

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2017

Ing. Jiří KUTÁČ

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu „doktor“
v oboru Elektroenergetika

**Působení bleskového proudu a přepětí na osoby a na
elektrická a elektronická zařízení uvnitř budov s návrhem
možných ochranných opatření s ohledem na tyto vlivy**

*Příspěvek k matematickému modelování interakce svodu bleskového výboje a vnitřní
instalace s důrazem na alternativní prostředí*

Autor:
Školitel:
Školitel specialista:

Ing. Jiří KUTÁČ
Doc. Ing. Zbyněk MARTÍNEK, CSc.
Ing. Jan MIKEŠ, Ph.D.

Plzeň a Praha, 2017

Anotace

Předložená disertační práce se zabývá otázkou působení bleskového výboje na vnitřní instalace v objektech. Studuje volbu vhodného matematického modelu, který je implementovatelný pro inženýrskou praxi. V úvodní části je popsán princip vzniku bleskového výboje od fyzikální fenomenologie až po extrakci použitelnou v inženýrské praxi. S ohledem na náročnost vzniklého modelu při akceptování většiny fyzikálních souvislostí bylo hledáno řešení, které je dostatečně přesné, robustní a přináší v praxi použitelné řešení, avšak na druhou stranu je počítačově zpracovatelné. Byl tak vytvořen příspěvek k matematickému modelování interakce svodu bleskového výboje a vnitřní instalace s důrazem na alternativní prostředí (dřevostavby). Teoretické předpoklady a matematický model byly validovány při reálném měření v laboratoři vysokých napětí na VUT v Brně. Další poznatky byly získány v *Laboratoři environmentální elektrotechniky a ekonomiky FEL ČVUT v Praze*.

Klíčová slova

bleskový výboj, atmosférická elektřina, indukované přepětí, vnější a vnitřní ochrana

Abstract

This doctoral thesis deals with the effects of lightning discharge on indoor electrical installations in buildings. It focusses on the choice of a suitable mathematical model that could be implemented into the engineering practice. The first part describes the way how the lightning discharge is created, from the physical phenomenology to the extraction that could be used in the engineering practice. With regard to the complexity of the model created while respecting most physical interrelations, the aim was to find a solution that would be sufficiently exact, robust, would bring practical solutions and be processable by computers at the same time. This doctoral thesis contributes to mathematical modelling of interaction between lightning discharge conductor and the indoor installation with the emphasis on an alternative environment (wooden structures). The theoretical hypothesis and the mathematical model were validated by real measurements performed in the high voltage laboratory at the *Brno University of Technology* (VUT Brno). Further knowledge was gained in the *Laboratory of Environmental Electrical Engineering and Economics* of the Faculty of Electrical Engineering of the Czech Technical University in Prague (FEL ČVUT v Praze).

Keywords

Lightning discharge, atmospheric electricity, induced overvoltage, external and internal protection

Prohlášení

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

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

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval mému školiteli panu, **doc. Ing. Zbyňku Martínkovi, CSc.**, a mému školiteli specialistovi panu, **Ing. Janu Mikešovi, Ph.D.**, za dlouhodobou odbornou pomoc, kterou mi poskytovali nejenom během mých studií, v době řešení mé disertační práce a také zejména v rámci odborných a praktických projektů, které společně řešíme.

Mé poděkování patří i institucím: *Laboratoři environmentální elektrotechniky a ekonomiky FEL ČVUT v Praze* a *Laboratoři velmi vysokých napětí VUT v Brně* za možnost využít jejich experimentálního zázemí.

Obsah

1	Úvod do studované problematiky	9
1.1	Cíle práce	12
1.2	Současný stav řešené problematiky	12
1.3	Vymezení předmětu studia	15
2	Teorie blesku a bouřky	16
2.1	Bouřkové mraky a jejich elektrické jevy	16
2.1.1	Čárový blesk	19
2.1.2	Výpočet elektrického pole ze Simpsonova modelu	23
3	Matematická reprezentace proudové vlny	26
4	Klasifikace parametrů bleskových výbojů	33
4.1	Fyzikální parametry	33
4.2	Aproximace atmosférických výbojů pro technickou praxi	36
5	Způsoby přenosu atmosférických přepětí do připojených zařízení	40
5.1	Přímý úder blesku	40
5.2	Nepřímý úder blesku – přepětí indukovaná	41
5.3	Škody způsobené bleskovým výbojem	47
6	Normotvorná podpora ochrany před bleskem v České republice	48
7	Technické prostředky pro omezení přepětí a přímého úderu blesku	55
7.1	Používaná terminologie	55
7.2	Zóny ochrany před bleskem	56
7.3	Vnější ochrana před bleskem	58
7.4	Vnitřní ochrana před bleskem	59
7.5	Specifikace vnější ochrany proti bleskovému výboji	59
7.5.1	Definice systému ochrany	59
	Ad a) Metoda vrcholového úhlu	59
	Ad b) Metoda valící se koule	62
	Ad c) Metoda mřížové soustavy	63
	Ad d) Metoda aktivního hromosvodu	63
8	Přehled jednotlivých výpočetních metod, které se věnují problematice přepětí a přímých účinků bleskových proudů	66

8.1	Řešení v kartézských souřadnicích	71
8.2	Řešení ve válcových souřadnicích	77
9	Matematický model chráněného objektu – metoda telegrafních rovnic	80
9.1	Numerické řešení	82
9.1.1	Výpočet vlastní a vzájemné indukčnosti instalační smyčky a vnitřní elektroinstalace (tab. 6):	85
9.1.2	Výpočet kapacity mezi instalační smyčkou a vnitřní instalací	86
9.1.3	Výpočet dostatečné vzdálenosti z normy IEC 62305	89
9.2	Namodelované grafické výsledky	89
9.3	Dílčí zhodnocení.....	93
10	Experimentální část disertační práce.....	94
10.1	Vlastní modelování účinků bleskového proudu	94
10.2	Zhodnocení	104
11	Resumé	106
11.1	Resume	109
11.2	Zusammenfassung.....	112
12	Výběr z referenční literatury	116
12.1	Odborná literatura	116
12.2	Normy.....	123
13	Soupis vlastních publikačních výstupů	124
13.1	Významné publikované a realizované práce v rámci Ph.D. studia	124
13.2	Citace	127
13.3	Konferenční příspěvky.....	128
14	Soupisy.....	128
14.1	Obrázků.....	128
14.2	Tabulek	130

1 Úvod do studované problematiky

Blesk je elektrický výboj atmosférické elektřiny bouřkových mraků (cumulonimbů) mezi mraky navzájem nebo mezi mraky a zemí, obvykle doprovázený zvukovou kulisou (hřměním).

Blesk je tedy přírodní úkaz, známý lidem již od počátku jejich existence. Po mnoho staletí však zůstávala jeho podstata utajena a ochrana před bleskem byla spíše dílem náhody. O pochopení podstaty blesku se postaral až rozmach přírodních věd v 18. století. První kroky v technice hromosvodu uskutečnil roku 1749 Benjamin Franklin, který v blízkosti chráněných budov umísťoval vysoké uzemněné kovové stožáry. Vědomě tak využil hrotového efektu, neboť poznamenal: *„Jestliže budou koule umístěné na špici korouhvice na tyčích a stožárech nahrazeny železnou tyčí zaostřenou v hrot, budou elektrický oheň odvádět z mraků klidně, aniž by se mohl přiblížit natolik, aby udeřil“*. O 4 roky později přidal ještě druhou vlastnost, *„jímač bud’ zabrání úderu z mraku, nebo když nastane úder, odvede jej bezpečně z budovy“*. Tento výrok již popisuje funkci hromosvodu tak, jak ji známe dnes.

Do českých zemí se poznatky o ochraně před bleskem dostaly zásluhou Václava Prokopa Diviše, který roku 1754 postavil hromosvod v Příměticích u Znojma. Předpokládal, že stovky hrotů na koruně hromosvodu budou vysávat elektřinu z mraků, a zabrání tak výbojům blesků. V druhé polovině 18. století se začaly objevovat první předpisy pro ochranu před bleskem, ať už se jednalo o Pravidla chování při blízké bouřce G. Ch. Lichtenberga, Předpisy pro hromosvody od J. A. H. Reimaruse nebo spisy dalších autorů. Tyto předpisy byly vydány hlavně za účelem ochrany kostelů, skladišť střelného prachu, pro slámové střechy, cestovní vozy a lodě. S příchodem 19. století začala i existence pojišťovacích ústavů, pojišťujících mimo jiné i proti požáru, vzniklém v důsledku úderu blesku. Díky tomu začalo rozšiřování systému ochrany před bleskem získávat na technickém i společenském významu. V Československu a posléze v České republice byla nejpoužívanější publikací kniha Hromosvody od Ladislava V. Říhánka z let 1940, 1951 a 1962. Každé z jejích dalších vydání bylo vždy aktualizováno o nejnovější poznatky z oboru. Ochrana před bleskem se věnovaly Předpisy ESČ z roku 1950, které byly roku 1955 nahrazeny ČSN 34 1390.

Její platnost skončila v únoru 2009 a byla nahrazena souborem evropských norem ČSN EN 62305, používaných dodnes.

Při úderu blesku se vyrovnávají napěťové potenciály. Rozdíl potenciálů mezi mrakem a zemí může činit až desítky megavoltů. V přírodě vznikají negativní (výskyt 90 %) a pozitivní (výskyt 10 %) výboje (rozhodující je polarita mraku). Blesk je tvořen vůdčím výbojem (leader) a jedním nebo několika hlavními výboji (vůdčí výboj postupuje k zemi cestou nejmenšího odporu) a vstřícným výbojem ze země (objektu). Spojí-li se tyto dva výboje, vytvoří se hlavní kanál, potřebný pro průchod bleskového proudu. Dlouhodobými měřeními bylo zjištěno, že asi 50 % úderů blesku tvoří jen jeden (první) výboj a asi 50 % úderů blesku se skládá z prvního a následujících výbojů. Většina blesků se šíří shora dolů (sestupné výboje), pouze ve vyšších polohách nebo na velmi vysokých budovách (např. telekomunikační vysílače, stanice mobilních operátorů, věže kostelů apod.) někdy vznikají výboje směrem nahoru (vzestupné) s širokým rozvětvením. Právě blesky a jejich účinky tvoří jedno z největších procentuálních rizik, kterými mohou být ohroženi lidé a předměty uvnitř i vně zasažených budov.

Ve 20. století byly zkoumány možnosti zlepšení tradičních ochranných prostřednictvím sběrných elektrod, efektivnějšího uzemnění a vhodnějším rozmístěním obou komponent. Spolu s nimi se začaly objevovat i specifické prostředky (aktivní, nekonvenční) ochrany objektů před bleskem. Podle typu a využití technologie se rozdělují na systémy konvenční (hromosvodní nebo bleskosvodní jímače) a aktivní, které emitují vstřícné výboje vůči hlavním bleskovým výbojům. Aktivní blesková ochrana zahrnuje zprvu systémy s radioaktivním nuklidem a zadruhé ochrany využívající elektronických obvodů (pasivní RLC obvod v podobě oscilátoru). Radioaktivní i elektronické jímače s označením Early Streamer Emission (ESE) – s urychleným vysláním vstřícného výboje – byly v literatuře často diskutovány jak po praktické, tak po odborné stránce jejich účinnosti proti bleskovým výbojům. Negativní posudky o užití radionuklidových hlavic přinášely už zkušební laboratoře *Elektrotechnického svazu československého (ESČ)*¹ a za dlouho později, roku 1980,

¹ EFMERTOVÁ, M. Elektrotechnika v českých zemích a v Československu do poloviny 20. století: studie k vývoji elektrotechnických oborů. 1. vyd. Praha: Libri, 1999, s. 96–101. ISBN 80-85983-99-0.

byly v mnohých zemích omezeny na základě zpřísněných podmínek pro ochranu před radioaktivním vyzařováním. Aktivní jímače se na základě reklamy vyrábějí a prodávají stále v mnoha zemích. Měření v laboratoři a mnohé zkoušky za přirozených podmínek však dokazují, že jímače ESE nevykazují lepší vlastnosti než konvenční jímače. Hypotéza, na níž jsou založeny, je proto pravděpodobně nesprávná. S příchodem a rozšiřováním využití elektrické energie a elektrických zařízení však vyvstala nutnost chránit nejen objekty před přímým zásahem pomocí hromosvodu, ale také elektrická vedení a techniku před nebezpečným pulsním přepětím. Následné ztráty způsobené výpadky výroby, ztrátou dat a informací bývají ještě vyšší než přímé škody na zařízení. Je to cena za rozšiřování špičkové techniky, rostoucí počet počítačů a masové aplikace mikroprocesorů v technických zařízeních a spotřebičích. Nechráněné elektrické rozvody, počítačové a datové sítě představují vždy značné riziko pro jejich uživatele. Proto je třeba tyto zařízení chránit pomocí přepětových ochrany. Instalace přepětových ochrany je především prevencí proti možným škodám. Jejich náklady bývají pouze nepatrným zlomkem pořizovací hodnoty chráněné techniky a nepatrnou částkou možných škod zaviněnými výpadky a zničením technologického zařízení. Proto je třeba je neustále zdokonalovat a odstraňovat zastaralé a neúčinné metody a principy.

Základním principem přepětové ochrany je vzájemné pospojování všech vodivých částí v objektu, čímž dojde k zamezení vzniku rozdílných potenciálů, tedy příčiny nebezpečného napětí mezi těmito částmi. Galvanické spojení jednotlivých vodičů samozřejmě není možné s důvodu vzniku nefunkční instalace. K jejich spojení v okamžiku vzniku přepětí proto slouží právě přepětové ochrany. Ty mají při jmenovitém napětí obrovský odpor blízký se odporu izolantu. Při zvýšení napětí však jejich odpor prudce klesne a dovolí vytvoření galvanického spojení pracovního vodiče s ekvipotenciální přípojnici. Vznikne tak krátkodobý řízený zkrat, který odvede nebezpečné přepětí mimo chráněné zařízení. Realizace takových ochrany je možná mnoha způsoby (varistory, jiskřiště, supresorové diody atd.), Každý z nich s sebou nese své specifické výhody i úskalí.

1.1 Cíle práce

Cílem disertační práce je vytvořit bázi řešení praktických příkladů ochrany osob i předmětů a objektů před přímými i nepřímými účinky bleskových proudů. Hlavním cílem je představení možných numerických způsobů řešení konkrétní praktické úlohy (vytvoření matematického modelu chráněného objektu), její ověření v laboratorních podmínkách a validace získaných údajů s matematickým (počítačovým) modelem.

Vedlejšími cíli jsou potom především jednotlivé případové studie z oblasti ochrany dřevostaveb a alternativních staveb, na kterých demonstrují často nevhodná rozhodnutí, která mohou vést k ohrožení lidí, zvířat, majetku a mohou působit destruktivní selhání inženýrských infrastruktur. Navržení opatření, která by vedla ke zvýšení bezpečnosti osob nacházející se za bouřky ve stavbách. Ekonomická optimalizace výsledků a jejich praktické využití pro snížení hmotných škod způsobených bleskem na stavbách.

1.2 Současný stav řešené problematiky

Ochrana před přímým i nepřímým úderem blesku do objektů patří v posledním decéniu 21. století k aktuálním a stále častěji řešeným otázkám. Bleskový výboj, jako velmi obtížně predikovaný fenomén, začal být v posledních letech exaktně studován na základě nových odborných poznatků a za přispění moderních měřicích metod. Vnější ochrana před bleskem se tak již nestala jediným způsobem ochrany před jeho účinky. Rozvoj výkonové elektroniky napomohl ke kvalitativnímu i kvantitativnímu zlepšení ochranných systémů. Vzhledem k obtížnému modelování bleskových výbojů, není dosud výzkum v oblasti přesného napodobení bleskového výboje uzavřený. Velkým přínosem pro praxi byl v roce 2006 (platný od 11/2006) vydaný mezinárodní soubor norem IEC 62305, nyní již v druhé edici,² který shrnul dosavadní poznatky o účincích bleskových výbojů do praktických výstupů. Většina evropských států se tak řídí tímto

² IEC 62305-1 (EN 62305-1):2010-12 Protection against lightning, Part 1: General principles IEC 62305-2 (EN 62305-2):2010-12 Protection against lightning, Part 2: Risk management IEC 62305-3 (EN 62305-3):2010-12 Protection against lightning, Part 3: Physical damage to structures and life hazard IEC 62305-4 (EN 62305-4):2010-12 Protection against lightning, Part 4: Electrical and electronic systems within structures.

standardem a v některých zemích se stal dokonce závazným. Důležitost a význam výzkumu v oblasti ochrany před bleskovým výbojem dokládá i nárůst počtu stran souboru norem z původní Československé normy 34 1390 – cca se sto stranami³ na současných 366 stran u ČSN EN 62305⁴. Vzhledem k harmonizaci a nezávaznosti norem v ČR to není jediný materiál, který může být podkladem pro správný návrh, konstrukci nebo revizi ochranného systému. Dnes již existuje značné množství popularizačních i striktně odborných textů, které mohou být vhodným vodítkem při studiu problematiky ochrany před bleskem.

Nárůst zájmu o tuto důležitou problematiku nejenom v české, ale i zahraniční odborné společnosti dokládá i každé dva roky pořádaná mezinárodní symposia ICLP – International Conference on Lightning Protection,⁵ APL – Asia Pacific International Conference on Lightning,⁶ nebo ICOLSE – International Conference on Lightning & Static Electricity,⁷ která referují o zásadních problémech oboru. Všechny uvedené konferencí se spolu s kolegy snažím aktivně účastnit.

³ ČSN 34 1390 – Elektrotechnické předpisy ČSN. Předpisy pro ochranu před bleskem, platnost ukončena k 1. 2. 2009.

⁴ ČSN EN 62305 Ochrana před bleskem. Druhá edice, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011–2013. Část 1: Obecné principy (09/2011), Část 2: Řízení rizika (02/2013), Část 3: Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života (01/2012), Část 4: Elektrické a elektronické systémy ve stavbách (09/2011).

⁵ Pravidelná konference, která se od roku 1951 specializuje na problematiku fyziky bleskového výboje, ochrany před přímými i nepřímými účinky bleskových výbojů. Více informací viz: The History of the International Conference on Lightning Protection. *ICLP* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.iclp-centre.org/about.php>.

⁶ Konference, která se zaměřuje od roku 2003 na problematiku účinků bleskových výbojů a cílí především na země s jejich největším výskytem. Jednotlivě se konaly: Thailand (Thajsko, 2017), Beijing (Čína, 2003), Seoul (Jižní Korea, 2004), Tokyo (Japonsko, 2005), Guangzhou (Čína, 2007), Jeju (Jižní Korea, 2008), Yokohama (Japonsko, 2009), Chengdu (Čína, 2011), Seoul (Jižní Korea, 2013) a Nagoya (Japonsko, 2015). Více informací viz: Welcome to The 10th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2017). *APL* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://apl2017.org/index.html>.

⁷ Konference, která se specializuje na širší problematiku bleskových výbojů včetně jejich sekundárních účinků. Pravidelně se koná od roku 1999: Nagoya (Japonsko, 2017), Toulouse (Francie, 2015), Seattle (USA, 2013), Oxford (Velká Británie, 2011), Pittsfield (USA, 2009), Paris (Francie, 2007), Seattle (USA, 2005), Blackpool (Velká Británie, 2003), Seattle (USA, 2001), Toulouse (Francie, 1999). Více informací viz: Conference history. *ICOLSE* [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: http://www.icolse2017.org/data/about_icolse.html#sec1.

Hlavní otázkou návrhu vhodné ochrany před bleskovým výbojem u objektu stále zůstává místo průniku do vnitřních částí instalací, rozdělení bleskového proudu v jednotlivých svodech a zemničích a vzájemné působení prostřednictvím kapacitních a induktivních vazeb s vnitřními instalacemi. Na rozdíl od vydaných norem a od samotného modelování a návrhu přepětových ochrany byla tomuto tématu věnována znatelně menší pozornost v domácí i zahraniční literatuře. V rámci své disertační práce jsem se rozhodl otevřít diskusi nad možnými způsoby modelování vnější ochrany před bleskem u reálných objektů zahrnující všechny komponenty ochranného systému (jímač, svodové vedení, uzemnění, včetně mřížových soustav, atd...).

Nedílnou součástí práce je studium vhodného analytického vyjádření bleskového proudu pro účely modelování.

Výpočtům elektromagnetických polí v blízkosti bleskových kanálů a jimi způsobenými přepětími je věnována pozornost od 70. let 20. století. Příkladem může být nasazení analytických rovnic pro výpočet vertikálních bleskových kanálů v pracích Umana (1975)⁸, nebo vlivy uzemnění v pracích Rachidiho (1996)⁹, pozornost byla zaměřena i na výpočty indukovaných napětí ve venkovních vedení VN a VVN, stejně tak jako v telekomunikačních sítích.

V roce 1996 byla odvozena Cooray-Rubinsteinova rovnice¹⁰ pro výpočet indukovaných napětí ve frekvenční oblasti akceptující konečnou vodivost země. Přepětí a přímé údery bleskového výboje začaly být simulovány prostřednictvím elektromagnetického transientního programu Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP).¹¹ Počátkem 90. let 20. století začaly tyto

⁸ UMAN, M. A., MCLAIN, D. K., KRIDER, E. P. "The electromagnetic radiation from a finite antenna," in *American Journal of Physics*, vol. 43, pp. 33–38.

⁹ RACHIDI, F., NUCCI, C. A., IANOZ, M., MAZZETTI, C. "Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, pp. 404–407.

¹⁰ CALIGARIS, C., DELFINO, F., PROCOPIO, R. "Cooray–Rubinstein Formula for the Evaluation of Lightning Radial Electric Fields: Derivation and Implementation in the Time Domain," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 1, 2008, pp. 194–197. doi: 10.1109/TEMC.2007.913226.

¹¹ ATP je bezplatná verze programu EMTP (The Electromagnetic Transients Program). ATP a EMTP jsou pravděpodobně nejpoužívanější simulační programy pro rychlé přechodné děje. Více informací viz:

modely přecházet z akademického prostředí do běžné praxe a byly pomocí nich řešeny konkrétní inženýrské úlohy.

V posledních dvaceti letech došlo ke zřetelnému nárůstu metod, které pracují na základě metody konečných diferencí /finite-difference time domain (FDTD)/, na základě metody konečných prvků /finite-element methods (FEM)/ nebo ekvivalentních obvodů /partial-element equivalent-circuit (PEEC)/, případně kombinovaných elektromagnetických obvodů /hybrid electromagnetic model (HEM)/.

1.3 Vymezení předmětu studia

Ve své disertační práci se zabývám aplikací numerických výpočetních modelů na reálné praktické příklady ochrany před bleskem. Konkrétně jsem se zaměřil na problematiku alternativních staveb, které využívají hořlavé a snadno zápalné materiály – nejčastěji jsou takovými dřevostavby (je zde časté použití jednotlivých specifických materiálů: sádkartony, izolační výplně, minerální vaty, plechy, PVC, PE). V disertační práci studuji jak teoretickou, tak praktickou stránku problematiky ochrany před bleskem. V případových studiích pak na laboratorních modelech demonstruji negativní hlediska nevhodně zvolené ochrany.

2 Teorie blesku a bouřky

2.1 Bouřkové mraky a jejich elektrické jevy^{12,13}

Blesky vznikají při bouřkách a můžeme je podle vzniku rozlišit na:

- bouřky z tepla, kdy se země v určitém místě zahřívá intenzivním slunečním zářením a ohřáté vrstvy vzduchu nad povrchem země jako lehčí stoupají vzhůru,
- bouřky frontální, při nichž následkem postupu studené fronty vytlačuje studený vzduch teplý vzduch směrem nahoru,
- bouřky orografické (horské), při nichž jsou spodní vrstvy teplého vzduchu následkem terénního vyvýšení vytlačovány větrem vzhůru.

Ve všech těchto případech dochází ke vzniku bouřkových buněk v mracích, protože vertikální pohyb vzduchu je dále zesilován dvěma jevy. Stoupající vzduch je ochlazován, až dosáhne teploty nasycení vodních par. Dochází k vytvoření kapek a při kondenzaci se vzduch znovu ohřeje, takže znovu začíná stoupat. Dalším ochlazováním dochází k poklesu teploty pod nulu, mrznutí znamená nové uvolnění tepla a stoupání vzduchu se dále zrychluje až k rychlostem okolo 100 km/hod.

Přitom dochází ke vzniku a rozdělování elektrických nábojů v kapičkách vody nebo ledu. Kladně nabitě částičky jsou zpravidla „lehčí“ než záporné, a to znamená, že se v bouřkovém mraku oddělí oblasti s kladným nábojem – nahoře (část jich však zůstává úplně dole) a záporným nábojem – uprostřed. Z fyzikálního hlediska je tedy bouřkový mrak gigantický elektrostatický generátor, kde je každá buňka schopna produkovat

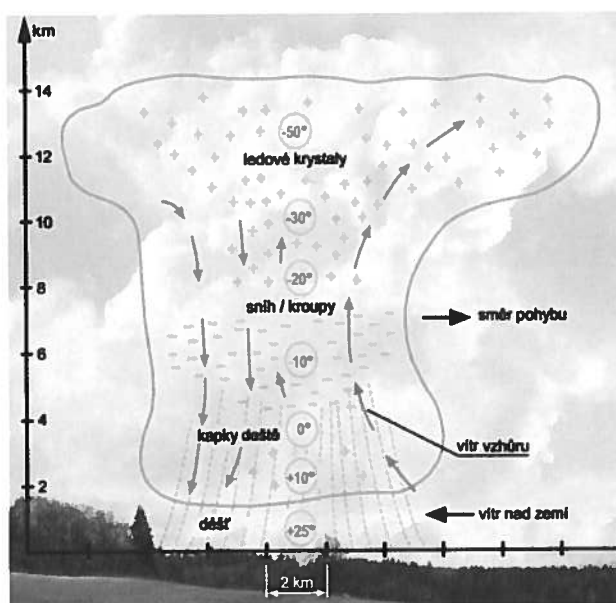
¹² Zpracováno podle: KUTÁČ, J., ROUS, Z., HLADNÝ, Z. Hromosvody a zemniče. 2. přeprac. vyd. Praha: IN-EL, 2008. Elektro. Dílenská příručka, sv. 17. ISBN 978-80-86230-45-0.

¹³ BURANT, J. Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3 a také MIKEŠ, J. Vnější ochrana před bleskem – semestrální práce. Praha: ČVUT v Praze, 2004.

Bouřka je souborem elektrických, optických a akustických jevů vznikajících mezi oblaky navzájem nebo mezi oblaky a zemí. Bouřky označujeme podle doby a místa vzniku, pohybu, vzdálenosti od místa pozorování, intenzity projevů atd. Bouřky jsou vázány na cumulonimby. Oblak má několik dalších synonymních jmen - kumulonimbus, bouřkový oblak a kupa dešťová - definice z technického naučného slovníku dostupného na: Cumulonimbus. *Bouřkový oblak* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus>.

průměrně dva až čtyři blesky za minutu, které vznikají při intenzitě elektrického pole řádově stovky kV/m.

Typickou buňku pro bouřku z tepla ukazuje obr. 1. Často se rozkládá až do výšek přes 10 km, zatímco spodní okraj mraku je typicky 1 až 2 km nad zemí. Teplota ubývá s rostoucí výškou: od teploty půdy okolo +25 °C až k teplotě na horní hranici mraku okolo -50 °C. V horní části buňky se nacházejí kladné náboje na ledových krystalech, zatímco v dolních částech převládají záporné náboje vázané na dešťové kapky.



Obrázek 1 – Simpsonův model¹⁴ elektrické struktury bouřkového oblaku

U frontálních a orografických bouřek může být rozložení nábojů silně odlišné. Náboje v mraku indukují na povrchu i uvnitř země náboje, které lze charakterizovat elektrickým polem o intenzitě až několik desítek kV/m, které může vést na povrchu (vrcholky vln, konce trávy) ke vzniku korony. V případě překročení elektrické pevnosti vzduchu mezi mrakem a zemí pak může dojít ke vzniku vodivého kanálu pro bleskový výboj.

¹⁴ BEDNÁŘ, J. Pozoruhodné jevy v atmosféře: atmosférická optika, akustika a elektřina. 1. vyd. Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2.

Množství bouřek je různé v závislosti na možnostech jejich vzniku, obecně jejich počet klesá se zeměpisnou šířkou. V oblasti blíže rovníku vzniká více bouřek než za polárním kruhem. Také v členitém (hornatém) terénu se utváří větší počet orografických bouřek. Měřítkem je zpravidla průměrný počet bouřkových dní za rok pro určitou oblast, tzv. keraunická úroveň.¹⁵ Ta může v tropických oblastech dosahovat více než 200 bouřkových dní v roce, v České republice se pohybuje mezi 15 až 40 dny. Počet uvedených dní byl stanoven mnohaletým pozorováním. Odchyłka od průměrné hodnoty však může být v určitém roce značná.

Nesmíme zapomínat, že lidé často posuzují intenzitu bouřkové činnosti v daném místě podle ničivých následků. Ty jsou ovšem závislé nejen na četnosti bleskových úderů v daném místě, ale též na dalších parametrech, zvláště pak na vodivosti půdy a na odolnosti instalovaných elektrických zařízení proti účinkům přepětí.

Elektronická zařízení s anténami registrujícími změny elektromagnetického pole a propojená počítačovou sítí umožňují více než registraci alespoň jednoho slyšitelného zahřmění během 24 hodin určujícího bouřkový den – lokalizují přímo úder blesku s poměrně dobrou přesností (do 200 m) a umožňují stanovit velikost proudu v kanálu blesku včetně jiných parametrů. Pak lze místo četnosti bouřek stanovit přímo množství úderů blesků do povrchu země. V českých zemích se pohybují průměrné hodnoty v rozsahu 2 až 5 úderů za rok do 1 km² povrchu Země.

Již před několika lety bylo zahájeno **Českým hydrometeorologickým ústavem** (ČHMI) zavádění kvalitnějšího systému registrace bleskových výbojů i na českém území.¹⁶ Jsou využívány informace ze zaměřovacích stanic v okolních zemích (Německo, Rakousko, Maďarsko, Slovensko, Polsko) a v Čechách a na Moravě byla rovněž zřízena dvě centra (Komořany a Mohelnice). Tento systém umožňuje už dnes

¹⁵ **Keraunické číslo (úroveň)** je číslo popisující průměrný počet bleskových výbojů v dané lokalitě. Definuje se jako průměrný počet zaznamenaných úderů za rok. Z takto získaných údajů je sestavena tzv. **isokeraunická mapa**, která spojuje místa se stejným **isokeraunickým číslem**. S ohledem na přesnější metody měření bleskových výbojů (takové, které rozlišují výboje mezi mrakem a zemí, respektive mezi mraky) se začíná používat tzv. **flash density map**.

¹⁶ Dostupné z: Central European Lightning Detection Network. **CELDN** [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: <http://www.euclid.org/celdn.html>.

stanovit nejen místa úderů blesku (s přesností do 50 m), ale také jejich trvání a nejdůležitější parametry blesku (vrcholovou hodnotu proudu, strmost aj.).¹⁷ Mohou sloužit především pojišťovněm k posuzování případů ekonomických škod způsobených bleskem, případně při návrhu ochranných opatření pro ochranu před bleskem.

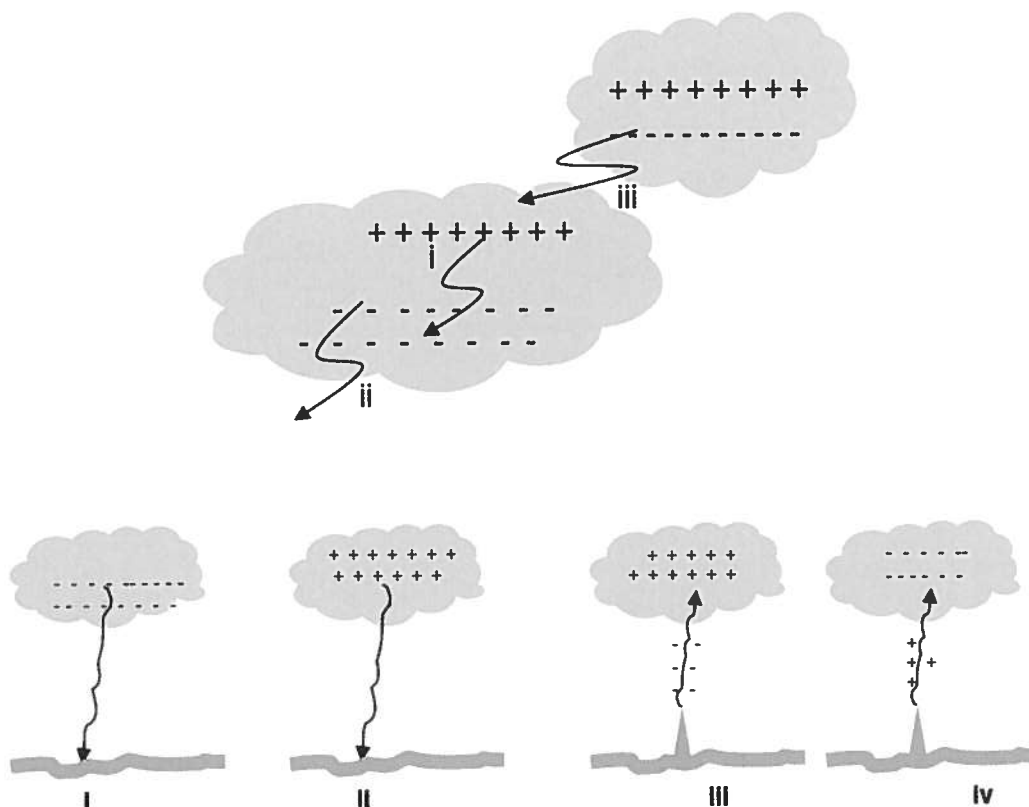
2.1.1 Čárový blesk

Ze záporného centra náboje ve spodní části mraku se při napětí mezi mrakem a zemí dosahujícím několika stovek milionů voltů posouvá směrem k zemi **vůdčí vyhledávací výboj** o průměru až několika desítek metrů, uvnitř s plazmovým jádrem o průměru okolo 1 cm. Tento tzv. vůdčí výboj (leader) postupuje rychlostí asi 300 km/s, a to trhaně po několika desítkách metrů s přestávkami několika desítek mikrosekund (μs). Když se přiblíží k zemi na vzdálenost několika desítek až stovek metrů, zvýší se na špičkách blízkých stromů nebo domů intenzita elektrického pole natolik, že dojde k překročení elektrické pevnosti vzduchu a vzhůru je excitován **vstřícný vůdčí výboj** (streamer), který se setká se **sestupujícím vůdčím výbojem**. Tím je určena dráha blesku a místo úderu. **Vstřícný hlavní výboj** se takto vytvořenou drahou dostává vzhůru do mraků rychlostí asi jedné třetiny rychlosti světla (100 000 km/s). Teprve tento jev je vnímán jako viditelný světelný bleskový výboj. Kanál blesku se zahřívá na teplotu několika desítek tisíc stupňů Celsia a má průměr několika centimetrů. Tlak vzduchu se zvýší na stonásobek normálního tlaku, což vnímáme jako zahřmění. Délka vertikálního blesku je průměrně 5 až 7 km, při horizontálních výbojích 8 až 16 km a výboje uvnitř mraků mohou mít délku jen několik metrů. Při tzv. **hlavním výboji** protéká kanálem blesku krátký vysoký proud s typickou hodnotou několika desítek kA, může však dosáhnout i několika stovek kA. Přenášený náboj bývá zpravidla jednotky až desítky coulombů. Typický průběh hlavního výboje bleskového proudu ukazuje obr. 2.

