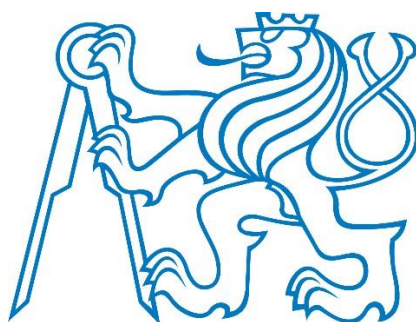


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

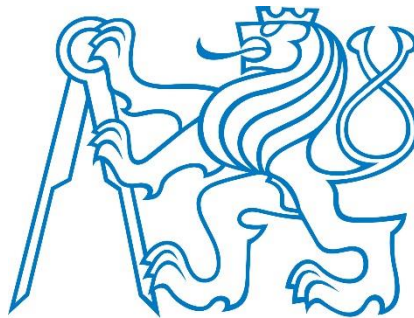
PRAHA 2016

PAVEL VELÍNSKÝ

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH VĚD



DIPLOMOVÁ PRÁCE

INTELIGENTNÍ SYSTÉMOVÉ OCHRANY PŘED BLESKEM

INTELLIGENT LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

PRAHA 2016

PAVEL VELÍNSKÝ

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Velínský Pavel

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Inteligentní systémové ochrany před bleskem

Pokyny pro vypracování:

- analýza varovných systémů před bleskem
- návrh konstrukce čítače bleskových proudů pro konkrétní objekt
- zhodnocení ekonomického přínosu zvoleného řešení

Seznam odborné literatury:

Rakov, V. A. Lightning: physics and effects. New York: Cambridge University Press, 2002, ISBN 0-521-58327-6

Řezáčová, D. et al.: Fyzika oblaků a srážek, Praha: Academia, 2007, ISBN 978-80-200-1505-1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Mikeš, Ph.D. – ČVUT FEL, K 13116

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2016/2017

L.S.

Prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11.2.2016

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou lokalizace bleskových výbojů, jejich prokazatelnou detekcí a návrhem čítače bleskových proudů, s následnou ekonomickou analýzou a optimalizací navrženého řešení. Cílem této práce je vytvoření souhrnného dokumentu, který čtenáře uvede do problematiky detekce bleskových výbojů, nastíní možná praktická řešení čítače bleskových proudů a ekonomicky zhodnotí zvolené řešení s návrhem ekonomicky optimální varianty.

Klíčová slova

bleskový proud; bleskový výboj; čítač bleskových proudů; čistá současná hodnota; detekce; senzor

Abstract

This thesis deals with the localization of lightning, the proven detection and counter proposal lightning current and subsequent economic analysis and optimization of proposed solutions. The aim of this work is to create a comprehensive document that the reader introduce to the detection of lightning, outlines possible practical solutions to counter lightning and economically evaluate the solution chosen by designing an economically optimal variant.

Key words

lightning current; lightning discharge; lightning current counter; net present value; detection, sensor

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří se podíleli poskytováním informací na tvorbě závěrečné práce, ale především mému vedoucímu, panu Ing. Janu Mikešovi, Ph.D., za užitečné rady, ochotu, pomoc a čas, který mi věnoval. Dále také celé mé rodině a partnerce za podporu a porozumění v době vypracovávání diplomové práce.

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Pavel Velínský

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	4
Seznam grafů.....	5
1 Úvod.....	6
2 Analýza současných možností varovných systémů před bleskem	7
2.1 Bleskový výboj	7
2.2 Metody detekce bleskového výboje.....	8
2.2.1 Elektrické pole ^[w1]	10
Elektrometr	10
Mlýn elektrostatického pole ^[w3]	10
Změna elektrostatického pole	11
2.2.2 Elektromagnetické pole.....	13
2.2.2.1 Metoda detekce směru DF (direction finding)	13
2.2.2.2 Metoda času příchodu TOA (time of arrival) ^[2L]	15
Systémy s velmi krátkou vzdáleností.....	16
Systémy s krátkou vzdáleností.....	17
Systémy s velkou vzdáleností	17
Lokalizace bleskového výboje metodou TOA.....	18
2.2.3 Interferometrie.....	20
2.3 Detekce bleskových výbojů	21
2.3.1 Sítě pro detekci bleskových výbojů	21
2.3.1.1 Evropa.....	21
2.3.1.2 Severní Amerika	24
2.3.1.3 Celosvětová síť.....	25
2.3.2 Čidla pro pozemní detekci.....	25
2.4 Vhodné senzory pro měření bleskového proudu	26
2.4.1 Rogowského cívka.....	26

2.4.2	Magneto-optický senzor ^[w11]	29
3	Návrh konstrukce čítače bleskových proudů pro konkrétní objekt.....	33
3.1	Stanovení cílů	33
3.2	Vytvoření prototypu	34
3.3	Metodologie návrhu druhého prototypu bezdrátového čítače bleskových proudů	35
4	Ekonomické zhodnocení navržené systémové ochrany druhého prototypu	38
4.1	Metodika výpočtu efektivnosti investice.....	38
4.2	GSM komunikace.....	38
4.3	Napájení	41
4.3.1	Modelování spotřeby.....	42
4.3.2	Uvažované zdroje energie.....	43
4.3.3	Výpočet doby provozu variantních zdrojů.....	44
4.3.4	Cenové hodnocení navržených variant	46
4.4	Porovnání variantních systémů	47
4.5	Výběr optimální varianty.....	50
4.6	Ekonomické hledisko nutnosti implementovat ochranný systém.....	52
5	Závěr	55
6	Zdroje.....	56
	Internetové zdroje	56
	Tištěná literatura	60
	Normy	60
	Zdroje obrázků.....	61
7	Přílohy.....	62
	Příloha A.....	62
	Příloha B.....	63
	Příloha C.....	64

Seznam obrázků

Obrázek 1 Bleskový výboj.....	7
Obrázek 2 Četnost blesků vztažených na km ² plochy zemského povrchu zaznamenaná satelitní optickou detekcí v roce 1999	9
Obrázek 3 Frekvenční pásma a šíření elektromagnetického signálu.....	9
Obrázek 4 Cylindrický mlýn.....	10
Obrázek 5 Mlýn s rotující clonou	11
Obrázek 6 DF Detektor na střeše MFF UK v Praze	13
Obrázek 7 Systém dvou detektorů	14
Obrázek 8 Systém tří detektorů	15
Obrázek 9 Průsečíky hyperboloidů	16
Obrázek 10 Časové diference senzorů	18
Obrázek 11 Situace se třemi senzory	18
Obrázek 12 Nejednoznačné řešení se třemi senzory	19
Obrázek 13 Lokalizace pomocí čtyř senzorů.....	19
Obrázek 14 Příklad 2D lokalizace shluku výbojů za použití širokopásmové interferometrie. Příklad ukazuje vertikálně vypuštěnou raketu k navedení výboje do místa měření.....	20
Obrázek 15 Typy čidel pro pozemní detekci	26
Obrázek 16 Rogowského cívka	26
Obrázek 17 Měřicí rozsah RC.....	28
Obrázek 18 Lineární polarizace světla	29
Obrázek 19 Magneto-optický senzor.....	30
Obrázek 20 Vyhodnocení měřeného proudu.....	31
Obrázek 21 Změna úhlu polarizace	31
Obrázek 22 Příklad použití magneto-optického senzoru	32
Obrázek 23 Blokové schéma navrženého řešení	36
Obrázek 24 Nákres modelového domu	37

Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled detekčních sítí spadajících do EUCLID	21
Tabulka 2 Typy čidel pro pozemní detekci	25
Tabulka 3 Nabídka tarifů komerčních operátorů.....	39
Tabulka 4 Modelování spotřeby snímače – režim hodinová kontrola s týdenním hlášením SMS zprávou	42
Tabulka 5 Varianty zdrojů napájení.....	43
Tabulka 6 Maximální intervaly dle ČSN 62305.....	44
Tabulka 7 Výpočet výkonového zatížení pro snímač s 2 letou lhůtou výměny baterií..	44
Tabulka 8 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 2 letou periodou údržby	45
Tabulka 9 Výpočtové doby provozu pro snímač s 2 letou periodou údržby	45
Tabulka 10 Množství zvolených akumulátorů.....	46
Tabulka 11 Měrné ceny pro zařízení s 2 letou údržbou	46
Tabulka 12 Ceny komponent systému	47
Tabulka 13 Přehled o ceně a množství zvolených napájecích článků	47
Tabulka 14 Vybrané varianty pro mikrokontrolér Texas Instr. a senzor s 4 letou periodou napájení.....	50
Tabulka 15 Statistika škod HSZČR způsobených úderem blesku v letech 2006–2015 ^[w30]	52
Tabulka 16 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 1 letou periodou údržby ...	62
Tabulka 17 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 2 letou periodou údržby ...	62
Tabulka 18 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 4 letou periodou údržby ...	62
Tabulka 19 Výpočtové doby provozu pro snímač s 1 letou periodou údržby	63
Tabulka 20 Výpočtové doby provozu pro snímač s 2 letou periodou údržby	63
Tabulka 21 Výpočtové doby provozu pro snímač s 4 letou periodou údržby	63
Tabulka 22 Měrné ceny pro zařízení s 1 letou údržbou	64
Tabulka 23 Měrné ceny pro zařízení s 2 letou údržbou	64
Tabulka 24 Měrné ceny pro zařízení s 4 letou údržbou	64

Seznam grafů

Graf 1 Citlivostní analýza - využívání datového objemu	40
Graf 2 Citlivostní analýza - základní objem dat 1MB + vliv SMS zpráv	41
Graf 3 NPV variant na dobu životnosti 20 let celého systému o 2 zařízeních	48
Graf 4 Investiční výdaje na systém s mikrokontrolérem od Texas Instruments.....	49
Graf 5 Investiční výdaje na systém s mikrokontrolérem IQRF	49
Graf 6 Citlivostní analýza provedená na změnu počtu čítačů systému po dobu 20 let.	51
Graf 7 Citlivostní analýza provedená na změnu kurz USD/CZK pro výdaje na dobu 20 let	51

1 Úvod

V nižších vrstvách zemské atmosféry, zvaných troposféra, probíhá mnoho fyzikálních dějů, které se na venek projevují jako počasí. Jedním z takových dějů je i blesková činnost, která ve větší či menší míře ovlivňuje život na Zemi. Blesk je obtížně předvídatelný a nekontrolovatelný jev, nesoucí velmi vysokou energii, která může jak způsobovat škody na majetku, tak i na lidských životech. S bleskovou činností se musí lidstvo naučit buďto žít, nebo alespoň akceptovat její ničivé následky a směřovat své chování k jejich minimalizaci.

