

**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Analytické metody stanovení pravděpodobného místa zásahu objektu
bleskovým výbojem**

**Analytical methods to determine the possible location of the strike on an
object by lightning discharge**

Bakalářská práce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stökl** Jméno: **Tibor** Osobní číslo: **457058**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analytické metody stanovení pravděpodobného místa zásahu objektu bleskovým výbojem

Název bakalářské práce anglicky:

Analytical methods to determine the possible location of the strike on an object by lightning discharge

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte současné prediktivní metody zásahu objektu bleskovým výbojem
- 2) U konkrétních objektů modelujte navrženými metodami pravděpodobné místo zásahu bleskem
- 3) Ekonomicky zhodnoťte vliv navržených opatření na celkové pořizovací náklady objektu

Seznam doporučené literatury:

Rakov, V.A. Lightning: physics and effects. New York: Cambridge University Press, 2002, ISBN 0-521-58327-6
Řezáčová, D. et al.: Fyzika oblaků a srážek, Praha: Academia, 2007, ISBN 978-80-200-1505-1
ČSN EN 62305 - Ochrana před bleskem - v platné edici

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Mikeš, Ph.D., ČVUT FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s *Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací*.“

V Praze, dne 24. 5. 2018

Tibor Stökl

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Janu Mikešovi, Ph.D., za cenné podněty, metodické a odborné vedení při psaní této závěrečné práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou vnějších ochran před bleskem. V úvodní části je popsán fyzikální jev charakterizující bleskové výboje. V návazné části práce jsou analyzovány současně používané metody určené k prevenci škod způsobených bleskovým výbojem tak, jak jsou stanoveny českou normou *ČSN EN 62305 – Ochrana před bleskem*. Vlastní přínos práce spočívá ve studiu metod identifikujících nejpravděpodobnější místo zásahu bleskem na budově a implementaci vlastního programu, ve kterém je tato metoda uplatněna. Závěrečná část bakalářské práce popisuje problematiku ekonomického zhodnocení ochran před bleskem, a to za pomoci analýzy rizika a čisté současné hodnoty.

Klíčová slova

Ochrana před bleskem, fyzika bleskového výboje, metoda valivé koule, dynamická valivá koule, metoda vrcholových úhlů, metoda mřížové soustavy

Abstract

This bachelor thesis is dealing with the external lightning protection systems. In the introductory part the physical phenomenon of a lightning is described. In the next part I analyze currently used methods which are used to reduce damages from lightning strikes in the manner that is described in Czech norm ČSN EN 62305 – Ochrana před bleskem. In this thesis my main focus is on methods which can be used to identify the most probable place that a lightning strike may hit. This knowledge is then applied in a self-made program. In the last part of this work the matter of economic evaluation of lightning protection systems is explored with the use of risk evaluation and net present value.

Key words

Lightning protection, the physics of a lightning strike, the rolling sphere method, dynamic electro-geometrical model, protective angle method, the mesh method

OBSAH

1	Úvod	9
2	Bleskový výboj	10
2.1	Vznik a rozdělení bleskového výboje	10
2.2	Škody po úderu blesku	12
2.3	Ochrana budov proti blesku	13
2.4	System ochrany před bleskem	13
3	Současné prediktivní metody	14
3.1	Metoda valící se koule	14
3.1.1	Vzdálenost proniknutí valící se koule	16
3.2	Metoda ochranných úhlů	17
3.2.1	Ochranný prostor svislé jímací tyče	18
3.2.2	Ochranný prostor vodičové jímací soustavy	19
3.3	Metoda mřížové soustavy	20
4	Dynamická valivá koule	22
4.1	Souvislost s metodou valivé koule	23
4.1.1	Poloměr valivé koule	23
4.2	Účinek většího množství středů valivé koule na pravděpodobnost zásahu	26
4.3	Pravděpodobnostní distribuce vrcholových proudů bleskového výboje	28
4.3.1	Pravděpodobnostní distribuce poloměrů bleskové koule	29
4.4	Počítačový kód	31
4.4.1	Vytvoření objektu	32
4.4.2	Vytvoření objemu vzduchu	33
4.4.3	Výpočet pravděpodobnosti zásahu povrchových bodů	36
4.4.4	Grafické vyobrazení	37
4.5	Simulace konkrétních objektů	38

4.5.1	Objekt č. 1 bez jímacích tyčí	38
4.5.2	Objekt č. 1 s jímacími tyčemi v rozích.....	39
4.5.3	Objekt č. 1 s jednou jímací tyčí ve středu budovy	40
4.5.4	Objekt č. 2 bez jímacích tyčí	41
4.5.5	Objekt č. 2 s jímacími tyčemi v rozích.....	42
4.5.6	Objekt č. 3 bez jímacích tyčí	43
4.5.7	Objekt č. 3 s jímací tyčí na jednom z objektů	44
5	Ekonomické zhodnocení ochrany před bleskem	45
5.1	Riziko.....	45
5.2	Roční náklady na ztráty	47
5.3	Čistá současná hodnota.....	48
5.4	Ekonomické zhodnocení ochran pro konkrétní objekt	48
6	Závěr.....	52
7	Reference	54

1 ÚVOD

V dnešní době neexistují žádné metody, pomocí kterých bychom mohli kontrolovat atmosférické úkazy takovým způsobem, abychom zabránili bleskovým výbojům. Proto je v některých případech nutné vytvářet nejrůznější ochrany před bleskem, jelikož údery do stavby nebo připojeného vedení mohou způsobit jak hmotnou škodu, tak i ohrožení života osob v budově nebo v jejím okolí.

Potřebnou míru ochrany před bleskem můžeme stanovit oceněním rizika, které závisí například na počtu blesků za rok v místě sledované stavby, dále na pravděpodobnosti poškození jedním úderem blesku a také na průměrném rozsahu následných ztrát.

Hlavní ochranné opatření staveb před škodou způsobenou bleskovým výbojem je nazýván systémem ochrany před bleskem *Lightning Protection System* (LPS). Tento ochranný celek je složen z vnitřních a vnějších částí.

Vnitřní LPS zabraňuje nebezpečným účinkům blesku uvnitř staveb pomocí ekvipotencionálního pospojování vodivých částí objektu a také pomocí přepětových ochran a svodičů bleskových proudů.

Vnější LPS je určen k zachycení úderu blesku do stavby pomocí jímací soustavy, která dále svede bleskový proud směrem do země použitím soustavy svodů, a nakonec pomocí uzemňovací soustavy rozptýlí bleskový proud v zemi.

Cílem bakalářské práce bylo především vytvoření programu, ve kterém je možné analyzovat jednoduché tvary budov, na kterých se určí nejrizikovější místa pro zásah blesku, a tím i místa pro instalace vnějšího LPS.

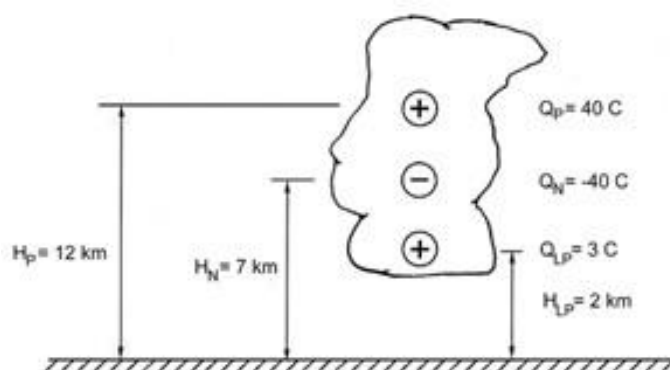
V první části fyzikálně popisují samotný úkaz bleskového výboje. V druhé části charakterizují v současné době používané metody pro určování rizikových míst na objektu tak, jak jsou definované českou normou *ČSN EN 62305 – Ochrana před bleskem*. V třetí části se zabývám rozбором konkrétní metody určování místa zásahu bleskem. V této části také navrhuji sestavení programu využívající tuto metodu, a dále modeluji konkrétní případy. V poslední části rozebírám způsob ekonomického zhodnocení ochran a toto ekonomické zhodnocení demonstruji na konkrétní budově.

2 BLESKOVÝ VÝBOJ

2.1 VZNIK A ROZDĚLENÍ BLESKOVÉHO VÝBOJE

Vznik tohoto atmosférického úkazu je podmíněn existencí bouřkového oblaku označovaného termínem *cumulonimbus*. Takovýto bouřkový oblak vznikne v důsledku silného vertikálního proudění vzduchu a vodní páry, který vytvoří typický vzhled „*vysoké věže*“, kde vrchní část má podobu „*kovadliny*“. Se zvyšující se nadmořskou výškou se průměrná teplota vzduchu snižuje. Ve chvíli, kdy je průměrná teplota menší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, se začnou některé částice vody měnit na led. Jakmile teplota klesne pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, veškerá voda se promění v led. V rozmezí teplot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ probíhá nejvíce elektrických jevů. (1)

Příčinou bleskového výboje je rozdělení elektrického náboje v těchto bouřkových oblacích. Tyto náboje jsou výsledkem interakcí velkého množství tekutých nebo zmrzlých částic vody. Pohyb těchto částic, a tedy nábojů, je určen poryvy větru a působením gravitace. V horní části oblaku se soustřeďuje kladný elektrický náboj, zatímco záporný náboj se nachází v dolní části oblaku. Kromě těchto hlavních nábojových center se v dolní části oblaku vyskytuje menší oblast kladného náboje. Jednoduchý model výskytu těchto nábojů v oblaku je vyobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1: Idealizovaný výskyt nábojů v oblaku. (1)

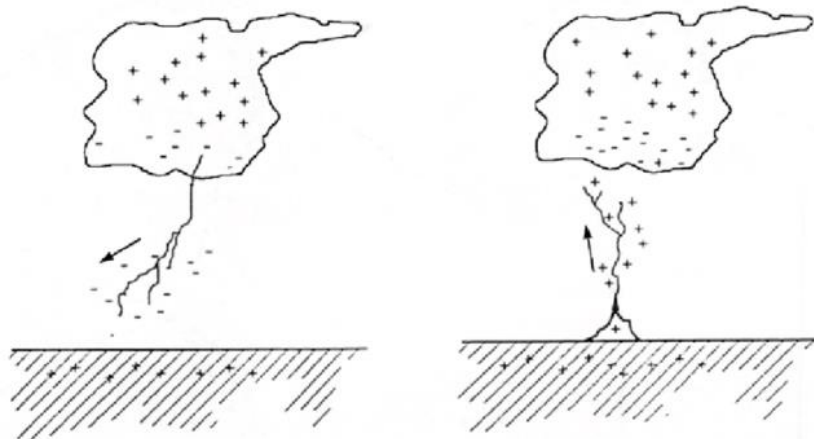
Celkové elektrické pole je vytvářeno těmito náboji společně s náboji indukovanými na zemském povrchu. Zatímco za klidného počasí je intenzita elektrického pole na zemském povrchu $130\text{--}140\text{ V/m}$, vznikem cumulonimbu elektrické pole zesílí až na desítky kV/m . Takto vzniklé elektrické pole může vyvolávat výboje na předmětech s ostrými hranami. (2)

Záporné náboje v dolní části bouřkového oblaku a kladné náboje v jeho horní části společně s náboji vzniklými na povrchu země mohou být neutralizovány blesky. Může tak docházet k bleskům mezi centry kladného a záporného náboje v oblaku nebo mezi oblakem a povrchem země. Výboje mezi oblaky jsou častější, ale nejlépe prozkoumány jsou výboje k zemi.

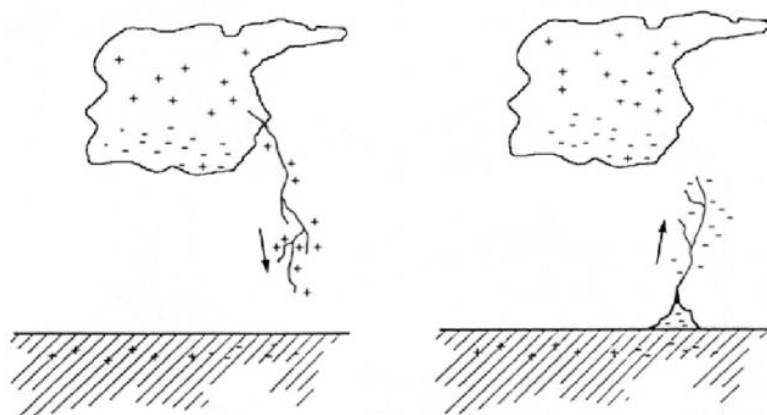
Bleskové výboje k zemi můžeme dělit do čtyř kategorií podle toho, jakým způsobem se přesouvá náboj mezi mrakem a zemí:

- a) *sestupný negativní blesk,*
- b) *vzestupný negativní blesk,*
- c) *sestupný pozitivní blesk a*
- d) *vzestupný pozitivní blesk.*

Tyto výboje můžeme chápat jako přesun náboje z mraku k zemi. Jednotlivé druhy blesků jsou vyobrazeny na obrázku 2.



(a) *Sestupný negativní blesk* (b) *Vzestupný negativní blesk*



(c) *Sestupný pozitivní blesk* (d) *Vzestupný pozitivní blesk*

Obrázek 2: Jednotlivé typy blesků. (1)

Z těchto čtyř druhů se nejčastěji objevuje sestupný negativní blesk. Zahrnuje asi 90 % případů všech výbojů. Pozitivnímu sestupnému blesku přiřazujeme 10 % blesků. Oba vzestupné výboje nastávají pouze pro objekty vyšší než 100 metrů. (1)

Samotný negativní sestupný výboj začíná v oblaku, odkud se šíří po rozvětvené a slabě svítící dráze směrem k zemi. Tento výboj se nazývá *vůdčí stupňovitý výboj*. Když se špička stupňovitého výboje přiblíží na několik desítek metrů k zemi, začne se od jejího povrchu pohybovat *vstřícný výboj*, který vzniká v důsledku silného elektrického pole na předmětech s ostrými hranami. Ve chvíli, kdy se oba výboje setkají, vytvoří se vodivá cesta mezi centrem v oblaku a povrchem země. Náboje se bleskem neutralizují. S časovým odstupem asi 40 ms může následovat další výboj, který sleduje dráhu předchozího. Blesk je nejčastěji tvořen dvěma až třemi dílčími výboji. Kladné blesky se vyskytují zejména v pozdních fázích vývoje bouřkového oblaku, tedy v době, kdy záporné centrum náboje slábne a kladný náboj klesá dolů v sestupných proudech. (2)

2.2 ŠKODY PO ÚDERU BLESKU

Blesky dokáží způsobovat menší, ale často i velice rozsáhlé škody několika způsoby. Typickým příkladem takové škody je lesní požár po zásahu stromu bleskem. Jelikož se bouřky vyskytují hlavně v letních měsících, může se požár kvůli většímu suchu snadněji šířit po okolí. Takovéto požáry mohou způsobit vysoké ekologické škody.