Jedním kanálem blesku však často proběhne několik dílčích hlavních výbojů postupně vybíjejících další nabitě oblasti v mraku, mezi nimiž může protékat menší proud

¹⁷ Detekce blesků. ČHMI [online]. [cit. 2017-08-27]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/detekce-blesku>.

o velikosti několika stovek ampérů. Tento proud zvětšuje náboj a tím i energii bleskového proudu, což má svůj význam při vzniku požáru. Dílčích výbojů může být až několik desítek, v takovém případě pak může trvání celého blesku překročit i jednu sekundu.

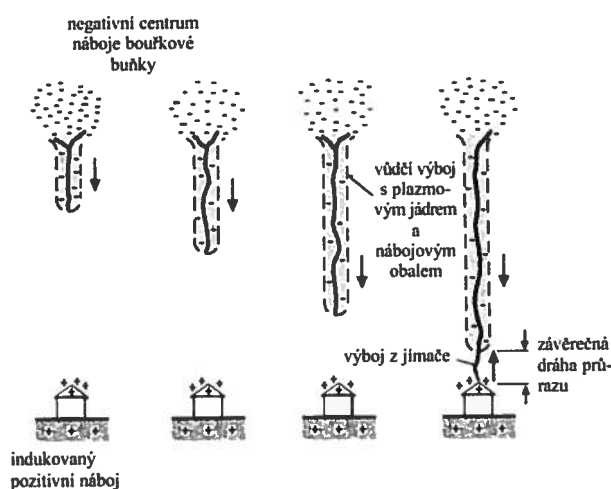


Obrázek 2 – Typy jednotlivých atmosférických výbojů a): I – výboj uvnitř mraku, II – výboj vznikající v atmosféře, III – mezioblačný výboj. b): I – vyhledávací negativní výboj k zemi, II – vyhledávací pozitivní výboj k zemi, III – vstřícný pozitivní výboj, IV – vstřícný negativní výboj¹⁸

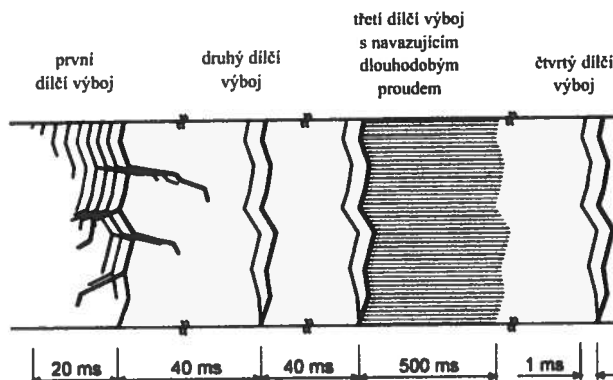
Měření elektromagnetických polí v okolí bleskových výbojů ukazují, že záporný blesk směřující od mraku směrem dolů je iniciován dělením nábojů uvnitř oblaku – tato počáteční fáze se nazývá **předběžný výboj** (obr. 3). Tento proces vede k separaci náboje nazývaného **stupňovitý vůdčí výboj** (obr. 4), který se postupně pohybuje z oblaku na zem. Často bývá pojem **předběžný výboj** směřován s pojmem

¹⁸ BURANT, J. Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80- 86534-10-3. Viz též COORAY, V. (ed.). Lightning protection. London: IET, 2009.

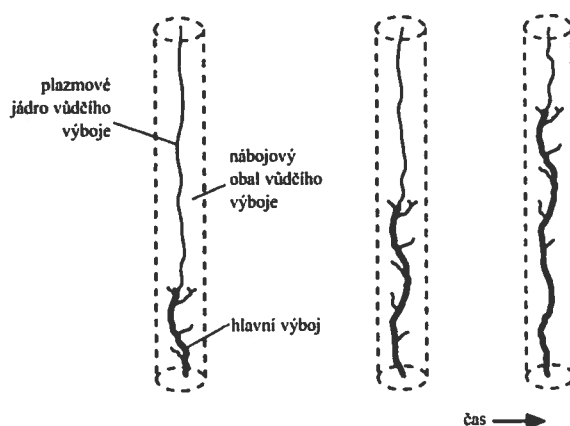
stupňovitého vůdčího výboje, a často bývají oba procesy slučovány do jednoho. Na cestě k zemi může docházet k větvení výboje. Jak se **stupňovitý vůdčí výboj** přibližuje k zemi, zvyšuje se intenzita elektrického pole při povrchu země. Když **stupňovitý vůdčí výboj** dosáhne výšky asi několika set metrů nad zemí, elektrické pole na špičce uzemněných konstrukcí se zvětšuje na takovou úroveň, že z nich jsou iniciovány elektrické výboje. Tyto výboje se nazývají **vstřícné výboje**. V okamžiku, kdy dojde ke spojení obou procesů, proteče ve vodivém kanálu, který je rozžhaven na několik desítek tisíc stupňů Kelvina (K) tzv. **zpětný výboj** (obr. 5).



Obrázek 3 – Rozvoj vůdčího výboje



Obrázek 4 – Rozvoj stupňovitého vůdčího výboje



Obrázek 5 – Rozvoj zpětného (hlavního) výboje přes vúdčí výboj

Pro inženýrskou praxi jsou však nejdůležitější účinky samotného zpětného výboje a elektrická pole generovaná před a v průběhu uzavření bleskového výboje k zemi.

Pro studie ochrany před bleskem jsou elektrická pole důležitá především z důvodu:

- elektrická pole generovaná na zemském povrchu iniciují vzestupné proudy, které směřují od země k bouřkovému oblaku,
- vlivem sršení (korony) se na ostrých hrotech, větvích stromů, listí generuje prostorový náboj, který potom ovlivňuje místo připojení vúdčího a vstřičného výboje,
- mění se elektrická pole jsou lokalizovatelná indikačními přístroji, které mohou být použity jako varovné systémy pro informace o blížící se bouři.

Odborné studie¹⁹ prokazují i značnou souvislost velikosti elektrických polí s nadmořskou výškou, v nižších nadmořských výškách jsou intenzity elektrických polí blízké $\sim 20 \frac{kV}{m}$, v nadmořské výšce kolem 600 m může intenzita vzrůst až na $\sim 60 \frac{kV}{m}$.

Vliv na místo potenciálního možného zásahu má i velikost prostorového náboje, která se utváří vlivem korony a hrotového efektu, a to v okamžiku, kdy intenzita dosáhne velikosti několika desítek kV/m. S narůstajícím časem jsou ionty posunovány vlivem elektrického pole vzhůru k oblaku. Tento jev však není dominantní a na změny

¹⁹ ERIKSSON, A. J. The Lightning Ground Flash – an Engineering Study. PhD Thesis. Faculty of Engineering, Pretoria, South Africa: University of Natal, 1979.

elektrických polí v okolí místa zásahu má jen malý vliv. Model zabývající se vlivem prostorového náboje na místo zásahu bleskovým výbojem byl prezentován v pracích Chauzy a Rennela.²⁰

2.1.2 Výpočet elektrického pole ze Simpsonova modelu²¹

Výpočet elektrického pole stanovil G. C. Simpson prostřednictvím teoretických i experimentálních zjištění. Stanovil rozložení kladného náboje o velikosti 24 C do kulového objemu o poloměru 2 km a středu cca ve výšce 6 km nad zemským povrchem při teplotách kolem $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, záporný náboj 20 C je potom v jeho případě situován do koule o poloměru 1 km a středu ve výši 3 km, kde se již teplota pohybuje kolem $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podružné centrum lokálního kladného náboje o velikosti 4 C situoval rovněž do podoby kulového objemu s poloměrem 0,5 km, středem ve výši 1,5 km a teploty přibližně $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Elektrické pole²² získané v okolních částech kumulonimbu je vytvořeno nejenom zmíněnými centry lokalizovaných nábojů, ale zároveň i náboji, které vznikají indukci elektrického pole na zemském povrchu. Pro analogické případy se v teorii elektrostatického pole používá metoda zrcadlení.²³

Analogický princip – dva stejné bodové elektrické náboje – opačné polarity a o velikosti Q jsou umístěny ve vertikální rovině nad sebou ($+Q$ a $-Q$). Záporný ($-Q$) lokalizujeme

²⁰ SOULA S., CHAUZY, S. "Multilevel measurement of the electric field underneath a thundercloud 2. Dynamical evolution of a ground space charge layer," in *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, D12, pp. 22327–36. Také BECERRA, M., COORAY, V., SOULA, S., CHAUZY, S. "Effect of the space charge layer created by corona at ground level on the inception of upward lightning leaders from tall towers," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 2007. doi: 10.1029/2006JD008308, D 12205.

²¹ BEDNÁŘ, J. Pozoruhodné jevy v atmosféře. 1. vyd. Praha: Academia, 1989, s. 205–208. ISBN 80-200-0054-2. Také HASMAN, T. Přepětí v elektroenergetických soustavách. Praha: ČVUT, 2004 a 1997. (Tento model byl poprvé publikován v roce 1940 G. C. Simpsonem, nejedná se o jediný model, který byl dosud pro exaktní studium bleskových výbojů vytvořen, ale patří k nejcitovanějším a odbornou literaturou k nejkompaktnějším.).

²² BEDNÁŘ, J. Pozoruhodné jevy v atmosféře. 1. vyd. Praha: Academia, 1989, s. 205–208. ISBN 80-200-0054-2 - zde je rozebrán komplexní výpočet příspěvků tvořících celý příspěvek intenzity elektrického pole v bodě P v blízkosti kumulonimbu.

²³ Kromě elektrických nábojů v oblacích pracujeme i s fiktivními náboji, které mají opačnou polaritu a umístěny jsou zrcadlově symetricky k rovině, kterou aproximujeme zemský povrch.

do výšky h a kladný náboj $(+Q)$ do výšky H ($h \leq H$). V bodě P se nachází dostatečně vzdálený pozorovatel, na nějž působí přibližně stejně velký, ale opačně orientovaný gradient elektrického pole. Vzhledem k nerovnoměrné poloze kladného a záporného náboje uvnitř kumulonimbu převažuje vertikální složka kladného náboje.

Kvalitativní představu můžeme kvantifikovat výpočtem elektrického pole v bodě P .

$$|E^{(-)}| = |E^{(+)}| = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)}$$

kde H (m) – výška nad fiktivní rovinou, Q (C) – náboj lokálních center mraku, r (m) – horizontální vzdálenost průmětny od pozorovatele P , ϵ_0 - permitivita vakua ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Pro studium směrů velikostí nábojů pomůže představa, že u záporného náboje je směr intenzity opačný ke spodnímu náboji $(-Q)$ a pro druhou polaritu směřuje intenzita od bodu P k hornímu náboji Q .

$$|\vec{E}| = 2|\vec{E}^{(-)}| \cos(90^\circ - \alpha) = 2|\vec{E}^{(+)}| \cos(90^\circ - \alpha) = 2|\vec{E}^{(-)}| \sin \alpha = \frac{|Q|H}{2\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Jednoduchou úpravou tvarů využitých při formování představy rozložení nábojů v obrázku zavedeme

$$|\vec{E}| = k \frac{\sin \alpha}{R^2}$$

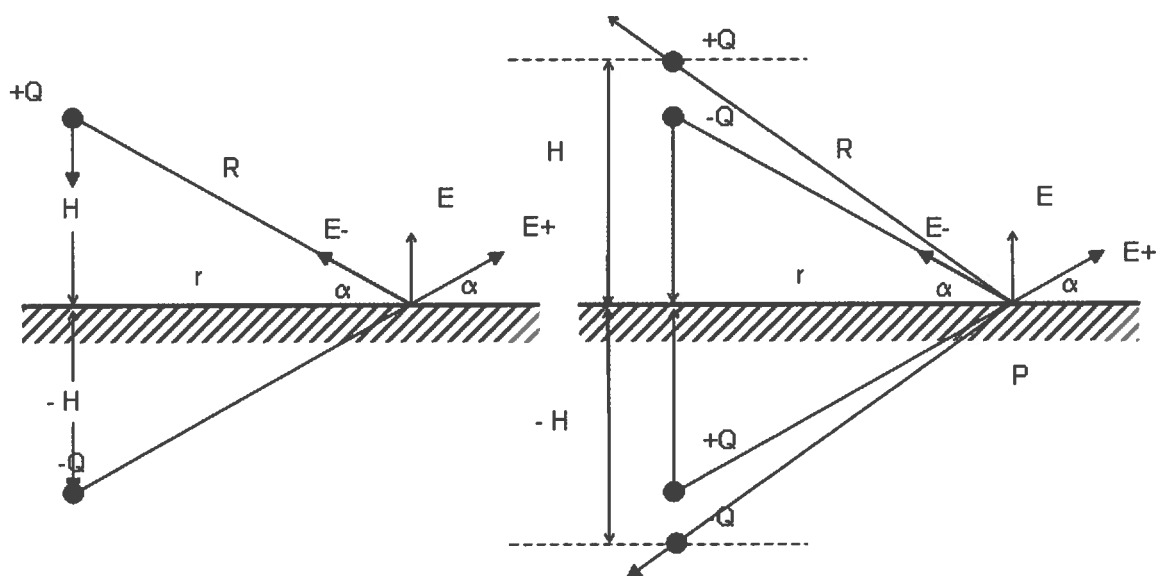
Náboj v lokálních centrech kumulonimbů zůstává konstantní, lze tedy zavést koeficient

$$k = \frac{|Q|}{2\pi\epsilon_0}$$

a z pravoúhlého trojúhelníku platí potom Pythagorova věta $R^2 = (H^2 + r^2)$

Následující úvaha je provázena předpokladem, že nárůst výšky mraku ve vzdálenosti H od nuly do $H = \frac{D}{\sqrt{2}}$ při konstantní vzdálenosti r způsobí, že intenzita elektrického pole rychle narůstá - děje se tak vlivem rychlého nárůstu $\sin \alpha$ oproti R^2 . Opačně při klesání

výšky H , naopak R^2 klesá se strmostí větší, než $\sin \alpha$. Výsledkem formovaného procesu je stav, že v bodě P přispívají dvě stejně velké vertikálně umístěné složky intenzity elektrického pole, tyto jsou podobně závislé na vzdálenosti pozorovatele od vertikální roviny mraku (obr. 6). Uvažujeme-li, že H je konstantní, pak závislost intenzity pole klesá s klesající vzdáleností pozorovatele r . Strmost ovlivňuje velikost výšky H . Celý výpočet je v některých ohledech zjednodušen, při komplexním studiu je potřeba uvažovat náboje ve všech lokálních centrech, která se uvnitř kumulonimbu tvoří a která působí na místo pozorovatele P . V literatuře²⁴ je možné se přesvědčit o různé hustotní reprezentaci dílčích nábojových center uvnitř kumulonimbu v závislosti na lokalitě, kde je výpočet realizován.²⁵



Obrázek 6 – Metoda zrcadlení ve studiu rozložení elektrického pole při působení nábojů kumulonimbu²⁶

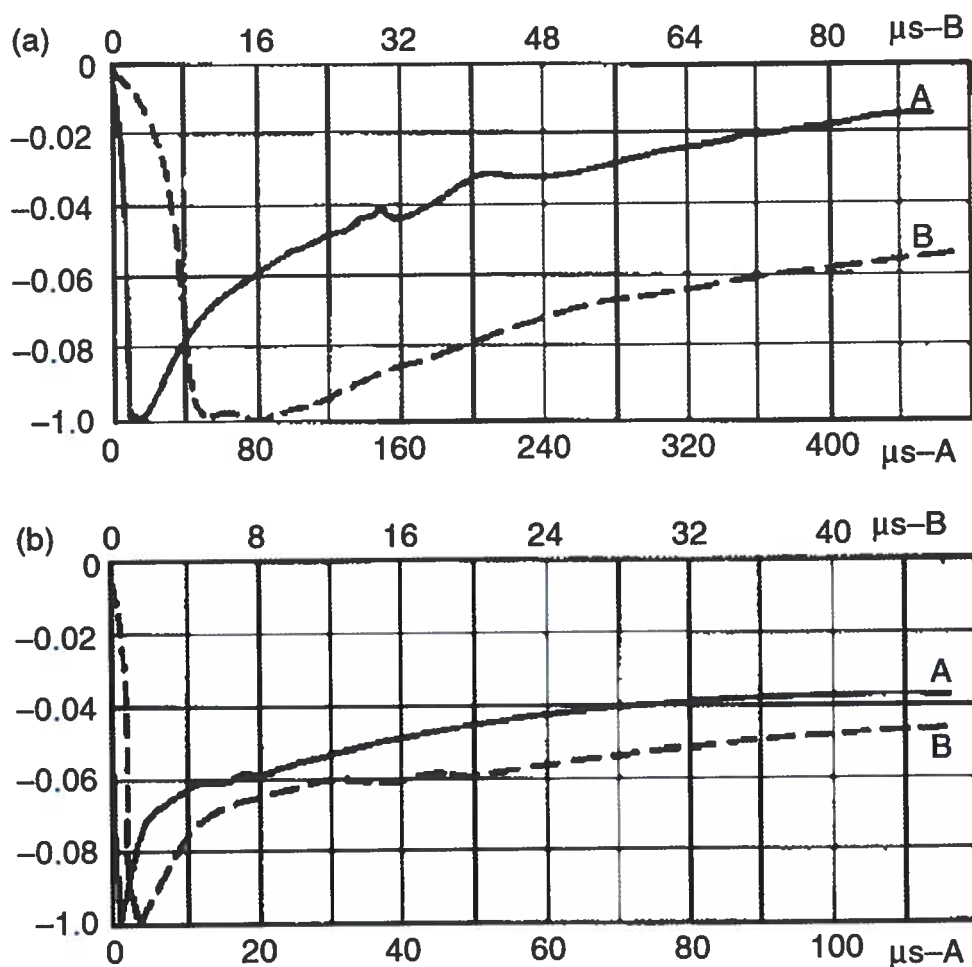
²⁴ RAKOV, V., UMAN, M. Lightning, Physics and Effects. New York : Cambridge Press, 2003. ISBN 0-521-58327-6.

²⁵ CHALMERSE (1967) uvedl, že v rovníkových oblastech nevyklučuje výskyt kumulonimbů se zápornou bipolární strukturou – tedy s kladným nábojem v dolní části oblaku a s opačným nábojem v horních vrstvách – pro tento výpočet srovnej s BEDNÁŘ, J. Pozoruhodné jevy v atmosféře. 1. vyd. Praha: Academia, 1989, s. 205–208. ISBN 80-200-0054-2.

²⁶ RAKOV, V., UMAN, M. Lightning, Physics and Effects. New York : Cambridge Press, 2003, zejména p. 70. ISBN 0-521-58327-6. Také MIKEŠ, J. Vnější ochrana před účinky atmosférické elektřiny. Diplomová práce, Praha: ČVUT v Praze, 2006, s. 65–69.

3 Matematická reprezentace proudové vlny

Pro inženýrskou praxi návrhu ochrany před přímými i nepřímými účinky bleskových výbojů jsou nejdůležitější znalosti o velikosti procházejícího proudu skrz vodivý kanál vyvolaný *zpětným výbojem*. Velikosti prvního a následných *zpětných výbojů* vyjádřil souhrnně Berger²⁷ na základě mnohačetných měření a jsou uvedeny na obr. 7. Velikost proudu je uvedena v poměrných jednotkách.



Obrázek 7 – Měřené a statisticky průměrované průběhy zpětných výbojů vyjádřené v poměrných jednotkách: A) prvního zpětného výboje, B) následných zpětných výbojů

²⁷ BERGER, K., ANDERSON, R.B., KRONINGER, H. "Parameters of lightning flashes," in *Electra*, vol. 41, 1975, pp. 23–37.

Pro praktický výpočet, respektive pro modelování návrhů ochran je tento postup však nevhodný a je třeba zavést analytické vyjádření. Během několika desetiletí výzkumů tvarů a velikostí proudů protékajících uvnitř zpětných výbojů, byly stanoveny četné návrhy analytických vyjádření:

1) Proudová vlna definovaná standardem CIGRE²⁸

$$I(t) = A * t + B * t^x$$

kde **A** a **B** jsou konstanty a **t** je čas. Náběžná hrana vícenásobných zpětných výbojů je reprezentována vztahem $I(t) = s_m * t$, kde s_m je maximální krok. Podle vztahu $I(t) = A * t + B * t^x$ nastává nestrmější nárůst v čase t_n v závislosti na exponentu x . Obě proměnné s_m a t_n byly odvozeny iterací z obecného vztahu:

$$\left(\frac{1 - 3 * x}{2 * S_N}\right) * (1 - x)^\psi = \frac{x * (\psi - 1)}{2 * S_N} + \left(\frac{1 - 3 * x * \psi}{2 * S_N}\right) * (1 - x)$$

$$S_N = s_m * \frac{t_f}{I}$$

$$X_N = 0,6 * \frac{t_f}{t_n}$$

t_f je čas náběhu. Dostatečně přesná řešení lze získat řešením rovnic pro ψ a t_n :

$$\chi = 1 + 2 * (S_N - 1) * \left(2 + \frac{1}{S_N}\right)$$

a

$$t_n = 0,6 * t_f * \left[\frac{3 * S_N^2}{(1 + S_N^2)}\right]$$

konstanty **A** a **B** jsou potom stanoveny:

²⁸ Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33, October 1991.

$$A = \frac{1}{\chi - 1} * \left[0,9 * \frac{I}{t_n} * \chi - s_m \right]$$

$$B = \frac{1}{t_n^\chi * (\chi - 1)} * [s_m * t_n - 0,9 * I]$$

Týl proudové vlny je potom definován jako:

$$I = I_1 * e^{-\frac{t-t_n}{t_1}} - I_2 * e^{-\frac{t-t_n}{t_2}}$$

kde I_1 a I_2 jsou konstanty a t_1 a t_2 jsou časové konstanty

$t_1 = \frac{t_h - t_n}{\ln 2}$, kde t_h je poloviční hodnota amplitudy a I_1 a I_2 jsou dány

$$I_1 = \frac{t_1 * t_2}{t_1 - t_2} * \left[s_m + 0,9 * \frac{I}{t_2} \right]$$

$$I_2 = \frac{t_1 * t_2}{t_1 - t_2} * \left[s_m + 0,9 * \frac{I}{t_1} \right]$$

2) Jiným vyjádřením proudové vlny bleskového proudu je metoda používaná v International Electrotechnical Commission (IEC) – tzv. **Heidlerova funkce**²⁹

$$i(t) = \frac{I_P}{\eta} * \frac{k_S^n}{1 + k_S^n} * e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

$$k_S = \frac{t}{\tau_1}$$

Následující tab. 1 precizuje jednotlivé koeficienty stanovené F. Heidlerem pro vyjádření vlny bleskového proudu.

²⁹ HEIDLER, F., SVETIC, J. M., STANIC, B. V. "Calculation of lightning current parameters," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, 1997, pp. 399–404.

Parametry	První zpětný výboj			Následující zpětné výboje		
	LPL			LPL		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV
I (kA)	200	150	100	50	37,5	25
η	0,93	0,93	0,93	0,993	0,993	0,993
τ_1 (μ s)	19,0	19,0	19,0	0,454	0,454	0,454
τ_2 (μ s)	485	485	485	143	143	143

Tabulka 1 – Tabulka vhodných konstant pro zobrazení průběhu bleskového proudu pomocí Heidlerovy funkce

3) Nucciho³⁰ analytické vyjádření bleskového proudu

$$i(t) = \frac{I_{01}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2}{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2 + 1} * e^{\frac{-t}{\tau_2}} + I_{02} * (e^{\frac{-t}{\tau_3}} + e^{\frac{-t}{\tau_4}})$$

Za použití této rovnice můžeme nezávisle počítat bleskový proud v závislosti na parametrech I_{01} a τ_1 . Běžně užívané hodnoty pro **stupňovitý zpětný výboj** mohou být: $I_{01} = 9.9 \text{ kA}$, $\eta = 0.845$, $\tau_1 = 0.072 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_2 = 5 \text{ } \mu\text{s}$, $I_{02} = 7.5 \text{ kA}$, $\tau_3 = 100 \text{ } \mu\text{s}$ a $\tau_4 = 6 \text{ } \mu\text{s}$.

³⁰ NUCCI, C. A., DIENDORFER, G., UMAN, M. A., RACHIDI, F., IANOZ, M., MAZZETI, C. "Lightning return stroke current model with specified channel-base current: a review and comparison," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, 1990, pp. 20395–408.

4) Dindorfer-Umanovo³¹ analytické vyjádření bleskového proudu

Dindorfer s Umanem aproximovali první a následující zpětné výboje jako sumu dvou Heidlerových funkcí.

$$i(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^2}{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^2 + 1} * e^{\frac{-t}{\tau_{21}}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^2}{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^2 + 1} * e^{\frac{-t}{\tau_{22}}}$$

Pro reprezentaci prvního zpětného výboje doporučuje Diendorfer a Uman použít následujících parametrů:

$$I_{01} = 28 \text{ kA}, \eta_1 = 0,73, \tau_{11} = 0,3 \mu\text{s}, \tau_{21} = 6 \mu\text{s}, I_{02} = 16 \text{ kA}, \eta_2 = 0,53, \tau_{12} = 10 \mu\text{s} \\ \text{a } \tau_{22} = 50 \mu\text{s}$$

pro následující zpětné výboje potom:

$$I_{01} = 13 \text{ kA}, \eta_1 = 0,77, \tau_{11} = 0,15 \mu\text{s}, \tau_{21} = 3 \mu\text{s}, I_{02} = 7 \text{ kA}, \eta_2 = 0,64, \tau_{12} = 5 \mu\text{s} \\ \text{a } \tau_{22} = 50 \mu\text{s}$$

s těmito parametry je maximální proud prvního zpětného výboje 30 kA a strmost nárůstu proudu 80 kA/μs, pro případ následných zpětných výbojů 14 kA a 75 kA/μs

5) Delfinovo³² analytické vyjádření bleskového proudu

Delfino použil pro vyjádření zpětných výbojů rovnici podobnou, jako Diendorfer a Uman

³¹ DIENDORFER, G., UMAN, M. A. "An improved return stroke model with specified channel base current," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, 1990, pp. 13621–44.

³² DEFINO, F., PROCOPIO, R., ROSSI, M., RACHIDI, F., NUCCI, C. A. "An algorithm for the exact evaluation of the underground lightning electromagnetic fields," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, 2007, pp. 401–11.

$$i(t) = I_{01} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^2}{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^2 + 1} * e^{\frac{-t}{\tau_{21}}} + I_{02} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^2}{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^2 + 1} * e^{\frac{-t}{\tau_{22}}}$$

V případě prvního zpětného výboje navrhuje použít konstanty:

$$I_{01} = 28 \text{ kA}, \tau_{11} = 1,8 \mu\text{s}, \tau_{21} = 95 \mu\text{s}$$

pro následné zpětné výboje potom:

$$I_{01} = 10,7 \text{ kA}, \tau_{11} = 0,25 \mu\text{s}, \tau_{21} = 2,5 \mu\text{s}, I_{02} = 6,5 \text{ kA}, \tau_{12} = 2 \mu\text{s} \text{ a } \tau_{22} = 230 \mu\text{s}$$

6) Coorayovo³³ analytické vyjádření proudu

$$i(t) = I_{01} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n + 1} + I_{02} * \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)^3}\right] * (ae^{\frac{-t}{\tau_2}} + be^{\frac{-t}{\tau_3}})$$

$$I_{01} = 7,8 \text{ kA}, \tau_{11} = 5 \mu\text{s}, n = 100, I_{02} = 32,5 \text{ kA}, \tau_2 = 4 \mu\text{s} \text{ a } \tau_3 = 100 \mu\text{s}$$

$$a = 0,2 \text{ b} = 0,8$$

Pro typický zpětný výboj má tato vlna pomalý náběh čela $\sim 5 \mu\text{s}$, strmost v čase 10–90 % $\sim 4,5 \mu\text{s}$, celkový náboj 3 C, derivaci proudu v maximum $37 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}$, plocha pod křivkou je $4,5 * 10^4 \frac{\text{A}^2}{\text{s}}$.

Ve většině případů dochází k poklesu hodnoty bleskového proudu v čase řádově několika stovek milisekund na nulu. U některých případů však v intervalu několika milisekund až několika stovek milisekund prochází bleskovým kanálem proud stovek ampér. Existence a doba trvání proudů může být identifikována blízkými elektrickými poli vytvářenými následnými bleskovými výboji. Na základě výsledků získaných z měření záznamů lze pokračující proud rozdělit do několika kategorií. Kitagawa³⁴

³³ COORAY, V., MONTANO, R., RAKOV, V. "A model to represent negative and positive lightning first strokes with connecting leaders," in *Journal of Electrostatics*, vol. 60, 2004, pp. 97–109.

³⁴ KITAGAWA, N., BROOK, M., WORKMAN, E. J. "Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 62, 1962, pp. 637–47.

a Brook³⁵ definovali trvalé proudy delší než 40 ms jako dlouhé pokračující proudy, zatímco Shindo a Uman³⁶ definovali následné proudy v čase trvání mezi 10–40 ms jako krátké pokračující proudy. Rovněž našli příklady, kdy trvání proudu bylo v rozmezí 1–10 ms. Saba a kolegové³⁷ tyto definují jako velmi krátké pokračující proudy. Toto rozdělení, i když je vhodné pro klasifikaci, však postrádá hlubší fyzikální popis. Mohl by tedy existovat stejný fyzikální popis, který způsobuje pokračující proudy, bez ohledu na jejich trvání.

Heidler a Hopf³⁸ studovali pokračující proudy v bleskových výbojích v Německu pomocí záznamů elektrických polí. Podle Heidlera a Hopfa³⁹ bylo 48 % negativních výbojů hybridních, které obsahovaly alespoň jeden trvalý proud. Ve studii, kterou provedl Thompson⁴⁰, bylo zjištěno, že u 34 vícenásobných výbojů mělo 47 % zásahů alespoň jeden kontinuální proud. Ve studii, kterou provedl Shonland,⁴¹ byla tato hodnota 20 %. Podle pozorování Livingstona a Kridera⁴² je četnost výbojů, které mají pokračující proudy, od 29 do 46 %. Ve studii, kterou provedli Shindo a Uman,⁴³ 22 z 90

³⁵ **BROOK, M., KITAGAWA, N., WORKMAN, E. J.** "Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, 1962, pp. 649–59.

³⁶ **SHINDO, T., UMAN, M. A.** "Continuing current in negative cloud-to-ground lightning," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, D 4, 1989, pp. 5189–98.

³⁷ **SABA, M. M. F., BALLAROTTI, M. G., PINTO, O. Jr.** "Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, 2006, D03101.

³⁸ **HEIDLER, F., HOPF, C.** "Measurement results of the electric fields in cloud-to-ground lightning in nearby Munich, Germany," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no.4, 1998, pp. 436–43.

³⁹ Tamtéž.

⁴⁰ **THOMSON, E. M.** "Characteristics of Port Moresby ground flashes," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, C2, 1980, pp. 1027–36.

⁴¹ **SCHONLAND, B. F. J.** "The lightning discharge," in *Handbuch der Physik*, vol. 22, Berlin: Springer-Verlag, 1956, pp. 576–628.

⁴² **LIVINGSTON, J. M., KRIDER, E. P.** "Electric fields produced by Florida thunderstorms," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, C1, 1978, pp. 385–401.

⁴³ **SHINDO, T., UMAN, M. A.** "Continuing current in negative cloud-to-ground lightning," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, D4, 1989, pp. 5189–98.

negativních výbojů obsahovalo dlouhé pokračující proudy a 11 obsahovalo krátké pokračující proudy.

4 Klasifikace parametrů bleskových výbojů⁴⁴

4.1 Fyzikální parametry

Pro praktické návrhy ochran před účinky bleskových proudů je nezbytné, aby byly parametrizovány jednotlivé fyzikální vlastnosti, které bleskový výboj vykazuje, ať již jako přírodní jev, tak ve vztahu k zasaženému objektu. Účinky bleskových proudů dělíme na primární a sekundární (přímý úder blesku do objektu a sekundární, které jsou způsobeny následnou vlnou). Charakter blesku je nejbližší z energetického hlediska elektrickému oblouku, i když svými vlastnostmi se blíží jiskrovému výboji. Subjektivní dělení můžeme najít v literatuře na tepelné, mechanické, elektrodynamické účinky a dále na elektrické průrazy a elektromagnetickou indukci. Tepelné a elektromagnetické účinky jsou nezbytné především pro správné dimenzování jímacích zařízení a veškerých připojovaných rozvodů v objektech. Parametry se dají sledovat z ohledu na jejich statistickou nezávislost, ke které patří amplituda, a obě doby náběhu a doznívání. Sledovanými parametry potom jsou velikosti 1) amplitudy bleskového proudu, 2) doby náběhu vlny, 3) doby doznívání, 4) strmosti proudu (di/dt), 5) polarit, 6) velikosti přenášeného náboje, 7) specifické energie (W/R).⁴⁵ V přehledu nabízí nejpoužívanější klasifikační veličiny následující tab. 2.

