



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

**Ekonomické zhodnocení implementace ochrany
před atmosférickým přepětím**

**Economic evaluation of the implementation of protection
against atmospheric surge**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Jan Mikeš, Ph.D.

Ondřej Malý

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Malý Ondřej**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Ekonomické zhodnocení implementace ochrany před atmosférickým přepětím

Pokyny pro vypracování:

1. Charakterizujte ochrany před atmosférickým přepětím.
2. Navrhněte metodiku pro volbu ochrany.
3. Pro konkrétní objekt proveďte ekonomickou a statistickou analýzu vhodnosti ochran.

Seznam odborné literatury:

1. Rakov V.A.: Lightning: physics and effects. New York: Cambridge University Press, 2002.
2. Lightning: properties, formation and types [online]. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2011. Earth sciences in the 21st century [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/lib/natl/Doc?id=10661557>.
3. ČSN EN 62305-1-4. Ochrana před bleskem: Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
4. Řezáčová D.et al. Fyzika oblaků a srážek. Vyd. 1. Praha: Academia, 2007.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Mikeš, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Prof.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2016

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje princip systému ochrany před bleskem, přičemž největší pozornost je věnována ochraně před přepětím vznikajícím během atmosférického výboje. Samotná ochrana je analyzována jak po technické, tak po ekonomické stránce. Cílem této studie je poskytnout ucelený pohled na způsob ochrany před bleskem a jeho ekonomickou optimalizaci. V úvodní části se práce zabývá samotným bleskem, jeho parametry a škodami, které může napáchat. Druhá část je zaměřena na způsoby ochrany před bleskem a na princip jejich funkce. Následující část popisuje problematiku analýzy a řízení rizika a zabývá se rozhodnutím, v jakém rozsahu a zda vůbec je ochrana ekonomicky nejefektivnější. Poslední část je věnována řešení konkrétní situace, návrhu vnitřní ochrany a výpočtům efektivnosti pro transformaci objektu na kancelářskou budovu a její vybavení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Atmosférické přepětí, přepětíová ochrana, blesk, ochrana před bleskem, vnitřní systém ochrany, analýza rizik, efektivnost nákladů, čistá současná hodnota

ABSTRACT

This work describes the principle of the lightning protection system, while the most attention is given to the surge protection, which occurs during the atmospheric discharge. The protection itself is analyzed both technically and economically. The aim of this work is to provide a comprehensive view of the protection methods and its optimization. In the first chapter the thesis deals with the lightning itself, its parameters and caused damages. The second part is focused on methods of protection against atmospheric surge and their principle. The following chapter describes the issues of analysis and risk management and is engaged in the decision to what extent, if at all, it is necessary to install the protection to be economically the most effective. The last part is devoted to the solution of a concrete situation, protection design and efficiency calculations for offices and its equipment.

KEYWORDS

Atmospheric surge, surge protection, lightning, lightning protection, internal lightning protection, risk analysis, cost efficiency, Net Present Value

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Mikešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, cenný čas a návrhy, které mi poskytl při tvorbě práce. Dále děkuji prof. PhDr. Marcelu Efmertové, CSc. za ochotu, pomoc s formální úpravou práce a uvedení do problematiky publikační činnosti. Mé poděkování patří také panu doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za připomínky k ekonomické části práce a panu Ing. Jiřímu Kutáčovi za pomoc, poskytnuté materiály a licenci k softwaru DEHNSupport.

V Praze dne 20. 5. 2016

.....
(podpis autora)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 20. 5. 2016

.....
(podpis autora)

Obsah

Úvod	1
Vznik, parametry a účinky blesku	3
Vznik bouře.....	3
Vznik blesku.....	4
Druhy bleskových výbojů	5
Parametry bleskových proudů	5
Účinky blesku.....	7
Úder blesku do vedení.....	7
Úder blesku do budov	8
Ochrana před bleskem	8
Ochrana vedení proti blesku	9
Přístroje pro ochranu vedení.....	10
Ochrana budov proti blesku	13
Vnější systém ochran před bleskem.....	13
Vnitřní systém ochran před bleskem	14
Řízení rizika.....	15
Metodika pro volbu ochrany	20
Rozhodovací kritéria pro volbu ochrany	20
Princip analýzy rizik	21
Škody a ztráty	21
Riziko a jeho součásti	22
Určení hodnoty rizik	23
Ocenění efektivity nákladů na ochranu.....	23
Výpočet efektivity nákladů	24
Návrh a zhodnocení ochrany objektu	25
Případová studie.....	25
Řešení	25
Výpočet Rizika R_4 pro nechráněný objekt	25
Návrh ochrany pro budovu v LPL III-IV	28
Návrh ochrany pro budovu v LPL II.....	30
Pojištění objektu.....	31
Ověření výsledků	31
Výpočet NPV pro chráněný objekt	32
Výpočet NPV pro pojištěný objekt	34
Závěr.....	35

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rozložení náboje	3
Obrázek 2 – Vznik blesku.....	4
Obrázek 3 – Mechanismus bleskového výboje	5
Obrázek 4 – Parametry bleskových proudů	7
Obrázek 5 – Ochranný prostor vedení	9
Obrázek 6 – VA charakteristika odporů.....	10
Obrázek 7 – Ventilovábleskojistka.....	11
Obrázek 8 – VA charakteristika omezovačů přepětí	12
Obrázek 9 – Vyrovnání potenciálů	14
Obrázek 10 – Zóny ochran před bleskem LPZ	16
Obrázek 11 – Princip umístování svodičů.....	17
Obrázek 12 – Přepětí na jiskřišti a varistoru.....	18
Obrázek 13 – VA charakteristika supresorové diody	19
Obrázek 14 – Kombinace 3 stupňů přepětových ochran	20
Obrázek 15 – Vyhodnocování efektivnosti ochran.....	24
Obrázek 16 – Příklad rozmístění přístrojů.....	25
Obrázek 17 – Rozmístění svodičů v LPL III–IV.....	28
Obrázek 18 – Rozmístění svodičů v LPL II.....	30
Obrázek 19 – Zapojení svodičů v síti TN-C-S.....	31

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry bleskových proudů	6
Tabulka 2 – Hladiny ochran LPL.....	15
Tabulka 3 – Typické hodnoty přípustného R_T	22
Tabulka 4 – Cena ochranných opatření pro LPL III–IV.....	28
Tabulka 5 – Cena ochranných opatření pro LPL II	30
Tabulka 6 – Vstupní hodnoty pro výpočet NPV.....	32
Tabulka 7 – NPV pro nechráněný objekt.....	32
Tabulka 8 – NPV pro objekt v LPL III–IV.....	33
Tabulka 9 – NPV pro objekt v LPL II	33
Tabulka 10 – NPV z hlediska úspor v LPL III–IV.....	33
Tabulka 11 – NPV z hlediska úspor LPL II.....	34
Tabulka 12 – NPV z hlediska úspor – pojištění	34

Úvod

Blesk je 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. Ukázkou může být například existence Šalamounova chrámu, který byl pokryt zlatými deskami a velkým množstvím kovových trub pro odvod vody. I když se tento chrám nacházel na výskyt blesků na velmi exponovaném místě, nebyly na něm zaznamenány žádné škody způsobené bleskem od roku 925 do roku 587 před n. l., kdy je jeho existence doložena. 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 později ve své práci 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 buď zabráni úderu z mraku, nebo když nastane úder, odvede jej bezpečně z budovy.“(7) 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 zabráni tak výbojům blesků. Jeho železná konstrukce na dřevěném stožáru, „machina meteorologica“, byla spojena řetězy s kovovými kužely zakopanými do země a jednalo se o první uzemněný hromosvod (otázkou dodnes zůstává fakt, zda uzemnění bylo vědomé, či vzniklo při mechanické stabilizaci celé konstrukce). (7)

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 práce byly vydány především 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. Díky tomu začalo rozšiřování systému ochrany před bleskem získávat na popularitě. (7) 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 z našich předpisů začaly věnovat Předpisy ESČ z roku 1950, které byly roku 1955 nahrazeny ČSN 34 1390. Její platnost skončila v lednu 2009 a byla nahrazena souborem evropských norem ČSN EN 62305, používanými dodnes. (8)

Ve 20. století se vývoj zaměřil i na technické prostředky ochrany budov před bleskem. Projednávány byly možnosti zlepšení tradičních ochranných prostředků sběrných elektrod, efektivnějšího uzemnění a vhodnějším rozmístěním obou komponent. Spolu s nimi se začaly objevovat i specifické prostředky ochrany objektů před bleskem. Ty se podle typu a využití technologie rozdělují na systémy konvenční (hromosvodní nebo bleskosvodní jímače) a aktivní, které emitují vstřícné výboje vůči hlavním bleskovým výbojům. 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 však přinášely už zkušební laboratoře Elektrotechnického svazu československého a roku 1980 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 zkoušky za přirozených podmínek však dokazují, že jímače ESE nevykazují lepší vlastnosti než konvenční jímače. Hypotéza, na níž jsou založeny, je proto pravděpodobně nesprávná. (8)

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 ochran.

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 z důvodu vzniku nefunkční instalace. K jejich spojení v okamžiku vzniku přepětí proto slouží právě přepětové ochrany. Ty mají při jmenovitém napětí značný odpor blížící 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 ochran je možná mnoha způsoby (varistory, jiskřišti, supresorovými diodami atd.), popsány v kapitole „Ochrana před bleskem“.

Instalace přepětových ochran 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. Také riziko úderu blesku se však zdá být velmi malé, a proto vždy vyvstává otázka, zda je skutečně nutné objekt chránit. Pokud se jedná o nemocnice nebo důležité kulturní dědictví, které nemůže být v případě poškození obnoveno, je volba velmi jednoduchá a o nutnosti ochran nikdo nepochybuje. Pokud ale bude podnikatel zvažovat, zda investovat do ochrany svého majetku, mohou být důsledkem tohoto rozhodnutí značné finanční ztráty, které by mohly vést až k zániku firmy.

Cílem této práce je proto přiblížení těchto problémů, a na konkrétním případě představení návrhu účinného, a co možná ekonomicky nejefektivnějšího řešení ochrany před bleskem. Aktuálnost vývoje ochranných systémů a jejich implementace na základě nových vědeckých poznatků je nezbytnou součástí a potřebou pro rozvoj elektrotechniky, neboť bleskový výboj bude stále ohrožovat citlivější a konstrukčně složitější zařízení.

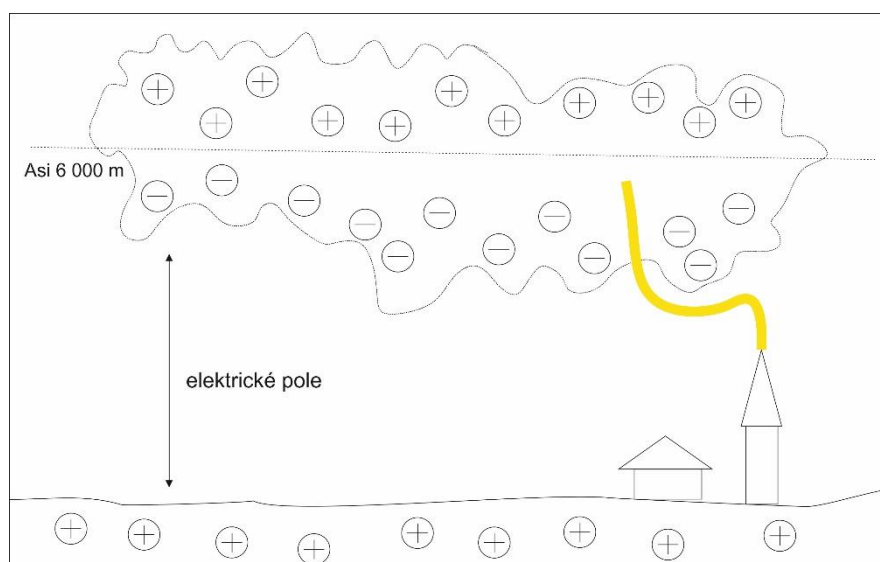
Vznik, parametry a účinky blesku

Vznik bouře

Blesk je silný přírodní elektrostatický výboj o vysokém impulzním napětí a proudu vznikající v atmosféře během bouřky v bouřkových mracích (cumulonimbech/kumulonibeč). Bouřky se rozlišují podle svého vzniku:

- bouřka z tepla – zemský povrch je zahříván slunečním zářením, což způsobuje stoupání lehčích vrstev vzduchu ohřátých nad povrchem
- frontální bouřka – teplý vzduch je následkem postupu studené fronty vytlačován vzhůru studeným vzduchem
- orografická bouřka (geografická) – spodní vrstvy teplého vzduchu jsou následkem terénního vyvýšení vytlačovány směrem vzhůru (1)

U všech těchto typů bouřek se v mracích vytvářejí bouřkové buňky a stoupající vzduch je ochlazován. Jakmile vzduch dosáhne teploty nasycení vodních par, dochází k vytváření dešťových kapek. Při kondenzaci se vzduch znovu ohřeje a opět začíná stoupat. Jeho dalším ochlazováním dochází k poklesu teploty pod nulu a mrznutí, které znamená nové uvolňování tepla a stoupání vzduchu se dále urychluje až k rychlostem 100 km/h. Přitom dochází ke vzniku a rozdělování elektrických nábojů v kapičkách vody nebo ledu. Záporně nabitě části jsou zpravidla „těžší“ než kladné. Následkem toho se v bouřkovém mraku oddělí oblasti s kladným nábojem nahoře a záporným nábojem uprostřed. Kromě těchto dvou nábojových center se v dolní části kumulonimbu vyskytuje podstatně menší oblast kladného náboje, jehož existence je však prostorově i časově vázána na produkci srážek. Z fyzikálního hlediska je bouřkový mrak „gigantický“ elektrostatický generátor. Každá jeho buňka je aktivní asi 30 minut a je schopna produkovat průměrně 2–4 blesky za minutu, které vznikají při intenzitě elektrického pole řádově stovek kV/m. (1)



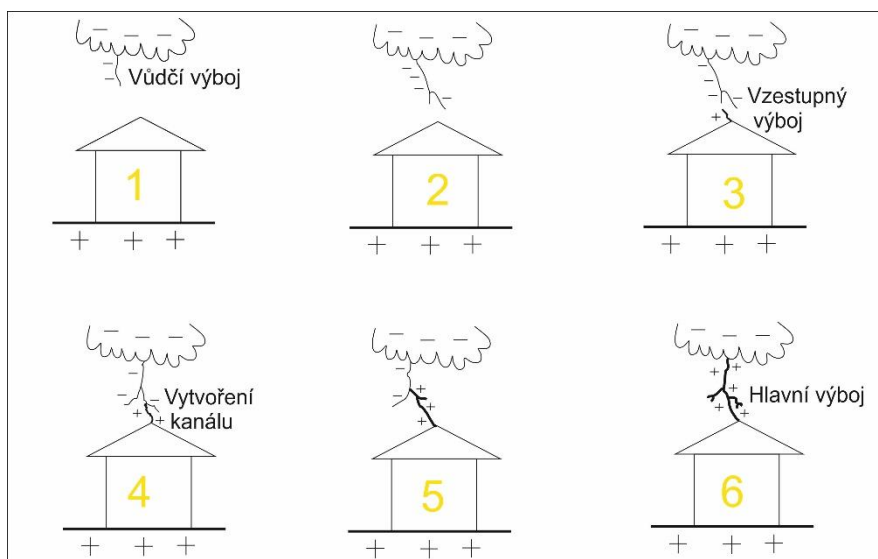
Obrázek 1 – Rozložení náboje

Obrázek 1 zobrazuje bouřkový mrak, jenž se často rozkládá až do výšek přes 10 km, zatímco jeho spodní okraj je 1–2 km nad zemí. Mrak o průměru 5 km může obsahovat až 500 000 tun vody. V horní části buněk se nacházejí kladné náboje na ledových krystalech, zatímco ve spodní části převládají záporné náboje vázané na dešťové kapky. Vlivem polarizace zledovatělých částic mraku vzniká na zemském povrchu kladný zrcadlový náboj. V případě překročení elektrické pevnosti vzduchu mezi zemí a mrakem pak může dojít ke vzniku vodivého kanálu pro bleskový výboj. (1)

Vznik blesku

Za klidného počasí je intenzita elektrického pole na povrchu země 130–140V/m a povrch země má proti atmosféře záporný náboj. Vznikem kumulonimbu se ale elektrická intenzita přepóluje a zesílí až na desítky kV/m. Takto zesílené elektrické pole může vyvolat na předmětech s ostrými hranami hrotové výboje charakteristické typickou fialovou barvou a častým sršením. Proud těchto výbojů dosahuje až jednotek miliampér a pomalu neutralizuje náboj ve spodní části bouřkového mraku. Na myšlenku umělé neutralizace tohoto náboje hrotovými výboji byl založen bleskosvod Václava Prokopa Diviše v 18. století a posléze další konstrukce. S ohledem na rozmístění elektrického náboje může docházet k bleskům mezi centry kladného a záporného náboje v oblaku, mezi oblaky nebo mezi oblakem a zemí. Blesky v oblacích jsou častější, jejich poměr k bleskům mrak–Země je v našem zeměpisném pásmu asi 1,5 : 1. Lépe prozkoumané jsou však výboje k Zemi, které představím při popisu vzniku blesku. (3)

Po dosažení intenzity elektrického pole mezi kumulonimbem a zemí 0,5–10 kV/m (kritickou hodnotu intenzity ovlivňují především místní dielektrické vlastnosti ovzduší) se začíná postupně vytvářet atmosférický výboj. Od oblasti záporného náboje ve spodní části mraku je ionizací částic vzduchu vytvořen kanál blesku s tenkým vodivým jádrem (průměr je jednotky až desítky milimetrů), který se stupňovitě blíží k zemskému povrchu. Postupuje po 20–50 metrech s prodlevami mezi jednotlivými skoky asi 50 μ s a pro další směr rozvoje blesku volí nejvodivější dráhu. Tento druh výboje se nazývá *vůdčí stupňovitý výboj* a jeho průměrná rychlost je mezi 10^5 a 2×10^5 m/s. Proud je odhadován na stovky ampér. Ve vzdálenosti několika desítek metrů od povrchu Země začne postupovat opačným směrem tzv. *vstřícný výboj*. K tomu dochází v místech s vyšším gradientem intenzity elektrického pole, tedy na předmětech s ostrými hranami (věže, stromy, tráva apod.). Po jejich spojení vznikne celistvá vodivá dráha mezi Zemí a centrem náboje v oblaku. Potenciálový rozdíl mezi těmito místy vyvolá proudový impuls, který způsobí *zpětný výboj* sledující stopu obou předchozích výbojů a šířící se rychlostí blízkou rychlosti světla. Vytváří se vodivý ionizovaný kanál o průměru asi 5 cm, v němž dochází k extrémnímu nárůstu proudové hustoty a tedy i teploty, která dosahuje přibližně 25 000 K. Výbojem rychle zahřátý vzduch zvýší svůj tlak až na 10 MPa, a jeho prudké rozpínání provází vznik tlakové vlny. Související akustické projevy pak vnímáme jako hrom. Takto vzniká *hlavní bleskový výboj* dosahující maxima proudu asi po 50 μ s při době trvání okolo 250 μ s. (4), (3) Vznik bleskového výboje popisuje obrázek 2.