Jelikož bleskovou činnost nedokáže lidstvo ovládat, je důležité alespoň včas detekovat hrozící nebezpečí. Ať už je to otázka predikce vzniku potenciálního nebezpečí ve formě předpovědi počasí či radarových dat, nebo přímo lokalizací místa případného bleskového výboje. Současnými možnostmi sledování a detekce bouřkové činnosti, ale hlavně bleskových výbojů by se měla zabývat první část této práce. Jejím cílem je seznámení se s obecnými principy detekce bleskových výbojů, se systémy, které tyto metody aktivně využívají, a s vhodnými, inovativními a často používanými senzory využitelnými pro detekci bleskových impulsních proudů.

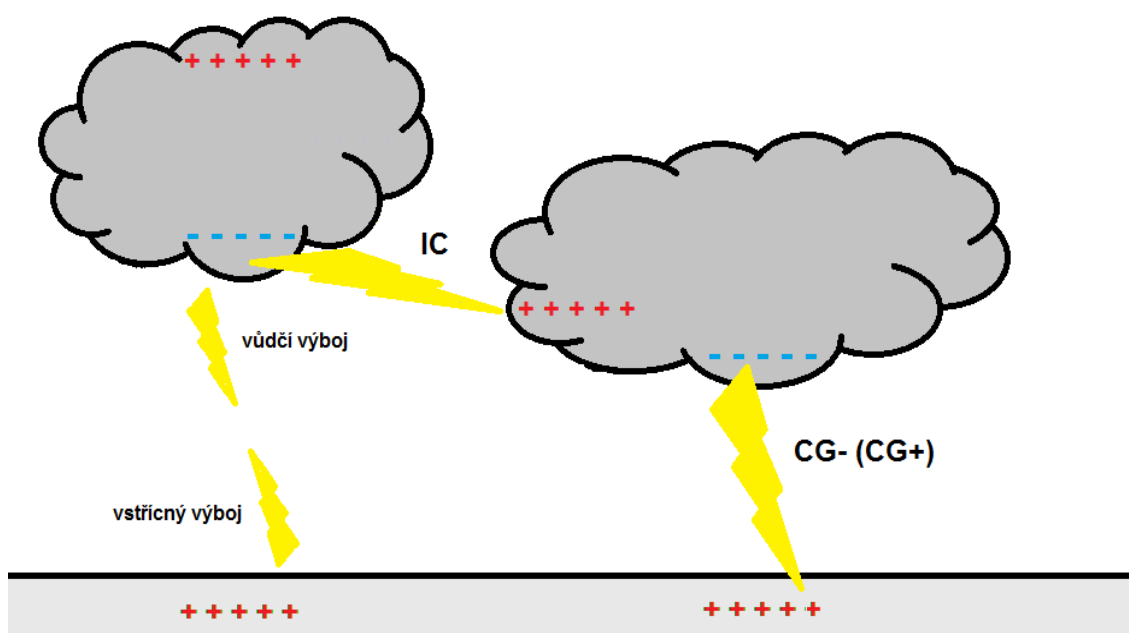
Praktická část práce by měla obsáhnout jak technickou, tak ekonomickou problematiku návrhu čítače bleskových proudů. Cílem technické části návrhu je prezentace možných "cest" řešení vedoucích k modelovému návrhu technického provedení vlastního čítače.

Cílem poslední části by měla být technicko-ekonomická analýza modelového návrhu čítače, zaměřená především na optimalizaci zvoleného technického řešení a snížení výdajů spojených s provozem a pořizovací investicí. V konečné fázi práce by měl být zhodnocen přínos celého řešení inteligentní systémové ochrany před bleskem.

2 Analýza současných možností varovných systémů před bleskem

2.1 Bleskový výboj

Bleskový výboj má původ v separaci náboje v mraku a jeho vyrovnávání k zemskému povrchu, případně do okolní atmosféry, respektive mezi jednotlivými mraky (může k němu docházet i uvnitř mraku). Obtížná predikovatelnost atmosférických výbojů, jejich vysoké energetické hodnoty zapříčiňují, že samotný mechanismus vzniku oblačného náboje není doposud jednoznačně a přesně určen, avšak nejpravděpodobněji je jeho rozvoj zapříčiněn cirkulací drobných ledových krystalků a větších krupek uvnitř specificky formovaných mraků – cumulonibů (kumonibů). Při vzájemném kontaktu elektricky nabitých ledových útvarů, teplotním, tlakovým a gravitačním poměrům dochází k hromadění kladného náboje na menších krystalcích zpravidla v horní části oblaku a opačného záporného náboje na větších krupkách ve spodní části oblaku. Vyrovnání center kladného a záporného náboje vede k bleskovému výboji. Pokud dojde k překročení elektrické pevnosti vzduchu vlivem rostoucí intenzity opačných center nábojů, dojde k ionizaci vodivého kanálu a průchodu bleskového proudu. Rozlišují se dva hlavní typy výbojů a to IC (z anglického „inter-cloud“ či „intra-cloud“), tedy mezioblačný výboj a CG (z anglického „cloud-to-ground“), tedy blesk do země. CG výboje se vyskytují jak záporné CG-, tak i kladné CG+. Z takřka 90 % převažují CG- výboje a zbylých 10 % výboje CG+. [21]



Obrázek 1 Bleskový výboj

Blesku do země, tedy CG výboji, předchází tzv. vůdčí a vstřícný výboj. Vůdčí výboj klesá z bouřkového oblaku k zemi po krátkých „krocích“, které jsou projevem vybíjení oblačného náboje. Vždy po každém „kroku“ dojde ke krátké časové prodlevě, během níž roste intenzita elektrického pole až do bodu elektrického průrazu vzduchu. Takto sestupující vůdčí výboj vyvolá vstřícný výboj postupující od zemského povrchu směrem k oblaku. V momentě, kdy se oba výboje spojí, vytvoří se kompletně ionizovaný vodivý kanál a dojde k samotnému bleskovému CG výboji. Je známo, že v jednom ionizovaném kanálu zpravidla dochází opakovaně k jednotlivým vstřícným, ale i vůdčím výbojům. ^[14] V případě IC výboje se jedná o obdobný mechanismus vzniku, avšak výboj dosahuje většinou menších amplitud proudu. Podrobněji se problematikou vzniku bleskového výboje zabývá monografie. ^[24]

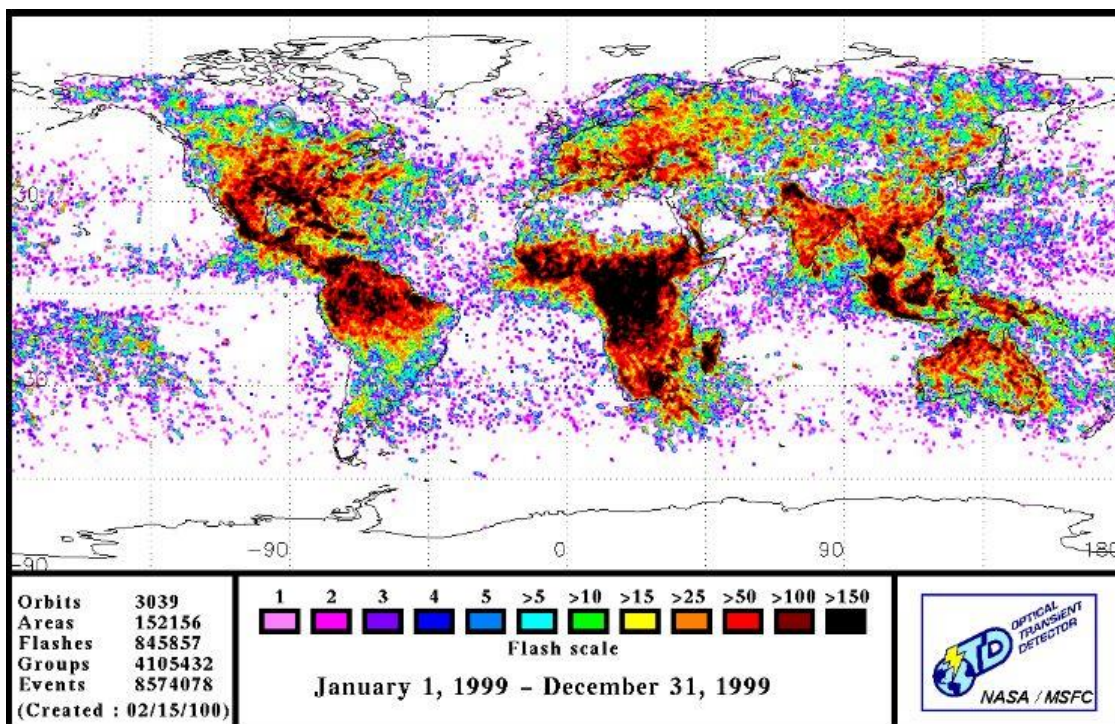
2.2 Metody detekce bleskového výboje

Jak počátky, tak vlastní průběh bleskové činnosti lze zaznamenávat pomocí detekce elektrického pole. Rostoucí intenzita elektrického pole je předzvěstí blížícího se vybití oblačného náboje, jehož důsledkem je bleskový výboj. Při výboji dochází ke strmému poklesu intenzity elektrického pole a po jeho konci opět roste intenzita elektrického pole do té míry, dokud nedojde k dalšímu výboji. Blíže je toto téma rozvedeno v kapitole 1.2.1.

Vlastní elektrický výboj lze detekovat na základě různých fyzikálních projevů. Prvním z nich je optické záření ve viditelném spektru světla. Optické záření má původ ve zvýšení teploty v ionizovaném kanálu bleskového výboje. Toto zvýšení teploty vede k excitaci elektronů v atomových jádrech okolního vzduchu do vyšších energetických hladin, a při následujícím ochlazení bleskového kanálu elektrony sestupují do nižších hladin a přebytečnou energii odevzdají ve viditelném spektru záření. V současnosti se využívají jak pozemní, tak i satelitní detekce blesku. Pozemní detekce má mnoho nevýhod. Jednak je nutno dodržet přímý výhled na zdroj záření, ale s tím se pojí i problém spolehlivé detekce na delší vzdálenosti. V tom případě je nutné počítat se zakřivením Země a také i se stíněním výhledu na zdroj signálu. Další problém s přesností detekce může být při nepříznivých rozptylových podmínkách, či s nahodilými překážkami mezi zdrojem signálu a snímacím čidlem či kamerou. Přesnost satelitní detekce je závislá v největší míře na citlivosti snímače a na rozptylu světla v oblaku, jež může mít průměr až 10 km. ^[w12] Podrobněji lze nalézt v ^[24] ^[34].