⁴⁴ Tato kapitola vytyčuje pouze dílčí části (použitelné při návrhu bleskových ochran) z celkové problematiky bleskového výboje uvedeného v kapitole 1 a 2. Další zpřesnění lze najít v citované literatuře BURANT, J. Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80- 86534-10-3.

⁴⁵ Všechny hodnoty se měří pravidelně ve specifických laboratořích, jejichž síť zaštiťuje mezinárodní organizace CIGRE (**Conseil International des Grands Réseaux Électriques** - International Council on Large Electric Systems). Informace jsou členům dostupné [online]. [cit. 2017-02-21] přes portál www.cigre.org.

Veličina	Jednotka	Hodnoty			Hodnota pro třídu ochrany	Druh výboje
		95%	50%	5%		
I	kA	4	20	90		První záporný výboj
		4,9	11,8	28,6	50	Záporný následný výboj
		4,6	35	250	200	První kladný výboj
Q	C	1,3	7,5	40		Záporný výboj
		20	80	350	300	Kladný výboj
Q _{imp}	C	1,1	4,5	20		První záporný výboj
		0,22	0,95	4		Záporný následný výboj
		2	16	150	100	První kladný výboj
W/R	kJ/Ω	6	55	550		První záporný výboj
		0,55	6	52		Záporný následný výboj
		25	650	15 000	10 000	První kladný výboj
di/dt _{max}	kA/μs	9,1	24,3	65		První záporný výboj
		9,9	39,9	161,5		Záporný následný výboj
		0,2	2,4	32	20	První kladný výboj
di/dt _{30/90%}	kA/μs	4,1	20,1	98,8	200	Záporný následný výboj

Q_{long}	C				200	Dlouhá proudová vlna
T_{long}	s				0,5	Dlouhá proudová vlna
doba čela	μs	1,8	5,5	18		První záporný výboj
		0,22	1,1	4,5	$T1=0,25$	Záporný následný výboj
		3,5	22	200	$T1=10$	První kladný výboj
trvání blesku	μs	30	75	200		První záporný výboj
		6,5	32	140	$T2=100$	Záporný následný výboj
		25	230	2000	$T1=350$	První kladný výboj

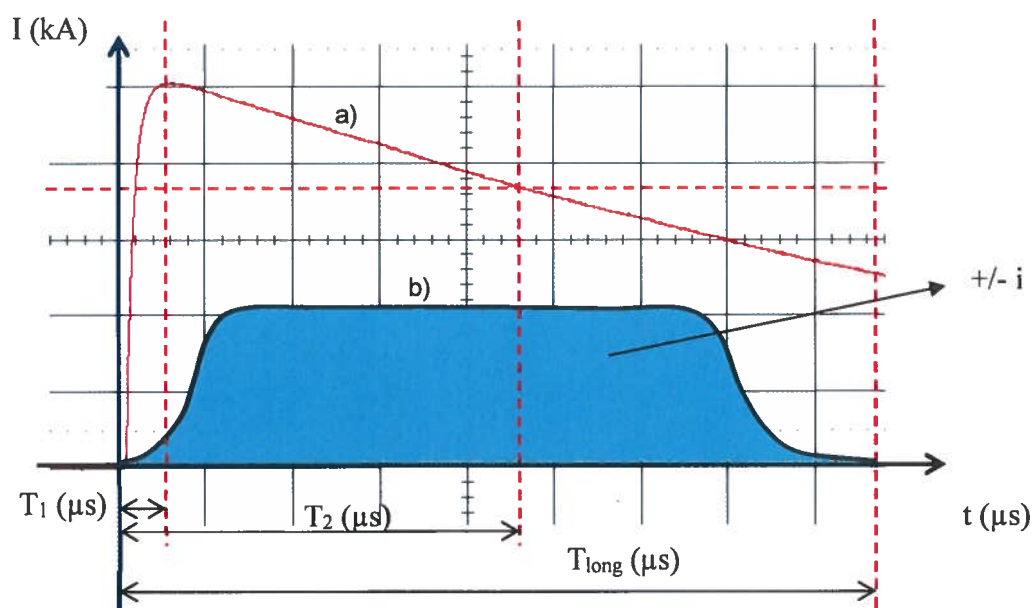
Tabulka 2 – Tabulka výchozích parametrů bleskového výboje⁴⁶

⁴⁶ Sestaveno dle aktuálních hodnot CIGRE z roku 2006, hodnoty - I - vrcholová hodnota proudu výboje, Q - celkový náboj blesku, Q_{imp} - náboj proudového impulzu, W/R - specifická energie, di/dt_{max} - průměrná strmost, Q_{long} - náboj dlouhé proudové vlny, T_{long} - doba trvání proudové vlny.

4.2 Aproximace atmosférických výbojů pro technickou praxi⁴⁷

Veličiny definované v předchozí části disertační práce jsou pro technickou praxi příliš specifické a užívá se jich pouze pro ověřování vlastností technických zařízení, která vyžadují zvýšenou odolnost před důsledky atmosférické elektřiny. Běžné technické nároky však nejsou z hlediska fyziky bleskového výboje tolik náročné - respektive není možné vytvářet taková laboratorní zařízení, abychom byli schopni se k předpokládaným teoretickým a výpočtovým představám přiblížit. Bleskový výboj tedy aproximujeme rázovou vlnou. Jednou z typických vlastností bleskového výboje je i setrvačnost termické ionizace - kanál bleskového výboje zůstává po dlouhou dobu vodivým (a to i po odeznění proudové vlny). Díky vodivosti proudového kanálu se neprojevuje bleskový výboj pouze jedním impulzem, ale je charakterizován sledem krátkých impulzů se středním časem kolem 2 ms nebo následnými dlouhými proudovými vlnami. Termický kanál i sledy impulzů nejdou dobře v laboratorním prostředí simulovat. Proto se atmosférický impulz nahrazuje pouze rázovou vlnou, jejíž hlavní parametry jsou vyznačeny na obr. 8.

⁴⁷ MIKEŠ, J. Vnější ochrana před účinky atmosférické elektřiny. Diplomová práce. Praha: ČVUT, 2006, s. 69–72.

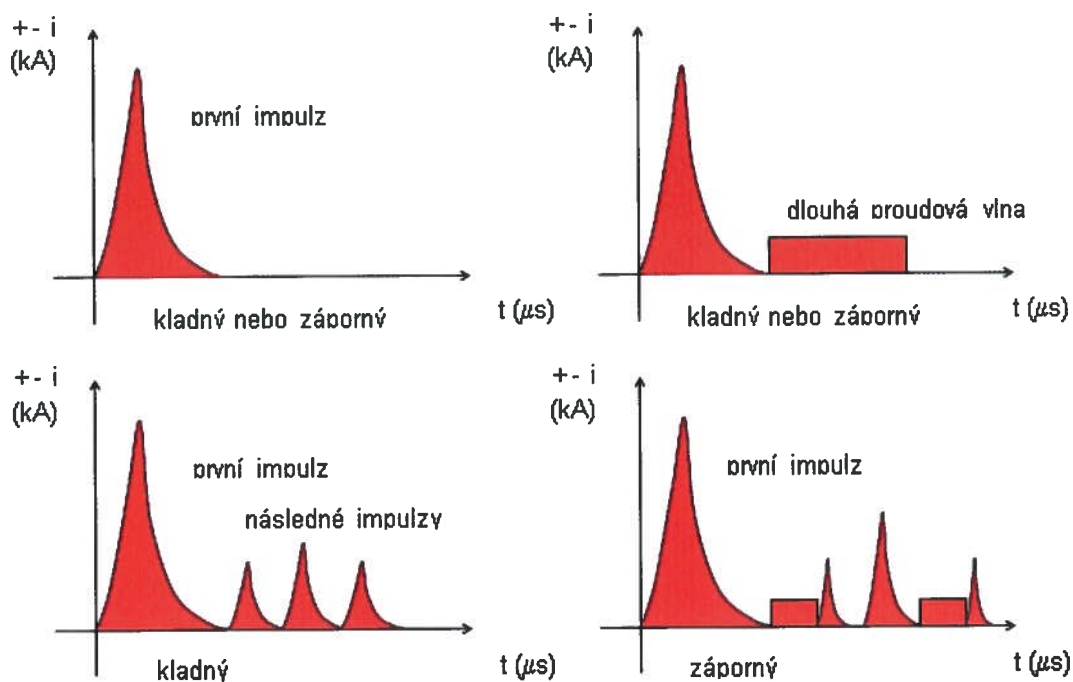


Obrázek 8 – a) Parametry proudového impulsu, b) Parametry dlouhé proudové vlny⁴⁸

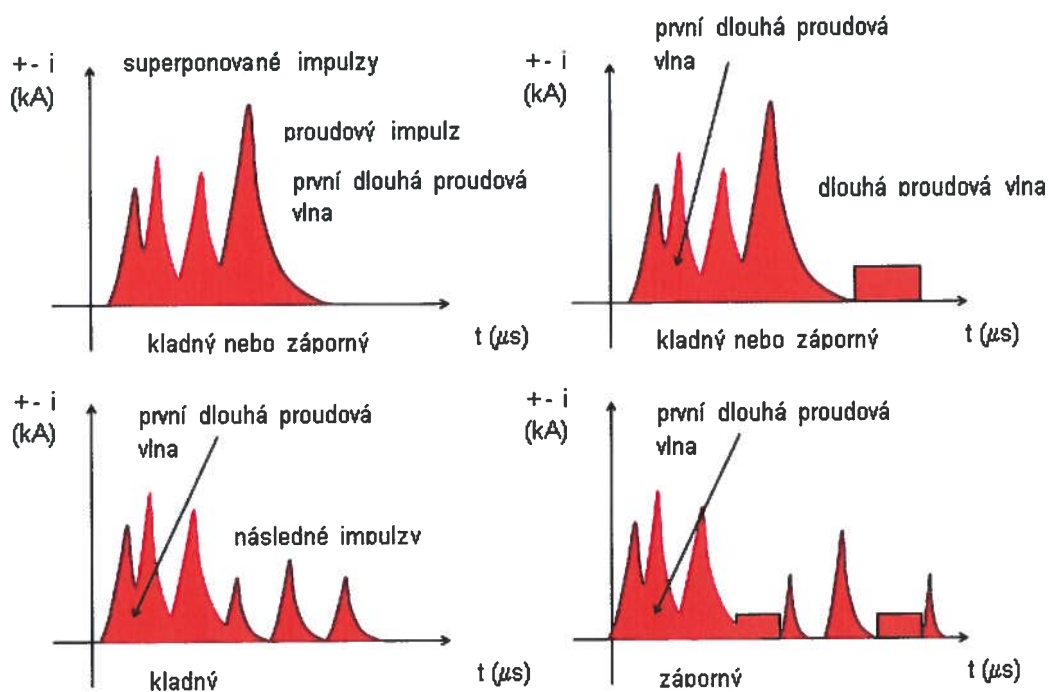
Často se vyskytují kombinace obou uvedených druhů následných výbojů – většinou bývá první proudová vlna totožná s hlavním bleskovým výbojem (s kladnou nebo zápornou polaritou) – tím se přenese většina uvolněné energie a již nemusí následovat dílčí výboje. Při záporném výboji je nesena často menší energie, a proto se objevuje větší množství dílčích následných výbojů. Situaci jsem pro šestici možností, které se mohou objevit, nastínil v následujícím diagramu v obr. 9 a 10.⁴⁹

⁴⁸ BURANT, J. Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.

⁴⁹ MIKEŠ, J. Vnější ochrana před účinky atmosférické elektřiny. Diplomová práce. Praha: ČVUT, 2006, s. 68–73.

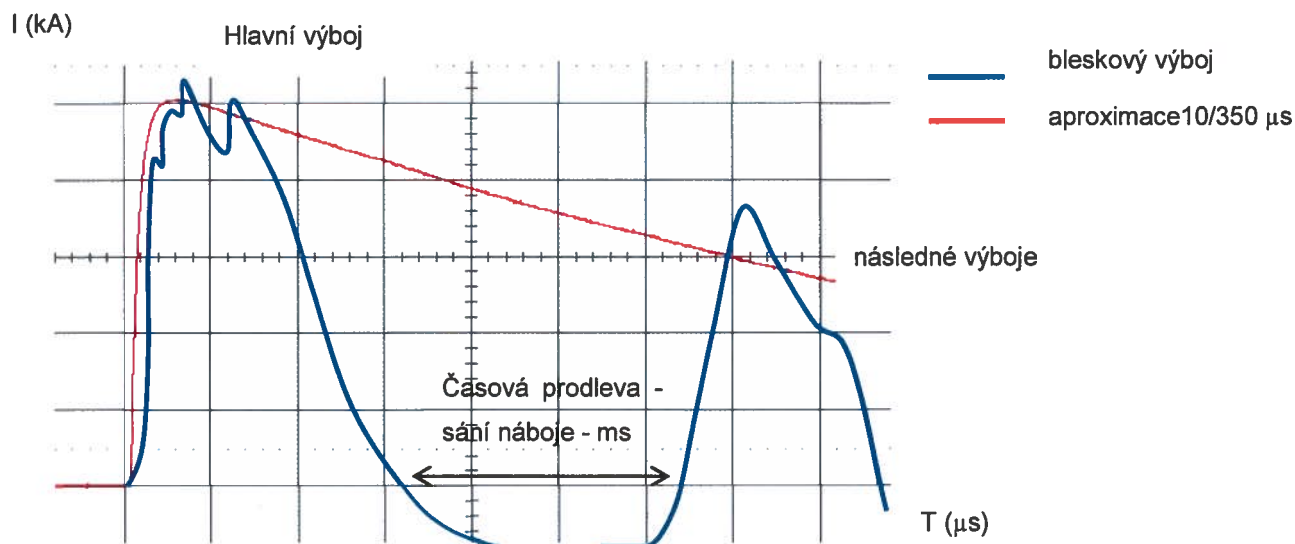


Obrázek 9 – Typické příklady modelovaného sestupného bleskového výboje

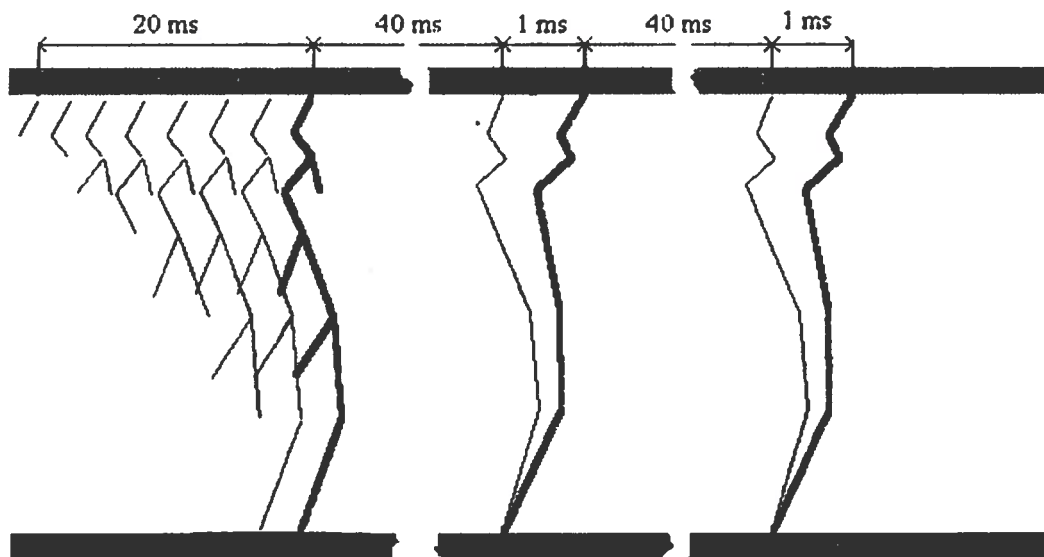


Obrázek 10 – Typické příklady modelovaného vzestupného bleskového výboje

Na předchozích grafech jsou precizovány modely předpokládaného výboje u sestupného, respektive vzestupného bleskového výboje. Skutečný průběh má však charakter mnohem složitější, jeho rekonstrukce je na obr. 11.



Obrázek 11 – Srovnání skutečného bleskového výboje a aproximovaného výboje vlnou 10/350 μs



Obrázek 12 – Typický průběh negativního blesku - mrak – země⁵⁰

⁵⁰ HASMAN, T. Přepětí v elektroenergetických soustavách. Praha: ČVUT, 1997 a 2004.

Vzhledem k dlouhodobému studiu bleskových výbojů, především na amerických experimentálních pracovištích⁵¹ byly zavedeny další technické veličiny, které je možné v přehledu najít v citované literatuře.⁵²

5 Způsoby přenosu atmosférických přepětí do připojených zařízení

5.1 Přímý úder blesku

Přímý úder blesku do objektu je definován v normě ČSN EN 62305⁵³ jako proud kanálu blesku, jehož část protéká zasaženým objektem, respektive živým tvorem. Zasažené místo se stává zdrojem šíření proudové a napěťové vlny. Podle teorie šíření vln se odrážejí tyto vlny na rozhraních, která pro ně představují změnu vlnové impedance. Viz literatura,⁵⁴ kde je precizován průchod přepěťové vlny přes rozhraní. Hovoříme-li o přímém zásahu blesku do vedení distribuční soustavy, řešíme nejčastěji otázku účinku zemního lana, které většinu přímých zásahů eliminuje díky „stínicímu efektu“ vrcholového kužele, který nad vedením rozprostírá. K odrazení vlny dochází však i v místech, která tvoří spojení zemního lana se stožáry, místy uzemnění, respektive přizemnění dílčích částí elektroenergetických soustav. V takovém případě může docházet ke značnému elektrickému a především mechanickému a tepelnému namáhání jednotlivých komponent. Literatura⁵⁵ řeší otázku přímého zásahu bleskovým

⁵¹ Například k největším patří University of Florida s oddělením Lightning Research (The International Center of Lightning Research and Testing) na Department of Electrical and Computer Engineering, nebo výzkumná pracoviště NASA pro Lightning and electrical research v oddělení Global Hydrology and Climate Center, popřípadě Institute of High Voltage Research na Uppsala University ve Švédsku. Podobných pracovišť existuje především v Americe, Africe a severovýchodních zemích velké množství z Evropy je nejznámější ve Švýcarsku na hoře San Salvator v Kew.

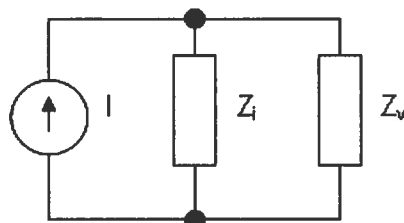
⁵² BERGER, K., ANDERSON, R.B., KRONINGER, H. "Parameters of lightning flashes," in *Electra*, vol. 41, 1975, pp. 23–37. GOLDE, R. H. *Lightning*. London: Academia Press, 1977. GOLDE, R. H. *Lightning Protection*. London: EA Publishers, 1973.

⁵³ ČSN EN 62305 Ochrana před bleskem. Druhá edice, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011–2013. Část 1: Obecné principy (09/2011), Část 2: Řízení rizika (02/2013), Část 3: Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života (01/2012), Část 4: Elektrické a elektronické systémy ve stavbách (09/2011).

⁵⁴ HASMAN, T. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Praha: ČVUT, 2004, s. 44–54.

⁵⁵ Tamtéž. BURANT, J. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.

proudem do soustavy jako vlastní spojení proudového zdroje se zátěží o impedanci Z_i (řádově tisíce ohmů - jde o impedanci vlastního bleskového kanálu) a impedance připojených částí vedení (Z_v), která však nedosahuje více než několika set ohmů (obr. 13).



Obrázek 13 – Elektrická analogie zásahu blesku do vedení přes zemnicí lano

Zemnicí lano je ochranným prvkem vedení, jehož primární funkcí je eliminovat přímé zásahy bleskových výbojů do fázových vodičů. Pokud však nezareaguje a dojde k přímému zásahu vedení, uplatní se výše zmiňovaná kombinace spojení impedancí. Může dojít i ke zpětnému přeskoku mezi fázově namáhaným vodičem (vlastním napětím proti zemi) a superponovaným napětím od bleskového proudu. V takovém případě nemusí vydržet elektrická pevnost izolačních komponent vedení a dojde k jejich poškození zapálením oblouku mezi uzemněnou částí stožáru a samotným fázovým vodičem. U objektů se řeší otázka ochrany před přímým zásahem blesku prostřednictvím jímacích svodů.

5.2 Nepřímý úder blesku – přepětí indukovaná

Za nepřímý úder blesku považujeme událost, kdy objekt není přímo zasažen bleskem, avšak část proudu z kanálu blesku do něho vždy přechází zemí, kovovým vedením apod. Nepřímý úder blesku může též poškodit nebo zapálit předměty a zabít zvířata nebo lidi.

K určitým problémům při rozlišení přímého a nepřímého úderu blesku dochází v případě podzemních kabelů zavedených do budovy. První běžný omyl, který je vžitý, lze formulovat asi takto: „Blesk, který udeří do země, ztrácí svou ničivou sílu a nemůže poškodit žádné podzemní zařízení“. Ve skutečnosti dochází v místě vniku bleskového

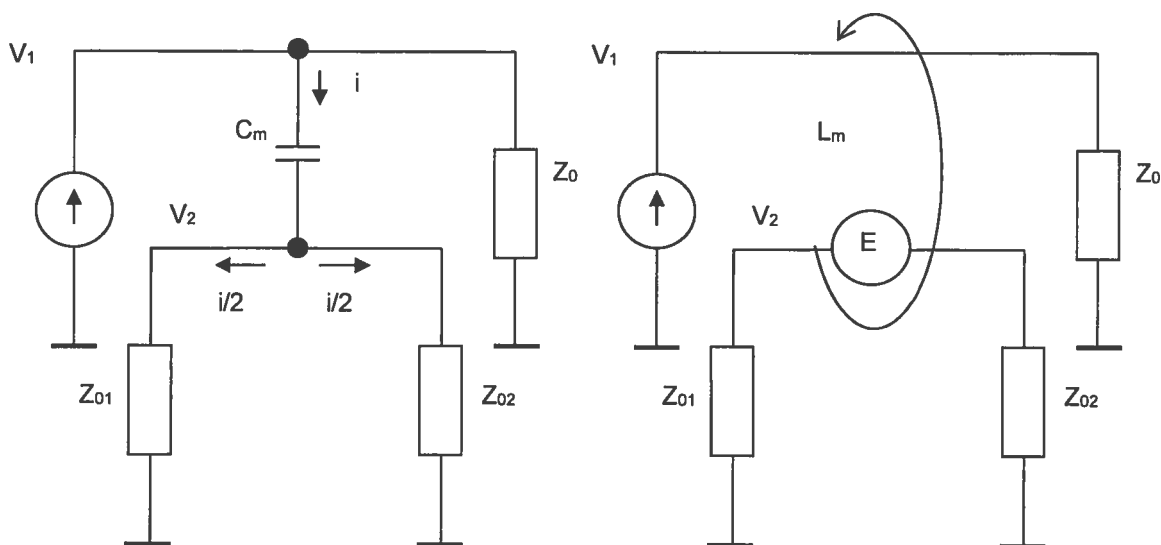
proudu k překročení elektrické pevnosti půdy (typicky 2 až 10 kV/cm) a vzniku oblasti s ionizovanou vodivou půdou, která se často uvádí jako polokoule nebo disk.⁵⁶ Pokud je v půdě mezi kabelem (jeho kovovým obalem) a ionizovanou oblastí překročena elektrická pevnost půdy, též dojde ke vzniku přeskočce (často obloukem) až do desítek metrů a bleskový proud se pak šíří na obě strany od vniku po kabelu. Z hlediska podzemního kabelu se jedná o přímý úder se všemi ničivými následky, je-li místo úderu nepřilíživě vzdálené od budovy, kam je kabel zaveden, může projít po vedení prakticky celý bleskový proud do budovy a pak doporučujeme uvažovat tento případ jako přímý úder blesku.⁵⁷

V literatuře⁵⁸ je naznačena představa o výpočtu indukovaného napětí ve vedení prostřednictvím analogie dvou paralelních vedení. Celkovou představu jsem shrnul do následujícího schématu na obr. 14.

⁵⁶ **SUNDE, E. D.** Earth conduction effects in transmission systems. New York: Van Nostrand, 1949.

⁵⁷ **KUTÁČ, J., ROUS, Z., HLADNÝ, Z.** Hromosvody a zemniče. 2. přeprac. vyd. Praha: IN-EL, 2008. Elektro. Dílenská příručka, sv. 17. ISBN 978-80-86230-45-0. s. 19.

⁵⁸ **HASMAN, T.** Přepětí v elektroenergetických soustavách. Praha: ČVUT, 2004. A také **BURANT, J.** Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.



Obrázek 14 – Elektrotechnická představa o šíření indukovaného přepětí

Prvním elektrickým obvodem prochází časový proudový impuls $i(t)$ a přes vazbu vyjádřenou kapacitou C_m (elektrická) a vazbou L_m (magnetická) ovlivní chování v obvodu V_2 . Úbytek napětí E reprezentuje potom vznik indukovaného napětí na vedení V_2 (přes proud protékající kapacitou C_m a derivací proudu podle času na vzájemné indukčnosti L_m). V daném časovém okamžiku tvoří výsledné napětí součet okamžitých hodnot elektrického a magnetického indukovaného napětí, které je rozdílné na začátku a na konci vedení. Podle zprávy ze sborníku časopisu *Electra* z roku 1995⁵⁹ byla přijata a ověřena představa, že největší účinek na vznik indukovaného přepětí nemají jenom hromaděné náboje v proudových vlnách (dílčí a zpětné), ale především silná elektrická pole, která jsou jimi generována. Nedostatek experimentálních ověření, neměřitelnost určitých veličin zapříčinily nemožnost sestavení přesného modelu bleskového kanálu a modelu účinku na objekt. Podle citované literatury⁶⁰ byl zaveden model MTL – Modified Transmission Line Model –

⁵⁹ NUCCI, C. A. "Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines," in *Electra*, vol. 161 and 162, 1995.

⁶⁰ Tamtéž.

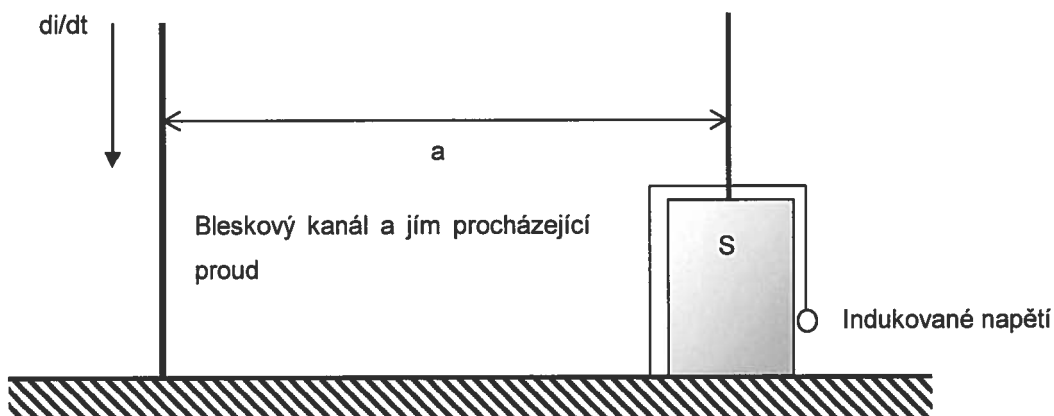
v něm je zpětný výboj chápán jako proudová vlna šířící se od zemského povrchu zpět k mraku a jeho velikost proudu se s výškou snižuje. Pro okamžité hodnoty byly zavedeny vlnové rovnice.

$$i(z', t) = i\left(t - \frac{z'}{v}\right) \cdot e^{-\frac{z'}{\lambda}} \quad \text{pro} \quad z' \leq v \cdot t$$

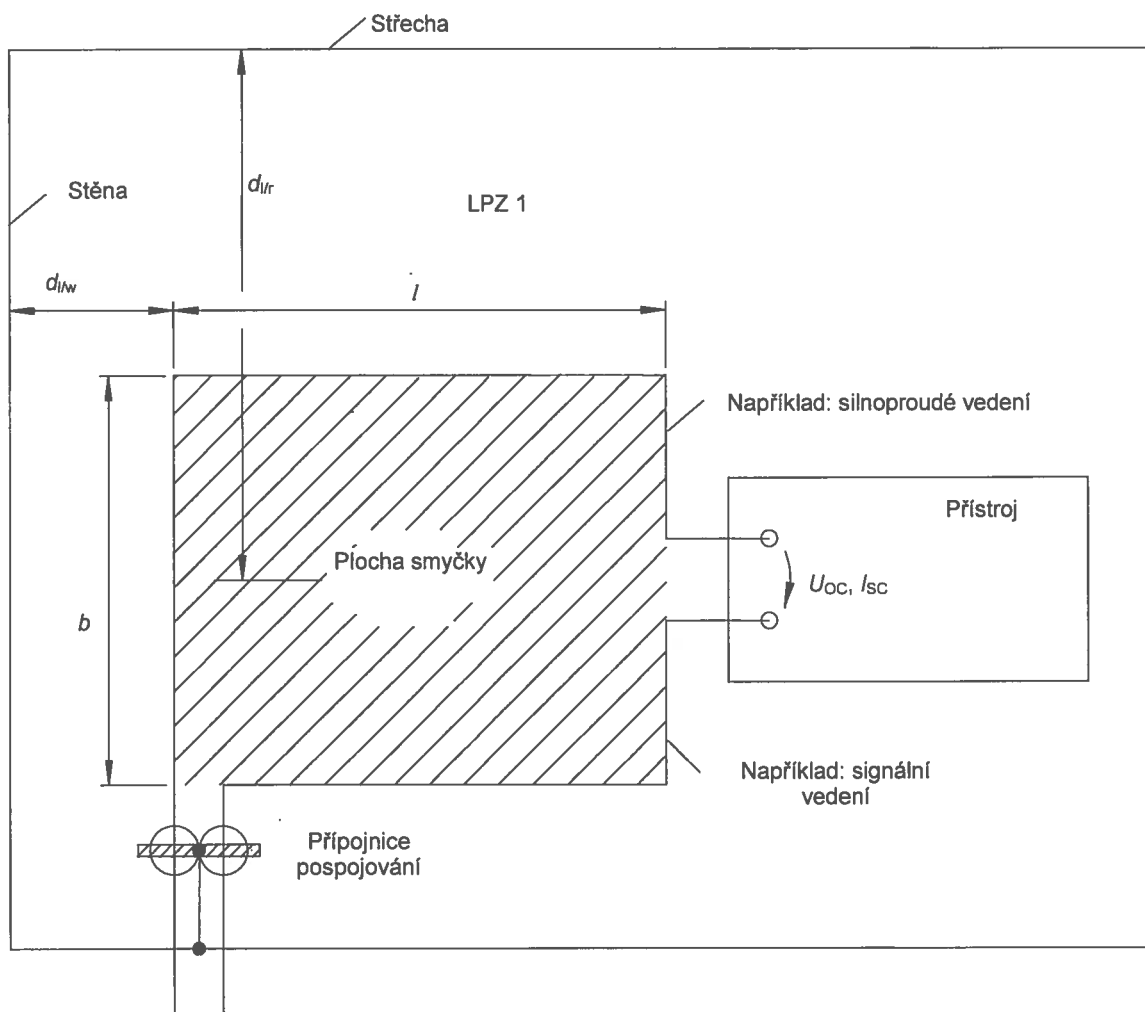
$$i(z', t) = 0 \quad \text{pro} \quad z' \geq v \cdot t$$

Definována je zde v - rychlost šíření proudové vlny bleskovým kanálem, λ konstanta útlumu proudu s výškou. Podrobnosti výpočtu jsou uvedeny v HASMAN, T. Přepětí v elektroenergetických soustavách, ČVUT, Praha 2004 a 1997 a MIKEŠ, J. *Vnější ochrana před účinky atmosférické elektřiny*. Praha. ČVUT v Praze, 2006. (Diplomová práce).

Pro praktické účely se stanovuje většinou zjednodušená představa indukce do předřazené plochy sledovaného objektu viz obr. 15.



Obrázek 15 – Příklad zjednodušené induktivní vazby mezi bleskovým kanálem a plochou obepnutou kolem objektu, do kterého se indukuje přepětí



Obrázek 16 – Běžný stav smyčky pro indukovaná přepětí u dvojice vedení⁶¹

Jako typickou ukázkou výpočtu indukovaných přepětí v jednotlivých bezpečnostních zónách jsem použil příklad z normy ČSN EN 62305 - 4 část - Ochrana před bleskem – Elektrické a elektronické systémy ve stavbách (obr. 16).⁶²

Pro magnetické pole H_1 uvnitř prostoru V_s v LPZ 1, platí následující:

⁶¹ ČSN EN 62305 - Ochrana před bleskem - 4 část. Elektrické a elektronické systémy ve stavbách 2006. s. 54–56.

⁶² Tamtéž.

$$H_1 = k_H \cdot i_0 \cdot w / (d_w \cdot \sqrt{d_r}) \quad (\text{A/m})$$

Pro napětí naprázdno u_{oc} platí:

$$u_{oc} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot k_H \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot di_0/dt \quad (\text{V})$$

Vrcholová hodnota $u_{oc/max}$ nastane během doby čela T_1

$$u_{oc/max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot k_H \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_{o/max} / T_1 \quad (\text{V})$$

kde:

μ_0 je $4\pi \cdot 10^{-7}$ (Vs)/(Am),

b šířka smyčky v (m),

d_{lw} vzdálenost smyčky od stínění stěny, kde $d_{lw} \geq d_{s/1}$, v (m),

d_{lr} střední vzdálenost smyčky od stíněné střechy, v (m),

i_0 bleskový proud v LPZ 0A, v (A),

$i_{o/max}$ maximální hodnota bleskového proudu v LPZ 0A, v (A),

$k_H(1/\sqrt{m})$ činitel geometrického uspořádání $k_H = 0,01 \cdot (1/\sqrt{m})$,

l délka smyčky, v (m),

T_1 doba čela bleskového proudu v LPZ 0A, v (s),

w šířka ok mřížového stínění, (m).

Pro zkratový proud I_{sc} platí:

$$I_{sc} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot k_H \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_0 / L \quad (\text{A})$$

kde ohmický odpor vodičů je zanedbán (nejhorší případ).