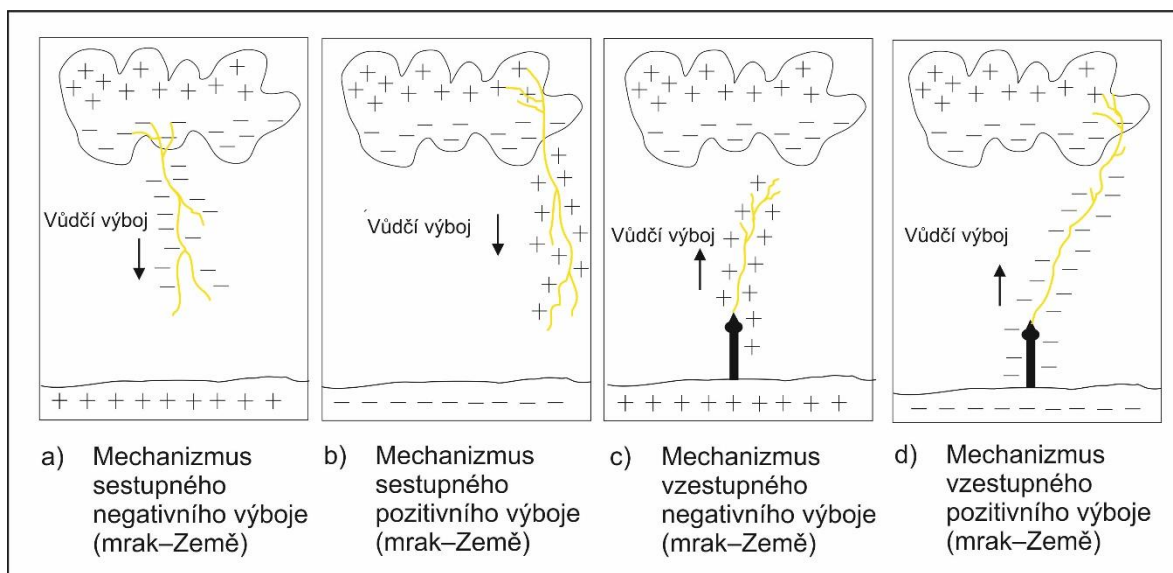
Obrázek 2 – Vznik blesku

Po časovém odstupu asi 40 ms může následovat další výboj, který sleduje dráhu předchozího hlavního výboje. Nešíří se však ve skocích a není rozvětvený. Nazývá se *rychlý vůdčí výboj* a spolu se svým zpětným výbojem tvoří tzv. dílčí bleskový výboj, jenž trvá průměrně 1 milisekundu. Celkový blesk může být tvořen několika dílčími výboji, které následují za prvním výbojem a většinou zasáhnou shodné místo. Asi v třiceti procentech případů se však stává, že dílčí výboje zasáhnou místa na Zemi vzdálená od sebe stovky metrů až několik kilometrů. Za součást jednoho blesku jsou proto považovány pouze výboje, které proběhnou v odstupu maximálně jedné vteřiny a zasáhnou místa, která jsou od sebe vzdálená do deseti kilometrů. (3)

Druhy bleskových výbojů

Do této chvíle popisovaný bleskový výboj se týkal negativního sestupného výboje mrak – Země, který je nejčastějším typem a tvoří asi 90 % všech výbojů. Na hoře Monte San Salvatore ve Švýcarsku byl současnými optickými a elektrickými metodami proveden dosud nejkompaktnější výzkum blesku. Dle tohoto výzkumu lze blesky podle mechanismu vzniku rozdělit do 4 skupin: (2)

- negativní sestupný výboj mrak–Země (obrázek 3 a)
- pozitivní sestupný výboj mrak–Země (obrázek 3 b)
- negativní vzestupný výboj Země–mrak (obrázek 3 c)
- pozitivní vzestupný výboj Země–mrak (obrázek 3 d)



Obrázek 3 – Mechanismus bleskového výboje

Pro lepší představu popisuje mechanismus výbojů obrázek 3.

Kladné blesky se vyskytují především v pozdních fázích vývoje bouřkového oblaku, vlivem slábnutí spodního záporného centra náboje a klesáním horního kladného náboje. Relativně častější je také výskyt kladného blesku v zimních měsících. Vzhledem k jeho nižší četnosti o něm není ani mnoho informací, lze však předpokládat jeho podobnost s hlavním záporným výbojem. Významným rozdílem je ale skutečnost, že je kladný blesk tvořen pouze jedním dílčím výbojem o mimořádné intenzitě. (2) Kladné blesky přenášejí větší náboj a energii, jsou proudově silnější a trvají až 10x déle než záporné (viz parametry bleskových proudů). Jsou proto velmi nebezpečné.

Parametry bleskových proudů

Ničivé účinky blesku úzce souvisí s velikostí elektrického náboje v bouřkovém mraku, který se neutralizuje bleskem. Z již zmíněného výzkumu na hoře San Salvatore v 60. a 70. letech vyplynulo, že parametry bleskových výbojů silně závisí na polaritě (viz druhy bleskových výbojů), a na tom, zda se

jedná o první či následující dílčí výboj. Velikosti sledovaných parametrů, znázorněné pomocí kumulativní četnosti jsou uvedeny v tabulce 1. (3)

Parametr	Jednotka	Kumulativní četnost		
		95%	50%	5%
Vrcholová hodnota proudu				
záporný dílčí výboj	kA	14	30	80
záporný následný dílčí výboj		4,6	12	30
kladný blesk		4,6	35	250
Náboj				
záporný dílčí výboj	C	1,1	5,2	24
záporný následný dílčí výboj		0,2	1,4	11
záporný blesk		1,3	7,5	40
kladný blesk		20	80	350
Doba čela				
záporný dílčí výboj	μs	1,8	5,5	18
záporný následný dílčí výboj		0,22	1,1	4,5
kladný blesk		3,5	22	200
Maximální strmost proudu di/dt				
záporný dílčí výboj	kA/μs	5,5	12	32
záporný následný dílčí výboj		12	40	120
kladný blesk		0,2	2,4	32
Doba trvání				
záporný dílčí výboj	μs	30	75	200
záporný následný dílčí výboj		6,5	32	140
kladný blesk		25	230	2 000

Tabulka 1 – Parametry bleskových proudů

Z velikostí parametrů proudu bleskových výbojů v tabulce 1 vyplývá, že kladný blesk dosahuje větších hodnot amplitudy, ale má menší strmost. Porovnáním prvního a následných dílčích výbojů záporného blesku zjistíme, že první výboj má obvykle větší amplitudu, ale menší strmost. Pro lepší pochopení následuje popis jednotlivých parametrů:

1) Vrcholová hodnota proudu [kA]

- je stanovena z maximální hodnoty proudu dosažené v průběhu dílčího bleskového výboje
- určuje maximální úbytek napětí na odporu uzemnění zasaženého objektu (zvýšení potenciálu vůči Zemi)
- důležitý parametr pro dimenzování ochran před bleskem (17)

2) Náboj Q [C]

- celkový náboj Q je stanoven jako integrál proudu podle času $Q = \int i dt$
- skládá se z náboje impulzního proudu Q_s a náboje dlouhodobého proudu Q_l
- má vliv na výměnu energie v místě úderu blesku a v místech kde bleskový proud proniká ve formě oblouku přes izolační vrstvu. Tento oblouk způsobuje roztavení a následné rozstříknutí materiálu na jímačích a elektrodách ochranných jiskřišť bleskojistek (17)

3) Doba čela [μs]

- 1,25 násobek doby mezi okamžiky, ve kterých okamžitá hodnota proudu naroste z 10 % na 90 % své vrcholové hodnoty.

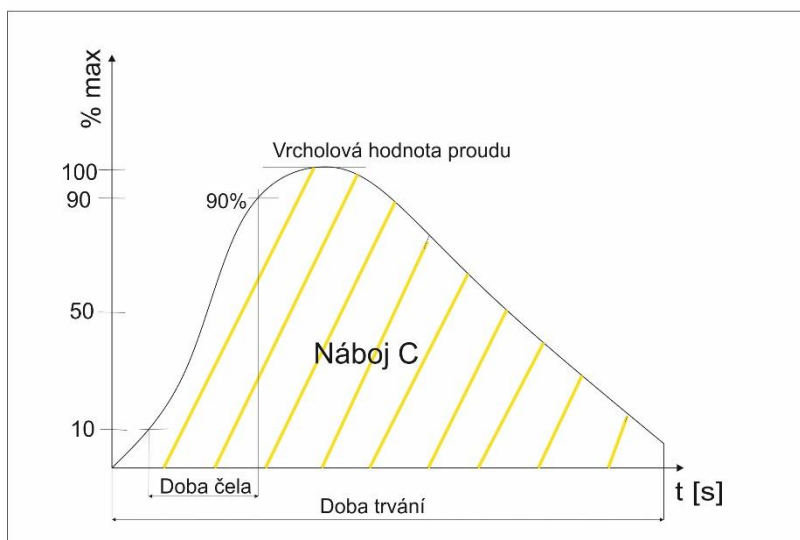
4) Strmost proudu di/dt [kA/μs]

- definuje změnu velikosti proudu za jednotku času
- ovlivňuje velikost indukovaného napětí ve smyčkách elektroinstalace, podle jehož velikosti lze stanovit bezpečnou vzdálenost hromosvodu a vodivých instalací (17)

5) Doba trvání [μ s]

- doba, po kterou v místě úderu protéká bleskový proud

Jednotlivé parametry popisuje obrázek 4:



Obrázek 4 – Parametry bleskových proudů

Účinky blesku

Přepětí způsobená bleskem jsou zapříčiněna jednak úbytkem napětí na vodičích, kterými bleskový proud prochází, a jednak elektromagnetickým polem vzniklým v důsledku bleskového výboje. Mohou způsobit škody na venkovních elektrických vedeních i budovách a jejich přístrojovém vybavení. Tyto škody budou přiblíženy v dalším textu. (3)

Úder blesku do vedení

Při přímém úderu blesku je v zasaženém místě do vedení injektován proudový impulz o průběhu popisovaném na obrázku 4. Od místa zásahu se na obě strany šíří napěťové a proudové vlny, které se odrážejí všude, kde dochází ke změně vlnové impedance. Pravděpodobnost přímého zásahu blesku do vedení se snižuje zemnicími lany, která zachytávají výboje směřující na vedení podobně jako hromosvod. Při zásahu zemnicího lana se vlny napětí a proudu šíří podél tohoto lana. V důsledku zásahu zemnicího lana nebo stožáru vedení bleskem se v horní části stožáru, kde jsou zavěšeny na izolátorech vodiče, objeví napětí proti zemi. Tím dochází k napěťovému namáhání izolátoru. Velmi často je toto namáhání tak velké, že překročí elektrickou pevnost izolátoru vedení a dojde ke zpětnému přeskočení, který má za následek zapálení elektrického oblouku mezi stožárem a vodičem, tedy zkrat vedení. I v případě, že ke vzniku zkratu nedojde, může být provoz elektroenergetického systému ohrožen v důsledku napětí, která se do vedení přenesou elektromagnetickou vazbou mezi zemnicím lanem, stožárem a vedením. (3)

Během výboje blesku dochází k prudkým změnám elektromagnetického pole, což může ve vedení i elektrických obvodech indukovat napětí. Indukovaná přepětí vznikají především náhlou změnou elektrostatického pole při úderu blesku. Vzniklý náboj postupuje jako přepěťová vlna na obě strany vedení. Tak vzniká elektrostaticky indukované přepětí, které bývá obvykle kladné polarity a které je na všech vodičích jednoho vedení stejné. Tvar indukovaného přepětí je charakteristický poměrně malou strmostí vzrůstu čela vlny a delší dobou týlu. Pokud dojde k úderu v malé vzdálenosti od

vedení (do 5km), mohou tato napětí ohrozit izolační systém jak vlastního vedení, tak připojených zařízení. I v případě, kdy je vzdálenost blesku od vedení větší i indukované napětí nižší, může dojít k poruše nebo chybné funkci elektronických zařízení. Napětí indukovaná do vedení bleskovým výbojem jsou daleko častější než přímý zásah do vedení. (3)

Ať už přerušení dodávky elektrické energie nebo poškození drahých elektrických zařízení s sebou ale nese tak velké náklady, že je nutností se proti těmto poruchám chránit. Mezi tato opatření patří ochrana před přímým úderem blesku a správné rozmístění svodičů přepětí (viz ochrana před bleskem).

Úder blesku do budov

Přepětí vyvolaná bleskem v budovách vzniká v zásadě stejnými mechanismy jako v případě venkovních vedení. Se svými elektronickými instalacemi a sdělovacími vedeními však představují podstatně složitější uspořádání. Napětí indukovaná v elektrické instalaci mohou vznikat při přímém zásahu budovy nebo při úderu blesku v blízkosti stavby. (3) Elektromagnetický impulz způsobený bleskem (LEMP) zahrnuje tepelné, mechanické, elektrodynamické a elektromagnetické účinky, které jsou z hlediska zaměření této práce nejdůležitější.

V důsledku průchodu bleskového proudu vodiči vzniká v jejich okolí magnetické pole indukující napětí. Síť nízkého napětí má velmi složitou strukturu s mnoha odbočkami nepravidelně vyvedenými, což velmi komplikuje výpočet přepětí.

Přepětí způsobená úderem blesku jsou velmi nebezpečná a způsobují zpravidla největší škody vzniklé přepětím. Intenzita a možná poškození takto způsobená závisí primárně na tom, kam blesk udeří. ČSN EN 62305 rozlišuje čtyři různé příčiny poškození:

- S1 – údery do stavby
- S2 – údery v blízkosti stavby
- S3 – údery do inženýrských sítí připojených ke stavbě
- S4 – údery v blízkosti inženýrských sítí připojených ke stavbě (6)

Při úderu blesku v blízkosti inženýrských sítí spojených se stavbou (S4) a úderu v blízkosti stavby (S2) vzniká elektromagnetické pole, které indukuje na všech kovových částech v okolí napětí. Toto napětí obvykle nedosahuje vysokých hodnot a jím vytvořená rázová vlna nadproudu většinou dosahuje hodnot do 5 kA v energetické vlně 8/20 μ s. Bez dostatečné ochrany je však schopna i takto vzniklá energie zničit citlivá elektronická zařízení. Obecně zařazujeme tyto případy z hlediska přepětí do první aplikační skupiny – Malé ohrožení instalace.

Pokud nastane úder do vedení, může rázová vlna nadproudu dosahovat až 10 kA v energetické vlně 10/350 μ s (poměr délky trvání čela/půl týlu) a může tedy způsobit ještě větší škody. Tyto případy zařazujeme aplikačně do druhé skupiny – Střední ohrožení instalace.

Největší škody na majetku však může napáchat přepětí indukované při přímém úderu do stavby (S1) nebo blízkých objektů, které jsou s tímto objektem galvanicky spojeny (např. kabelem). Hodnoty bleskového proudu mohou často dosahovat až 25 kA ve vlně 10/350 μ s na jeden vodič přírodního vedení. V tomto případě je přepětí indukováno na vodičích díky jejich impedanci a protékajícímu bleskovému proudu. Aplikačně řadíme do skupiny – Velké ohrožení instalace. (6)

Ochrana před bleskem

Účelem ochrany před bleskem je vytvořit komplexní ochranný systém, který spolehlivě omezí účinky přepětí na dodávku elektřiny, lidi a hmotný majetek nacházející se v dosahu jeho účinků. Takový systém může obsahovat speciální technické prvky, zařízení vyvinutá k tomuto účelu a také celou řadu konstrukčních a stavebních opatření. Zkonstruovaný systém musí především omezit možnost vzniku

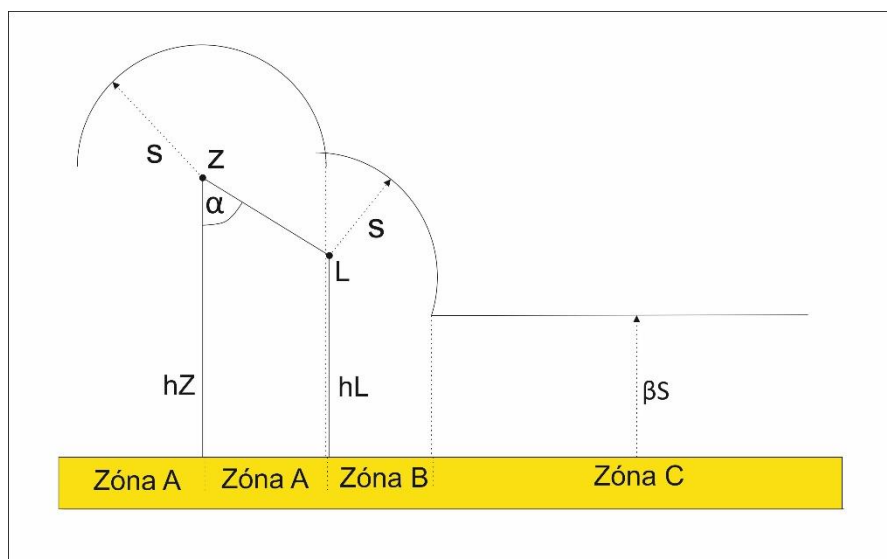
přepětí a již vzniklá přepětí snížit na přijatelnou úroveň. Pro spolehlivé plnění těchto funkcí se prvky ochrany umísťují na místa v trase přenosu nežádoucích přepětových jevů (4):

- ve zdroji přepětí
- v trase možného přenosu přepětí
- v cílovém zařízení

Nejlépe by samozřejmě bylo zamezit přepětí již ve zdroji, tedy první případ. Omezit však atmosférický výboj, energeticky nejsilnější projev přepětí, již v jeho vzniku se dosud nepodařilo. Není tedy jiná možnost než postupné omezování jeho účinků. Ochranou v trase přenosu přepětí se rozumí chránění přenosové a distribuční soustavy a to převážně pomocí zemnicích lan, bleskojistek a omezovačů přepětí. Ochranou v cílovém zařízení se rozumí ochrana objektů. V současnosti se používají zařízení souhrnně označovaná termínem LPS (Lightning Protection System). Normou jsou stanoveny 4 třídy LPS (I–IV), které odpovídají hladinám ochrany před bleskem LPL (viz řízení rizika). Parametry jednotlivých tříd LPS jsou určeny charakteristickými vlastnostmi chráněné stavby a uvažovanou hladinou ochrany před bleskem (LPL). Základním rozdělením LPS je však rozdělení na **vnější a vnitřní** systém ochrany před bleskem. Vnější ochrana se zabývá hromosvodní a uzemňovací soustavou, zatímco u vnitřní ochrany řešíme převážně zabezpečení přístrojů pomocí varistorů, jiskřišť, Zenerových diod apod. (4) Podrobněji jsou uvedené postupy popsány dále v této práci, přičemž hlavní pozornost bude věnována vnitřnímu systému ochrany.