Při zásahu člověka bleskem je riziko úmrtí velmi vysoké. Největší nebezpečí pro člověka nastává na vyvýšených plochách nebo na volném prostranství. V době bouřky je proto doporučeno nevycházet z domu nebo případně najít co možná nejbezpečnější úkryt.

Při zásahu bleskem do budovy se škody projevují na základě charakteristických vlastností této budovy. Typ a rozsah škod pak závisí na konstrukci nebo účelu této stavby, na vybavení a počtu obyvatel v této budově. Rovněž mají vliv připojené elektrické sítě a instalované ochranné zařízení určené ke snížení těchto škod.

Tyto škody vznikají zapříčiněním určitých základních faktorů, které jsou pro úder blesku specifické. Při výběru ochranných opatření se zaměřujeme na omezení jejich účinků, které zahrnují tepelné působení, mechanické namáhání nebo elektrické průrazy.

2.3 OCHRANA BUDOV PROTI BLESKU

Ideální ochranou před bleskem by bylo uzavření sledované budovy dovnitř uzemněného a dokonale vodivého stínění, které by zabránilo pronikání bleskového proudu a působení elektromagnetického pole. V praxi je toto řešení samozřejmě nereálné, ať už kvůli vysoké ceně nebo nesouvislému stínění.

K základní ochraně budov proti působení bleskového výboje se využívá ochrana proti přímému úderu blesku známá jako hromosvod. Hromosvod vytváří vodivou cestu pro bleskový výboj. Musí ho zachytit, svést ho do země a tam ho rozptýlit.

Zachycování výboje má za úkol jímací zařízení, které je tvořené vzájemně propojenými vodiči na povrchu budovy. Tento jímací systém může být tvořen mřížovou soustavou propojených vodičů nebo může být tvořen jímacími tyčemi a závěsnými lany. Jímací systém nemusí být součástí budovy.

Při zásahu bleskem do hromosvodu se vytvářejí potenciálové rozdíly mezi objekty, které jsou spojeny s potenciálem zemniče a objekty, které s ním spojené nejsou. Rozdíl těchto potenciálů může způsobit nebezpečné jiskření, které je životu nebezpečné. Proto další ochranou proti blesku je potenciálové pospojování vodivých objektů v budově.

2.4 SYSTÉM OCHRANY PŘED BLESKEM

Celkový souhrn všech ochranných opatření proti úderu blesku, sloužící ke snížení škod způsobených přímým zásahem do dané budovy, nazýváme *Systém ochrany před bleskem* (LPS). (3)

LPS se rozděluje do čtyř tříd, kde každé číslo označuje různou ochranou úroveň před bleskem.

Třída LPS	Příklady
I	nemocnice, banky, stanice mobilních operátorů, vodárny, elektrárny
II	školy, supermarkety, katedrály
III	rodinné domy a obytné domy se standardní výbavou, zemědělské objekty
IV	objekty a haly bez výskytu osob a vnitřního vybavení

Tabulka 1: Příklady možného zatřídění objektů. (4)

Každá třída LPS má specifické parametry ochranných prvků, kterými chrání budovu. Tyto jednotlivé parametry jsou rozebírány v dalších částech této práce, například poloměr valící se koule, velikost ok mřížového systému a ochranný úhel jímací tyče. Výběr třídy LPS je dán řízením rizika, což je poměrná hodnota pravděpodobných ročních ztrát, které na budově mohou nastat.

3 SOUČASNÉ PREDIKTIVNÍ METODY

V současné době musí být součástí jímací soustavy instalované tak, aby byly umístěny na rozích, na exponovaných místech a na hranách. Metody, podle kterých určíme toto umístění, upravuje norma ČSN EN 62305-3 (3). Tyto metody jsou:

- Metoda valící se koule: Tato metoda je vhodná pro všechny případy.
- Metoda ochranných úhlů: Tato metoda je vhodná pro jednoduché tvary budov, ale je ohraničena výškou jímací soustavy.
- Metoda mřížové soustavy: Tato metoda je vhodná pro ochranu rovinných ploch.

3.1 METODA VALÍCÍ SE KOULE

Při použití této metody je umístění jímací soustavy dostatečné, když žádný bod chráněného prostoru není v kontaktu s koulí o poloměru r valící se po zemi, kolem a přes vrchol stavby ze všech možných směrů. Proto by se měla koule dotýkat jen země a/nebo jímací soustavy.

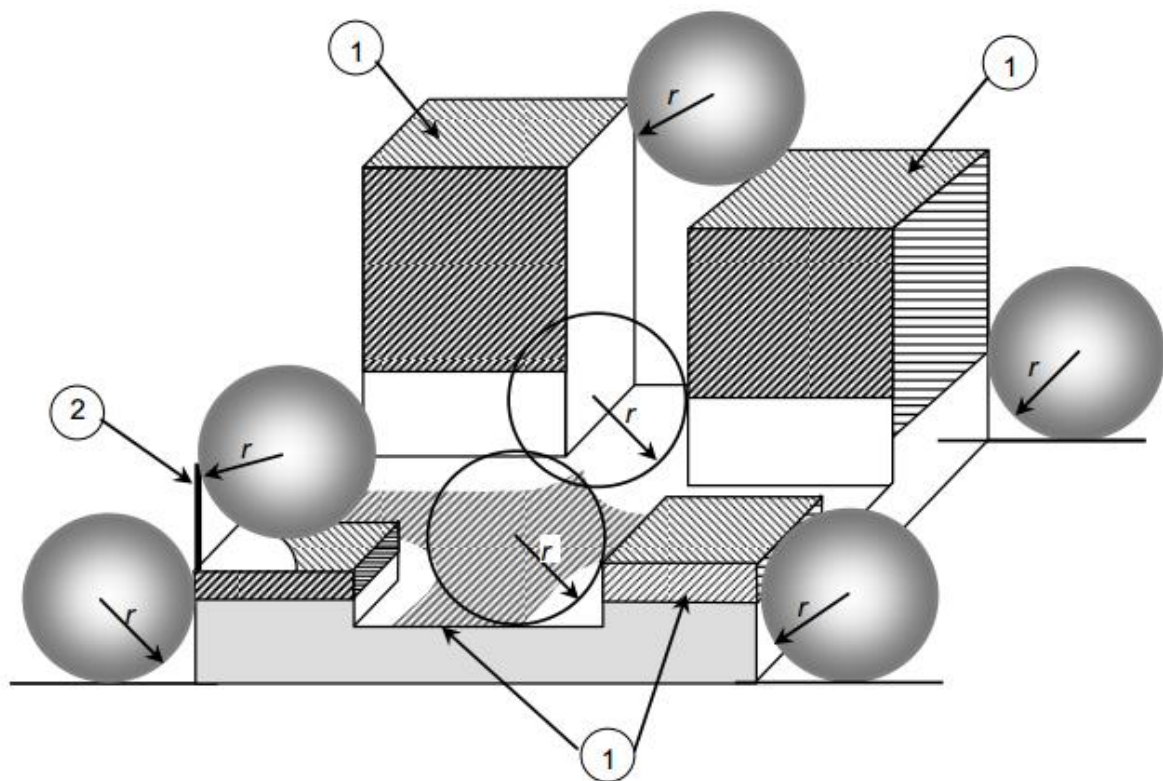
Poloměr r valící se koule je závislý na třídě LPS podle tabulky 2.

Obrázek 3 zobrazuje uplatnění metody valící se koule pro různé stavby. Koule o poloměru r se valí kolem a přes celou stavbu, až se koule dotkne země nebo jakékoli trvalé konstrukce nebo objektu, který je v kontaktu se zemí a který může sloužit jako vodič blesku. Úder blesku by mohl nastat v místě, kde se valící koule dotýká stavby. U takovýchto bodů musí být zajištěna ochrana jímacím vedením. Je-li použita metoda valící se koule pro výkresy stavby, pak by stavba měla být posuzována ze všech směrů, aby bylo zajištěno, že žádná část nevyčnívá do

nechráněného prostoru – bod, který by mohl být lehce přehlédnutelný, je-li na výkrese posuzován jen pohled přední (nárys), boční (bokorys) anebo půdorys. (3)

Třída LPS	Poloměr valící se koule r (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Tabulka 2: Závislost poloměru valící se koule na třídě LPS (3)



Legenda

1 Šrafované plochy jsou vystaveny úderům blesku.

2 Stožár na stavbě.

r Poloměr valící se koule podle tabulky 2

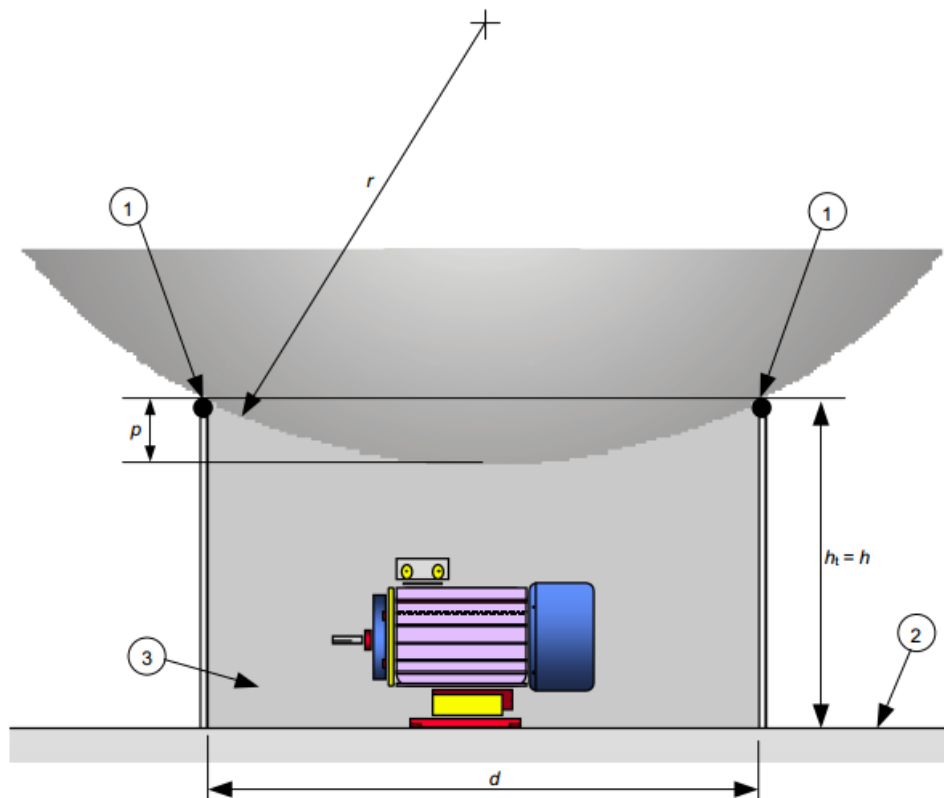
Obrázek 3: Návrh jímací soustavy LPS podle metody valící se koule. (3)

3.1.1 Vzdálenost proniknutí valící se koule

V případě dvou paralelních vodorovných jímacích vodičů LPS umístěných nad vodorovnou referenční rovinou, jak je znázorněno na obrázku 4, může být vzdálenost proniknutí p valící se koule pod úroveň vodičů v prostoru vypočten ze vzorce:

$$p = r - \left[r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{r 1})$$

Průvės (velikost průniku) p by měl být menší než h_t minus výška chráněného objektu (motor na obrázku 4). (3)



Obrázek 4: Ochranný prostor mezi dvěma paralelními vodorovnými jímacími dráty. (3)

Legenda

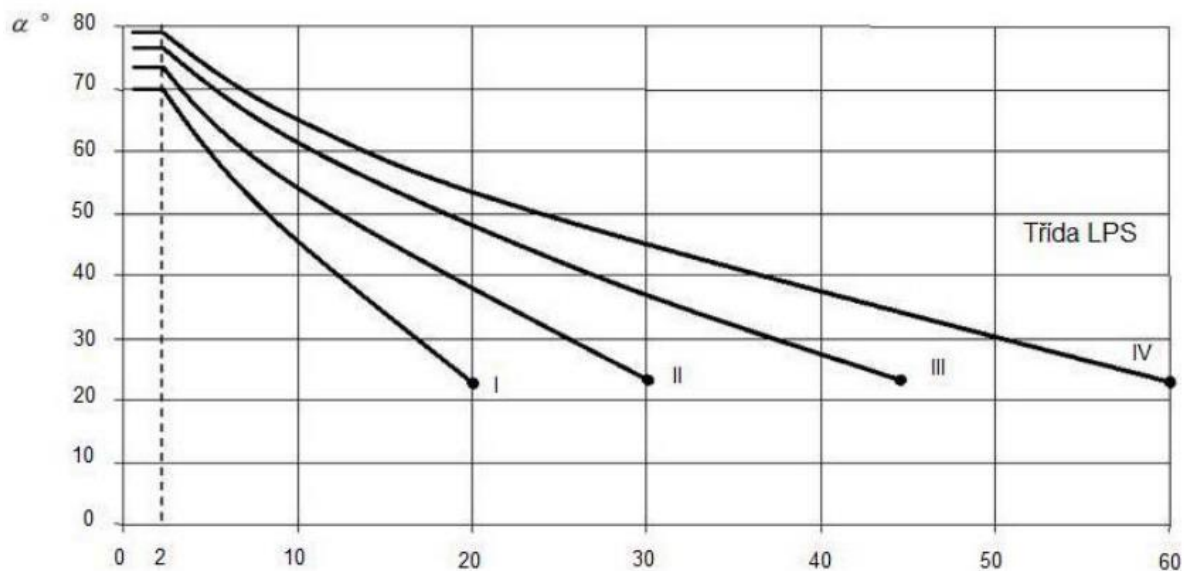
- 1 Vodorovné dráty.
- 2 Referenční rovina.
- 3 Prostor, který je chráněn dvěma paralelními vodorovnými jímacími dráty, nebo dvěma jímacími tyčemi.
- h_t Fyzická výška jímacích tyčí nad referenční rovinou.
- p Vzdálenost proniknutí valící se koule.
- h Výška jímací tyče
- r Poloměr valící se koule.
- d Vzdálenost mezi dvěma paralelními vodorovnými jímacími dráty nebo dvěma jímacími tyčemi.

3.2 METODA OCHRANNÝCH ÚHLŮ

Jímací vodiče, tyče, stožáry a dráty by měly být umístěny tak, aby všechny části chráněné stavby byly uvnitř obalového povrchu, který vznikne projekcemi body jímací soustavy k referenční rovině pod úhlem α svisle ve všech směrech.

Ochranný úhel α by měl odpovídat obrázku 5, kde h je výška jímače nad chráněným povrchem.