Pro maximální hodnotu $I_{sc/max}$ platí:

$$I_{sc/max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot k_H \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_{o/max} / L \quad (\text{A})$$

kde L je vlastní indukčnost smyčky, v (H).

Pro pravoúhlé smyčky vlastní indukčnost L může být vypočtena z:

$$L = \left\{ 0,8 \cdot \sqrt{l^2 + b^2} - 0,8 \cdot (l + b) + 0,4 \cdot l \cdot \ln \left[(2blr) / \left(1 + \sqrt{1 + (bl)^2} \right) \right] + 0,4 \cdot b \cdot \ln \left[(2llr) / \left(1 + \sqrt{1 + (lb)^2} \right) \right] \right\} \cdot 10^{-6} \quad (\text{H})$$

kde r je poloměr vodiče, v (m).

Pro napětí a proud indukované magnetickým polem prvního výboje ($T_1 = 10 \mu\text{s}$) platí:

$$U_{oc/f/max} = 1,26 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_{f/max} \quad (\text{V})$$

$$I_{sc/f/max} = 12,6 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_{f/max} / L \quad (\text{A})$$

Pro napětí a proud indukované magnetickými poli následných výbojů ($T_1 = 0,25 \mu\text{s}$) platí:

$$U_{oc/s/max} = 50,4 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_{f/max} \quad (V)$$

$$I_{sc/s/max} = 12,6 \cdot 10^{-6} \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{lw}) \cdot (w/\sqrt{d_{lr}}) \cdot i_{s/max}/L \quad (A)$$

kde

$i_{f/max}$ je maximální hodnota proudu prvního výboje v (kA),

$i_{s/max}$ maximální hodnota proudu následných výbojů v (kA).

5.3 Škody způsobené bleskovým výbojem⁶³

Úder blesku se zpravidla skládá z více dílčích výbojů. Během hlavního výboje protéká zasaženým objektem vysoký krátkodobý rázový proud (desítky až stovky kA). V dalším průběhu pak další dílčí výboje a mezi nimi „stálý“ proud hodnoty několika stovek ampérů, což odpovídá zhruba proudu při svařování.

Nenajde-li blesk při své cestě k zemi žádné elektricky dobře vodivé spojení se zemí, mohou se předměty jím protékané zahřát natolik, že dosáhnou teploty zapálení a tím může vzniknout požár (zapalující blesk). Zvláště lehce se mohou vznítit doškové střechy, uskladněné seno nebo sláma, papír a výbušné pevné, tekuté či plynné látky.

Prochází-li blesk např. vlhkým dřevem (stromy, trámy) nebo zdivem (komíny, střechami, stěnami), může explodovat rychle se vypařující vlhkost a tím dojde nejen k poškození nebo zničení komínů, střešních tašek, dřevěných trámů, ale též celých částí střech nebo zdí, aniž by došlo k zapálení objektu (nezapalující neboli studené blesky). Rovněž elektrická instalace v budově a k ní připojené přístroje a dokonce i podzemní kabely bývají poškozovány bleskem.

Často bývají důležité i následné škody: přerušení výroby, nutnost přestěhovat se, poškození okolních objektů výbuchem nebo požárem apod. Zvláště výrazně vzrůstají tyto škody při poškození elektronických zařízení. I když je budova (i zařízení uvnitř) pojištěna proti škodám způsobeným bleskem, pojištění nemusí zahrnovat následné

⁶³ Zpracováno podle KUTÁČ, J., ROUS, Z., HLADNÝ, Z. Hromosvody a zemniče. 2. přeprac. vyd. Praha: IN-EL, 2008. Elektro. Dílenská příručka, sv. 17. ISBN 978-80-86230-45-0. s. 19.

škody. V České republice činí roční škody hlášené pojišťovnám (vedle toho existují i další) odhadem několik milionů až desítek milionů korun.

Riziko škod podstatně snižuje kvalitně provedená hromosvodní ochrana, která předurčuje dráhu blesku mimo hořlavé materiály a snižuje riziko proniknutí blesku dovnitř budov.

6 Normotvorná podpora ochrany před bleskem v České republice⁶⁴

Bleskový výboj patří k jedněm z nejstarších projevů atmosférické elektřiny, kterou může člověk pozorovat. K exaktnímu popisu jeho fyzikální povahy a souvislostí s elektrickými jevy došlo však až v 18. století. V této době byl také objeven a prakticky potvrzen efekt sání a princip emise náboje z ostrého hrotu. Na konci 19. století byly rozpracovány první normy a technické směrnice, které vedly k ošetření budov před účinky blesku.⁶⁵ Vzhledem k dlouhodobému nepřijetí inovace normy ČSN 34 1390⁶⁶ byly v Československu vytvořeny doplňky nejrůznějších standardů z oblasti stavitelství, požární ochrany budov, provozu elektrických zařízení a jim podobným. Pokud sledujeme normotvornou podporu, která je platná v České republice po roce 1993 až do roku 2006, najdeme přibližně 20 norem, které se z určitých hledisek zabývají ochranou budov před bleskem. Jmenovitě v tabulce 3:⁶⁷

⁶⁴ Zpracováno a doplněno na základě: **MIKEŠ, J.** Vnější ochrana před účinky atmosférické elektřiny. Diplomová práce. Praha: ČVUT, 2006, s. 79–82.

⁶⁵ První hromosvod v Čechách byl postaven v roce 1775 na zámku v Měšicích u Prahy. Stavitelem byl profesor anatomie na pražské univerzitě Josef Tadeáš Klinkoš. V roce 1776 byla také chráněna hromosvodem první veřejná budova – vyšehradská zbrojnice. Krátce po těžkých neštěstích, která napáchal blesk v italské Brescii, kde se vznítil střelný prach, výbuchu podlehla šestina města a zahynulo na tři tisíce lidí, musela mít všechna skladiště střelného prachu z nařízení Marie Terezie ochranný hromosvod. Pražský Vyšehrad byl chráněn řetězem svedeným do Vltavy. Dochoval se i jedinečný elektrotechnický posudek - Dochoval se i první elektrotechnický posudek hromosvodu v českých zemích. Autorem byl Josef Stepling a v roce 1778 ho zaslal exjezuitovi Ignáci Musilovi do Hradce Králové. Překlad originálu z latiny poprvé publikoval Karel Čupr v 3. až 5. čísle *Elektrotechnického obzoru* v roce 1946.

⁶⁶ ČSN 34 1390 – Elektrotechnické předpisy ČSN. Předpisy pro ochranu před bleskem, platnost ukončena k 1. 2. 2009.

⁶⁷ **BURANT, J.** Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.

<p>ČSN EN 62305 – 1, ed.2, 2011-09: Ochrana před bleskem – část 1: Obecné principy</p>	<p>Tato část IEC 62305 poskytuje obecné principy, které by měly být respektovány při ochraně staveb před bleskem, včetně jejich instalací a obsahu, stejně jako osob.</p>
<p>ČSN EN 62305 – 2, ed.2, 2013-02: Ochrana před bleskem – část 2: Řízení rizika</p>	<p>Jejím účelem je poskytnout postup pro vyhodnocení takového rizika. Jakmile je vybrána horní přípustná mez rizika, umožňuje tento postup volbu vhodných ochranných opatření, které se musí přijmout pro snížení rizika na přípustnou mez nebo pod ní.</p>
<p>ČSN EN 62305 – 3, ed.2, 2012-01: Ochrana před bleskem – část 3: Hmotné škody na stavbách a ohrožení života</p>	<p>Tato část EN 62305 se zabývá ochranou stavby, uvnitř i v jejím blízkém okolí, před hmotnými škodami a ochranou živých bytostí před úrazem dotykovým a krokovým napětím.</p>
<p>ČSN EN 62305 – 4, ed.2, 2011-09: Ochrana před bleskem – část 4: Elektrické a elektronické systémy ve stavbách</p>	<p>Tato část IEC 62305 obsahuje informace pro návrh, instalaci, revizi, údržbu a zkoušení elektrických a elektronických ochranných systémů (SPM) uvnitř staveb, která jsou schopna snížit riziko stálých poruch způsobených elektromagnetickým impulzem blesku (LEMP).</p>
<p>ČSN EN 62561-1, 2012, Součásti systémů ochrany před bleskem (LPSC) Část 1: Požadavky na spojovací součásti</p>	<p>ČSN EN 62561-1, 2012, Součásti systémů ochrany před bleskem (LPSC) Část 1: Požadavky na spojovací součásti</p>
<p>ČSN EN 62561-2, 2012, Součásti systému ochrany před bleskem (LPSC) – Část 2: Požadavky na vodiče a zemniče</p>	<p>Tato část normy EN 62561 specifikuje požadavky a zkoušky pro: kovové vodiče (jiné než „přirozené“ vodiče), které tvoří součást jímacího systému a svodů,</p>

	kovové zemniče, které tvoří součást uzemňovací soustavy.
ČSN EN 62561-3, 2012, Součásti systémů ochrany před bleskem (LPSC) - Část 3: Požadavky na oddělovací jiskřiště	Tato část normy EN 62561 specifikuje požadavky a zkoušky pro oddělovací jiskřiště (ISG – isolating spark gaps) pro systémy ochrany před bleskem.
ČSN EN 62561-4, 2012, Součásti systému ochrany před bleskem (LPSC) – Část 4: Požadavky na podpěry vodičů	Tato čtvrtá část EN 62561 se zabývá požadavky a zkouškami pro kovové a nekovové držáky vodičů, které jsou používány ve spojení s hromosvody, svody a zemnicím systémem.
ČSN EN 62561-5, 2011, Součásti systému ochrany před bleskem (LPC) – Část 5: Požadavky na revizní skříně a provedení zemničů	Tato část 5 normy EN 62561 předepisuje požadavky a zkoušky pro revizní skříně, provedení zemničů.
ČSN EN 62561-6, 2012, Součásti systému ochrany před bleskem (LPSC) – Část 6: Požadavky na čítače úderů blesků (LSC)	Tato část 6 normy EN 62561 specifikuje požadavky a zkoušky pro zařízení určená k počítání impulzů bleskových proudů protékajících vodičem (svodem). Tyto vodiče mohou být součástí instalace systému ochrany před bleskem (LPS) nebo mohou být připojeny do instalace s SPD (nebo ostatní vodiče, které nejsou určeny k vedení významné části bleskového proudu).
ČSN EN 62561-7, 2012, Součásti systému ochrany před bleskem (LPSC) – Část 7: Požadavky na směsi zlepšující uzemnění	Tato část normy EN 62561 specifikuje požadavky a zkoušky na směsi zlepšující uzemnění snížením rezistivity zemnicího systému.
ČSN EN 61643-11 ed.2, 2013, Ochrany před přepětím nízkého napětí - Část 11: Ochrany před přepětím zapojené	Tato část EN 61643 se vztahuje na přepěťová ochranná zařízení, chránící proti účinkům nepřímého a přímého úderu blesku a jiných přechodných

<p>v sítích nízkého napětí - Požadavky a zkušební metody</p>	<p>přepětí. Tato zařízení se nazývají ochrany proti přepětí (SPD – Surge Protective Devices). Tyto ochrany jsou konstruovány pro připojení ke střídavým napájecím obvodům kmitočtu 50 Hz a k zařízením se jmenovitým napětím do efektivní hodnoty 1 000 V. Stanoveny jsou výkonové parametry, bezpečnostní požadavky, standardní zkušební metody a hodnocení. Tyto ochrany obsahují alespoň jeden nelineární prvek a jsou určeny k omezení rázových přepětí a ke svedení impulzních proudů.</p>
<p>ČSN CLC/TS 61643-12 (341392), 2013-06: Ochrany před přepětím nízkého napětí - Část 12: Ochrany před přepětím zapojené v sítích nízkého napětí - Zásady pro výběr a instalaci</p>	<p>Tato technická specifikace popisuje zásady pro výběr, provoz, umístění a koordinaci SPD připojených k 50 Hz až 60 Hz AC silovým obvodům a zařízením s nominálními hodnotami do 1 000 V efektivní hodnoty.</p>
<p>ČSN EN 61643-21, 2002, Ochrany před přepětím nízkého napětí - Část 21: Ochrany před přepětím zapojené v telekomunikačních a signalizačních sítích - Požadavky na funkci a zkušební metody</p>	<p>Tato mezinárodní norma se používá na zařízení pro ochranu před přepětím telekomunikačních a signalizačních sítí před nepřímými a přímými účinky blesků a jiných přechodných přepětí.</p>
<p>CLC/TS 61643-22, 2005-09: Ochrany před přepětím nízkého napětí – Část 22: Ochrany před přepětím zapojené v telekomunikačních a signalizačních sítích – Výběr a zásady instalace</p>	<p>(nezavedena)</p>
<p>ČSN EN 60664-1 ed. 2, 2008, Koordinace izolace zařízení nízkého</p>	<p>Norma byla revidována pro zajištění rozlišené koordinace pro hlavní rozvody nízkého napětí, ostatní instalační</p>

<p>napětí - Část 1: Zásady, požadavky a zkoušky</p>	<p>systémy a vnitřní obvody zařízení. Zdůrazňují se pravděpodobnostní aspekty přepětí a jsou zahrnuty požadavky pro pevnou izolaci.</p>
<p>ČSN EN 61000-4-5 ed. 3, 2015, Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-5: Zkušební a měřicí technika - Rázový impulz - Zkouška odolnosti</p>	<p>Tato část IEC 61000 se týká požadavků na odolnost, zkušebních metod a rozsahu doporučených zkušebních úrovní pro zařízení s ohledem na jednosměrné rázové impulzy způsobené přepětími od spínacích a atmosférických přechodných jevů. Je definováno několik zkušebních úrovní týkajících se různých prostředí a podmínek instalace. Tyto požadavky byly vyvinuty pro elektrická a elektronická zařízení a pro tato zařízení tyto požadavky platí.</p>
<p>ČSN EN 61000-4-9, 1996, Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí techniky. Díl 9: Pulsy magnetického pole - zkouška odolnosti. Základní norma EMC (IEC 1000-4-9:1993)</p>	<p>Tato část IEC 61000 specifikuje požadavky na odolnost, zkušební metody a rozsah doporučených zkušebních úrovní pro zařízení vystavené impulzním magnetickým rušením týkající se hlavně:</p> <ul style="list-style-type: none"> – průmyslových instalací, – elektráren, – železničních instalací, – rozvoden vysokého napětí a velmi vysokého napětí.
<p>ČSN EN 61000-4-10 ed.2, 2017-07, Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí technika. Oddíl 10: Tlumené kmity magnetického pole - zkouška odolnosti. Základní norma EMC</p>	<p>Tato mezinárodní norma se týká požadavků na odolnost zařízení proti tlumeným kmitům magnetického rušení, týkajících se rozvoden vysokého a velmi vysokého napětí a to pouze za provozních podmínek.</p>

<p>ČSN 33 2000-4-443 ed.3, 2016-11, Elektrické instalace nízkého napětí – Část 4-44: Bezpečnost – Ochrana před rušivým napětím a elektromagnetickým rušením – Kapitola 443: Ochrana před atmosférickým nebo spínacím přepětím</p>	<p>ČSN 33 2000-4-443 ed.3, 2016-11, Elektrické instalace nízkého napětí – Část 4-44: Bezpečnost – Ochrana před rušivým napětím a elektromagnetickým rušením – Kapitola 443: Ochrana před atmosférickým nebo spínacím přepětím.</p>
<p>ČSN 33 2000-5-534 ed.2, 2016-11, Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-53: Výběr a stavba elektrických zařízení - Odpojování, spínání a řízení - Oddíl 534: Přepět'ová ochranná zařízení</p>	<p>ČSN 33 2000-5-534 ed. 2 Tato část HD 60364 se zabývá všeobecnými požadavky pro odpojování, spínání, řízení a monitorování a požadavky na volbu a montáž přístrojů zajišťujících plnění těchto funkcí.</p>
<p>ČSN 33 2000-5-54 ed.3, 2012, Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení - Uzemnění a ochranné vodiče</p>	<p>Tato část IEC 60364 je určena pro zřizování uzemnění a pro ochranné vodiče včetně vodičů ochranného pospojování tak, aby elektrická instalace byla bezpečná.</p>
<p>ČSN 33 1500/Z4, 2007, Elektrotechnické předpisy. Revize elektrických zařízení</p>	<p>Účelem revize elektrických zařízení je ověřování jejich stavu z hlediska bezpečnosti. Požadavky bezpečnosti se považují za splněné, pokud elektrické zařízení odpovídá z hlediska bezpečnosti příslušným ustanovením norem.</p>
<p>ČSN 33 2000-6 ed.2, 2017-03, Elektrické instalace nízkého napětí - Část 6: Revize</p>	<p>ČSN 33 2000-6 ed. 2 Tato norma stanoví požadavky pro výchozí a pravidelnou revizi elektrické instalace. Kapitola 6.4 stanoví požadavky na výchozí revizi prováděnou prohlídkou a zkouškami elektrické instalace, aby se, pokud je to rozumně možné, rozhodlo, zda byly splněny požadavky ostatních částí</p>

	<p>souboru IEC 60364 a požadavky na provedení zprávy o výsledcích výchozí revize. Výchozí revize se provádí po dokončení nové instalace nebo po dokončení doplněných částí nebo po dokončení změn již existující instalace. Kapitola 6.5 stanoví požadavky na pravidelnou revizi elektrické instalace, aby se, pokud je to rozumně možné, rozhodlo, zda instalace a veškeré její součásti jsou z hlediska užití instalace v uspokojivém stavu, a dále stanoví požadavky na provedení zprávy o výsledcích pravidelné revize.</p>
<p>ČSN 34 1390, 1969, Předpisy pro ochranu před bleskem</p>	<p>Výše citovaná norma z roku 1955 (1969), která byla do roku 2006 největším zdrojem informací o ochraně budov před účinky bleskových proudů. V současnosti není platná (konec platnosti v roce 2009).</p>
<p>PNE 33 3430-5 a PNE 33 0000-5 ed.3</p>	<p>Jsou energetickými podnikovými normami, které definují požadavky na přepěťová ochranná zařízení, která bývají umísťována do neměřených částí elektrických instalací (před elektroměr) a v rámci elektrických instalací objektů.</p>

Tabulka 3 – Přehled současně platných norem v ochraně před bleskem a přepětím

Většina norem vzniká (tab. 3) na mezinárodní úrovni jako IEC (International Electrotechnical Commission – Mezinárodní elektrotechnická komise) a EN (European standard – evropská norma, zabezpečovaná CEN (European Committee for Standardization – Evropskou komisí pro standardizaci), CENELEC (European

Committee for Electrotechnical Standardization – Evropskou komisí pro standardizaci v elektrotechnice) and ETSI (European Telecommunications Standards Institute – Evropským telekomunikačním standardizačním institutem) a překladem se staly národními normami, v problematice ochrany budov před bleskem lze zaznamenat pouze vznik národních standardů v Německu, jako národní normy VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik). Většina z uvedených norem vznikala indiferentně, bez větší vzájemné návaznosti a propojení.

7 Technické prostředky pro omezení přepětí a přímého úderu blesku⁶⁸

7.1 Používaná terminologie

Systém ochrany před bleskem (lightning protection system – LPS) je kompletní systém používaný pro snížení hmotných škod způsobených úderem blesku do stavby.

Vnější systém ochrany před bleskem (hromosvod) (external lightning protection system) – část LPS, která se skládá z jímací soustavy, soustavy svodů a uzemnění.

Vnější LPS izolovaný (oddálený) od chráněné stavby (external LPS isolated from the structure to be protected) – LPS, jehož jímací soustava a svody jsou umístěny tak, aby dráha bleskového proudu nebyla v dotyku s chráněnou stavbou.

Vnější LPS neizolovaný (neoddálený) od chráněné stavby (external LPS not isolated from the structure to be protected) – LPS, jehož jímací soustava a svody jsou umístěny tak, že dráha bleskového proudu může být v dotyku s chráněnou stavbou.

Vnitřní systém ochrany před bleskem (internal lightning protection system) – část LPS, která se skládá z ekvipotenciálního vyrovnání bleskového proudu a/nebo elektrické izolace hromosvodu.

⁶⁸ KUTÁČ, J., ROUS, Z., HLADNÝ, Z. Hromosvody a zemniče. 2. přeprac. vyd. Praha: IN-EL, 2008. Elektro. Dílenská příručka, sv. 17, s. 47–64. ISBN 978-80-86230-45-0.

Jímací soustava – je určena k jímání přímých úderů blesků do stavby včetně úderů do boku stavby.

Soustava svodů – je instalována pro svedení bleskového proudu od bodu úderu do země.

Ekvipotenciální pospojování proti blesku – má funkci vyrovnání potenciálů bleskových proudů na vstupu do objektu tak, aby nemohla vzniknout nebezpečná jiskření mezi různými kovovými částmi.

Uzemňovací soustava – je určena k rozvedení bleskového proudu v zemi bez toho, aby vznikly tepelné a mechanické škody nebo nebezpečná jiskření, která mohou vyvolat požár nebo explozi.

7.2 Zóny ochrany před bleskem

Ochranná opatření jako LPS – lightning protection system, stínící vodiče, magnetická stínění a SPD (surge protection devices) určují zóny ochrany před bleskem LPZ (lightning protection zone).

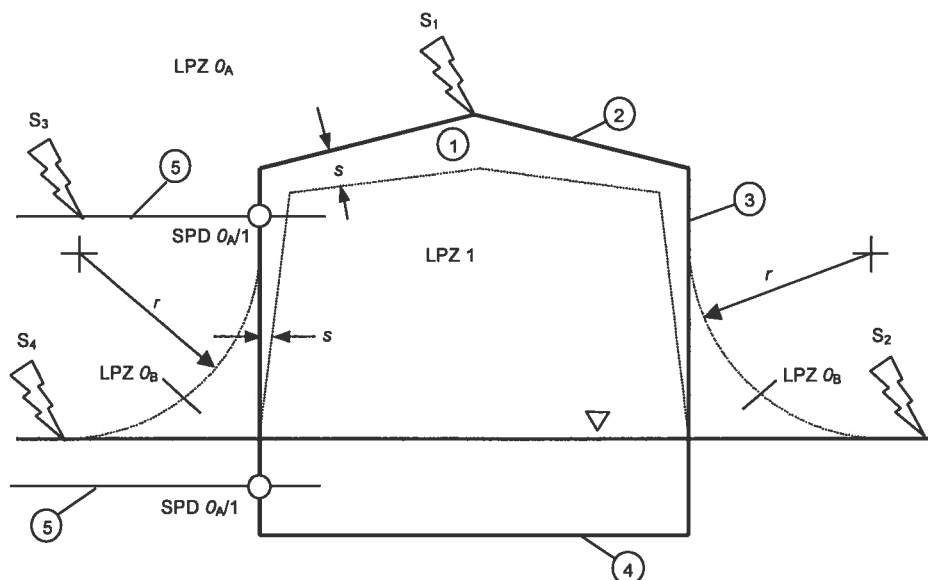
LPZ ve směru ochranných opatření jsou charakterizovány podstatnějším omezením LEMP než ty, které jsou proti směru LPZ.

LPZ 0_A zóna, kde je ohrožení přímým úderem blesku a plným elektromagnetickým polem blesku. Vnitřní systémy mohou být vystaveny plnému nebo dílčímu impulznímu bleskovému proudu,

LPZ 0_B zóna chráněná proti přímým úderům blesku, ale ve které je hrozba plného elektromagnetického pole blesku. Vnitřní systémy mohou být vystaveny dílčím impulzním proudům blesku,

LPZ 1 zóna, kde je impulzní proud omezen rozdělením proudu a SPD na rozhraní. Prostorové stínění může zeslabit elektromagnetické pole blesku,

LPZ 2, ..., n zóna, kde může být impulzní proud dále omezen rozdělením proudu a dalšími SPD na rozhraní. Další prostorové stínění může být použito pro další zeslabení elektromagnetického pole blesku. Přehled jednotlivých ochranných zón představuje následující obr. 17:



Legenda:

1 Stavba

2 Jímací soustava

3 Soustava svodů stavbě

4 Uzemňovací soustava připojené ke stavbě

5 Vstupující inženýrské sítě

S1 Úder do stavby

S2 Úder v blízkosti stavby

S3 Úder do inženýrské sítě připojené ke

S4 Úder v blízkosti inženýrské sítě

r Poloměr valcív se koule

s Dostatečná vzdálenost proti nebezpečnému jiskření

▽ Úroveň země

○ Ekvipotencionální pospojování proti blesku pomocí SPD

Přímý výboj, plný proud blesku

LPZ 0_A Přímý úder, plný bleskový proud

LPZ 0_B Žádný přímý úder, částečný blesk nebo indukovaný proud

LPZ 1 Žádný přímý úder, omezený blesk nebo indukovaný proud

Obrázek 17 – Přehled jednotlivých zón ochrany

7.3 Vnější ochrana před bleskem

V okamžiku, jak postupuje stupňovitý vůdčí výboj směrem k zemi, zvětšuje se intenzita elektrického pole na uzemněných koncích kovových (respektive vodivých konstrukcích) a často se na nich začíná objevovat korona, která generuje vstřícný výboj. Jakmile dojde ke spojení obou výbojů, objeví se zpětný výboj. Přesné vyhodnocení místa úderu blesku do objektu (struktury) musí respektovat nejenom vývoj streamerů z ostrých konců konstrukcí, následné místo spojení vůdčího a vstřícného výboje, vznik stabilního propagujícího vůdčího výboje, ale také velikost a charakter zpětného výboje.

Současné mezinárodní normy týkající se ochrany proti bleskovým výbojům jsou založeny na nejrůznějších fyzikálně-technických koncepcích a modelech, a to metodě **ochranného úhlu** a **elektro-geometrické metodě** (charakterizovanou prostřednictvím **valivé koule**). Často tyto metody nepracují se samotným připojovacím jevem charakterizovaným spojení **stupňovitého vůdčího výboje** a **vstřícného výboje**. Výzkumu bleskových výbojů se však v posledních několika desetiletích věnuje zvýšená pozornost, což umožňuje hlubší pochopení fyzikálních procesů spojení obou výbojů a projektovat je do inženýrských přístupů v ochraně před bleskem. Dnes existuje možnost simulovat vznik a šíření jak streamerů, tak leaderů z uzemněných konstrukcí, takže je možné předvídat bod úderu blesku jakékoliv složité struktury.

Cílem této podkapitoly je představit současný stav ochranných metod, pomocí nichž je možné determinovat případná možná místa zásahu objektu bleskovým výbojem.

Vnější ochrana před bleskem je určena k řízenému svedení bleskového výboje do země a k jeho rozvedení s omezením vzniku tepelných, mechanických a jiných přechodných jevů. Tato část sestává z jímačů a svodů. Jímačem může být tyč (i samostatně odděleně stojící – např. oddálený hromosvod), závěsná lana, anebo samostatná mřížová soustava vzájemně propojených vodičů.

7.4 Vnitřní ochrana před bleskem

Vnitřní ochrana před bleskem sestává z uceleného vícestupňového souboru prvků, které tvoří vzájemně koordinovaný systém potlačující amplitudy přechodných jevů, které vznikají v důsledku kapacitních, induktivních, respektive odporových vazeb vnitřní elektroinstalace a samotného bleskového kanálu.

7.5 Specifikace vnější ochrany proti bleskovému výboji

7.5.1 Definice systému ochrany

Systém vnější ochrany se definuje a navrhuje podle jedné z uvedených metod:

- a) *metodou vrcholových úhlů,*
- b) *metodou valivé koule,*
- c) *metodou mřížové soustavy*
- d) *metodou aktivního hromosvodu.*

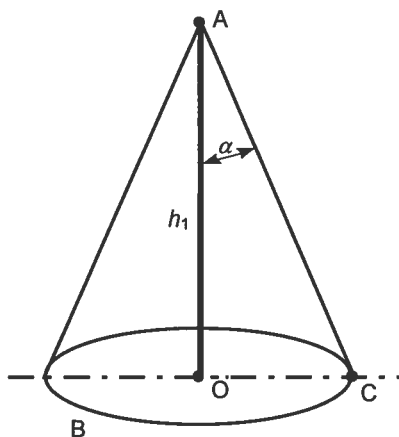
Ad a) Metoda vrcholového úhlu

Jedná se o jednu z nejstarších metod ochrany před přímým účinkem blesku do objektu. Předmětem diskuze se v technické praxi stala již v publikovaných pracích Benjamina Franklina a Václava Prokopa Diviše. První exaktní představu však vytvořil až Gay-Lussac, který definoval ochranné pásmo pravoúhlého kužele se základnou o poloměru kružnice se středem v patě jímače a dvojnásobným poloměrem, než je výška jímače. Postupně však byla studována exaktně fyzikální závislost mezi výškou jímače a polovičním vrcholovým úhlem α , který specifikuje dané ochranné pásmo dle třídy LPS. Patří k základním a nejjednodušším způsobům ochrany před bleskem, výsledky u složitých objektů však nemusí být přesné. Metodu nejvíce prezentovaly práce O. J. Lodgeho⁶⁹ a R. H. Goldeho⁷⁰.

⁶⁹ LODGE, O. J. *Lightning Conductors and Lightning Guards*. London: Whittaker and Co., 1892.

⁷⁰ GOLDE, R. H. "The lightning conductor," in R. H. Golde (ed.). *Lightning*. Vol. 2: *Lightning Protection*. New York: Academic Press, 1977, pp. 545–576.

Pro ochranný poměr (poměr poloměru základny kužele ($O-C$) k výšce jímače h_1) 1 : 1 je úhel mezi jímačem a bočním povrchem kužele 45° . Ochranný poměr 2 : 1 odpovídá úhel 60° . Průmět ochranných pásem jednotlivých jímačů vytvoří spojenou kuželovou plochu. Velmi často je tato ochrana aplikována v podobě zemních lan u přenosových a distribučních vedení (viz obr. 18–20).



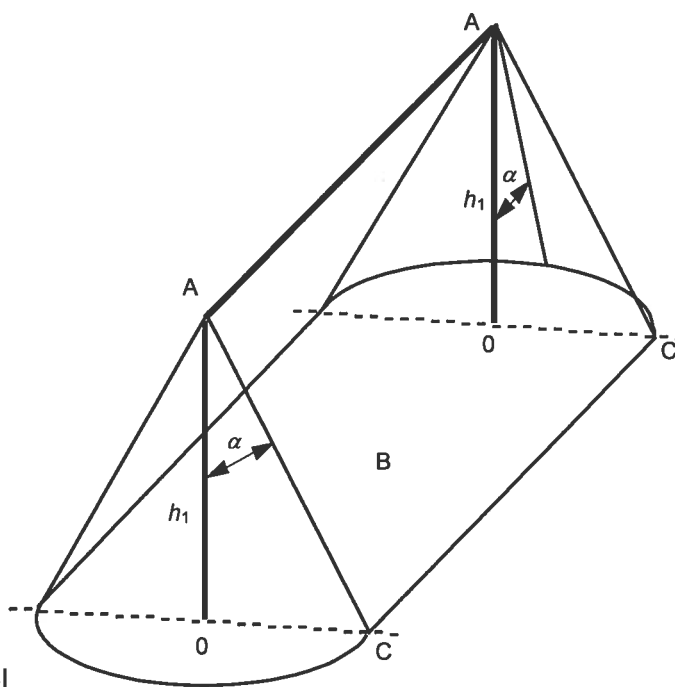
Legenda

A Vrchol jímací tyče

B Referenční rovina

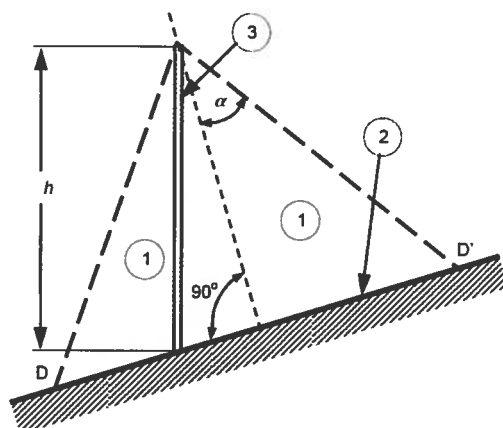
OC Poloměr ochranného prostoru

h_1 Výška jímací tyče nad referenční rovinou chráněného prostoru



α Ochranný úhel

Obrázek 18 – Geometrie ochranného úhlu hromosvodu

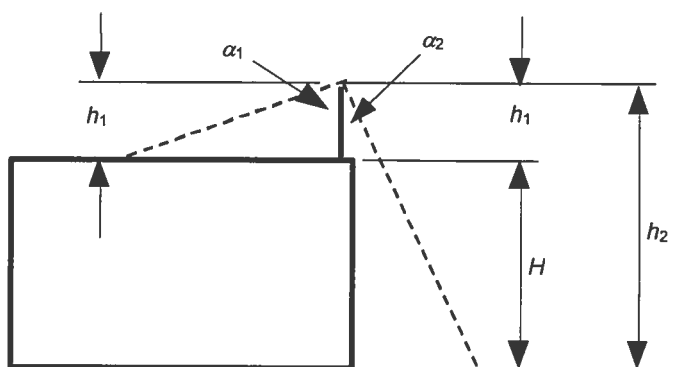


Legenda

- 1 Ochranný prostor
- 2 Referenční rovina
- 3 Jímací tyč
- h Skutečná výška jímače
- α Ochranný úhel
- D, D' Hranice ochranného prostoru

Obrázek 19 – Ochranný prostor jímací tyče na nakloněném povrchu s použitím metody ochranného úhlu

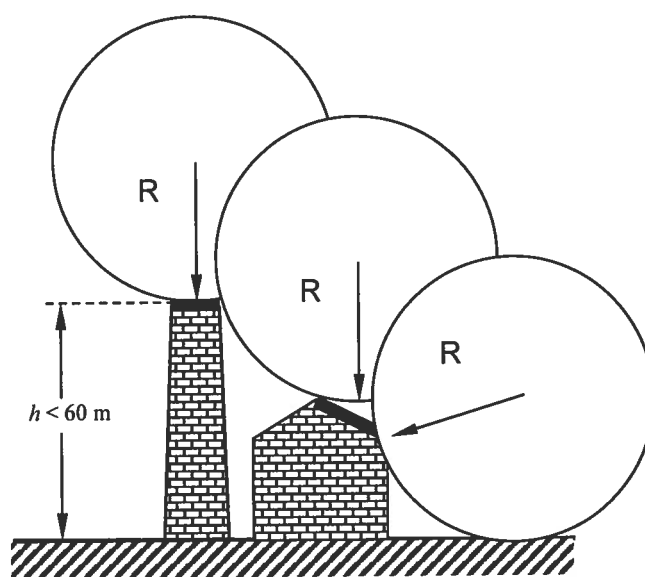
U výškově nestejných objektů je zapotřebí respektovat hodnoty ochranných pásem definovaných v diagramu na následujícím obrázku.