Ochrana vedení proti blesku

Nejnebezpečnější atmosférická přepětí vznikají přímým úderem blesku do vedení (viz úder blesku do vedení). Základní ochranou proti jejich vzniku je natažení zemnicích lan souběžně s fázovými vodiči, jejich uzemnění a umístění tak, aby pravděpodobnost jejich zásahu byla podstatně vyšší než ta, že budou zasaženy fázové vodiče. Volba polohy zemnicích lan vychází z teorie ochranného prostoru. Při atmosférické výboji postupuje z výšky několika kilometrů vřdčí stupňovitý výboj bez ohledu na reliéf povrchu země (viz vznik blesku). Teprve ve výšce několika desítek metrů začne být přitahován vstřícným výbojem, který vzniká na ostrých hranách objektů nacházejících v jeho blízkosti. Vzdálenost, na kterou je blesk k danému objektu přitahován, se nazývá *ochranná vzdálenost*. Ta je poloměrem *ochranného prostoru*, jehož střed leží v místě vzniku vstřícného výboje a obvykle se nachází v nejvyšším bodě daného objektu. (3)



Obrázek 5 – Ochranný prostor vedení

Na obrázku 5 je zobrazena konstrukce ochranných prostorů pro vedení se zemnicím lanem, jehož poloha je dána ochranným úhlem α . Jak vyplývá z obrázku 5, pokud se bude vůdčí výboj přibližovat k vedení v zóně A, bude přitahován k zemnicímu lanu (Z) a v zóně C bude přitahován k povrchu země. Zóna B představuje nechráněný prostor, v němž je blesk přitahován fázovým vodičem (L).

S rostoucím proudem blesku se zóna B zmenšuje, a s tím i pravděpodobnost úderu do fázového vodiče. Velikost zóny B lze uměle zmenšit volbou menšího ochranného úhlu nebo použitím dvou zemnicích lan. (3)

Zemnicí lano zmenšuje velikost indukovaného přepětí na vodičích venkovního vedení především tak, že zvyšuje kapacitu vodičů k zemi, přibližuje potenciální hladinu země k vodičům a tím snižuje podélnou složku napětí na vodiči v poli sestupujícího vůdčího výboje. Náboj indukovaný na vedení je menší než u vedení bez zemnicího lana a odpovídající napětí, vznikající na vodičích uvolněním indukovaného náboje, rovněž nedosahuje velikosti přepětí vlny na vedení bez zemnicího lana. (3)

Vlny ve fázových vodičích společně s vlnami vznikajícími ve stožárech mohou vést ke zpětnému přeskoku ze stožáru na vedení. Použití zemnicích lan je tedy pouze základní opatření, které samo o sobě v žádném případě nedostačuje a musí být doplněno dalšími ochranami, konkrétně svodiči přepětí. Ty se připojují paralelně k chráněným zařízením a zajišťují, aby na nich nevzniklo napětí vyšší než dovolené. Svodiče přepětí existují v mnoha variantách, jejich společnou vlastností je ale změna vnitřní impedance s rostoucím napětím. (3)

Přístroje pro ochranu vedení

Napětově závislé odpory

Napětově závislé odpory se původně používaly k výrobě svodičů přepětí z karbidu křemíku SiC nebo oxidu zinečnatého ZnO. Voltampérové charakteristiky jsou definovány vztahem:

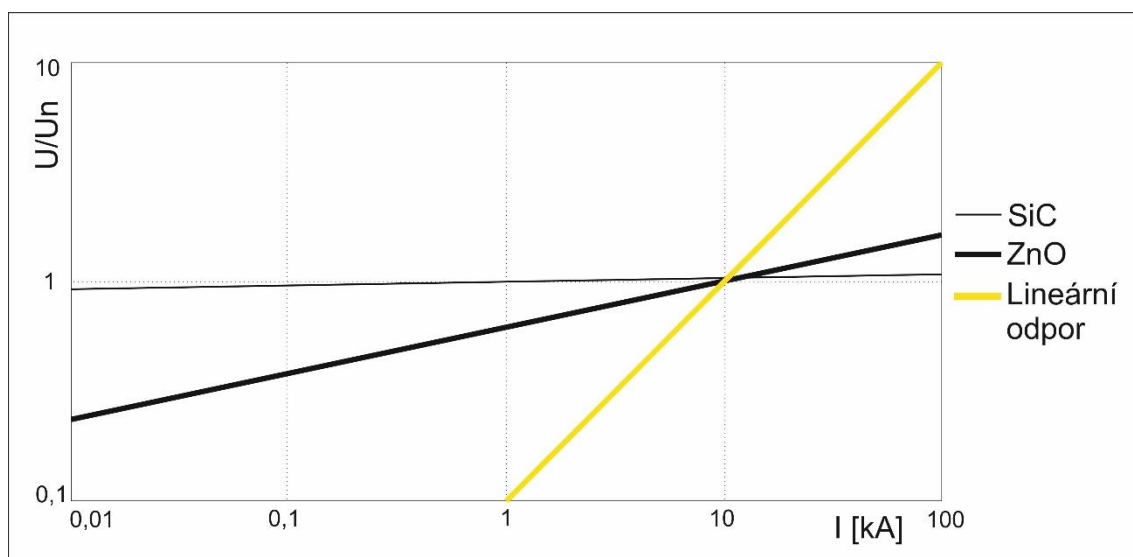
$$I = k * U^\alpha$$

I...velikost proudu [A]

U...napětí [V]

k...konstanta odpovídající úrovni napětí, pro kterou je svodič určen

α ...koeficient nabývající hodnot 2–6 (SiC) a 20–50 (ZnO)

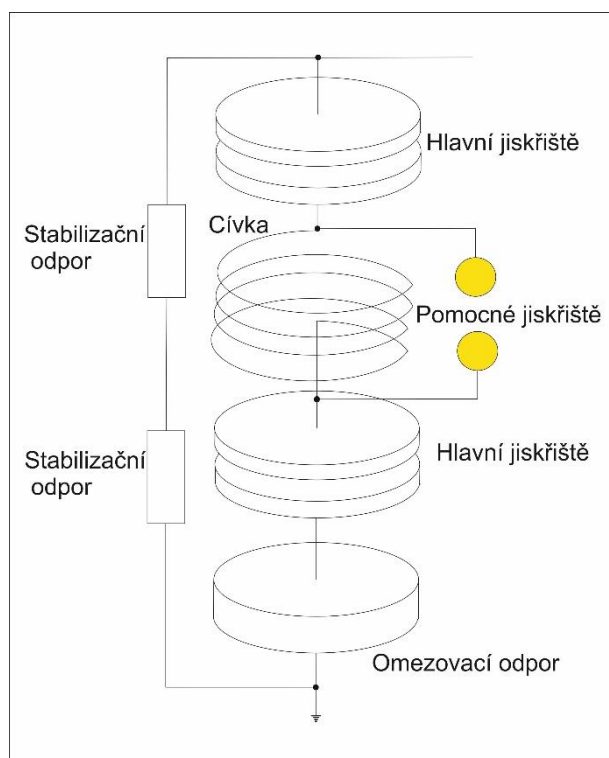


Obrázek 6 – VA charakteristika odporů

Na obrázku 6 jsou znázorněny voltampérové charakteristiky odpovídající tomuto vztahu pro různé velikosti exponentu α a úbytek napětí U_n . Je z nich zřejmá odlišnost závislosti velikosti úbytku na procházejícím proudu pro lineární odpor ($\alpha = 1$), SiC ($\alpha = 5$) a ZnO ($\alpha = 50$). Tyto sloučeniny mají sice potřebné vlastnosti k omezení přepětí, při normálním napětí je však jejich odpor poměrně malý, což způsobuje trvale procházející proud, a tedy i velké ztráty a tepelné přetěžování svodiče (pro SiC). Aby se tato nevýhoda odstranila, předřazují se napětově závislému odporu jiskřiště oddělující za normálních podmínek odpor od napětí a zajišťující potřebnou impedanci svodiče. Při přepětí se jiskřiště zapálí a odpor připojí. Takto konstruované svodiče se nazývají ventilové bleskojistky. (3)

Ventilové bleskojistky

Ventilové bleskojistky bývají různého provedení pro různé velikosti proudů, které mají svádět do země. Jejich společným znakem je však jeden nebo více dílů obsahující jiskřiště a nelineární odpor v sérii. Na obrázku 7 je příklad bleskojistky tvořené dvěma hlavními jiskřišti, magnetickou cívkou s paralelním pomocným jiskřištěm, napětově závislým omezovacím odporem v sérii s jiskřištěm a dále stabilizačními napětově závislými odpory připojenými paralelně k jiskřištím. (3)



Obrázek 7 – Ventilová bleskojistka

Tyto části bývají v neprodyšně uzavřeném porcelánovém válci, naplněném např. suchým vzduchem, čímž jsou chráněny před korozí. Napětí, při kterém bleskojistka začne působit, je určeno zejména vlastnostmi jiskřiště, jehož zapalovací napětí ve velké míře závisí na strmosti přepětí. Proto často mají jiskřiště předionizaci, aby bleskojistka působila co nejrychleji i při strmých vlnách napětí. Princip ventilové bleskojistky podle obrázku 7 je následující:

Při výskytu přepětí na svorkách ventilové bleskojistky dojde k zapálení obou hlavních jiskřišť a k průchodu proudu cívkou a také připojeným nelineárním odporem. Nárůst proudu na cívce vyvolá vznik napětí, které způsobí zapálení pomocného jiskřiště, a tím i vyřazení cívky. Impedance bleskojistky je v této fázi dána pouze úbytkem na napětově závislém odporu. Po svedení přepětí se impedance cívky podstatně sníží, což způsobí zhasnutí oblouku na pomocném jiskřišti a opět zařadí cívku do obvodu. Cívka vytvoří magnetické pole, jež působí na proud obloukových výbojů na hlavních jiskřištích tak, že je oblouk vytlačen do zhášecích komor, které jsou součástí jiskřišť. Tím dochází

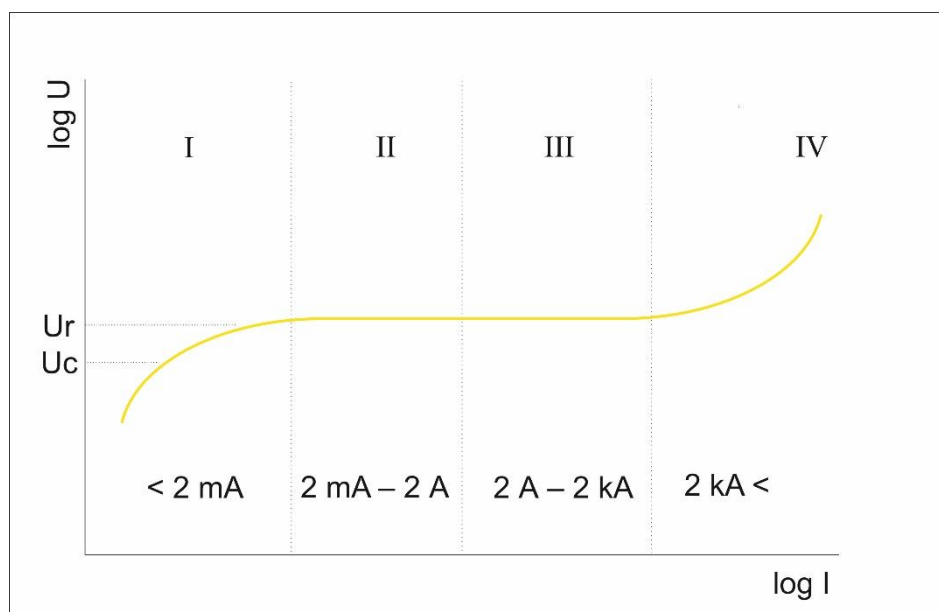
k přerušení výbojů a k zamezení následného proudu. Stabilizační odpory zařazené paralelně k hlavním jiskřičkám zajišťují rovnoměrné rozložení napětí na jiskřičkách v případě, že je bleskojistka tvořena větším počtem jiskřiček, a tím stabilizují zapalovací napětí bleskojistky. Zároveň omezují vliv vnějších elektrických polí.

Omezovače přepětí

Vývoj technologie výroby napětově závislých odporů na bázi oxidu zinečnatého ZnO umožnil zvýšit exponent α (viz napětově závislé odpory) na hodnoty 20 až 50. Nelinearity se dosahuje spékáním granulí z materiálu ZnO s příměsí a další náročnou speciální technologií výroby. Mezi zrny se vytváří polovodičový přechod. Na obrázku 6 je viditelné, že při napětí o 10 % nižším, než je zbytkové napětí při proudu 10 kA, protéká odporem ZnO proud o nejméně 3 řády nižší než odporem SiC. Tato vlastnost dovolila použití odporů ZnO jako svodičů přepětí přímo, tedy bez zařazení zapalovacích jiskřiček.

Odpory vyrobené ze ZnO jsou kromě napětí závislé také na teplotě, na což je třeba brát zřetel při návrhu omezovačů. Dlouhodobé zvýšení napětí na omezovači totiž způsobí v důsledku poklesu jeho odporu nárůst proudu, a tím i vývin tepla, které pokud není dostatečně odváděno, způsobí další pokles odporu s opětovným zvýšením ztrát. Tepelná nestabilita může vést až k havárii omezovače.

Parametry popisující omezovač, na základě kterých se provádí jeho výběr, jsou jiné, než parametry ventilových bleskojistek. Vzhledem k nepřítomnosti zapalovacího jiskřičky je zapůsobení omezovače prakticky nezávislé na strmosti přepětí.



Obrázek 8 – V-A charakteristika omezovačů přepětí

Průběh V-A charakteristiky omezovače ve skutečnosti neodpovídá ideálnímu průběhu podle obrázku 6, jelikož exponent α (viz napětově závislé odpory) není konstantní a podle jeho změny lze V-A charakteristiku rozdělit do 4 částí (obrázek 8). První část, odpovídající proudům do 2 mA, je z hlediska napětí oblastí trvalého provozního napětí (α zde nabývá hodnot 4–8). Druhá část, odpovídá oblasti dočasných přepětí (α 15–50, v okolí inflexního bodu až 50). Třetí část odpovídá výskytu spínacích přepětí s proudy do 2 kA (α 15–25), a čtvrtá část, s α v rozmezí 7–10, odpovídá atmosférickým přepětím. (3)

Odolnost omezovačů vůči přetížení je vyjádřena zařazením do energetické třídy 1–5, která vyjadřuje schopnost absorpce energie atmosférických a spínacích přepětí a je nezávislá na jmenovitém napětí. Omezovače třídy 1 se používají pro málo exponované venkovní sítě, třídy 2 jsou nejběžnější ve

venkovních vedeních vn, třída 3 vyhovuje rozsáhlým kabelovým sítím a sítím 110–400kV. Omezovače třídy 4 se používají pro sítě 400 kV s dlouhým vedením a nejdolnější omezovače třídy 5 se volí pro extrémně rozsáhlé kabelové sítě a sítě 750 kV. (3)

Porovnání ventilových bleskojistek a omezovačů přepětí

Největším rozdílem v obou typech svodičů spočívá ve faktu, že jmenovité napětí bleskojistek musí vždy ležet nad maximální velikostí dočasných přepětí, zatímco odpovídající parametr omezovačů, trvalé provozní napětí U_c , může být nižší. Tím se dosáhne snížení ochranné hladiny. V případě zapálení bleskojistky při dočasném přepětí jí totiž prochází proud až několik set ampér po dobu trvání přepětí, což může způsobit její zničení. Omezovačem prochází proud o poznání menší, takže ani oteplení ZnO bloků nedosahuje takových hodnot, pokud doba trvání nepřekročí určitou mez. Pokud ano, musí se i pro omezovače volit jmenovité napětí nad úroveň dočasných přepětí a snížení ochranné hladiny oproti bleskojistce se tak nedosáhne. Přesto se i v těchto případech vyplatí použití omezovačů přepětí, jelikož se prostor potřebný pro jiskřiště v bleskojistce použije k umístění dalších bloků ZnO, čímž se zvětší tepelná kapacita omezovačů. Další výhodou omezovačů je větší spolehlivost díky jednodušší konstrukci. U bleskojistek je velké procento poruch způsobeno závadou na jiskřištích. Při kontrole bleskojistek se musí navíc svodiče odpojit od sítě, zatímco kontrola omezovačů se provádí za provozu, nebo se dokonce nemusí kontrolovat vůbec. Poslední uvedený rozdíl se týká spolupráce několika svodičů přepětí. U ventilových bleskojistek je zapalovací napětí o 10–15% vyšší než zbytkové, takže zapálení jedné z několika paralelních sníží napětí pod úroveň zapalovacího napětí ostatních a k jejich zapálení nedojde. U omezovačů závisí rozdělení zatížení pouze na vzájemném vztahu V-A charakteristik a obecně platí, že jejich podmínky pro spolupráci jsou výrazně příznivější než u bleskojistek. (3)

Ochrana budov proti blesku

Chod nejen elektroenergetických soustav, ale i průmyslu a domácností je ve stále větší míře ovládan a monitorován pomocí automatizovaných měřicích a řídicích systémů. Citlivá zařízení se nacházejí v rozvodnách, administrativních i obytných budovách. Porucha nebo nesprávná funkce těchto zařízení může mít vážnější následky, než porucha přímo v silové části elektroenergetické soustavy (viz úder blesku do budov). Přepětí na elektrických zařízeních se mohou v budovách objevit při jejich přímém zasažení bleskem, nebo mohou být přivedeny po silových nebo sdělovacích vedeních a je nutné se s nimi vypořádat. (3)

Ideální ochranou staveb by bylo jejich uzavření uvnitř uzemněného a dokonale vodivého souvislého stínění s odpovídající tloušťkou a na vstupu do stínění zajistit odpovídající pospojování inženýrských sítí přivedených do stavby. Takové řešení by bylo schopno zabránit pronikání bleskového proudu a souvisejícího elektromagnetického pole do chráněné stavby a zabránit nebezpečným tepelným a elektrodynamickým účinkům proudu, stejně jako nebezpečnému jiskření a přepětím ve vnitřních systémech. V praxi však často není reálné ani cenově efektivní realizovat ji v takovém rozsahu, aby byla zajištěna plná ochrana. Nedostatečná souvislost stínění a/nebo jeho nedostatečná tloušťka, umožňují bleskovému proudu pronikat jím a způsobovat hmotné škody, ohrožení života a poruchy vnitřních systémů. Ochranná opatření přijatá pro snížení takových škod a souvisejících následných ztrát musí být navržena pro stanovený soubor parametrů bleskového proudu, pro které se ochrana požaduje (LPL – viz řízení rizika). (5)

Vnější systém ochrany před bleskem

Základní ochranou budov proti účinku atmosférického výboje je ochrana před přímým úderem blesku. Tento problém řeší *vnější systém ochrany před bleskem*, čili hromosvod. Úkolem hromosvodu je zachycení bleskového výboje a jeho následné odvedení do země. Sestává se z *jímacího zařízení, svodu a zemniče*.

