

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ochrana venkovních vedení zemnicím lanem

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá schopností zemnicích lan chránit fázové vodiče před přímým úderem blesku. Odlišné geometrické uspořádání jednotlivých typů stožárů používaných na napěťových hladinách vvn a zvn způsobuje mezi nimi rozdíly v této ochranné schopnosti. V práci se nachází teoretický rozbor vzniku blesku a způsoby ochrany proti němu. V závěru práce je představen laboratorní experiment, kterým jsem porovnal jednotlivé typy stožárů v jejich ochranné schopnosti.

Klíčová slova

Atmosférické přepětí, vůdčí výboj, zemnicí lano, fázový vodič, nosný stožár, Donau, Portál, Soudek, SFR, SFFOR

Abstract

The master theses deals with the ability of grounding wires to protect phase conductors from direct lightning strike. The different geometric arrangement of the pylons used in HV levels causes differences in this protection capability. The thesis contains a theoretical analysis of the origin of lightning flash and methods of protection against it. At the end of the thesis, a laboratory experiment is presented, by which I compared individual types of pylons in their protective ability.

Key words

Atmospherical overvoltage, leader, grounding wire, phase conductor, suspension tower, Donau tower, Portal tower, Barrel tower, SFR, SFFOR

Prohlášení

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.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2020

Jan Nešpor

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a za pomoc při realizaci laboratorního měření. Rád bych také poděkoval zaměstnancům firmy ČEPS a.s. Ing. Radku Ovesnému a Petru Spurnému, DiS za poskytnutí nezbytných materiálů, bez kterých by tato diplomová práce nejspíš nevznikla.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1. ATMOSFÉRICKÉ PŘEPĚTÍ	10
1.1 MECHANISMUS BLESKU.....	11
1.2 TYPY BLESKŮ	16
1.3 BOUŘKOVÁ AKTIVITA NA VEDENÍ V432.....	18
2. OCHRANA PROTI PŘEPĚTÍ.....	20
2.1 ZEMNÍ LANO	20
2.2 SVODIČE PŘEPĚTÍ.....	22
2.2.1 <i>Bleskojistky</i>	23
2.2.2 <i>Omezovače přepětí</i>	25
2.2.3 <i>Transil, trisil</i>	27
2.3 KOORDINACE IZOLACE	29
3. STOŽÁRY VVN A ZVN V ČR.....	30
3.1 TYPY STOŽÁRŮ	31
3.2 ČÁSTI STOŽÁRŮ	32
3.3 ROZDĚLENÍ STOŽÁRŮ	33
3.3.1 <i>110 kV</i>	33
3.3.2 <i>220 kV</i>	34
3.3.3 <i>400 kV</i>	35
3.4 SFR, SFFOR	35
4. OVĚŘENÍ EFEKTIVNOSTI ZEMNÍHO LANA.....	40
4.1 MĚŘENÍ.....	40
4.1.1 <i>Vybavení laboratoře</i>	40
4.1.2 <i>Měřicí model</i>	42
4.1.3 <i>Měření pravděpodobnosti přeskočení</i>	45
4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	47
5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	54
ZÁVĚR.....	56
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	1

Úvod

Atmosférické výboje mohou v přenosové síti způsobit mnoho problémů. Například úder blesku do fázových vodičů venkovního vedení způsobí přepětíovou vlnu, která se po vedení šíří a narušuje jeho běžný provoz. Proto bylo vyvinuto několik způsobů ochrany proti bleskům. Hlavní ochranou proti úderům blesku do fázových vodičů jsou zemnicí lana, která jsou napnuta nad fázovými vodiči a tím je proti možným úderům stíní. Vzájemné umístění zemnicích lan a fázových vodičů je dáno typem použitého stožáru. Každý používaný typ má však odlišnou konstrukci, a tak se liší i ve schopnosti chránit fázový vodič zemnicími lany.

Ve své práci jsem se zaměřil na porovnání několika vybraných typů stožárů mezi sebou v této jejich ochranné schopnosti. Jednotlivé typy jsem mezi sebou porovnal pomocí výpočtů a následně pomocí laboratorního pokusu, během něhož byl nasimulován samotný úder blesku do vedení. Při porovnávání jednotlivých stožárů mezi sebou, jsem se nejvíce zaměřil na dvojici stožárů Donau 1962 a Dunaj 2012. Na tuto dvojici jsem se zaměřil především proto, že stožáry Donau 1962 jsou v současnosti nahrazovány stožáry Dunaj 2012 a bylo by tedy zajímavé zjistit, který ze stožárů vyjde v tomto porovnání lépe. V mé práci je také popsán vznik blesku a ostatní možnosti ochrany proti atmosférickému přepětí.

Seznam symbolů a zkratek

EUCLID	European Cooperation for Lightning Detection
CELD	Central European Lightning Detection Network
ZL	zemnicí lano
vvn	velmi vysoké napětí
zvn	zvlášť vysoké napětí
U_c	provozní napětí
SFR	Shielding Failure Rate
SFFOR	Shielding Failure Flashover Rate
r_c	úderová vzdálenost
S_g	vzdálenost mezi zemnicími lany
D_g	odhalená vzdálenost zemnicích lan
D_c	odhalená vzdálenost fázových vodičů

1. Atmosférické přepětí

V této kapitole nejprve stručně popíši způsoby, jak může docházet ke vzniku atmosférického přepětí na venkovním vedení. Poté budu popisovat samotný mechanismus vzniku blesku uvnitř mraku. Dále představím jednotlivé typy blesků a jejich charakteristické vlastnosti. Na závěr této kapitoly uvedu data o bleskové aktivitě na konkrétním vedení, které mi poskytla společnost ČEPS a.s.

Atmosférické přepětí může na venkovních vedeních vzniknout několika způsoby:

Nepřímým úderem do vodiče

Dojde k naindukování přepětí bleskem elektrostatickou a elektromagnetickou indukci. Toto naindukované přepětí se po vedení šíří rychlostí světla, stejně jako vlny s malým útlumem. Při vstupu tohoto přepětí do stanice může dojít k nebezpečné situaci.

Přímým úderem do vodiče

Od místa úderu se šíří přepětí vlna na obě strany. Tato vlna vysoce namáhá izolaci proti zemi. Její amplituda může dosáhnout až milionů voltů, což je více než rázová pevnost izolace přenosu pro napětí 400 kV. Navíc tato vlna postupující jedním fázovým vodičem indukuje přepětí i v sousedních fázových vodičích.

Přímým úderem do zemičího lana

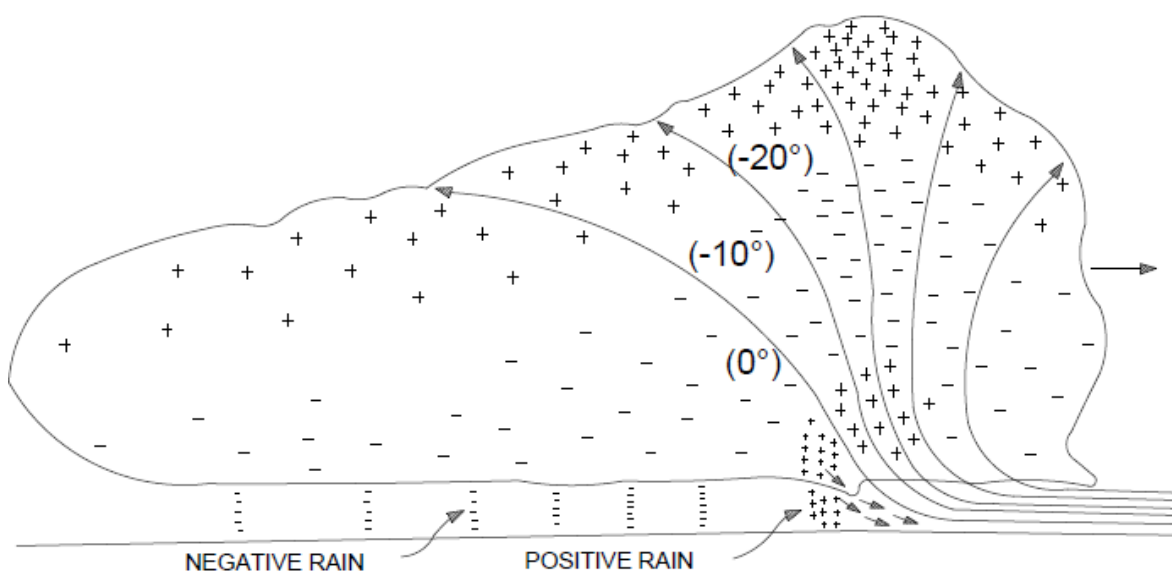
Pokud dojde k zasažení zemičího lana bleskem, dojde opět k šíření přepětí vlny na obě strany lana. Při tom se indukuje napětí na sousedních fázových vodičích. Ve chvíli, kdy dochází k postupu přepětí vlny po zemičím laně, vzniká mezi tímto lanem a fázovým vodičem rozdíl napětí. Pokud tento rozdíl napětí přesáhne hodnotu přeskokového napětí, může dojít mezi lanem a vodičem ke zpětnému přeskoku.

Přímým úderem do stožáru

Při úderu blesku do stožáru vzniká přepětí, které v tomto případě velmi závisí na parametrech samotného stožáru. Jedná se například o odpor uzemnění stožáru (v praxi do 10Ω), indukčnost a vlnovou impedanci. Záleží také na strmosti průběhu proudu blesku. Opět zde může dojít ke zpětnému přeskoku ze stožáru na fázový vodič [1].

1.1 Mechanismus blesku

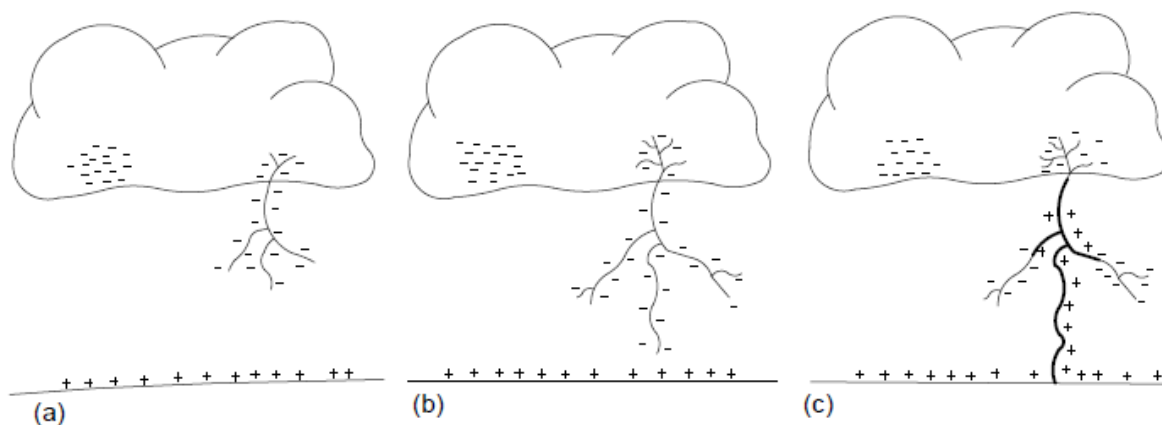
V této části budu popisovat poslední krok blesku, tedy okamžik při úderu. Budu popisovat vznik bouře a proces při, kterém začne docházet k úderům blesku směrem k zemi. Na obrázku 1 je zakresleno rozložení náboje uvnitř bouřkového mraku.



Obr. 1 Rozložení náboje v bouřkovém mraku

Spodní část mraku je negativně nabitá, horní část je nabitá pozitivně. Zároveň vznikají pozitivní náboje na povrchu země pod mrakem. Ve spodní části mraku mohou také vznikat malé pozitivně nabitě kapsy. Teplota uvnitř mraku může dosáhnout $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a vítr dosahuje rychlosti až 150 km/h . Průměrná výška výskytu bouřkových mraků je od 9 do 12 km . Základ mraku v nehornatém terénu je zhruba ve výšce 1500 m . Čím více začne docházet k oddělování náboje tím více se zvyšuje napětí mezi centry náboje. K bodu zlomu dojde ve chvíli zapálení oblouku. Předpokládá se, že toto zhroucení nebo zapálení oblouku se

objevuje mezi negativně nabitou oblastí a spodní kladně nabitou kapsou nebo vzniká z hlavního negativního a pozitivního náboje. Zároveň s touto událostí se zvyšuje napětí na okraji mraku a dochází k rozpadu vzduchu mezi mrakem a zemí. Následně vznikne stupňový výboj mířící k zemi.

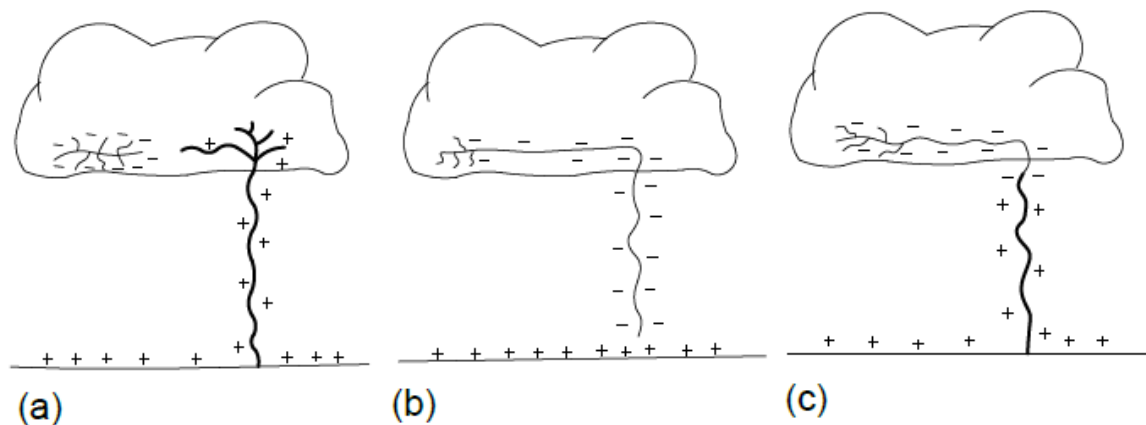


Obr. 2 První úder blesku

Obrázek 2 ilustruje obecný jev. Na obrázku a je zobrazen stupňovitý výboj mířící k zemi zastavený zhruba 50 m nad zemí. Po každém kroku se stupňovitý výboj pozastaví a poté pokračuje jednou nebo více cestami. Mezi každým krokem je časový rozestup kolem 50 μ s. To však platí pouze poblíž místa vzniku blesku na okraji mraku. Tento interval se postupem výboje k zemi snižuje až na 13 μ s. Rychlost stupňovitého výboje je relativně nízká, zhruba 0,10 % rychlosti světla. Není ovšem viditelný pouhým okem a proudová hodnota je od 50 do 200 A.

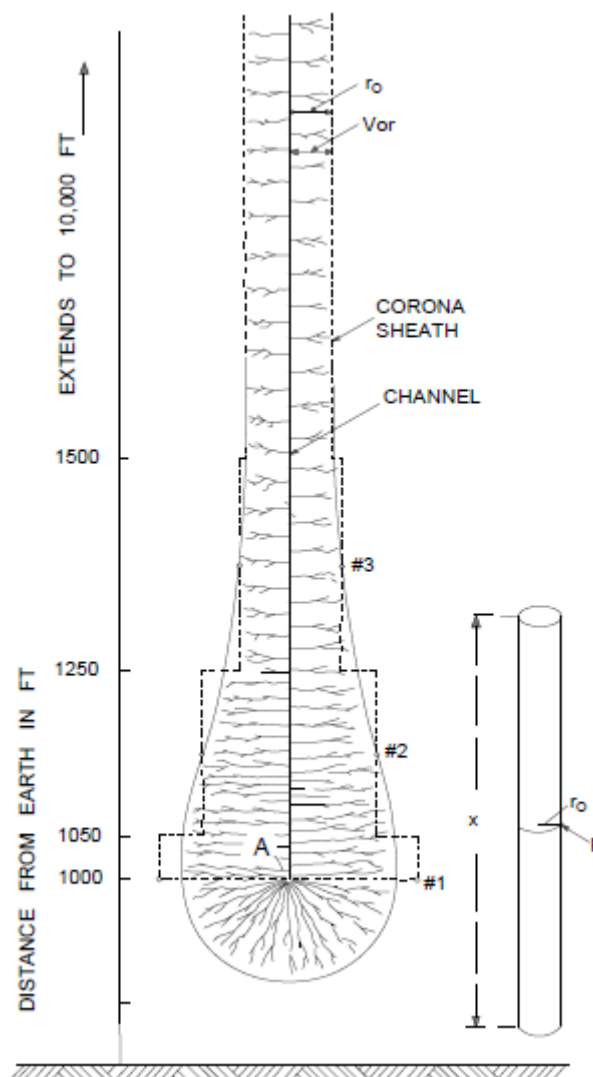
Na obrázku 2b je zobrazen stupňovitý, dolů směřující výboj přibližující se k zemi. Následně vzniká zpětný, nahoru směřující výboj, který se se spodním výbojem setká. Tento horní výboj poté putuje nahoru kanálem, směrem k mraku rychlostí mezi 10 až 30 % rychlosti světla, jak je ilustrováno na obrázku 2c. Tento jev je velmi dobře viditelný pouhým okem. Proud, který je tímto kanálem přiveden k zemi může dosáhnout až 200 kA, ale průměrná hodnota dosahuje kolem 33 kA. Zároveň teplota v tomto kanálu dosahuje téměř 28 000 °C, trojnásobek teploty na povrchu slunce. Prudké zvýšení teploty způsobí rázovou vlnu, kterou známe jako hrom. Celková délka dolů směřujícího výboje a kanálu, kterým putuje výboj zpět k mraku je mezi 5 a 6 km.