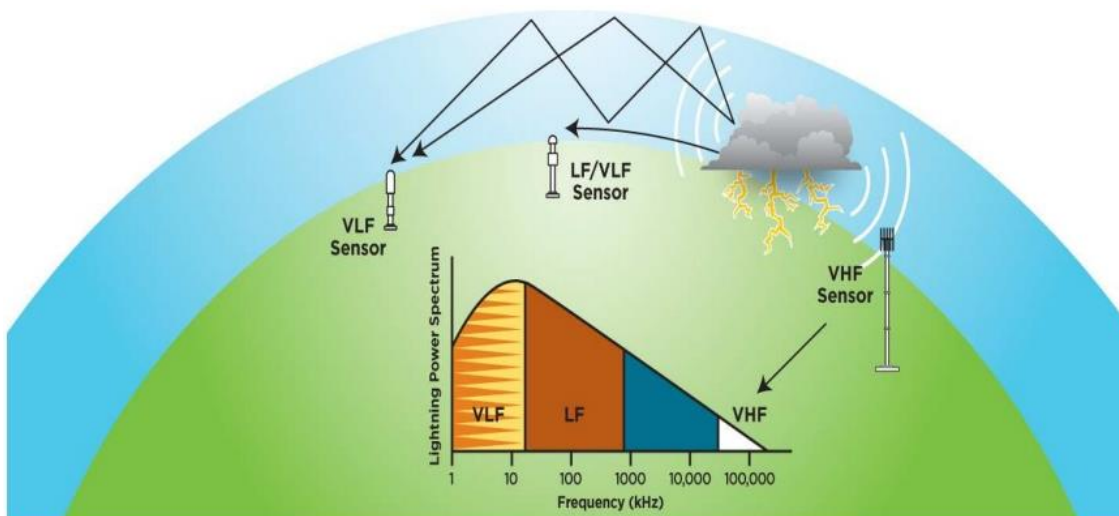
Hrom je dalším měřitelným projevem bleskového výboje. Jedná se o akustickou vlnu, mající původ v impulsní změně objemu vzduchu při zahřátí bleskového kanálu.

Akustická vlna se podle [2L] skládá z 2 až 4 pulsů mající frekvenční rozsah od jednotek Hz po jednotky kHz. Rozpětí změn tlaku akustické vlny je 0,2–2,4 Pa s ohledem na vzdálenost čidla od zdroje. Akustické signály jsou produkovány jak CG, tak i IC výboji.



Obrázek 2 Četnost blesků vztažených na km² plochy zemského povrchu zaznamenaná satelitní optickou detekcí v roce 1999

Nejpoužívanější metodou pro lokalizaci bleskového výboje je detekce elektromagnetického záření. Prudké změny velikostí protékajících proudů v bleskovém kanálu mají za následek vznik elektromagnetického záření na vlnových délkách od jednotek kHz po řádově stovky MHz. Frekvenční rozsah je rozdělen do tří kategorií na nejnižší frekvence VLF (z angl. very low frequency), nízké frekvence LF (z angl. low frequency) a velmi vysoké frekvence VHF (z angl. very high frequency).



Obrázek 3 Frekvenční pásma a šíření elektromagnetického signálu

Ve VLF spektru je vyzářeno největší množství energie, které je spojeno především s CG blesky. Naopak pro IC blesky je charakteristické vyzařování převážně VHF signálu. Detekční vzdálenosti jsou s měnícím se frekvenčním spektrem různé. Je známo, že VHF signál má velký útlum při přenosu na velké vzdálenosti, proto i VHF detektory jsou účinné jen na krátké vzdálenosti. Naopak VLF senzory využívají velmi dlouhých vln, které se mohou odrážet i od horních vrstev atmosféry, k detekci na vzdálenosti až okolo 1 000 km. Podrobněji je rozvedeno v kapitole 1.2.2.

2.2.1 Elektrické pole ^[w1]

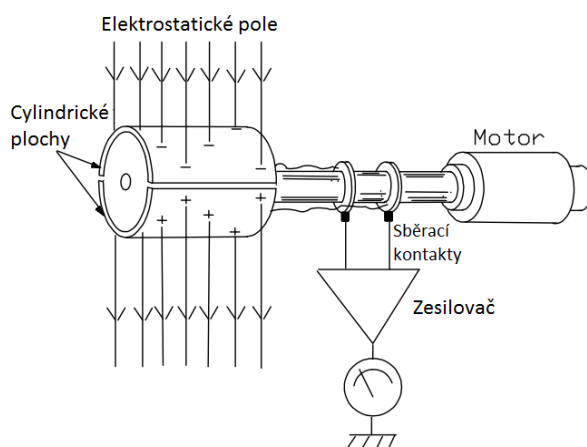
Jednou z poměrně jednoduchých metod jak detekovat bleskové výboje, je měření změny elektrostatického pole. Tato intenzita se za počasí bez působení bouřkové činnosti pohybuje okolo +100 V/m při zemském povrchu. Intenzita elektrického pole se rapidně mění při přechodu elektricky nabitých mračen bouřkové činnosti a při bleskovém výboji, a to řádově na jednotky kV/m. ^[w2]

Elektrometr

Nejjednodušším způsobem měření je snímání pole elektrometrem s připojenou anténou. Antény mohou být různého provedení, jako např. tyčová, desková či dlouhá drátová. Připojený elektrometr je poměrně jednoduchý elektronický obvod umístěný ve stíněném kovovém pouzdře, který zaznamenává časový průběh elektrostatického pole na připojené anténě.

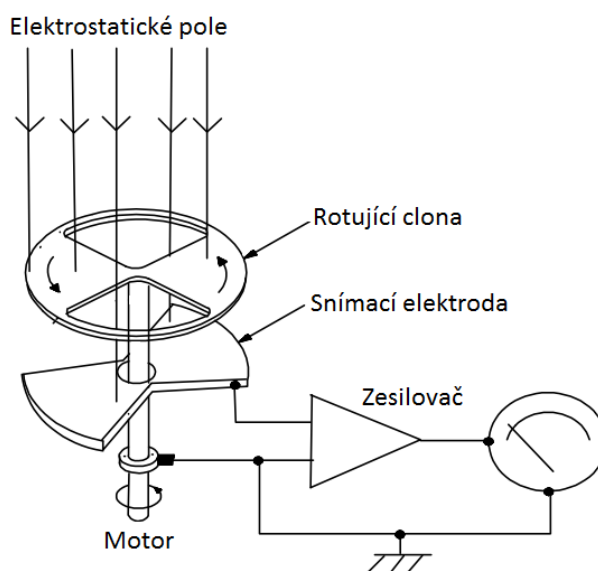
Mlýn elektrostatického pole ^[w3]

Mlýn elektrostatického pole je zařízení založené na elektrostatické indukci. Existují dva základní typy mlýnů. Prvním je tzv. **cyldrický mlýn**. Ten je schematicky zobrazen na *obrázku 4*. Na otáčející se vzájemně izolované plochy působí elektrostatické pole, které střídavě nabíjí cylindrické plochy opačnou polaritou. Vzniklé střídavé pole (vlivem rotujících ploch) je snímáno a zesilováno v zesilovači.



Obrázek 4 Cylindrický mlýn

Druhým typem mlýnu je mlýn s rotující clonou. Tento typ je znázorněn na obrázku 5. Uzemněná rotující clona střídavě zastíňuje pevnou izolovanou snímací elektrodu, která se nabíjí a vzniklý náboj je veden do zesilovače. Pro maximální účinnost tohoto mlýnu je zapotřebí dodržet směr osy mlýnu ke zdroji pole. Tento princip může být díky směrové závislosti vhodný i pro detekci nežádoucího pole v měřicích laboratořích či v průmyslu. Komerčně se využívá v několika zemích k detekci bouřkové činnosti.



Obrázek 5 Mlýn s rotující clonou

Změna elektrostatického pole

Jelikož se převážná část elektrostatického pole bleskového výboje odehrává při vyzařování na frekvencích od 1 Hz do 1 kHz ^[2L], frekvenční odezva mlýnu elektrostatického pole však této frekvenci neodpovídá. Není proto možné správně vyhodnocovat jednotlivé dílčí pochody pomocí mlýnu elektrického pole. Ten se hodí pro celkovou změnu elektrostatického pole. Proto byly zavedeny další metody. Pro vyhodnocování CG blesků se používá funkce χ^2 definovaná podle vzathu v. 1.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta E_{mi} - \Delta E_{ci})^2}{\sigma_{Ei}^2} \quad [\text{V/m}] \quad (\text{v. 1})$$

kde ΔE_{mi} je naměřená změna intenzity elektrického pole i-té pozemní stanice, ΔE_{ci} je vypočítaná změna pole v i-té pozemní stanici, σ_{Ei}^2 je odchylka měření v i-té stanici v důsledku chyby, a N je počet stanic.

Nejjednodušším příkladem je situace, kdy pozemní měřicí stanice budou mít všechny stejnou nadmořskou výšku $z_i = 0$, Q je neznámý náboj se sférickými souřadnicemi (x, y, z), stanice se nacházejí na dokonale rovném a vodivém povrchu,

všechn náboj se neutralizuje průchodem CG blesku, ϵ_0 je permitivita vakua a ΔE_{ci} je teoretická změna pole na i-té stanici. Takový případ nazýváme **model bodového náboje** viz *vztah v. 2*. V rovnici se nacházejí čtyři neznámé (souřadnice x, y, z a náboj Q), proto je pro řešitelnost této rovnice nutné pracovat se sítí alespoň čtyř senzorů. Neznámé jsou hledány iterační metodou, dokud funkce χ^2 nebude nabývat svého minima.

$$\Delta E_{ci} = \frac{2Q_z}{4\pi\epsilon_0[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad [\text{V/m}] \quad (\text{v. 2})$$

Pro detekci IC blesků lze upravit předchozí *vztah v. 2* a rozšířit jej pomocí metody superpozice. Teoretická vypočítaná hodnota změny elektrického pole ΔE_{ci} je zapříčiněna neutralizací dvou center mezioblačného náboje opačné polarity. Tento model se nazývá **dipólový**. Pro ΔE_{ci} tedy v tomto případě platí:

$$\Delta E_{ci} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2\Delta p_z}{R_i^3} - \frac{6z}{R_i^5} R_i \Delta p \right] \quad [\text{V/m}] \quad (\text{v. 3})$$

Kde $\Delta \mathbf{p} = Q\Delta \mathbf{l} = \Delta p_x \mathbf{a}_x + \Delta p_y \mathbf{a}_y + \Delta p_z \mathbf{a}_z$ a $\Delta \mathbf{p}$ je vektor změny dipólového momentu, $\Delta \mathbf{l}$ je vektor vzdálenosti mezi náboji a $\mathbf{R}_i = (x-x_i) \mathbf{a}_x + (y-y_i) \mathbf{a}_y + z \mathbf{a}_z$ kde \mathbf{R}_i je vzdálenost mezi bodovým nábojem a i-tou měřicí stanicí. Ze *vzorce v. 3* získáváme šest neznámých (x, y, z, Δp_x , Δp_y , Δp_z), a tedy potřebujeme alespoň 6 měřících senzorů.