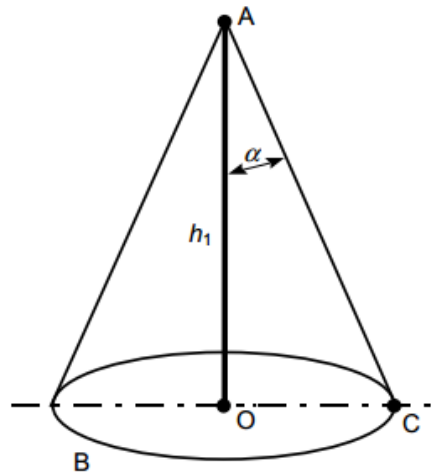
Tato metoda není vhodná pro stavby vyšší než poloměr valící se koule pro vybranou hladinu ochrany LPS. (3)



Obrázek 5: Ochranný úhel odpovídající třídě LPS. (3)

3.2.1 Ochranný prostor svislé jímací tyče

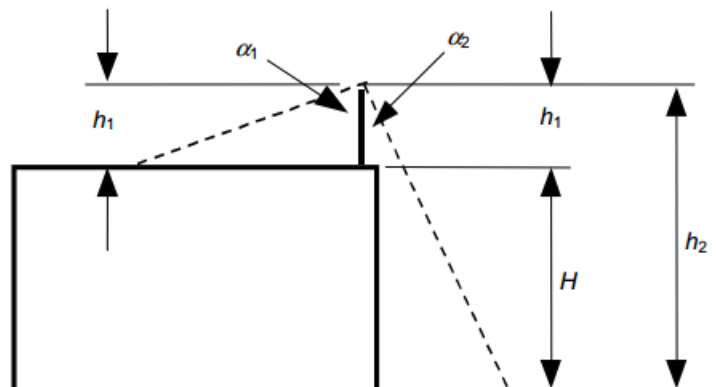
Ochranný prostor svislé jímací tyče bude vytvořen pravoúhlým kuželem s vrcholem umístěným v ose jímací tyče, polovičním vrcholovým úhlem α , který je závislý na třídě LPS a na výšce jímací soustavy dle obrázku 5. Příklady ochranných prostor jsou zobrazeny na obrázcích 6 a 7.



Obrázek 6: Chráněný prostor svislé jímací tyče. (3)

Legenda

- A Vrchol jímací tyče.
- B Referenční rovina.
- OC Poloměr ochranného prostoru.
- h_1 Výška jímací tyče nad referenční rovinou.
- α Ochranný úhel podle obrázku 5.



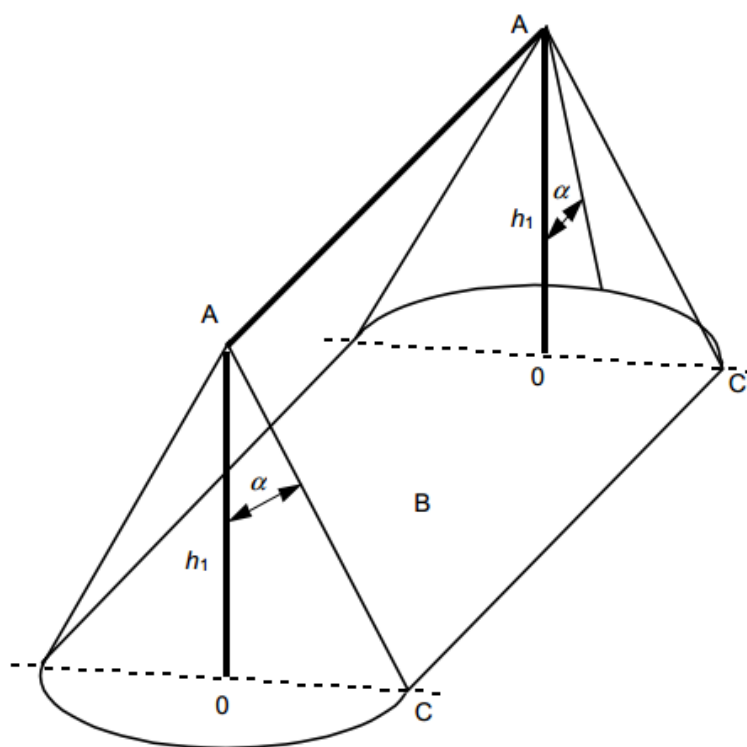
Obrázek 7: Ochranný prostor svislé jímací tyče. (3)

Legenda

- h_1 Fyzická výška jímací tyče.
- H Výška objektu

3.2.2 Ochranný prostor vodičové jímací soustavy

Prostory, které jsou chráněny vodičovou jímací soustavou, jsou definovány sestavou prostorů chráněných zdánlivými svislými tyčemi, které mají mezi vrcholy vodič. Příklady ochranných prostorů jsou zobrazeny na obrázku 8.



Obrázek 8: Ochranný prostor vodičové jímací soustavy. (3)

Legenda

h_1 Fyzická výška jímací tyče.

3.3 METODA MŘÍŽOVÉ SOUSTAVY

Metoda mřížové soustavy

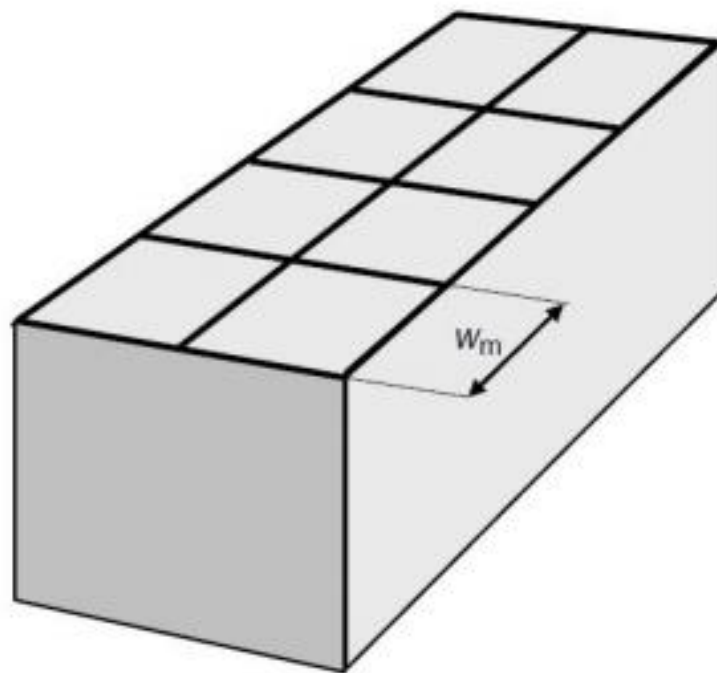
Pro ochranu plochých povrchů tak, aby byl chráněn celý prostor, se považuje za vhodné použít mříž, a to za splnění následujících předpokladů.

- a) jímací vodiče jsou umístěny na:
 - hranách střechy,
 - přesazích střechy,
 - hřebenech střechy, pokud je sklon střechy větší než 1/10,
 - bočních plochách stavby, které jsou vyšší než 60 m od úrovně 80 % výšky stavby;
- b) rozměry jímací sítě nejsou větší než hodnoty uvedené v tabulce 3;
- c) síť jímací soustavy je provedena tak, aby bleskový proud měl vždy alespoň dvě různé kovové dráhy k zemi a aby žádná kovová instalace nevyčnívala ven z prostoru chráněného jímací soustavou;
- d) jímací vodiče jsou vedeny, pokud možno, nejkratší a nejprímější dráhou.

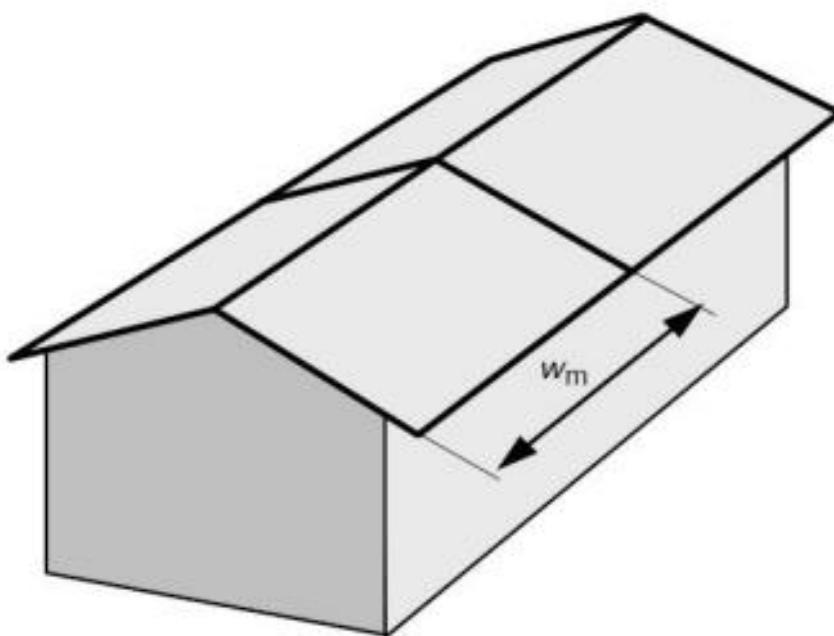
Třída LPS	Velikost ok w_m (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Tabulka 3: Maximální hodnoty velikostí ok přiřazené třídě LPS. (3).

Příklady neizolovaného LPS s použitím metody mřížové soustavy jsou znázorněny na obrázku 9 pro stavbu s plochou střechou a na obrázku 10 pro stavbu se šikmou střechou.



Obrázek 9: Jímací soustava LPS na stavbě s plochou střechou. (3).



Obrázek 10: Jímací soustava LPS na stavbě se skloněnou střechou. (3).

Legenda pro obrázek 9 a 10.

w_m Velikost ok mříže.

4 DYNAMICKÁ VALIVÁ KOULE

Klasickou metodou valící se koule zjišťujeme všechna možná místa na objektu, kde jsou možné údery blesku, a na která se pak umístí jímací zařízení. Nezískáme ale žádnou informaci o pravděpodobnosti úderu blesku do těchto jímacích zařízení.

Při pozorování jednoduché budovy ve tvaru kvádru lze zjistit, že polohováním valivé koule může být přiřazen na vodorovné ploše střechy každému potenciálnímu místu úderu blesku vždy jen jeden střed valivé koule, zatímco na hranách a rozích střechy se může valivá koule převalovat o 90° . Toto převalování má za následek, že tato místa mají podstatně více středů valivé koule.

Pokud bychom vycházeli z klasické metody valivé koule, představují jak plochá střecha, tak také hrany a rohy střechy potenciální místa zásahu blesku, která je potřeba chránit jímacími zařízeními. Nezahrnuli bychom ale skutečnost, že úder blesku do hrany a rohu střechy je mnohem pravděpodobnější.

Při použití *dynamické valivé koule* analyzujeme všechny možné velikosti valivé koule, které se budovy dotýkají. Velikost poloměru každé z těchto koulí je spojena s vrcholovou hodnotou bleskového proudu, Ta je spojena s pravděpodobností výskytu podle pravděpodobnostní funkce.

Tato metoda tak může vztahovat pravděpodobnosti úderu blesku na konkrétní místa. Tímto způsobem můžeme ohrožené oblasti lépe porovnávat a umožní nám cílené umístění jímacích zařízení tam, kde je jich nejvíce potřeba. Můžeme se tak vyhnout použití velkého množství jímacích tyčí v místech, kde jsou z části zbytečné k dosažení stejného ochranného účinku (5).

4.1 SOUVISLOST S METODOU VALIVÉ KOULE

Při přibližování vůdčího stupňovitého výboje k zemi se začne na objektech vytvářet elektrické pole, které na předmětech s ostrými hranami může vytvořit vstřícný výboj. Bod jeho vzniku je bodem zásahu bleskovým výbojem. Po spojení vstřícného výboje se stupňovitým vůdčím výbojem se jejich náboje neutralizují vytvořením bleskového výboje. (6)

4.1.1 Poloměr valivé koule

Podle teorie valivé koule se konec vůdčího stupňovitého výboje může přiblížit pouze na určitou kritickou vzdálenost k objektu předtím, než dojde ke spojení se vstřícným výbojem, kdy vznikne blesk. Nejmenší vzdálenost mezi koncem vůdčího stupňovitého výboje a počátečním bodem vstřícného výboje nazýváme poloměrem valivé koule. Můžeme si pak představit kulovitý objem s poloměrem valivé koule se středem na špičce vůdčího výboje. V okamžiku, kdy první bod objektu na zemi, ke kterému se vůdčí výboj přibližuje, vstoupí do této smyšlené koule, vznikne vodivé spojení a výboj se pomocí bleskového výboje neutralizuje. (6)

Podmínky, kdy gradient elektrického pole dosáhne těchto hodnot, úzce souvisí s hustotou náboje podél vůdčího stupňovitého výboje. Z experimentálních měření bylo také zjištěno, že velikost poloměru bleskové koule se dá vyjádřit pomocí velikostí vrcholné hodnoty proudu blesku podle vztahu (6):

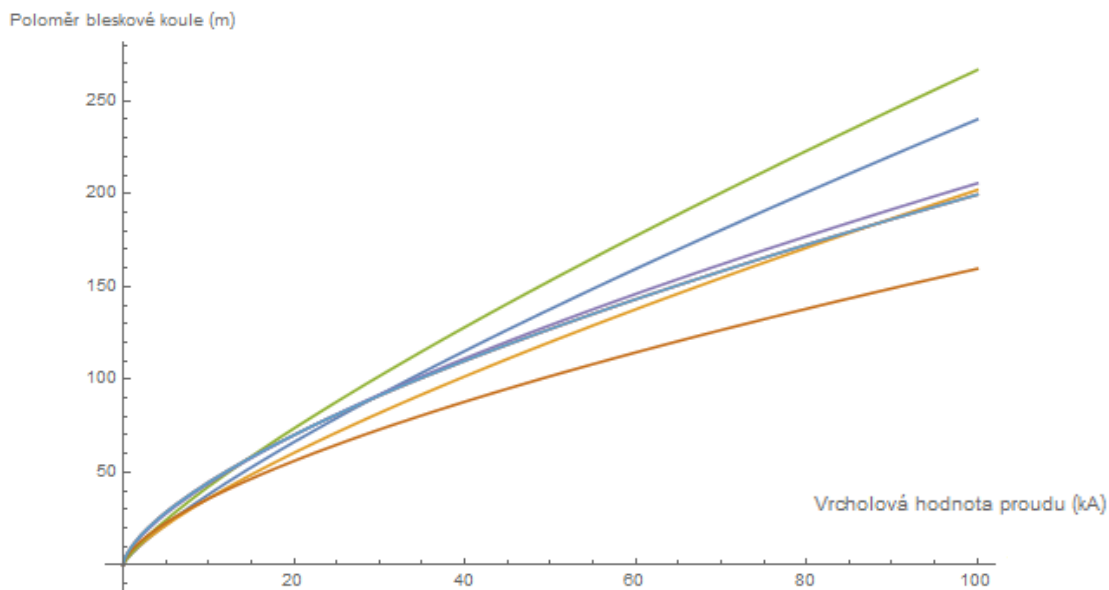
$$r = aI_p^b \quad (r 2)$$

Kde I_p je vrcholová hodnota bleskového proudu a parametry a a b jsou konstanty. Hodnoty vhodné pro tyto konstanty se liší na základě různých názorů výzkumníků nebo daných standardů norem. Navrhnuté hodnoty těchto konstant různými autory jsou popsány v tabulce 4.