Obrázek 20 – Kombinace ochranných pásem u výškově nestejných částí objektu

Ad b) Metoda valící se koule

Metoda valící se koule (obr. 21) byla navržena na počátku 60. let 20. století Horvathem⁷¹ a Schwaigerem.⁷² Pro svoji univerzálnost se brzy dostala nejprve do maďarských a posléze i dalších evropských a světových norem. V samotném principu je založena na elektromagnetických modelech, při kterých je akceptován fakt, že **stupňovitý vůdčí výboj** musí dosáhnout takové kritické vzdálenosti od objektu, aby mohlo dojít k uzavření vodivé cesty a protéct hlavní bleskový proud. Existuje tedy sférická oblast s poloměrem rovnajícím se přeskokové vzdálenosti mezi **stupňovitým vůdčím výbojem** a uzemněnými konstrukcemi objektů na Zemi. Samotné jméno **valící se koule** dal metodě R. H. Lee⁷³ v USA. Na základě této metody musí být veškeré části objektu, kterých by se dotkla **valící se koule** o poloměru přeskokové vzdálenosti, uzemněny. Přeskoková vzdálenost je určena **vstřícným výbojem**, který vychází z uzemněných konstrukcí objektů.



Obrázek 21 – Použití metody valivé koule u složitých objektů

⁷¹ SZEDENIK, N. "Rolling sphere – method or theory?," in J. Electrostatics vol. 51–52, 2001, pp. 345–50.

⁷² SCHWAIGER, A. Der Schutzbereich von Blitzableitern. Munich: R. Oldenbourg, 1938.

⁷³ LEE, R. H. "Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice," in IEEE. Trans. Ind. Appl., vol. 14, 1978, pp. 465–70 a také LEE, R. H. "Lightning protection of buildings," in IEEE Trans. Ind. Appl., IA-15(3), 1979, pp. 236–40.

Ad c) Metoda mřížové soustavy

Metoda mřížové soustavy má výhodu v nezávislosti na tvaru a výšce objektu. Jímací soustava musí být umístěna na vnějších hranách objektu. Kovová atika může být použita jako náhodný jímač, splňuje-li podmínky dimenzování. Mřížová soustava bývá tvořena svařeným armovacím drátem, který je ve všech místech vodivě spojen s ostatními kovovými částmi sloužícími buď jako jímač nebo zemnič. Maximální velikost ok definuje tab. 4 a následující obr. 22.

Ad d) Metoda aktivního hromosvodu⁷⁴

Během rozvoje elektrotechniky především ve 20. století se vývoj zaměřil i na technické prostředky ochrany budov před bleskem. Diskutovány byly možnosti zlepšení konvenčních ochranných prostřednictvím sběrných elektrod, efektivnějšího uzemnění objektů a vhodnějšího rozmístění obou komponent. Současně s těmito, v té době již běžnými prostředky se začaly objevovat i specifické prostředky (aktivní, nekonvenční) ochrany objektů před účinky bleskových proudů. Podle typu a využití technologie se začaly rozdělovat na systémy konvenční (franklinovské tyče, častěji hromosvodní nebo bleskosvodní jímače) a aktivní, které emitují vstřícné výboje vůči hlavním bleskovým výbojům. Aktivní blesková ochrana se rozdělila na systémy s radioaktivním nuklidem a na ochrany využívající elektronických obvodů (pasivní RLC obvod v podobě oscilátoru).

Jak radioaktivní jímače, tak i elektronické s označením Early Streamer Emission (dále ESE) – s urychleným vysláním vstřícného výboje – jsou často diskutovány v literatuře a řešeny jak po praktické, tak i po odborné stránce jejich působnosti proti bleskovým výbojům. Na základě masivní reklamy se aktivní jímače vyrábějí a prodávají v mnoha zemích. V posledních 30 letech bylo instalováno přibližně 100 000 těchto zařízení. Některé publikace uvádějí teoretické úvahy týkající se mechanismu jejich činnosti, ty se však v laboratoři velmi těžko prokazují ze statistického hlediska. Například

⁷⁴ MIKEŠ, J., KUTÁČ, J. "Technická podstata hromosvodu," in *Elektroinstalatér*, č. 1. 2012, s. 47–49, ISSN 1211-2291.

v Německu byly aktivní jímače experimentálně zkoumány H. Baatzem, F. Noackem a K. Chrzanem.^{75,76,77} Měření v laboratoři a mnohé zkoušky za přirozených podmínek dokazují, že jímače ESE nevykazují lepší vlastnosti než konvenční jímače. Hypotéza, na níž jsou založeny jímače ESE, je pravděpodobně nesprávná.

Fyzikální podstata většiny nekonvenčních jímačů je založena na principu oscilačního obvodu, jehož kmitočet je dán Thomsonovým vztahem, kde $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Energie vnějšího zdroje je velmi malá (je jí atmosférická elektřina a korónové výboje) a obvod oscilátoru hromosvodu je obvodem s reálnými prvky, tedy i s tlumenými oscilacemi. Pokud nastane stav, že vnucený kmitočet napájecího zdroje je právě roven kmitočtu vlastnímu oscilačního obvodu, dostane se obvod do elektromagnetické rezonance. Tato situace pravděpodobně nastane pouze zřídka a amplituda obvodu bude oscilovat mezi maximem a hodnotou vnějšího pole.

Lze tedy konstatovat, že hlavice aktivního jímače je značně závislá na podmínkách vnějšího pole, které ji obklopuje. Obvod se může a nemusí dostat do rezonance, ale současně pro bleskový výboj tvoří reálnou impedanci, přes kterou se dostává do uzemňovací soustavy. Může tak být lepším hromosvodem, ale také nemusí. Záleží na konfiguraci elektrického pole v jeho okolí. Chybně bývá distributory tento princip interpretován tak, že stačí jedna hlavice aktivního hromosvodu na velkou plochu, kterou musí pokrýt.

Aktivní hromosvody patří nejenom v České republice k velmi populárním ochranným prostředkům. Jejich činnost však nenaplnuje deklarované funkční vlastnosti a revize jsou velmi často prováděny podle neplatných vyhlášek a souborů norem. V České republice pro jejich činnost není zavedena normotvorná podpora.

⁷⁵ CHRZAN, K. "Untersuchungen an Early Streamer Emission-Fangstangen," in *Elektrotechnische Zeitschrift*, vol. 2, 2005.

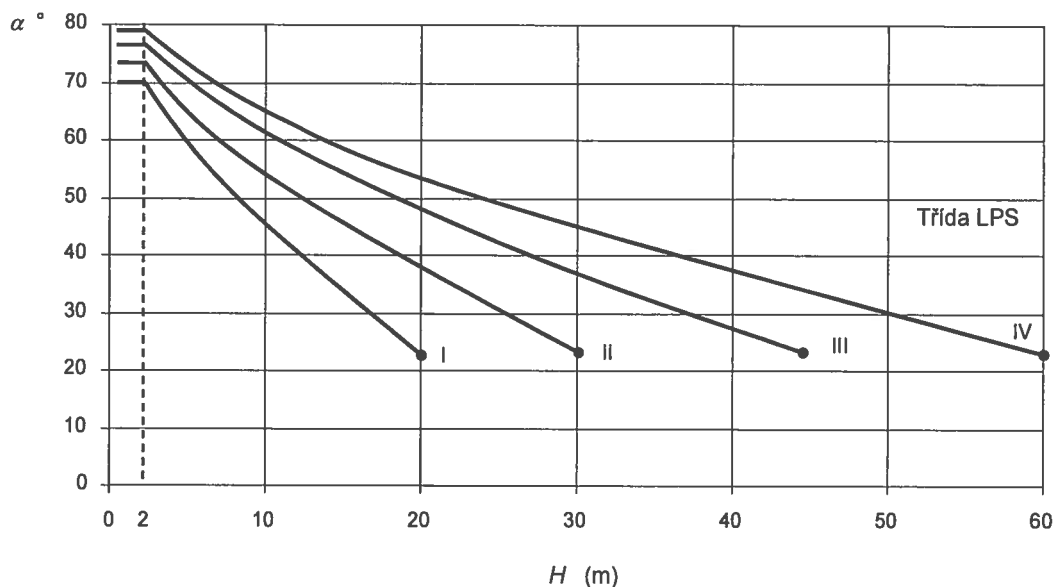
⁷⁶ GOLDE, R. H. *Lightning*. London: Academic Press, 1977, p. 546.

⁷⁷ BAATZ, H. "Radioaktive Isotope verbessern nicht den Blitzschutz," in *ETZ-A*, 1972.

V tab. 4 a na obr. 22 jsou uvedeny vzájemné vztahy mezi používanými metodami návrhu ochrany před bleskem.

Třída LPS	Metody ochrany		
	Poloměr valící se koule r m	Velikost ok W m	Ochranný úhel α°
I	20	5 × 5	Viz obr. 22
II	30	10 × 10	
III	45	15 × 15	
IV	60	20 × 20	

Tabulka 4 – Maximální hodnoty poloměru valící se koule, velikosti ok přiřazené do třídy LPS



Obrázek 22 – Vztah mezi vrcholovým úhlem a výškou jímače nad zemí

8 Přehled jednotlivých výpočetních metod, které se věnují problematice přepětí a přímých účinků bleskových proudů

K numerickým výpočetním metodám zahrnujícím přepětí, ale i dílčí části bleskových kanálů náleží:

- a) Metoda momentů
- b) Metoda dílčích obvodářských modelů
- c) Metoda konečných prvků
- d) Metoda telegrafních rovnic
- e) Metoda konečných diferencí v časové oblasti
- f) Matematický model chráněného objektu

Ad a) Metoda momentů – *Method of Moments (MOM)*

MOM v časové oblasti (Van Baricum a Miller 1972,⁷⁸ Miller et al 1973⁷⁹) byla poprvé použita k analýze odezvy tenkého vodiče na vliv vnějších přechodných elektromagnetických polí. Celá vodivá struktura je modelována na základě kombinace válcových úseků drátu, jejichž poloměry jsou mnohem menší než vlnové délky studovaného jevu.

Ad b) Dílčí obvodářské modely – *Partial element equivalent circuit method (PEEC)*

⁷⁸ VAN BARICUM, M., MILLER, E. K. TWDT – A computer program for time-domain analysis of thin-wire structures. UCRL-51-277, Livermore, USA: Lawrence livermore laboratory, 1972.

⁷⁹ MILLER, E. K., POGGIO, A. J., and BURKE, G. J. "An integro-differential equation technique for the time domain analysis of thin wire structur: part I. The numerical method," in *Journal of Computational Physics*, vol. 12, 1973, pp 24–28.

PEEC metoda (Ruehli 1974⁸⁰) poskytuje plné řešení Maxwellových rovnic. Metoda je použitelná pro řešení úloh jak v čase (Wang et al. 2010)⁸¹, tak ve frekvenční oblasti. Významný rozdíl od metody momentů MOM je především v tom, že systém svodů a jímačů je analyzován na základě jejich ekvivalentních obvodů. Přestože PEEC metoda je založena na přesné teorii elektromagnetického pole, nebyla původně tato metoda pro řešení polí určena. V roce 1990 byla metoda rozšířena o použití v dielektrických materiálech (Ruehli a Heeb 1992)⁸². Relativně nedávno byla aplikována pro potřeby ochrany před bleskem (např. Yutthagowith et al. 2009⁸³).

Ad c) Metoda konečných prvků – *Finite-Element Method* (FEM)

FEM (např. Sadiku 1989)⁸⁴ je výpočetní technika vhodná pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Tato metoda má schopnost řešit složité geometrie pomocí nestrukturovaných prvků: mřížky, často s trojúhelníky v 2D simulaci a čtyřstěnnými prvky v 3D simulaci. Tetraedrické tvary umožňují snazší řešení pro zakřivené tvary nebo objekty, které jsou obtížné modelovatelné za použití krychlových nebo pravoúhlého rovnoběžnostěnů. Přestože lze řešení hledat jak v časové, tak frekvenční oblasti, většina implementací FEM jsou aplikovány pro frekvenční oblasti. Některé konkrétní aplikace FEM ve frekvenční oblasti se nacházejí v Smajic et al. (2011)⁸⁵ a Shoory et al. (2012).

⁸⁰ RUEHLI, A. "Equivalent circuit models for three-dimensional multiconductor systems," in *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 22, 1974, pp 216–221.

⁸¹ WANG, S., HE, J., ZHANG, B., ZENG, R., YU, Z. "A Time-Domain Multiport Model of Thin-Wire System for Lightning Transient Simulation," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, no. 1, 2010, pp. 128–135. doi: 10.1109/TEMC.2009.2035815.

⁸² RUEHLI, A. E., HEEB, H. "Circuit models for three-dimensional geometries including dielectrics," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 7, 1992, pp. 1507–1516. doi: 10.1109/22.146332.

⁸³ YUTTHAGOWITH, P., AMETANI, A., NAGAOKA, N., BABA, Y. "Lightning-Induced Voltage Over Lossy Ground by a Hybrid Electromagnetic Circuit Model Method With Cooray–Rubinstein Formula," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 4, 2009, pp. 975–985. doi: 10.1109/TEMC.2009.2029702.

⁸⁴ SADIKU, M. N. O. "A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems," in *IEEE Transactions on Education*, vol. 32, no. 2, 1989, pp. 85–93. doi: 10.1109/13.28037.

⁸⁵ SMAJIC, J., HOLAUS, W., KOSTOVIC, J., RIECHERT, U. "3D Full-Maxwell Simulations of Very Fast Transients in GIS," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, 2011, pp. 1514–1517. doi: 10.1109/TMAG.2010.2090653.

Ad d) Metoda telegrafních rovnic – *Transmission Line Modeling Method (TLM)*

TLM metoda (Johns a Beurle 1971)⁸⁶ byla použita pro výpočty elektromagnetických polí blesku a simulacím přepětí (Mattos 2005⁸⁷, Yuda et al. 2013⁸⁸). TLM metoda je založena na Huygensově principu. Analogie šíření elektromagnetických vln a napěťových vln v 3D prostoru je realizována prostřednictvím 3D mřížky tvořené krátkými úseky „přenosových vedení“. TLM metoda má výhody podobné FDTD metodám, je schopná řešit nelineární vlivy (komponenty) a komplexní struktury. Nevýhodou je však její mnohonásobně nižší stabilita oproti FDTD metodám.

Ad e) Metoda konečných diferencí v časové oblasti – *Finite Difference Time domain method (FDTD)*

Metoda konečných diferencí v časové oblasti (**FDTD**), (Yee 1966)⁸⁹ je jednou z nejčastěji používaných metody k výpočtům elektromagnetického rušení. FDTD metoda používá aproximaci centrálních diferencí Maxwellových vlnových rovnic, které jsou definovány jako Faradayův zákon a Ampérův zákon, a to v časové oblasti. Metoda řeší rovnice výsledné rovnice pro elektrické a magnetické pole v každém časovém kroku a pro každou prostorovou diskretizaci. Výhody metody FDTD oproti jiným metodám výpočtu elektromagnetického pole lze shrnout následovně:

⁸⁶ **JOHNS, P. B., BEURLE, R. L.** "Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix." in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, no. 9, 1971.

⁸⁷ **MATTOS, M. A. F.** "Grounding grids transient simulation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, 2005, pp. 1370–1378. doi: 10.1109/TPWRD.2004.839177.

⁸⁸ **YUDA, S., SAWAKI, S., BABA, Y., NAGAOKA, N., AMETANI, A.** "Application of the TLM Method to Transient Simulations of a Conductor System With a Lossy Ground: Grounding Electrodes and an Overhead Wire," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 1, 2013, pp. 175–182. doi: 10.1109/TEMC.2012.2205152.

⁸⁹ **YEE, K.** "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, 1966, pp. 302–307. doi: 10.1109/TAP.1966.1138693.

Výhody jsou:

1. Metoda je založena na jednoduchém postupu, a proto je poměrně snadné její počítačové programování.
2. Metoda je schopna pracovat s komplexní geometrií a nehomogenitami.
3. Do výpočtu je možno zahrnout i vliv nelineárních efektů a součástí.

Nevýhody jsou:

1. Je to ve srovnání s jinými metodami, například metodou momentů (MOM) výpočetně náročná metoda.
2. Metoda je složitá pro disperzní materiály a struktury.
3. Metoda je obtížně řešitelná pro struktury, které nejsou přepsatelné do karteziánských souřadnic.

Další podrobnosti o metodě FDTD jsou uvedeny v pracích Kunz a Luebbers (1993),⁹⁰ Taflove (1995),⁹¹ Sullivan (2000),⁹² Hao a Mittra (2009),⁹³ Yu et al. (2009)⁹⁴ a Inan a Marshall (2011)⁹⁵.

První recenzovaná publikace, kde FDTD metoda byla použita pro řešení impulzních jevů, byla publikována v roce 2001 (Tanabe 2001),⁹⁶ a první recenzovaná studie, ve které byla použita k řešení elektromagnetické analýzy způsobené přímým zásahem

⁹⁰ KUNZ, K. S., LUEBBERS, R. J. The finite difference time domain method for electromagnetics. Boca Raton, USA: CRC Press, 1993.

⁹¹ TAFLOVE, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Norwood, MA: Artech House, 1995.

⁹² SULLIVAN, D. M. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method, 1. Wiley-IEEE Press, 2000, 10.1109/9780470544518.

⁹³ HAO, Y., MITTRA, R. FDTD Modeling of Metamaterials: Theory and Applications. London: Artech House, 2009.

⁹⁴ YU, W. Electromagnetic simulation techniques based on the FDTD method. Hoboken: N. J., Wiley, 2009.

⁹⁵ INAN, U. S., MARSHALL, R. A. Numerical electromagnetics: the FDTD method. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

⁹⁶ TANABE, K. "Novel method for analyzing the transient behavior of grounding systems based on the finite-difference time-domain method," in *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, vol. 3, 2001, pp. 1128–1132. doi: 10.1109/PESW.2001.917230.

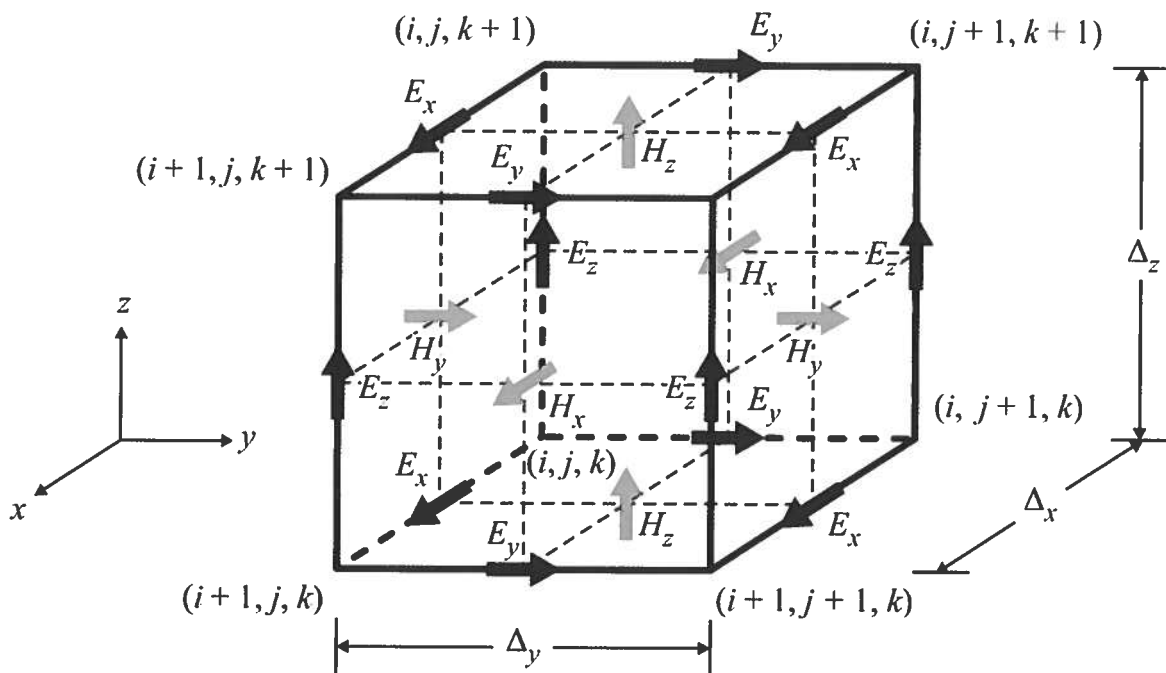
bleskem, byla publikována v roce 2003 (Baba a Rakov 2003).⁹⁷ Více než v 60 časopisech a velkém počtu konferenčních příspěvků, které používají metody FDTD k řešení účinku elektromagnetického pole blesku a rázových simulací, byly zveřejněny v posledních deseti letech (např. Baba a Rakov 2014 a odkazy v něm)⁹⁸. Zájem o používání metody FDTD pro elektromagnetické pole v okolí blesku a simulace přepětí i nadále roste.

⁹⁷ **BABA, Y., RAKOV, V. A.** "On the transmission line model for lightning return stroke representation," in *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, 2003, p. 2294. doi:10.1029/2003GL018407, 24.

⁹⁸ **THANG, T. H., BABA, Y., NAGAOAKA, N., AMETANI, N., ITAMOTO, N., RAKOV, V. A.** "FDTD Simulations of Corona Effect on Lightning-Induced Voltages," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 1, 2014, pp. 168–176. doi: 10.1109/TEMC.2013.2278384.

8.1 Řešení v kartézských souřadnicích

FDTD metoda v 3D kartézském souřadnicovém systému⁹⁹ vyžaduje celý pracovní prostor, který definuje jímací a ochranný systém, který má být analyzován. Systém je rozdělen do buněk krychlí nebo hranolů s rozměry Δx , Δy , Δz . Princip definuje následující obr. 23.



Obrázek 23 – Polohy komponent elektrického a magnetického pole v uvažovaném elementu

Příspěvky elektrického pole E_x jsou situovány do středů stran buňky s osou x, E_y do y osy a E_z do části osy z. Komponenty magnetických polí jsou situovány do stěn kubického elementu H_x do yz plochy, H_y do zx plochy a H_z do xy plochy. Elektrické pole je počítáno v čase $n\Delta t$ a magnetické pole je počítáno pro $(n+1/2)\Delta t$.

Časové změny pro komponenty elektrických polí v x-ové, y-ové a z-ové ose jsou získány z Ampèrova zákona, respektive komponenty magnetických polí H_x , H_y a H_z jsou počítány z Faradayova zákona.

⁹⁹ BABA, Y., RAKOV, V. A. Electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies. Wiley: IEEE, 2016.

$$\nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \mathbf{J}^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}$$

kde \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole, \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole, ε je permitivita a σ vodivost, t je čas a $n - \frac{1}{2}$ je časový krok pro výpočet magnetického pole.

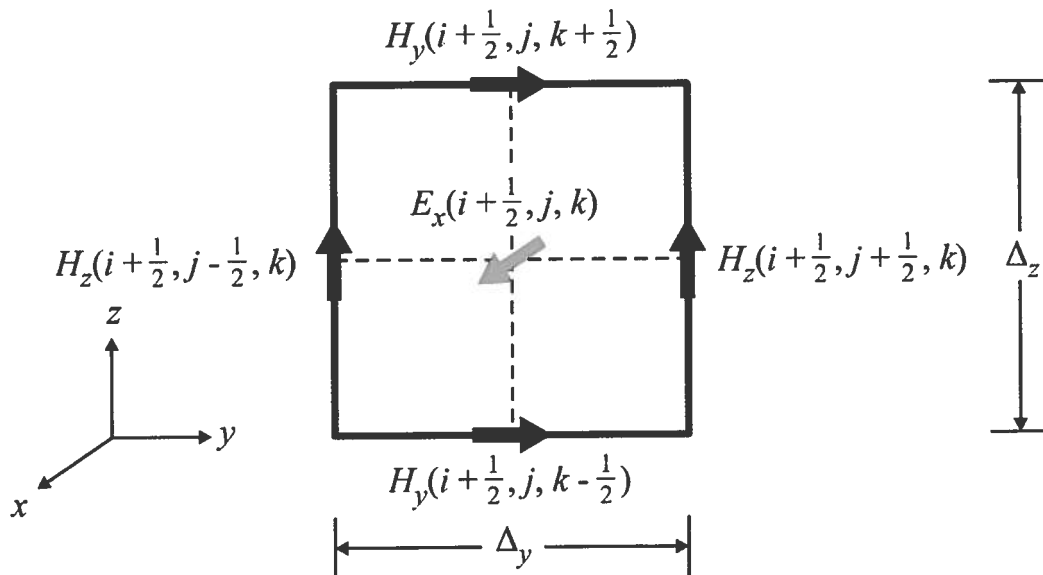
$\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ je náhrada proudové hustoty. Za použití centrální derivace platí:

$$\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}} \approx \varepsilon \frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t} + \sigma \frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{2} \approx \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$$

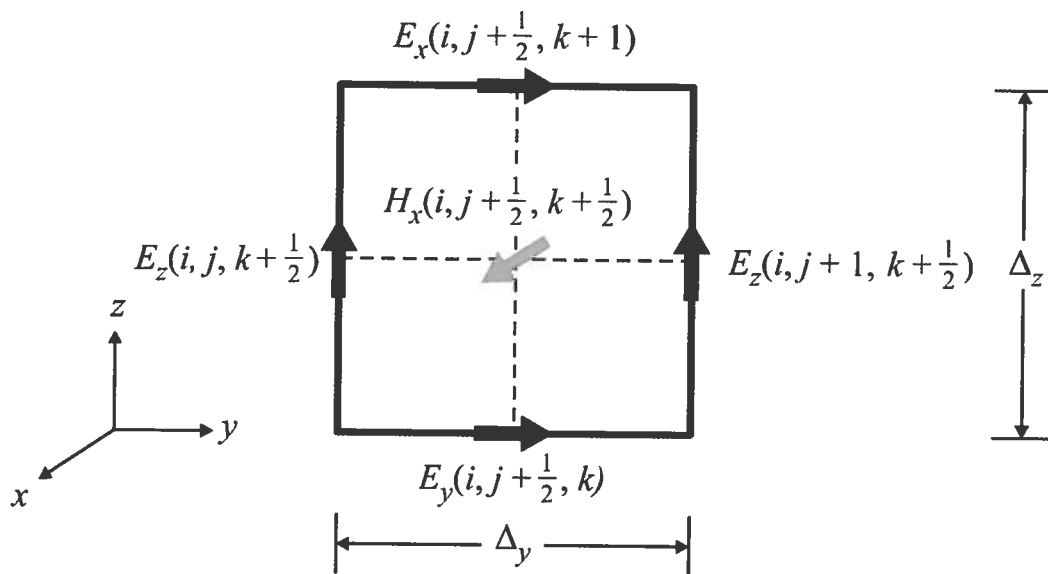
Úpravou dostaneme:

$$\mathbf{E}^n = \left(\frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \right) \mathbf{E}^{n-1} + \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon} \right) \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$$

následnou úpravu pro E_x^n na pozici $(i + \frac{1}{2}, j, k)$ demonstruje obr. 24.



Obrázek 24 – Příklad příspěvek intenzity elektrického pole E_x^n v ose x na pozici $(i + \frac{1}{2}, j, k)$



Obrázek 25 – Příspěvek intenzity magnetického pole $H_x^{n+\frac{1}{2}}$ v ose x na pozici $(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})$

$$\begin{aligned}
& E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\
&= \frac{1 - \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}} E_x^{n-1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\
&+ \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}} \left[\frac{\partial H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\partial y} - \frac{\partial H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\partial z} \right] \\
&= \frac{1 - \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}} E_x^{n-1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\
&+ \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}} \left[H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta z \right. \\
&- H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right) \Delta z - H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta y \\
&\left. + H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) \Delta y \right]
\end{aligned}$$

kde prostorové derivace byly nahrazeny jejich centrálními konečnými diferencemi

$$\begin{aligned}
E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) &= \frac{1 - \frac{\sigma \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)}} E_y^{n-1} \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \\
&+ \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)}} \left[H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \Delta x \right. \\
&- H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2} \right) \Delta x - H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta z \\
&\left. + H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \Delta z \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_z^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) &= \frac{1 - \frac{\sigma \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)}} E_z^{n-1} \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) \\
&+ \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)}} \left[H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta y \right. \\
&- H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta y - H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \Delta x \\
&\left. + H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \Delta x \right]
\end{aligned}$$

Faradayův zákon je definován jako:

$$\nabla \times \mathbf{E}^n = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}^n}{\partial t}$$

po nahrazení centrálními konečnými diferencemi:

$$\mu \frac{\partial \mathbf{H}^n}{\partial t} \approx \mu \frac{\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \approx -\nabla \times \mathbf{E}^n$$

Po úpravě dostaneme:

$$\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^n$$

$H_x^{n+\frac{1}{2}}$ na pozici $(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})$ dostaneme:

$$\begin{aligned} & H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \\ &= H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \\ & - \frac{\Delta t}{\mu\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)} \left[\frac{\partial E_z^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\partial y} - \frac{\partial E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\partial z} \right] \\ &= H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \\ & - \frac{\Delta t}{\mu\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)} \frac{1}{\Delta z \Delta y} \left[E_z^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \Delta z - E_z^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \Delta z \right. \\ & \left. - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) \Delta y + E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta y \right] \end{aligned}$$

a po náhradě centrálními derivacemi $H_y^{n+\frac{1}{2}}$ a $H_z^{n+\frac{1}{2}}$

$$\begin{aligned} & H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) \\ &= H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) \\ & - \frac{\Delta t}{\mu\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right)} \frac{1}{\Delta z \Delta x} \left[E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) \Delta x - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \Delta x \right. \\ & \left. - E_z^n\left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}\right) \Delta z + E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \Delta z \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \\
&= H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \Delta x \Delta y} \left[E_y^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}, k\right) \Delta y - E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) \Delta y \right. \\
&\quad \left. - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1, k\right) \Delta x + E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \Delta x \right]
\end{aligned}$$

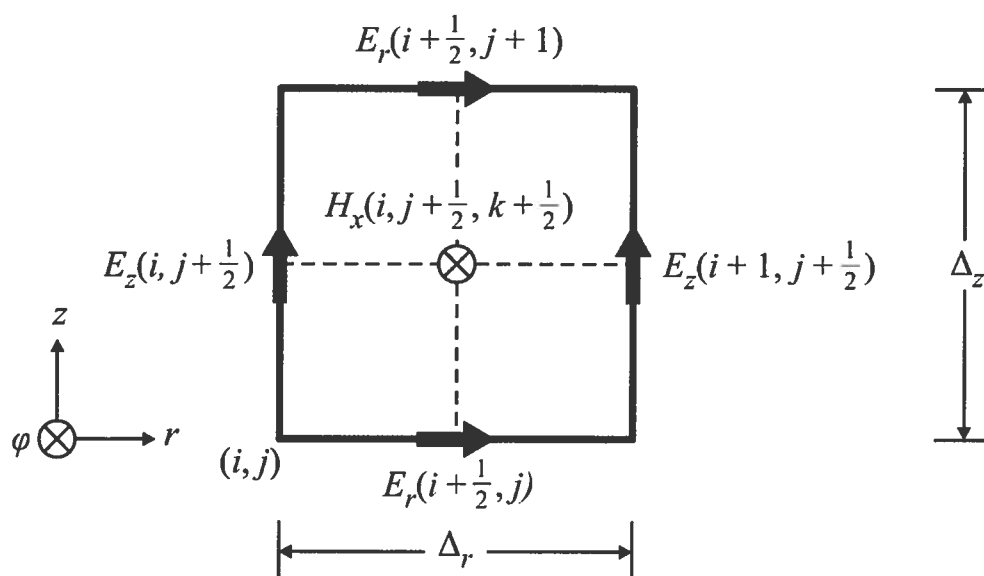
Po dosazení všech komponent E_x^n , E_y^n , E_z^n , $H_x^{n+\frac{1}{2}}$, $H_y^{n+\frac{1}{2}}$, $H_z^{n+\frac{1}{2}}$ dostaneme výsledné rozložení impulzního elektrického a magnetického pole v pracovním prostoru.