Metody lokalizace bleskového výboje pracující na principu detekce elektrického pole nejsou dostatečně přesné, proto se většinou pro lokalizaci používají v kombinaci s metodou TOA (time of arrival) a DF (direction finding), jež jsou popsány v následující části.

2.2.2 Elektromagnetické pole

2.2.2.1 Metoda detekce směru DF (direction finding)

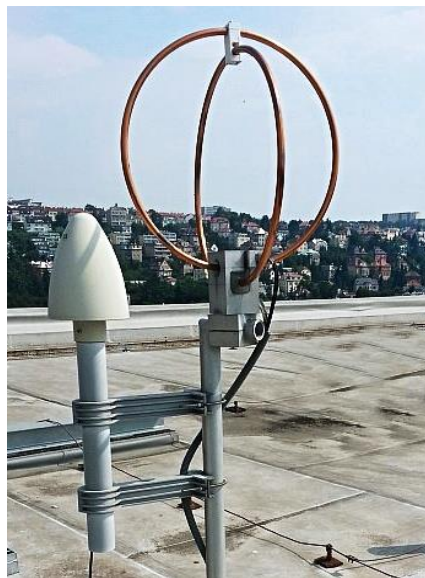
DF z anglického Direction Finding je metoda lokalizace bleskového výboje, založená na lokalizaci směru zdroje signálu. Senzor se skládá ze dvou navzájem kolmých vodivých smyček, jež jedna z nich má plochu orientovanou ve směru sever-jih a druhá východ–západ. Podle platnosti Faradayova indukčního zákona vyzařované magnetické pole indukuje ve vodivých smyčkách elektromotorické napětí, které je úměrné kosinu úhlu mezi vektorem magnetického pole a normálovým vektorem roviny smyčky.

Velké množství CG blesků má převážně vertikální směr šíření, proto jejich siločáry budou mít tvar horizontálních soustředných kružnic, šířících se od místa zdroje k přijímači. Uvedeme-li příklad smyčky V–Z, tak v této smyčce se indukuje maximální napětí (vzhledem k velikosti vyzařovaného magnetického pole), pokud je zdroj na sever či na jih od této smyčky.

Avšak druhá smyčka orientovaná S–J indukuje z uvažovaného bleskového výboje nulové napětí. Signál smyčky V–Z je úměrný kosínu úhlu mezi východem a zdrojem (ve směru od přijímače), kdežto signál smyčky S–J je úměrný sinu stejného úhlu. Podílem signálu z obou smyček je tedy tangenta úhlu mezi východem a zdrojem signálu, ze které již lze vypočítat úhel, odkud detekovaný signál přichází. Jeden směrový detektor je schopen určit azimutální úhel, pro detekci místa bleskového výboje je zapotřebí alespoň dvou detektorů o známé vzájemné poloze.

Směrová detekční zařízení DF jsou dvojího druhu:

Úzkopásmové detektory pracující v úzkém pásmu frekvencí mezi 5 kHz a 10 kHz, kde se neprojevuje tak velký útlum vlivem odrazů signálů od ionosféry a vyzařovaná energie je dostatečně silná. Nevýhodou úzkopásmových detektorů je velká azimutální chyba při vzdálenostech pod 200 km, způsobená nevertikálními složkami (horizontálními výboji) magnetického pole a odrazy od ionosféry. Chyby tohoto typu se nazývají polarizačními a jejich velikost je odhadnuta na 10 [24]. Další

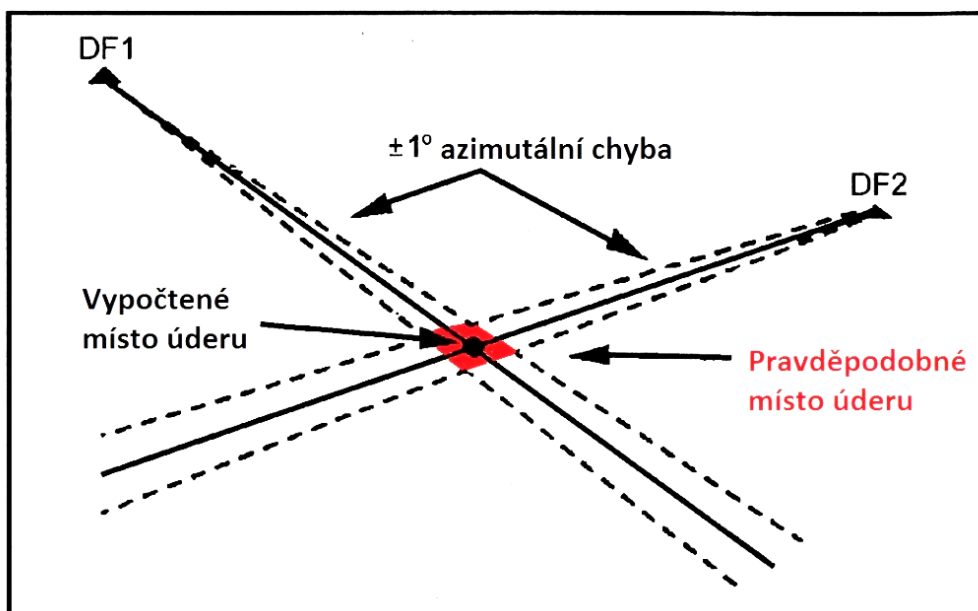


Obrázek 6 DF Detektor na střeše MFF UK v Praze

chyby úzkopásmových detektorů mohou být způsobeny terénními nerovnostmi a zářením blízkých vodičů. Takovéto chyby nazýváme chybami vlivem umístění, a jejich velikost se odhaduje až na 30° (Horner 1954). Později byl systém vylepšen a detekce byla prováděna pouze z prvních 100 μs . Tím byla eliminována polarizační chyba a přesnost se zvýšila na 2° [2L].

Širokopásmové detektory se šířkou pracovního pásma od jednotek kHz po 500 kHz byly vyvinuty po roce 1970 a byly schopny eliminovat azimutální chybu úzkopásmových detektorů. Eliminace spočívala ve vzorkování počáteční vrcholové hodnoty magnetického pole zpětného výboje signálu. Zpětný výboj má tendenci být vertikálním, a díky tomu je eliminována vertikální složka magnetického pole zapříčiňující polarizační chybu. Vzorkováním počáteční hodnoty se eliminuje i vliv odrazu od ionosféry, který má určité zpoždění za samotným výbojem. Předpokladem nízké polarizační chyby je plochá krajina a nevodivé okolí kolem detektoru. Azimutální chyby širokopásmových detektorů se pohybují mezi 1° – 2° [2L].

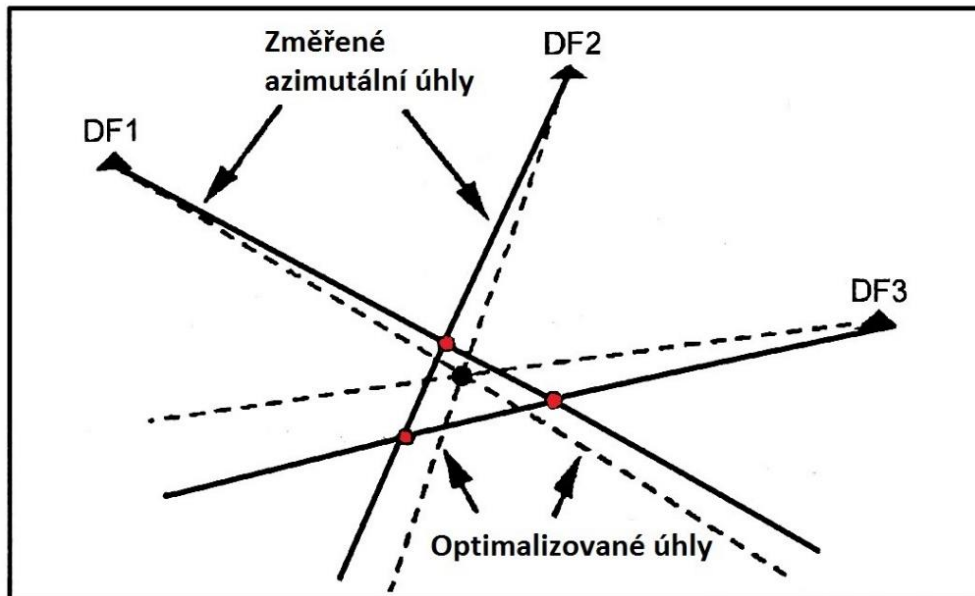
Jak bylo popsáno výše, k určení polohy bleskového výboje je zapotřebí nejméně dvou směrových detektorů. Tato situace je znázorněna na *obrázku 7*, kde plné čáry znázorňují vypočtené azimutální úhly, a černý průsečík pak místo úderu blesku. Čárkované čáry jsou azimutální chyby a jimi vymezená červená oblast představuje nejistotu při určování místa úderu.



Obrázek 7 Systém dvou detektorů

V praxi se ale používají systémy alespoň se třemi detektory. Tato situace je znázorněna na *obrázku 8*, kde plné čáry představují změřené azimutální úhly,

a červené body tedy možná místa úderu. Optimální místo úderu leží v průsečíku čárkovaných čar a vede k němu minimalizace funkce χ^2 ze vzorce v. 4.