Jímací zařízení má za úkol zachycení výboje a je tvořeno veškerými vodivými předměty na povrchu budovy, dostatečně kvalitně elektricky spojených. Vytváří tzv. *ochranný prostor*, pod kterým nemůže

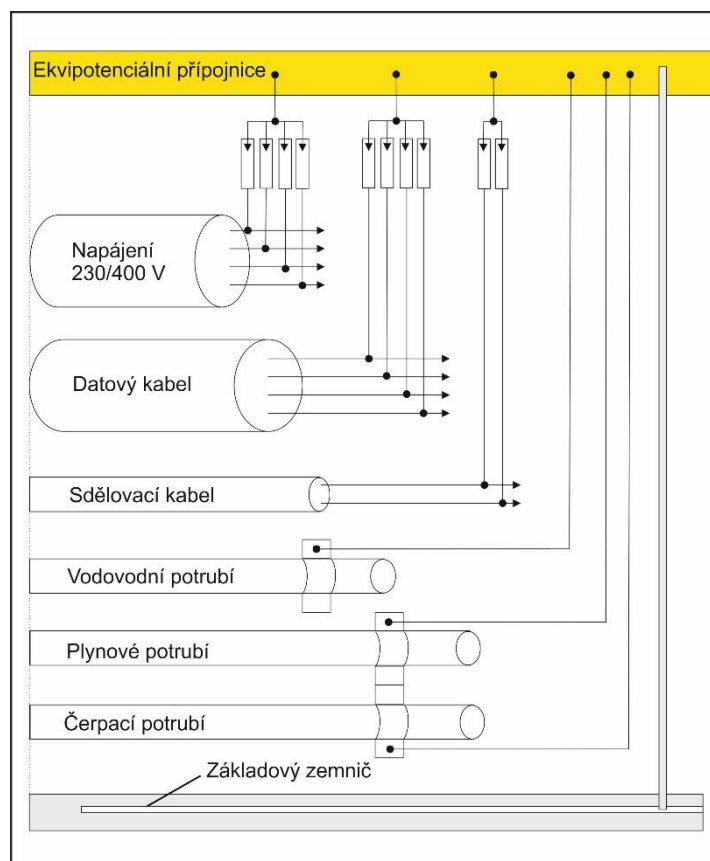
být žádný předmět, zvíře ani osoba zasažen bleskem. Jímací zařízení mohou být součástí chráněné budovy, potom vytváří hřebenovou nebo mřížovou soustavu, popřípadě může být použit tyčový jímač, nebo nemusí být součástí budovy a mluvíme o tzv. oddáleném hromosvodu.

Svody zajišťují elektrické spojení jímače s uzemněním. Měl by být co nejkratší a pokud možno přímý, aby svou indukčností nezpůsobil napěťové úbytky. Dále musí být vyroben z vodiče dostatečně dimenzovaného na průchod bleskového proudu.

Zemnění hromosvodu zajišťuje propojení hromosvodu se zemí. Zemniče mohou být různého provedení (deskové, tyčové, páskové) nebo se používají tzv. základové zemniče. Tento systém se nachází pod budovou v celé ploše jejího půdorysu zalitý do betonu, aby byl chráněn před korozí.

Vnitřní systém ochran před bleskem

Při zásahu hromosvodu bleskem vzniká v důsledku průchodu proudu zemničem potenciálový rozdíl mezi předměty spojenými s potenciálem zemniče a předměty, které jsou zemněny vlastním zemničem nebo jiným způsobem (např. vodovodní potrubí). Tento rozdíl může být životu nebezpečný a ohrožuje izolaci elektrických zařízení jiskřením. Kromě toho může při zásahu bleskem, ať už do budovy nebo její blízkosti, dojít k indukovaní nebezpečných napětí do elektrických obvodů (viz účinky blesku). Pro omezení těchto případů se používá právě *vnitřní ochrany před bleskem*.



Obrázek 9 – Vyrovnání potenciálů

Základem tohoto systému je ochranné vyrovnání potenciálů, které se provede připojením všech vodivých předmětů v objektu na ochrannou ekvipotenciální přípojnici (viz obrázek 9). Tato přípojnice je spojena se systémem uzemnění a uzemněnými částmi všech vedení vstupujících do budovy (pláště kabelů, stínění sdělovací techniky). Aby při úderu blesku nedošlo ke vzniku nebezpečných napětí mezi uzemněnými předměty a vodiči silových a sdělovacích vedení, připojují se tyto vodiče k přípojnici přes oddělovací jiskřiště nebo jiné vhodné svodiče přepětí. (3)

K omezení vzniku indukovaných přepětí se používá *elektromagnetické stínění*. To spočívá ve vytvoření vodivého obalu kolem chráněného objektu (Faradayova klec). Pro dosažení kvalitního stínění budovy nebo místnosti je vhodné spojení stavebních kovových částí budovy – kovové střechy, fasády, ocelové armování v betonu, kovové potrubní systémy. Při vytvoření Faradayovy klece dojde k rozložení bleskového proudu na malé části, které prochází jednotlivými oky armování. Vzájemným působením polí z jednotlivých dílčích elektromagnetických polí se dosáhne značného utlumení celkového elektromagnetického pole.

Řízení rizika

V předchozí kapitole byly popsány parametry a účinky bleskových proudů na objekty, vodiče a elektrické přístroje. Je tedy zřejmé, že proti ničivým účinkům blesku je nutné se chránit. Výběr vhodné ochrany vždy vychází z analýzy rizika, které musí být sníženo na přijatelnou mez. S nástupem nového souboru norem ČSN EN 62305 od 1. února 2009 o ochraně před bleskem započala nutnost zabývat se podrobněji nejen chráněným objektem, jeho vnější i vnitřní strukturou a vybavením, ale i účelem jeho vystavení a způsobem jeho využití. Významnou roli hraje také prostředí, ve kterém je chráněný objekt zasazen. Všechny tyto faktory ovlivňují riziko, kterému jsou stavba, zařízení, lidé a zvířata ve stavbě a jejím přilehlém okolí vystaveni. Riziko (R) udává hodnota pravděpodobných průměrných ročních ztrát na lidských životech, veřejných službách (dodávky energie atd.), kulturním dědictví a hodnota ekonomických ztrát (přímé poškození stavby a zařízení, výpadky výroby, dodávek zboží a služeb). (11) Podle vypočteného rizika je následně rozhodnuto, zda je současná ochrana objektu dostačující a pokud ne, v jak velkém rozsahu je nutné ochranu zřídít. Postup pro provedení analýzy rizik je podrobně uveden ve druhé části práce v kapitole „Metodika pro volbu ochrany“.

Postup při realizaci ochrany

Pokud je po výpočtu rizika nutné ochranu před bleskem použít, postupuje se následujícím způsobem. Pro realizaci odpovídající ochrany je potřeba zařadit všechny přístroje a spotřebiče v objektu do příslušné kategorie podle toho, jaké impulzní výdržné napětí je pro ně bezpečné. Podle umístění jednotlivých přístrojů si virtuálně ohraničíme konkrétní oblasti v objektu, a tím definujeme zóny ochrany před bleskem LPZ (lightning protection zone). Na hranicích jednotlivých LPZ musí být použity přepěťové ochrany odpovídající kategoriím přepětí v jednotlivých zónách.

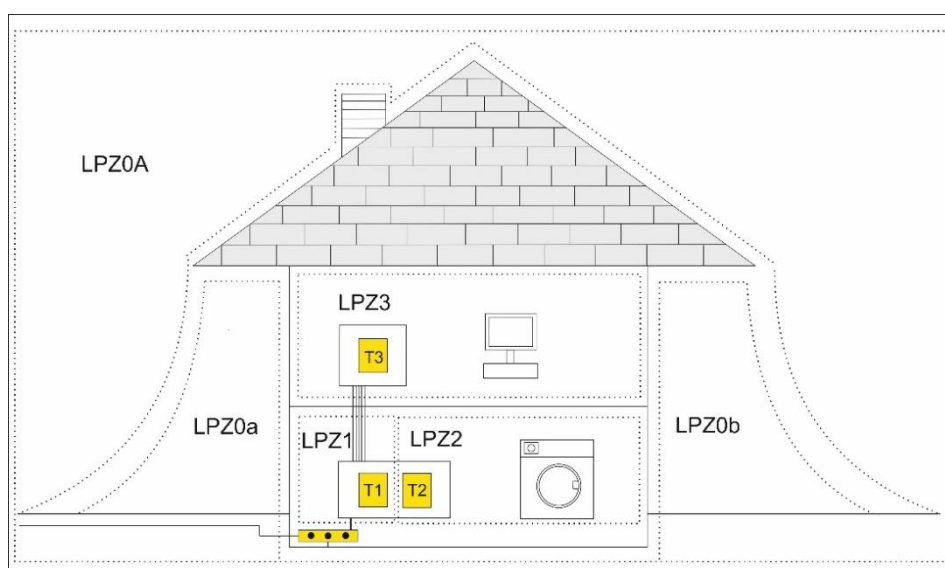
Nejdůležitější je volba přepěťové ochrany na hranici venkovní a vnitřní zóny. Její typ je závislý na předpokládané velikosti bleskového proudu. Volíme tzv. hladinu ochrany před bleskem LPL (viz tabulka 2). Ke stanovení LPL (lightning protection level) je zapotřebí poměrně mnoho informací, ať se jedná o použití objektu nebo o reálnou podobu elektroinstalace. Konkrétněji tuto problematiku řeší ČSN EN 62305-2, která se zabývá analýzou a řízením rizik spojených s přepětím způsobeným úderem blesku. Volba LPL není samozřejmě jediné opatření ke snížení rizika. Patří sem například i třída systému ochrany před bleskem (jímací soustava, svody, zemniče), stínění, výdržné napětí vnitřních systémů, systém detekce a hašení požáru apod. (10)

Úroveň ohrožení Hladina ochrany před bleskem LPL	Maximální parametry bleskového výboje Kritérium pro dimenzování LPS	
	Maximální vrcholová hodnota bleskového proudu I_{max}	Pravděpodobnost, že vrcholová hodnota proudu výboje bude nižší než maximální
I	200 kA	99 %
II	150 kA	98 %
III	100 kA	97 %
IV	100 kA	97 %

Tabulka 2 – Hladiny ochrany LPL

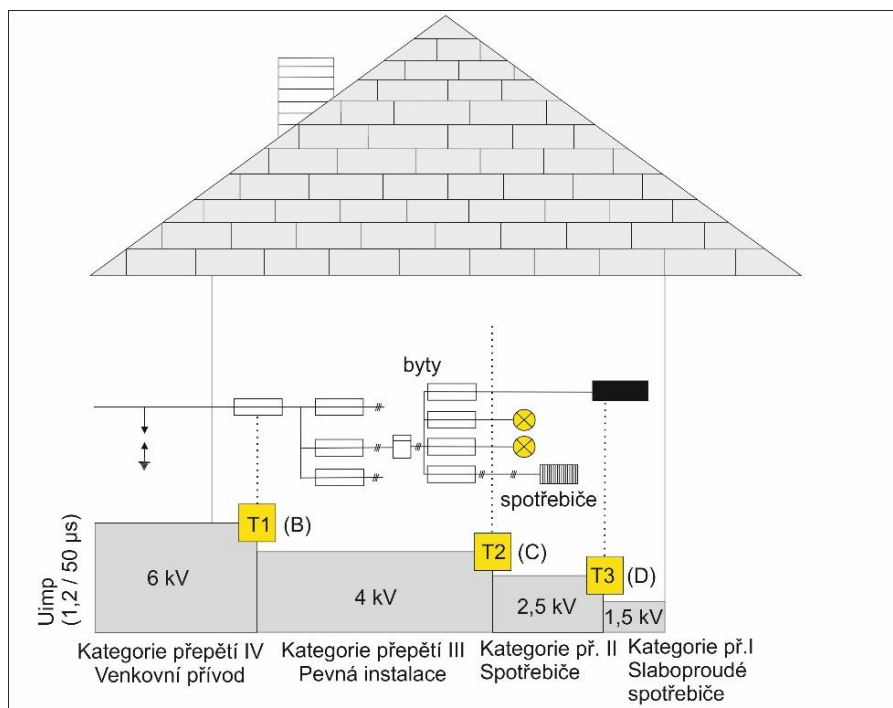
Dle ČSN EN 62305 jsou zóny ochrany před bleskem LPZ definovány následovně (viz obrázek 10):

- LPZ 0A – zóna, kde je ohrožení přímým úderem blesku a plným elektromagnetickým polem blesku. Vnitřní systémy mohou být vystaveny plnému nebo dílčímu impulznímu bleskovému proudu;
- LPZ 0B – 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 izolačním rozhraním a/nebo SPD na rozhraní. Prostorové stínění může zeslabit elektromagnetické pole blesku;
- LPZ 2, ..., n – zóna, kde může být impulzní proud dále omezen rozdělením proudu a izolačním rozhraním a/nebo dalšími SPD na rozhraní. Další prostorové stínění může být použito pro následné zeslabení elektromagnetického pole blesku. (5)



Obrázek 10 – Zóny ochrany před bleskem LPZ

Na vstupu objektu musí být zajištěna napěťová hladina přepětí max. 6 kV, což bývá většinou vyřešeno ochrannými prvky na vedení. Tato úroveň přepětí je však stále příliš vysoká a může poškodit kabely i instalované přístroje. Ke snížení přepětí se používá první stupeň přepětové ochrany „T1“ (třída B), který se umísťuje co nejbližší vstupu vedení do objektu. Tato ochrana sníží přepětovou hladinu na 4 kV nebo nižší. Takové přepětí už bez problémů vydrží pevná elektroinstalace. Druhým stupněm „T2“ (třída C) se sníží přepětová hladina na 2,5 kV a méně. Na tuto hodnotu je dimenzována většina spotřebičů, proto je přepětí neohroží. Třetím stupněm „T3“ (D) se zajišťuje ochrana velice citlivých spotřebičů. Tato jemná ochrana zaručuje, že přepětová hladina nepřesáhne 1,5 kV. Reaguje totiž na přepětí ze všech tří stupňů nejrychleji. Princip umístování svodičů přepětí je zřejmý z obrázku 11.



Obrázek 11 – Princip umístování svodičů

Přepětová ochranná zařízení SPD

Ochrana před přepětím je zajišťována pomocí přepětových ochran SPD. Ty se rozdělují do tří základních kategorií. Pro účelnou ochranu elektronických zařízení uvnitř budovy se využívá kombinace všech tří typů (viz zóny ochrany LPZ). Každý tento svodič přepětí sníží přepětí na stanovenou hodnotu, což má za následek postupnou eliminaci přepětí. Jako SPD se nejčastěji využívají přepětové ochrany na bázi **jiskřiště, varistoru a supresorové diody**. Každý z těchto prvků zajišťuje odlišnou ochranu před přepětím, podle čehož disponují rozdílnými parametry. (10)

SPD typu 1 (třída B)

Svodič přepětí 1. stupně, který je nazýván jako hrubá ochrana objektu, je umístován na rozhraní LPZ 0 a LPZ 1. Je aplikován na síť a vodiče v oblasti vstupu do chráněného objektu, z čehož vyplývá, že se obvykle umísťuje do hlavního rozvaděče a zachytí největší část přepětové vlny.

Tato přepětová ochrana se vyrábí ve formě svodu na bázi jiskřiště. Jeho princip je totožný s principem koordinačního jiskřiště (viz ochrana vedení). Podle konstrukčního provedení je možné rozdělení jiskřišť na tzv. otevřená a uzavřená. Tvar elektrod, materiál a vzduchová mezera mezi elektrodami určují ochrannou úroveň, svodovou schopnost a chování jiskřiště při zhášení následných proudů.