Autor	a	b	Ksg (proporcionální konstanta)
Armstrong a Whitehead (7)	6,7	0,8	0,9
Brown a Whitehead (8)	7,1	0,75	0,9
Gilman a Whitehead (9)	6,7	0,8	1
Love (10)	10	0,65	1
Whitehead dotazník CIGRE (11)	9,4	0,67	1
Pracovní skupina IEEE (12)	8	0,65	0,64-1
Pracovní skupina IEEE (13)	10	0,65	0,55-1

Tabulka 4: Parametry koeficientů uvedeného vztahu. (6)

Existuje tedy mnoho validních způsobů, jakými můžeme vyjádřit vztah mezi vrcholovou hodnotou proudu a poloměrem valivé koule. Na obrázku 11 je vynesena tento vztah pro různé návrhy hodnot konstant a a b odlišnými autory.



Obrázek 11: Závislost poloměru na vrcholové hodnotě proudu pro různé konstanty.



V této práci využívám vztah, který byl přijat českou normou ČSN EN 62305-1. Tato norma pracuje s výrazem popsaným Lovem (viz tabulka č. 4) (6) a má tedy tuto podobu:

$$r(m) = 10 * I^{0,65}(kA) \quad (r 3)$$

Vycházíme-li z metody valivé koule, pracujeme s konstantní vrcholovou hodnotou bleskového proudu, tedy i s konstantním poloměrem, podle kterého posuzujeme daný objekt. Tyto poloměry jsou rozděleny do čtyř bezpečnostních tříd. V metodě dynamické valivé koule nepracujeme s jednou vybranou vrcholovou hodnotou, ale s proměnnou vrcholovou hodnotou a poloměr pak určujeme pomocí výše zmiňovaného vztahu.

4.2 ÚČINEK VĚTŠÍHO MNOŽSTVÍ STŘEDŮ VALIVÉ KOULE NA PRAVDĚPODOBNOST ZÁSAHU

V současně používaných metodách se pravděpodobnosti zásahu nezjišťují, ale při instalaci vnějšího systému ochrany se pravděpodobná místa zásahu bleskem v úvahu berou. Tato místa jsou nejčastěji exponovaná místa, teda místa rohů, hran nebo hřebenů objektu.

Tato skutečnost byla zjištěna sledováním systematickosti škod způsobených bleskovým výbojem na budovách a jiných objektech. Byly provedeny studie, které přímo sledovaly desítky budov v dlouhém období, které byly opakovaně zasaženy bleskem (14).

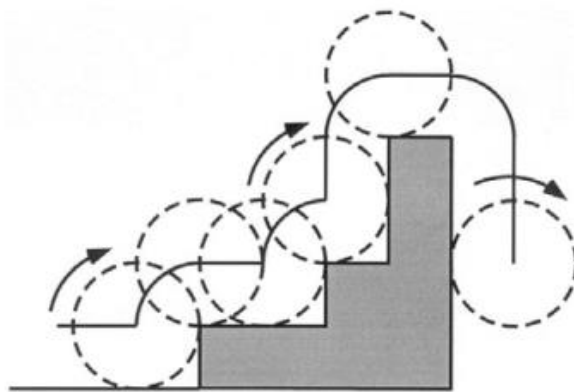
Z těchto studií bylo zjištěno, že většina zásahů bleskem byla lokalizovaná na rozích a hranách střech nebo blízko nich. V tabulce 5 je zaznamenána nejčastější lokace poškození bleskem jako procentuální zastoupení.

Lokace poškození bleskem	% zastoupení
(A) ostré body/vyčnívající rohy	>90
(B) horizontální/šikmé hrany	<5
(C) vertikální hrany (pod A)	<2
(D) rovinné plochy (blízko A)	<1
(E) prohnuté kouty, jiné místa	0

Tabulka 5: Nejčastěji zasažená místa na objektu. (15).

Vysvětlení této skutečnosti se zakládá na poznacích metody valivé koule. Jak jsem uvedl již výše, v této metodě pracujeme s virtuální valivou koulí s určitým poloměrem, ke které je přiřazena určitá vrcholná hodnota proudu bleskového výboje.

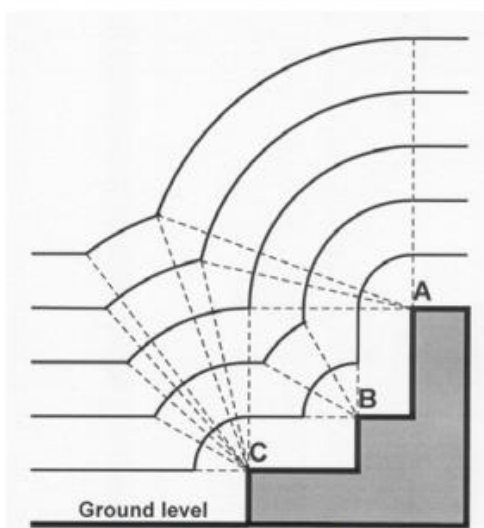
Pozorujeme vůdčí stupňovitý výboj, který je lokalizován ve středu valivé koule. V okamžiku, kdy se tato koule převaluje přes specifický bod na budově, pohyb tohoto středu opíše kulovitý povrch pro jakékoli hrany a rohy na objektu. Díky tomu můžeme přiřadit pro kterýkoli specifický bod na hraně nebo rohu hned několik středů valivé koule v prostoru, jejichž vzdálenost od objektu je rovna poloměru této bleskové koule. Tento proces je znázorněn na obrázku 12.



Obrázek 12: Pohyb valivé koule po budově. (15)

Množství středů valivé koule, které můžeme přiřadit k jednomu povrchovému bodu, závisí na tvaru objektu, jelikož okolní povrchové body budou mít svoje vlastní středy valivé koule. Pravděpodobnost zásahu povrchového bodu bleskovým výbojem o určité velikosti bude potom proporcionální s počty středů valivé koule, které jsou spjaté s tímto povrchovým bodem pro daný poloměr.

Na obrázku 13 můžeme pozorovat, jak se mění počet středů valivé koule spjatých s povrchovým bodem se zvětšujícím se poloměrem. Můžeme si všimnout, že tento počet se pro každý bod může zvětšovat i zmenšovat. Čím bude poloměr valivé koule větší, tím se bude zvětšovat pravděpodobnost zásahu výše položených bodů na objektu.



Obrázek 13: Počet středů valivé koule při změně poloměru. (15)

Tento poznatek můžeme využít k vytvoření efektivnější vnější ochrany před bleskem nezávisle na použité prediktivní metodě. Tato skutečnost má klíčovou roli při určování pravděpodobnosti zásahu bleskem na konkrétní místo.

4.3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ DISTRIBUCE VRCHOLOVÝCH PROUDŮ BLESKOVÉHO VÝBOJE

V současné době zjišťujeme parametry vrcholových bleskových proudů s použitím vzdáleně měřených elektrických a magnetických polí. Můžeme tak vytvořit statistický model určením středních hodnot a rozptylu těchto naměřených proudů. Dnes se předpokládá, že se parametry bleskových proudů dají aproximovat logaritmicko normální distribucí. (6) V této spojitě distribuci pracujeme s náhodnou jednorozměrnou veličinou x , jejíž přirozený logaritmus $\ln(x)$ má normální rozdělení se střední hodnotou μ a směrodatnou odchylkou σ . V normě ČSN EN 6205-1 (16), která je založena na výsledcích *Mezinárodní rady pro velké elektrické sítě (International Council on Large Electric Systems - CIGRE)*, je přijato, že statické rozložení vrcholových proudů lze popsat touto pravděpodobnostní distribucí. Funkční vztah pro toto rozdělení, kde argumentem je vrcholová hodnota bleskového proudu, je následující:

$$\int f(x) = \int \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{-\frac{[\ln(\frac{x}{\mu})]^2}{2 \cdot \sigma^2}} = 1 \quad (r 4)$$

σ – rozptyl

μ – střední hodnota

Hodnoty směrodatné odchylky a střední hodnoty se liší v závislosti na tom, zda se jedná o záporný nebo kladný bleskový výboj.

Stanovení těchto hodnot je neustále předmětem výzkumu. V současné době bylo provedeno hned několik studií. Výsledky některých studií pro záporně nabitě blesky jsou popsány v tabulce 6.

Studie	Střední hodnota vrcholného proudu (kA)	Směrodatná odchylka
Anderson a Eriksson (17)	31,1	0,21
Eriksson (18)	44	-
Berger (19)	30	-
Garbagnati (20)	33	0,25
Saba (21)	13,5	-
Visacro (22)	45	0,37
Takami a Okabe (23)	29,3	-

Tabulka 6: Rozptyl a střední hodnota záporných blesků popsána různými autory. (6)

Můžeme si všimnout, že výsledky těchto studií se v některých případech mohou značně lišit a určení těch nejpřesnějších výsledků může být proto složité. V tomto dokumentu pracuji s hodnotami rozptylu a střední hodnoty, které jsou popsány normou ČSN EN 6205-1. Tyto hodnoty jsou založeny na výsledcích CIGRE a jsou popsány v tabulce 7.

	Záporný blesk	Kladný blesk
Střední hodnota vrcholového proudu (kA)	33,3	33,9
Rozptyl	0,263	0,527

Tabulka 7: Rozptyl a střední hodnota pro kladný a záporný výboj popsány normou ČSN EN 6205-1.

4.3.1 Pravděpodobnostní distribuce poloměrů bleskové koule

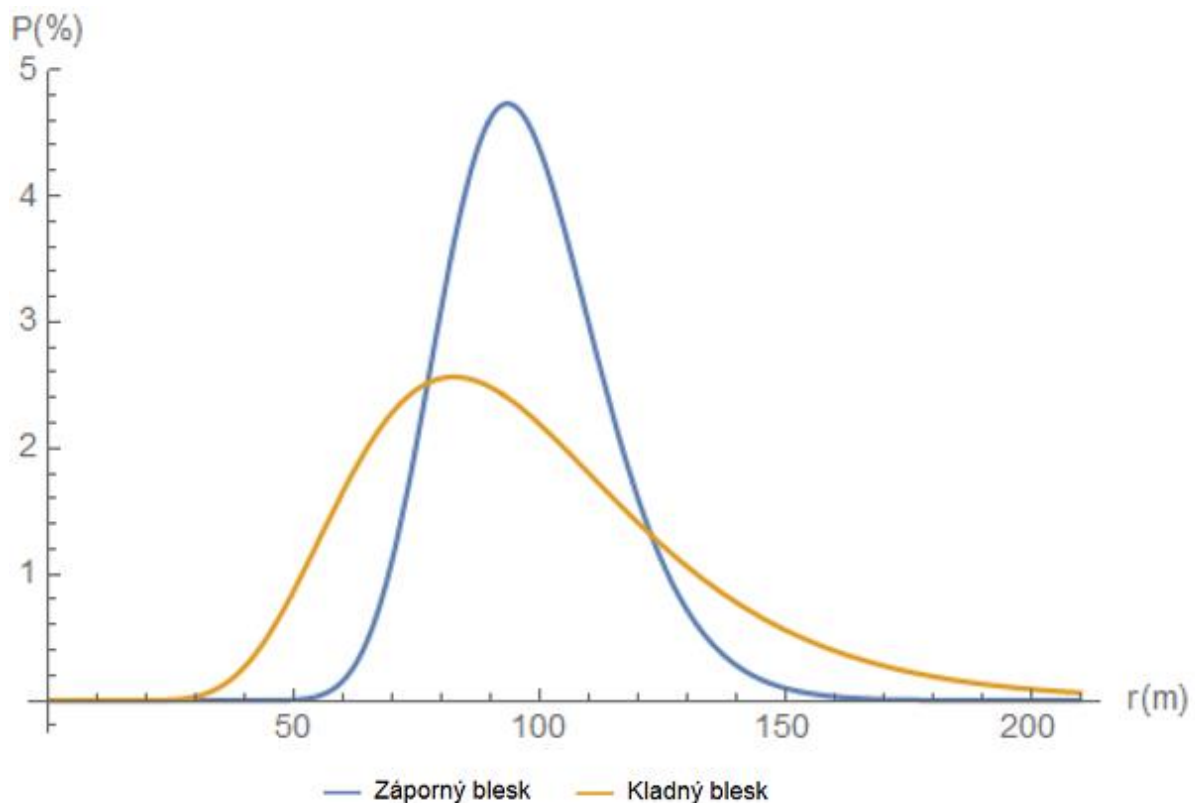
Pro mé výpočty je nutné spojit vztah pro statické rozložení vrcholových proudů a vztah pro výpočet *poloměru bleskové koule*. Toho docílím přepsáním vztahu pro výpočet poloměru bleskové koule, kde vyjádřím vztah pro vrcholovou hodnotu proudu:

$$I = \left(\frac{r}{10}\right)^{\frac{1}{0,65}} \quad (r 5)$$

Tento vztah může být dosazen do uvažované pravděpodobnostní funkce, přičemž se musí dbát na zachování pravidel pro integrování, aby se zachovaly charakteristiky pravděpodobnostní funkce. (24) Výsledkem je spojité pravděpodobnostní rozložení poloměrů valivé koule. Parametry střední hodnoty a směrodatné odchylky používám z normy ČSN EN 62305-1 v tabulce 9. (16)

$$f(r) = \frac{\frac{1}{0,65} \left(\frac{1}{10}\right)^{0,65} r^{0,35}}{\left(\frac{r}{10}\right)^{0,65} * \sigma * \sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{\left(\ln\left(\frac{r}{10}\right)^{0,65} \frac{1}{\mu}\right)^2}{2 * \sigma^2}} \quad (r \text{ 6})$$

Toto pravděpodobnostní rozložení pro kladné i záporné bleskové výboje podle výše použité tabulky je vyobrazeno na obrázku 14.



Obrázek 14: Pravděpodobnostní rozložení poloměrů bleskové koule.

4.4 POČÍTAČOVÝ KÓD

Pro naprogramování a realizaci tohoto konceptu výpočtu pravděpodobnosti zásahu bleskem jsem se rozhodl využít program *Wolfram Mathematica*. Mathematica je moderní výpočetní systém, který se běžně využívá v oblastech náročných výpočetních operací, jako jsou například umělé neuronové sítě, strojové učení nebo data science.

Při psaní kódu jsem se snažil vytvořit prostředí, kde je možné zkoumat pravděpodobná místa zásahu bleskem na jednoduchých tvarech objektu. Konkrétněji jsou to objekty ve tvaru kvádrů, u kterých je možné zadat jejich požadovanou délku, šířku a výšku. Tyto rozměry jsou zadávány v metrech a při tvorbě objektu se vytvářejí jednotlivé body, kde sousední body jsou od sebe vzdáleny vždy jeden metr. To znamená, že například při vytvoření objektu o rozměrech 3x3x3 m se vytvoří list s 27 body představujícími tento objekt. Dále je možné k tomuto vytvořenému objektu přidat jednotlivé body možného zásahu, které mohou představovat jímací tyče.