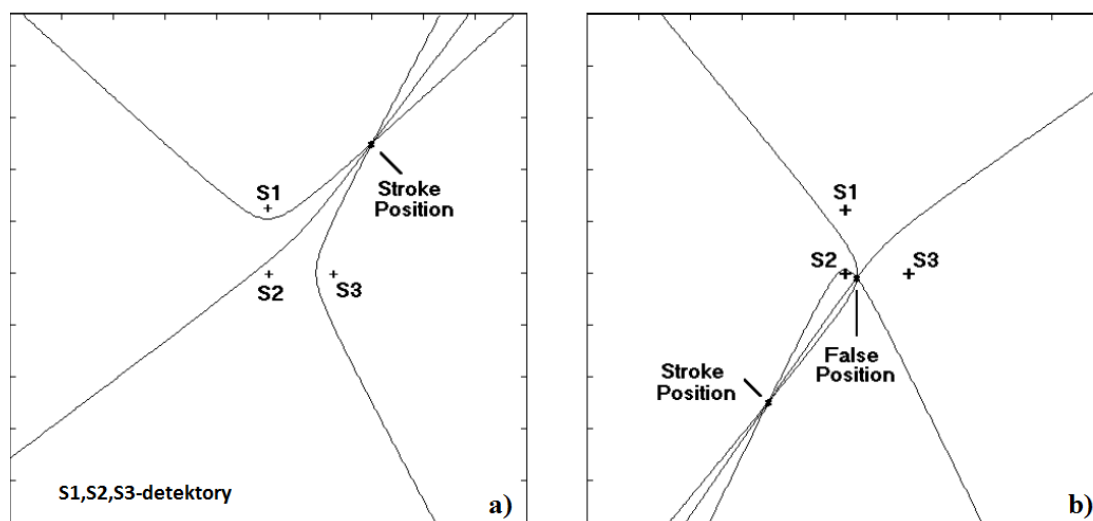
Obrázek 8 Systém tří detektorů

Kde θ_i , E_i jsou hledané hodnoty azimutu, respektive vrcholové hodnoty elektrického pole měřené v i -té stanici. θ_{mi} , E_{mi} jsou hodnoty změřeného azimutálního úhlu, respektive změřené amplitudy elektrického pole. σ_{θ_i} , σ_{E_i} jsou směrodatné odchylky měření.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\theta_{mi} - \theta_i)^2}{\sigma_{\theta_i}^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(E_{mi} - E_i)^2}{\sigma_{E_i}^2} \quad (v. 4)$$

2.2.2.2 Metoda času příchodu TOA (time of arrival) [2L]

TOA z anglického Time of Arrival je metoda detekce bleskového výboje, pracující na principu měření časů příchodu detekovaného signálu, a následnému vyhodnocení mezi synchronizovanými senzory. Rozdíl mezi časy příchodu signálu, zaznamenanými mezi jednotlivými snímači, se nazývá časovou diferencí. Vychází se z geometrického předpokladu, že body mající stejnou časovou diferencí leží na hyperboloidu. Průsečíkem hyperboloidů je pak rovina, ve které leží zdroj detekovaného signálu. Takováto situace je na *obrázku 9a*. Za jistých okolností se může stát, že nedojde k jednoznačnému průsečíku hyperboloidů (*obrázek 9b*). Z toho důvodu je třeba systém provozovat s minimálním počtem čtyř senzorů, kdy již nedojde k nejednoznačnosti lokalizace.



Obrázek 9 Průsečíky hyperboloidů

Existují tři typy systémů pracujících s různou vzdáleností mezi senzory. Jsou to systémy s velmi krátkou, krátkou a velkou vzdáleností detektorů. První dva typy, tedy s velmi krátkou a krátkou vzdáleností, pracují v rozsahu velmi vysokých frekvencí (VHF), tedy cca 30 MHz až 300 MHz. Poslední jmenovaný pracuje v rozsahu velmi nízkých (VLF) až nízkých frekvencí (LF), tedy 3 kHz až 300 kHz.

Systemy s velmi krátkou vzdáleností

Velmi krátká vzdálenost detektorů je taková vzdálenost, kdy VHF signálu trvá mnohem kratší dobu urazit vzdálenost mezi snímači, než je doba trvání mezi následnými bleskovými impulzy. Doba mezi pulzy je v řádech jednotek až stovek mikrosekund, proto vzdálenost mezi snímači musí být úměrně menší době trvání přenosu signálu mezi snímači.

První funkční systém navrhli Oetzel a Pierce v roce 1969. Skládal se ze tří antén se vzájemnou vzdáleností 30 m až 300 m a frekvenčním rozsahem 30 MHz až 100 MHz. Tento navržený systém dokázal měřit azimut, tedy orientovaný úhel od severu, výšku, a nikoliv lokalizaci. Přesnost záležela na velmi dobré synchronizaci časových základů všech snímačů. V dnešní době se provádí přesná synchronizace pomocí času z GPS (Global Position System), avšak v roce 1969 nebyla takto přesná a jednoduchá synchronizace možná. Postupem času byl tento systém vylepšen a modifikován novými anténami a změnou frekvenčního rozsahu.

Systemy s krátkou vzdáleností

Jedním ze systémů s krátkou vzdáleností detektorů je LDAR (Lightning Detection and Ranging), který vyvinuli v Kennedyho vesmírném středisku na Floridě. Pracuje se šesti podřízenými a jedním řídicím detektorem na stejné frekvenci 66 MHz a s šířkou pásma 6 MHz. Těchto sedm senzorů je rozmístěno do oblasti s průměrem 20 km a pokrývá detekční oblast přes 100 km od středu s prostorovou schopností rozlišení 100 m. Ve chvíli, kdy měřený signál přesáhne prahovou hodnotu zaznamenanou na řídicím snímači, začne měření i na všech zbylých po dobu 82 μ s. Data jsou poté odeslána pomocí mikrovlnného signálu do řídicí stanice, kde je provedena korekce o čas přenosu mezi stanicemi, a vypočtena lokalizace místa bleskového výboje.

Dalším systémem s krátkou vzdáleností senzorů byla vynalezena přenosná verze systému LDAR v institutu NMIMT (New Mexico Institute of Mining and Technology). Tento systém obsahoval čtyři stanice schopné jednoznačně detekovat místo vzniku výboje, a pátou sloužící k potvrzení správnosti výpočtu. Detektory byly rozmístěny ve vzdálenostech 10 km až 40 km od sebe. Prostorové rozlišení bylo 100 m. Chyby v určování horizontálních souřadnic polohy se pohybovaly okolo 25 m. Vertikální chybovost byla v rozmezí 100 m a 1 km.

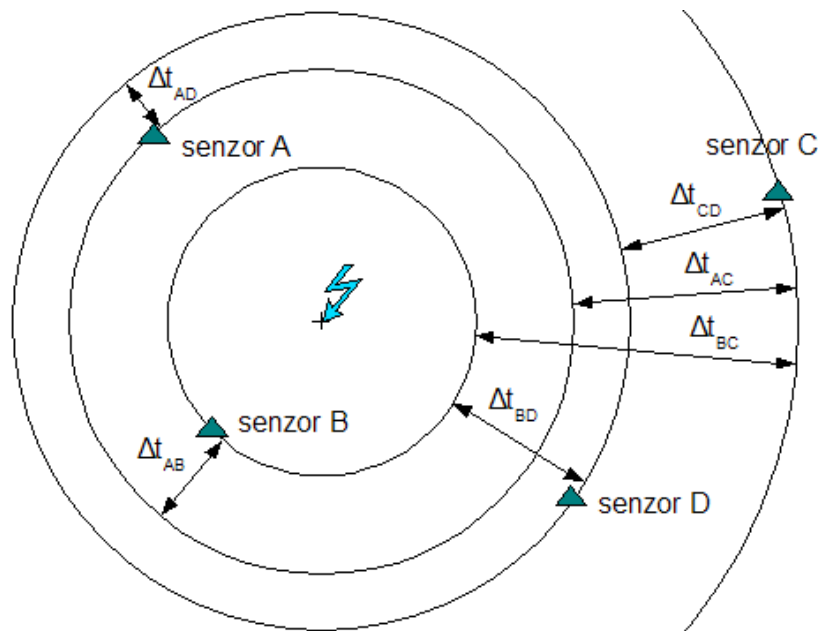
Systemy s velkou vzdáleností

Principiálně funguje stejně jako systém s velmi krátkou vzdáleností, ale na nižší frekvenci a s větší vzdáleností senzorů. Velká vzdálenost mezi detektory je v tomto případě více jak 100 km. V roce 1960 byl vyvinut první systém s velkou vzdáleností mezi senzory, který se skládal ze dvou detektorů v USA ve státě Massachusetts, pracující na frekvencích 4 kHz až 45 kHz.

Komerční systém byl vyvinut v 80. letech americkou Atmospheric Scientific Corporation a pojmenován LPATS (Lightning Positioning And Tracking System). Skládá se minimálně ze čtyř senzorů ve vzdálenostech od 200 km do 400 km. Původní verze byly synchronizovány pomocí pozemního systému radiové navigace LORAN (LOng Range Aid to Navigation). Následovaly pozdější verze se synchronizací pomocí signálu GPS. První verze systému nebyly schopny rozlišit mezi CG blesky a mezi oblačnými výboji, avšak novější verze tyto výboje rozlišovaly podle délky trvání pulzu. Všechny detekované výboje s délkou trvání nad 10 μ s/do 10 μ s, byly zařazeny jako CG/IC výboje.

Lokalizace bleskového výboje metodou TOA

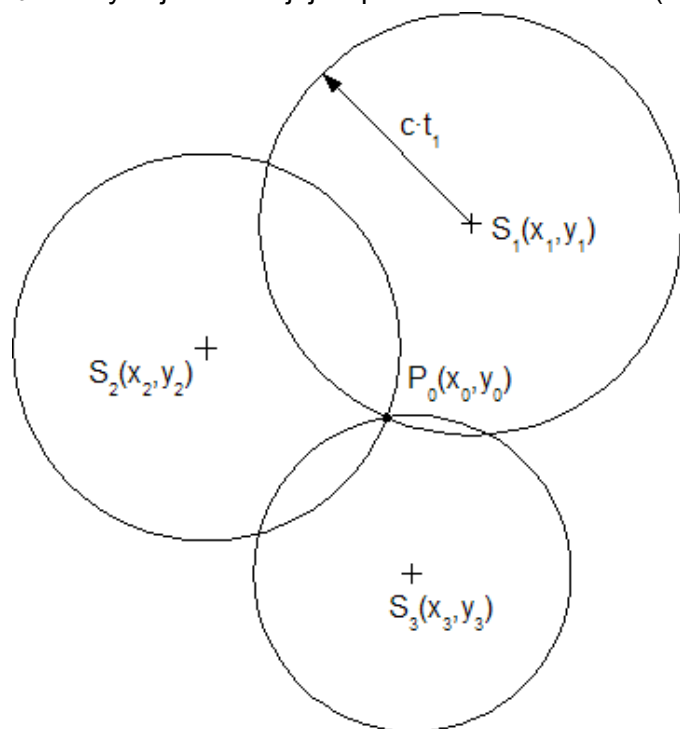
Jak již bylo řečeno, k jednoznačné lokalizaci je nutné využít nejméně čtyř senzorů. Rozdíly v časech příchodu signálu Δt_i mezi jednotlivými senzory (A–D) jsou znázorněny na obrázku č. 10.



Obrázek 10 Časové difference senzorů

Pro zjednodušení a lepší názornost principu lokalizace je uvažováno síť pouze tří senzorů. Mějme tři senzory S_1 – S_3 u kterých je známa jejich poloha v souřadnicích (x_{1-3}, y_{1-3}) a hledaný bod úderu blesku P_0 se souřadnicemi (x_0, y_0) . Je obecně známo, že elektromagnetický signál se šíří rychlostí světla, tudíž vzdálenost bodu P_0 od senzoru se vypočítá jako součin rychlosti světla c a času t_i , za který urazí signál tuto dráhu ke snímači.