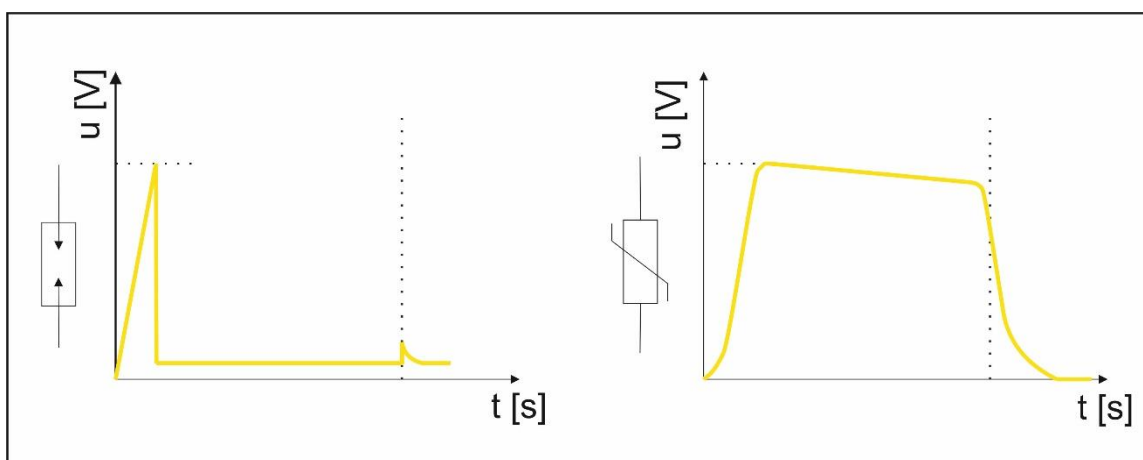
Otevřená jiskřiště mají vynikající svodové schopnosti, I_{imp} až 50 kA (I_{imp} je impulzní bleskový proud se zkušební tvarem vlny 10/350 μ s, který svodiče přepětí musí bez poškození nejméně dvakrát odvést). Naopak jejich nedostatkem je vyšlehávání žhavého plazmatu z pouzdra při jejich aktivaci bleskovým proudem, což přináší problémy z hlediska požární bezpečnosti.

Uzavřená jiskřiště tento problém řeší za cenu snížení parametru samočinně zhášeného proudu. (15)

SPD typu 2 (třída C)

Tato zařízení jsou často nazývána jako střední ochrana proti přepětí. SPD typu 2 se umísťují na rozmezí ochranných zón LPZ 1 a LPZ 2, nejčastěji do podružného rozvaděče. Při odpovídajících podmínkách mohou být instalovány do hlavního rozvaděče i bez předřazení prvního stupně. Svodiče třídy C jsou konstruované na bázi varistoru, tedy prvku, jehož hodnota elektrického odporu se prudce snižuje s přibývajícím napětím. (viz napěťově závislé odpory). Elektrické hodnoty jsou dány především použitými materiály, jejich zrnitostí a rozměry tělesa. V současnosti moderní technologické postupy umožňují výrobu varistorů se svodovými schopnostmi, I_{imp} až 20 kA. Hlavní předností je především nízká cena a kratší odezva. Porovnání se svodičem přepětí na bázi jiskřiště popisuje obrázek 12.

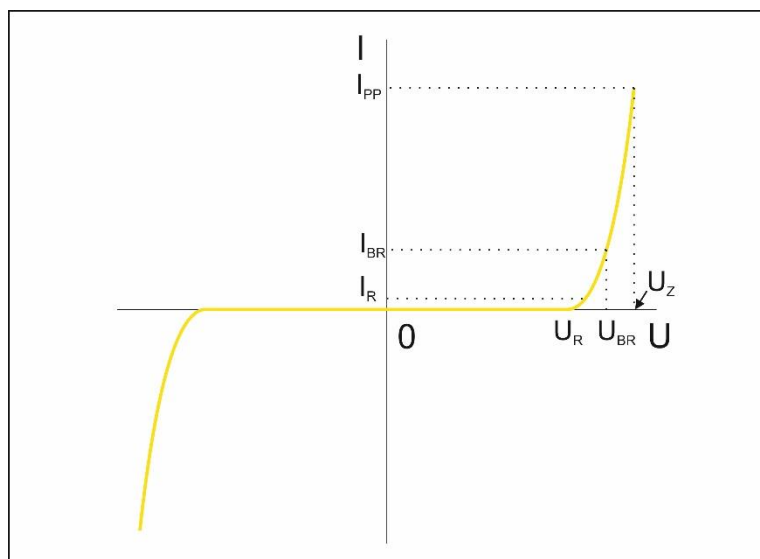
Většinou se SPD typu 2 instalují do podružného rozvaděče za svodiče, které sníží přepětí a omezí energii přepěťové vlny. Existují také moduly obsahující svodič přepětí třídy 1 i 2, které nesou označení SPD B+C. (15)



Obrázek 12 – Přepětí na jiskřišti a varistoru

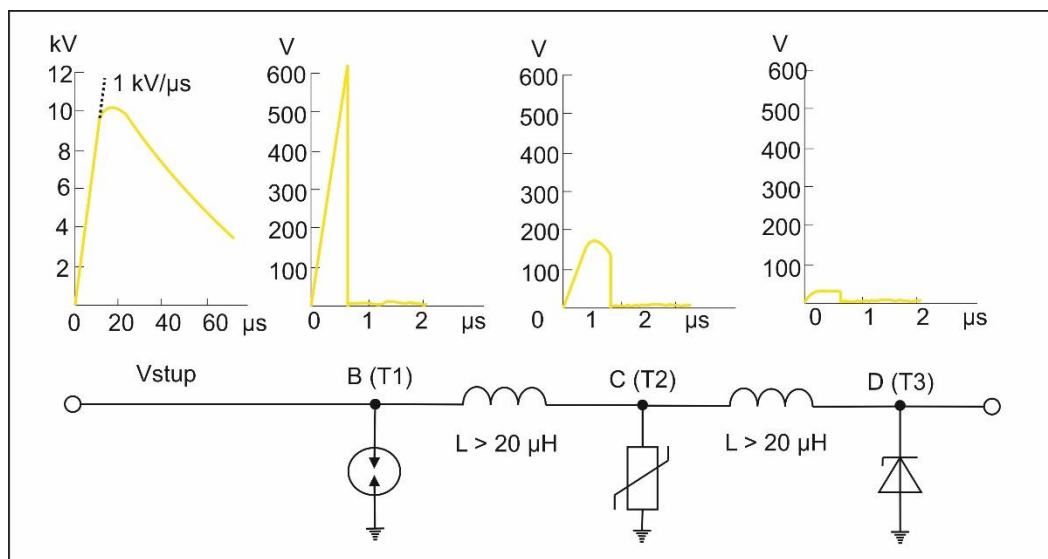
SPD typu 3 (třída D)

Pro zabezpečení úplné ochrany proti přepětí se využívá třetího typu SPD. Tato přepěťová ochrana se využívá k ochraně velmi citlivých elektronických zařízení tím, že se připojuje těsně před ně. Je-li délka vedení mezi typy T2 a T3 menší než 5 metrů, není nutno tento typ svodiče použít a ochranu dostatečně zajistí typ 2. Pokud ne, mohlo by se ve vodičích zvýšit napětí (indukcí) nad přijatelnou úroveň a je tedy nutné tento typ použít. (16)



Obrázek 13 – VA charakteristika supresorové diody

Tyto SPD jsou reprezentovány Zenerovými diodami, tedy diodami určenými k zapojení v závěrném směru (snesou opakovaný průraz v závěrném směru). Pro ochranu vůči rychlým přepětovým impulzům byly vyvinuty speciální křemíkové lavinové diody, které proti klasickým Zenerovým diodám vykazují vyšší proudovou zatížitelnost v závěrné Zenerově oblasti, kratší reakční dobu (řádově jednotky až desítky ps) a schopnost absorbovat větší energii signálu. Dodávají pod názvem supresorové diody, příp. TAZ diody (Transient Absorbing Zener), transil nebo Transzorb (General Semiconductor). Supresorové diody jsou obvykle pouzřeny jako pár diod zapojených anti sériově proti sobě. Vzniká tak bipolární součástka se symetrickou A-V charakteristikou na obrázku 13. Rozsah ochranných napětí činí u supresorových diod obvykle $6 \div 440$ V. Podobně jako varistory vykazují i supresorové diody značnou vlastní kapacitu (až 15 000 pF), která ztěžuje jejich použití jako ochranného prvku ve vysokofrekvenčních systémech (velká kapacita diody způsobuje velký útlum přenášeného užitečného vysokofrekvenčního signálu). Pro takové aplikace je proto tato ochrana doplněna o vysokofrekvenční filtr s velmi rychlou odezvou, potlačující vf rušení v pásmu 150 kHz až 30 MHz a schopností svádět pulsní proudy až 10 kA. (16) Supresorová dioda se chová stejně jak v propustném směru, tak v nepropustném směru. Za normálních provozních podmínek je supresorová dioda v nevodivém stavu. Po překročení průrazného napětí U_{BR} začíná být vodivou. Za normálního provozu dioda pracuje při napětí menším, než je napětí jmenovité U_R .



Obrázek 14 – Kombinace 3 stupňů přepětových ochran

Kombinací všech 3 typů SPD se tedy přepětí eliminuje na přijatelnou hodnotu, což ukazuje obrázek 14. Ne ve všech případech je však nutné použití všech typů svodičů. Pro ochranu běžných domácích spotřebičů dostačují svodiče typu B a C, často osazované v kombinaci B+C v jednom modulu. Rozsah ochrany se volí podle analýzy rizika s ohledem na možné ztráty. Detailnější popis tohoto procesu je uveden v kapitole metodika pro volbu ochrany.

Metodika pro volbu ochrany

Rozhodovací kritéria pro volbu ochrany

V této části se budu zabývat rozhodnutím, zda je ochrana před bleskem skutečně nutná, nebo se z ekonomického hlediska vyplatí spoléhat na to, že blesk neudeří. I v případě, že se pro ochranu rozhodneme, hraje také obrovskou roli její rozsah. V krajním případě totiž může nastat situace, že náklady na ochranná opatření jsou vyšší, než náklady na výstavbu samotného objektu, jako je tomu např. při výstavbě fotovoltaické elektrárny. Pokud se naopak ve stavbě nevyskytuje větší množství elektronických zařízení, je možné použít pouze vnější systém ochrany, který budovu ochrání před nejnebezpečnějším přímým úderem a následným požárem. Rozhodování ještě stěžuje fakt, že ani budova s nainstalovaným systémem ochrany není před bleskem úplně chráněna. V roce 2014 došlo v ČR k vyhoření třiceti budov v důsledku úderu blesku, přičemž 9 z nich, tedy 30 %, bylo chráněno hromosvodem. Na druhou stranu, celková škoda byla 9,6 mil. Kč, z čehož 8,1 mil. Kč bylo na objektech nechráněných hromosvodem. (13) Je tedy vidět, že ochrana před bleskem alespoň minimalizuje ztráty, pokud už jim nedokáže zabránit úplně.

Další věcí je rovněž otázka, v jakých případech jsme ze zákona povinni budovu systémem ochrany vybavit. Povinností při výstavbě jakékoli stavby je řídit se stavebním zákonem a vyhláškou o technických požadavcích na zařízení:

Ochrana před bleskem

Ochrana před bleskem se musí zřizovat na stavbách a zařízeních tam, kde by blesk mohl způsobit

- ohrožení života nebo zdraví osob, zejména ve stavbě pro bydlení, stavbě s vnitřním shromažďovacím prostorem, stavbě pro obchod, zdravotnictví a školství, stavbě ubytovacích zařízení nebo stavbě pro větší počet zvířat,
- poruchu s rozsáhlými důsledky na veřejných službách, zejména v elektrárně, plynárně, vodárně, budově pro spojová zařízení a nádraží,

- c) výbuch zejména ve výrobě a skladu výbušných a hořlavých hmot, kapalin a plynů,
- d) škody na kulturním dědictví, popřípadě jiných hodnotách, zejména v obrazárně, knihovně, archivu, muzeu, budově, která je kulturní památkou,
- e) přenesení požáru stavby na sousední stavby, které podle písmen a) až d) musí být před bleskem chráněny,
- f) ohrožení stavby, u které je zvýšené nebezpečí zásahu bleskem v důsledku jejího umístění na návrší nebo vyčnívá-li nad okolí, zejména u továrního komína, věže, rozhledny a vysílací věže.

Pro tyto stavby musí být proveden výpočet řízení rizika (viz níže) podle normových hodnot k výběru nejvhodnějších ochranných opatření stavby. (14)

Obecně lze říci, že ochranu před bleskem pořizovat nemusíme, protože není daná zákonem. Předepsaná je pouze v případě, kdy se jedná o bezpečnost nebo zájem veřejnosti. U soukromých budov je rozhodnutí čistě na vlastníkově. Na první pohled by se mohlo zdát, že spoléhat na teorii pravděpodobnosti a doufat že k zásahu nedojde, není úplně nejrozumnější řešení. Na druhou stranu, pokud je riziko opravdu minimální, může výhodněji, než instalace ochrany, vyjít uzavření pojistky s pojišťovnou, která danou situaci akceptuje. Instalace hromosvodu totiž překvapivě není podmínkou pro uzavření smlouvy o pojištění objektu. Je-li budova zkolaudována bez systému ochrany před bleskem, pojišťovna ji také nevyžaduje.

K vyhodnocení velikosti hrozící škody a možnosti určení ekonomicky nejefektivnějšího řešení slouží analýza rizik dle normy ČSN EN 62305-2. Riziko je v ní definované jako pravděpodobné průměrné roční ztráty na stavbě způsobené úderem blesku, a závisí na:

- počtu úderů blesku za rok ovlivňujících stavbu;
- pravděpodobnosti poškození jedním působením úderu blesku;
- průměrném rozsahu následných ztrát.

Na základě této analýzy dochází k rozhodnutí, zda je ochrana nutná, a pokud ano, na jaké technické úrovni s uvažováním nákladů instalace a případné ekonomické ztráty v objektu. České technické normy nejsou, pokud na ně neodkazují vyhlášky či zákony, obecně závazné, proto se lze řídit při výpočtu rizika i jinými předpisy, které však musí být v souladu s mezinárodními normami.

Princip analýzy rizik

Škody a ztráty

Základní příčinou všech poškození je bleskový proud. Rozlišujeme 4 situace úderu blesku, tedy úder do stavby S1, v blízkosti stavby S2, do inženýrských sítí připojených ke stavbě S3 a úder v blízkosti těchto sítí S4. Podrobněji byly tyto situace popsány v části „úder blesku do budov – elektromagnetické účinky“. Podle místa úderu blesku vznikají různé typy škod, které se pro praktické ocenění rizika rozdělují do třech základních skupin:

- D1: úraz živých bytostí elektrickým proudem; (nastávají při S1 a S3)
- D2: hmotná škoda; (nastávají při S1 a S3)
- D3: porucha elektrických a elektronických systémů. (nastávají při S1, S2, S3 i S4)

Každý typ škody, sám nebo v kombinaci s jinými, může vyvolat různé následné ztráty, které stejně jako škody závisí na vlastnostech chráněného objektu, a také na jeho obsahu. Uvažují se následné typy ztrát:

- L1: ztráty na lidských životech (i poranění s trvalými následky); (vzniklé škodami D1, D2 i D3)
- L2: ztráty na veřejných službách; (vzniklé škodami D2 a D3)
- L3: ztráty na kulturním dědictví; (vzniklé škodou D2)
- L4: ztráty ekonomické hodnoty (stavby, obsahu a ztráta činnosti). (vzniklé škodami D1, D2 i D3)

Riziko a jeho součásti

Pro každý typ ztrát, které mohou ve stavbě takto nastat, musí být oceněno odpovídající riziko, tedy R_1 , R_2 , R_3 a R_4 . Riziko R je poměrná hodnota pravděpodobných průměrných ročních ztrát. Pro jeho ocenění musí být definovány a vypočítány jeho dílčí rizika, závisující na příčině a typu škody. Dílčí součásti celkového rizika R pro jednotlivé situace úderu jsou následující:

Součásti rizika pro S1

R_A – vztahuje se k úrazu živých bytostí elektrickým proudem v důsledku dotykových a krokových napětí.

R_B – vztahuje se k hmotné škodě způsobené jiskřením uvnitř stavby, které iniciuje požár nebo výbuch.

R_C – vztahuje se k poruše vnitřních systémů způsobené LEMP.

Součásti rizika pro S2

R_M – vztahuje se k poruše vnitřních systémů způsobené LEMP.

Součásti rizika pro S3

R_U – vztahuje se k úrazu živých bytostí elektrickým proudem v důsledku dotykových a krokových napětí způsobených bleskovými proudy injektovanými do vedení vstupujícího do stavby.

R_V – vztahuje se k hmotné škodě způsobené jiskřením mezi venkovní instalací a kovovými částmi, které iniciuje požár nebo výbuch.

R_W – vztahuje se k poruše vnitřních systémů způsobené indukovanými přepětími ve vstupním vedení a přenesenými do stavby.

Součásti rizika pro S4

R_Z – vztahuje se k poruše vnitřních systémů způsobené indukovanými přepětími ve vstupním vedení a přenesenými do stavby.

Z těchto dílčích rizik jsou složena zmíněná rizika R_1 – R_4 :

- R_1 : Riziko ztrát na lidských životech $R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$
- R_2 : Riziko ztrát na veřejných službách $R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2}$
- R_3 : Riziko ztrát na kulturním dědictví $R_3 = R_{B3} + R_{V3}$
- R_4 : Riziko ztrát ekonomických hodnot $R_4^1 = R_{A4} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4}$

V dalším kroku se takto vypočtená hodnota rizika porovná s hodnotou přípustného rizika R_T . Pokud je $R \leq R_T$, není další ochrana před bleskem nutná. Pokud je ale $R > R_T$ musí být přijata ochranná opatření pro snížení na $R \leq R_T$ pro všechna rizika, kterým je stavba podrobena. Po přidání ochranných opatření se opět provede analýza a tento proces se opakuje, dokud $R \leq R_T$. Za stanovení hodnoty přípustného rizika zodpovídá orgán, který má pro to kompetenci. Tam, kde údery blesku zahrnují ztráty na lidských životech nebo ztráty sociálních nebo kulturních hodnot, jsou typické hodnoty přípustného rizika R_T uvedeny v tabulce 3.