Řešení musí splňovat Courantovu podmínku stability:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}$$

8.2 Řešení ve válcových souřadnicích

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z}, \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r}, \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r H_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} \right) \right] = \left[-\frac{\partial H_\varphi}{\partial z}, 0, \frac{1}{r} \frac{\partial(r H_\varphi)}{\partial r} \right]$$



Obrázek 26 – Příspěvek radiální a vertikální komponenty E_r a E_z a H_φ

Po zavedení aproximací:

$$\begin{aligned}
 E_r^n \left(i + \frac{1}{2}, j \right) &= \frac{1 - \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}} E_r^{n-1} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \\
 &+ \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}} \left[-\frac{\partial H_\varphi^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}{\partial z} \right] \\
 &= \frac{1 - \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \Delta t}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}} E_r^{n-1} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \\
 &+ \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}}{1 + \frac{\sigma \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \Delta t \Delta z}{2\varepsilon \left(i + \frac{1}{2}, j \right)}} \left[-H_\varphi^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - H_\varphi^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2} \right) \right]
 \end{aligned}$$

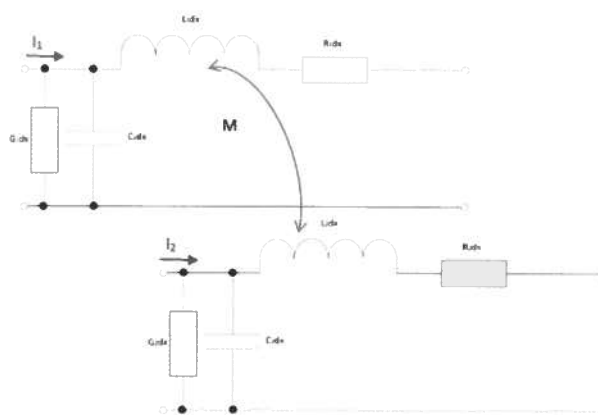
$$\begin{aligned}
E_z^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) &= \frac{1 - \frac{\sigma\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}}{1 + \frac{\sigma\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}} E_z^{n-1}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \\
&\quad + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}}{1 + \frac{\sigma\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}} \left[\frac{1}{r_i} \frac{\partial r_i H_\varphi^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}{\partial r} \right] \\
&= \frac{1 - \frac{\sigma\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}}{1 + \frac{\sigma\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}} E_z^{n-1}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \\
&\quad + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}}{1 + \frac{\sigma\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2\varepsilon\left(i + \frac{1}{2}, j\right)}} \left[r_{i+\frac{1}{2}} H_\varphi^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \right. \\
&\quad \left. - r_{i+\frac{1}{2}} H_\varphi^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) \\
&= H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)} \left[\frac{\partial E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)}{\partial z} - \frac{\partial E_z^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)}{\partial r} \right] \\
&= H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)} \frac{1}{\Delta z} \left[E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1\right) - E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j\right) \right] \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)} \frac{1}{\Delta r} \left[E_z^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

9 Matematický model chráněného objektu – metoda telegrafních rovnic¹⁰⁰

Při návrhu matematického modelu svodu a vnitřní instalace (obr. 27) jsem se rozhodl pro metodu telegrafních rovnic. Matematický model svodu a jímáče bleskových proudů je v mém prvním přiblížení sestaven z ideálního vedení doplněného reálnými parametry, rezistance, vlastní a vzájemné indukčnosti, kapacity a svodu. Tyto parametry jsou stanovovány na základě přesných výpočtů odvozených ze skutečného stavu svodu a zemnění a reálných stavebních materiálů použitých v konkrétním případě. Výpočty jsou založeny na programování v softwaru Matlab R 2013a

¹⁰⁰ MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., EFMERTOVÁ, M., MARTÍNEK, Z. "Influence of the wall material of the lightning protected object size induced surges," in *ICLP 2014, Shanghai*, pp. 1724–1730, IEEE 978-1-4799-3544-4/14/\$31.00.



Obrázek 27 – Náhradní schéma pro odvození matematického modelu

- Svodové vedení a jímač bleskového proudu

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial x^2} &= -L_1 \cdot \frac{\partial^2 i_1(x, t)}{\partial x \partial t} - M_1 \cdot \frac{\partial^2 i_2(x, t)}{\partial x \partial t} - R_1 \cdot \frac{\partial i_1(x, t)}{\partial x} \\ &\quad \frac{\partial i_1(x, t)}{\partial x} - C_1 \cdot \frac{\partial u_1(x, t)}{\partial t} - G_1 \cdot u_1(x, t) \\ \frac{\partial^2 i_1(x, t)}{\partial x \partial t} &= -C_1 \cdot \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial t^2} - G_1 \cdot \frac{\partial u_1(x, t)}{\partial t} \end{aligned}$$

- Vnitřní elektroinstalace

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial x^2} &= -L_2 \cdot \frac{\partial^2 i_2(x, t)}{\partial x \partial t} - M_2 \cdot \frac{\partial^2 i_1(x, t)}{\partial x \partial t} - R_2 \cdot \frac{\partial i_2(x, t)}{\partial x} \\ &\quad \frac{\partial i_2(x, t)}{\partial x} - C_2 \cdot \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial t} - G_2 \cdot u_2(x, t) \\ \frac{\partial^2 i_2(x, t)}{\partial x \partial t} &= -C_2 \cdot \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial t^2} - G_2 \cdot \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial t} \end{aligned}$$

- Obecně

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial x^2} &= L_1 C \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial t^2} + L_1 G \frac{\partial u_1(x, t)}{\partial t} + M C \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial t^2} + M G \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial t} \\ &\quad + R_1 C \frac{\partial u_1(x, t)}{\partial t} + R_1 \cdot G \cdot u_1(x, t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial x^2} &= L_2 C \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial t^2} + L_2 G \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial t} + M C \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial t^2} + M G \frac{\partial u_1(x, t)}{\partial t} \\ &+ R_2 C \frac{\partial u_2(x, t)}{\partial t} + R_2 \cdot G \cdot u_2(x, t) \end{aligned}$$

- **Formálně můžeme zapsat pro napětí a proud**

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} i_1(x, t) \\ i_2(x, t) \end{bmatrix} - C \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1(x, t) \\ i_2(x, t) \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} L_1 G + R_1 C & MG \\ MG & L_2 G + R_2 C \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} i_1(x, t) \\ i_2(x, t) \end{bmatrix} - G \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1(x, t) \\ i_2(x, t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} u_1(x, t) \\ u_2(x, t) \end{bmatrix} - C \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(x, t) \\ u_2(x, t) \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} L_1 G + R_1 C & MG \\ MG & L_2 G + R_2 C \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} u_1(x, t) \\ u_2(x, t) \end{bmatrix} - G \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(x, t) \\ u_2(x, t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

9.1 Numerické řešení

Pro řešení výše uvedené hyperbolické parciální rovnice druhého řádu jsem použil Lax-Wendroffovu metodu druhého řádu. Problem může být popsán v $(0, T) \times (0, D)$, kde M, L, C, G, R jsou konstanty a $I(t, x) = \begin{bmatrix} i_1(t, x) \\ i_2(t, x) \end{bmatrix} : (0, T) \times (0, D) \rightarrow \mathbb{R}^2$ je neznámá funkce proudu. Aproximace jsem doplnil o Dirichletovy okrajové podmínky: $I(t, 0) = I_0(t)$, v $(0, T)$ a $I(t, D) = 0$ v $(0, T)$, kde I_0 reprezentuje vstupní impulz a podmínky $I(t, D) = 0$ vlivem uzemnění svodu a za použití počátečních podmínek $I(0, x) = \frac{\partial}{\partial t} I(0, x) = 0$, v $(0, D)$.

Výpočtovou oblast jsem pokryl časovými a prostorovými kroky $h > 0$ a $\tau > 0$. Necht' $x_k = kh$, $k = 0, \dots, N$, jsou prostorové a $t_l = l\tau$, $l = 0, \dots, M$, časové uzly. Předpokládám $I_k^l \equiv I(t_l, x_k)$ jako funkci proudu v aproximačních uzlech. Aproximace (t_l, x_k) Lax-Wendroffovou metodou můžeme zapsat:

$$\begin{aligned} I_k^l &\approx \frac{1}{4} \cdot [I_k^{l-1} + I_{k+1}^{l-1} + I_k^l + I_{k+1}^l] \\ \frac{\partial}{\partial t} I_k^l &\approx \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{I_k^l - I_k^{l-1}}{\tau} + \frac{I_{k+1}^l - I_{k+1}^{l-1}}{\tau} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} I_k^l \approx \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{I_k^l - 2 \cdot I_k^{l-1} + I_k^{l-2}}{\tau^2} + 2 \cdot \frac{I_{k+1}^l - 2 \cdot I_{k+1}^{l-1} + I_{k+1}^{l-2}}{\tau^2} + \frac{I_{k+2}^l - 2 \cdot I_{k+2}^{l-1} + I_{k+2}^{l-2}}{\tau^2} \right]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I_k^l \approx \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{I_{k+2}^l - 2 \cdot I_{k+1}^l + I_k^l}{h^2} + 2 \cdot \frac{I_{k+2}^{l-1} - 2 \cdot I_{k+1}^{l-1} + I_k^{l-1}}{h^2} + \frac{I_{k+2}^{l-2} - 2 \cdot I_{k+1}^{l-2} + I_k^{l-2}}{h^2} \right]$$

kde $k = 0, \dots, N - 2$ a $l = 2, \dots, M$. Možná alternativa pro výpočet k Lax-Wendroffově metodě může být zpětná metoda centrálních derivací, která však se příliš neosvědčila vlivem nízké stability:

$$I_k^l \approx I_k^l$$

$$\frac{\partial}{\partial t} I_k^l \approx \frac{1}{\tau} \cdot [I_k^l - I_k^{l-1}]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} I_k^l \approx \frac{1}{\tau^2} \cdot [I_k^l - 2 \cdot I_k^{l-1} + I_k^{l-2}]$$

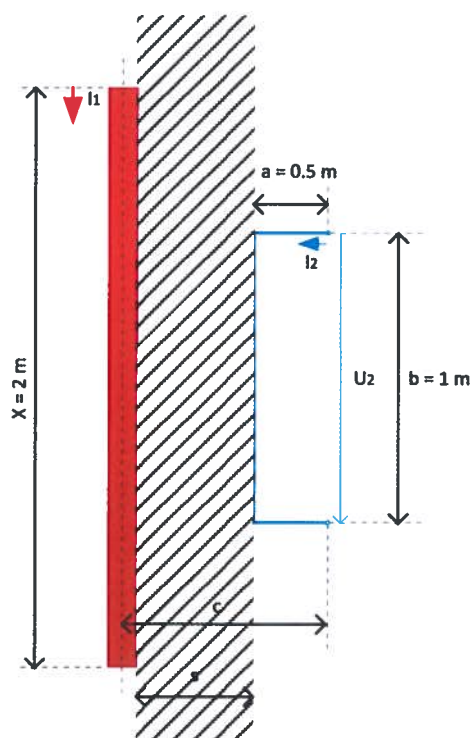
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I_k^l \approx \frac{1}{h^2} \cdot [I_{k-1}^l - 2 \cdot I_k^l + I_{k+1}^l]$$

Vložení aproximací dostaneme pro každý časový uzel $k = 0, \dots, N - 2$ and $l = 2, \dots, M$ lineárních algebraických rovnic ve tvaru:

$$d_k^l \cdot I_k^l + d_{k+1}^l \cdot I_{k+1}^l + d_{k+2}^l \cdot I_{k+2}^l = F(I_k^{l-1}, I_{k+1}^{l-1}, I_{k+2}^{l-1}, I_k^{l-2}, I_{k+1}^{l-2}, I_{k+2}^{l-2}),$$

kde $d_k^l, d_{k+1}^l, d_{k+2}^l$ je matice koeficientů a F je vektorová funkce z předchozího časového kroku. Dostaneme tak systém $M - 2$ lineárních rovnic s $2(N - 1)$ neznámými.

Vyzkoušel jsem model pro uspořádání svodu (běžně na vnější stěně objektu) a instalační smyčky (uvnitř objektu). Celkové uspořádání je v řezu na obr. 28. Všechny veličiny vztahující se ke svodu jsou indexovány 1 a veličiny vztahující se k instalační smyčce jsou indexovány 2.



Obrázek 28 – Celkový řez modelovanou situací

Materiálem svodu byl vodič o průřezu 50 mm^2 a aktivní délce 2 m vyrobený ze slitiny AlMgSi s rezistivitou $\rho = 0.036 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$ and vnitřní instalace byla modelována vodičem o průřezu 2.5 mm^2 , délce $1 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}$ a rezistivitě $\rho = 0.0135 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$. Rezistance na 1 metr délky svodového vodiče byla vypočtena – $R_1 = 0.72 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$ a instalační smyčky – $R_2 = 6.8 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$. Pro oba svody G_{12} jsem použil $G = 1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{S}}{\text{m}}$.

Jedna z možností zápisu analytické funkce bleskového proudu – tzv. Heidlerova funkce – v rámci možností definovaných v kapitole 3 jsem ji vybral jako nevhodnější pro implementaci do numerického řešení.

$$i = \frac{i_{max}}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [\text{A}],$$

Koeficienty jsou uvedeny v následující tab. 5:

	Proudová funkce T1/T2		
	10/350 μs	1/200 μs	0,25/100 μs
η	0.93	0.986	0.993
T	19.0 μs	1.82 μs	0.454 μs
τ	485 μs	285 μs	143 μs

Tabulka 5 – Koeficienty analytické funkce proudu

9.1.1 Výpočet vlastní a vzájemné indukčnosti instalační smyčky a vnitřní elektroinstalace (tab. 6):

Vzájemná indukčnost

$$M = 0.2 \cdot b \cdot \ln \frac{c}{a} \quad [\mu\text{H/m}]$$

Vlastní indukčnost svodu

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{c}{r_1} \right) \quad [\text{H/m}]$$

Vlastní indukčnost elektroinstalace

$$L_2 = 0.8 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} - 0.8 \cdot (a + b) + 0.4 \cdot a \cdot \ln \frac{2 \cdot b}{r_2 \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]} + 0.4 \cdot b \cdot$$

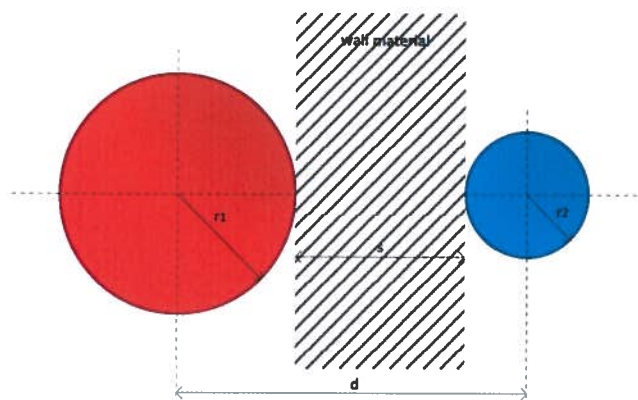
$$\ln \frac{2 \cdot a}{r_2 \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]} \quad [\mu\text{H/m}]$$

vlna	proud (kA)	M_{12} (μH)				L_2 (μH)	L_1 (μH)
		vzduch	beton	PVC	PE		
10/350 μs	200	1.066	1.023	0.970	0.968	3.512	1.116
	150	1.045	1.010	0.970	0.968	3.512	1.095
	100	1.023	1.158	0.969	0.968	3.512	1.072
0.25/100 μs	50	1.066	1.023	0.970	0.968	3.512	1.116
	37.5	1.045	1.010	0.970	0.968	3.512	1.095
	25	1.023	1.158	0.969	0.968	3.512	1.072
1/200 μs	100	1.066	1.023	0.970	0.968	3.512	1.116
	75	1.045	1.010	0.970	0.968	3.512	1.095
	50	1.023	1.158	0.969	0.968	3.512	1.072

Tabulka 6 – Výpočet indukčnosti

9.1.2 Výpočet kapacity mezi instalační smyčkou a vnitřní instalací

Celkovou situaci popisuje (obr. 29).



Obrázek 29 – Řez situace pro výpočet kapacit

Výpočet kapacity (tab. 7)

$$s_1 = \frac{d^2 + r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot d} \quad s_2 = \frac{d^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot d} \quad d = s_1 + s_2$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r}{\ln \left(\frac{\left(\frac{d^2 + r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot d} + \sqrt{\left(\frac{d^2 + r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot d} \right)^2 - r_1^2} \right) \cdot \left(\frac{d^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot d} + \sqrt{\left(\frac{d^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot d} \right)^2 - r_2^2} \right)}{r_1 \cdot r_2} \right)}$$

C [F/m]	vlna	proud (kA)	vzduch $\epsilon_r=1$	beton $\epsilon_r=4.5$	PVC $\epsilon_r=3.5$	PE $\epsilon_r=2.4$
	10/350 μs	200	6.215E-12	2.427E-11	5.393E-11	5.943E-11
		150	6.629E-12	2.569E-11	6.105E-11	7.741E-11
		100	4.585E-12	2.797E-11	7.411E-11	1.796E-10
	0.25/100 μs	50	6.215E-12	2.427E-11	5.393E-11	5.943E-11
		37.5	6.629E-12	2.569E-11	6.105E-11	7.741E-11
		25	4.585E-12	2.797E-11	7.411E-11	1.796E-10
	1/200 μs	100	6.215E-12	2.427E-11	5.393E-11	5.943E-11
		75	6.629E-12	2.569E-11	6.105E-11	7.741E-11
		50	4.585E-12	2.797E-11	7.411E-11	1.796E-10

Tabulka 7 – Výpočet parazitních kapacit

Tvar vlny	Proud [kA]	k_i [-]	Dostatečná vzdálenost s [m]			
			$k_m = 1/0.5/20/60$			
			Vzduch	Stavební materiál	PVC	PE
10/350 μ s	200	0.08	0.16	0.32	0.008	0.003
	150	0.06	0.12	0.24	0.006	0.002
	100	0.04	0.8	0.16	0.004	0.001
0.25/100 μ s	50	0.08	0.16	0.32	0.008	0.003
	37.5	0.06	0.12	0.24	0.006	0.002
	25	0.04	0.8	0.16	0.004	0.001
1/200 μ s	100	0.08	0.16	0.32	0.008	0.003
	75	0.06	0.12	0.24	0.006	0.002
	50	0.04	0.8	0.16	0.004	0.001

Tabulka 8 – Dostatečná vzdálenost jako funkce stavebního materiálu

Ve všech uvedených standardech je definován koeficient vlivu materiálu pro vzduch $k_m = 1$ a pro stavební materiály (beton, cihla, dřevo...) $k_m = 0,5$, ve slovenské národní normě STN 34 1398 (2013) je přidán koeficient vlivu materiálu pro PVC $k_m = 20$ a PE $k_m = 60$. Všechny uvedené standardy jsou pro případ jednoho svodu shodné, v případě více svodů se vzájemně liší v uváděné hodnotě koeficientu k_c . (tab. 9). V našem případě byl uvažován jeden svod

k_c	počet svodů	IEC 62305 STN 34 1398	NF C 17-102
	1	1	1
	2	0.66	0.75
	3	0.44	0.60
	>4	0.44	0.41

Tabulka 9 – Koeficient K_c dle jednotlivých technických norem

9.1.3 Výpočet dostatečné vzdálenosti z normy IEC 62305¹⁰¹

Platí:

$$s = \frac{k_i}{k_m} k_c l \quad [\text{m}],$$

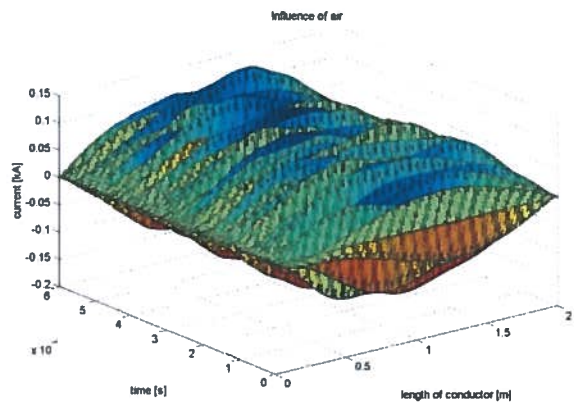
Kde:

- k_i záleží na volbě LPS
- k_m záleží na izolačním materiálu
- k_c záleží na počtu svodů
- l vzdálenost svodu

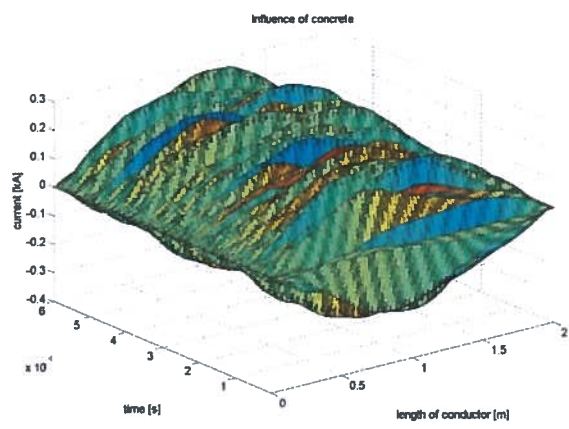
9.2 Namodelované grafické výsledky

Pro všechny vlny 10/350 μs , 0,25/100 μs a 1/200 μs byly odzkoušeny modely pro zvolené izolační materiály – vzduch, beton, PE a PVC. Dle uvedených standardů byl posuzován koeficient vlivu materiálu, který je nastavený pro vzduch na 1 a pro ostatní stavební materiály na 0.5, pro PE a PVC – 20 a 60 (STN 34 1398). Byl sledován indukovaný proud v instalační smyčce. Za předpokladu platnosti uvedených norem, by měl vzduch mít nejhorší vlastnosti (největší amplitudy indukovaných proudů) a pro ostatní materiály by měly být buďto srovnatelné, nebo nižší. Z modelu je však patrný pravý opak.

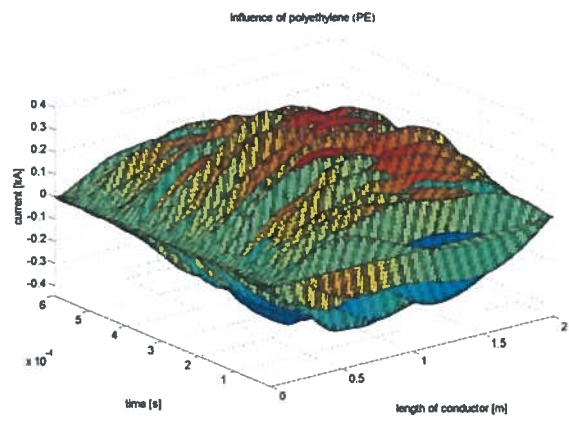
¹⁰¹ Detailní rozbor viz např. KUTÁČ, J., ROUS, Z., HLADNÝ, Z. Hromosvody a zemniče. 2. přeprac. vyd. Praha: IN-EL, 2008. Elektro. Dílenská příručka, sv. 17. ISBN 978-80-86230-45-0.



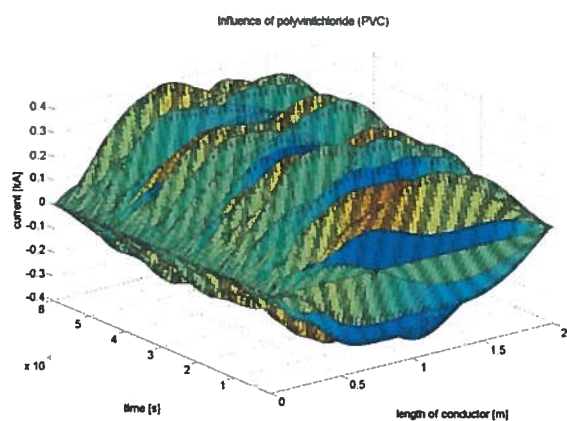
a)



b)

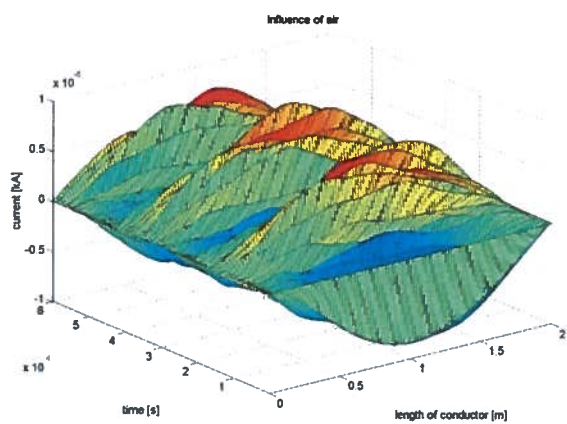


c)

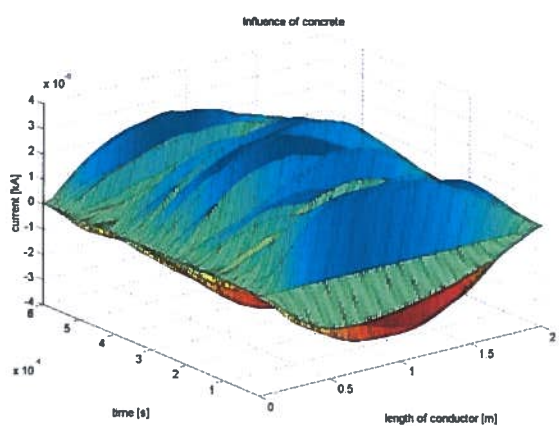


d)

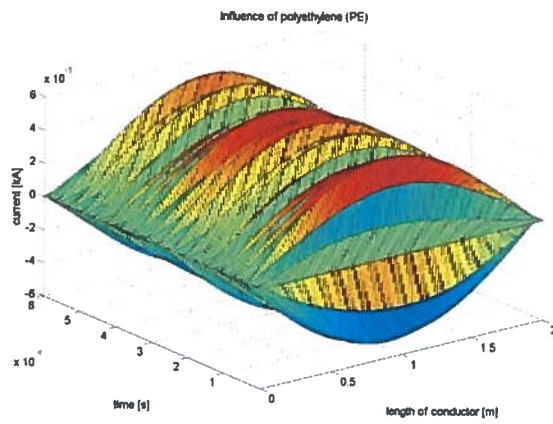
Obrázek 30 – Velikost indukovaného proudu (a – vzduch, b – beton, c – PE, d – PVC) ve smyčce při aplikaci impulsu 0,25/100 μ s a $I_1=50$ kA



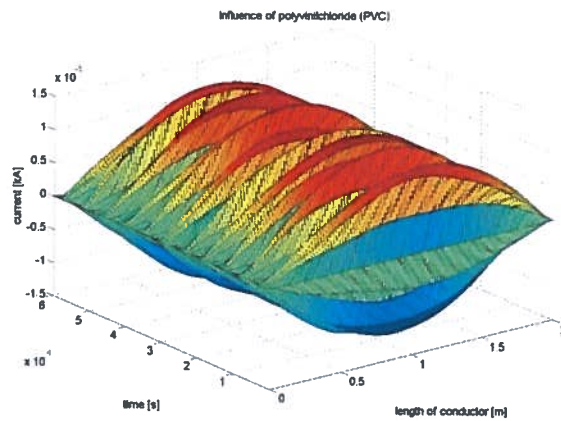
a)



b)

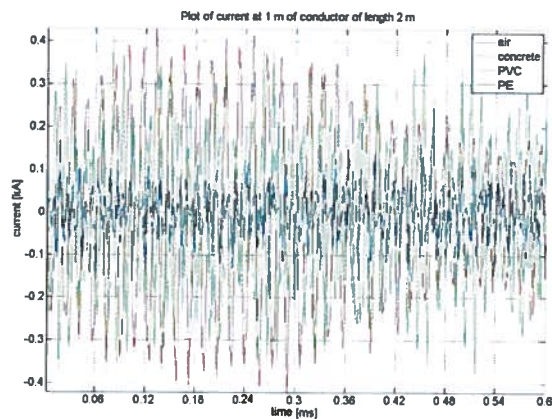


c)

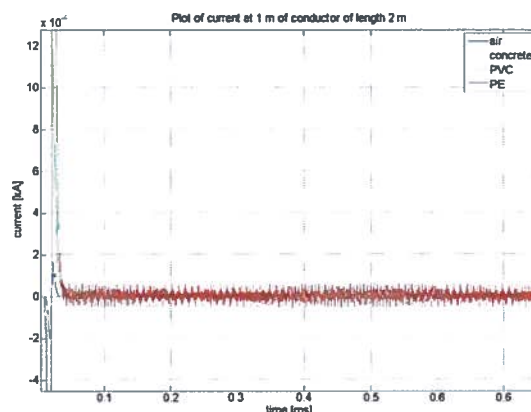


d)

Obrázek 31 – Velikost indukovaného proudu (a – vzduch, b – beton, c – PE, d – PVC) ve smyčce při aplikaci impulzu $1/200 \mu\text{s}$ and $I_1=50 \text{ kA}$



Obrázek 32 – Řez indukovanými proudy v 1 m svodu o celkové délce 2 m – pro vzduch, beton, PVC a PE při aplikaci impulzu $0,25/100 \mu\text{s}$ and $I_1=50 \text{ kA}$



Obrázek 33 – Řez indukovanými proudy v 1 m svodu o celkové délce 2 m – pro vzduch, beton, PVC a PE při aplikaci impulzu 1/200 μ s and $I_1=50$ kA

9.3 Dílčí zhodnocení

Výše jsem uvedl dva možné postupy výpočtu dostatečné vzdálenosti, a to: pomocí empirických vztahů a za použití matematického modelování.

V závislosti na ověření dostatečné vzdálenosti podle norem IEC 62305¹⁰² matematickým modelováním jsem se zabýval vlivy materiálů stěn reálných objektů na velikost indukovaného proudu do vnitřních instalací objektů. Hlavním mým studijním zájmem v disertační práci bylo využití tohoto modelu a jeho implementace do komplexních reálných objektů. Model byl numericky řešen v prostředí software Matlab a zajišťuje širokou variabilitu a stabilitu koeficientů determinujících reálný objekt. Objektivně zhodnotitelné výsledky vyvolaly podněty, které vedly ke zrušení slovenské technické normy STN 34 1398 (1. 3. 2017).

¹⁰² IEC 62305-1 (EN 62305-1):2010-12 Protection against lightning Part 1: General principles IEC 62305-2 (EN 62305-2):2010-12 Protection against lightning Part 2: Risk management IEC 62305-3 (EN 62305-3):2010-12 Protection against lightning Part 3: Physical damage to structures and life hazard IEC 62305-4 (EN 62305-4):2010-12 Protection against lightning Part 4: Electrical and electronic systems within structures.

10 Experimentální část disertační práce

V rámci následné části jsem testoval možnost použití komerčního programu ATP-EMTP a porovnával s reálným měřením provedeným ve specializované laboratoři.

10.1 Vlastní modelování účinků bleskového proudu

Pro validaci namodelovaných výsledků jsem provedl v Laboratoři vysokých napětí VUT v Brně měření, které se sestávalo ze série testovaných vzorků v pořadí:

- A) testování indukovaného napětí do vodiče uloženého pod izolačními vrstvami používanými u dřevostaveb
- B) testování elektrické průraznosti izolačního materiálu vůči vnitřní instalaci za pomoci atmosférického impulzu

Detailní uspořádání je patrné z následujících obrázků.

Ad A)

Testovány byly tyto kombinace:

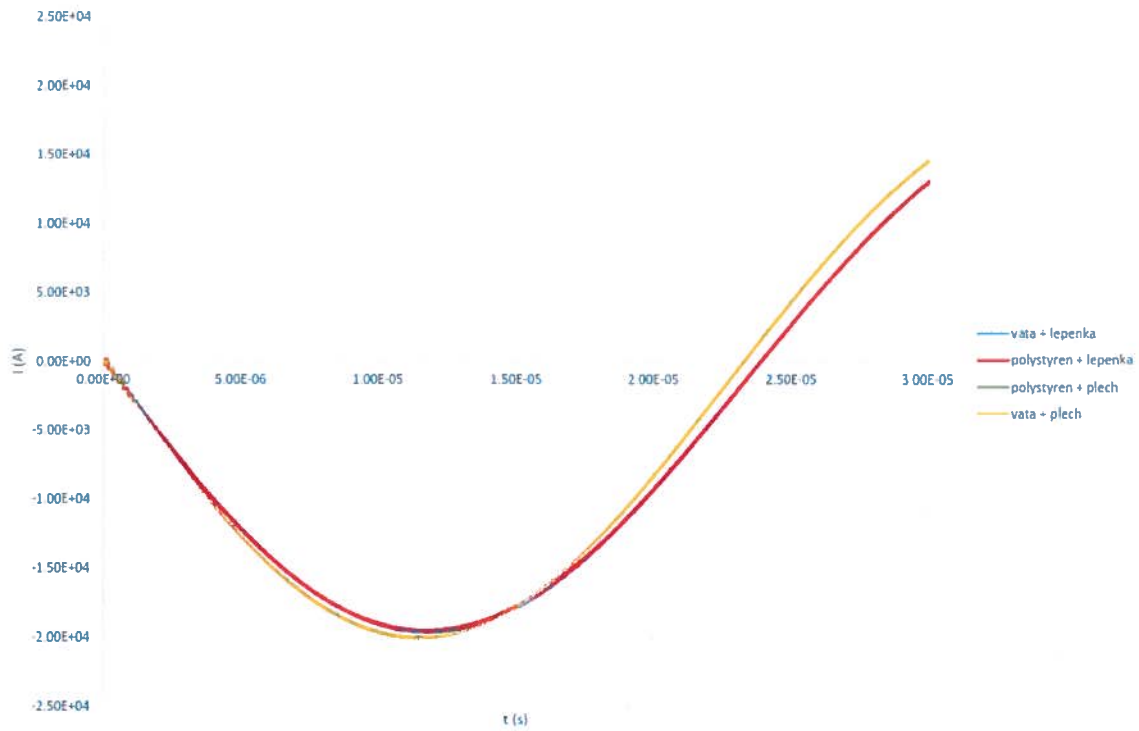
- 1) asfaltová lepenka simulující střechu a vrstva tvrzeného polystyrenu
- 2) pozinkovaný lakovaný plech simulující střechu a vrstva tvrzeného polystyrenu
- 3) asfaltová lepenka simulující střechu a vrstva skelné vaty
- 4) pozinkovaný lakovaný plech simulující střechu a vrstva skelné vaty

Ad B)

Testovány byly tyto kombinace:

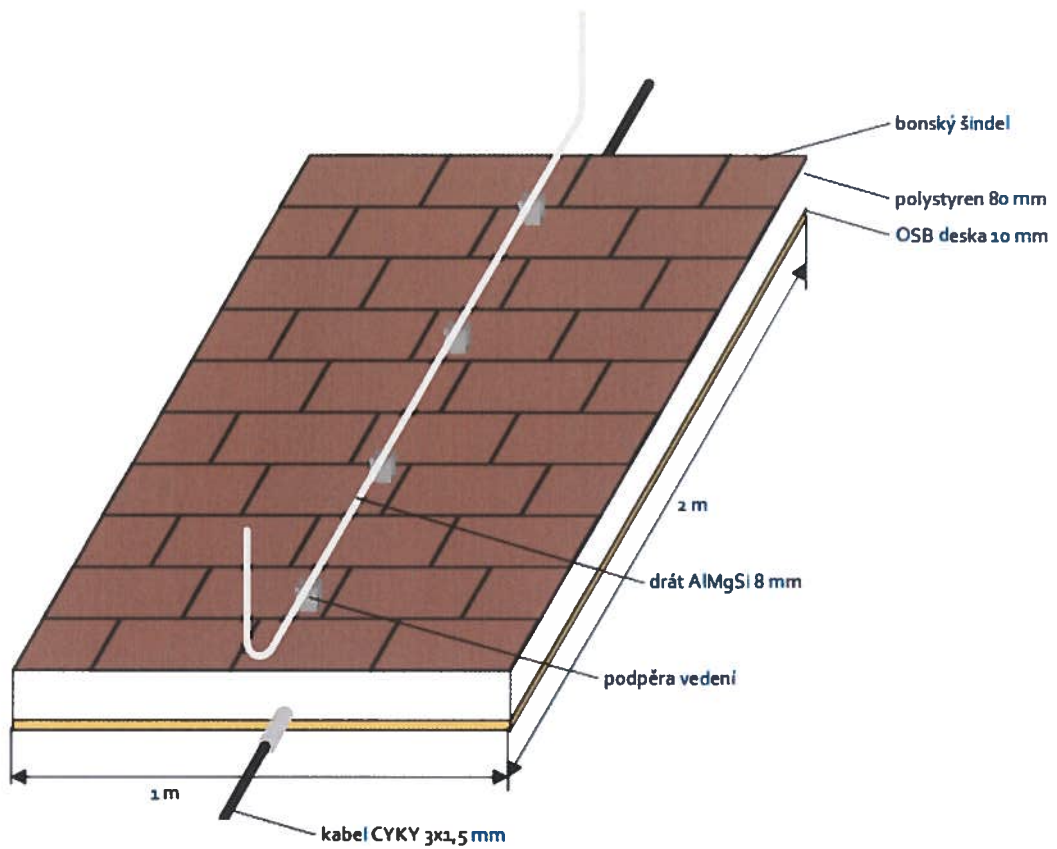
- 1) asfaltová lepenka simulující střechu a vrstva tvrzeného polystyrenu
- 2) pozinkovaný lakovaný plech simulující střechu a vrstva tvrzeného polystyrenu
- 3) asfaltová lepenka simulující střechu a vrstva skelné vaty
- 4) pozinkovaný lakovaný plech simulující střechu a vrstva skelné vaty

U těchto kombinací jsem zkoušel ještě vliv sádkartonářských CDW profilů na velikost průrazného napětí.