V horní části je popsán mechanismus prvního úderu blesku. Blesk se však může skládat až z 50 takových úderů. Průměrně se, ale každý blesk skládá asi ze tří úderů. Často může být viděn vícenásobný úder blesku. Tyto znatelné pulzace blesku jsou způsobeny právě následnými údery blesku. Tyto pulzace lze snadno počítat. Obrázek 3 popisuje tento mechanismus. V čase mezi 10 až 100 ms od vzniku prvního úderu vzniká druhý výboj, známý jako špičkový. Tento výboj směřuje opět přímo dolů k zemi, jak je zobrazeno na obrázku 3b. K tomu, aby mohlo dojít k tomuto dalšímu zažehnutí výboje, musí být nejprve vybita další část náboje v mraku. Tento špičkový výboj, jak již jeho název napovídá, nemá žádné výrazné kroky, ale pokračuje přímo k zemi. Dosahuje rychlosti až 1 % rychlosti světla. Je tedy mnohem rychlejší než stupňovitý výboj. To je způsobeno tím, že na rozdíl od stupňovitého výboje, prochází ionizovaným vzduchem, který vznikl právě při vzniku stupňovitého výboje. Jak se čelo špičkového výboje blíží k zemi, opět se vytvoří nahoru směřující výboj. Když se oba výboje setkají, dojde opět k vybití náboje do země. Tentokrát však má proud hodnotu pouze 40 % prvotního úderu. V mraku mohou být další centra náboje, která sešlou další špičkové výboje směrem k zemi. Ty způsobí další úder blesku a celý děj se může opakovat.



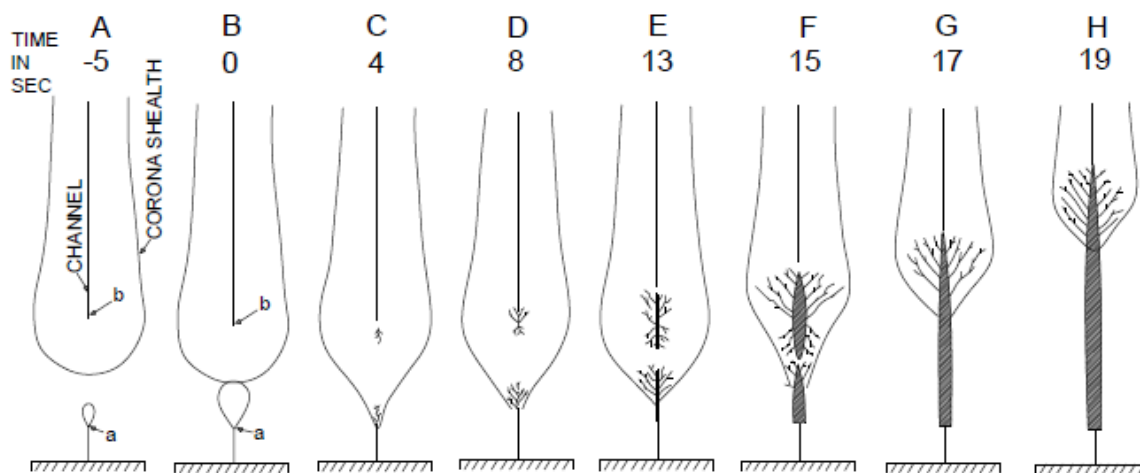
Obr. 3 Druhý úder blesku

Abychom více pochopili mechanismus prvního úderu, blíže prozkoumáme stupňovitý dolů směřující výboj. Jak je zobrazeno na obr. 4, dolů směřující výboj se skládá ze dvou částí. Tenké vysoce vodivé jádro, také nazýváno jako kanál, a negativní okolní náboj, který tento kanál obklopuje. Průměr kanálu jsou zhruba 2 mm a jeho napěťový pokles je až 50 kV/m. Náboj z mraku se snižuje postupem výboje a v prostoru je rozložen příčně pomocí paprsků koróny.



Obr. 4 Dolů směřující výboj

Obrázek 4 zobrazuje dolů směřující vůdčí výboj v okamžiku kroku, kdy náboj v okolí dosáhne maxima a výboj je připraven k dalšímu kroku. Potenciál výboje v obrázku 4 je zhruba 50 000 kV. Krokový proces se skládá z rychlého rozšíření kanálu zhruba na úroveň paprsků koróny. V ten okamžik se vůdčí výboj zastaví, korona kolem něj expanduje a dojde k dalšímu kroku. Tento proces vzniká v mraku, kde je interval kroku asi 50 μs . To platí, dokud se vůdčí výboj nepřiblíží k zemi, poté se interval zkrátí na 13 μs , i méně. Pro zjednodušení uvažujeme, že vůdčí výboj blížící se k zemi se zde pohybuje konstantní rychlostí.



Obr. 5 Fáze vývoje dolů mřícího kanálu

Obrázek 5 ilustruje důležité fáze posledního kroku vůdčího výboje. Jak se výboj blíží k zemi přemění se ve vysokorychlostní, vysokonapěťový zpětný úder. Předpokládejme, že potenciál vůdčího výboje je 50 000 kV a blíží se k zemi rychlostí 0,5 m/ μ s. Vůdčí výboj je zde zobrazen, jak se přibližuje k 30 m vysokému stožáru. V bodě A vznikne na stožáru korónový výboj, který má kladnou polaritu. Vzdálenost mezi vrcholem stožáru „a“ a špicí vůdčího výboje „b“ je 80 m. V bodě B putuje vůdčí výboj dalších 1,5 m směrem dolů, to způsobí setkání obálky koróny vyzařované ze stožáru a koróny obklopující vůdčí výboj. V bodě B, tedy v čase 0, je dosažen tzv. „rozišovací bod“ a vůdčí výboj se zde „rozhodne“, zda spíše udeří do vrcholu stožáru než do země. Toto bylo zjištěno z laboratorního měření přeskokové vzdálenosti, kde byl určen přeskový spád 605 kV/m. Pokud tedy uvažujeme potenciál vůdčího výboje 50 000 kV, vyjde nám kritická hodnota 80 m. Právě v této vzdálenosti je možné sledovat fenomén posledního kroku. Tato kritická vzdálenost se nazývá „úderová vzdálenost“. V bodě C, v čase 4 μ s, se kanály jdoucí z vůdčího výboje a zpětného výboje z vrcholu stožáru zvětšují. V bodech D a E, v čase 8-13 μ s, jsou zobrazeny oba kanály, jak se k sobě postupně přibližují se stále rostoucí rychlostí. Zároveň oběma kanálům stále roste hodnota proudu. V bodě F, v čase 15 μ s, dojde k setkání obou kanálů a k dosažení maximální hodnoty proudu. V bodech G a H, v čase 17-19 μ s, je zobrazen již sjednocený kanál pokračující v pohybu směrem vzhůru. Zajímavostí zde je, že proud obsažený v kanálech je tvořen především nábojem korónových paprsků vůdčího výboje, a ne nábojem samotného mraku.

V předešlém odstavci jsem přirovnal vybíjecí proces k měření výbojové vzdálenosti v laboratoři. Při laboratorním měření neustále zvyšujeme napětí, dokud nedojde k přeskoku mezi jednotlivými elektrodami. Ovšem při úderu blesku je napětí konstantní a veličina, která se zde mění je vzdálenost [2].

1.2 Typy blesků

V předchozí kapitole je popsán zjednodušený poslední krok prvního úderu blesku a jedná se o negativní spodní úder blesku. Nicméně celkem existují 4 typy blesků. Tyto 4 typy jsou popsány v obrázku 6. Pojmenování každého typu je spojeno s polaritou náboje v mraku odkud je blesk zažehnut. Zároveň označení polarity v pojmenování také vyjadřuje polaritu výsledného proudu zemí.

První typ blesku, negativní spodní, je nejčastějším typem blesku mířícím přímo do země a do zařízení nacházejících se ve střední výšce, zhruba do 100 m. Jedná se o 85 až 95 % veškerých blesků mířících do těchto zařízení. Střední hodnota proudu těchto blesků se udává 33 kA.



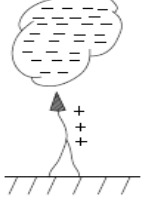
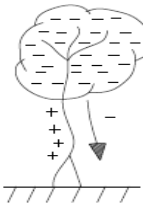
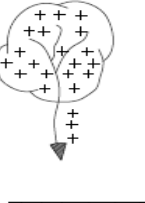

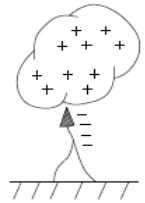

Negativní horní blesk byl poprvé pozorován na Empire State Building v New Yorku. Tento typ blesků je nejčastější pro vysoké stavby. Vědec Karl Berger uskutečnil měření, během něhož byly na hoře San Salvatore ve Švýcarsku umístěny 80 m vysoké stožáry, které byly za 11 let zasaženy celkem 1196 blesky. Z celkového množství blesků, které zasáhly stožáry, bylo 75 % typu negativní horní, a pouze 11 %, tedy 125, bylo negativní spodní blesky. Zbylé blesky byly klasifikovány jako pozitivní horní blesky. Negativní horní blesk má střední hodnotu proudu méně než 25 kA.

Třetím typem blesku je pozitivní horní blesk, také označován jako tzv. „Super blesk“. Proudová velikost těchto blesků bývá 1,2 až 2,2krát vyšší než u negativních spodních blesků. Jejich akční integrál, což je integrál kvadrátu proudu v závislosti na čase, je výrazně větší než u negativních spodních blesků. Pozitivní blesky mají převážně pouze jeden úder v průběhu záblesku a také se převážně vyskytují na začátcích nebo na koncích bouřek. Typicky se vyskytují v bouřkách nad oceánem, ale samozřejmě objevují se i výjimky.

Například při bouřce 19. května 2018 byl na našem území, pomocí systému EUCLID na zaznamenávání úderů blesků, zaznamenán pozitivní blesk s amplitudou 593 kA a necelé dvě minuty nato byl na stejném úseku zaznamenán další pozitivní blesk, tentokrát s amplitudou 302 kA. Odhaduje se, že z celkového počtu blesků je pouze 2 až 10 % s pozitivní polaritou.

U pozitivního spodního blesku doposud neexistuje potřebné množství dat, které by jeho existenci dokumentovalo. Například v [10] autor analyzuje pozitivní spodní blesk, ovšem v následných analýzách již popisuje tento typ blesku jako pozitivní horní. Tím pádem pozitivní blesk může být považován za horní či spodní. Zatím neexistuje zřejmé rozdělení těchto dvou typů.

Závěrem tedy lze říct, že zhruba 85 až 95 % blesků jsou blesky negativní spodní. Zbýlých 5 až 15 % jsou blesky horní negativní nebo pozitivní [2].

První úder	Zpětný úder	Název	Poznámka
		Negativní spodní	"Normální" blesk, 85-90%. Průměrná hodnota 33kA.
		Negativní horní	Poprvé pozorován na Empire State Building. Proud má menší hodnotu než u negativního
		Pozitivní horní	"Super blesk", oběhuje se v zimě na začátku a na konci bouřky. Proud je 1.2 až 2.2krát vyšší než u negativního spodního.
		Pozitivní spodní	Bergrem nebyl zaznamenán. Těžko se rozpoznává od pozitivního horního.

Obr. 6 Typy blesků

1.3 Bouřková aktivita na vedení V432

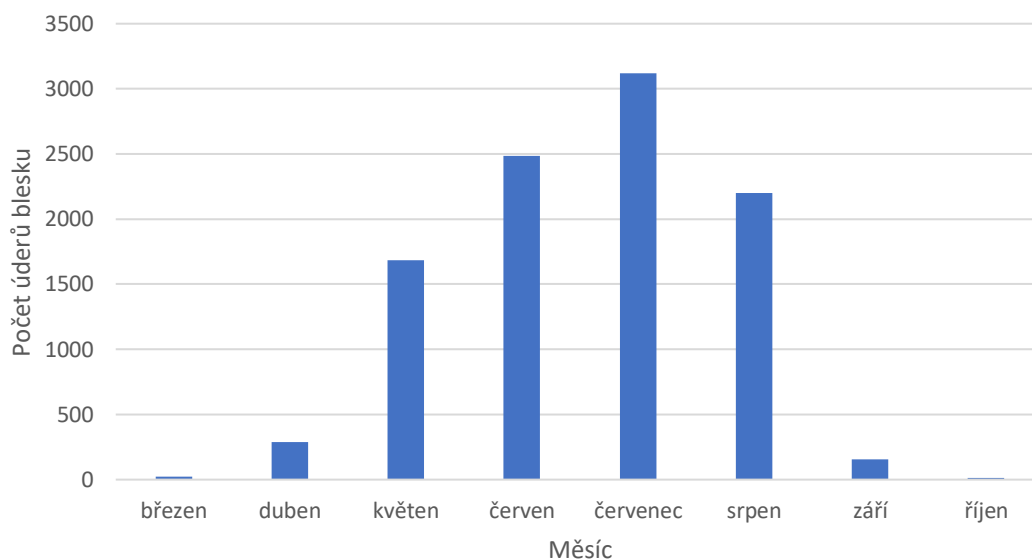
Od společnosti ČEPS a.s. jsem obdržel data o úderech blesků, které byly zaznamenány poblíž určitého venkovního vedení. Jedná se o jednoduché vedení 400 kV V432, které je vystavěno na trase Přeštice-Kočín a je dlouhé celkem 116 km. Data, která mi byla poskytnuta obsahují záznamy o úderech za roky 2012 až 2018. Celkem je to téměř 10 000 záznamů úderů. Jedná se o blesky, které udeřily do 1 km od osy vedení a byly zaznamenány pomocí programu EUCLID. Program EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection) je síť skládající se v současnosti ze 147 měřících stanic, které registrují údery blesků ve svém okolí. Data z ČR jsou zaznamenávána regionální soustavou CELD (Central European Lightning Detecion Network). A vyhodnocována jsou společností Siemens. Společnost ČEPS a.s. tato data nakupuje a dále zpracovává pro vlastní potřebu. Především využívá program EUCLID pro určování, zda blesk, který jím byl zaznamenán udeřil do fázových vodičů vedení, či do jiného zařízení vedení.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
březen	10	0	0	2	0	12	0
duben	7	46	83	33	78	13	27
květen	82	227	124	51	199	181	818
červen	176	92	24	405	981	447	362
červenec	901	332	459	393	257	293	483
srpen	519	563	128	114	169	487	221
září	1	1	116	9	20	0	10
říjen	0	15	0	0	0	0	0

Tab. 1 Počet blesků za jednotlivé měsíce

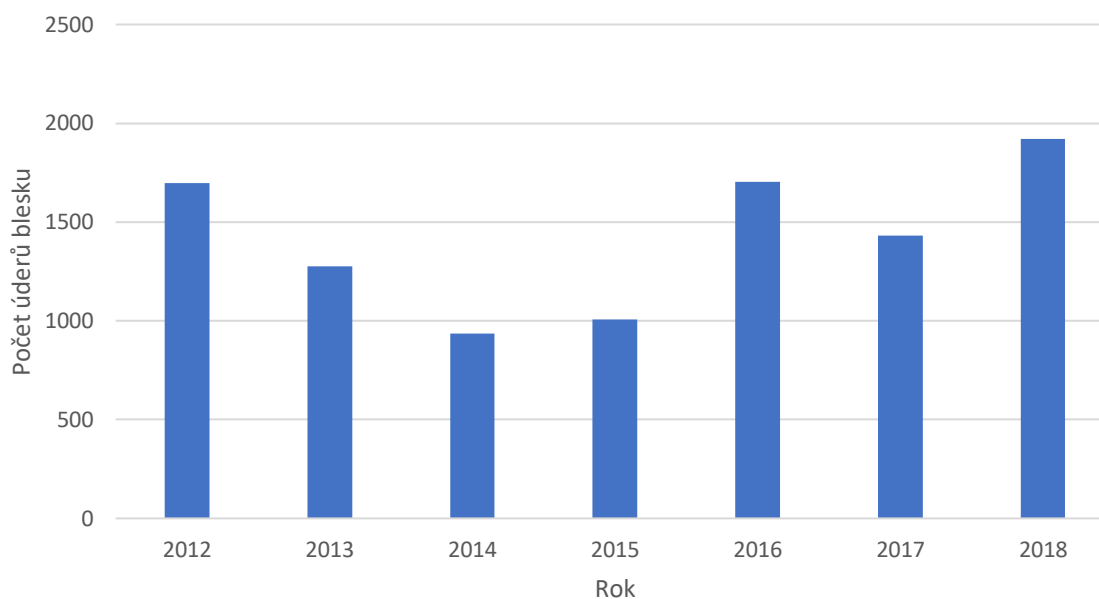
V tabulce 1 je popsán počet úderů blesku u vedení za jednotlivé měsíce. Data jsou pořizena pouze z měsíců březen až říjen. V zimních měsících jsou bouřky pouze ojedinělé a dosti vzácné. Už z této tabulky je vidět, že blesky se nejčastěji vyskytují v letních měsících. V těchto měsících, tedy v červnu, červenci a srpnu, bylo registrováno téměř 80 % z celkového počtu zaznamenaných úderů blesku. To lze snadno odůvodnit tím, že nejvíce bouřek se u nás tvoří právě v těchto letních měsících. V grafu 1 je zobrazena závislost počtu úderů blesku na jednotlivých měsících. Je z něho opět patrná převaha bouřkové aktivity v letním období. V červenci, který byl na bouřková aktivita nejčastější, bylo zaznamenáno 3 118 úderů. V červnu to bylo 2 487 a v srpnu podobných 2 201. Ze zbývajících měsíců byl ještě velmi častý výskyt úderů blesku v květnu, 1 682 úderů. V ostatních měsících se jednalo

pouze o ojedinělé bouřkové dny. V dubnu bylo za těchto sedm let zaznamenáno pouze 287 a v září 157, z toho v roce 2017 nebyl v září zaznamenán žádný. V březnu byl úder blesku zaznamenán pouze v letech 2012, 2015 a 2017. Celkem se jednalo pouze o 24 úderů. A v říjnu byly údery blesku zaznamenány pouze v roce 2013, bylo jich 15.