Typy ztrát		$R_T (Y^{-1})$
L1	Ztráty na lidských životech nebo trvalé následky úrazu	10^{-5}
L2	Ztráta veřejné služby	10^{-3}
L3	Ztráta kulturního dědictví	10^{-4}

Tabulka 3 – Typické hodnoty přípustného R_T

Pro ztráty ekonomických hodnot L4 se provádí porovnání nákladů na ochranu před bleskem a případných ztrát, jak je podrobněji popsáno v části „ocenění efektivnosti nákladů na ochranu“.

¹ Riziko ekonomických ztrát se vyhodnocovat nemusí.

Podle podílu každé součásti rizika v celkovém riziku R se provádí výběr nejvhodnějších ochranných opatření. Pro každý typ ztrát existuje řada ochranných opatření, která jednotlivě nebo v kombinaci, splňují podmínku $R \leq R_T$. Přijaté rozhodnutí musí být vybráno s ohledem na technická a ekonomická hlediska.

Určení hodnoty rizik

Všechna rizika R_A-R_Z , jak byly popsány v kapitole „Riziko a jeho součásti“, jsou dány následujícími rovnicí:

$$R_X = N_X * P_X * L_X$$

N_X ... počet nebezpečných událostí za rok [-]

P_X ... pravděpodobnost poškození stavby [-]

L_X ... ztráty vzniklé daným typem škody

Počet N_X událostí za rok je dán počtem úderů blesku do země (N_G) a fyzickými parametry daného objektu, jeho okolím a připojenými vedeními. Parametr N_G , který se získá z mapy rozložení úderů blesku, se tedy násobí ekvivalentní sběrnou plochou stavby, upravenou různými korekčními činiteli pro fyzické vlastnosti stavby. Jestliže není tato mapa k dispozici, může být N_G v mírných pásmech odhadnuto podle vztahu: $N_G = 0,1 T_D$, kde T_D je počet bouřkových dnů za rok. Tato hodnota se získává z izokeraunických map. Vyhodnocují se nebezpečné události způsobené úderem do stavby, v její blízkosti, úderem do vedení vstupujícího do stavby, úderem v jeho okolí a úderem do stavby, ke které je vedení připojeno.

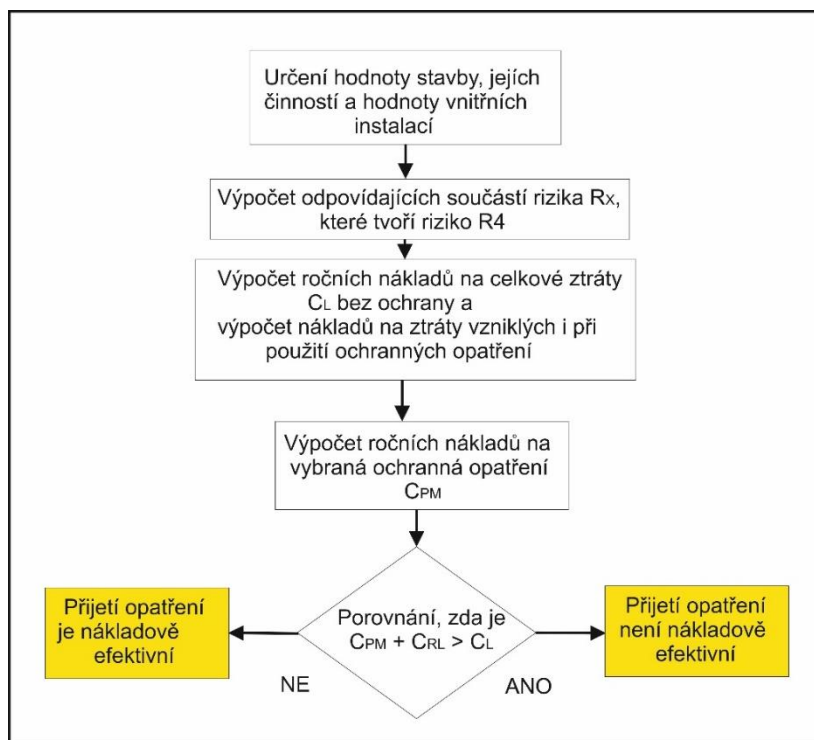
Pravděpodobnost P_X poškození stavby závisí na vlastnostech chráněné stavby a připojených vedení a na použitých ochranných opatřeních. Vyhodnocuje se pravděpodobnost, že úder do místa S1–S4 způsobí úraz živých bytostí, hmotnou škodu nebo poruchu vnitřních systémů.

Ztráty L_X , jak byly popsány v „škody a ztráty“ mají být vyhodnoceny projektantem, který je navrhne podle příslušné národní komise. Ztráty se liší podle typu škod a jsou ovlivněny použitím objektu, přítomností osob, typem poskytovaných služeb, hodnotou majetku a opatřeními učiněnými pro omezení ztrát. Přesné výpočty se pro jednotlivé koeficienty X liší podle místa úderu blesku (S1–S4) a podle typů škod (D1–D3), jsou dány normou ČSN EN 62305 a v této části se jimi nebudu dopodrobna zabývat. Detailní postup bude v případě potřeby uveden v praktické části.

K provedení analýzy rizika existuje řada softwarů, které projektantovi umožňují zadat veškeré vstupní parametry a následně stanovit požadovaná rizika. V druhém kroku je potom možné navrhnout ochranu tak, aby se riziko snížilo na přijatelnou úroveň. Jedním z takových programů je DEHNSupport firmy Dehn + Söhne. V této aplikaci je možné i porovnání několika variant ochrany a jejich ekonomické zhodnocení, čehož využijí při návrhu ochrany pro vlastní budovu.

Ocenění efektivity nákladů na ochranu

Jak bylo nastíněno v úvodu této kapitoly, kromě ochrany stavby před bleskem je z ekonomického pohledu také důležité zhodnotit přínosy instalace ochranných opatření za účelem snížení ekonomických ztrát L_4 , i když se tyto ztráty vyhodnocovat nemusí. Odhad součástí rizika R_4 umožňuje porovnat náklady na ekonomické ztráty s přijatými ochrannými opatřeními a bez nich, což je důležitým ukazatelem pro každého, kdo chce minimalizovat náklady spojené s ochranou před bleskem. Zjednodušený postup při vyhodnocení efektivity nákladů stanovený normou ČSN EN 62305 je naznačen na obrázku 15. Tento způsob ohodnocení efektivity investice však samozřejmě není jediný použitelný a v některých případech nemusí vystihovat řešený problém. Proto bude ve třetí části práce použit i jiný způsob hodnocení investic.



Obrázek 15 – Vyhodnocování efektivnosti ochrany

Výpočet efektivnosti nákladů

Vlastní výpočet se provádí následujícím způsobem. Náklady na celkové ztráty C_L ve stavbě bez ochrany před bleskem mohou být určeny z následující rovnice:

$$C_L = \Sigma C_{LZ} = R_4 * C_t$$

C_{LZ} ... náklady na celkové ztráty v zóně (viz „zóny ochran LPZ“) [Kč]

R_4 ... riziko ztrát hodnot bez uplatnění ochranných opatření [-]

C_t ... celková hodnota stavby (budova, obsah, činnosti atd.) [Kč]

Náklady na ztráty vzniklé i při použití ochranných opatření C_{RL} (zbytkové náklady) mohou být vypočteny z rovnice:

$$C_{RL} = \Sigma C_{RLZ} = R_4' * C_t$$

C_{RLZ} ... zbytkové náklady na celkové ztráty v zóně (viz „zóny ochran LPZ“) [Kč]

R_4' ... riziko ztrát hodnot ve stavbě, v níž jsou uplatněna ochranná opatření [-]

Roční náklady na ochranná opatření C_{PM} jsou vypočteny podle rovnice:

$$C_{PM} = C_p * (i + a + m)$$

C_p ... cena ochranných opatření

i ... úroková míra

a ... odpisová míra

m ... míra údržby

Roční úspora S_M v penězích je potom:

$$S_M = C_L - (C_{PM} + C_{RL})$$

Jestliže je $S_M > 0$, je ochrana ekonomicky efektivní. Tento postup lze aplikovat na více možností ochranných opatření a podle roční úspory stanovit nejvýhodnější řešení, což bude právě úkolem ve třetí části této práce.

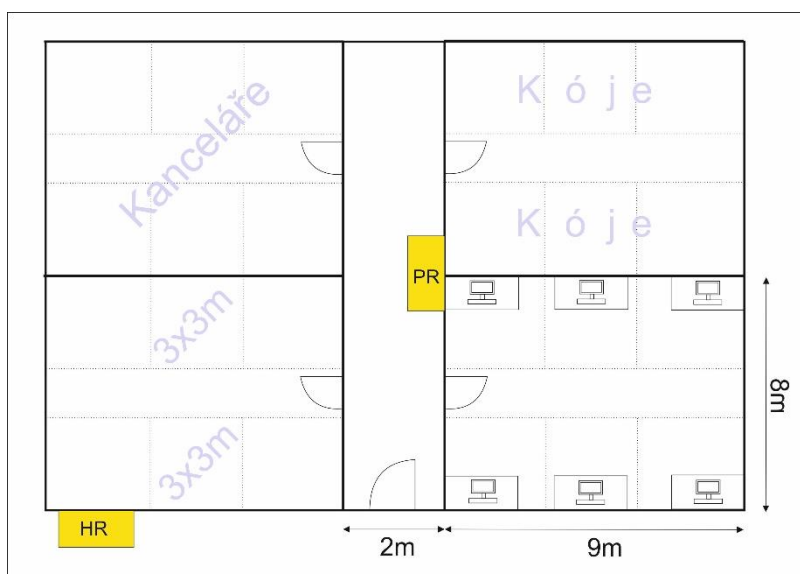
Návrh a zhodnocení ochrany objektu

V této části práce bude na konkrétním případě předveden výpočet analýzy rizika, návrh různých ochran před bleskem pro silové vedení a jejich porovnání z ekonomického hlediska. Jak bylo uvedeno v předchozím textu, lze analýzu rizika a výběr ochran možné provést jak ručně v souladu s normou ČSN EN 62305, tak pomocí výpočetního softwaru. Proto bude pro jednotlivé možnosti ochran demonstrován jak klasický, tak moderní způsob.

Případová studie

Jako objekt pro návrh ochrany a její zhodnocení byla vybrána fiktivní, čtyřpatrová, osamoceně stojící budova ve střežocheském kraji o rozměrech délka $L = 16$ m, šířka $W = 20$ m, výška $H = 14$ m. Uvažuji případ, kdy dochází k rekonstrukci starší průmyslové budovy na kancelářskou, obsahující větší množství citlivé elektroniky. Budova je již vybavena systémem vnější ochrany LPS a odpovídajícím pospojováním a riziko R_1 ztrát na lidských životech je tedy na přijatelné úrovni. Z toho důvodu je zapotřebí pouze rozhodnout, zda budovu vybavit vnitřním systémem ochrany SPD, popřípadě v jakém rozsahu. Provedu tedy analýzu rizika pouze pro riziko R_4 .

V každém patře kancelářské budovy se nachází chodba a 4 místnosti. V každé místnosti je 6 počítačů s příslušenstvím v hodnotě 50 000 Kč. Dohromady tedy $4 \times 4 \times 50\,000 = 4\,800\,000$ Kč. Ostatní vybavení kanceláří, jako jsou tiskárny, skartovačky a projekční technika je v hodnotě 1 200 000 Kč. Cena vnitřních systémů C_3 , včetně ztráty ušlého zisku činí 1 100 000 Kč. Celková peněžní hodnota stavby C_1 je 7 100 000 Kč. Řez jedním patrem a příklad možného rozmístění přístrojů ukazuje obrázek 16.



Obrázek 16 – Příklad rozmístění přístrojů

Řešení

Výpočet Rizika R_4 pro nechráněný objekt

Nejprve provedu výpočet rizika podle ČSN EN 62305 pro nechráněnou stavbu, tedy bez koordinovaného systému svodičů přepětí SPD.

Jak bylo uvedeno v části „princip analýzy rizik“, odpovídá riziko R_4 součtu dílčích rizik:

$$R_4 = R_{A4} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4}$$

Tato dílčí rizika jsou vždy dále dána součinem pravděpodobnosti poškození, počtem událostí a vzniklých ztrát, jak bylo v této části rovněž popsáno:

$$R_X = N_X \times P_X \times L_X$$

Jelikož je stavba vybavena systémem LPS, lze riziko R_{A4} a R_{U4} zanedbat a rizika požáru R_{B4} a R_{V4} jsou omezena na přijatelnou hodnotu hasicími přístroji. Výsledné riziko R_4 je tedy:

$$R_4 = R_{C4} + R_{M4} + R_{W4} + R_{Z4}$$

Pro jednotlivá dílčí rizika platí:

$$R_{C4} = N_D \times P_C \times L_C$$

N_D ... počet nebezpečných událostí způsobených úderem do stavby

P_C ... pravděpodobnost poruchy vnitřních systémů (úderem do stavby)

L_C ... ztráty související s poruchou vnitřních systémů (úderem do stavby)

$$N_D = (N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6})$$

$$N_D = 2,5 \times (16 \times 20 + 2 \times (3 \times 14)) \times (16 + 20) + \pi \times (3 \times 14)^2 \times 1 \times 10^{-6}$$

$$N_D = 0,0222$$

N_G ... hustota úderů blesku do země (viz „princip analýzy rizik“)

A_D ... sběrná plocha stavby ($L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times 16^2)$)

C_D ... činitel polohy (pro osamocenou budovu = 1)

$$P_C = (P_{SDP} \times C_{LD}) = 1 \times 1 = 1$$

P_{SDP} ... koordinovaná ochrana SPD (bez ochrany = 1)

C_{LD} ... činitel pro stínění při úderu blesku do vedení (bez stínění = 1)

$$L_C = \left(L_O \times \frac{C_s}{C_t} \right) = \left(0,01 \times \frac{1100000}{7100000} \right) = 1,5492 \times 10^{-3}$$

L_O ... typická střední hodnota majetku porušeného poškozením vnitřních systémů (pro kancelář = 0,01)

C_s ... peněžní hodnota vnitřních systémů

C_t ... celková peněžní hodnota stavby

$$R_{C4} = 0,0222 \times 1 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{3,441 \times 10^{-5}}$$

$$R_{M4} = N_M \times P_M \times L_M$$

N_M ... počet nebezpečných událostí způsobených úderem v blízkosti stavby

P_M ... pravděpodobnost poruchy vnitřních systémů (úderem v blízkosti stavby)

L_M ... ztráty související s poruchou vnitřních systémů (úderem v blízkosti stavby)

$$N_M = N_G \times A_M \times 10^{-6} = 2,5 \times (2 \times 500 \times (16 + 20) + \pi \times 500^2) \times 10^{-6}$$

$$N_M = 2,053$$

A_M ... sběrná oblast úderů se zásahy v blízkosti stavby ($2 \times 500 \times (L + W) + \pi \times 500^2$)

$$P_M = (P_{SPD} \times P_{MS}) = 1 \times 1 = 1$$

P_{MS} ... činitel závislý na stínění, instalaci a výdržném napětí zařízení

$$L_M = \left(L_O \times \frac{C_s}{C_t} \right) = \left(0,01 \times \frac{1100000}{7100000} \right) = 1,5492 \times 10^{-3}$$

$$R_{M4} = 2,053 \times 1 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{3,181 \times 10^{-3}}$$

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W$$

N_L ... počet nebezpečných událostí způsobených úderem do vedení

N_{DJ} ... počet nebezpečných událostí způsobených úderem do vedlejší budovy (osamocená stavba = 0)

P_W ... pravděpodobnost poruchy vnitřních systémů (úderem do připojeného vedení)

L_W ... ztráty související s poruchou vnitřních systémů (úderem do připojeného vedení)

$$N_L = N_G \times A_L \times C_1 \times C_E \times C_T \times 10^{-6}$$

$$N_L = 2,5 \times (40 \times 1000) \times 0,5 \times 0,5 \times 1 \times 10^{-6} = 0,025$$

A_L ... sběrná oblast pro údery do vedení (40 x délka vedení 1000m)

C_1 ... činitel instalace vedení (pro kabelové vedení = 0,5)

C_E ... činitel prostředí (pro předměstské = 0,5)

C_T ... činitel typu vedení (pro silové vedení = 1)

$$P_W = P_{SPD} \times P_{LD} \times C_{LD} = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

P_{LD} ... pravděpodobnost snížení P_W v závislosti na charakteristikách vedení a výdržném napětí zařízení

$$L_W = \left(L_O \times \frac{C_s}{C_t} \right) = \left(0,01 \times \frac{1100000}{7100000} \right) = 1,5492 \times 10^{-3}$$

$$R_{W4} = 0,025 \times 1 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{3,873 \times 10^{-5}}$$

$$R_Z = N_1 \times P_Z \times L_Z$$

N_1 ... počet nebezpečných událostí způsobených údery v blízkosti vedení vstupujícího do stavby

P_Z ... pravděpodobnost poruchy vnitřních systémů (údery v blízkosti vedení)

L_Z ... ztráty související s poruchou vnitřních systémů (údery v blízkosti vedení)

$$N_1 = N_G \times A_1 \times C_1 \times C_E \times C_T \times 10^{-6}$$

$$N_1 = 2,5 \times (4000 \times 1000) \times 0,5 \times 0,5 \times 1 \times 10^{-6} = 2,5$$

A_1 ... sběrná oblast úderů do země v blízkosti sítě (4000 x délka vedení 1000m)

$$P_Z = P_{SPD} \times P_{LI} \times C_{LI} = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

P_{LI} ... pravděpodobnost poruchy vnitřních systémů (údery do blízkosti vedení) závisující na jejich charakteristikách (pro silové vedení = 1)