Pro výpočet souřadnic bodu P_0 je nutné sestavit soustavu tří rovnic.



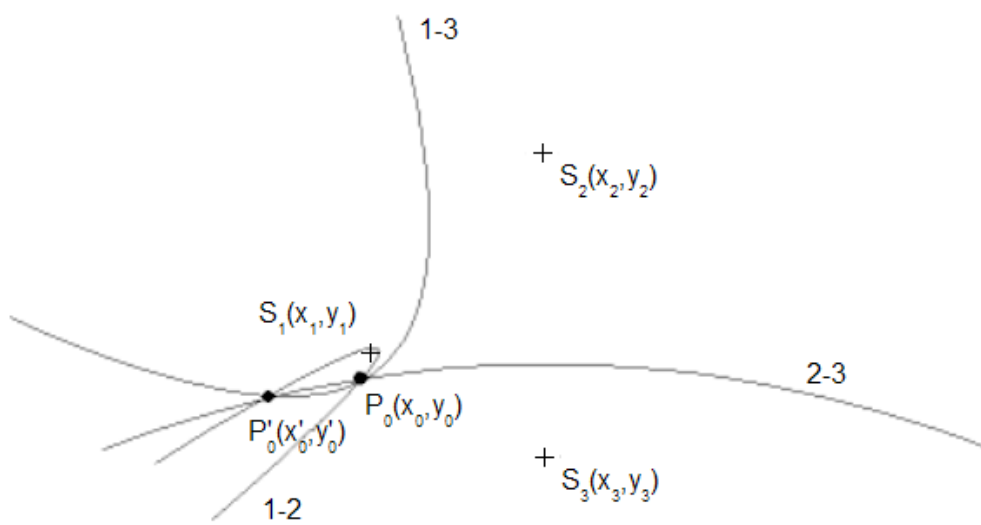
Obrázek 11 Situace se třemi senzory

$$t_0 = t_1 - \frac{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}}{c} \quad (\text{v. 5})$$

$$t_0 = t_2 - \frac{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}}{c} \quad (\text{v. 6})$$

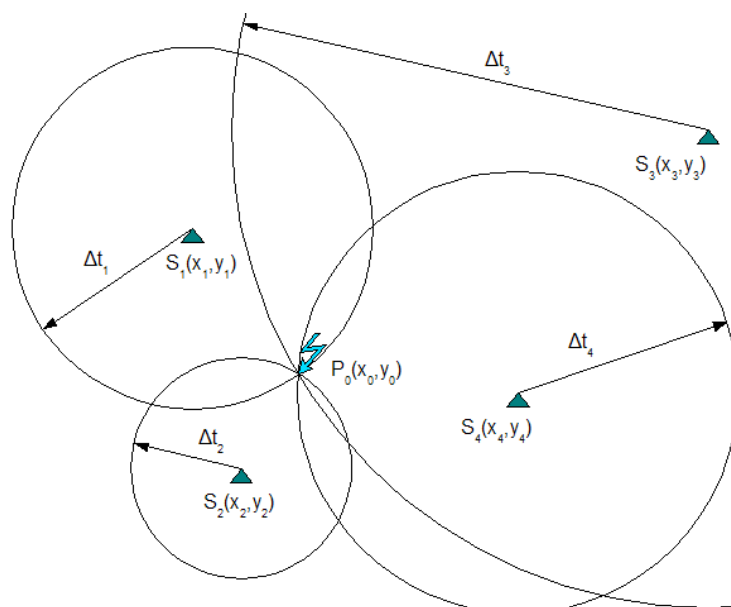
$$t_0 = t_3 - \frac{\sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2}}{c} \quad (\text{v. 7})$$

Řešení soustavy rovnic vede na kvadratickou rovnici a z toho vyplývá, že výsledkem budou dvě řešení bodů lokalizace P_0 a P_0' . Problém lokalizace je možno znázornit graficky pomocí průsečíků hyperboloidů, jako je na *obrázku č. 12*.



Obrázek 12 Nejednoznačné řešení se třemi senzory

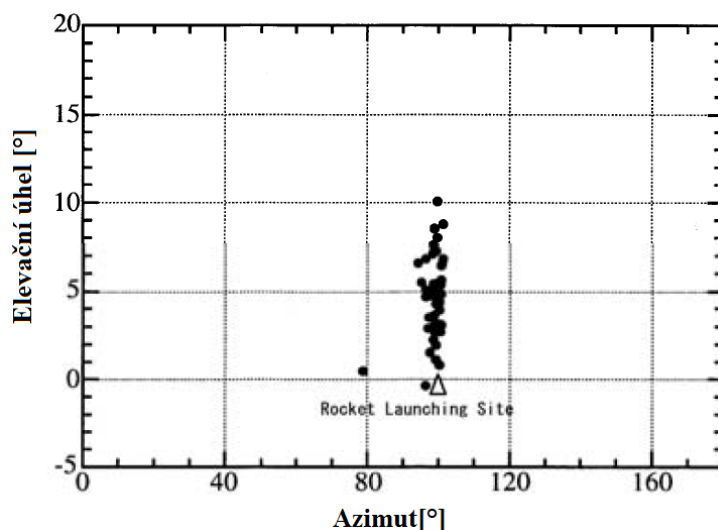
Čtvrtý senzor bezpečně odstraní problém s nejednoznačností řešení, viz *obrázek č. 13*.



Obrázek 13 Lokalizace pomocí čtyř senzorů

2.2.3 Interferometrie

Je známo, že bleskový výboj nevyzařuje pouze izolované pulsy, ale i shluky jednotlivých pulsů, které není možno rozlišit pomocí metody TOA. Možnost, jak takové shluky rozlišit a zaznamenat, nám dává širokopásmová interferometrie. Základní myšlenkou širokopásmového interferometru je odhad fázového rozdílu v různých frekvenčních složkách Fourierových spekter mezi dvojicí širokopásmových antén. Pomocí diskretní Fourierovy transformace je možno získat fázový posuv a vypočítat azimutální a elevační úhel shluku výbojů. ^[w4] Příklad takovéto 2D lokalizace je na *obrázku 10*. Za předpokladu, že potřebujeme určit konkrétní polohu ve 3D, je nutné použít minimálně dva senzory.



Obrázek 14 Příklad 2D lokalizace shluku výbojů za použití širokopásmové interferometrie. Příklad ukazuje vertikálně vypuštěnou raketu k navedení výboje do místa měření.

První interferometr pro studium bleskového výboje byl navržen v roce 1979. Od té doby prošel mnoha modifikacemi a v dnešní době je známa jeho komerční varianta zvaná SAFIR (Surveillance et Alerte Foudre par Interférométrie Radioélectrique). SAFIR čítá tři detektory vzdálené 10 km/nad 100 km pro získávání mapy ve 2D/3D. Systém SAFIR pracuje na střední frekvenci mezi 110 MHz a 118 MHz s šířkou pásma 1 MHz. Tato frekvence se může měnit v závislosti na rušení okolního prostředí, aby nedocházelo k interferenci užitečného signálu s rušením. Každá stanice má poměrně komplikovaný systém přijímacích antén. Pro 3D lokalizaci a určení azimutu má každá anténa osm horizontálně oddělených přijímacích částí a pro určení výšky dokonce 16 jak horizontálně, tak i vertikálně oddělených částí antén.

2.3 Detekce bleskových výbojů

2.3.1 Síť pro detekci bleskových výbojů

2.3.1.1 Evropa

EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection)

Mezinárodní detekční síť využívá spolupráce dílčích podsystémů na národní úrovni a tvoří tím ucelený a koordinovaný celoevropský detekční systém. Jednotlivé podsystémy odesílají v reálném čase data do místa zpracování a vyhodnocení dat v německém Karlsruhe. EUCLID tvoří 11 dílčích nezávislých sítí provozovaných jednotlivými státy. Zastoupení zemí podílejících se na síťovém pokrytí se nachází v *tabulce č. 1*.

Cílem provozovatelů detekčních sítí bylo zefektivnění lokalizace blesků na jejich vnější hranici, protože bylo zjištěno, že přesnost rapidně klesá v obvodové zóně dosahu detekčních čidel. Proto začalo docházet ke spolupráci jednotlivých územních systémů, které vedlo ke zvýšení přesnosti detekce. První dohoda o sjednocení do celoevropského systému EUCLID proběhla v roce 1999.

Země	Síť
Španělsko	AEMET
Rakousko	ALDIS
Lucembursko, Belgie, Holandsko	BLDN
Německo, Švýcarsko, Velká Británie, Irsko	BLIDS
Česká republika, Polsko, Maďarsko	CELDN
Itálie	CESI-SIRF
Slovinsko, Chorvatsko, Srbsko, Bosna, Černá hora	SCALAR
Portugalsko	IPMA
Francie, Švýcarsko, Velká Británie, Irsko	METEORAGE
Norsko, Švédsko, Finsko, Estonsko	NORDLIS
Litva	LHMS

Tabulka 1 Přehled detekčních sítí spadajících do EUCLID

Detekční síť EUCLID

AEMET (Agencia Estatal de Meteorología)

Je národní meteorologickou službou Španělska. AEMET provozuje síť bleskových detektorů od roku 1990 a množství nasazených čidel stále rozšiřuje. Nyní čítá 20 detektorů společnosti Vaisala. 15 detektorů je rozmístěných po pevninské části Španělska a zbylých 5 na Kanárských ostrovech. Systém má pokrytí na území celého státu a sdílí naměřená data se sítí detektorů v Portugalsku a ve Francii.

ALDIS (Austrian Lightning Detection and Information System)

Je detekční systém sloužící od roku 1991. Skládá se z 8 čidel LS7002 firmy Vaisala, které slouží ke komplexnímu vyhodnocení nízkofrekvenčních výbojů jak typů Země-mrak, tak typu mrak-mrak. ALDIS provozuje vysílač na hoře Geisberg nedaleko Salzburgu, který je vybavený primárním měřením proudu. Naměřená data používá ALDIS nejen ke zpřesňování lokačních schopností čidel, ale také pro výzkumné účely.

BLDN (Benelux Lightning Detection Network)

Je síť šesti senzorů, a jednoho doplňkového za hranicí Lucemburska ve Francii. Hlavní síť je složena ze 4 LPATS a 2 IMPATS ES senzorů, jejichž data jsou spolu s doplňkovými shromažďovány v řídicím centru BLDN.

BLIDS (Blitz-Informationsdienst von Siemens)

Sídlí v oddělení společnosti Siemens AG v německém Karlsruhe a slouží zároveň jako středisko vyhodnocování dat pro evropský EUCLID. První detektory byly nainstalovány v roce 1991 a postupem času se síť rozvinula a modernizovala. Tím se zvýšila její přesnost a spolehlivost, protože první detekce systému vykazovaly velkou chybovost. Prvními uživateli naměřených dat se staly energetické společnosti a pojišťovny, ale následně se míra využitelnosti zvýšila použitím v meteorologii a pro složky integrovaného záchranného systému.