Graf 1 Počet blesků za jednotlivé měsíce

V grafu 2 jsou zobrazeny počty úderů blesku za jednotlivé roky. Z grafu je patrné, že v roce 2018 bylo úderů blesku nejvíce, celkem 1 921. V letech 2016 a 2012 byla situace velmi podobná, 1 704 a 1 696. Roky s nejmenším počtem úderů jsou podle grafu roky 2014 a 2015. V roce 2014 bylo zaznamenáno pouze 934 a v roce 2015 1 007. V obou letech dohromady bylo stejně úderů blesku jako za rok 2018. Ovšem je tu jeden faktor, který nám napovídá proč bylo v roce 2018 zaznamenáno tolik úderů blesku. V roce 2018 bylo zaznamenáno v oblasti jižních Čech celkem 97 dní s teplotou vyšší než 25 °C [3], z toho 27 dní teplota překročila 30 °C. To je značný rozdíl právě oproti roku 2014, kdy bylo zjištěno pouze 50 dní s překročenou teplotou 25 °C. A jen v 10 dnech překročila teplota hranici 30 °C [4]. Tato skutečnost odpovídá teoretickému předpokladu, že počet bouřkových dnů má přímou souvislost s počtem letních a tropických dnů.



Graf 2 Počet blesků za jednotlivé roky

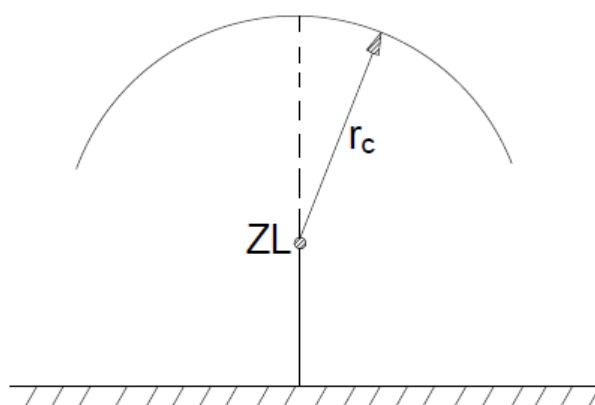
2. Ochrana proti přepětí

K přepětím, která zatěžují elektroenergetickou soustavu, může docházet několika způsoby. Může k nim dojít například působením vnějších vlivů. Do této kategorie patří atmosférické přepětí. Nebo k nim dojde působením vnitřních vlivů. Sem spadá tzv. spínací přepětí. Ať už se však jedná o přepětí způsobené vnějšími či vnitřními vlivy, snažíme se jej potlačit nebo alespoň zmírnit jeho důsledky. Přepětí může totiž způsobit mnoho nepříznivých stavů. Může například dojít k neplánovaným výpadkům dodávek elektrické energie či k poškození rozvodných zařízení. Motivy k jeho potlačení jsou tedy jak charakteru ekonomického, tak technického. Mezi opatření k zamezení účinků přepětí patří především ochrana objektů před přímým úderem blesku a správná volba svodičů přepětí [5].

2.1 Zemnicí lano

Nejnebezpečnějším jevem, který vzniká při atmosférickém přepětí na venkovních vedeních je zcela jistě přímý úder blesku do fázových vodičů. Hlavním způsobem, jak tomuto zabránit, je použití zemnicích lan. Tato lana jsou v praxi umístěna nad fázovými vodiči a jsou na vybraných místech vedení uzemněna. V České republice se zemnicí lana používají pro vedení v napěťové hladině 110 kV, 220 kV a 400 kV. U některých sítích vysokého napětí, 22 kV a 35 kV, se používají tzv. výběhová lana. Tato lana se umísťují hned za

rozvodnu a pokračují nanejvýše několik kilometrů. Přičemž pro 110 kV se používá jedno nebo dvě zemnicí lana a pro vedení s napětím 400 kV se používají vždy dvě. Co se týče hladiny 220 kV, používá se opět jedno nebo dvě lana. Záleží na typu stožáru, kde je vedení napnuto. Volba umístění zemnicího lana vychází z teorie o ochranném prostoru. Hranice tohoto ochranného prostoru je zde zobrazována jako kružnice se středem v místě, kde je zemnicí lano. Vzdálenost mezi středem a okrajem kružnice se nazývá úderová vzdálenost a na obrázku 7 je značena jako r_c .



Obr. 7 Úderová vzdálenost zemnicího lana

Určení této vzdálenosti se liší v několika zdrojích. Například v [6] je uveden vztah:

$$r_c = 14,2 \cdot I^{0,42} \quad (1)$$

Dalším příkladem však může být také vztah z [7]:

$$r_c = 6,7 \cdot I^{0,8} \quad (2)$$

A nebo také vztah v [8], který má tvar:

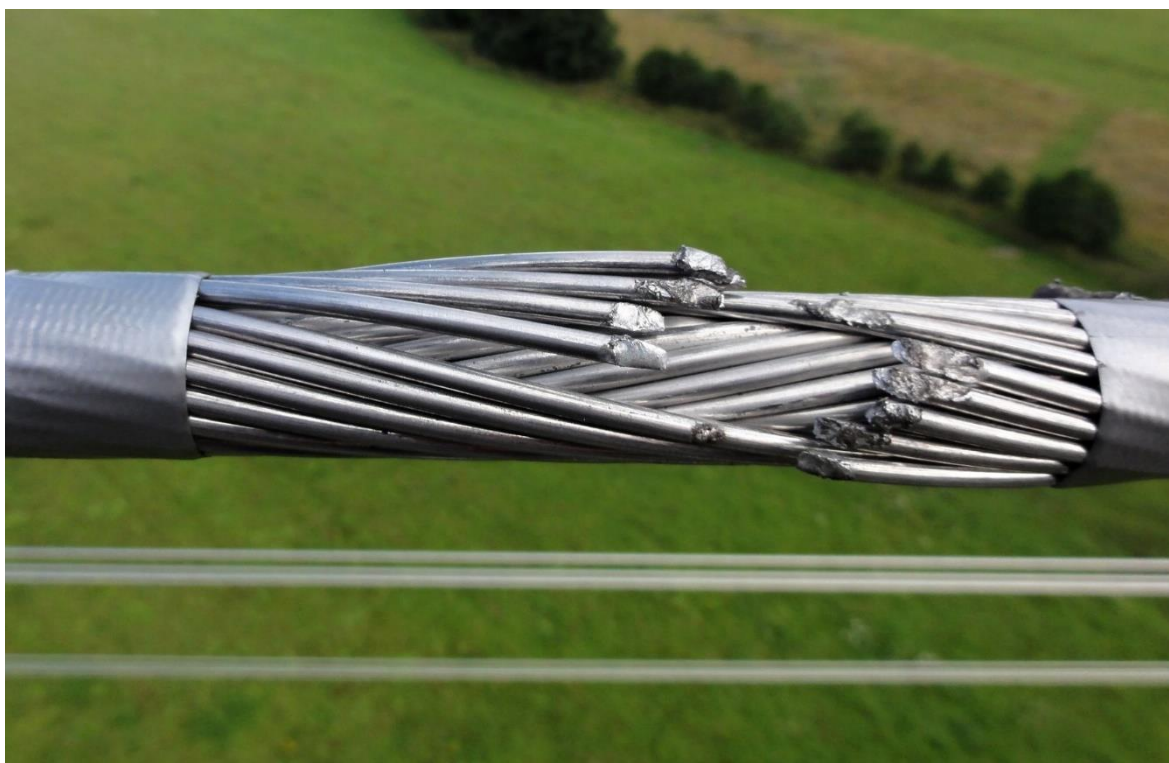
$$r_c = 7,1 \cdot I^{0,75} \quad (3)$$

Nejvíce používaným vztahem je však standard skupiny IEEE-1992 [9]:

$$r_c = 10 \cdot I^{0,65} \quad (4)$$

Zemnicí lano je však stále pouze základním prvkem ochrany venkovních vedení před atmosférickým přepětím. Napětí a proud vyvolaný v zemnicím laně přímým úderem blesku naindukuje napětí také ve fázových vodičích. Je tedy třeba použít i jiné typy ochrany před přepětím, především svodiče přepětí.

Zároveň s napěťovým namáháním soustavy má blesk také negativní mechanické účinky. Po přímém úderu do lana může dojít za jistých podmínek k natavení nebo i přetržení samotného lana. Na obrázku 8 je zobrazeno poškozené zemnicí lano. Tuto fotografii mi poskytla společnost ČEPS a.s. ČEPS a.s. vlastní, provozuje a také udržuje vedení přenosové soustavy, organizuje tedy i veškeré opravy.



Obr. 8 Poškozené zemnicí lano

2.2 Svodiče přepětí

Jedná se o zařízení, která chrání citlivé systémy sítě či rozvodů před vyšším napětím než dovoleným. Nejjednodušším svodičem přepětí je samotné ochranné jiskřiště. Používá se v kombinaci s izolátory, ke kterým se připojí paralelně. Princip, který využívají spočívá v posunutí průrazné dráhy vzduchu od povrchu izolátoru. Izolátor je takto ochráněn před tepelnými účinky zkratu. Svodiče mohou být různých konstrukcí a s rozdílnými

vlastnostmi, ale všechny mají jeden společný znak, pracují na stejném principu jako jednoduché jiskřiště. S rostoucím napětím se jejich impedance mění. Během normálního stavu je elektrická pevnost vzduchu mnohem větší než velikost elektrického pole mezi hroty jiskřiště. K proražení vzduchu dojde až ve chvíli, kdy je tato průrazná pevnost překonána. Svodič je připojen k chráněnému zařízení paralelně. Při přepětí tedy dojde k jeho zachycení svodičem a ten jej svede do země. Pro snížení následných proudů se svodiče zpravidla uzemňují přes odpor.

2.2.1 Bleskojistky

Jsou to nejspíše nejúčinnější zařízení na ochranu proti atmosférickým přepětím. A to kvůli jejich schopnosti automaticky zhasit oblouk vyvolaný následnými proudy. Odpor bleskojistky má být proměnný. Při vysokém napětí malý, naopak při nízkém napětí vysoký.

2.2.1.1 Ventilová bleskojistka

Ventilové bleskojistky pro vysoké napětí, které jsou určeny na nepříliš vysoká jmenovitá napětí jsou tvořeny jedním dílem. Ty bleskojistky, které jsou určeny pro vyšší jmenovitá napětí se skládají z více stejných dílů, které jsou uloženy v sérii. Každý z těchto dílů je tvořen sériovým jiskřištěm a nelineárním odporem.

Sériové jiskřiště je složeno z několika menších jiskřišť spojených do série. Ty jsou vzduchově uzavřeny v porcelánovém válci, který je naplněn nejčastěji suchým vzduchem. Tímto způsobem je jiskřiště ochráněno před korozi a nemění se zapalovací napětí. Menší dílčí jiskřiště se skládají z kovových kotoučů, které jsou od sebe vzdáleny desetinými milimetry. Zároveň jsou vhodně předionizovány. To umožňuje bleskojistce správně působit i v případech, kdy je napěťová vlna velmi strmá. To, že jsou dílčí jiskřiště předionizovány má také za následek malý rozptyl v rázovém zapalovacím napětí. Této předionizace se dá dosáhnout např. upravením vzduchové mezery mezi keramickými vložkami, které mají velkou permitivitu a kovovými elektrodami. Ty mají asi poloviční zapalovací napětí oproti dílčím jiskřištím. Výhodami sériového řazení dílčích jiskřišť je např. účinné chlazení a deionizace oblouku.

Nelineární odpory se skládají z několika bloků, které mají válcový tvar a čelní plochy jsou pokovené. Nejčastěji používanými materiály jsou siliciumkarbid a oxid zinečnatý. Poté co

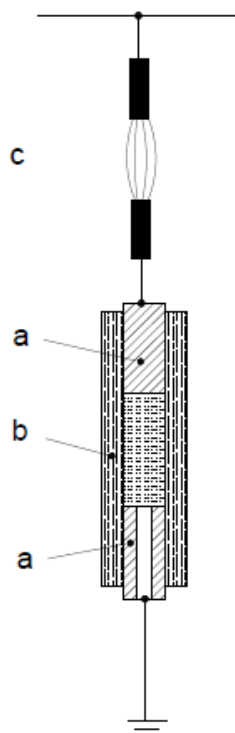
dojde k zapálení bleskojistky odpor se natolik zmenší, že nedovolí překročení zapalovacího napětí a omezí tím napětí na objektu, který je chráněn. Sériový odpor má tři hlavní úkoly:

1. Během doby, kdy bleskojistka působí, udržuje na jejích svorkách konstantní napětí. Nevzniká tak náhlý pokles napětí, jako je tomu u vyfukovacích bleskojistek.
2. Po pominutí přepětí, stoupá odpor, aby byl omezen následný proud. Nevznikne tak zkrat ani proudový ráz.
3. Protože je následný proud omezen, dojde k jeho uhašení v první půlperiodě, tedy při průchodu proudu nulou.

Pro ventilové bleskojistky s jmenovitým napětím větším než 110 kV se přidává ochranný kruh. Pomocí tohoto kruhu je zajištěno rovnoměrné rozložení napětí na díly, které bleskojistky tvoří. Zároveň se tím zabránuje příliš nízké hodnotě rázového zapalovacího napětí. Rázové proudy, které jsou z vedení bleskojistikami odváděny, jsou zhruba desetinové oproti proudům v bleskovém kanálu. Nejvyšší pozorovaná hodnota proudu tekoucího bleskojistikami je 20 kA. Dříve se ventilové bleskojistky používali především k ochraně před atmosférickým přepětím. Je však ověřeno, že uspokojivě zvládnou i spínací přepětí [1].

2.2.1.2 Vyfukovací bleskojistka

Vyfukovací bleskojistka je v podstatě tvořena jiskřištěm (a) uzavřeným v trubici ze speciální směsi fibru nebo pryže (b) a tyčovým jiskřištěm (c). Obě tato jiskřiště jsou v sérii. Při vzniku oblouku dojde k odpaření tenké vrstvičky trubice. Vzniklý plyn je složen z materiálu trubice a neionizovanou vodní párou. Tento plyn vyžene z trubice ionizovaný vzduch, takže když následný proud prochází nulou, dojde k jeho uhašení. Řez vyfukovací bleskojistikou je zobrazen na obrázku 9.

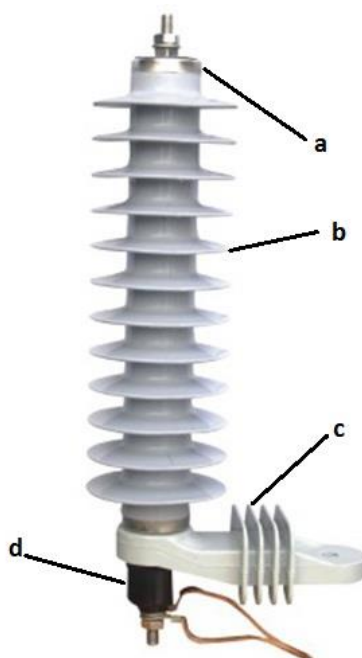


Obr. 9 Řez vyfukovací bleskojistkou [1]

Následný proud může na rozdíl od ventilové bleskojistky nabýt mnohem větších hodnot, až několik kA. Potom co dojde k zapálení, poklesne napětí na nízkou hodnotu. To je dáno úbytkem oblouku v trubici. Ochranná hladina bleskojistky je vlastně dána zapalovacím napětím [1].