C_{LI} ... je činitel závislý na stínění a podmínkách izolování vedení (pro nestíněné kabelové vedení = 1)

$$L_Z = \left(L_O \times \frac{C_s}{C_t} \right) = \left(0,01 \times \frac{1100000}{7100000} \right) = 1,5492 \times 10^{-3}$$

$$R_{Z4} = 2,5 \times 1 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{3,873 \times 10^{-3}}$$

$$R_4 = 3,441 \times 10^{-5} + 3,181 \times 10^{-3} + 3,873 \times 10^{-5} + 3,873 \times 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{R_4 = 7,142 \times 10^{-3}}}$$

Výběr ochranných opatření

Nyní budou popsány možnosti snížení rizika R_4 . Jak bylo uvedeno v předchozím textu, výběru ochranných opatření předchází zařazení objektu do hladiny ochrany před bleskem LPL I–IV. Podle vybrané hladiny se následně volí vhodné přepětové ochrany, které svými parametry splňují požadavky pro zařazení do dané hladiny. Tímto parametrem je maximální předpokládaný proud, který svodič dokáže odvést. Vychází se z předpokladu, že přes zemniče hromosvodu a elektroinstalace se do elektroinstalace zaveče 50 % bleskového proudu (viz. tabulka 2). Např. po zařazení do LPL I musí tedy být svodič schopen svést proud o vrcholové hodnotě I_{max} 100 kA, zatímco po zařazení do LPL III–IV 50 kA. Svodová schopnost jednoho pólu I_{1p} je dána vzorcem:

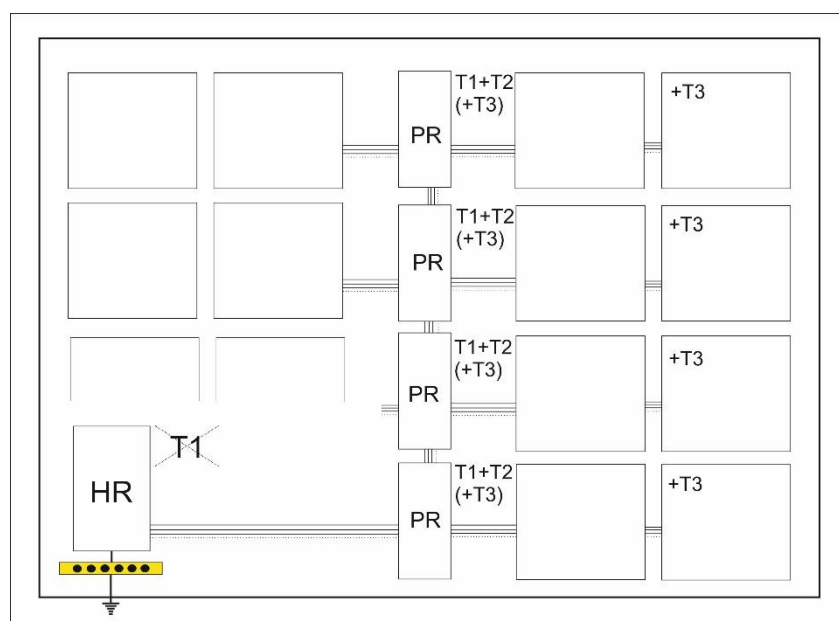
$$I_{1p} = \frac{0,5 \times I_{max}}{n}$$

n ... počet vodičů v napájecí síti

Např. na jeden dílčí vodič v nejběžnější síť TN-C potom připadá 1/4 tohoto proudu. Volba hladiny LPL závisí na rozhodnutí majitele chráněné budovy, který tím tak reguluje kvalitu a cenu ochranných opatření. Provedu tedy návrh a porovnání ochrany pro budovu zařazenou do hladiny LPL III IV a do hladiny LPL II.

Návrh ochrany pro budovu v LPL III-IV

Jako svodič bleskových proudů typu 1 po zařazení do LPL III-IV tedy postačí přístroj s minimální svodovou schopností 12,5 kA/pól. Tyto parametry splňuje např. kombinovaný svodič typu 1 DEHNshield – DSH TNC 255 (18). Slovo kombinovaný v tomto případě znamená, že při správném zapojení plní naráz funkce svodičů T1 + T2 + T3. Není tedy nutné instalovat samostatný typ 1 do hlavního rozvaděče a postačí umístění této kombinované přepětové ochrany do podružných rozvaděčů. Pro zadanou budovu to znamená umístění jednoho DEHNshield do podružného rozvaděče do každého patra. Podmínkou takového zapojení je ale maximální vzdálenost od koncového zařízení < 5 m, což pro 4 místnosti v patře o rozměrech 16x20m nemůže být zajištěno. Nad vzdálenost 5 m plní svodič pouze funkce typu T1 + T2. Proto je nutné před vzdálenější koncová zařízení doplnit svodiče přepětí typu T3. Těmi jsou např. DEHNflex – DFL M 255, které jsou potřeba 3 pro každou místnost, celkem tedy 48 přístrojů. Rozmístění svodičů naznačuje obrázek 17.



Obrázek 17 – Rozmístění svodičů v LPL III-IV

Cena ochranných opatření

Celková cena vybraných ochranných opatření je zachycena v tabulce 4. (19)

Přístroj	Cena/ks	Počet kusů	Cena
DSH TNC 255	6 363,80 Kč	4	25 455 Kč
DFL M 255	1 369,90 Kč	48	65 755 Kč
Cena celkem			91 210 Kč

Tabulka 4 – Cena ochranných opatření pro LPL III-IV

Výpočet rizika R_4 pro objekt v LPL III-IV

Použitím ochranných opatření pro LPL III-IV se změní pravděpodobnost P_{SPD} ve výpočtu pro nechráněný objekt z hodnoty 1 na hodnotu 0,05. Tato změna ovlivňuje pravděpodobnosti poruchy vnitřních systémů P_C , P_M , P_W a P_Z :

$$P_C = (P_{SDP} \times C_{LD}) = 0,05 \times 1 = 0,05$$

$$P_M = (P_{SDP} \times P_{MS}) = 0,05 \times 1 = 0,05$$

$$P_W = (P_{SDP} \times P_{LD} \times C_{LD}) = 0,05 \times 1 \times 1 = 0,05$$

$$P_Z = P_{SDP} \times P_{LI} \times C_{LI} = 0,05 \times 1 \times 1 = 0,05$$

Změna těchto pravděpodobností má za následek zmenšení dílčích rizik R_C , R_M , R_W a R_Z :

$$R'_{C4} = N_D \times P_C \times L_C$$

$$R'_{C4} = 0,0222 \times 0,05 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{1,721 \times 10^{-6}}$$

$$R'_{M4} = N_M \times P_M \times L_M$$

$$R'_{M4} = 2,053 \times 0,05 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{1,591 \times 10^{-4}}$$

$$R'_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W$$

$$R'_{W4} = 0,025 \times 1 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{1,937 \times 10^{-6}}$$

$$R'_Z = N_1 \times P_Z \times L_Z$$

$$R'_{Z4} = 2,5 \times 0,05 \times (1,5492 \times 10^{-3}) = \underline{1,937 \times 10^{-4}}$$

Celkové riziko R_4 se tedy sníží na hodnotu:

$$R'_4 = R_{C4} + R_{M4} + R_{W4} + R_{Z4}$$

$$R'_4 = 1,721 \times 10^{-6} + 1,591 \times 10^{-4} + 1,937 \times 10^{-6} + 1,937 \times 10^{-4}$$

$$\underline{\underline{R'_4 = 3,591 \times 10^{-4}}}$$

Vypočtené riziko je evidentně o řád menší než riziko ztrát ekonomických hodnot, samo o sobě však nevyjadřuje porovnatelnou peněžní hodnotu. Z toho důvodu je nutné provést výpočet ocenění efektivity nákladů, jak byl popsán v předchozí stejnojmenné kapitole.

Porovnání nákladů s ochranou a bez ochrany

Doplnění koeficientů

Teoretický postup ocenění efektivity nákladů byl již popsán v části „výpočet efektivity nákladů“. Z uvedeného vyplývá, že je pro výpočet nejprve nutné zvolit odpisovou míru a , úrokovou míru i a míru údržby m .

Obecně není možné přesně říci, jaká je normální životnost přepětových ochranných zařízení použitých v elektrické instalaci. Záleží na počáteční kvalitě použitého svodiče, počtu a velikosti přepětových špiček, které svede, ale také například na teplotě v rozváděči. Pro zadaný příklad však budu uvažovat životnost 10 let, která je mnohými výrobci deklarována a v některých případech zaručována. Odpisová míra a je tedy 10 %.

Úrokovou míru, tedy cenu peněz v čase, stanovím podle alternativní investice na stejný časový úsek se srovnatelným rizikem. Touto investicí jsou emise desetiletých státních dluhopisů, které je v současné době možné pořídit s úrokovou sazbou 2,4 %. (20) Tuto hodnotu budu považovat za i .

Zvláštní údržba svodičů přepětí není vyžadována, doporučuje se pouze vizuální kontrola přístroje po bouřích s atmosférickými výboji. Z toho důvodu uvažuji $m = 1$ %.

Výpočet

$$C_L = \Sigma C_{LZ} = R4 * C_T$$

$$C_L = 7,142 \times 10^{-3} * 7\,100\,000 = 50\,708 \text{ Kč}$$

$$C_{RL} = \Sigma C_{RLZ} = R4' * C_t$$

$$C_{RL} = 3,591 \times 10^{-4} * 7\,100\,000 = 2\,550 \text{ Kč}$$

$$C_{PM} = C_P * (i + a + m)$$

$$C_{PM} = 91\,210 * (0,024 + 0,1 + 0,01) = 12\,222 \text{ Kč}$$

$$S_M = C_L - (C_{PM} + C_{RL})$$

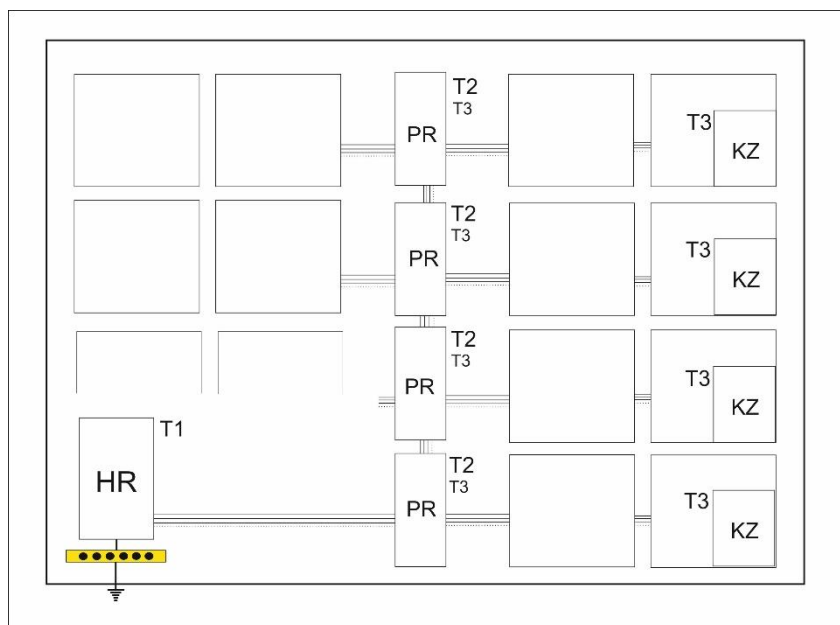
$$S_M = 50\,708 - (12\,222 + 2\,550)$$

$$\underline{\underline{S_M = 35\,936 \text{ Kč}}}$$

Roční úspora s použitím ochranných opatření pro LPL III–IV činí 35 936 Kč. Z toho je zřejmé, že se riziko, i když je na první pohled malé, nevyplatí zanedbat a spoléhat na to, že se atmosférické přepětí v instalaci nevyskytne. Je však možné, že zařazení objektu do vyšší LPL II a použití výkonnějších, i když dražších, přístrojů povede k ještě větší roční úspoře. Tento případ nyní prověřím a poté bude možné obě situace porovnat.

Návrh ochrany pro budovu v LPL II

Pro ochranu elektronického zařízení v budově zařazené do LPL II již budou svodiče postupně omezovat nebezpečné přepětí, jak bylo popsáno dříve a jak ukazuje obrázek 14. Svodič bleskových proudů typu 1 po zařazení do LPL II již musí být schopen svést přepětí špičku o hodnotě 100 kA, tedy 25kA/pól. Takovým přístrojem je např. DEHNbloc – DB 3 255 H. Ten bude osazen v hlavním rozvaděči, kde zachytí největší díl přepětí vlny. Druhý stupeň budou zajišťovat přepětí ochrany umístěné v podružných rozvaděcích v každém patře, konkrétně DEHNguard – DG M TNC 275. Minimální vzdálenost prvního a druhého stupně udávané výrobcem 15 m bude bez problémů splněna (viz obrázek 16). Ochranná úroveň do 5 m od tohoto svodiče je < 1,5 kV a z toho důvodu není koncovým zařízením třeba předřazovat třetí stupeň ochrany. Záštitu vzdálenějšího vybavení zajistí připojení k síti přes zásuvkovou lištu se svodičem přepětí SFL PRO 6X. Předpokládá se instalace jedné lišty po obou stranách každé místnosti, celkem tedy 32 kusů. (18) Rozmístění svodičů naznačuje obrázek 18. Konkrétní zapojení svodičů v rozvaděcích a zásuvkovém okruhu potom obrázek 19.



Obrázek 18 – Rozmístění svodičů v LPL II

Cena ochranných opatření

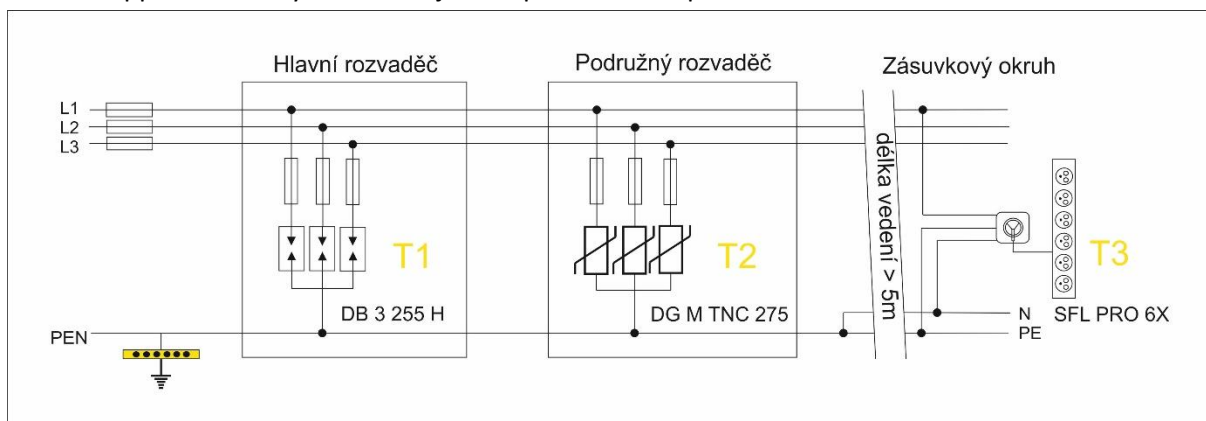
Celková cena vybraných ochranných opatření je zachycena v tabulce 5. (19)

Přístroj	Cena/ks	Počet kusů	Cena
DB 3 255 H	6 762,60 Kč	1	6 763 Kč
DG M TNC 275	3 058,80 Kč	4	12 235 Kč
SFL PRO 6X	2 772,70 Kč	32	88 726 Kč
Cena celkem			107 724 Kč

Tabulka 5 – Cena ochranných opatření pro LPL II

Výpočet rizika R_4 pro objekt v LPL II

Výpočet rizika pro objekt zařazený do LPL II byl proveden pomocí programu DEHNsupport. Po zadání parametrů budovy a jejího okolí bylo ověřeno, že riziko bez použití ochranných opatření bylo vypočteno správně. Celkové riziko R_4 s použitím ochranných opatření v hladině LPL II je $1,549 \times 10^{-4}$. Toto riziko i jeho dílčí části R_c – R_z jsou uvedeny v příloze č. 1 této práce „Objekt v LPL II – DEHNsupport rizika“, tedy souboru Microsoft Excel, který je výstupem programu DEHNsupport. Druhým výstupním souborem, který je rovněž přílohou této práce, je technická zpráva ve formátu PDF. Tento soubor obsahuje mimo jiné ekonomické vyhodnocení rizika R_4 . Soubor DSPRJ pro práci v DEHNsupport s celkovým řešením je třetí přílohou této práce.



Obrázek 19 – Zapojení svodičů v síti TN-C-S

Porovnání nákladů s ochranou a bez ochrany

Díky použití kvalitnějších přístrojů došlo ke snížení ročních nákladů na zbylé ztráty C_{RL} na hodnotu 1 100 Kč, ovšem za cenu zvýšení ročních nákladů na ochranná opatření C_{PM} na hodnotu 14 435 Kč. Roční úspora peněz S_M je v tomto případě **35 173,93 Kč/rok**, což je méně než úspora 35 936 Kč/rok v případě objektu v LPL III–IV (viz příloha). Tento výpočet ovšem nezohledňuje cenu peněz v čase a fakt, že pokud budu přepětové ochrany pořizovat jako firma nebo podnikatel, je možné jejich daňové odepsání. Z toho důvodu výsledek přezkoumám pomocí jednoho z klasických ekonomických nástrojů pro hodnocení investic.

Pojištění objektu

Poslední možností ochrany přístrojového vybavení objektu je jeho pojištění. Pro popisovanou případovou studii je na objekt nutné nahlížet jako na budovu určenou k podnikání, od čehož se odvíjí pojistná smlouva. Pojištění pouze proti přepětí bohužel není ve standardní nabídce pojišťoven a je pouze součástí balíčků „allrisk“ kryjící nejrůznější pojistná nebezpečí. Česká podnikatelská pojišťovna nabízí pojištění strojů, strojních zařízení a elektroniky. V tomto případě je výsledné pojistné 42 000 Kč/rok se spoluúčastí 5 000 Kč. Kalkulace pojištění majetku je pátou přílohou této práce. Posouzení efektivity této investice bude provedeno pomocí kritéria čisté současné hodnoty v části věnované jeho výpočtu.