Pro určení pravděpodobného místa zásahu bleskovým výbojem na objektu jsem použil následující postup.

Celý povrch budovy, včetně jejich jímacích tyčí, společně s povrchem země kolem této budovy, je diskretizován do povrchových bodů. Volný prostor kolem této budovy bude zase diskretizován do prostorových bodů. V mojí práci jsem si zvolil velikost diskretizace jednoho metru. Dále za použití geometrických vztahů jsem určil pro každý prostorový bod jeho nejbližší povrchový bod a stanovil vzdálenost mezi nimi.

Tuto vzdálenost považuji za *poloměr valivé koule*, kdy tento poloměr představuje délku koncové průrazné dráhy. Za použití výše vyjádřené pravděpodobnostní funkce určím pravděpodobnost spojenou s tímto poloměrem.

Jelikož k jednomu povrchovému bodu může být přiřazeno několik prostorových bodů s různými poloměry valivé koule, musím tyto jednotlivé vypočtené pravděpodobnosti sečíst. Tento součet pak podělím součtem všech vypočtených pravděpodobností pro každý povrchový bod a zjistím tak pravděpodobnost zásahu pro tento specifický bod. (25)

4.4.1 Vytvoření objektu

Samotný kód pro vytvoření objektu má tuto podobu:

```
Clear[x, y, z]
a11 = Table[{{x, 1, z}, 0}, {z, 0, Vyska - 1}];
a12 = Flatten[Table[a11, {x, 1, Delka}], 1];
Clear[x, y, z]
a21 = Table[{{1, y, z}, 0}, {z, 0, Vyska - 1}];
a22 = Flatten[Table[a21, {y, 1, Sirka}], 1];
Clear[x, y, z]
a31 = Table[{{x, Sirka, z}, 0}, {z, 0, Vyska - 1}];
a32 = Flatten[Table[a31, {x, 1, Delka}], 1];
Clear[x, y, z]
a41 = Table[{{Delka, y, z}, 0}, {z, 0, Vyska - 1}];
a42 = Flatten[Table[a41, {y, 1, Sirka}], 1];
Clear[x, y, z]
a51 = Table[{{x, y, Vyska - 1}, 0}, {y, 1, Sirka}];
a52 = Flatten[Table[a51, {x, 1, Delka}], 1];
Objekt = DeleteDuplicates[Join[a12, a22, a32, a42, a52, Rod]];
```

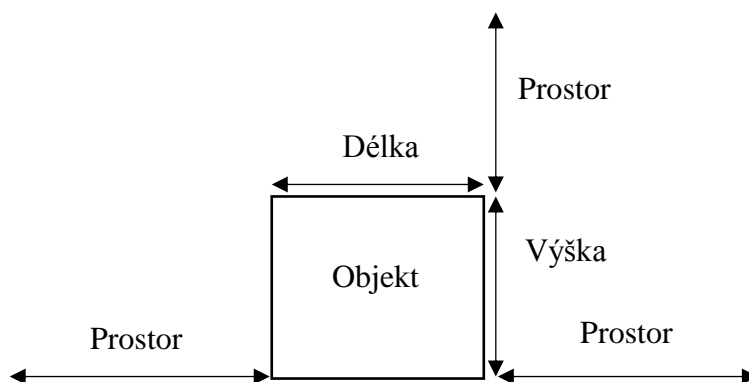
Výsledkem tohoto kódu je list souřadnic jednotlivých bodů objektu. Tyto body jsou výhradně povrchové body objektu. Body, které se nachází v objemu, nejsou do listu zahrnuté, jelikož nehrají roli při výpočtu pravděpodobnosti zásahu. To samé platí pro povrchové body dotýkající se země. Samotný bod v tomto listu má tuto podobu:

$$\{\{x, y, z\}, 0\}$$

Kde x , y a z představují souřadnice a při dalších výpočtech se na místo nuly určí pravděpodobnost zásahu bleskem spojená s tímto bodem.

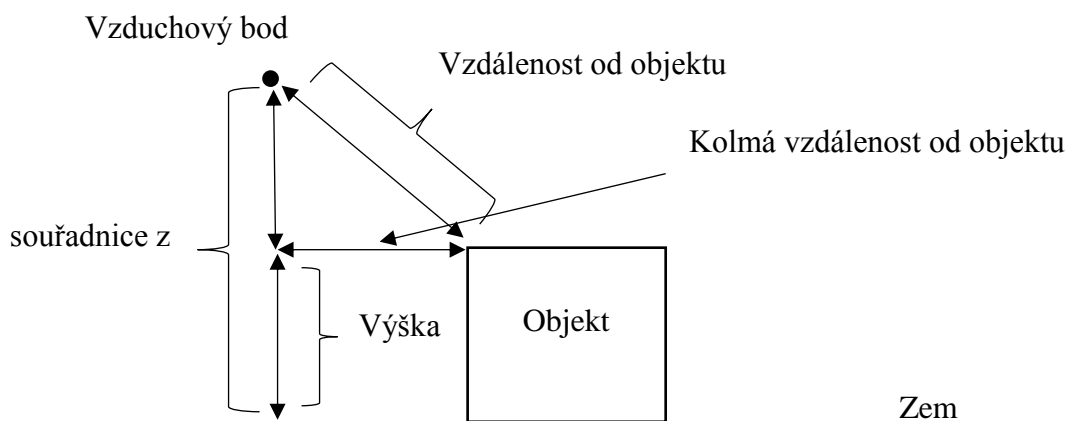
4.4.2 Vytvoření objemu vzduchu

Nyní je nutné vytvořit list jednotlivých bodů vzduchu kolem objektu. Velikost objemu určím pomocí hodnoty, kterou jsem pojmenoval „Prostor“. V závislosti na zadaných rozměrech objektu se kolem něho vytvoří list bodů, který vytváří objem vzduchu. Tento princip je vyobrazen na obrázku 15.



Obrázek 15: Vytvoření bodů kolem objektu.

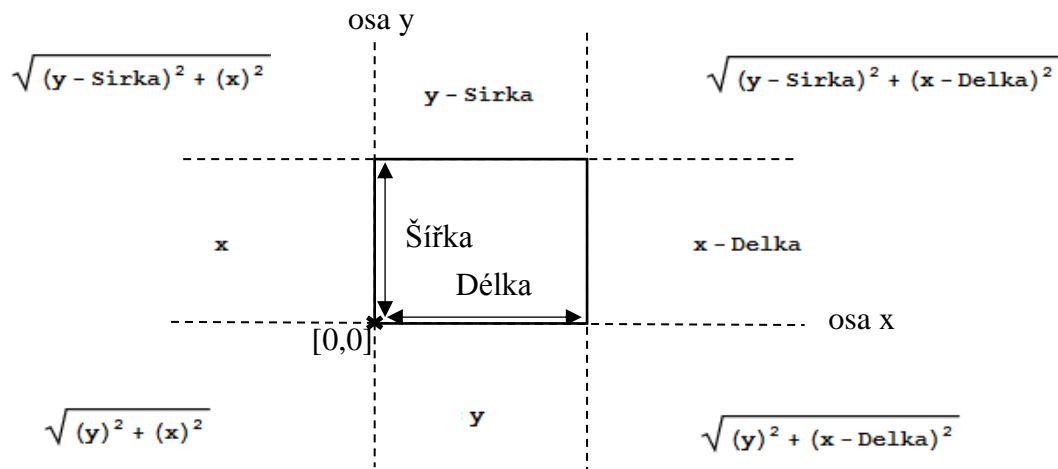
Při vytváření těchto jednotlivých bodů se nezahrnují body, které mají kratší kolmou vzdálenost k zemi, než mají k nejbližšímu bodu vytvořeného objektu. Chci-li určit, zda bod zahrnout nebo nezahrnout, musím provést následující postup – viz obrázek 16 a 17:



Obrázek 16: Vzdálenost bodu od země a objektu.

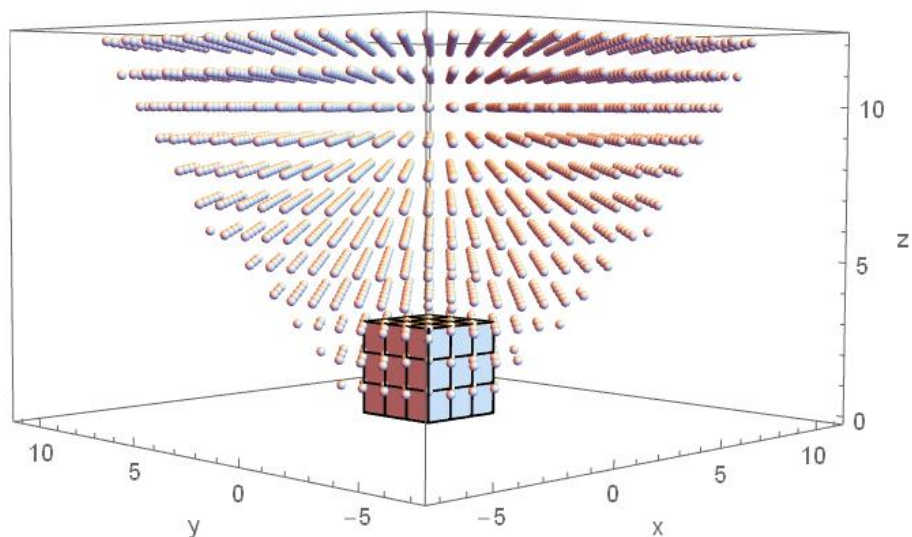
K určení, zdali je bod blíže k zemi, nebo k objektu, musím porovnat z-tovou souřadnici tohoto bodu se vzdáleností prostorového bodu od objektu. Tuto vzdálenost mohu vypočítat pomocí Pythagorovy věty. K tomuto výpočtu musím zjistit kolmou vzdálenost od objektu. Tu zjistím pomocí známých souřadnic x a y následujícím způsobem.

V souřadných osách x a y rozdělím prostor kolem objektu do osmi oblastí. V každé této oblasti se kolmá vzdálenost od objektu vypočítá specifickým vztahem. Tyto vztahy jsou vyobrazeny na obrázku 17.



Obrázek 17: Výpočet kolmé vzdálenosti bodu od objektu podle souřadnic x a y

Poté porovnám vzdálenost vzduchového bodu od země a objektu. Pokud bude vzdálenost od země kratší, nezahrnu tento bod v dalších výpočtech. Výsledkem bude list bodů, které představují objem paraboloidu. Na obrázku 18 je znázorněno postavení těchto bodů vůči zkoumanému objektu.



Obrázek 18: Vyobrazení prostorových bodů kolem zkoumaného objektu

Samotný kód vytvoření všech bodů v prostoru je vyobrazen níže.

```

Vzduch={ };
x = -Prostor + 1;
y = -Prostor + 1;
z = Prostor + Vyska - 1;
While[ x < Prostor + Delka + 1,
  While[ y < Prostor + Sirka + 1,
    Which[
      y ≤ Sirka && x ≤ Delka && y ≥ 1 && x ≥ 1, b = 0;;
      y > Sirka && x > Delka && y > 0 && x > 0, b =  $\sqrt{(y - Sirka)^2 + (x - Delka)^2}$ ;;
      y ≤ Sirka && x ≥ Delka && y ≥ 1 && x > 0, b = x - Delka;;
      y < Sirka && x > Delka && y < 0 && x > 0, b =  $\sqrt{(Abs[y] + 1)^2 + (x - Delka)^2}$ ;;
      y < Sirka && x ≤ Delka && y ≤ 1 && x ≥ 1, b = Abs[y] + 1;;
      y < Sirka && x < Delka && y < 0 && x < 0, b =  $\sqrt{(Abs[y] + 1)^2 + (Abs[x] + 1)^2}$ ;;
      y ≤ Sirka && x < Delka && y ≥ 1 && x ≤ 1, b = Abs[x] + 1;;
      y > Sirka && x < Delka && y > 0 && x < 0, b =  $\sqrt{(y - Sirka)^2 + (Abs[x] + 1)^2}$ ;;
      y ≥ Sirka && x ≤ Delka && y > 0 && x ≥ 0, b = y - Sirka;
    ];
  ];
While[ z > 0,
  If[ z > Vyska - 1,
    If[ z >=  $\sqrt{(z - Vyska - 1)^2 + b^2}$ ,
      bod = {x, y, z};
      AppendTo[Vzduch1, bod];
      , z = 1;
    ],
    If[ z ≥ b,
      bod = {x, y, z};
      AppendTo[Vzduch1, bod];
      , z = 1;
    ]
  ];
  z--;
  z = Prostor + Vyska + 1;
  y++;
  y = -Prostor + 1;
  x++;
];

```

4.4.3 Výpočet pravděpodobnosti zásahu povrchových bodů

V další části kódu se pro každý prostorový bod určí jeho nejbližší povrchový bod objektu. Zjistí se vzdálenost mezi nimi, která představuje délku koncové průrazné dráhy, a tím poloměr valivé koule. Pomocí vztahu pro logaritmicko-normální rozložení zjistím pravděpodobnost spojenou s touto vzdáleností, a tu přičtu k již vypočtené pravděpodobnosti pro daný povrchový bod. Všechny vypočtené pravděpodobnosti, pro každý bod, sečtu dohromady do proměnné pod názvem „PravCelkova“. Tento kód je popsán níže.

```
j = 1;
While[j < Length[Vzduch] + 1,
  BodVzduch = Vzduch[[j]];
  BodObjekt = Nearest[Objekt[[All, 1]], BodVzduch];
  If[First[BodObjekt] == BodVzduch, Nothing,
    Vzdalenost = EuclideanDistance[First[BodObjekt], BodVzduch];
    Prav = f[Vzdalenost,  $\sigma$ ,  $\mu$ ];
    i = 1;
    Do[
      Pozice = Flatten[Position[Objekt[[All, 1]], BodObjekt[[i]], 1];
      Objekt[[Pozice, 2]] += Prav;
      i++;
      PravCelkova += Prav;
    , Length[BodObjekt]]
  ]
  j++]
```

4.4.4 Grafické vyobrazení

Po výpočtu všech pravděpodobností zásahu je dále nutné získané výsledky graficky zobrazit. Porovnáám, jakou část zabírá sečtená pravděpodobnost pro jednotlivé poloměry valivé koule pro jeden specifický bod vůči celkové sečtené pravděpodobnosti všech povrchových bodů, a tím určím konečnou pravděpodobnost zásahu pro tento bod. Podle velikosti této pravděpodobnosti tento bod přiřadím do pravděpodobnostního intervalu, kde každý interval má svou specifickou barvu. Tyto intervaly jsou vyobrazeny u obrázků.