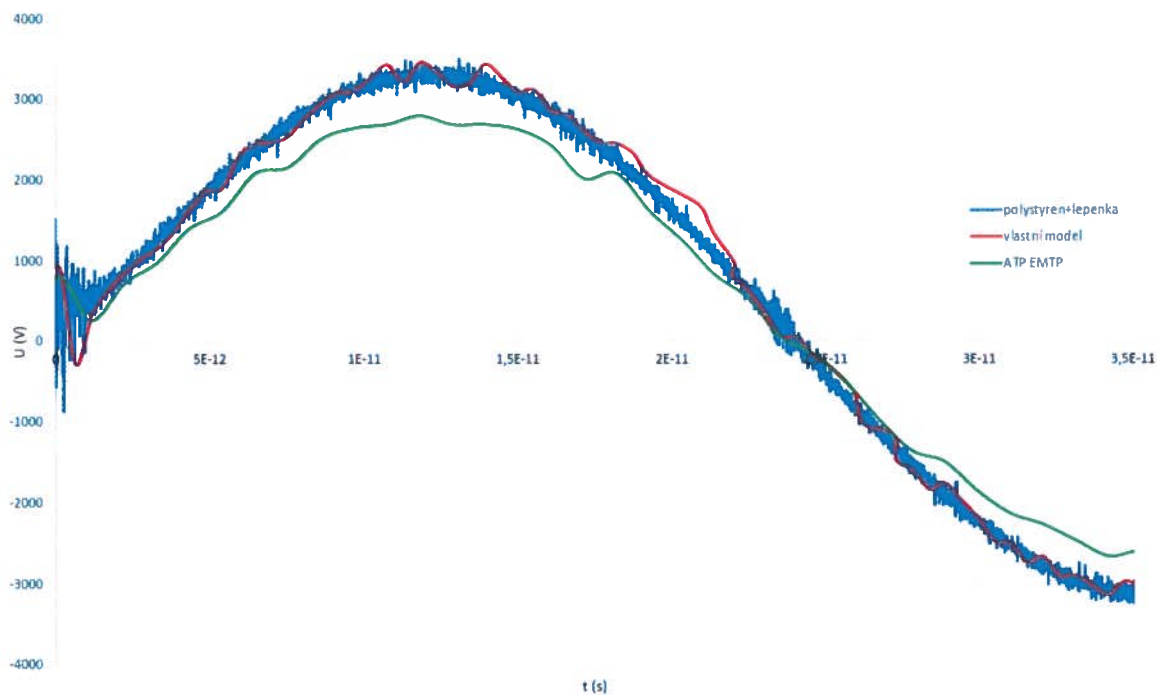


Obrázek 34 – Průběhy použitých impulzů proudové vlny 8/20 μ s

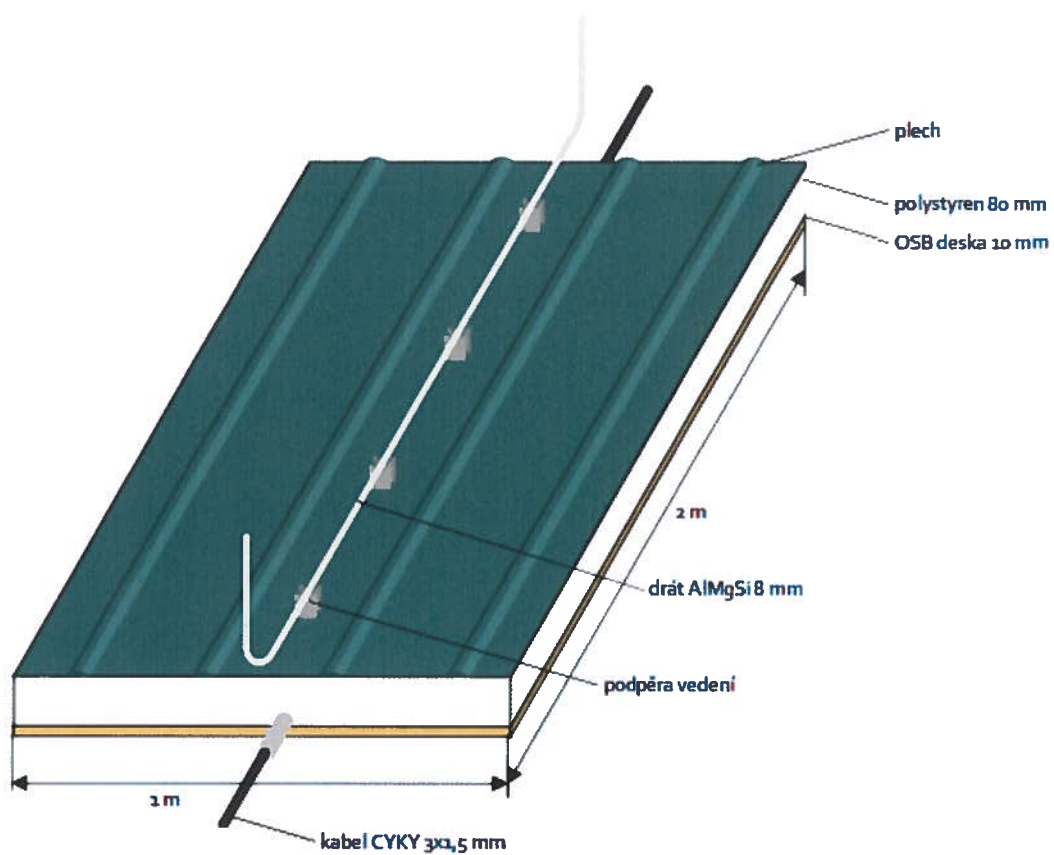
Testování jsem prováděl z impulzního generátoru Haefely 20 kA zápornou vlnou 8/20 μ s přivedenou přímo na zemnicí drát AlMgSi 8 mm (obr. 34), který byl dále veden do zkratu. Na děliči Haefely jsem potom snímal velikost indukovaného napětí v simulaci vnitřní instalace – vodič CYKY 3x1.5 mm²



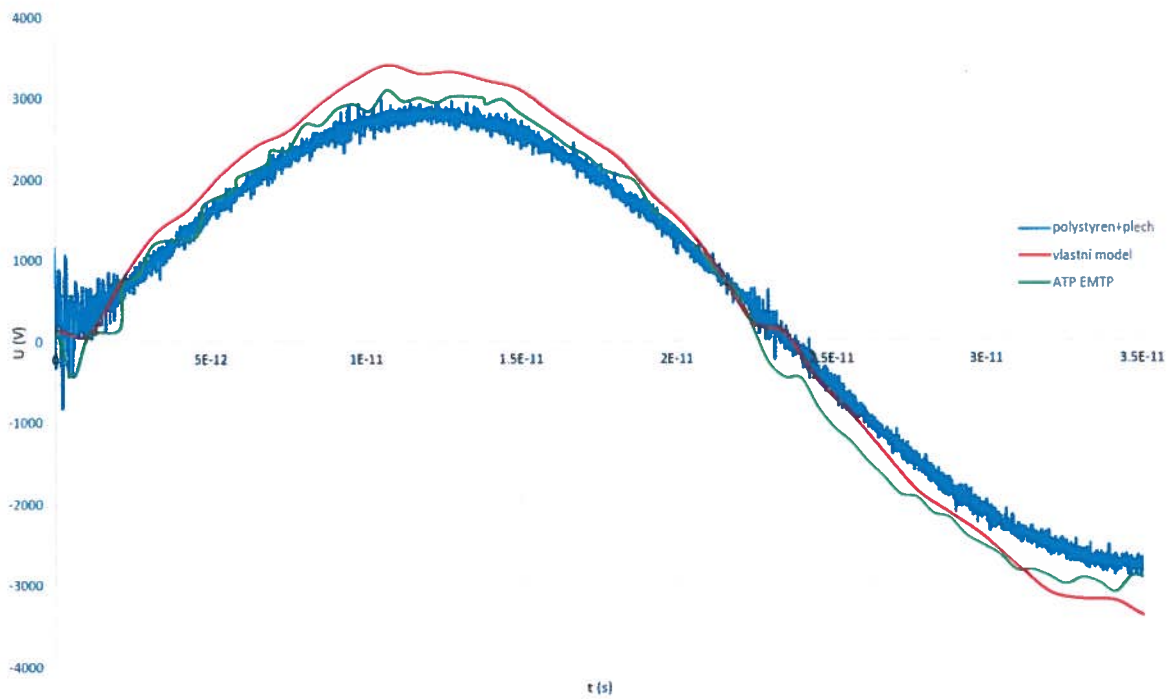
Obrázek 35 – Měřicí uspořádání – bonský šindel (lepenka) a polystyren



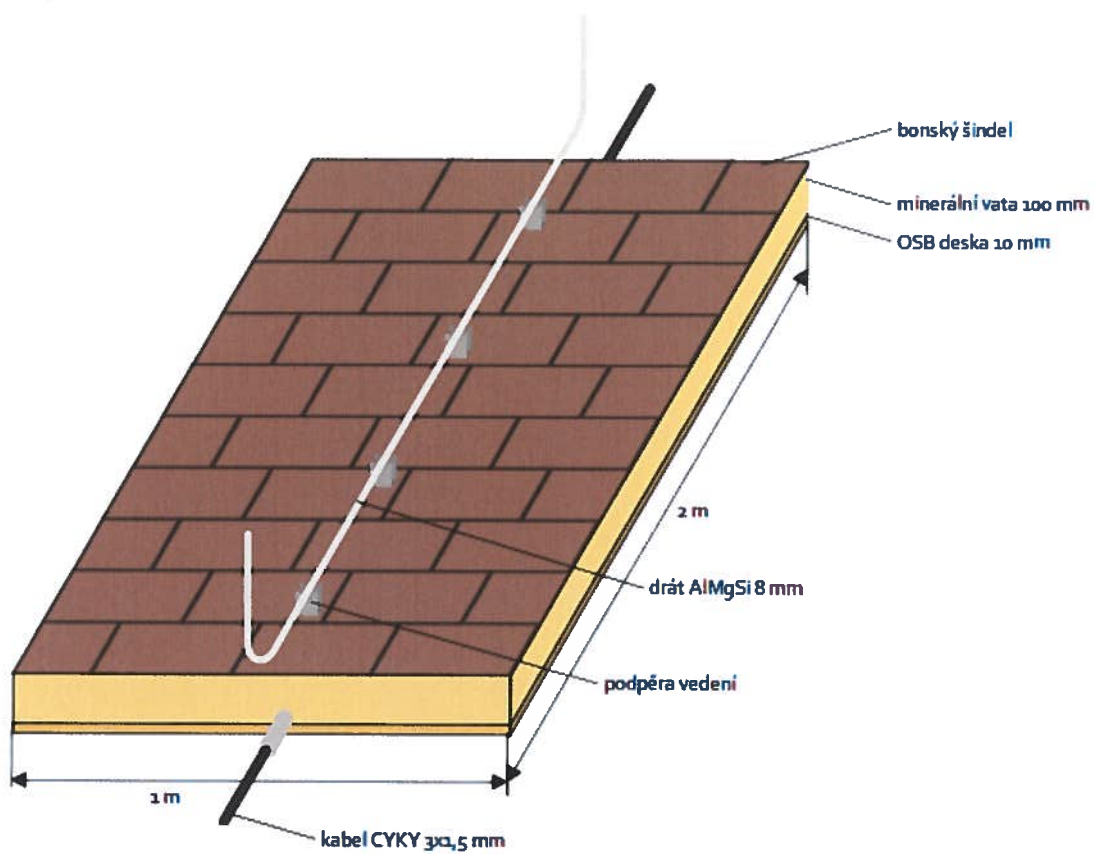
Obrázek 36 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – bonský šindel (lepenka) a polystyren



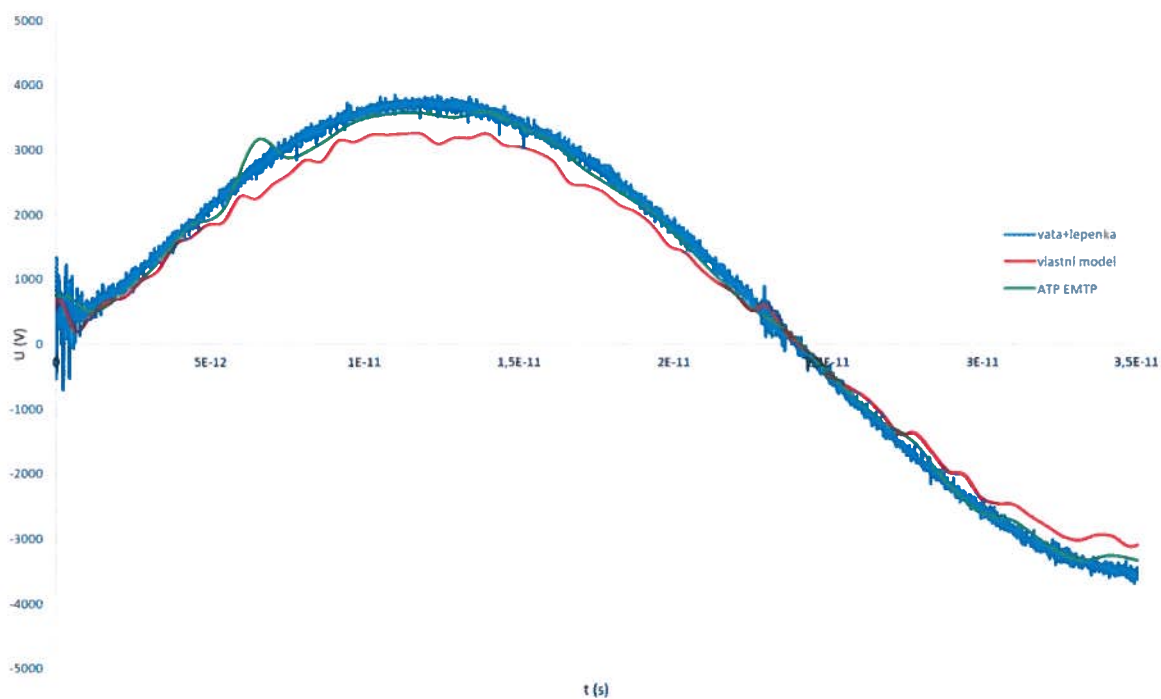
Obrázek 37 – Měřicí uspořádání – plech a polystyren



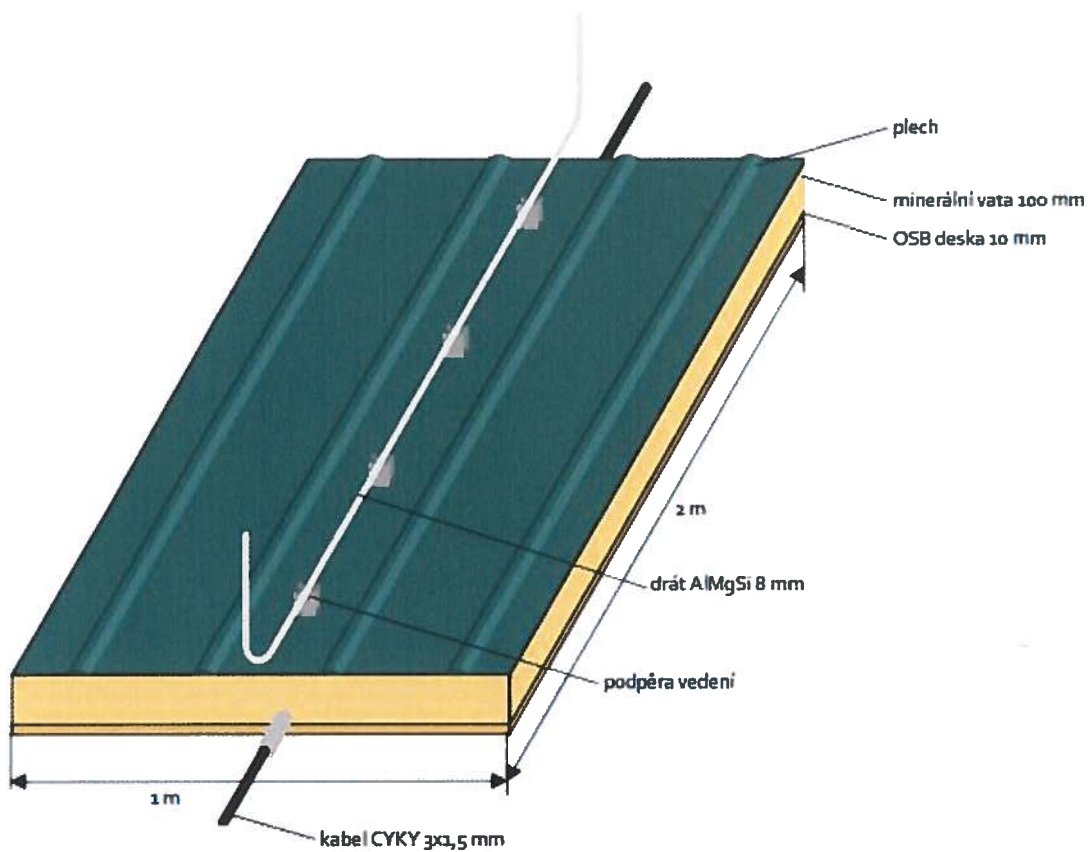
Obrázek 38 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – plech a polystyren



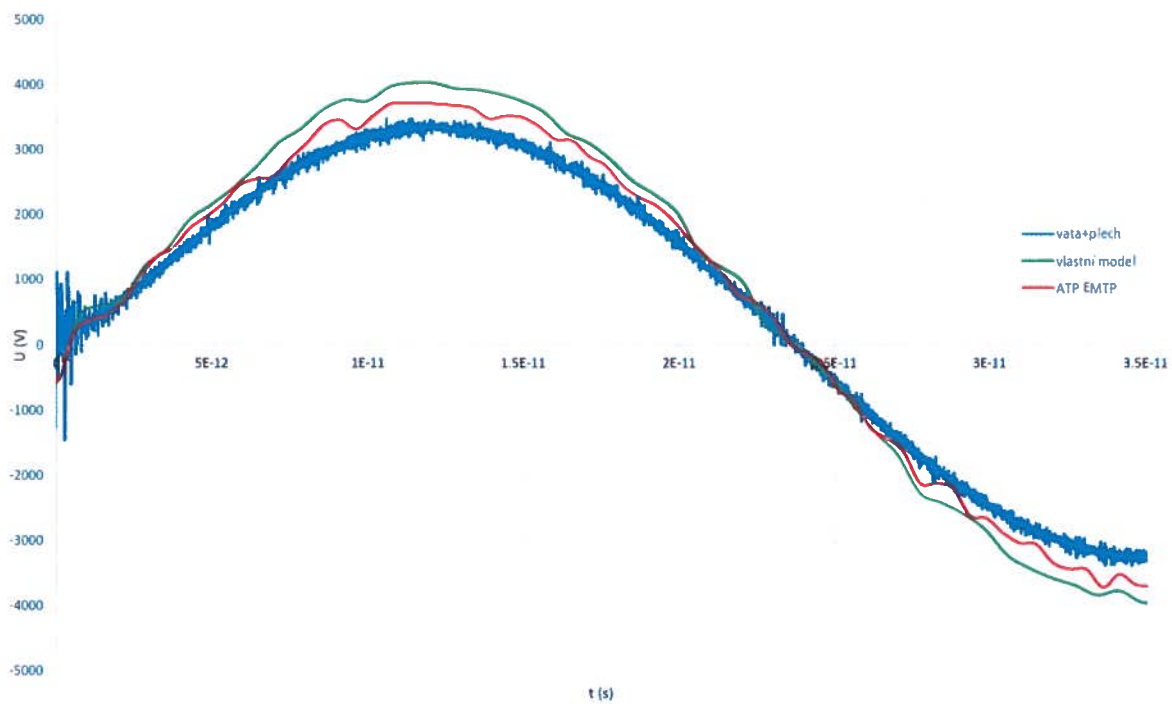
Obrázek 39 – Měřicí uspořádání – banský šindel (lepenka) a minerální vata



Obrázek 40 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – bonský šindel (lepenka) a minerální vata



Obrázek 41 – Měřicí uspořádání – plech a minerální vata



Obrázek 42 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – plech a minerální vata

10.2 Zhodnocení

Na základě výše popsaného experimentu jsem porovnával tři možné metody zjištění indukovaného napětí prostřednictvím kapacitních a induktivních vazeb do vnitřní instalace (simulováno svodem AlMgSi 8 mm a vodičem CYKY 3x1.5 mm²) za pomoci a) reálného měření, b) modelu v programu ATP EMTP a c) pomocí vlastní navržené numerické metody pro řešení telegrafních rovnic.

Závěrem lze konstatovat, že všechny metody jsou použitelné, ale mají silná omezení. Největším problémem je správné určení velikosti parazitních kapacit a induktivních vazeb, které není jednoduché, vzhledem k jejich malé velikosti, přesně determinovat – výpočetní metody neakceptují většinou nehomogenity, které při reálném měření nastávají. Při samotném měření je potom potřeba se vyrovnat s prací s reálnými objekty, které musí mít z důvodu eliminace parazitních přeskoků větší rozměry a jejich uložení nemusí být zcela planparalelní (většina modelů však předpokládá absolutně konstantní podmínky). Často je také významným problémem samotné nastavení impulzního generátoru a jeho zatížení kapacitní vazbou. Většinou nelze dosáhnout naprosto přesného teoretického impulzu, v našem případě 8/20 μ s.

V případě vlastního modelu bylo výhodou, že jsem mohl vzájemně matematicky i numericky spojovat jednotlivé bloky odpovídající příslušným kapacitním, resp. induktivním vlivům k sobě a mohl lépe ovlivňovat počáteční a okrajové podmínky řešené úlohy. V případě komerčního softwaru bylo vstupní zadání jednodušší, avšak optimalizace výsledku v závislosti na kroku, počtu zobrazených bodů, času výpočtu, omezeně ovlivnitelná.

Větší shody jsem dosáhl u polystyrenu, a to především pro jeho lepší plošné homogenní vlastnosti. U minerální vaty je vysoké nebezpečí porézních vzduchových kapes, které nejenom že působí na celkovou elektrickou pevnost uspořádání, ale také přímo ovlivňují vazební kapacitu mezi svodem a jímačem. V případě plechové střechy byly výsledky ovlivněny i samotným vlivem kovového materiálu, a to na rozvoj klouzavých výbojů. Ty žádný z uvedených modelů dosud nepředpokládá.

Závěrem se domnívám, že vhodnějším nástrojem pro hlubší studium uvedených jevů je vlastní numerické řešení telegrafních rovnic, než komerčně dostupný software. Vlastní napsaný program umožňuje zobrazení výsledku po ose celého svodu, a to v kterékoliv jeho části. Dá se tak impulzní interakce bleskového proudu studovat nejenom v závislosti na čase, ale také poloze svodu. Tento fakt je především uplatnitelný u výškových staveb, kde se tak dá provést ekonomická optimalizace dostatečné vzdálenosti svodu od vnitřních instalací.

Uvedená problematika je vhodná pro detailní studium rozložení napěťových a proudových impulzů uvnitř svodů a napomáhá hlubšímu rozhodování při instalaci hromosvodní techniky ve složitých objektech. Uvedený soubor norem ČSN EN 62305 tuto problematiku studuje z velmi omezeného pohledu a nenabízí prakticky příliš prostor pro ekonomicko-technickou optimalizaci.

11 Resumé

Předložená disertační práce se zabývá otázkou působení bleskového výboje na vnitřní instalace v objektech. Zkoumá volbu vhodného matematického modelu, který je implementovatelný pro inženýrskou praxi. V úvodní části je popsán vývoj pojetí normotvorné ochrany před bleskem od rozvoje přírodních věd v 18. století, kdy Benjamin Franklin a Prokop Diviš v podstatě ve stejné době poloviny 18. století představili své bleskosvody (meteorologické stroje) a odborně popsali jejich činnost (Franklin, B., Collinson, P., *Experiments and observations on electricity*. Printed and sold by E. Cave, at St. John's Gate, 1751, Diviš, P., *Magia naturalis*, Tübingen 1765). V druhé polovině 18. století se začaly objevovat první předpisy pro ochranu před bleskem, ať už se jednalo o *Pravidla chování při blízké bouři* G. Ch. Lichtenberga, *Předpisy pro hromosvody* od J. A. H. Reimaruse nebo spisy dalších autorů. Tyto publikace - předchůdci norem - byly vydány hlavně za účelem ochrany kostelů, skladišť střelného prachu, pro slámové střechy, cestovní vozy a lodě. S příchodem 19. století začala i existence pojišťovacích ústavů, pojišťujících mimo jiné i proti požáru, vzniklém v důsledku úderu blesku. Díky tomu začalo rozšiřování systému ochrany před bleskem získávat na technickém i společenském významu od počátku 20. století.

Cílem disertační práce bylo vytvořit bázi řešení praktických příkladů ochrany osob i předmětů a objektů před přímými i nepřímými účinky bleskových proudů. Hlavním badatelským cílem bylo představení možných numerických způsobů řešení konkrétní praktické úlohy (vytvoření matematického modelu chráněného objektu), její ověření v laboratorních podmínkách a validace získaných údajů s matematickým (počítačovým) modelem. Vedlejšími cíli jsou především jednotlivé případové studie z oblasti ochrany dřevostaveb a alternativních staveb.

Dále charakterizují princip vzniku bleskového výboje od fyzikální fenomenologie až po extrakci použitelnou v inženýrské praxi. S ohledem na náročnost vzniklého modelu při akceptování většiny fyzikálních souvislostí bylo hledáno řešení, které je dostatečně přesné, robustní, počítačově zpracovatelné a přináší v praxi použitelné řešení. Byl tak vytvořen příspěvek k matematickému modelování interakce svodu bleskového výboje a vnitřní instalace s důrazem na alternativní prostředí (dřevostavby).

Přínosem pro praxi byl v roce 2006 vydaný mezinárodní soubor norem IEC 62 305, který shrnul dosavadní poznatky o účincích bleskových výbojů do praktických výstupů a dnes již doznal druhé edice a připravuje se třetí. Většina evropských států se tak řídí tímto standardem a v některých zemích se stal dokonce závazným. Důležitost a význam výzkumu v oblasti ochrany před bleskovým výbojem dokládá i nárůst počtu stran souboru norem z původní Československé normy 34 3190 – cca se sto stranami na současných cca 366 stran. Vzhledem k harmonizaci a nezávaznosti norem v ČR to není jediný materiál, který může být podkladem pro správný návrh, konstrukci nebo revizi ochranného systému.

Práce přináší z technického i ekonomického hlediska posouzení implementace vnitřní ochrany před bleskem. Kromě úvodní vývojové analýzy problému je podrobně studována problematika návrhu vnitřních ochranných systémů podle současně platných českých i zahraničních norem. V práci jsou specifikovány rozhodovací metody využívané při zvažování vnitřního ochranného systému, běžně používané v odborné literatuře, ale také vlastní rozhodovací metody, posuzující komplexnost celé stavby vnitřního ochranného systému.

Další část práce se věnuje konkrétnímu rozpracování empirických metod a matematických modelů pro realizaci ochrany, což je doloženo v tabulkách a grafech a rovnicích.

Nárůst zájmu o tuto důležitou problematiku nejenom v české, ale i zahraniční odborné společnosti dokládá i každé dva roky pořádaná mezinárodní symposia ICLP – *International Conference on Lightning Protection*, APL – *Asia Pacific International Conference on Lightning*, nebo ICOLSE – *International Conference on Lightning & Static Electricity*, která referují o zásadních problémech oboru.

Po základní odborné charakteristice souvislostí bleskových výbojů a vysvětlení uplatnění norem v českém prostředí jsem přistoupil k matematickému modelování.

Sestavil jsem na základě teoretického studia problematiky soubor numerických metod vhodných pro výpočet elektrických polí a použitelných především pro inženýrskou praxi. Z v práci popsaných variant jsem zvolil metodu telegrafních rovnic a její vhodnost jsem ověřoval za pomoci programu ATP–EMTP a reálného měření v Laboratoři vysokých napětí na VUT v Brně. Validita všech metod je silně závislá na vstupních parametrech, které jsou klíčovou osnovou očekávaného výsledku. U reálných měření je potom velmi důležité dodržení i zdánlivě banálních podmínek, které mohou silně ovlivnit výsledky (mezi ně patří například externí i interní rušení, klouzavé výboje, nedokonalá uzemnění a dodržení tvaru a parametrů vstupního impulsu). U idealizovaného matematického modelu je potřeba se soustředit na přesný vliv „parazitních“ vazeb (především kapacitní a induktivní). Výsledkem mé práce je tak program, pomocí kterého je možné vypočítávat indukovaná napětí, respektive proudy ve vnitřních instalacích. Pro složitější případy (souběhy instalací, komplikované rozvody) se však metoda stává nejenom výpočetně velmi náročnou, ale zároveň nepřináší dostatečně přesné výsledky.

Pomocí mé práce se podařilo prokázat, že souvislosti uváděné v technických normách, které jsou extrémně restruovány pouze na inženýrskou praxi, mohou přinášet zavádějící výsledky (viz vliv materiálů PE a PVC pro nastavení koeficientu dostatečné vzdálenosti ve slovenské národní normě STN 34 1398, která byla na základě mnoha interpelací i mých výsledků z modelů od 1. 3. 2017 zrušena).

11.1 Resume

This doctoral thesis deals with the effects of lightning discharge on indoor electrical installations in buildings. It focuses on the choice of a suitable mathematical model that could be implemented into the engineering practice. The initial part describes the evolution of the normative lightning protection concept since the major progress of natural sciences in the 18th century, when Benjamin Franklin and Prokop Diviš introduced, basically at the same time, their lightning conductors (“*machina meteorologica*”) and described their technical functioning (Franklin, B., Collinson, P., *Experiments and observations on electricity*. Printed and sold by E. Cave, at St. John's Gate, 1751, Diviš, P., *Magia naturalis*, Tübingen 1765). First written rules concerning lightning protection started to appear in the second half of 18th century, such as *Behaviour rules during a near thunderstorm* by G. Ch. Lichtenberg, *Rules for lightning conductors* by J. A. H. Reimarus and publications by other authors. These documents – predecessors of technical standards – were published mainly in order to ensure protection of churches, gunpowder warehouses, straw roofs, travelling carriages and ships. A lot of insurance companies were founded during the 19th century offering among others an insurance cover against fire caused by a lightning strike. Due to this fact, the technical and social importance of the lightning protection started to become more and more widespread during the 20th century.

The aim of this doctoral thesis was to create a base of practical solutions for protection of people and structures against direct and indirect effects of lightning currents. The main goal of the research was to present possible numerical ways how to solve a concrete practical task (to create a mathematical model for of the structure to be protected), its verification in laboratory conditions and the validation of the obtained data using a mathematical (computer) model. The secondary goals are mainly the individual case studies concerning the protection of wood and alternative structures.

Further, I characterised the principle of the lightning discharge creation from the physical phenomenology to the extraction that could be used in the engineering practice. With regard to the complexity of the model created while respecting most physical interrelations, the aim was to find a solution that would be sufficiently exact,

robust, would bring practical solutions and be processable by computers at the same time. This doctoral thesis contributes to mathematical modelling of interaction between lightning discharge conductor and the indoor installation with the emphasis on an alternative environment (wooden structures).

A great benefit for the practical application was the international set of standards IEC 62 305, published in 2006, that provided a practical summary of the existing knowledge regarding the effects of lightning discharge. Currently, already the 3rd edition is being prepared. Most European countries follow this standard, and in some of them, this standard has become binding. The importance of the research of lightning discharge protection could also be seen in the increased number of pages in the Czechoslovakian standard 34 3190 – while the standard contained approximately one hundred pages originally, today it is about 336. Having regard to the harmonisation and the non-binding nature of standards in the Czech Republic, the above standard is not the only document that may be used as the basis for a correct design, construction or revision of a protection system.

This doctoral thesis offers technical and economic assessment of the implementation of the indoor lightning protection. In addition to the initial evolutionary analysis of the problem, the thesis deals with the design of indoor protection systems according to the currently effective Czech and foreign standards in more detail, and includes specifications of decision methods used when considering the installation of an indoor protection system that are commonly referred to in professional literature but also own decision methods to assess the complexity of the whole construction of an indoor protection system.

Another part of the thesis focuses on the concrete elaboration of empiric methods and mathematical models for the implementation of the protection, supported by sheets, charts and equations.