Ověření výsledků

Korektním kritériem pro rozhodování je porovnání současné hodnoty všech budoucích příjmů a výdajů vyvolaných projektem – kritérium čisté současné hodnoty NPV. Tato metoda hodnocení investic navíc umožňuje porovnání i s projekty nesouvisejícími s ochranou před bleskem. Obecně platí, že pokud je čistá současná hodnota budoucích příjmů vyšší než hodnota budoucích výdajů, tedy $NPV > 0$, měl by být projekt realizován.

V tomto případě projekt nepřinese žádné reálné příjmy a na NPV je možné nahlížet dvěma způsoby. Z hlediska nákladů je možné NPV spočítat jednotlivě pro každou možnost ochrany a výhodnější bude

varianta s nižšími náklady. Druhou možností je kritérium čisté současné hodnoty z hlediska úspor, kdy budou jednotlivé možnosti porovnány se stávající variantou objektu bez ochrany. V tomto případě položku příjmů nahradí položka finančně ohodnocených úspor. V obou případech se ale jedná o stejný výpočet, který je pouze jinak vyjádřen. NPV bude v obou případech vypočítáno podle vzorce:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T\check{z}} CF_t \times (1 + r)^{-t}$$

CF_t ... tok hotovosti v roce t

$T\check{z}$... doba životnosti

r ... diskont

Výpočet NPV pro chráněný objekt

Jak bylo uvedeno v části „doplnění koeficientů“, je doba životnosti přepětových ochrany stanovena 10 let, sazba na údržbu 1 % a úroková sazba odpovídající diskontu 2,4 %. (20) Při výpočtu NPV vyjdeme z vypočteného rizika R_4 a hodnoty stavby 7 100 000. Jejich součinem jsou roční náklady na celkové ztráty C_z , které lze společně s náklady na údržbu (1 % z pořizovací hodnoty přístrojů) a odpisy, považovat za tok hotovosti v daném roce. Svodiče přepětí byly z hlediska daňových odpisů zařazeny jako „elektrická rozvodná zařízení“ do třetí odpisové skupiny, tedy na 10 let. Přístroje budou odepisovány rovnoměrně, tedy 5,5 % v prvním roce a 10,5 % v letech následujících. Pořizovací cena přístrojů je jednorázovou investicí v roce 0. Hodnoty potřebné k výpočtu NPV pro jednotlivé možnosti ochrany jsou uvedeny v tabulce 6.

	Nechráněný objekt	Objekt v LPL III–IV	Objekt v LPL II
Riziko	0,007142	0,0003591	0,0001549
Roční ztráty	50 708,20 Kč	2 549,61 Kč	1 099,89 Kč
Cena SPD		91 210,00 Kč	107 724,00 Kč
Údržba		912,10 Kč	1 077,24 Kč

Tabulka 6 – Vstupní hodnoty pro výpočet NPV

NPV z hlediska nákladů

Jako náklady (výdaje) při výpočtu NPV jsou započítány počáteční investice, roční náklady na celkové ztráty a náklady na údržbu přístrojů. Daňové odpisy ovlivní základ daně. Předpokládám-li, že firma je celkově v zisku, sníží tyto odpisy výdaje a mohou být tedy započítány jako „příjmy“. V tabulkách 7–9 jsou uvedeny hotovostní toky pro nechráněný objekt, objekt zařazený do hladiny LPL III-IV a objekt v LPL II.

NPV z hlediska nákladů – nechráněný objekt											
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cena SPD [Kč]											
Údržba [Kč]											
Roční ztráty [Kč]		-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708
CF [Kč]	0	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708	-50 708
DCF [Kč]	0	-49 520	-48 359	-47 226	-46 119	-45 038	-43 982	-42 952	-41 945	-40 962	-40 002
NPV		-446 103,48 Kč									

Tabulka 7 – NPV pro nechráněný objekt

NPV z hlediska nákladů – objekt v LPL III–IV											
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cena SPD [Kč]	91 210										
Údržba [Kč]		-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912
Odpisy [Kč]		5 017	9 577	9 577	9 577	9 577	9 577	9 577	9 577	9 577	9 577
Roční ztráty [Kč]		-2 550	-2 550	-2 550	-2 550	-2 550	-2 550	-2 550	-2 550	-2 550	-2 550
CF [Kč]	-91 210	1 555	6 115	6 115	6 115	6 115	6 115	6 115	6 115	6 115	6 115
DCF [Kč]	-9 1210	1 518	5 832	5 695	5 562	5 432	5 304	5 180	5 058	4 940	4 824
NPV	-41 864,14 Kč										

Tabulka 8 – NPV pro objekt v LPL III–IV

NPV z hlediska nákladů – objekt v LPL II											
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cena SPD [Kč]	107 724										
Údržba [Kč]		-1 077	-1 077	-1 077	-1 077	-1 077	-1 077	-1 077	-1 077	-1 077	-1 077
Odpisy [Kč]		5 925	11 311	11 311	11 311	11 311	11 311	11 311	11 311	11 311	11 311
Roční ztráty [Kč]		-1 100	-1 100	-1 100	-1 100	-1 100	-1 100	-1 100	-1 100	-1 100	-1 100
CF [Kč]	-107 724	3 748	9 134	9 134	9 134	9 134	9 134	9 134	9 134	9 134	9 134
DCF [Kč]	-107 724	3 660	8 711	8 507	8 307	8 113	7 922	7 737	7 555	7 378	7 205
NPV	-32 628,88 Kč										

Tabulka 9 – NPV pro objekt v LPL II

Kompletní výpočty jsou součástí přílohy č. 4 této práce. Součástí této přílohy je i citlivostní analýza s možností změny některých parametrů. Díky tomu je možné sledovat, jak by se rozhodnutí změnilo v případě jiné hodnoty chráněného vybavení nebo při změně diskontu. Hodnocení investic pomocí čisté současné hodnoty v tomto případě upřednostňuje variantu zařazení budovy do hladiny ochrany LPL II a provedení odpovídajících opatření. Aby byla zřejmá celková úspora, provedu ještě výpočet NPV z hlediska ušetřených peněz.

NPV z hlediska úspor

NPV z hlediska úspor je založena na stejném principu jako výpočet efektivnosti daný normou, respektuje však časovou cenu peněz a daňové odpisy. Roční úspora je dána jako rozdíl ročních nákladů na ztráty nechráněné budovy a zbylých ročních nákladů na ztráty s použitím ochranných opatření společně s náklady na údržbu přístrojů. Daňové odpisy jsou opět připočítány kladně k této hodnotě. Tato úspora je hotovostním tokem v daném roce a NPV je poté součtem jejích diskontovaných hodnot. V tabulkách 10 a 11 jsou tyto hodnoty uvedeny pro porovnání nechráněného objektu s objektem v LPL III–IV, resp. v LPL II.

NPV z hlediska úspor – objekt v LPL III–IV											
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cena SPD [Kč]	91 210										
Úspora [Kč]		52 263	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824
CF [Kč]	-91 210	52 263	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824	56 824
DCF [Kč]	-91 210	51 038	54 191	52 921	51 681	50 469	49 287	48 131	47 003	45 902	44 826
NPV	404 239,34 Kč										

Tabulka 10 – NPV z hlediska úspor v LPL III–IV

NPV z hlediska úspor – objekt v LPL II											
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cena SPD [Kč]	107 724										
Úspora [Kč]		54 456	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842
CF [Kč]	-107 724	54 456	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842	59 842
DCF [Kč]	-107 724	53 180	57 070	55 732	54 426	53 150	51 905	50 688	49 500	48 340	47 207
NPV	413 474,60 Kč										

Tabulka 11 – NPV z hlediska úspor LPL II

Jak již bylo řečeno v předchozím textu, NPV z hlediska úspor a nákladů je jen jiným vyjádřením téhož. Pokud by bylo od hodnoty NPV nákladů pro nechráněný objekt odečteno NPV nákladů pro objekt chráněný, získal by se stejný výsledek jako po výpočtu NPV úspor.

Výpočet NPV pro pojištěný objekt

Jak bylo uvedeno v části „pojištění objektu“, je možné budovu pojistit za 42 000 Kč/rok se spoluúčastí 5 000 Kč při vzniklé škodné události. Na první pohled je zřejmé, že i případ pojištění bude výhodnější než situace nechráněného objektu, u které lze očekávat vyšší roční průměrné ztráty, než jsou pravidelné platby pojistného. Jelikož škody vzniklé škodnou událostí uhradí pojišťovna, je v tomto případě zaplacení spoluúčasti jediným výdajem, který hrozí při zničení elektroniky. Roční náklady na celkové ztráty jsou za použití stejného postupu jako pro chráněný objekt rovny součinu rizika R_4 (pro nechráněný objekt) a této spoluúčasti. Hodnoty pro výpočet NPV jsou uvedeny v tabulce 12.

NPV z hlediska nákladů - pojištěný objekt											
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cena/rok [Kč]		-42 000	-42 000	-42 000	-42 000	-42 000	-42 000	-42 000	-42 000	-42 000	-42 000
Roční ztráty [Kč]		-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36
CF [Kč]		-42 036	-42 036	-42 036	-42 036	-42 036	-42 036	-42 036	-42 036	-42 036	-42 036
DCF [Kč]		-41 050	-40 088	-39 149	-38 231	-37 335	-36 460	-35 606	-34 771	-33 956	-33 160
NPV	-369 807,57 Kč										

Tabulka 12 – NPV z hlediska úspor – pojištění

NPV z hlediska úspor je možné stanovit stejným postupem jako v případě objektu chráněného SPD, nebo jako rozdíl NPV z hlediska nákladů pro nechráněný a pojištěný objekt.

$$NPV_{\text{úspory}} = 446\,103 - 369\,807 = 76\,296 \text{ Kč}$$

Výsledná uspořena částka nedosahuje takových hodnot, jako úspora vzniklá použitím ochranných opatření proti přepětí. Na druhou stranu tato varianta zahrnuje ochranu proti široké škále nebezpečných událostí, které nejsou předmětem této práce. Z toho důvodu nelze možnost pojištění objektu jednoznačně zavrhnout a v jiných případech by jistě nalezla své uplatnění.

Kritérium čisté současné hodnoty z hlediska úspor jasně signalizuje, že z ekonomického hlediska je výhodné objekt vnitřním systémem ochrany vybavit a nespolehat na případ, že atmosférický impulz přepětí nezpůsobí. Ani jedna z možností ochrany objektu není výrazným způsobem lepší než jiná. Navíc, změnou klíčových parametrů by si dokonce vyměnili své pořadí, jak je možné nasimulovat v příloze č. 4. Jelikož je však čistá současná hodnota investice do přístrojů splňující nároky pro zařazení do hladiny LPL II o něco vyšší než NPV investice do SPD pro LPL III–IV a navíc se jedná o technicky dokonalejší řešení, je v tomto případě tato možnost efektivnější.

Závěr

Systém ochrany před bleskem se od svého vzniku stále zdokonaluje. První pokusy o odvedení bleskového výboje byly prováděny pomocí hromosvodů, v současné terminologii tedy vnějším systémem ochrany. I když je na tomto druhu ochrany zajisté stále co zlepšovat, tato práce pojednává především o vnitřním systému ochrany před bleskem, jehož nutnost vyvstala až s příchodem citlivých přístrojů náchylných na přepětí.

Při úderu blesku v blízkosti inženýrských sítí spojených se stavbou a úderu v blízkosti stavby totiž vzniká elektromagnetické pole, které může indukovat na všech kovových částech v okolí nebezpečné napětí. To sice nedosahuje vysokých hodnot, takto vzniklá energie však může zničit citlivá elektronická zařízení. Pokud nastane úder do vedení, může už rázová vlna nadproudu dosahovat několika kA. Tím může dojít ke zkratu nebo přenesení napětí do vedení elektromagnetickou vazbou a ohrožení elektroenergetického systému. Největší škody na majetku pak může napáchat přepětí indukované při přímém úderu do stavby. V tomto případě je přepětí indukováno na vodičích díky jejich impedanci a protékajícímu bleskovému proudu.

Aby se vzniku přepětí předešlo a již vzniklá přepětí byla snížena na pro elektronická zařízení přijatelnou úroveň, umísťují se prvky ochrany na místa v trase přenosu nežádoucích přepětíových jevů. Tím se rozumí chránění přenosové a distribuční soustavy pomocí zemnicích lan, bleskojistek a omezovačů přepětí a ochrana objektů pomocí zařízení souhrnně označovaných termínem LPS (Lightning Protection System). Základním principem všech přístrojů chránících před přepětím, tedy svodičů přepětí, je náhlá změna impedance s rostoucím napětím.

Základem ochrany budov je vyrovnání potenciálů, které se provede připojením všech vodivých předmětů v objektu na ochrannou ekvipotenciální přípojnicí, která je spojena se systémem uzemnění. Podle impulzního výdržného napětí se přístroje rozdělí do zón ochrany před bleskem, na jejichž rozhraní se instalují svodiče přepětí. Tím dochází k postupnému snižování přepětí na přijatelnou úroveň spotřebičů. Na vstupu do objektu se umísťuje hrubá ochrana, tedy svodiče přepětí na bázi ochranného jiskřiště, které zachytí největší díl přepětíové vlny. Střední ochrana proti přepětí je dále zajištěna svodiči přepětí na bázi varistoru, tedy napětově závislých odporů, které sniží přepětí na takovou úroveň, že ji již vydrží většina spotřebičů. Pro ochranu nejcitlivějších přístrojů se využívá svodičů konstruovaných jako supresorové diody, tedy diody které snesou opakovaný průraz v závěrném směru a mají krátkou reakční dobu.

Tímto způsobem je po technické stránce řešena současná ochrana proti přepětí. Neméně důležité je však také správný výběr ochrany. Tomu předchází analýza rizik, které musí být pro danou stavbu uvažovány. Jediným rizikem, jehož výpočet závisí pouze na rozhodnutí vlastníka je riziko ekonomických hodnot R_4 . V současné době, kdy je výdaje nutné snížit na minimum, je však toto riziko nesmírně důležité. Proto byl na konkrétním případě ilustrován výpočet tohoto rizika pro různé možnosti ochrany a určení jeho finančních dopadů.

Nejprve bylo vypočteno riziko ekonomických hodnot pro nechráněný objekt. Následoval návrh méně nákladné varianty ochrany, výpočet zbylého rizika a porovnání těchto variant z hlediska roční úspory peněz. Tentýž postup, pouze s použitím počítačového programu byl proveden i pro nákladnější, avšak kvalitnější způsob ochrany. Poslední možností ochrany bylo pojištění objektu. V tomto konkrétním případě sice tato možnost nepřinesla velkou úsporu, ale vzhledem k tomu že zahrnuje ochranu i před jinými nebezpečími, může být v některých případech nejvýhodnější variantou. Po porovnání variant ochrany pomocí svodičů přepětí způsobem stanoveným normou ČSN EN 62305 byl předveden výpočet kritéria hodnocení efektivnosti investic NPV, které stanovilo jako nejvýhodnější investici do kvalitnějších přepětíových ochrany. Z hlediska celkových úspor se jednalo o nezanedbatelnou částku a pro tento případ je tedy použití přepětíových ochrany ekonomicky efektivní.

Seznam literatury

- (1) KUTÁČ, Jiří a Ján MERAŤ. *Ochrana před bleskem a přepětím z pohledu soudních znalců: Ochrana před bleskem a přepětím z pohledu soudních znalců*. Vyd. 1. Praha, Trenčín [i.e. Ostrava]: SPBI, 2010, 186 s. ISBN 978-80-7385-081-4.
- (2) RAKOV, Vladimír A a Martin A UMAN. *Lightning: physics and effects*. First published. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. ISBN 05-210-3541-4.
- (3) HASMAN, Tomáš. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 129 s. ISBN 80-010-2952-2.
- (4) BURANT, Jiří. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochrany*. Praha: FCC Public, 2006, 252 s. ISBN 80-865-3410-3.
- (5) ČSN EN 62305-1. *Ochrana před bleskem: Část 1: Obecné principy*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- (6) MORAVEC, Jan. *Elektrické ochrany v soustavách nízkého napětí: 4. díl: Přepětiová ochrana* [online]. 2015, 2015-11-23 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/elektricke-ochrany-v-soustavach-nizkeho-napeti-4-dil-prepetova-ochrana/>
- (7) HÁJEK, Jan a Dalibor ŠALANSKÝ. *První elektronická knížka o ochraně před bleskem* [online]. 2008. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: www.kniska.cz
- (8) MIKEŠ, Jan a Jiří KUTÁČ. *Technická podstata hromosvodu* [online]. 2012, 3 [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/8374-technicka-podstata-hromosvodu>
- (9) ČSN EN 62305-2. *Ochrana před bleskem: Část 2: Řízení rizika*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- (10) *Aplikační příručka: Přepětiové ochrany* [online]. OEZ, 2012 [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: www.oez.cz
- (11) DUDÁŠ, Josef. *Řízení rizika jako východisko pro komplexní ochranu před bleskem*. *Elektro* [online]. 2007 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.lpsdesigner.cz/clanky/>
- (13) *Statistická ročenka 2014 HZS: Požární ochrana*. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, 2014, 2014 (3/2015).
- (14) ČR. Zákon § 36: Ochrana před bleskem. In: 268. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, 2009, ročník 2009, částka 81, číslo 268.
- (15) SŠ ELEKTROTECHNICKÁ OSTRAVA, Na jízdárně 30. *Učební texty: 3. Ochrana před bleskem* [online]. In: . s. 18 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/4mb/ochr_pred_bleskem.pdf
- (16) *Prvky pro jemnou přepětiovou ochranu* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/node25.html>
- (17) *Vše o blesku: Nejčastěji kladené otázky a odpovědi* [online]. DEHN, 2015-11-23 [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: http://www.dehn.cz/cz/bourky_blesky/tema/tema4.shtml
- (18) *Katalog přepětiových ochrany: Montážní příručka 2015/16*. DEHN + SÖHNE, 2015.
- (19) *Ceník – Svodiče přepětí: DEHN + SÖHNE 2015* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: www.dehn.cz/pdf/preislisten/SPD-DEHN-2015.pdf
- (20) *Emisní kalendář střednědobých a dlouhodobých státních dluhopisů - duben 2016* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.mfcr.cz/cs/verejny-sektor/rizeni-statniho-dlhu/emise-statnich-dluhopisu/emisni-kalendare-sdd/2016/emisni-kalendar-strednedobych-a-dlouhodo-24368>