2.2.2 Omezovače přepětí

Jedná se zřejmě o nejspolehlivější přepět'ovou ochranu současnosti. Je velmi hojně využívána ve všech distribučních systémech. Hlavními složkami, které tvoří samotný omezovač přepětí jsou nelineární odpory, varistory. Materiál, který tvoří jednotlivé bloky je spečená směs prášků. Mezi nimi má největší zastoupení, až 90 %, oxid zinečnatý, ZnO. Zbytek tvoří další oxidy. Tento materiál má schopnost omezit následný proud po odeznění přepětí, které zasáhlo postižené zařízení. Na obrázku 10 je znázorněn omezovač přepětí pro jmenovité napětí 21 kV. Na špičce omezovače (a) se nachází ochranný kryt. Pod polymerovým pláštěm (b) jsou uloženy varistorové bloky ze ZnO. Ve spodní části omezovače je umístěna konzole (c) a odpojovač (d).



Obr. 10 Omezovač přepětí 21 kV [12]

Odporové bloky tvořící omezovač přepětí jsou kromě napětí také velmi závislé na teplotě. Při návrhu omezovače je nutné toto vzít v potaz. V případě, že je na omezovači zvýšené napětí, sníží se jeho odpor. To způsobí zvýšený tok proudu. Když proud prochází odporovým článkem zvyšuje se jeho teplota a jeho vnitřní odpor se opět mění. Pokud toto teplo není dostatečně efektivně odváděno, může dojít k nevratnému poškození omezovače. Výhodou varistorů oproti ostatním svodičům přepětí je jejich schopnost reagovat téměř okamžitě na změnu napětí. Také nevytvářejí žádné následné proudy, protože na napěťové impulsy reagují spojitě.

Charakteristické parametry omezovačů přepětí:

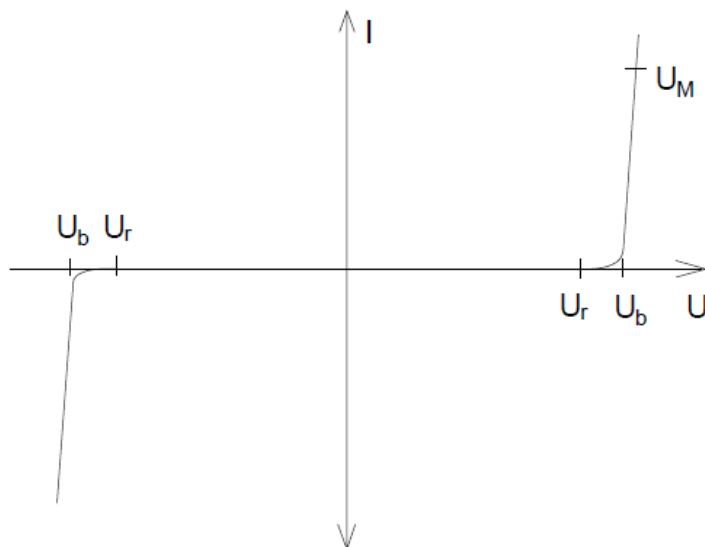
1. **Charakteristická napětí 50 Hz** – Jako nejdůležitější základní parametr, který se u omezovačů udává je maximální trvalé provozní napětí U_c . Toto napětí je popsáno jako nejvyšší přípustné 50 Hz napětí, jaké se natrvalo vyskytuje na svorkách omezovače, aniž by narušovalo jeho samotnou funkci i v případě vzniku přepětí. Zároveň s trvalým provozním napětím U_c je brán jako rovnocenný parametr jmenovité napětí na omezovači, označované v literatuře jako U_r . Je to napětí, které se může na omezovači vyskytovat po definovanou dobu. Poměr mezi těmito dvěma hodnotami se uvádí nejčastěji jako $U_c/U_r = 0,8$.

2. **Zbytkové napětí při impulsech proudu atmosférických přepětí** – Při nejrůznějších typech přepětí, vznikají proudové impulsy, kterým na omezovačích odpovídají zbytková napětí. U atmosférických přepětí rozlišujeme tyto tři druhy proudového impulsu. **8/20 μ s** jsou impulsy, které přicházejí do stanice z venkovních vedení. Nejčastější hodnoty amplitud jsou 5-10 kA. **4/10 μ s** odpovídá úderu blesku velmi blízko omezovače. Jsou zde velmi vysoké amplitudy proudů, až 100 kA. **1/20 μ s** jedná se o proud blesku s velikou strmostí náběžné hrany. Obvyklá hodnota amplitudy je 10 kA.

3. **Zbytková napětí při impulsech proudu spínacích přepětí** – U spínacích přepětí rozlišujeme dva tvary impulsů proudu. První je impuls 30-100/60-200 μ s. Tento proudový impuls provázejí nebezpečná spínací přepětí. Mezi ně lze zařadit například spínání vedení naprázdno. Hodnota amplitudy se zde pohybuje maximálně mezi 3-5 kA. Druhým typem jsou dlouhé impulsy, jejichž amplituda trvá mezi 500-3000 μ s. Tyto impulsy vyjadřují namáhání, které vytváří spínací přepětí vzniklé na dlouhých úsecích vedení. Amplituda je zde omezena jmenovitým napětím omezovače. Doba čela zde není významná, poněvadž je relativně krátká [11].

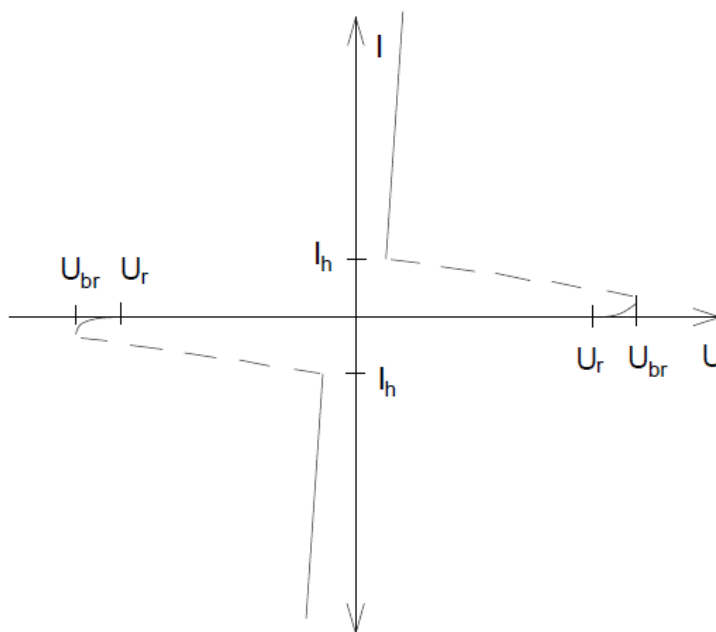
2.2.3 Transil, trisil

Pro ochranu elektronických součástek se používají menší zařízení, než jsou bleskojistky nebo omezovače přepětí. Jsou to například transily a trisily. Transil je založen na stejném principu jako Zenerova dioda. Zenerovy diody se používali jako ochrany již dříve, nemají však tak vysokou proudovou zatížitelnost. Z tohoto důvodu byly vyvinuty speciální lavinové diody, vyrobeny z křemíku. Ty jsou schopny především pohltit více energie přepětěového impulsu než právě Zenerovy diody, zároveň také reagují rychleji. Na obrázku 11 je zobrazena VA charakteristika transilu, ta je velice podobná VA charakteristice varistoru. Dokud napětí na součástce nepřekročí hodnotu U_b , nevede transil téměř žádný proud. Po překročení této hranice se transil otevře a svede proud vyvolaný přepětěovou poruchou.



Obr. 11 VA charakteristika transilu

Podobně jako je VA charakteristika transilu, zobrazena na obrázku 11, podobná té varistoru, VA charakteristika trisilu se podobá triaku. Po překročení napětí U_{br} dojde ke skokové změně napětí a zároveň velice rychle vzroste proud součástkou. Pokud však hodnota proudu poklesne pod hodnotu I_h , vrátí se trisil do svého blokovacího stavu. Stejně jako u transilu, je velkou výhodou použití trisilu jeho rychlost. K jejich aktivaci dojde zhruba 10-100 ps od průchodu rázové vlny [13].



Obr. 12 VA charakteristika trisilu

2.3 Koordinace izolace

Koordinací izolace se rozumí správná volba elektrické pevnosti zařízení. Tato elektrická pevnost zařízení se volí s ohledem na napětí, které se může na zařízení vyskytovat. Zároveň se přihlíží k charakteristikám svodičů přepětí a to tak, abychom zredukovali pravděpodobnost poruchy na přípustnou mez. Izolaci na zařízeních je nutné správně nadimenzovat a ověřit její odolnost správně volenými zkouškami elektrického namáhání. Mezi tato namáhání patří: namáhání jmenovitým napětím, dočasným přepětím, spínacím přepětím a atmosférickým přepětím. Namáhání izolace jmenovitým napětím a dočasným přepětím se provádí dielektrickými zkouškami při frekvenci 50 Hz. Při namáhání izolace pomocí spínacího přepětí se provádí pro zařízení se jmenovitým napětím nad 300 kV zkouška spínací vlnou a pro zařízení určená pro menší napětí než 300 kV se používá minutová zkouška. Při testování izolace proti atmosférickému přepětí, namáháme izolaci rázovou vlnou.

Statistická metoda

Pro zajištění přesného postupu je nutné mít zjištěné rozložení četnosti spínacích a atmosférických přepětí a rozložení elektrické pevnosti izolace pro tyto typy přepětí. Využití v praxi spočívá ve zvolení dvou reprezentativních bodů na obou rozloženích. Na rozložení elektrické pevnosti se zvolený bod nazývá statistické výdržné napětí. Na rozložení spínacích a atmosférických přepětí se daný bod nazývá statistické přepětí. Statistické výdržné napětí se volí tak, aby se nacházelo nad statistickým přepětím. To, jak vysoko nad statistickým přepětím se statistické výdržné napětí nachází, vyjadřuje statistický bezpečnostní činitel. Tento činitel odpovídá v určité situaci určité pravděpodobnosti poruchy. Pravděpodobnost poruchy musí být samozřejmě přijatelná jak z praktického, tak z ekonomického hlediska.

Statistické výdržné napětí je možné získat statistickým zpracováním výsledků z napěťových zkoušek. Jedná se o napětí, které musí izolace vydržet, samozřejmě s dohodnutou pravděpodobností. Statistické výdržné napětí musí být vyšší než jmenovité výdržné napětí, nebo se mu musí alespoň rovnat. Jmenovité výdržné napětí v systému určuje izolační hladinu zařízení, prověřuje se zkouškou.

Statistické přepětí je amplitudou přepět'ové vlny, která je vyvolána některou z událostí: sepnutí části vedení, úder blesku atd.

Konvenční metoda

Existují typy zařízení, jejichž izolace zůstane po průrazu nevratně zničena, nelze zcela aplikovat statistickou metodu. Jedná se především o transformátory, reaktory a generátory. U těchto zařízení se musí určit konvenční výdržná pevnost. Tato pevnost se ověřuje malým počtem impulsů, jejichž velikost se rovná jmenovitému výdržnému napětí. Konvenční výdržná pevnost musí být větší než konvenční maximální napětí, a to o bezpečnou hodnotu. Tato míra bezpečnosti je určena na základě zkušeností stejně jako konvenční maximální přepětí. Ani jedna z těchto hodnot se neodvíjí ze statistických výpočtů [1].

3. Stožáry vvn a zvn v ČR

Elektroenergetické stožáry jsou bezesporu nesdílňnou součástí venkovního nadzemního vedení. A protože kabelové vedení se na úrovni vysokého napětí uplatňuje především v městské zástavbě, je nadzemní vedení také nejvíce používaným typem rozvodu elektrické energie. Stožáry samotné slouží jako podpora lan a zároveň zabraňují jejich kontaktu s terénem či okolními objekty. Existují zákonné bezpečnostní normy, které popisují tuto distanční vzdálenost, která musí být dodržena.

Všechna elektrická vedení mají definované ochranné pásmo. Toto pásmo je tvořeno prostorem, kde je vedení umístěno a také prostor, který jej bezprostředně obklopuje. Ochranné pásmo má důležitou funkci, protože vodivá lana mají určitý průhyb. Průhyb lan je závislý na okolní teplotě a na jejich zatížení. Pokud je zatížení vyšší, zvýší se také teplota lana a průhyb se opět zvětší. Ochranné pásmo je definováno jako prostor ohraničený svislými rovinami na obou stranách vedení. Tyto roviny se nacházejí ve vzdálenosti, kterou stanovuje energetický zákon. Pro vedení 22 a 35 kV je to pro vodiče bez izolace vzdálenost 7 m, pro 110 kV 12 m, pro 220 kV 15 m a pro 400 kV je to 20 m. V těchto prostorech se nesmí vyskytovat objekt vyšší než 3 m.

V ČR jsou dva typy subjektů, které se stožáry hospodaří. Prvním tímto typem jsou distribuční společnosti, které zajišťují dodávku elektrické energie přímo k zákazníkům. Tyto

společnosti rozvádějí elektřinu na hladinách nízkého napětí, vysokého napětí (22 a 35 kV) a část velmi vysokého napětí (110 kV). Druhým typem je společnost ČEPS a.s., která u nás provozuje přenosovou soustavu. Jedná se o vedení velmi vysokého napětí (220 kV) a zvláště vysokého napětí (400 kV), tímto typem vedení je v ČR uskutečněn hlavní rozvod mezi velkými elektrárnami a také styk se zahraniční sítí. Mimo tyto dvě napěťové hladiny provozuje ČEPS také malou část vedení 110 kV.

Materiál používaný na výrobu stožárů se různí podle napěťových hladin. V hladinách vysokého napětí 22 a 35 kV se často používají betonové stožáry, vyskytují se i dřevěné stožáry. U napětí 110 kV až 400 kV však převažují ocelové konstrukce, jejichž povrch je opatřen protikorozní vrstvou (zinkování, speciální nátěr) nebo je použita speciální ocel (Atmofix).

3.1 Typy stožárů

Stožáry venkovního vedení se dělí jak podle napěťové hladiny, ve které jsou použity, tak zároveň podle jejich funkce a umístění na trase vedení. Podle funkce a umístění se rozdělím stožáry na nosné, výstužné (kotevní) a rohové. Každý z těchto typů plní svou vlastní roli na kompletní trase vedení. Jednotlivé typy jsou popsány níže.

Nosné stožáry (N)

Jsou to stožáry vyplňující prostor na trase mezi jednotlivými výstužnými stožáry. Jsou dimenzovány na zvládání menších tlaků a tahů, protože při normálním provozu jsou zatíženy rovnoměrně v obou směrech vedení. Zatížením, které u těchto stožárů převládá je zatížení větrem kolmo na vedení.

Výstužné (kotevní) stožáry (V)

Jedná se o pevné body umístěné na trase vedení. Jsou dimenzovány, aby při zhroucení vedení v jednom směru, udrželi zbytek vedení. V tomto případě je stožár v poškozeném směru vedení značně přetížen. Nosné stožáry na takové zatížení dimenzovány nejsou. Oproti nosným stožárům mají složitější a masivnější konstrukci. Pro představu výrobce stožárových konstrukcí EGE spol. s.r.o. udává ve svém katalogu [14] u stožáru typu Soudek pro napětí

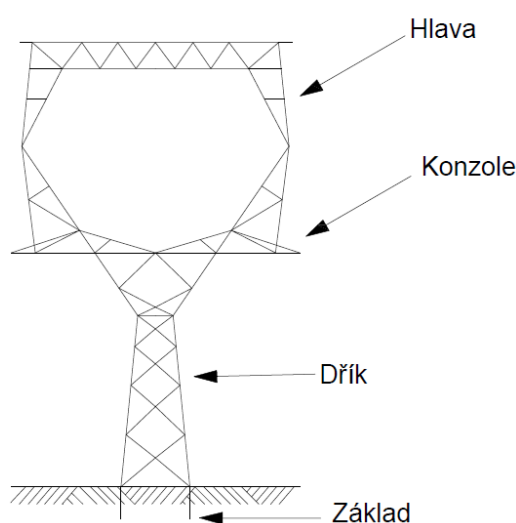
2x110 kV, že nosný typ tohoto stožáru váží bez povrchové úpravy 2852 kg. Výstužný typ stejného typu stožáru přitom váží 6779 kg při stejné výšce 26 m. Rozdíl je tedy značný. Je tedy i zřejmý záměr používání nosných typů stožárů. Jedná se především o ekonomické hledisko.

Rohové stožáry (R)

Nacházejí se na místech, kde se trasa láme. Existují varianty, kdy mohou být rohové stožáry nosné nebo výstužné. Tyto typy stožárů se v literatuře nazývají RV. Obecně jsou rohové stožáry konstruovány stejně jako stožáry výstužné, protože musejí přenášet výslednici tahů ve vodičích [15].

3.2 Části stožárů

Celková konstrukce, která tvoří samotný stožár se skládá z několika částí. Provedu popis těchto částí, jako příklad jsem použil stožár typu Delta, jehož nákres je na obrázku 13. Základní částí stožáru je tzv. patka. Patka je pevně spojena se základy stožáru. Ty jsou uloženy hluboko v zemi a jsou zabetonovány. U velkých stožárů jako je právě Delta musejí být základy až několik metrů hluboké. Na patku je poté napojen dřík, ten spojuje patku s hlavou stožáru. Na hlavě stožáru jsou umístěny konzole, na kterých jsou za použití izolátorových závěsů připevněny vodiče.