Samotný kód grafického zpracování je následující:

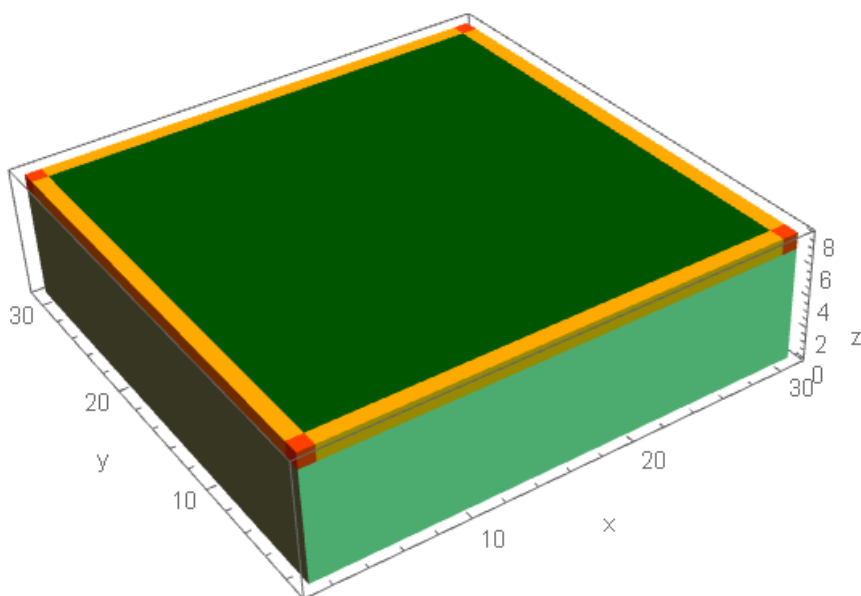
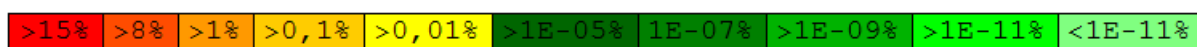
```
Krychle = Table[{
  Which[
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.15, Red,
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.08, Blend[{Red, Yellow}, 0.3],
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.01, Blend[{Red, Yellow}, 0.6],
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.001, Blend[{Red, Yellow}, 0.8],
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.0001, Yellow,
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.000001, Blend[{Green, Black}, 0.6],
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.00000001, Blend[{Green, Black}, 0.5],
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.0000000001, Blend[{Green, Black}, 0.3],
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova > 0.000000000001, Green,
    Objekt[[j, 2]] / PravCelkova < 0.000000000001, Blend[{Green, White}, 0.5]]
  , Cuboid[Objekt[[j, 1]]], {j, Length[Objekt]};
```

4.5 SIMULACE KONKRÉTNÍCH OBJEKTŮ

V této části využiji výše popsany program pro určení nejpravděpodobnějšího místa zásahu bleskem na třech konkrétních objektech. Při výpočtech se ve všech třech simulacích zahrnují prostorové body až 160 metrů vzdálené ve všech směrech od objektu. Sousedící body jsou vždy vzdálené jeden metr od sebe. Využívám pravděpodobnostní rozložení pro negativní blesky, jelikož se v přírodě vyskytují nejčastěji.

4.5.1 Objekt č. 1 bez jímacích tyčí

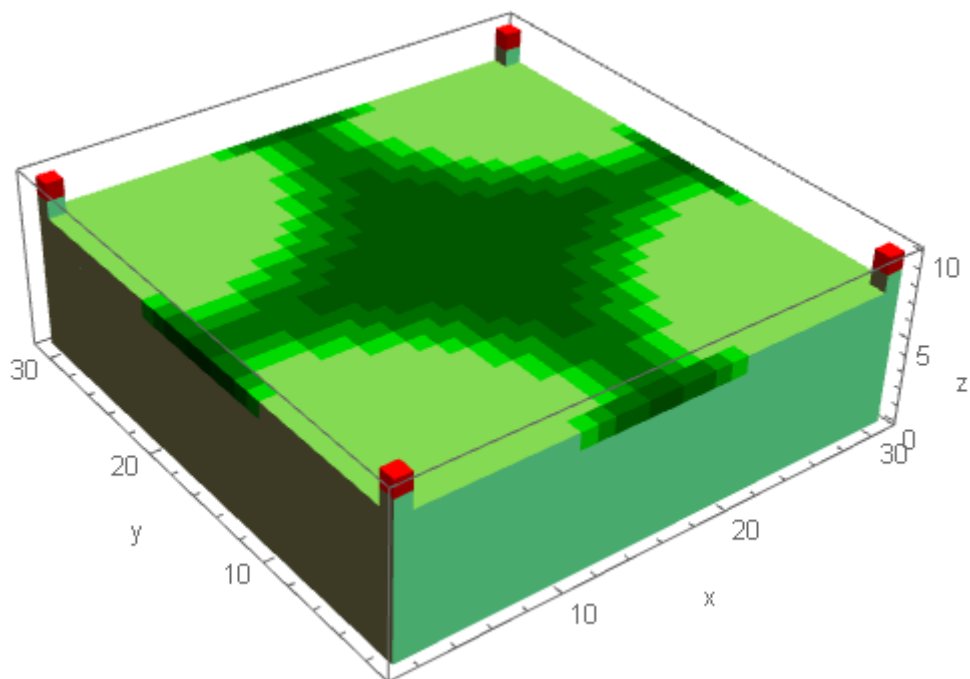
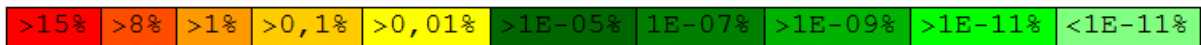
Objekt o ploše 30x30 metrů s výškou 8 metrů bez jímacích tyčí. Největší pravděpodobnost zásahu bleskem na tomto objektu je v rozích s kombinovanou pravděpodobností 48,99 %. Šance zásahu do jednoho z rohů je 12,25 %. Viz obrázek 19.



Obrázek 19: Objekt 30x30x8 m bez jímacích tyčí.

4.5.2 Objekt č. 1 s jímacími tyčemi v rozích

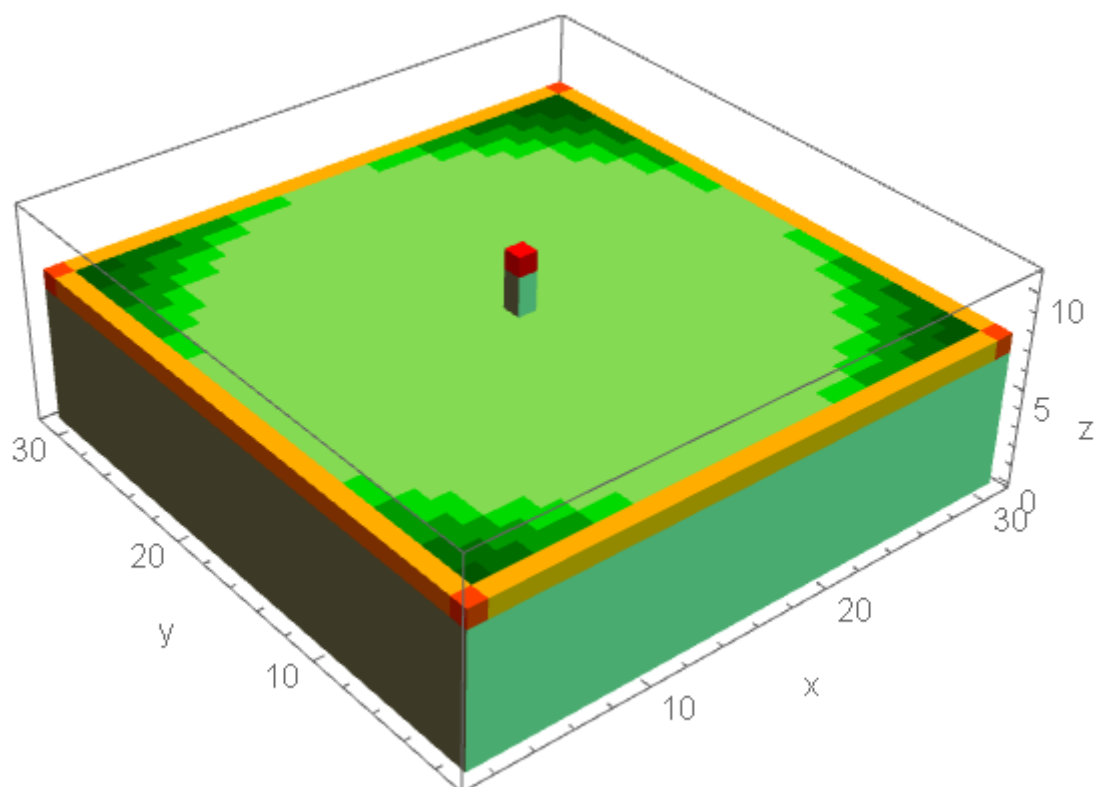
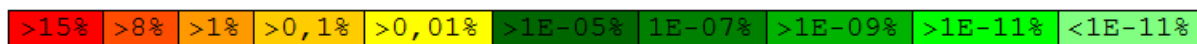
Přidám-li k výše uvedenému objektu jímací tyče o délce 2 metrů do každého rohu, výrazně snížím šanci zásahu bleskem do objektu. Kombinovaná šance, že blesk zasáhne jednu z jímacích tyčí je 98,77 %. Šance zásahu pro jednu jímací tyč je 24,7 %. Viz obrázek 20.



Obrázek 20: Objekt 30x30x8 m s jímacími tyčemi (2 m) v rozích.

4.5.3 Objekt č. 1 s jednou jímací tyčí ve středu budovy

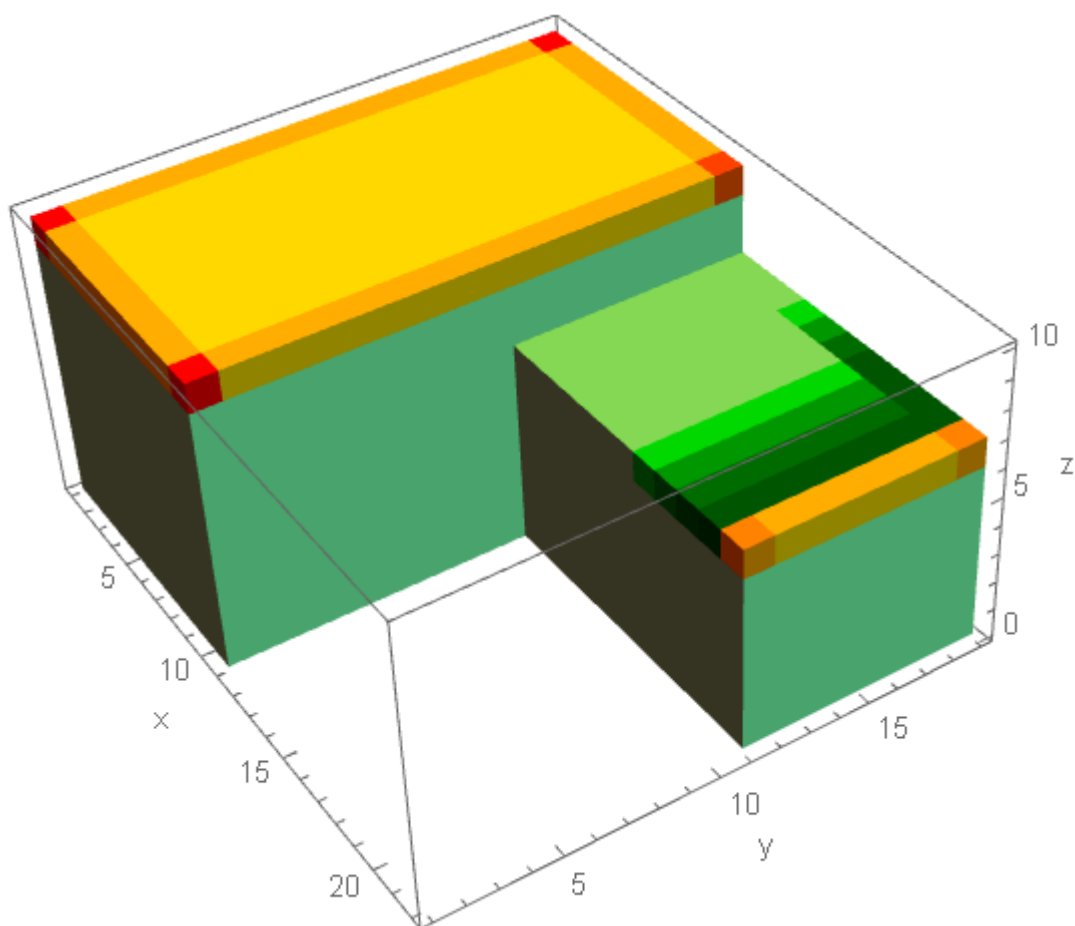
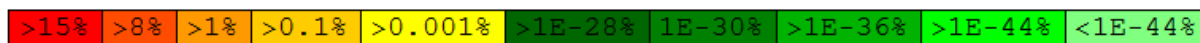
V tomto případě jsem k výše zmiňovanému objektu přidal jímací tyč o výšce 3 metry do středu budovy. Šance, že blesk zasáhne právě tuto jímací tyč, je 19,19 %. Šance zásahu bleskem do jednoho z rohů je 47,76 %. Viz obrázek 21.



Obrázek 21: Objekt 30x30x8 m s jímací tyčí (3 m) ve středu budovy.

4.5.4 Objekt č. 2 bez jímacích tyčí

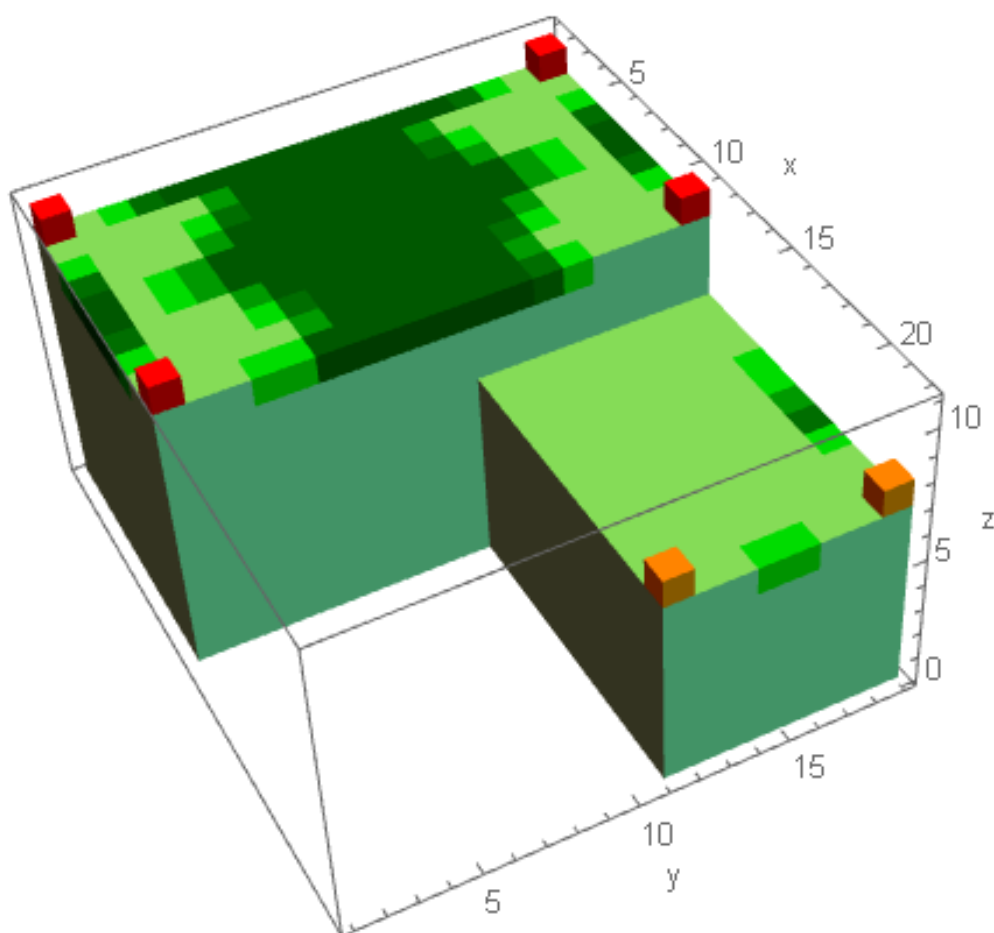
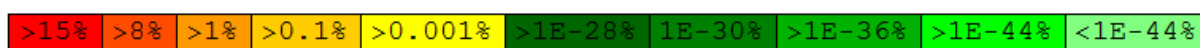
Objekt se skládá ze dvou spojených kvádrů o rozměrech 18x10x10 metrů a 8x12x7 metrů. Šance, že blesk zasáhne jeden z rohů tohoto objektu, je 75,9 %. Šance, že blesk zasáhne výše položené body je 68,3 %. Pro níže položené rohy je tato šance 7,6 %. Viz obrázek 22.