CELDN (Central Europe Lightning Detection Network)

Tento systém vznikl v roce 1999 za účelem zpřesnění detekce na území České republiky, Polska, Maďarska a celé centrální části Evropy. Spolu se stávajícími sítěmi BLIDS a ALDIS tak tvoří spolehlivý systém detekce pro střední Evropu, čítající 20 senzorů. V České republice jsou umístěny 2 senzory, a to v pražské Libuši a v Mohelnici.

CESI-SIRF (Co Elettrotecnico Sperimentale The Lister – Sistema Italiano Rilevamento Fulmini)

CESI je nezávislým centrem, které vede výzkum bleskové aktivity od šedesátých let minulého století a je zároveň poradenskou společností pro celé odvětví energetiky v oblasti problematiky bleskové aktivity. V roce 1994 CESI vyvinulo lokační systém nazvaný SIRF, zahrnující 16 vlastních nově nainstalovaných senzorů. Pro doplnění ke zpřesnění lokace v periferních oblastech využívá data z francouzských, rakouských a španělských lokačních stanic. Vyhodnocovací výpočetní středisko sídlí v Miláně.

SCALAR (Slovenski Center za Avtomatsko Lokalizacijo Atmosferskih Razelektritev)

V překladu: „Slovinské středisko pro automatickou lokalizaci atmosférických výbojů“. V roce 1997 byl spuštěn lokalizační systém 3 DF senzorů, který nebyl synchronizován s GPS systémem měření času, a proto docházelo k velkým nepřesnostem ve výpočtu polohy detekovaného výboje. Na základě toho došlo o rok později k rozšíření o dva LPATS III senzory kooperující s rakouským ALDIS. Systém se postupně rozrůstal a modernizoval až do dnešní doby, kdy čítá 8 senzorů.

IPMA (Instituto de português do mar e da atmosfera)

V překladu: „Portugalský institut moře a atmosféry“ je autonomní veřejná instituce portugalského státu, fungující pod dohledem Ministerstva zemědělství a moře. Detekční systém tvoří čtyři senzory pokrývající oblast pevniny a přilehlých oblastí oceánu. Měření provádí (jak je již v posledních letech zvykem) na základě kombinace metody MD a TOA časovou synchronizací pomocí GPS.

METEORAGE

Meteorage je akciovou společností dvou akcionářů, a to Meteo France a Vaisala, založenou v roce 1987. Ve stejném roce spustila svou detekční síť. Mimo provozu detekční sítě navrhuje, vyrábí a distribuuje systémová řešení řízení rizik spojených s bleskovou aktivitou. V roce 1990 se rozšířila o dvě čidla ve Švýcarsku a mezi lety 2008 a 2010 o oblast Irska a Velké Británie.

NORDLIS (Nordic Lightning Information System)

Centrem NORDLIS je finský meteorologický institut, zabývající se již od roku 1880 sledováním blesků. Až do roku 1960 bylo toto sledování realizováno pracovníky institutu. Poté bylo částečně nahrazeno optickými čítači CIGRE, jejichž výstupem je záznam o počtu záblesků. V roce 1980 došlo k částečné automatizaci systému instalací několika senzorů, pracujících na MD principu. Čítače a nové senzory nějakou dobu fungovaly paralelně a umožňovaly srovnání dat pomocí obou typů měření. O 17 let později došlo k náhradě stávajících čidel za senzory typu IMPACT, využívajících velmi nízkých frekvencí.

LHMS (Lithuania HydroMeteorological Service)

Jedná se o litevský lokační systém sídlící ve Vilniusu, který pracuje v rámci komplexní národní meteorologické služby, spadající pod tamější ministerstvo životního prostředí.

2.3.1.2 Severní Amerika

NLDN (National Lightning Detection Network)

Dr. Richard Orville přišel s myšlenkou, že by regionální síť detekce blesků mohly být propojeny. V roce 1989 došlo ke spojení stávajících decentralizovaných sítí detekce blesků v NLDN na celém vnitrozemském území USA.

Lokační síť čítala 106 senzorů a byla složena výhradně z DF čidel s odhadnutou přesností detekce 2 až 4 km.^[w5] Data jsou již od roku 1991 komerčně dostupná. První zásadní vylepšení detekčního systému v roce 1995 vedlo ke zvýšení účinnosti detekce na cca 500 m^[w6] kombinací DF a TOA metod. Rok 1998 přinesl spolupráci s nově vzniklou CLDN (Canadian Lightning Detection Network) a tím zpřesnění detekce v hraničních oblastech s Kanadou. Sídlo a vyhodnocovací centrum sbíraných dat sídlí v arizonském Tucsonu. V roce 2003 přišel další upgrade sítě pomocí IMPACT ESP senzorů, detekujících výboje na vzdálenost až 1 500 km s následným vylepšením algoritmu pro zpřesnění v oblasti detekce mezioblačných výbojů. V roce 2013 došlo k poslednímu vylepšení sítě pomocí senzorů LS7001 a tím zvýšení přesnosti detekce blesku na 300 až 150 m. ^[w7]

2.3.1.3 Celosvětová síť

WWLLN (World Wide Lightning Location Network)

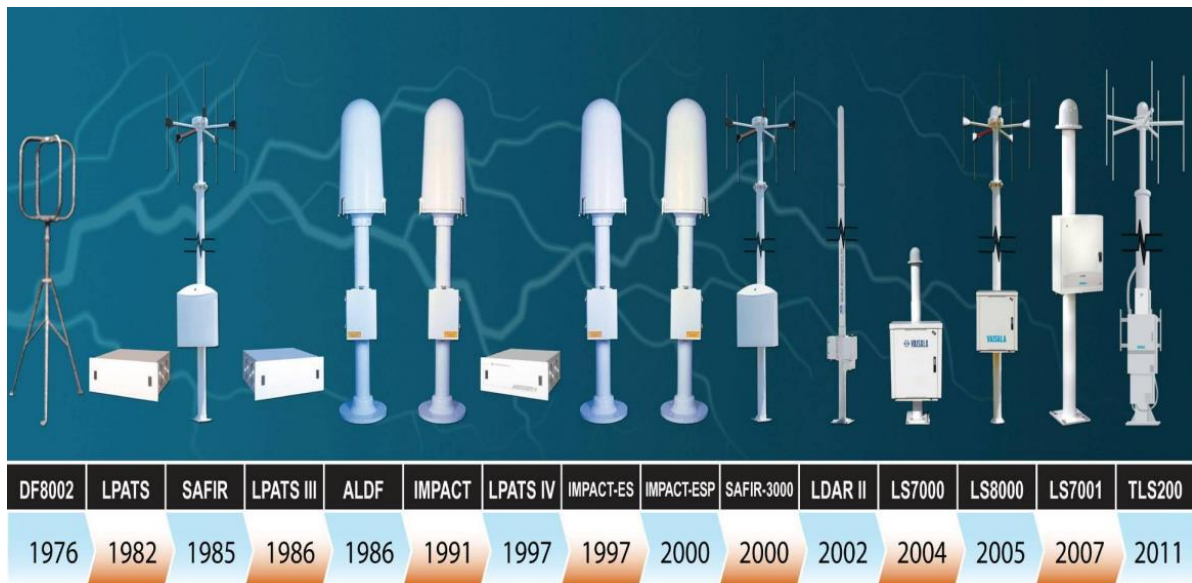
Využívá metodu TOGA pro vyhodnocení velmi krátkých vln z minimálně pěti senzorů. Ty jsou rozmístěny více jak 3 000 km daleko od sebe, co možná nejrovnoměrněji po povrchu celé Země. Účinnost detekčního systému je pouze 15 až 30 % z důvodu relativně malého počtu senzorů. Celosvětová lokační síť byla složena ve spolupráci více jak 50 vysokých škol. Nyní čítá 40 senzorů a jejich počet se má zvýšit na 60 během následujících 2 let. [w8]

2.3.2 Čidla pro pozemní detekci

V předchozí podkapitole „Sítě pro detekci bleskových výbojů“ se nacházela jména použitých senzorů pro detekci bleskových výbojů. V následující tabulce se nachází jejich výčet spolu s použitými metodami detekce výboje. Dále pak na obrázku č. 11 jsou jednotlivé snímače znázorněny k utvoření představy o jejich fyzické podobě.

Označení senzoru	Vydaný roku	Status	Frekvence	Lokační metoda
DF 8002	1976	zastaralý	LF/VLF	DF
LPATS	1982	zastaralý	LF/VLF	TOA
SAFIR	1985	zastaralý	VHF/LF	Interferometrie
LPATS III	1986	zastaralý	LF/VLF	TOA
ALDF	1986	zastaralý	LF/VLF	DF
IMPACT	1991	zastaralý	LF/VLF	DF a TOA
IMPACT ES	1996	bez tech. podpory	LF/VLF	DF a TOA
LPATS IV	1997	bez tech. podpory	LF/VLF	TOA
IMPACT ESP	2000	bez tech. podpory	LF/VLF	DF a TOA
SAFIR 3000	2000	bez tech. podpory	VHF/LF	Interferometrie
LDAR-II	2002	zastaralý	VHF/LF	TOA
LS7000	2004	podporovaný	LF/VLF	DF a TOA
LS8000	2005	podporovaný	VHF/LF/VLF	DF, TOA a Interferometrie
LS7001	2007	aktuální	LF/VLF	DF a TOA
TLS200	2011	aktuální	VHF/LF/VLF	DF, TOA a Interferometrie

Tabulka 2 Typy čidel pro pozemní detekci

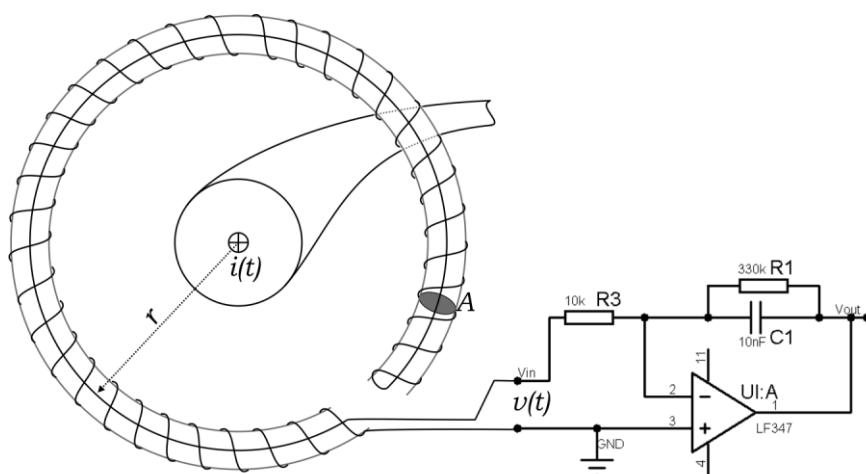


Obrázek 15 Typy čidel pro pozemní detekci

2.4 Vhodné senzory pro měření bleskového proudu

2.4.1 Rogowského cívka

Princip měřicí cívky publikoval již v roce 1912 německý fyzik Walter Rogowski. V dnešní době se díky nízkým výrobním nákladům a rozvoji vyhodnocovacích elektronických obvodů začíná hojně využívat. Jedná se o toroidní vzduchovou cívku navinutou na nemagnetickém jádře, viz obrázek 12.