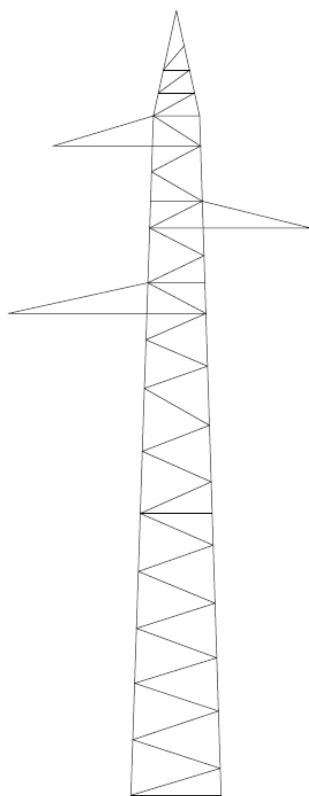
Obr. 13 Jednotlivé části stožáru

3.3 Rozdělení stožárů

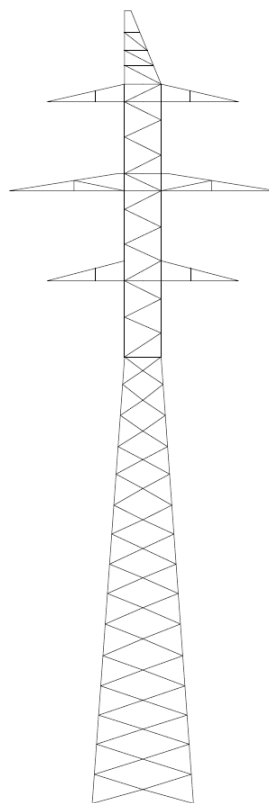
V kapitole 3.1 jsem popsal rozdělení stožárů podle funkce, kterou plní. V této kapitole rozdělím stožáry podle napěťové hladiny, ve které jsou použity. Některé konstrukční typy stožárů se objevují ve více napěťových hladinách např. stožár typu Portál (220 kV i 400 kV), a některé typy jsou používány pouze pro jednu napěťovou hladinu, např. Kočka.

3.3.1 110 kV

Na hladině 110 kV převažují stožáry typu Soudek. Jsou používány varianty pro jednoduché vedení, obrázek 14. Nebo pro dvojité vedení, obrázek 15. Dalším typem zde používaných stožárů jsou stožáry Podchodové pro dvojité vedení. Obecně stožáry pro hladinu 110 kV jsou menší a mají lehčí konstrukci než stožáry používané ve vyšších hladinách.



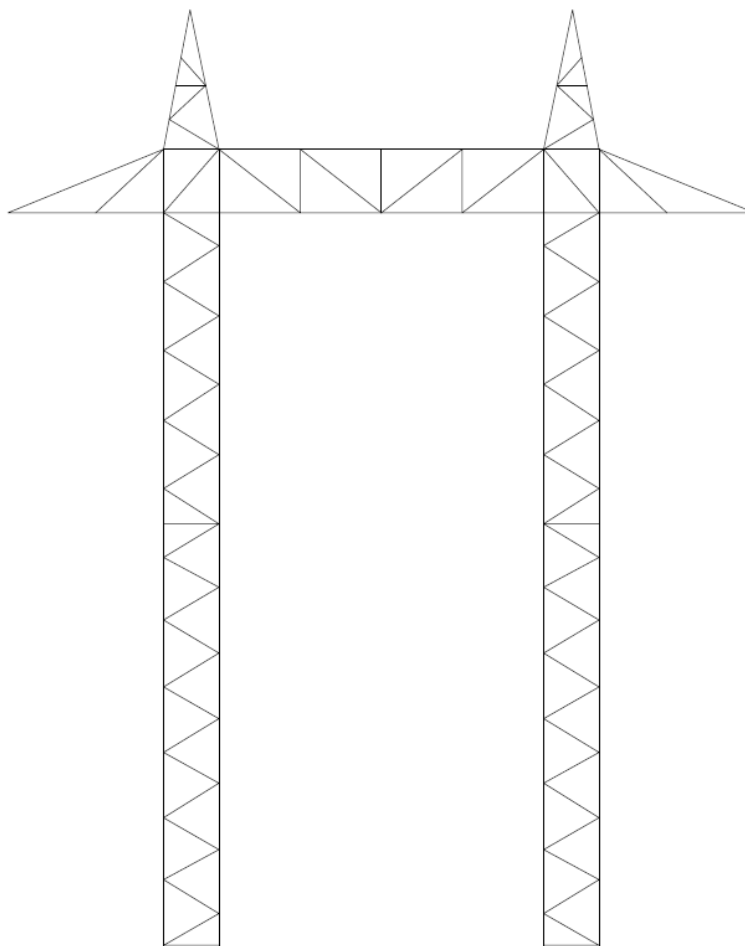
Obr. 14 Stožár 1x110 kV



Obr. 15 Stožár 2x110 kV „Soudek“

3.3.2 220 kV

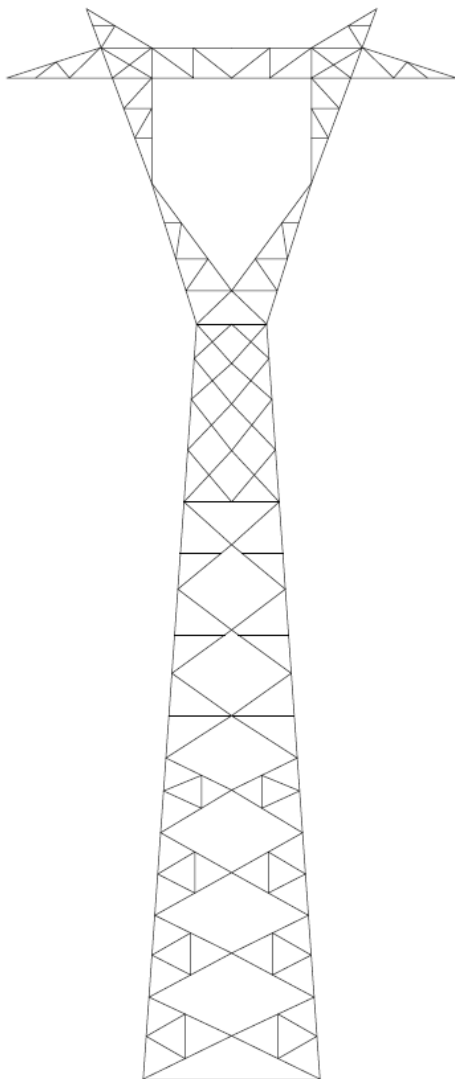
Na obrázku 16 je zobrazen stožár typu Portál pro 220 kV. Na těchto typech Portálů je zavěšeno jednoduché vedení, ovšem existují i tzv. Portály dvojnásobné, kde se používá dvojité vedení. Dále se na této hladině používají stožáry typu Soudek, jsou však vyšší a masivnější než na hladině 110 kV. Stejně jako na hladině 400 kV se i zde používají stožáry typu Donau. Počet zemnicích lan se na této hladině odvíjí od typu stožáru. Portály mají například vždy dvě zemnicí lana, ovšem Soudek stejně jako na hladině 110 kV, má pouze jedno. Stožár Donau používaný na hladině 220 kV má také pouze jedno zemnicí lano, tím se liší od stožáru Donau pro hladinu 400 kV.



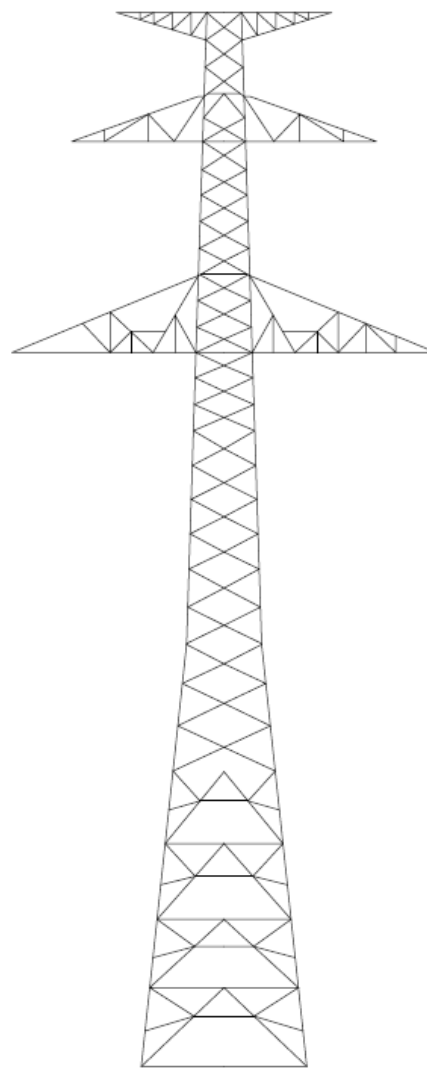
Obr. 16 Stožár 220 kV „Portál“

3.3.3 400 kV

V hladině 400 kV jsou používány největší a konstrukčně nejrobustnější stožáry. Stejně jako na hladině 220 kV jsou i zde použity stožáry typu Portál a Donau. Stožár Donau je zobrazen na obrázku 18. Dále se zde používají stožáry typu Kočka a Delta. Stožár Kočka je zobrazen na obrázku 17. U všech typů stožárů na hladině 400 kV jsou použity dvě zemnicí lana.



Obr. 17 Stožár 1x400 kV „Kočka“

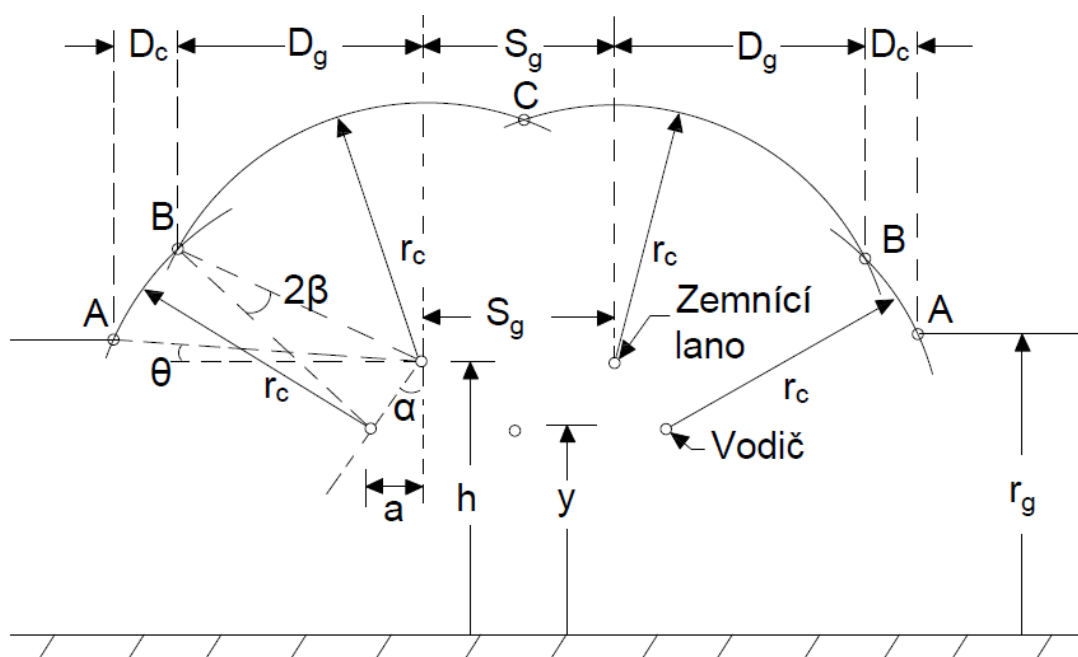


Obr. 18 Stožár 2x400 kV „Donau“

3.4 SFR, SFFOR

Schopnost ochránit fázové vodiče zemnicím lanem se dá stanovit i výpočetním způsobem. Ke stanovení míry ochranné schopnosti stožáru se dají použít parametry SFR (Shielding

Failur Rate) a SFFOR (Shielding Failure Flashover Rate). SFR představuje počet blesků, které proniknou k fázovému vodiči. V případě, že dojde k průniku blesku k fázovému vodiči, může zároveň dojít k přeskoku tohoto blesku. Ovšem ne všechny blesky, které proniknou přes zemnicí lana, jejichž míru udává SFR, způsobí přeskok. Počet blesků, které tuto situaci způsobí udává parametr SFFOR. K určení těchto parametrů se používá tzv. elektro-geometrický model (obrázek 19). Je to nákres, který respektuje rozložení vodičů na stožáru a zároveň jsou v něm naznačeny ochranné a průrazné oblasti stožáru.



Obr. 19 Elektro-geometrický model

Úderová vzdálenost r_c je přímo závislá na velikosti proudu blesku. Čím větší je proud blesku, tím větší je tato vzdálenost.

$$r_c = 10 \cdot I^{0,65} \text{ (m)} \quad (5)$$

Úderová vzdálenost je zde vynesena z krajních fázových vodičů a zemnicích lan. Vymezuje oblouky, které v místech svého křížení označují body B a C. Bod A je označen na místech, kde oblouk vymezený úderovou vzdáleností protíná výšku r_g . Tato výška vymezuje vzdálenost, od které blesk udeří do země, místo do fázového vodiče.

$$r_g = [0,36 + 0,17 \ln(43 - h)] \cdot I^{0,65} \text{ (m)} \quad (6)$$

U stožáru typu Donau 62 N jsem použil jako vzdálenost vodiče od země základní údaj. A to 34,5 m.

$$r_g = [0,36 + 0,17 \ln(43 - 34,5)] \cdot I^{0,65} \text{ (m)} \quad (7)$$

Mezi body A, B a C leží tzv. odhalené vzdálenosti. Odhalené vzdálenosti pro fázové vodiče jsou označeny D_c a pro zemnicí lana D_g . Odhalené vzdálenosti označují oblasti, do kterých blesk udeří. Pokud blesk udeří do oblasti označené D_g , zasáhne zemnicí lano, pokud udeří do D_c , zasáhne fázový vodič.

$$D_c = r_c \cdot (\cos \theta - \cos(\alpha - \beta)) \text{ (m)} \quad (8)$$

$$D_g = r_c \cdot \cos(\alpha - \beta) \text{ (m)} \quad (9)$$

Jednotlivé úhly se dají odvodit pomocí obrázku 19. Níže jsou uvedeny vztahy pro jejich výpočet s dosazenými hodnotami pro stožár Donau 62 N.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y} = \tan^{-1} \frac{4,6}{41,5 - 34,5} = 33,31^\circ \quad (10)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(h - y)^2 - a^2}}{2 \cdot r_c} = \sin^{-1} \frac{8,376}{2 \cdot r_c} \quad (11)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{(r_g - y)}{r_c} = \sin^{-1} \frac{(r_g - 34,5)}{r_c} \quad (12)$$

Z kapitoly 2 je patrné, že cílem je, aby blesk zasáhl právě zemnicí lano. Vzdálenost D_c by měla být tedy co nejmenší. S_g označuje vzdálenost mezi zemnicími lany a je závislá na konstrukci stožáru. Pro výpočet SFR a SFFOR musíme také určit konstantu N_g , která určuje stanovuje hustotu blesků směřujících k zemi.

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \left(\frac{n}{\text{km}^2 \cdot \text{rok}} \right) \quad (13)$$

Tato hustota je závislá na počtu bouřkových dní v dané oblasti T_d . Pro naše zeměpisné umístění se užívá jako standard 15 bouřkových dní v roce. Konstanta N_g se tedy vypočítá:

$$N_g = 0,04 \cdot 15^{1,25} = 1,181 \left(\frac{n}{\text{km}^2 \cdot \text{rok}} \right) \quad (14)$$

Pomocí těchto parametrů již můžeme vypočítat SFR. Konstanta L označuje délku vedení, pro kterou se SFR počítá (standardně se uvažuje 100 km). Funkce f_I je pravděpodobnostní hustota prvního úderu a je určena na základě standartu IEEE [16].

$$SFR = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot \int_0^{I_{max}} D_c(I) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (-) \quad (15)$$

Proud I_{max} představuje proud, při kterém se vzdálenost D_c rovná nule. Pro stožár Donau 62 N je výsledkem:

$$SFR = 2 \cdot 1,181 \cdot 100 \cdot (0,536 \cdot 10^{-3}) = 0,126516 \quad (16)$$

Výpočet SFFOR je velmi podobný jako SFR. Stačí změnit dolní mez integrálu z nuly na hodnotu I_c . Proud I_c je hodnota proudu, při které začíná docházet k přeskokům blesku. Určení této hodnoty proudu je popsáno v [17].

$$SFFOR = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot \int_{I_c}^{I_{max}} D_c(I) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (-) \quad (17)$$

Opět pro stožár Donau 62 N vypadá výsledný vztah takto:

$$SFFOR = 2 \cdot 1,181 \cdot 100 \cdot (95,465 \cdot 10^{-6}) = 0,022549 \quad (18)$$

Ve své práci jsem se primárně zabýval experimentálním určením ochranné schopnosti stožárů, což jsem popsal v poslední kapitole. Zároveň jsem také provedl výpočty obou výše zmíněných parametrů pro jednotlivé stožáry. Tyto parametry představují teoretický výsledek, k jakému se mělo při laboratorním experimentu dojít. I přesto, že výsledky jsou jistě jen orientační, mohly by naznačit, který ze stožárů bude lépe chránit. V následující tabulce jsou uvedeny základní geometrické rozměry pro jednotlivé stožáry, které jsou

k výpočtům nezbytné. Pomocí těchto hodnot a rovnic, které jsem uvedl výše, jsem vypočítal parametry SFR a SFFOR pro jednotlivé stožáry.

	a (m)	y (m)	h (m)	α (°)
Donau 62 N	4,6	34,5	41,5	33,31
Donau 62 I+II	5,15	32,5	44	24,12
Dunaj 2012 N	2,2	39,4	46	18,44
Dunaj 2012 RV	2,5	32,5	44,1	12,16
Portál 49	3,1	25	29	37,78
Portál 58	2,6	22	27	27,47
Portál 62 N	4,9	27,28	34,36	34,69
Portál 62 I	6	22	32,6	29,51
Soudek N	2,8	30,8	34	41,18
Soudek II	3,1	26,85	32,05	30,80

Tab. 2 Základní rozměry jednotlivých stožárů

V tabulce níže jsou uvedeny výsledky výpočtů, které jsem provedl. Jedná se o počet daných incidentů na 100 km za jeden rok. Podle výsledků je možné určit jaký stožár bude chránit lépe. Při srovnání stožárů Donau 62 a Dunaj 2012 je patrné, že novější verze stožáru vyšla lépe než starší verze. A to jak nosná, tak výstužná verze. Výstužná varianta stožáru Dunaj 2012 vlastně vyšla jako nejlepší ze všech. Zato nejhůře ze všech vyšel stožár typu Soudek, jeho nosná varianta. Při srovnání stožárů typu Portál je patrné, že nejlépe vyšel typ Portál 58 a nejhůře Portál 49.