The increased interest regarding this important topic in both the Czech and foreign professional public is only underlined by the international symposia ICLP – *International Conference on Lightning Protection*, APL – *Asia Pacific International*

Conference on Lightning, or ICOLSE – *International Conference on Lightning & Static Electricity*, that are held every 2 years and provide a platform for discussions about major topics in this field.

After the basic professional characteristic of the lightning discharge interrelations and the explanation of the use of standards in the Czech Republic, I have dealt with the topic of mathematical modelling.

Based on theoretical studies of the topic, I created a set of numerical methods that are suitable for the calculation of electric fields and applicable mainly for the engineering practice. From the options described in the thesis, I opted for the telegrapher's equations method and tested its suitability with the ATP–EMTP program and real measurements in the high-voltage laboratory at the Brno University of Technology (VUT Brno). The validity of all methods depends strongly on input parameters, being the key framework for the expected results. When performing real measurements, it is vital to observe even the seemingly unimportant conditions, as these too can take strong influence on the results (e.g. external and internal interference, gliding discharge, faulty earthing and keeping the form and parameters of the input impulse). When using an idealised mathematical model, it is necessary to concentrate on the exact influence of “parasitic” connections (mainly in regard to capacity and inductivity). The result of my work is a program that can be used to calculate induced voltages or, more specifically, the currents in indoor installations. However, this method becomes too demanding for calculations regarding more complex cases (parallel installations, complicated pipelines) and does not produce sufficiently exact results.

With my work, it was possible to prove that the interrelations stated in technical standards that are extremely oriented only towards the engineering practice may lead to incorrect results (see the impact of the PE and PVC materials for the setting of the separation distance in the Slovak national norm STN 34 1398 that have been cancelled after many interpellations and also based on my results from the models as of 1st March 2017).

11.2 Zusammenfassung

Das Thema der vorgelegten Dissertationsarbeit sind die Auswirkungen der Blitzentladung auf die inneren Installationen in Gebäuden. Die Arbeit beschäftigt sich mit der Wahl eines passenden und für die Ingenieurpraxis tauglichen mathematischen Modells. Im ersten Teil wird die Entwicklung des normbildenden Konzepts des Blitzschutzes seit dem rasanten Aufstieg der Naturwissenschaften im 18. Jahrhundert beschrieben, als Benjamin Franklin und Prokop Diviš praktisch zu derselben Zeit des 18. Jahrhunderts ihre Blitzableiter (Wettermaschinen) vorgestellt und ihre Funktion fachkundig beschrieben haben (Franklin, B., Collinson, P., *Experiments and observations on electricity*. Printed and sold by E. Cave, at St. John's Gate, 1751, Diviš, P., *Magia naturalis*, Tübingen 1765). In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts erschienen die ersten Blitzschutzvorschriften, seien es die *Verhaltensregel bei nahem Gewitter* von G. Ch. Lichtenberg, *Vorschriften für Blitzableiter* von J. A. H. Reimarus oder Werke von anderen Verfassern. Diese Publikationen – Vorläufer von Normen – wurden insbesondere zum Schutz von Kirchen, Schießpulverlagern, Strohdächern, Reisekutschen und Schiffe herausgegeben. Der Eintritt des 19. Jahrhunderts ist mit der Gründung vieler Versicherungsgesellschaften verbunden, die unter anderem auch Versicherungen für Brandschäden, die als Folge des Blitzeinschlags verursacht wurden, angeboten hatten. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts hat teilweise auch dadurch die Verbreitung des Blitzschutzes immer mehr an technischer und gesellschaftlicher Bedeutung gewonnen.

Das Ziel dieser Dissertationsarbeit war, eine Grundlage für die Lösungen praktischer Beispiele des Schutzes vor direkten sowie indirekten Auswirkungen des Blitzstroms für Personen und Gegenständen zu schaffen. Das Hauptziel der Forschungsarbeit war die Vorstellung von in Betracht kommenden numerischen Möglichkeiten, wie man eine konkrete praktische Aufgabe lösen kann (die Herstellung eines mathematischen Modells für das geschützte Objekt), ihre Überprüfung unter Laborbedingungen sowie die Validierung der gewonnenen Angaben mittels eines mathematischen (Computer-) Modells. Die Nebenziele bestanden insbesondere in den einzelnen Fallstudien bezüglich des Schutzes von Holzbauten und alternativen Bauten.

Ferner wird das Prinzip der Entstehung der Blitzentladung charakterisiert, beginnend mit der physikalischen Phänomenologie bis hin zu einer in der Ingenieurpraxis anwendbaren Extraktion. In Hinsicht auf die Komplexität des entstandenen Modells bei der Berücksichtigung der meisten physikalischen Zusammenhänge wurde nach einer Lösung gesucht, die ausreichend genau, robust und mit Computern bearbeitungsfähig wäre, sowie praktische Lösungen bringen würde. Es wurde somit ein Beitrag zur mathematischer Modellierung der Interaktion zwischen der Blitzentladung und der inneren Installation mit Akzent auf alternative Umgebung (Holzbauten) geleistet.

Ein großer Fortschritt für die praktische Anwendung war im Jahre 2006 die Herausgabe der internationalen Normenreihe IEC 62 305, die die bisherigen Kenntnisse über die Auswirkungen von Blitzentladungen in praktische Lösungen zusammengefasst hat. Zur Zeit wird bereits die dritte Edition vorbereitet. Die meisten europäischen Länder richten sich nach dieser Norm, die in einigen Staaten sogar verbindlich ist. Wie wichtig und bedeutend die Forschung im Bereich des Blitzschutzes ist, wird auch durch den Anstieg der Seitenzahl der Tschechoslowakischen Norm 34 3190 von den ursprünglichen ca. 100 auf die heutigen ca. 366 Seiten bewiesen. In Hinsicht auf die Harmonisierung und den unverbindlichen Charakter der Normen in der Tschechischen Republik ist die vorstehende Norm nicht das einzige Dokument, der die Grundlage für einen korrekten Entwurf, eine korrekte Konstruktion oder Revision des Schutzsystems sein kann.

Die Arbeit befasst sich mit der technischen und wirtschaftlichen Beurteilung der Implementierung des inneren Blitzschutzes. Neben der anfänglichen Entwicklungsanalyse des Themas wird eingehend die Problematik des Entwurfs der Schutzsysteme gemäß den aktuell gültigen tschechischen und ausländischen Normen untersucht. In der Arbeit werden sowohl die in der Fachliteratur genannten Entscheidungsmethoden, die bei der Erwägung des inneren Blitzschutzes angewendet werden, als auch die eigenen Entscheidungsmethoden spezifiziert, die die Komplexität des ganzen Aufbaus des inneren Blitzschutzes beurteilen.

Der weitere Teil der Arbeit widmet sich einer konkreten Ausarbeitung der empirischen Methoden und mathematischen Modelle zum Erreichen des Schutzes, was in den Tabellen, Grafiken und Gleichungen dargestellt wird.

Das gestiegene Interesse an dieser wichtigen Problematik sowohl in den tschechischen, als auch den ausländischen Fachkreisen wird auch durch die internationale Symposien ICLP – *International Conference on Lightning Protection*, APL – *Asia Pacific International Conference on Lightning*, oder ICOLSE – *International Conference on Lightning & Static Electricity*, bewiesen, die alle 2 Jahre stattfinden und auf denen die wesentlichen Themen der Branche besprochen werden.

Nach der elementaren fachlichen Charakteristik der Zusammenhänge bezüglich der Blitzentladungen und der Erklärung der Anwendung der Normen in der Tschechischen Republik bin ich zu der mathematischen Modellierung übergegangen.

Aufgrund der theoretischen Forschung der Problematik habe ich ein Set von numerischen Methoden vorbereitet, die zur Berechnung der elektrischen Felder sowie für die Anwendung in der Ingenieurpraxis geeignet sind. Aus den in der Arbeit beschriebenen Varianten habe ich mich für die Methode der Telegraphengleichungen entschieden und ihre Eignung mittels des Programms ATP–EMTP sowie der realen Messungen im Hochspannungslabor an der Technischen Universität in Brunn (VUT Brno) überprüft. Die Validität sämtlicher Methoden ist von den Eingangsparametern stark abhängig, die den Rahmen der erwarteten Ergebnisse darstellen. Bei den realen Messungen ist es sehr wichtig, auch scheinbar unwichtige Bedingungen einzuhalten, die einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse nehmen können (wie etwa die externe und interne Störung, Gleitentladungen, fehlerhafte Erdung sowie die Einhaltung der Form und der Parameter des Eingangsimpulses). Bei einem idealisierten mathematischen Modell ist es erforderlich, sich auf den genauen Einfluss der „parasitären“ Verbindungen zu konzentrieren (insbesondere im Hinblick auf die Kapazität und Induktion). Das Ergebnis meiner Arbeit ist ein Programm zur Berechnung von induzierten Spannungen bzw. Ströme in inneren Installationen. Bei komplizierteren Fällen (parallele Installationen, komplizierte Leitungen) wird die

Berechnung mit dieser Methode sehr anspruchsvoll, wobei sie gleichzeitig keine ausreichend exakten Ergebnissen produziert.

Mithilfe meiner Arbeit konnte bewiesen werden, dass die in den technischen Normen aufgeführte Zusammenhängen, die sich lediglich auf die Ingenieurpraxis extrem orientieren, irreführende Ergebnisse zur Folge haben können (siehe den Einfluss der Materialien PE und PVC für die Festlegung des Trennungsabstands in der slowakischen nationalen Norm STN 34 1398, die aufgrund von vielen Interpellationen sowie meinen Ergebnissen aus den Modellen zum 01.03.2017 aufgehoben wurde).

12 Výběr z referenční literatury

12.1 Odborná literatura

BAATZ, H. "Radioaktive Isotope verbessern nicht den Blitzschutz," in *ETZ-A*, 1972.

BABA, Y., RAKOV, V. A. Electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies. Wiley: IEEE, 2016.

BABA, Y., RAKOV, V. A. "On the transmission line model for lightning return stroke representation," in *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, 2003, p. 2294. doi:10.1029/2003GL018407, 24.

BECERRA, M., COORAY, V., SOULA, S., CHAUZY, S. "Effect of the space charge layer created by corona at ground level on the inception of upward lightning leaders from tall towers," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 2007. doi: 10.1029/2006JD008308, D 12205.

BEDNÁŘ, J. Pozoruhodné jevy v atmosféře: atmosférická optika, akustika a elektřina. 1. vyd. Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2.

BERGER, K., ANDERSON, R.B., KRONINGER, H. "Parameters of lightning flashes," in *Electra*, vol. 41, 1975.

BROOK, M., KITAGAWA, N., WORKMAN, E. J. "Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, 1962, pp. 649–59.

BURANT, J. Blesk a přepětí: systémová řešení ochran. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.

CALIGARIS, C., DELFINO, F., PROCOPIO, R. "Cooray–Rubinstein Formula for the Evaluation of Lightning Radial Electric Fields: Derivation and Implementation in the

Time Domain," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 1, 2008, pp. 194–197. doi: 10.1109/TEMPC.2007.913226.

COORAY, V. (ed.). *Lightning protection*. London: IET, 2009.

COORAY, V., MONTANO, R., RAKOV, V. "A model to represent negative and positive lightning first strokes with connecting leaders," in *Journal of Electrostatics*, vol. 60, 2004, pp. 97–109.

DEFINO, F., PROCOPIO, R., ROSSI, M., RACHIDI, F., NUCCI, C. A. "An algorithm for the exact evaluation of the underground lightning electromagnetic fields," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, 2007, pp. 401–11.

DIENDORFER, G., UMAN, M. A. "An improved return stroke model with specified channel base current," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, 1990, pp. 13621–44.

EFMERTOVÁ, M. *Elektrotechnika v českých zemích a v Československu do poloviny 20. století: studie k vývoji elektrotechnických oborů*. 1. vyd. Praha: Libri, 1999, s. 96–101. ISBN 80-85983-99-0.

ERIKSSON, A. J. *The Lightning Ground Flash – an Engineering Study*. PhD Thesis. Faculty of Engineering, Pretoria, South Africa: University of Natal, 1979.

GOLDE, R. H. *Lightning*. London: Academia Press, 1977.

GOLDE, R. H. *Lightning Protection*. London: EA Publishers, 1973.

GOLDE, R. H. "The lightning conductor," in R. H. Golde (ed.). *Lightning*. Vol. 2: *Lightning Protection*. New York: Academic Press, 1977, pp. 545–576.

HAO, Y., MITTRA, R. *FDTD Modeling of Metamaterials: Theory and Applications*. London: Artech House, 2009.

HASMAN, T. Přepětí v elektroenergetických soustavách. Praha: ČVUT, 1997 a 2004.

HEIDLER, F., HOPF, C. "Measurement results of the electric fields in cloud-to-ground lightning in nearby Munich, Germany," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40. no.4, 1998, pp. 436–43.

HEIDLER, F., SVETIC, J. M., STANIC, B. V. "Calculation of lightning current parameters," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, 1997, pp. 399–404.

CHRZAN, K. "Untersuchungen an Early Streamer Emission-Fangstangen," in *Elektrotechnische Zeitschrift*, vol. 2, 2005.

INAN, U. S., MARSHALL, R. A. Numerical electromagnetics: the FDTD method. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

JOHNS, P. B., BEURLE, R. L. "Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix." in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, no. 9, 1971.

KITAGAWA, N., BROOK, M., WORKMAN, E. J. "Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 62, 1962, pp. 637–47.

KUNZ, K. S., LUEBBERS, R. J. The finite difference time domain method for electromagnetics. Boca Raton, USA: CRC Press, 1993.

KUTÁČ, J., ROUS, Z., HLADNÝ, Z. Hromosvody a zemniče. 2. přeprac. vyd. Praha: IN-EL, 2008. Elektro. Dílenská příručka, sv. 17, s. 47–64. ISBN 978-80-86230-45-0.

LEE, R. H. "Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice," in *IEEE. Trans. Ind. Appl.*, vol. 14, 1978, pp. 465–70

LEE, R. H. "Lightning protection of buildings," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-15(3), 1979, pp. 236–40.

LODGE, O. J. *Lightning Conductors and Lightning Guards*. London: Whittaker and Co., 1892.

LIVINGSTON, J. M., KRIDER, E. P. "Electric fields produced by Florida thunderstorms," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, C1, 1978, pp. 385–401.

MATTOS, M. A. F. "Grounding grids transient simulation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, 2005, pp. 1370–1378. doi: 10.1109/TPWRD.2004.839177.

MIKEŠ, J. *Vnější ochrana před bleskem – semestrální práce*. Praha: ČVUT, 2004.

MIKEŠ, J. *Vnější ochrana před účinky atmosférické elektřiny*. Diplomová práce, Praha: ČVUT, 2006.

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J. "Technická podstata hromosvodu," in *Elektroinstalatér*, č. 1. 2012, s. 47–49, ISSN 1211-2291.

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., EFMERTO VÁ, M., MARTÍNEK, Z. "Influence of the wall material of the lightning protected object size induced surges," in *ICLP 2014, Shanghai*, pp. 1724–1730, *IEEE 978-1-4799-3544-4/14/\$31.00*.

MILLER, E. K., POGGIO, A. J., and BURKE, G. J. "An integro-differential equation technique for the time domain analysis of thin wire structure: part I. The numerical method," in *Journal of Computational Physics*, vol. 12, 1973, pp 24–28.

NUCCI, C. A. "Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines," in *Electra*, vol. 161 and 162, 1995.

NUCCI, C. A., DIENDORFER, G., UMAN, M. A., RACHIDI, F., IANOZ, M., MAZZETTI, C. "Lightning return stroke current model with specified channel-base current: a review and comparison," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, 1990, pp. 20395–408.

RACHIDI, F., NUCCI, C. A., IANOZ, M., MAZZETTI, C. "Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, pp. 404–407.

RAKOV, V., UMAN, M. *Lightning, Physics and Effects*. New York : Cambridge Press, 2003. ISBN 0-521-58327-6.

RUEHLI, A. "Equivalent circuit models for three-dimensional multiconductor systems," in *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 22, 1974, pp 216–221.

RUEHLI, A. E., HEEB, H. "Circuit models for three-dimensional geometries including dielectrics," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 7, 1992, pp. 1507-1516. doi: 10.1109/22.146332.

SADIKU, M. N. O. "A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems," in *IEEE Transactions on Education*, vol. 32, no. 2, 1989, pp. 85–93. doi: 10.1109/13.28037.

SABA, M. M. F., BALLAROTTI, M. G., PINTO, O. Jr. "Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, 2006, D03101.

SHINDO, T., UMAN, M. A. "Continuing current in negative cloud-to-ground lightning," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, D4, 1989, pp. 5189–98.

SCHONLAND, B. F. J. "The lightning discharge," in *Handbuch der Physik*, vol. 22, Berlin: Springer- Verlag, 1956, pp. 576–628.

SCHWAIGER, A. *Der Schutzbereich von Blitzableitern*. Munich: R. Oldenbourg, 1938.

SMAJIC, J., HOLAUS, W., KOSTOVIC, J., RIECHERT, U. "3D Full-Maxwell Simulations of Very Fast Transients in GIS," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, 2011, pp. 1514–1517. doi: 10.1109/TMAG.2010.2090653.

SOULA S., CHAUZY, S. "Multilevel measurement of the electric field underneath a thundercloud 2. Dynamical evolution of a ground space charge layer," in *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, D12, pp. 22327–36.

SULLIVAN, D. M. *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, 1. Wiley-IEEE Press, 2000, 10.1109/9780470544518.

SUNDE, E. D. *Earth conduction effects in transmission systems*. New York: Van Nostrand, 1949.

SZEDENIK, N. "Rolling sphere – method or theory?," in *J. Electrostatics* vol. 51–52, 2001, pp. 345–50.

TAFLOVE, A. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Norwood, MA: Artech House, 1995.

TANABE, K. "Novel method for analyzing the transient behavior of grounding systems based on the finite-difference time-domain method," in *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, vol. 3, 2001, pp. 1128–1132. doi: 10.1109/PESW.2001.917230.

THANG, T. H., BABA, Y., NAGAOAKA, N., AMETANI, N., ITAMOTO, N., RAKOV, V. A. "FDTD Simulations of Corona Effect on Lightning-Induced Voltages," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 1, 2014, pp. 168–176. doi: 10.1109/TEM.2013.2278384.

THOMSON, E. M. "Characteristics of Port Moresby ground flashes," in *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, C2, 1980, pp. 1027–36.

UMAN, M. A., MCLAIN, D. K., KRIDER, E. P. "The electromagnetic radiation from a finite antenna," in *American Journal of Physics*, vol. 43, pp. 33–38.

VAN BARICUM, M., MILLER, E. K. TWDT – A computer program for time-domain analysis of thin-wire structures. UCRL-51-277, Livermore, USA: Lawrence Livermore Laboratory, 1972.

WANG, S., HE, J., ZHANG, B., ZENG, R., YU, Z. "A Time-Domain Multiport Model of Thin-Wire System for Lightning Transient Simulation," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, no. 1, 2010, pp. 128-135. doi: 10.1109/TEM.2009.2035815.

YEE, K. "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, 1966, pp. 302–307. doi: 10.1109/TAP.1966.1138693.

YU, W. Electromagnetic simulation techniques based on the FDTD method. Hoboken: N. J., Wiley, 2009.

YUDA, S., SAWAKI, S., BABA, Y., NAGAOKA, N., AMETANI, A. "Application of the TLM Method to Transient Simulations of a Conductor System With a Lossy Ground: Grounding Electrodes and an Overhead Wire," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 1, 2013, pp. 175–182. doi: 10.1109/TEM.2012.2205152.

YUTTHAGOWITH, P., AMETANI, A., NAGAOKA, N., BABA, Y. "Lightning-Induced Voltage Over Lossy Ground by a Hybrid Electromagnetic Circuit Model Method With Cooray–Rubinstein Formula," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 4, 2009, pp. 975–985. doi: 10.1109/TEM.2009.2029702.

12.2 Normy

ČSN EN 62305 Ochrana před bleskem. Druhá edice, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011–2013. Část 1: Obecné principy (09/2011), Část 2: Řízení rizika (02/2013), Část 3: Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života (01/2012), Část 4: Elektrické a elektronické systémy ve stavbách (09/2011).

IEC 62305-1 (EN 62305-1):2010-12 Protection against lightning, Part 1: General principles IEC 62305-2 (EN 62305-2):2010-12 Protection against lightning, Part 2: Risk management IEC 62305-3 (EN 62305-3):2010-12 Protection against lightning, Part 3: Physical damage to structures and life hazard IEC 62305-4 (EN 62305-4):2010-12 Protection against lightning, Part 4: Electrical and electronic systems within structures.

ČSN 34 1390 – Elektrotechnické předpisy ČSN. Předpisy pro ochranu před bleskem, platnost ukončena k 1. 2. 2009.

Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33, October 1991.

13 Soupis vlastních publikačních výstupů

13.1 Významné publikované a realizované práce v rámci Ph.D. studia

KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M. "Mimořádná událost v areálu bioplynové stanice v Malšicích, " in *Elektro*, č. 11/2011, s. 23–26, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Rodinný dům – bezpečné místo za bouřky?," in *II. seminář Unie soudních znalců, o. s.*, 2011, ISBN 978-80-260-1035-7.

KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M. "Mimořádná událost v areálu bioplynové stanice v Malšicích," in *II. seminář Unie soudních znalců, o. s.*, 2011, ISBN 978-80-260-1035-7.

KUTÁČ, J. "Novostavba hotelu „chráněna“ aktivním jímačem ESE v plamenech," in konference *Atmosférické výboje a protipožární ochrana budov*, Unie soudních znalců, o. s., 2012, ISBN 978-80-260-2296-1.

KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M. "Szkopożar na stacji biopaliw Malšice," in *Elektro.info.pl*, 2012, ISSN 1642-8722.

KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M. "Biogas plant explosion protected early streamer emission (ESE) air terminal," in *Lightning Safety Alliance*, <http://www.lightningsafetyalliance.com/>, News, 2012.

KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., ČERNOCH, D. "Novostavba hotelu „chráněna“ aktivním jímačem ESE v plamenech," in *Elektro*, č. 8–9/2012, s. 23–26, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J., ČERNOCH, D. "Ochrana před bleskem a přepětím pro průmyslové aplikace se zaměřením na měniče frekvence," in *Elektro*, č. 3/2012, s. 22–23, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Rozbor mimořádných událostí po úderech blesků v roce 2011 na území ČR," in *Elektro*, č. 3/2012, s. 2–5, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "DEHNventil – vlnolam bleskových proudů," in *Elektro*, č. 5/2012, s. 22–23, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Ochrana před bleskem pro rodinné domy v souladu s právními předpisy ČR," in *Elektroinstalatér*, č. 5/2011, s. 27–29. ISSN 1211-2291.

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J. "Technická podstata hromosvodu," in *Elektroinstalatér*, č. 1/2012, s. 47–49, ISSN 1211-2291.

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., PETRÁK, M. "Biogas Plant Explosion Protected Early Streamer Emission (ESE) Air Terminal," in *Elektro*, 2011, vol. 21, no. 11, pp. 23–26. ISSN 1210-0889 (in Czech and English).

KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., ČERNOCH, D. "A New Hotel "Protected" by Air-Termination System ESE Goes Up In Flames," in *Elektro*, 2012, vol. 22, no. 8–9, pp. 82–85. ISSN 1210-0889. (in Czech and English).

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., EFMERTO VÁ, M., SZEDNIK, N. et al. "The Impact of Active Conductors on Czech and Hungarian Lightning Protection Legislation," in *Acta Polytechnica (Journal of Advanced Engineering)*, 2013, vol. 53, no. 4, 9 pp. ISSN 1210-2709 (print), ISSN 1805-2363 (online).

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z. "Protection Against Lightning by Means of ESE Collector and its Influence on the Protection of an Historical Monument," in *All for Power*, 2013, vol. VII, no. 2, pp. 94–97. ISSN 1802-8535 (in Czech and English).

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J. "Overvoltage Protection Technical Fundamentals of Lightning Rod," in *Elektroinstalatér*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 47–49. ISSN 1211-2291 (in Czech).

KUTÁČ, J. "Národní příloha NA ČSN EN 62305-3 ed.," in *Elektro*, č. 8–9/2013, s. 2, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Světová novinka: svodič bleskových proudů DEHNvenCI včetně pojistek," in *Elektro*, č. 3/2013, s. 24–25, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Rozbor mimořádných událostí způsobených úderem blesků v roce 2012," in *IV. seminář Unie soudních znalců, o. s.*, 2012, ISBN 978-80-260-3382-0.

KUTÁČ, J. "Hmotné škody na stavbách a ohrožení života, včetně všech alternativních ochran," in *Elektro*, č. 8–9/2013, s. 2, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "HVI power a další novinky firmy Dehn + Söhne," in *Elektro*, č. 11/2013, s. 34–35, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Společné stanovisko úřadů o platnosti norem k ochraně před bleskem na stavbách," in *Ročenka Elektro*, 2014, č. 2–16/2014, s. 2–16, ISSN 1210-0889.

KUTÁČ, J. "Ochrana před bleskem a přepětím pro průmyslová zařízení," in *Elektro*, č. 3/2014, str. 24–26, ISSN 1210-0889.

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., EFMERTO VÁ, M., MARTÍNEK, Z. "Influence of the wall material of the lightning protected object size induced surges," in *ICLP 2014*, Shanghai, pp. 1724–1730, ©2014 IEEE 978-1-4799-3544-4/14/\$31.00.

MIKEŠ, J., EFMERTO VÁ, M., KUTÁČ, J. "The technical and economic assessment of the lightning rod symmetrization effect on overvoltage in narrow structures," in *Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, Nagoya, Japan 2015.

KUTÁČ, J. "Oprava versus rekonstrukce hromosvodu podle platné právní úpravy ČR," in *Elektro*, č. 2/2016, str. 63–65, ISSN 1210-0889.

MIKEŠ, J., EFMERTOVÁ, M., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z. "Disturbance caused by penetration surge in interior installations of buildings," in *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*, Toulouse, France, 2016.

KUTÁČ, J. "Ochrana před bleskem pro dřevostavby podle platné legislativy ČR," in *DŘEVO&stavby PROFIspeciál 2017*, s. 62.

13.2 Citace

CHRZAN, K. L. *Klasyczne piorunochrony Franklina i piorunochrony pseudoaktywne, Pryzmat*, nr 253/2012, s. 32–34, ISSN 1429-1673

<http://pryzmat.pwr.wroc.pl/pryzmat/2011-2012/pryzmat253.pdf>,

citace: **KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M.** "Mimořádná událost v areálu bioplynové stanice v Malšicích," in *Elektro*, č. 11/2011, s. 23–26, ISSN 1210-0889.

CHRZAN, K. L. *Klasyczne piorunochrony Franklina i piorunochrony pseudoaktywne, Energoelektronika.pl*, NIP: 521-008-36-44,

http://www.energoelektronika.pl/do/ShowNews?id=1685&spis_artykulow,Klasyczne%20piorunochrony%20Franklina%20i%20piorunochrony%20pseudoaktywne,Pryzmat, citace: **KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M.** "Mimořádná událost v areálu bioplynové stanice v Malšicích," in *Elektro*, č. 11/2011, s. 23–26, ISSN 1210-0889.

CHRZAN, K. L., BAZYLEAN, E. M. *Piorunochrony pseudoaktywne*, http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=6075 PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (*Electrical Review*), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 6/2012 s. 221–224, citace: **KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., PETRÁK, M.** "Mimořádná událost v areálu bioplynové stanice v Malšicích," in *Elektro*, č. 11/2011, s. 23–26, ISSN 1210-0889.

BAZYLEAN E. M., CHRZAN, K. L. *Active lightning terminals. Przegląd Elektrotechniczny*, 2012. ISSN 0033-209, citace: **MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., PETRÁK, M.** "Biogas Plant Explosion Protected Early Streamer Emission (ESE)

Air Terminal," in *Elektro*, 2011, vol. 21, no. 11, pp. 23–26. ISSN 1210-0889 (in Czech and English).

13.3 Konferenční příspěvky

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., EFMERTO VÁ, M., MARTÍNEK, Z. "Influence of the wall material of the lightning protected object size induced surges," in *ICLP 2014*, Shanghai, pp. 1724–1730, ©2014 IEEE 978-1-4799-3544-4/14/\$31.00.

MIKEŠ, J., EFMERTO VÁ, M., KUTÁČ, J. "The technical and economic assessment of the lightning rod symmetrization effect on overvoltage in narrow structures," in *Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, Nagoya, Japan 2015.

MIKEŠ, J., EFMERTO VÁ, M., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z. "Disturbance caused by penetration surge in interior installations of buildings," in *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*, Toulouse, France, 2016.

14 Soupisy

14.1 Obrázků

Obrázek 1 – Simpsonův model elektrické struktury bouřkového oblaku	17
Obrázek 2 – Typy jednotlivých atmosférických výbojů a): I – výboj uvnitř mraku, II – výboj vznikající v atmosféře, III – mezioblačný výboj. b): I – vyhledávací negativní výboj k zemi, II – vyhledávací pozitivní výboj k zemi, III – vstřícný pozitivní výboj, IV – vstřícný negativní výboj	20
Obrázek 3 – Rozvoj <i>vůdčího</i> výboje	21
Obrázek 4 – Rozvoj stupňovitého <i>vůdčího</i> výboje	21
Obrázek 5 – Rozvoj <i>zpětného (hlavního)</i> výboje přes <i>vůdčí</i> výboj	22
Obrázek 6 – Metoda zrcadlení ve studiu rozložení elektrického pole při působení nábojů kumulonimbu	25
Obrázek 7 – Měřené a statisticky průměrované průběhy zpětných výbojů vyjádřené v poměrných jednotkách: A) prvního zpětného výboje, B) následných zpětných výbojů	26
Obrázek 8 – a) Parametry proudového impulsu, b) Parametry dlouhé proudové vlny	37
Obrázek 9 – Typické příklady modelovaného sestupného bleskového výboje	38
Obrázek 10 – Typické příklady modelovaného vzestupného bleskového výboje	38
Obrázek 11 – Srovnání skutečného bleskového výboje a aproximovaného výboje vlnou 10/350 μ s	39

Obrázek 12 – Typický průběh negativního blesku - mrak – země	39
Obrázek 13 – Elektrická analogie zásahu blesku do vedení přes zemnicí lano	41
Obrázek 14 – Elektrotechnická představa o šíření indukovaného přepětí	43
Obrázek 15 – Příklad zjednodušené induktivní vazby mezi bleskovým kanálem a plochou obepnutou kolem objektu, do kterého se indukuje přepětí	44
Obrázek 16 – Běžný stav smyčky pro indukovaná přepětí u dvojice vedení	45
Obrázek 17 – Přehled jednotlivých zón ochrany.....	57
Obrázek 18 – Geometrie ochranného úhlu hromosvodu	61
Obrázek 19 – Ochranný prostor jímací tyče na nakloněném povrchu s použitím metody ochranného úhlu	61
Obrázek 20 – Kombinace ochranných pásem u výškově nestejných částí objektu ..	61
Obrázek 21 – Použití metody valivé koule u složitých objektů.....	62
Obrázek 22 – Vztah mezi vrcholovým úhlem a výškou jímáče nad zemí	65
Obrázek 23 – Polohy komponent elektrického a magnetického pole v uvažovaném elementu.....	71
Obrázek 24 – Příspěvek intenzity elektrického pole E_x^n v ose x na pozici $(i + \frac{1}{2}, j, k)$	72
Obrázek 25 – Příspěvek intenzity magnetického pole $H_x^{n+\frac{1}{2}}$ v ose x na pozici $(i, j +$ $+\frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})$	73
Obrázek 26 – Příspěvek radiální a vertikální komponenty E_r a E_z a H_ϕ	77
Obrázek 27 – Náhradní schéma pro odvození matematického modelu	81
Obrázek 28 – Celkový řez modelovanou situací.....	84
Obrázek 29 – Řez situace pro výpočet kapacit.....	86
Obrázek 30 – Velikost indukovaného proudu (a – vzduch, b – beton, c – PE, d – PVC) ve smyčce při aplikaci impulzu 0,25/100 μ s a $I_1=50$ kA.....	91
Obrázek 31 – Velikost indukovaného proudu (a – vzduch, b – beton, c – PE, d – PVC) ve smyčce při aplikaci impulzu 1/200 μ s and $I_1=50$ kA.....	92
Obrázek 32 – Řez indukovanými proudy v 1 m svodu o celkové délce 2 m – pro vzduch, beton, PVC a PE při aplikaci impulzu 0,25/100 μ s and $I_1=50$ kA.....	92
Obrázek 33 – Řez indukovanými proudy v 1 m svodu o celkové délce 2 m – pro vzduch, beton, PVC a PE při aplikaci impulzu 1/200 μ s and $I_1=50$ kA.....	93
Obrázek 34 – Průběhy použitých impulzů proudové vlny 8/20 μ s	95
Obrázek 35 – Měřicí uspořádání – bonský šindel (lepenka) a polystyren.....	96
Obrázek 36 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – bonský šindel (lepenka) a polystyren	97
Obrázek 37 – Měřicí uspořádání – plech a polystyren.....	98
Obrázek 38 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – plech a polystyren	99
Obrázek 39 – Měřicí uspořádání – bonský šindel (lepenka) a minerální vata.....	100
Obrázek 40 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – bonský šindel (lepenka) a minerální vata ...	101
Obrázek 41 – Měřicí uspořádání – plech a minerální vata	102
Obrázek 42 – Průběhy modelovaného a měřeného indukovaného napětí při proudové vlně 8/20 μ s v uspořádání – plech a minerální vata.....	103

14.2 Tabulek

Tabulka 1 – Tabulka vhodných konstant pro zobrazení průběhu bleskového proudu pomocí Heidlerovy funkce	29
Tabulka 2 – Tabulka výchozích parametrů bleskového výboje.....	35
Tabulka 3 – Přehled současně platných norem v ochraně před bleskem a přepětím54	
Tabulka 4 – Maximální hodnoty poloměru valcí se koule, velikosti ok přiřazené do třídy LPS.....	65
Tabulka 5 – Koeficienty analytické funkce proudu.....	85
Tabulka 6 – Výpočet indukčností.....	86
Tabulka 7 – Výpočet parazitních kapacit.....	87
Tabulka 8 – Dostatečná vzdálenost jako funkce stavebního materiálu	88
Tabulka 9 – Koeficient Kc dle jednotlivých technických norem.....	88