Obrázek 22: Objekt 18x10x10 m a 8x12x7m bez jímacích tyčí.

4.5.5 Objekt č. 2 s jímacími tyčemi v rozích

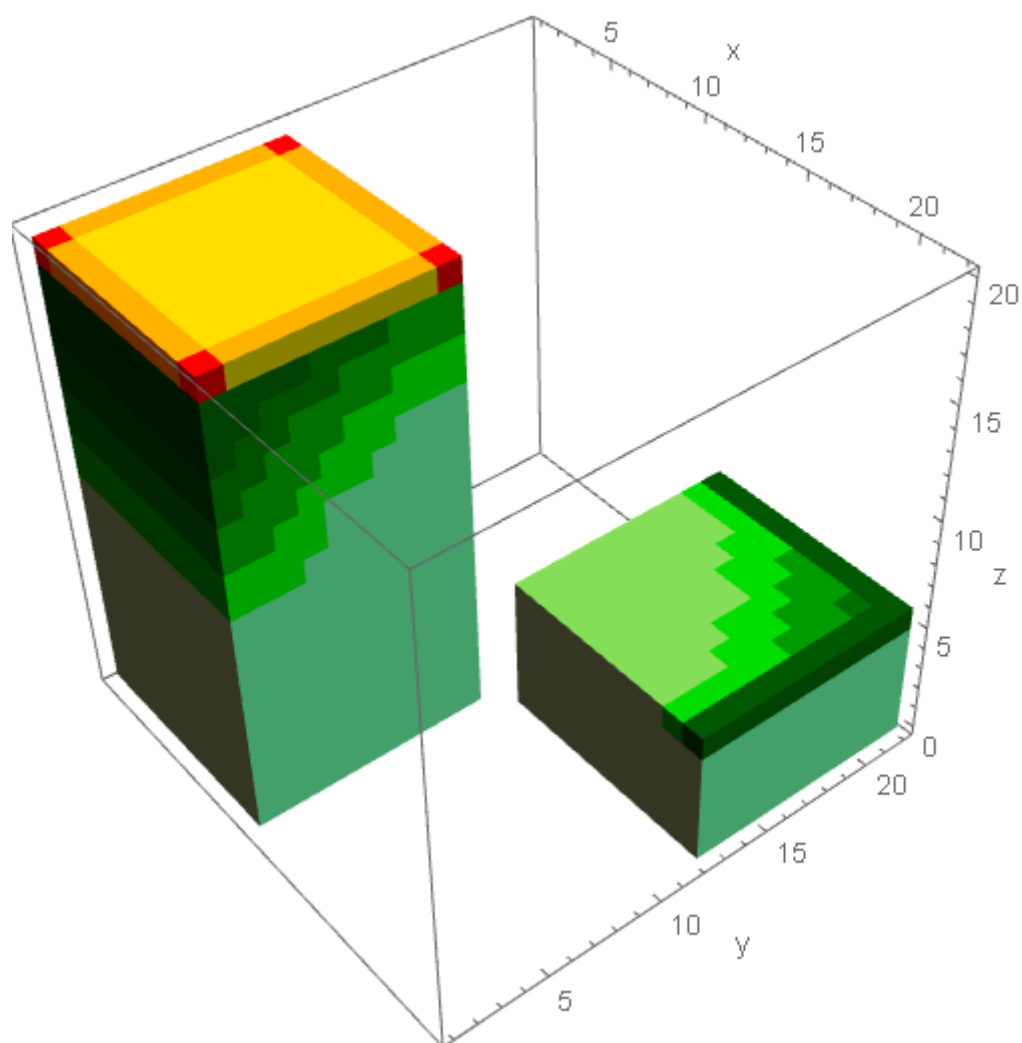
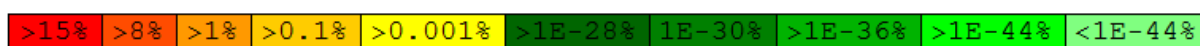
Objekt zmiňovaný výše s přidáním jímacích tyčemi v každém rohu tohoto objektu. Jímací tyče mají délku jednoho metru. Šance, že blesk zasáhne jednu z těchto jímacích tyčí, je 99,9 %. Šance, že blesk zasáhne výše položené jímací tyče, je 91 %, pro níže položené jímací tyče je tato pravděpodobnost 8,9 %. Viz obrázek 23.



Obrázek 23: Objekt 10x18x10 m a 12x8x7 m s jímacími tyčemi (1 m) v rozích.

4.5.6 Objekt č. 3 bez jímacích tyčí

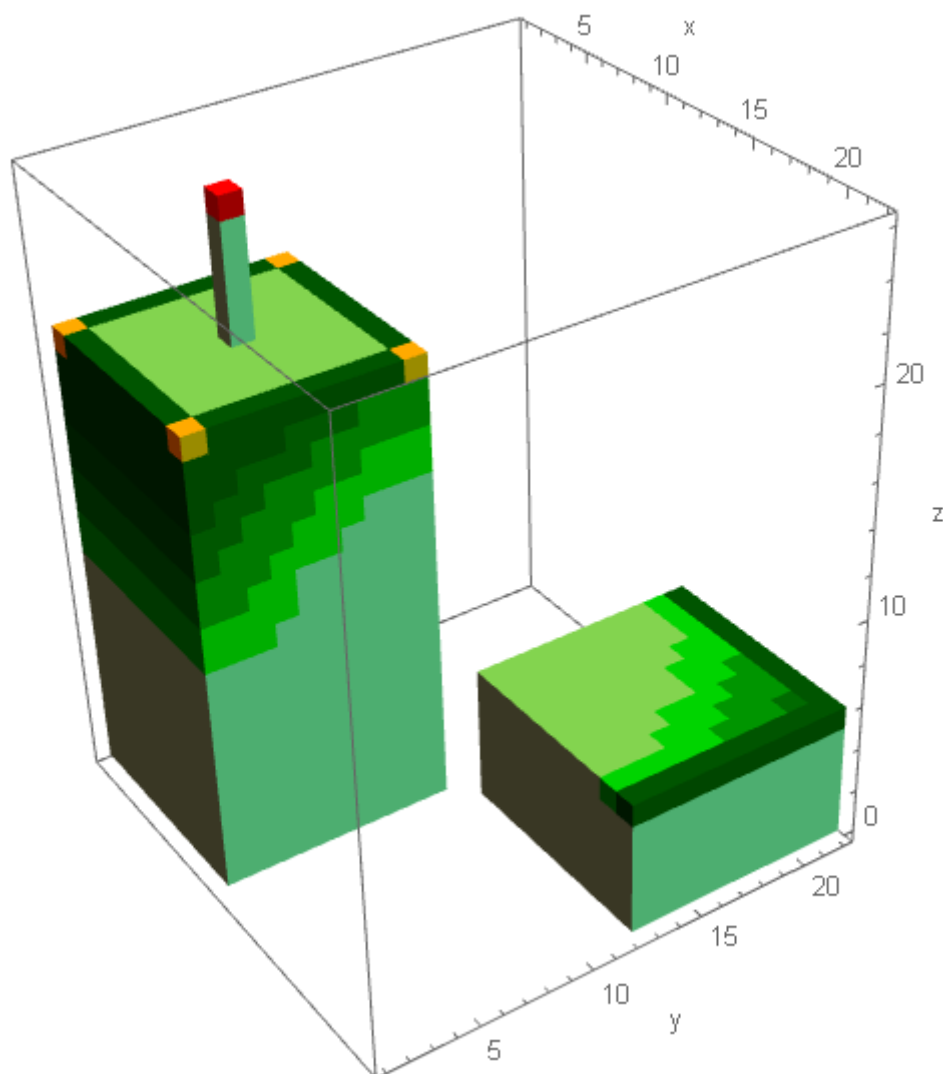
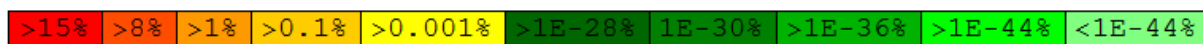
V tomto případě analyzuji dva sousedící objekty, které jsou od sebe vzdáleny jeden metr, přičemž jeden z objektů je výrazně vyšší než ten druhý. Samotné rozměry objektů jsou 10x10x20 m a 10x10x6 m. Šance, že blesk zasáhne povrch střechy vyššího objektu je 99,99 %, kde největší šance zásahu je v rozích a to 85,72 %. Viz obrázek 24.



Obrázek 24: Objekt 10x10x20 m a objekt 10x10x6 m. Vzájemně vzdálené 1 m.

4.5.7 Objekt č. 3 s jímací tyčí na jednom z objektů

V tomto případě je na objektu s rozměry 10x10x20 m přidána jímací tyč s délkou 5 metrů. Šance, že blesk zasáhne tuto jímací tyč, je 99,28 %. Druhé nejpravděpodobnější místo zásahu je do jednoho z rohů vyššího objektu, a to 0,71 %. Viz obrázek 25.



Obrázek 25: Objekt 10x10x20 m s jímací tyčí (5 m) a objekt 10x10x6m. Vzájemně vzdálené 1 m.

5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ OCHRANY PŘED BLESKEM

V této části budu rozebírat v jakých případech je ochrana před bleskem nutná a v jakých případech se bez ní můžeme obejít. Podle souboru norem ČSN EN 62305 pořizovat ochranu před bleskem nemusíme. Je předepsaná pouze v případě, kdy se jedná o bezpečnost nebo zájem veřejnosti. Z ekonomického hlediska je velice obtížné posoudit, zda daný objekt ochranu před bleskem potřebuje a pokud jí potřebuje, v jakém rozsahu. Je proto důležité zvážit možné škody a důsledky po zásahu bleskem. Tyto škody se mohou rozdělit do tří základních kategorií. Úraz živých bytostí, hmotné škody a poruchy elektronických systémů. Dále je nutné zvážit pravděpodobnost, že by danou budovu mohl blesk zasáhnout.

K určení velikosti hrozící škody, a dále k vyhodnocení ekonomicky nejefektivnějšího řešení slouží analýza rizik, která je určena normou ČSN 62305-2 (26). Toto riziko je definované jako pravděpodobně průměrné roční ztráty na stavbě způsobené údery bleskem, a závisí na počtu úderů blesku za rok související s touto stavbou, pravděpodobnosti poškození působením blesku a rozsahu následných ztrát. Na základě tohoto vypočteného rizika se můžeme rozhodnout, zda je ochrana nutná, a jakým případným ekonomickým ztrátám může zabránit.

5.1 RIZIKO

Riziko R je poměrná hodnota pravděpodobných průměrných ročních ztrát. Pro každý existující typ ztrát, které ve stavbě mohou nastat, musí být oceněno odpovídající riziko. Pomocí této hodnoty lze rozhodnout o potřebě systému ochran nebo jejich třídě. Rizika oceňovaná ve stavbě jsou následující:

- R_1 : riziko ztrát na lidských životech
- R_2 : riziko ztrát na veřejných službách
- R_3 : riziko ztrát na kulturním dědictví
- R_4 : riziko ztrát ekonomických hodnot

Každá součást rizika může být vyjádřena obecnou rovnicí. (26)

$$R_x = N_x * P_x * L_x \quad (r 7)$$

Kde N_x představuje počet nebezpečných událostí za rok. Tato hodnota je ovlivněna hustotou úderů blesku do země, jeho okolí, připojených vedení a půdy. P_x vyjadřuje pravděpodobnost poškození stavby a je ovlivněna vlastnostmi stavby, připojených vedení a použitými ochrannými opatřeními. L_x představuje následné ztráty. Je ovlivněna použitím budovy, přítomností osob, hodnotou majetku a typem služeb poskytovaných veřejnosti.

Po vypočtení těchto rizik se, podle jejich zastoupení na celkovém riziku, provede výběr nejvhodnějších ochranných opatření, které tyto rizika mohou snížit. Dále je nutné porovnat tato rizika s hodnotou přípustného rizika R_T . Pokud je vypočtené riziko menší, než tato hodnota není další ochrana před bleskem nutná. Pokud je větší měla by být přijata další opatření ke snížení těchto rizik. Jakmile jsou tato opatření uskutečněna, provede se další analýza rizik a porovnají se s přípustnou hodnotou. Tento proces se opakuje, dokud není riziko menší, než je hodnota přípustného rizika. Přípustné riziko stanoví orgán, který na to má kompetenci.

Vzhledem k náročnosti analýzy rizika se k jeho výpočtu využívá řada softwarů, které umožňují jeho výpočet. Tím se proces snižování rizika na přípustné riziko značně usnadní. Vytvářením těchto softwarů se zabývají firmy zabývající se problematikou ochrany před bleskem.

Typické hodnoty přípustného rizika jsou následující:

Typy ztrát	R_T
Ztráty na lidských životech nebo trvalé následky úrazu	10^{-5}
Ztráta veřejné služby	10^{-3}
Ztráta kulturního dědictví	10^{-4}

Tabulka 8: Typické hodnoty přípustného rizika R_T (26)

Pro ztráty ekonomických hodnot se provádí porovnání nákladů na ochranu před bleskem a případných ztrát.