	SFR	SFFOR
Donau 62 N	0,126516	0,022549
Donau 62 I+II	0,081339	0,014497
Dunaj 2012 N	0,037827	0,006742
Dunaj 2012 RV	0,027724	0,004941
Portál 49	0,134735	0,024014
Portál 58	0,063036	0,011235
Portál 62 N	0,128854	0,022966
Portál 62 I	0,091621	0,016330
Soudek N	0,167451	0,029845
Soudek II	0,095779	0,017071

Tab. 3 Výsledky parametrů

Přestože jsou parametry SFR a SFFOR běžně používané při návrzích nových typů stožárů a při studiu stávajících [17] [18], společnost ČEPS a.s. je do svých výpočtů nezahrnuje. Pro naše podmínky totiž nejsou příliš vhodné a nedají se přesně určit. Společnost ČEPS a.s. proto pracuje s jiným parametrem, který udává počet úderů blesku do vedení, které způsobily výpadek vedení. Hodnota tohoto parametru je přepočítávána každý rok. Mé výsledky

parametrů SFR a SFFOR jsou tedy, jak jsem již uvedl výše, pouze orientační a slouží spíše jako porovnání s výsledky dosaženými v laboratoři.

4. Ověření efektivnosti zemnicího lana

V této kapitole popíši laboratorní měření, pomocí kterého jsme ověřili efektivnost ochrany fázových vodičů venkovního vedení zemnicím lanem. Popíši zde použité vybavení laboratoře a měřící model. Zároveň v této kapitole popíši samotné měření, které jsem uskutečnil společně se svým vedoucím diplomové práce. Na závěr této kapitoly zhodnotím jednotlivé výsledky laboratorního měření.

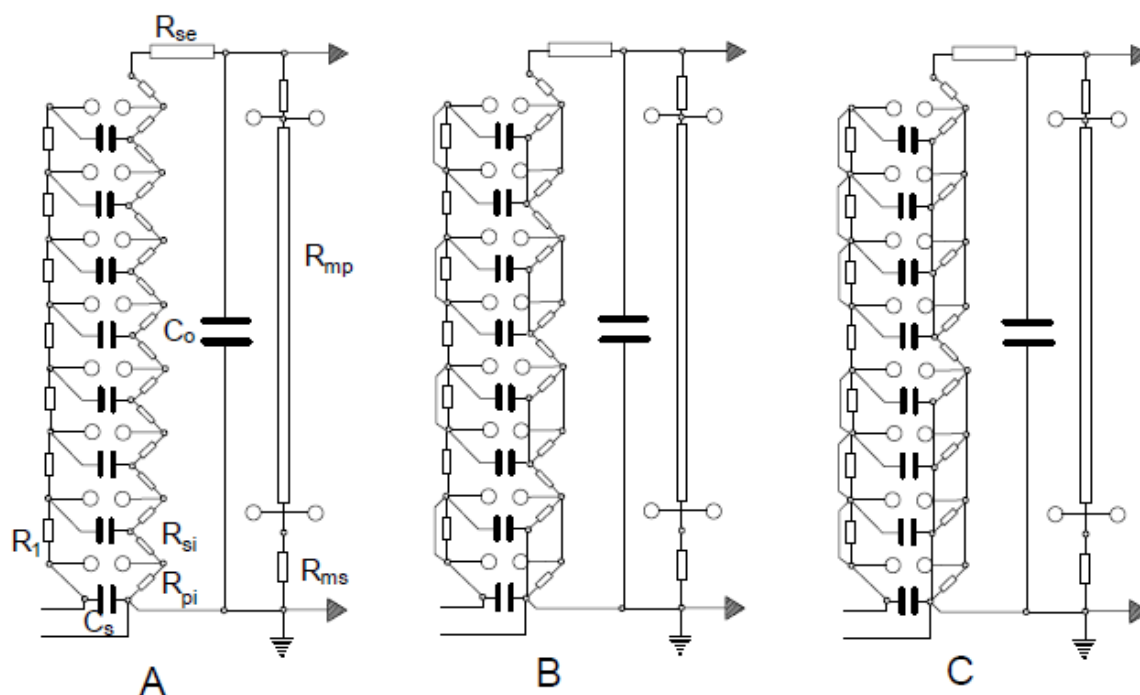
4.1 Měření

Smyslem provedení laboratorního měření, bylo porovnat schopnost zemnicího lana chránit jednotlivé fázové vodiče před přímým úderem blesku. Různé geometrické uspořádání stožárů má na tuto ochranou funkci zemnicího lana značný vliv. Parametr, podle kterého nejsnáze určíme, zda bude zemnicí lano chránit fázový vodič dostatečně je úhel, který je mezi zemnicím lanem a fázovým vodičem. Čím vyšší hodnota tohoto úhlu bude, tím větší je pravděpodobnost úderu blesku do fázového vodiče. Pomocí měřícího modelu jsem nasimuloval skutečné geometrické rozložení jednotlivých lan na různých typech stožárů. Podle doporučení od společnosti ČEPS a.s. jsem se měl zaměřit na porovnání stožárů typu Donau z roku 1962 a nového typu Dunaj 2012, který jej na několika místech v ČR postupně nahrazuje. Kromě porovnání těchto dvou typů stožárů jsem také porovnal mezi sebou několik stožárů typu Portál a dva stožáry typu Soudek.

4.1.1 Vybavení laboratoře

Rázový generátor – Je to zařízení, které bylo při laboratorním měření použito pro simulaci bleskových výbojů. Jedná se rázový generátor typu Stossgenerator 600 kV 4 kJ vyrobený společností HAEFELY. Náhradní schéma přístroje je uvedeno v obrázku 20. Přičemž během samotného experimentu jsme používali zapojení A. V tabulce 4 jsou poté uvedeny hodnoty pro jednotlivé prvky obsažené v náhradním schématu. Rázový generátor je proveden ve variantě několikastupňového uspořádání neboli Marxovo řazení. Toto zapojení rázového generátoru se používá pro značně vysoká vybíjecí napětí (do 1000 kV). Tento typ rázového

generátoru dokáže vyprodukovat až 600 kV. Při laboratorním měření bylo využíváno maximální napětí téměř 400 kV. Při spuštění rázového generátoru dochází k nabíjení rázové kapacity C_s ze stejnosměrného zdroje. Tato kapacita se následně vybije přes jiskřiště do následující kapacity, a tak to pokračuje, až na konec obvodu, kde se přes odpor R_{se} a kapacitu C_o vybije do námi požadovaného místa, či obvodu. V našem případě se rázová vlna šířila do elektrody, která byla namířena na měřicí model, který je popsán v následující kapitole.



Obr. 20 Náhradní schéma rázového generátoru

Zapojení		A	B	C
max. nabíjecí napětí	U	600 kV	300 kV	150 kV
sériové stupně	-	8	4	2
paralelní stupně	-	1	2	4
rázová kapacita	C_s	22,5 nF	90 nF	360 nF
jmenovitá kapacita	C_o	2 nF	2 nF	2 nF
odpor děliče napětí	R_{mp}	20 k Ω	20 k Ω	20 k Ω
počet úderů	k	6/min	6/min	6/min
sériový odpor	R_{si}	10 Ω	10 Ω	10 Ω
paralelní odpor	R_{pi}	430 Ω	430 Ω	430 Ω
zatěžovací odpor	R_1	7 k Ω	7 k Ω	7 k Ω

Tab. 4 Hodnoty prvků schématu rázového generátoru

Můstkový usměrňovač – Jedná se o zařízení pomocí, kterého je dodáváno stejnosměrné napětí do rázového generátoru. Můstkový usměrňovač je opět vyroben firmou HAEFELY. Jeho jmenovité napětí je 75 kV, jmenovitý proud 10 mA, primární napětí je 220 V. Jmenovitý výkon přístroje je 2250 VA.

Na obrázku 21 je zobrazen samotný rázový generátor používaný při laboratorním měření.

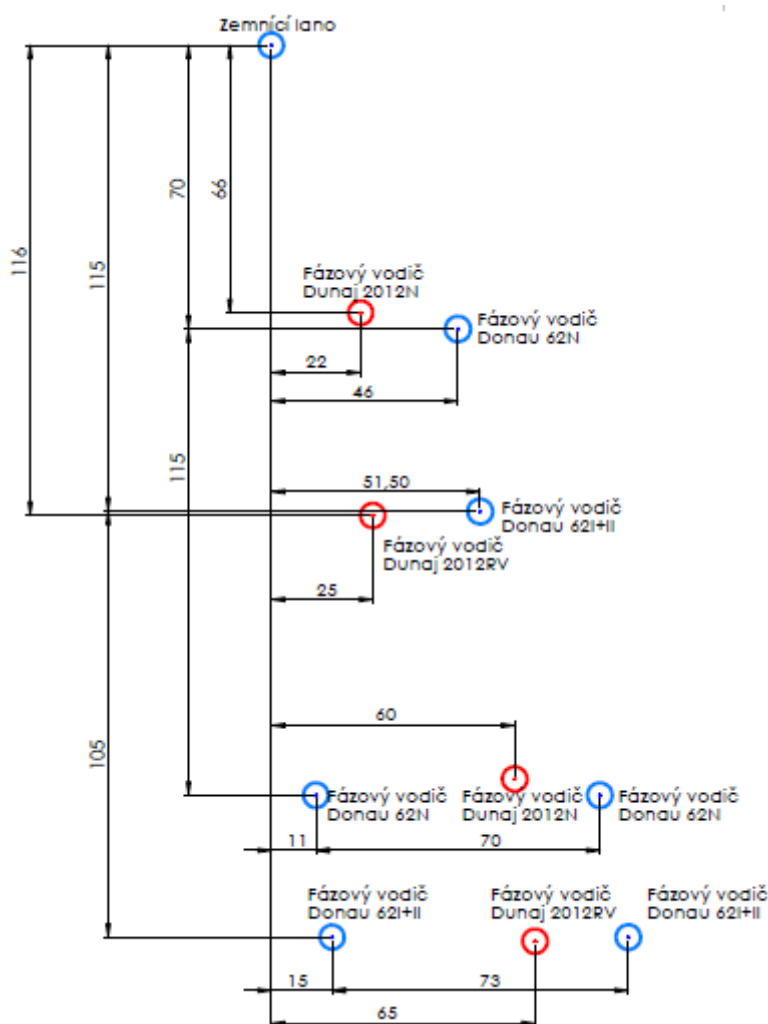


Obr. 21 Rázový generátor

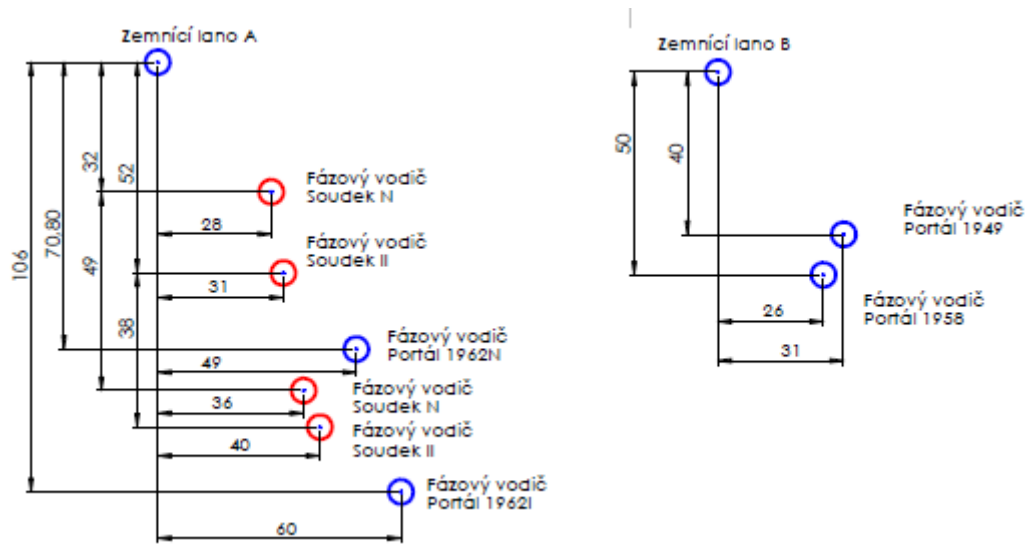
4.1.2 Měřicí model

Měřicí model jsem vytvořil na základě výkresů několika stožárů, které mi poskytla společnost ČEPS a.s. Jedná se o stožáry typu Donau 1962 N, I a II, Dunaj 2012 N, RV120L, 150L a 170L, Portál 220 kV 1949 N, Portál 220 kV 1958 II, Portál 400 kV 1962 N a Portál 400 kV 1962 I, Soudek 2x110 kV N a II. Stožáry typu N jsou nosné a stožáry typu RV, I a II jsou stožáry rohové výstužné. Model jsem vytvořil v měřítku 1:100. Do dvou dřevěných desek jsem vyvrtal otvory, do kterých jsem následovně vložil rovný ocelový drát, zhruba 1,5 m dlouhý. Obě desky jsem připevnil k rámu opět zhruba 1,5 m vysokému. K samotnému rámu jsem připevnil hliníkový plech jako náhradu zemskému povrchu. Na obrázku 22 a 23

je zobrazeno, jak jsou na modelu jednotlivé otvory uspořádány. Pro stožáry typu Donau 1962 a Dunaj 2012 jsou otvory pro zemnicí lano stejné. Pro stožáry Donau 1962 I, II a Dunaj 2012 RV120, 150 a 170 jsem volil společný otvor pro umístění fázového vodiče. A to z důvodu jejich velmi podobným rozměrům. V měřítku 1:1 se jedná o rozdíly zhruba 20 cm, což je pro model v měřítku 1:100 zanedbatelný rozměr. Dalším zjednodušením je zanedbání dvou levých krajních vodičů u stožárů typu Dunaj 2012. Tyto zanedbané vodiče mají záporný ochranný úhel vůči elektrodě simulující blesk, jsou tedy plně chráněny před přímým úderem blesku a je tedy zbytečné je na měřicí model instalovat. Na obrázku 24 je zobrazen již samotný měřicí model. Na obrázku 25 je zachycen detail samotné desky modelu s vyvrtanými otvory pro dráty reprezentující fázové vodiče a zemnicí lana. Jednotlivé otvory jsou barevně označeny, aby nedošlo k záměně mezi jednotlivými typy stožárů.