5.2 ROČNÍ NÁKLADY NA ZTRÁTY

K ekonomickému zhodnocení přínosu instalace ochranných opatření se využijí hodnoty rizika ztrát ekonomických hodnot R_4 a celkové hodnoty stavby. S jejich použitím se vypočítají roční celkové náklady na ztráty. Je pak možné porovnávat hodnoty celkových nákladů na ztráty s přijatými opatřeními a bez nich. Tím získáme užitečný ukazatel ekonomické efektivity, který je vhodný pro snižování nákladů spojenými s ochranou před bleskem. Vztah pro výpočet celkových ročních nákladů je popsán níže. (26)

$$C_L = R_4 * c_t \quad (r 8)$$

Kde R_4 představuje riziko vztahující se ke ztrátám hodnot bez uplatnění ochranných opatření a c_t je celková hodnota stavby, přičemž se zahrnují zvířata, budova, obsah a vnitřní systémy včetně jejich činnosti v penězích.

Náklady na ztráty vzniklé i po použití ochranných opatření C_{RL} (zbytkové náklady) jsou vypočteny ze vzorce:

$$C_{RL} = R_4' * c_t \quad (r 9)$$

Kde R_4' je riziko ztrát hodnot ve stavbě, kde jsou uplatněna ochranná opatření.

Pro ekonomické zhodnocení je dále nutné určit roční náklady na ochranné opatření C_{PM} , které můžeme vyjádřit následujícím vzorcem:

$$C_{PM} = C_P * (i + a + m) \quad (r 10)$$

Kde C_P je celková cena ochranných opatření, i představuje úrokovou míru, a odpisovou míru a m vyjadřuje míru údržby.

Jsou-li pak náklady celkových ročních ztrát C_L větší, než je součet nákladů na zbytkové ztráty C_{RL} s náklady na ochranná opatření C_P , je investice do ochranných opatření ekonomicky výhodná. Tento vztah můžeme vyjádřit vzorcem:

$$S_M = C_L - (C_{PM} + C_{RL}) \quad (r 11)$$

5.3 ČISTÁ SOUČASNÁ HODNOTA

Čistá současná hodnota (*NPV*) je jedno z nejpoužívanějších kritérií ke zhodnocení investic. Vyjadřuje součet všech diskontovaných peněžních toků za sledované období. Udává tak hodnotu přínosu investice. *NPV* se určí podle následujícího vztahu:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (r \ 12)$$

Kde

- CF_t - peněžní tok za sledovaný rok
- T - doba životnosti projektu
- r - úroková míra.

5.4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ OCHRAN PRO KONKRÉTNÍ OBJEKT

Ekonomický význam bleskových ochran zhodnotím na konkrétním objektu. Budu se zaměřovat na ekonomickou výhodnost nebo ztráty při instalaci ochranných systémů. K výpočtu rizik, které v ekonomickém zhodnocení ochran před bleskem figurují, využívám výpočtový program *Prozik* společnosti *OEZ (Orlické elektrotechnické závody)*, který v souladu s normou počítá rizika zásahu blesku do budovy.

V této práci bude ekonomické zhodnocení vycházet z vypočtené čisté současné hodnoty, kterou vypočtu z roční úspory peněz S_M , kterou zjistím pomocí výše zmiňovaných vztahů. Při výpočtu *NPV* se peněžní toky nebudou považovat za skutečné hotovostní toky, ale představují roční úspory nebo ztráty. Je to tedy fiktivní hodnota, která bude pouze sloužit k ekonomickému zhodnocení.

Dobu životnosti bleskových ochran budu předpokládat na 20 let s odpisovou mírou 5 %, sazbu na údržbu jsem určil 1 % a velikost diskontu podle úrokové míry státních dluhopisů na 2 %.

Důležité parametry budovy, které slouží jako vstup pro výpočet rizika ekonomických ztrát, jsou uvedeny v tabulce 9.

Délka	30 metrů
Šířka	30 metrů
Výška	8 metrů
Bouřková aktivita	25 dnů za rok
Okolí budovy	Osamocená stavba
Vedení	Nestíněné venkovní silové NN a telekomunikační
Typ stavby	Kancelářská budova
Typ povrchu podlahy	Betonová
Riziko požáru	Obvyklé
Opatření proti požáru	Hasicí přístroje, ruční poplachové instalace

Tabulka 9: Parametry budovy pro výpočet rizika

Pro ekonomické zhodnocení jsem si vybral osamocenou kancelářskou budovu v hodnotě 38 milionů Kč bez dalších staveb v okolí. K této budově vede jedno telekomunikační vedení a jedno silové vedení nízkého napětí. Bouřková aktivita odpovídá typické aktivitě v České republice, a to 25 dnům v roce.

Riziko ztrát ekonomických hodnot vypočtené z parametrů budovy tabulky 9 bez ochranných opatření a průměrné roční ztráty jsou vyobrazeny v tabulce 10.

Hodnota budovy	38 000 000 Kč
Vypočtené riziko (z programu Prozik)	$1,337 \times 10^{-5}$
Průměrné roční ztráty	508 Kč

Tabulka 10: Velikost hodnot pro výpočet NPV za jeden rok v případě budovy bez ochrany

V následující tabulce 11 jsou vyobrazeny diskontované hotovostní toky k výpočtu čisté současné hodnoty za 20 let v případě, kdybychom nepoužili žádná ochranná opatření.

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ochrana	0										
Roční ztráty	0	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508
Údržba	0										
CF	0	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508
DCF	0	-498	-488	-479	-469	-460	-451	-442	-434	-425	-417

Rok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ochrana										
Roční ztráty	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508
Údržba										
CF	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508	-508
DCF	-409	-401	-393	-385	-377	-370	-363	-356	-349	-342

Tabulka 11: Hotovostní toky pro výpočet NPV pro objekt bez ochrany.

Čistá současná hodnota je rovna součtu všech diskontovaných hotovostních toků za 20 let. Je tak rovna -8 307,51 Kč.

Dále budu počítat čistou současnou hodnotu v případě použití ochrany před bleskem v celkové hodnotě 25 000 Kč. Tato ochrana je instalována tak, aby odpovídala třídě ochrany před bleskem IV. V následující tabulce 12 jsou vyobrazeny velikosti nákladů a úspor za jeden rok při využití této ochrany.

Hodnota budovy	38 000 000 Kč
Vypočtené riziko (z programu Prozik)	$2,755 \times 10^{-6}$
Průměrné roční ztráty	105 Kč
Cena ochran	25 000 Kč
Odpisy	1 250 Kč

Tabulka 12: Velikost hodnot pro výpočet NPV za jeden rok v případě instalované ochrany třídy IV.

V další tabulce 13 jsou vyobrazeny diskontované hotovostní toky po dobu 20 let.

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ochrana	25 000										
Roční ztráty	0	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105
Odpisy	0	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250
Údržba	0	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250
CF	-25 000	895	895	895	895	895	895	895	895	895	895
DCF	-25 000	878	861	844	827	811	795	779	764	749	734

Rok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ochrana										
Roční ztráty	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105	-105
Odpisy	1250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250
Údržba	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250
CF	-355	895	895	895	895	895	895	895	895	895
DCF	720	706	692	679	665	652	639	627	615	603

Tabulka 13: Hotovostní toky pro výpočet NPV pro objekt s ochranou.

Čistá současná hodnota při využití ochrany je tedy rovna -10 360,40 Kč.

Porovnáme-li nyní dříve vypočtené NPV pro budovu bez ochrany s vypočteným NPV s instalovanou ochranou před bleskem, je zřejmé, že v tomto případě není ochrana z ekonomického hlediska nutná. Celkové ekonomické ztráty za 20 let by byly po instalaci ochranných opatření o 2053 Kč větší.

Důvodem je, že nainstalované ochrany nesnižují průměrné roční ztráty na takovou úroveň, aby se vyrovnaly s náklady na jejich pořízení a údržbu. Pokud by ale bylo možné tyto náklady snížit, bylo by pořízení těchto ochran výhodné. V následující tabulce 14 jsou vyobrazeny čisté současné hodnoty v závislosti na měnící se pořizovací ceně ochrany před bleskem.

Pořizovací cena ochrany před bleskem	Celková úspora peněz za 20 let
30 000 Kč	-3 983 Kč
25 000 Kč	-2052 Kč
20 000 Kč	-121 Kč
15 000 Kč	+1808 Kč

Tabulka 14: Celková úspora peněz pro různé ceny ochrany před bleskem.

6 ZÁVĚR

V současné době se využívají tři způsoby zhotovení vnějšího systému ochrany před bleskovým výbojem. Každá z těchto metod musí zajistit zachycení úderu blesku do stavby a jeho svedení do země, kde se bleskový proud bezpečně rozptýlí.

Bleskové výboje, které by tato soustava měla zachytit, jsou závislé na dané hladině ochrany před bleskem pro tento objekt. Normou ČSN EN 62305-3 jsou stanoveny čtyři třídy ochrany před bleskem, kde každá z nich určuje parametry pro správné zhotovení jímací soustavy za použití konkrétních následujících metod.

Metoda ochranného úhlu se využívá pro jednoduché tvary budov. Tato metoda má nevýhodu, že má omezené využití pro vyšší objekty. *Metoda mřížové soustavy* je nejčastěji využívána pro ochranu rovinných ploch a také pro rovinné boční plochy u objektů vyšších než 60 metrů. *Metoda valivé koule* je použitelná pro každý tvar stavby.

Při využití těchto tří metod vytvoříme spolehlivý vnější ochranný systém, který účinně zabrání zásahu bleskem do chráněného objektu. Žádná z těchto metod však nepracuje s pravděpodobností, podle které bychom určili nejrizikovější místa na objektu, pouze určí každé rizikové místo. To má za následek použití většího množství jímacích tyčí, ale bez výrazného celkového zlepšení ochrany před bleskem.

Metodou dynamické valivé koule můžeme tento nedostatek odstranit. U této metody postupujeme tak, že určíme riziková místa na objektu a zároveň pravděpodobnost zásahu bleskem pro tato místa. Ve výsledku tak můžeme realizovat systém ochrany před bleskem, který je stejně účinný jako současné využívané metody, a to díky tomu, že při použití této metody se zdá, že jímací tyče mají mnohem větší schopnost přitahovat blesky. Můžeme tak využít snížené množství jímacích tyčí, a tím snížíme i potřebné náklady spojené s výstavbou jímací soustavy.

V této práci jsem sestavil kód programu, ve kterém je tato metoda uplatněna a vytvořil jsem tři modely jednoduchých budov, na kterých jsem určoval možná místa zásahu bleskem. Všechny budovy jsem analyzoval nejdříve bez jímacích tyčí a později s nimi a sledoval jsem, jak se mění nejpravděpodobnější místo zásahu. Zjistil jsem, že po přidání jen několika jímacích tyčí se výrazně sníží šance zásahu blesku do budovy.

Samozřejmě *LPS* plní i jiné funkce než pouhé zachytávání blesků. Zároveň zajišťuje ekvipotenciální propojení pro rozptýlení elektrického proudu ke snížení indukovaných magnetických polí.

V poslední části práce jsem rozebral, jakým způsobem se blesková ochrana může ekonomicky zhodnotit. Pomocí řízení rizika, jehož výpočet je definován normou ČSN EN 62305-2, zjistím možné roční ztráty na budově, které společně s cenou ochranných opatření mohou fungovat jako nástroj pro rozhodování, zda je ochrana před bleskem nutná. Tento postup ekonomické analýzy jsem provedl na konkrétní budově.

7 REFERENCE

1. Rakov, V. A., Uman, M. A. *Lightning Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
2. Hasman, T. *Přepětí v Elektroenergetických soustavách*. Praha: ČVUT, 2004.
3. ČSN EN 62305-3 Ochrana před bleskem – Část 3: Hmotné škody na stavbách a ohrožení. Leden 2012.
4. Koudelka, C. Ochrana před bleskem [Online] [cit. 4. 4. 2018] Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/pred_ZEP/Ochrana%20pred%20bleskem-CSN.pdf.
5. Košťál, J. Dynamická blesková koule. In *Elektro* 12, 2011.
6. Cooray, V. *Lightning Protection*. London : The Institution of Engineering and Technology, 2010.
7. Armstrong, H. R., Whitehead, E. R. Field and analytical studies of transmission line shielding. In *IEEE Transactions, Power Apparatus and Systems*, Vol. 87, 1968, pp. 270–271.
8. Brown, G. W., Whitehead, E. R. Field and analytical studies of transmission line shielding: Part II. In *IEEE Transactions, Power Apparatus and Systems*, Vol. 88, 1969, pp. 617–626.
9. Gilman, D. W., Whitehead, E. R. The mechanism of lightning flashover on high-voltage and extra high voltage transmission lines. In *Electra*, Vol. 27, March 1973, pp. 65–96.
10. Whitehead, E. R. Protection of transmission lines. In Golde, R. H. (ed.). *Lightning*. London: Academic Press, Vol. 2, 1977.
11. Whitehead, E. R. CIGRE survey of the lightning performance of EHV transmission lines. In *Electra*, No. 33, 1974.
12. IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104*, No. 4, 1985, pp. 919–932.
13. IEEE Std 1243-1997, *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, 1997.

14. Hartono, Z. A., Robiah, I. A Method of Identifying the Lightning Strike Location on a Structure. In *Proc. of the International Conference on Electromagnetic Compatibility*. Kuala Lumpur, Malaysia, April 1995.
15. Hartono, Z. A., Robiah, I. The Collection Surface Concept as a Reliable method for predicting the lightning strike location. In *Proc. of the 25th International Conference on Lightning Protection*. September 2000, pp.328–333.
16. ČSN EN 62305-1 Ochrana před bleskem - Část 1: Obecné principy. Leden 2010.
17. Anderson, R. B., Eriksson, A. J. Lightning parameters for engineering applications. In *Electra*, Vol. 69, 1980.
18. Eriksson, A. J. *The Lightning Ground Flash—An Engineering Study*. Ph.D. thesis, University of Natal, Pretoria, South Africa, 1979.
19. Berger, K., Anderson, R. B., Kröninger, H. Parameters of lightning flashes. In *CIGRE Electra*, No 41, 1975.
20. Borghetti, A., Nucci, C. A., Paolone, M. Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers. In *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, 2004.
21. Saba, M. M. F., Pinto, O., Ballarotti, M. G. Relation etween lightning return stroke peak current and following continuing current. In *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, 2006.
22. Visacro, S., Soares, A., Aurélio, M., Schroeder, O., Cherchiglia, L. C. L., Sousa, V. J. de. Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo Station. In *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, 2004.
23. Takami, J., Okabe, S. Observational results of lightning current on transmission towers. In *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, 2007.
24. Hannig, M., Hannig, R., Brocke, R. *An analytical consideration on the striking probability and the total amount of strikes to simple structures according to standardized regulations*. Shanghai : International Conference on Lightning Protection, 2014.
25. Kern, A., Schelthoff, Ch., Mathieu, M. Probability of lightning strikes to airterminations of structures using the electrogeometrical model theory and the statistics of lightning current parametres. In *Atmospheric Research*, Vol. 117, November 2012.

26. ČSN EN 62305-2 Ochrana před bleskem - Část 2: Řízení rizika. Únor 2013.

27. Cooraya, V., Rakov, V., Theethayia, N. The lightning striking distance–Revisited. In *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, Issues 5-6, 2007, pp. 296–306.