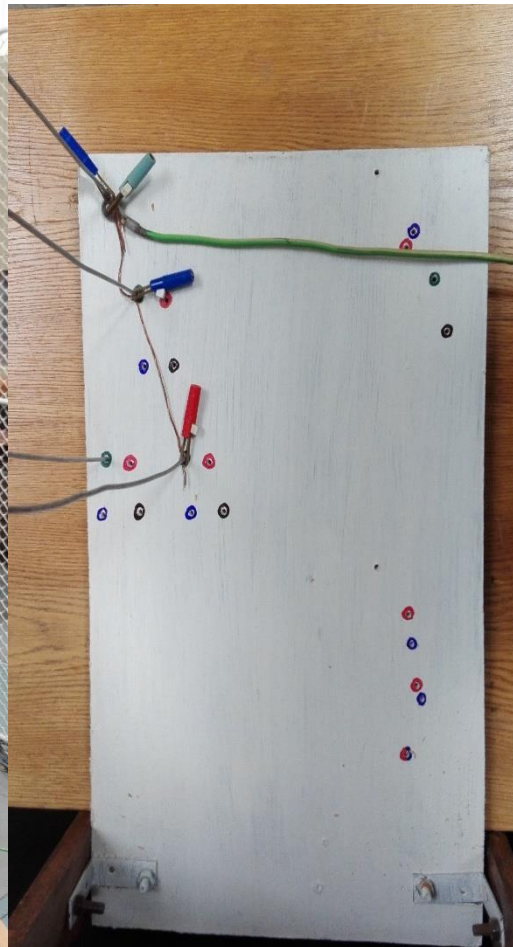
Obr. 22 Uspořádání jednotlivých otvorů v modelu



Obr. 23 Uspořádání jednotlivých otvorů v modelu



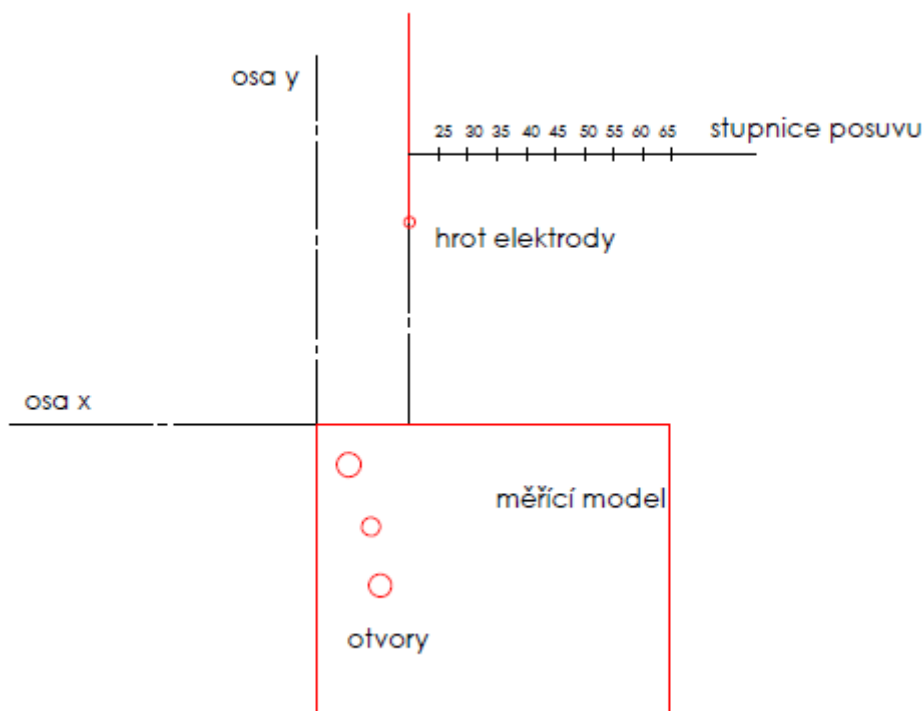
Obr. 24 Měřící model a elektroda



Obr. 25 Detail desky modelu

4.1.3 Měření pravděpodobnosti přeskočení

V této kapitole bych rád popsal samotné měření, které jsem uskutečnil společně se svým vedoucím. Pomocí měřicího modelu, který jsem popsal výše, jsem odměřil schopnost jednotlivých stožárů chránit fázové vodiče zemnicím lanem před přímým úderem blesku. Samotné měření bylo inspirováno školní laboratorní úlohou na měření ochranného úhlu alfa. Na rozdíl od této školní úlohy, kde byla elektroda v pevné pozici a měnilo se pouze uspořádání vodičů, tedy ochranný úhel alfa, jsem jako proměnný parametr zvolili vzdálenost elektrody od stožáru, resp. zemnicího lana, v ose x. Ochranný úhel alfa byl tedy pro každý stožár konstantní, měnila se pouze poloha blesku. Na obrázku 26 je zobrazeno uspořádání modelu a elektrody. Zároveň je zde zobrazen rastr v naznačené ose x, po kterém byla elektroda během experimentu posouvána.



Obr. 26 Uspořádání měřicí úlohy

Prvním měřeným stožárem byl Donau 1962 N. Při tomto prvním měření jsem se snažil nejprve určit vzdálenost elektrody od zemnicího lana v ose y. Bylo zapotřebí určit kritickou vzdálenost, protože pokud by byla elektroda příliš „vysoko“, byla by její vzdálenost k fázovým vodičům mnohem větší než k zemnicímu lanu. V takovém případě by zemnicí

lano přitáhlo většinu úderů a nejspíše bychom ani žádný úder do fáze nezaznamenali. Na druhou stranu, pokud bychom umístili elektrodu příliš „nízko“, fázové vodiče by přitahovaly výboje mnohem více než zemnicí lano. Navíc by v této malé „výšce“ začínali blesky daleko dříve přeskakovat na zem, kterou představoval hliníkový plech. Po několika pokusech jsem tedy vyhodnotil jako kritickou vzdálenost v ose y 30 cm. V této vzdálenosti záleželo spíše na změně umístění elektrody v ose x, než na jejím umístění v ose y. V jiných zkušebních vzdálenostech nebyla změna v ose x tolik patrná, nebo naopak i malá změna způsobila velký rozdíl. Tuto kritickou vzdálenost mezi zemnicím lanem a elektrodou jsem dodržel u měření pro všechny ostatní typy stožárů.

Během prvního měření jsem také určil vzdálenost v ose x, ve které jsme všechna měření začínali. Předpokládal jsem, že pokud bychom začínali měření ve vzdálenosti 0 cm od zemnicího lana, tedy kolmo, veškeré údery by směřovali do zemnicího lana. U většiny stožárů začalo docházet k úderům do fázových vodičů ve vzdálenosti 25-30 cm. Jako výchozí vzdálenost jsme tedy zvolili 20 cm v ose x od zemnicího lana. Pro menší vzdálenosti jsem předpokládal, že k úderu do fázového vodiče nedojde. Na obrázku 27 je zachycen přeskok mezi elektrodou a drátem.



Obr. 27 Přeskok mezi elektrodou a vodičem

Vzdálenost jsem zvyšoval s krokem 5 cm až do vzdálenosti, kde začala zem přitahovat veškeré blesky. Tento jev začal nastávat ve vzdálenosti 60-65 cm od zemnicího lana. Pokud jsem tedy měřil v rozmezí od 20 do 60-65 cm, bylo třeba pro každý typ stožáru provést 9-10 sérií měření. V každé sérii bylo vygenerováno celkem 10 výbojů. Během měření každé série jsem zaznamenával počet úderů do zemnicího lana a do fázových vodičů. Postupně jak jsem zvyšoval vzdálenost, tak jsem zaznamenával také úderů do země, tedy do hliníkového plechu. Výstupem těchto měření je procentuální pravděpodobnost úderu do fázového vodiče v dané vzdálenosti mezi zemnicím lanem a počátkem výboje. Tuto pravděpodobnost jsem vypočítal podle následujícího vzorce:

$$P_{pst} \text{ úderu do FV} = \frac{\text{Počet úderů do FV}}{\text{Celkový počet úderů}} \cdot 100 \quad (19)$$

Tato pravděpodobnost je velmi závislá na celkovém počtu úderů. Jak jsem již zmínil výše, v našem případě jsme vygenerovali 10 výbojů. Pokud bychom těchto výbojů vygenerovali více, následná pravděpodobnost by byla přesnější, ovšem už u 10 výbojů lze ve výsledcích pozorovat velké rozdíly mezi jednotlivými typy stožárů. Cílem měření bylo odhalit rozdíly mezi jednotlivými typy stožárů a tohoto cíle bylo dosaženo.

Výsledky měření jsem zhodnotil v následující kapitole.

4.2 Výsledky měření

V tabulkách 5 až 7 jsou uvedeny výsledky měření pro jednotlivé stožáry. Tyto tabulky jsou rozděleny podle typu stožárů. V tabulce 5 jsou zobrazeny výsledky pro stožáry typu Donau a Dunaj, v tabulce 6 jsou zobrazeny výsledky pro stožáry typu Portál a v tabulce 7 jsou výsledky pro stožáry typu Soudek.

d (cm)		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Donau 62 N	ZL	10	10	8	6	5	3	3	1	1	0
	FV	0	0	2	4	5	7	7	9	9	10
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ppst do FV (%)	0	0	20	40	50	70	70	90	90	100
Donau 62 I+II	ZL	10	10	10	10	10	10	10	10	7	8
	FV	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ppst do FV (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	30	20
Dunaj 2012 N	ZL	10	10	9	10	9	9	9	8	6	4
	FV	0	0	1	0	1	1	1	2	4	6
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ppst do FV (%)	0	0	10	0	10	10	10	20	40	60
Dunaj 2012 RV	ZL	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5
	FV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ppst do FV (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50

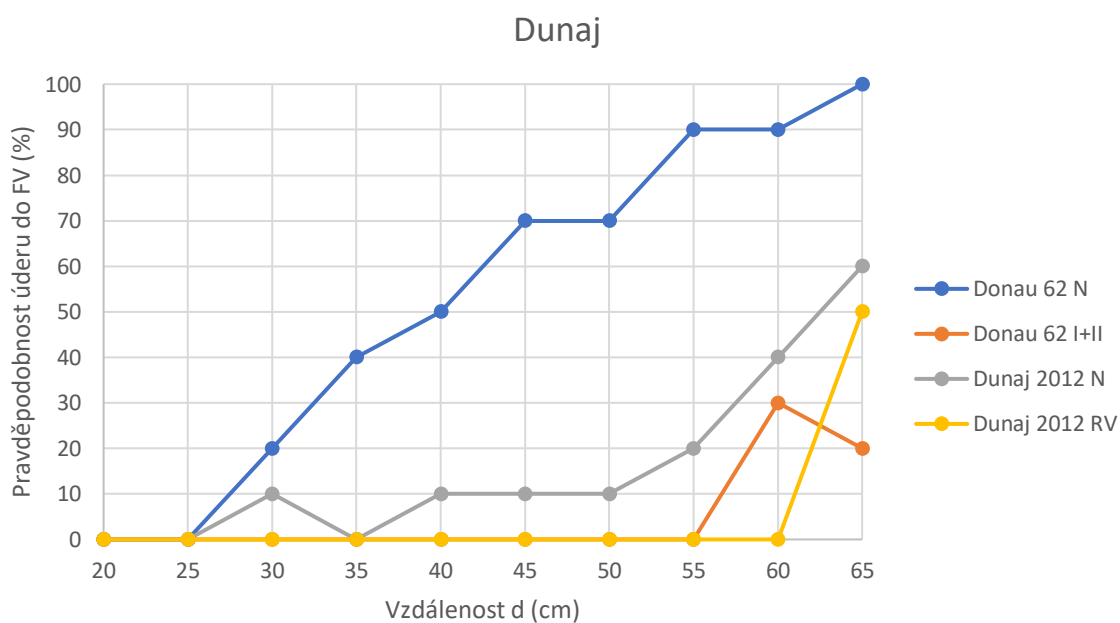
Tab. 5 Výsledky pro stožáry typu Dunaj

Při pohledu na výslednou pravděpodobnost úderu blesku do fázového vodiče je vidět, že nosné typy stožárů daleko méně kryly fázové vodiče svými zemnicími lany než stožáry rohové výstužné. Když například srovnám stožár typu Donau 1962 nosný a jeho rohovou výstužnou variantu, je vidět, že u nosného stožáru jsme změřili 50 % pravděpodobnost zásahu fázového vodiče už ve vzdálenosti 40 cm. U rohového výstužného typu jsme se dostali maximálně na 30 % pravděpodobnost, a to až v 60 cm vzdálenosti. Tato skutečnost může být způsobena tím, že rohové výstužné stožáry musí být, na rozdíl od nosných stožárů, dimenzovány, aby vydrželi celkové tahové zatížení vodičů, včetně námrazy. Dá se tedy předpokládat, že i jejich geometrické rozmístění lan bude odpovídat vyšší bezpečnostní míře. Na nosných stožárech jsou lana pouze zavěšena, nejsou tedy tolik namáhány.

U typu Dunaj 2012 to u srovnání nosného a rohového stožáru vychází podobně. Při měření nosného typu stožáru jsem změřil 10 % pravděpodobnost už ve vzdálenosti 30 cm a tuto míru pravděpodobnosti jsme změřili až do vzdálenosti 50 cm. Po překročení této vzdálenosti se již pravděpodobnost zvyšovala až na 60 %. Rohový výstužný typ stožáru byl proti úderu do fázového vodiče chráněn až do mezní vzdálenosti 65 cm. V této vzdálenosti jsem naměřil 50 % pravděpodobnost.

Srovnám-li tedy stožár typu Donau 1962 a Dunaj 2012 nelze srovnávat přímo jednotlivé typy, ale musí se rozlišit i zda se jedná o nosný nebo rohový stožár. Srovnávat tedy lze pouze nosné typy a rohové typy. Výsledky pro typy Donau 1962 N a Dunaj 2012 N jsou si velmi podobné ve smyslu vzdálenosti prvotního zásahu do fázového vodiče. Ovšem v procentuální pravděpodobnosti jsou již velmi rozdílné. Zatímco u stožáru Dunaj 2012 jsem naměřil maximální pravděpodobnost 60 % a to až na úplném konci měření, u stožáru Donau 1962 jsem naměřil tuto hodnotu již ve 45 cm a na konci měření jsem změřil až 100 % pravděpodobnost. Nový typ stožáru, tedy Dunaj 2012, v tomto srovnání tedy vyšel daleko lépe.

Na následujícím grafu je zobrazena závislost pravděpodobnosti úderu do fázového vodiče na vzdálenosti od hrotu elektrody. Tento graf je vytvořen pomocí dat z tabulky 5.



Graf 3 Závislost pravděpodobnosti úderu na vzdálenosti u stožáru typu Dunaj

V následující tabulce jsou zobrazeny výsledky měření stožárů typu Portál. U stožáru tohoto typu jsem měl k dispozici pouze nosné stožáry, jen u stožáru Portál 62 jsem měl k dispozici i rohovou variantu. Nelze ji tedy objektivně srovnat s jinou variantou. Mohli bychom se u něj však přesvědčit, zda i u stožárů typu Portál představují rohové varianty lepší možnost ochrany než nosné varianty. Poprvé se také u těchto typů objevily údery do země, tedy do hliníkového plechu. To je způsobeno především tím, že stožáry typu Donau a Dunaj jsou

vyšší než stožáry typu Portál. Vzdálenost k zemi je tedy bližší, a to má za následek, že od určité vzdálenosti se začnou objevovat údery do země. Kvůli tomuto jevu mají výsledné charakteristiky nejdříve vzestupný směr, poté dosáhnou maxima a následně se projeví zásahy do země a charakteristika začne klesat. Při vyhodnocování budu k těmto úderům do země přihlížet stejně jako k úderům do zemnicího lana.

U stožáru typu Portál 49 začínají údery do fáze ve vzdálenosti 30 cm s pravděpodobností 20 %. Od této vzdálenosti se pravděpodobnost zvyšuje až na 90 % ve 45 cm. Od této vzdálenosti se však již projevují výše zmíněné údery do země. Pravděpodobnost klesá a ve vzdálenosti 55 cm již všechny údery směřují do země.

Stožár typu Portál 58 má stejně jako stožár Portál 49 maximum úderů do fáze ve vzdálenosti 45 cm. Avšak v tomto maximu dosahuje pravděpodobnost pouze 40 %. U stožáru Portál 58 se navíc jedná o první vzdálenost, kdy byl zaznamenán úder do fáze. V následujícím kroku pravděpodobnost klesá na 20 % a v dalších vzdálenostech se již plně projeví zem. Stejně jako u stožáru typu Portál 49 je tato vzdálenost 55 cm. Pokud mám srovnat stožár Portál 49 a Portál 58, Portál 58 vychází daleko lépe z hlediska chránění fázových vodičů zemnicím lanem.

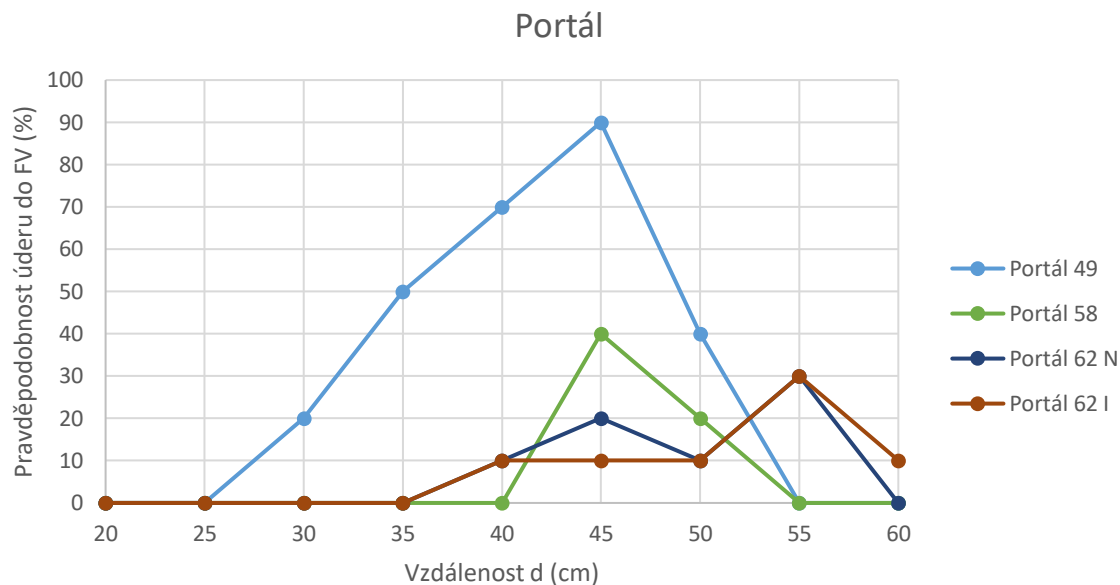
Dalším typem stožáru je Portál 62 nosný. U tohoto typu stožáru došlo k prvnímu úderu do fáze ve vzdálenosti 40 cm, byl to také jediný úder. Maximální pravděpodobnost zde nastala až ve vzdálenosti 55 cm, tedy ve vzdálenosti, kde u předešlých typů Portálů veškeré údery zamířili do země. Zde však do země zamířily pouze dva údery. Zároveň byla u stožáru Portál 62 maximální pravděpodobnost zatím nejnižší, pouze 30 %. Při srovnání se zatím nejlepším typem stožáru, Portál 58, je na tom stožár Portál 62 nosný velmi podobně. K prvnímu úderu došlo až v pozdější fázi měření, a i maximální pravděpodobnost úderu do fáze vyšla velmi podobně. Dalo by se namítat, že stožár Portál 58 je lepší, protože ve vzdálenosti nad 50 cm u něj nebyly zaznamenány žádné údery do fáze, na rozdíl od stožáru typu Portál 62. To je, ale nejspíš způsobeno tím, že stožár typu Portál 62 určen pro napětí 400 kV, je tedy vyšší. To ve výsledku může způsobit méně úderů do země, protože vzdálenost k zemi je zde vyšší. Ve výsledku jsou tedy oba typy stožárů velmi podobné, ve smyslu ochrany fázových vodičů zemnicím lanem.

Výsledky stožáru typu Portál 62 rohový jsou v porovnání s jeho nosnou variantou téměř totožné. Nedošlo zde tedy k tak významnému rozdílu mezi nosným a rohovým typem stožáru, jako tomu bylo u stožárů typu Donau a Dunaj. Pravděpodobnost úderu do fázového vodiče zde měla maximum také ve vzdálenosti 55 cm, a dokonce i velikost pravděpodobnosti byla stejná, 30 %. Jediným větším rozdílem bylo, že k úderům do země začalo docházet až ve vzdálenosti 60 cm, tedy až na konci měření. U všech předešlých typů stožárů typu Portál docházelo k úderům do země už v dřívějších krocích.

	d (cm)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Portál 49	ZL	10	10	8	5	3	1	2	0	0
	FV	0	0	2	5	7	9	4	0	0
	Zem	0	0	0	0	0	0	4	10	10
	Ppst do FV (%)	0	0	20	50	70	90	40	0	0
Portál 58	ZL	10	10	10	10	10	6	2	0	0
	FV	0	0	0	0	0	4	2	0	0
	Zem	0	0	0	0	0	0	6	10	10
	Ppst do FV (%)	0	0	0	0	0	40	20	0	0
Portál 62 N	ZL	10	10	10	10	9	8	9	5	0
	FV	0	0	0	0	1	2	1	3	0
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	2	10
	Ppst do FV (%)	0	0	0	0	10	20	10	30	0
Portál 62 I	ZL	10	10	10	10	9	9	9	7	0
	FV	0	0	0	0	1	1	1	3	1
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	Ppst do FV (%)	0	0	0	0	10	10	10	30	10

Tab. 6 Výsledky pro stožáry typu Portál

Na následujícím grafu je zobrazena stejná závislost pravděpodobnosti úderu jako u grafu 3. Tento graf je vytvořen pomocí dat z tabulky 6. Jsou zde dobře patrná maxima charakteristik a následné poklesy u stožárů typu Portál 49 a Portál 58. Maxima jsou jasně viditelná i u Portálu 62, v obou variantách, ale není to již tak jasný průběh jako u předchozích typů.



Graf 4 Závislost pravděpodobnosti úderu na vzdálenosti u stožáru typu *Portál*

Posledním měřeným typem stožáru byl Soudek 2x110 kV. U tohoto stožáru jsem měl k dispozici pouze dva typy, nosný a rohový. Nosný typ stožáru Soudek má první zaznamenaný úder do fáze ve vzdálenosti 30 cm. V této vzdálenosti je pravděpodobnost 10 %. Dále pravděpodobnost roste až do 70 % ve vzdálenosti 50 cm, poté však začnou úder směřovat především do země. Je to podobný jev jako u stožárů typu *Portál*.

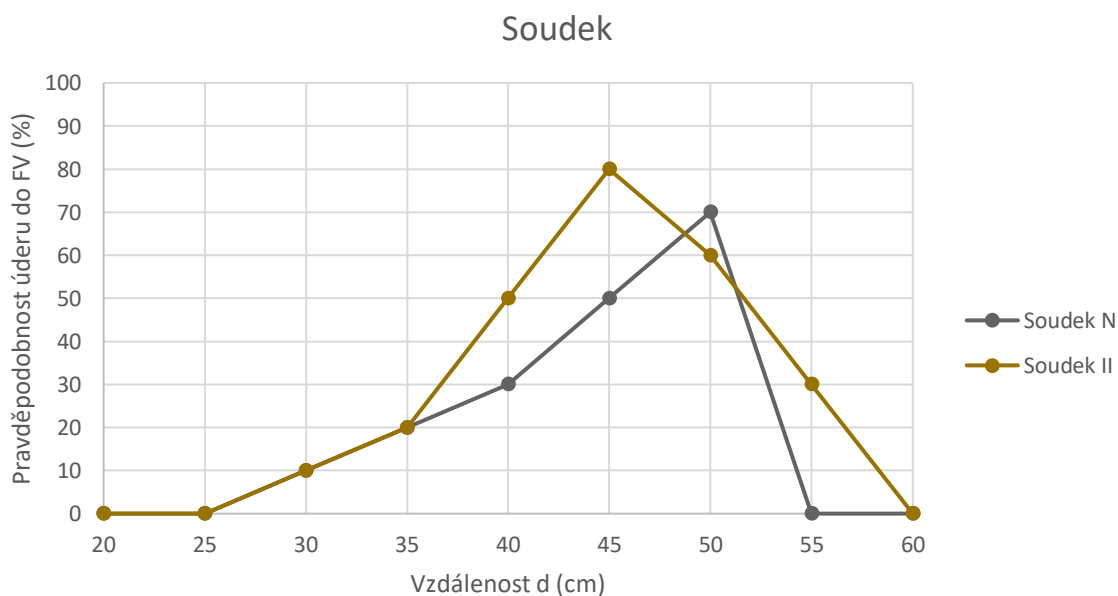
U rohového výstužného stožáru typu Soudek dojde k prvnímu úderu stejně jako u nosného stožáru. Poté se stožár projevoval téměř stejně jako nosný stožár, až do dosažení vzdálenosti 45 cm, kde pravděpodobnost stoupla na 80 %. Toto je zároveň změřené maximum u tohoto typu stožáru. Dále stejně jako v předešlém případě pravděpodobnost klesá, ovšem daleko pozvolnějším tempem než u nosného typu. Stejně tomu bylo u stožárů typu *Portál* zde nedochází k tak razantnímu rozdílu mezi nosnými a rohovými výstužnými typy.

Oba typy stožárů jsou ve výsledcích velice podobné. Ať už se tedy jedná o nosný či rohový výstužný typ stožáru, nebude to mít nejspíše na výslednou pravděpodobnost úderu do fázového vodiče vliv.

d (cm)		20	25	30	35	40	45	50	55	60
Soudek N	ZL	10	10	9	8	7	5	3	2	0
	FV	0	0	1	2	3	5	7	0	0
	Zem	0	0	0	0	0	0	0	8	10
	Ppst do FV (%)	0	0	10	20	30	50	70	0	0
Soudek II	ZL	10	10	9	8	5	2	2	0	0
	FV	0	0	1	2	5	8	6	3	0
	Zem	0	0	0	0	0	0	2	7	10
	Ppst do FV (%)	0	0	10	20	50	80	60	30	0

Tab. 7 Výsledky pro stožáry typu Soudek

Na následujícím grafu je zobrazena stejná závislost pravděpodobnosti úderu jako u grafů 3 a 4. Tento graf je vytvořen pomocí dat z tabulky 7. Opět jako u stožárů typů Portál jsou zde dobře patrná maxima charakteristik a následné poklesy. Obě charakteristiky jsou, až na drobné odchylky, velice podobné.



Graf 5 Závislost pravděpodobnosti úderu na vzdálenosti u stožáru typu Dunaj

5. Zhodnocení výsledků

V předešlé kapitole jsem představil postup a výsledky laboratorního měření pravděpodobnosti úderu do fázového vodiče u vybraných typů stožárů. Tyto výsledky z měření odpovídají předchozím výpočtům, které jsem představil v kapitole 3.4. Podle těchto výpočtů měla starší verze stožárů Donau vyjít při laboratorním testu hůř než novější verze. To se při měření také potvrdilo, což se dá vyvodit buď z tabulky č. 5 nebo z grafu č. 3. Po zhodnocení výsledků vypočítaných a naměřených mohu tedy s jistotou tvrdit, že stožár typu Dunaj 2012 je lépe dimenzován na ochranu fázových vodičů zemnicím lanem, než starší verze Donau 1962. U stožárů typu Portál, však už vypočítané výsledky tolik neodpovídají naměřeným. Podle laboratorního měření, vycházejí opět nejlépe nejnovější typy stožárů. Podle výpočtů však vychází nejlépe stožár z roku 1958. Který z výsledků je ten správný nelze snadno říci, při výpočtu jsem mohl započítat nějakou chybu, ale zároveň samotné měření není zcela přesné. Mám-li ovšem vybrat z jedné verze, přiklonil bych se k laboratornímu měření. U výpočtů totiž vyšel stožár z roku 1958 téměř dvakrát lépe než novější verze. Samozřejmě, že mohl vyjít ve výsledku lépe, ovšem nečekal bych takový skok. Kvůli tomuto bych se spíše přiklonil k laboratornímu měření. Zde si jsou výsledky podobnější a podle mě, tak spíše odpovídají skutečnosti.

Při porovnávání nosných a kotevních stožárů je však nutné dodat, že výsledky, které jsem vypočetl a naměřil odpovídají pouze konstrukcím jednotlivých stožárů nikoliv umístění lan. V praxi se na stožáry instalují izolátorové závěsy a až na nich jsou lana umístěna. To způsobuje změnu v umístění fázových lan u určitého typu stožárů. Na kotevních stožárech jsou izolátorové závěsy uchyceny z boku konzol, jsou tedy považovány za vodorovné. Umístění lan fázových vodičů se proto v tomto případě nemění. Na nosné typy stožárů se však izolátorové závěsy uchycují kolmo k zemi. Lana fázových vodičů se tedy ve skutečnosti nacházejí o zhruba 4,5 m níže, než je tomu na měřicím modelu. Kvůli této změně lze mezi sebou porovnávat kotevní a nosné stožáry, jen z pohledu konstrukcí nikoliv podle umístění lan. Můžeme však mezi sebou porovnat starý nosný a nový nosný stožár. Změna pozice fázových lan v tomto případě nebude hrát roli, protože ke změně by došlo u obou porovnávaných typů. Mé tvrzení, že lépe vychází verze stožárů Dunaj 2012 je tedy správná, chybné je však mé tvrzení, že kotevní stožáry vycházejí lépe než nosné stožáry. Pokud jsou započítány i izolátorové závěsy, měli by být tyto výsledky přesně opačné, nosné stožáry by

měly vycházet lépe než kotevní. Je to dáno právě tímto zvýšením vzdálenosti od zemnicího lana a zároveň snížením úhlu mezi zemnicím lanem a fázovým vodičem.

Tvrzení, že nosné stožáry by po korekci vycházely lépe než kotevní stožáry, lze dokázat jednoduchým výpočtem maximálního proudu, který ještě projde skrze stínění na fázový vodič. Čím nižší je tato hodnota proudu, tím menší je pravděpodobnost, že blesk tento fázový vodič zasáhne. K provedení výpočtu maximálního proudu jsem použil následující materiál [18], podle tohoto jsem odvodil:

$$I_{MSF} = \left[\frac{\frac{h+y}{2}}{14 \cdot (1 - \sin \alpha)} \right]^{0,42} [kA] \quad (20)$$

Jednotlivé neznámé odpovídají obrázku č. 19. Pro stožár Donau 1962 nosný platí: $h=41,5$ m $y=30$ m $\alpha=25,85^\circ$. V těchto výsledcích je již započítána korekce o izolátorové závěsy. Výsledný maximální proud je zde 35,23 kA. Pro stožár Donau 1962 kotevní platí: $h=44$ m $y=32,5$ m $\alpha=24,12^\circ$. Výsledný maximální proud je zde 36,87 kA.

Tyto výsledky dokazují, že nosné stožáry by měly chránit fázové vodiče lépe před úderem blesku než kotevní stožáry.

Závěr

Hlavním úkolem mé diplomové práce bylo ověřit vliv geometrického uspořádání vodičů na stožárech na jejich schopnost chránit fázové vodiče před přímým úderem blesku. V práci jsou uvedeny výpočty, pomocí kterých se dá tato závislost určit. Ovšem nejvíce jsem se soustředil na určení této závislosti pomocí měřicího modelu. Ten jsem vytvořil na základě výkresů poskytnutých společností ČEPS a.s. a následně jsem model otestoval ve školní laboratoři. I přesto, že při konstrukci měřicího modelu došlo k chybě, výsledky získané během měření jsou uspokojivé a lze pomocí nich usoudit, který typ stožáru bude lépe chránit fázové vodiče.

Při porovnání stožárů jsem se nejvíce soustředil na dvojici stožárů Donau 1962 a Dunaj 2012. Po uskutečnění laboratorního pokusu, mohu tvrdit, že nosná verze stožáru Dunaj 2012 chrání lépe fázové vodiče zemnicím lanem než nosný stožár Donau 1962. I u ostatních stožárů se projevoval trend, že novější typy vycházejí lépe ve srovnání se staršími verzemi. Je tedy vidět určitý progres v této problematice. Proto je nutné i u nově navrhovaných typů stožárů brát v úvahu výsledné umístění zemnicích lan k fázovým vodičům, aby jejich ochranná schopnost byla i nadále vylepšována.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1982
- [2] HILEMAN, R. A. *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Press, 2018
- [3] *Teplotní statistiky roku 2014* [online]. Metoe.Jankovic.cz. Dostupné z: <http://www.meteo.jankovic.cz/zaznamy/rok-2014/>
- [4] *Teplotní statistiky roku 2018* [online]. Metoe.Jankovic.cz. Dostupné z: <http://www.meteo.jankovic.cz/zaznamy/rok-2018/>
- [5] JAROŠ, Tomáš. *Ochrana energetických sítí proti přepětí*, diplomová práce, ZČU, Plzeň 2010
- [6] WAGNER, C. F., HILEMAN A. R. The Lighting Stroke-II. *AIEE Trans. on PA&S*, 1961
- [7] ARMOSTRONG, H. R., WHITEHEAD, E. R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding. *IEEE Trans. on PA&S*, 1969
- [8] BROWN, G. E., WHITEHEAD, E. R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding-II. *IEEE Trans. on PA&S*, 1969
- [9] IEEE Working Group. Estimating the Lighting Performance of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1993
- [10] BERGER, K., ANDERSON, R. B., KRONINGER, H. Parameters of the Lighting Stroke. *ELECTRA*, 1975
- [11] MILOTA, Jan. *Rešerše a porovnání přepět'ových jisticích prvků vn a vvn-omezovače a bleskojistky*, bakalářská práce, ZČU, Plzeň 2006
- [12] *21 kV Polymer Surge Arrester* [online] Made-in-china.com: © 1998-2020. Dostupné z: <https://vickey668.en.made-in-china.com/product/HKTxFnaCYDWL/China-21kv-Polymer-Surge-Arrester-Lightning-Arrester-Surge-Protection.html>
- [13] EFFENBERK, Kryštof. *Přepětí v elektrických sítích a ochrana elektrických zařízení proti přepětí*, JU, České Budějovice 2015
- [14] EGE spol. s.r.o. *Katalog stožárů*, České Budějovice 1999
- [15] *Stožáry dálkového vedení* [online] Elektro.tzb-info.cz: [cit. 11.6.2007]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4183-stozary-vvn-ii>
- [16] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines," in *IEEE Std 1243-1997*, vol., no., pp.1-44, 16 Dec. 1997
- [17] Ebdrup, T., Olason, D., Bak, C. L., & Silva, F. F. D. Comparison of overhead line

lightning performance based on two different tower geometries. Cigré International colloquium on lightning and power systems, Lyon 2014

- [18] Q. Wang, T. Jahangiri, C. L. Bak, F. F. da Silva and H. Skouboe, "Investigation on Shielding Failure of a Novel 400-kV Double-Circuit Composite Tower," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 752-760, April 2018.