Obrázek 16 Rogowského cívka

Rogowského cívka (dále jen RC) je používána stejně jako měřicí transformátor proudu (dále jen MTP) k měření harmonických, ale na rozdíl od MTP i přechodných impulsních proudů. V elektroenergetice se RC využívá hlavně pro měření proudů vyšších frekvencí a rychlých přechodných dějů, zejména v systémech elektrických ochran u výkonových transformátorů, přenosových vedení, odpojovačů a vypínačů. [w9]

Princip funkce

Využívá se magnetomotorického napětí U_m indukovaného na koncích RC, které je dále upraveno a vyhodnoceno. Toto napětí je důsledkem platnosti Ampèrova a Faraday-Lenzova zákona.

Ampèrův zákon říká, že součet proudu je roven integrací vektorů intenzity magnetického pole podle elementu délky po uzavřené křivce obklopující tento proud. Matematicky vyjádřeno jako:

$$i(t) = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad [A] \quad (v. 5)$$

Kde:

$i(t)$ je měřený proud

\vec{H} je vektor intenzity magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]

$d\vec{l}$ je nekonečně malý element délky [m]

Faraday-Lenzův zákon využívá proměnného magnetického pole v čase, které je důsledkem změny protékajícího proudu ze vztahu v. 5 a popisuje vznik elektromotorického napětí. Napětí indukované v jednom závitě se vypočítá jako: [w10]

$$u_e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (v. 6)$$

$$u_e = -\frac{d}{dt} (\iint \vec{B} \cdot d\vec{S}) \quad (v. 7)$$

$$u_e = -\frac{d}{dt} (\iint \mu_0 \cdot \vec{H} \cdot d\vec{S}) \quad (v. 8)$$

$$u_e = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{dH}{dt} \cdot \cos \alpha \quad (v. 9)$$

Kde:

u_e je elektromotorické napětí [V]

Φ je magnetický tok [Wb (V.s)]

\vec{B} je vektor magnetické indukce [T]

$d\vec{S}$ je element plochy [m²]

μ_0 je permeabilita vakua [H.m⁻¹]

S je plocha jednoho závitů [m²]

α je odklon vektoru intenzity magnetického pole \vec{H} od normály elementu plochy $d\vec{S}$ [rad]

Indukované napětí v celé cívce dostaneme po integraci vzorce v. 10, kde je zahrnut počet závitů cívky n . Konstanta M vyjadřuje vliv vzájemné indukčnosti. [w10]

$$u_c = - \int_0^1 u_e \cdot n \cdot dl \quad [V] \quad (v. 10)$$

$$u_c = -M \cdot \frac{di}{dt} \quad (v. 11)$$

$$M = \mu_0 \cdot S \cdot n \quad (v. 12)$$

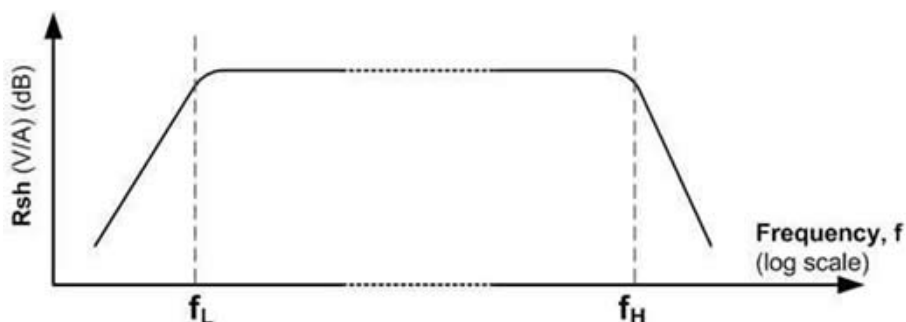
Kde: dl je element délky [m]

M je konstanta převodníku RC [H.m⁻¹.m².konst.]

$\frac{di}{dt}$ je změna měřeného proudu v čase [A.s⁻¹]

Měřicí rozsah RC

Vzhledem k tomu, že Rogowského cívka nemá železné jádro, nemůže dojít k nasycení magnetického obvodu, a její měřicí rozsah je velmi lineární. Rogowského cívka se používá pro široký rozsah frekvencí měřených proudů. Viz *obrázek č. 13*. Od f_L v jednotkách Hz až po f_H jednotky MHz. Pro nízké frekvence blíží se nule jde zesílení převodníku do nekonečna a vzrůstá šum nad únosnou mez. K eliminaci tohoto šumu se používá filtr dolní propusti.



Obrázek 17 Měřicí rozsah RC

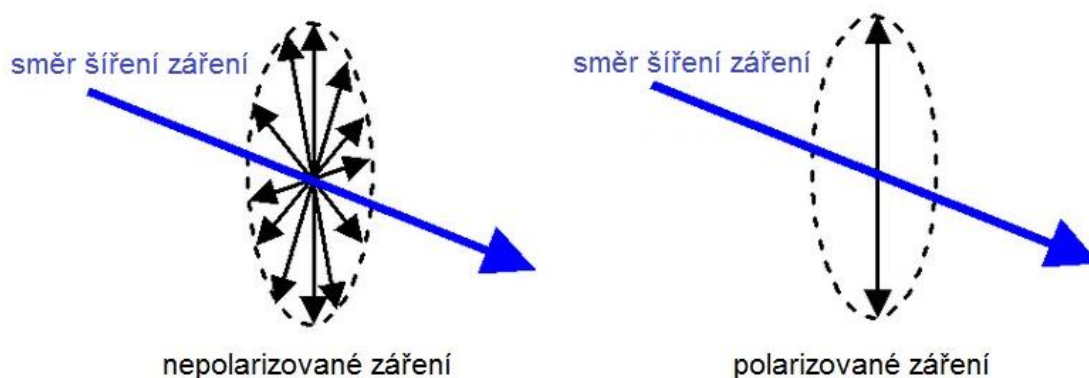
2.4.2 Magneto-optický senzor ^[w11]

Magneto-optický princip snímání bleskového proudu je založen na Faradayově jevu. Tento jev jako první experimentálně dokázal Michael Faraday již v roce 1845 a následně jeho interpretaci zdokonalil James Clerk Maxwell. Faradayův experiment dokázal spojitost mezi světlem (elektromagnetickým zářením) a magnetickým polem.

Faradayův jev popisuje tu skutečnost, že světelné záření interaguje s magnetickým polem. Důsledkem tohoto jevu je rotace polarizace světla ve světlovodu.

Princip funkce

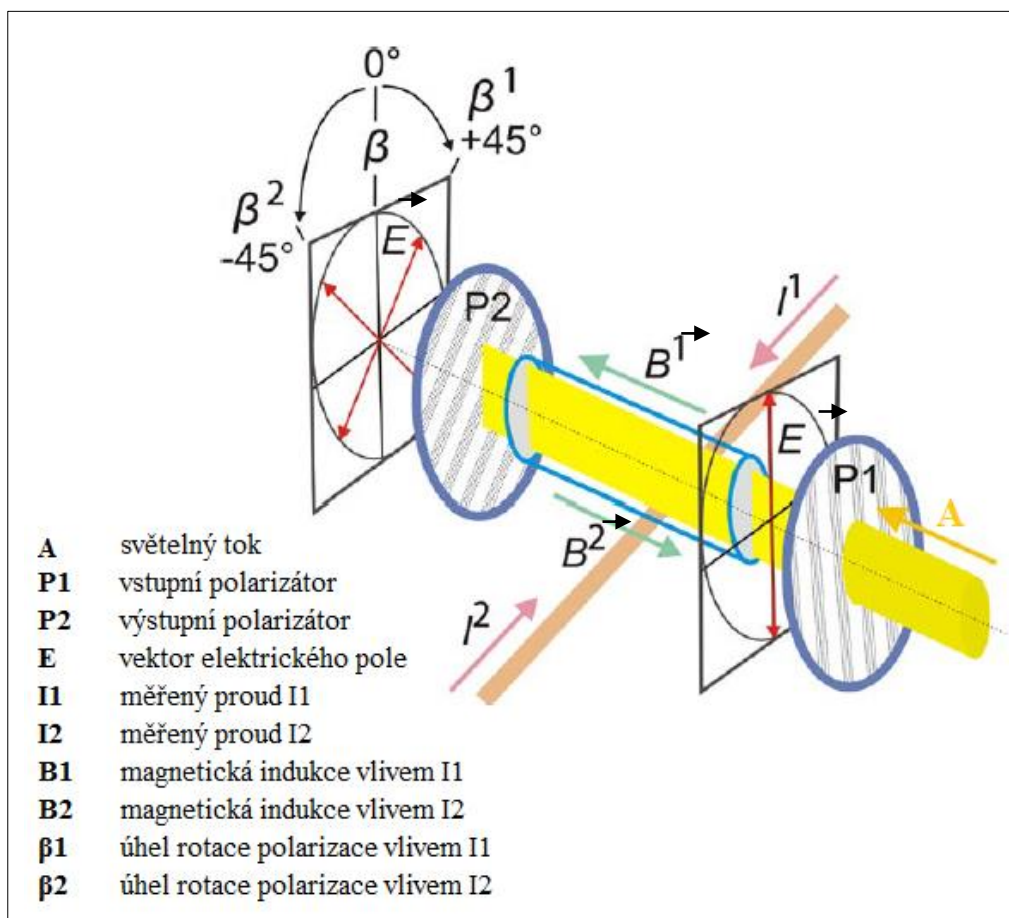
Světlo je příčným elektromagnetickým vlněním, které je popsáno vektory intenzity elektrického pole \vec{E} a vektory intenzity magnetického pole \vec{B} . Tyto vektory v čase periodicky kmitají a mění svou velikost i směr. Vůči sobě jsou však vždy kolmé. Takovému světlu říkáme nepolarizované. Pokud omezíme velikost či směr jednoho z vektorů, mluvíme již o polarizovaném světle. V tomto senzoru je použita lineární polarizace světla, tj. vektory kmitají ve stále stejném směru. V *obrázku 12* je znázorněn vektor intenzity \vec{E} nepolarizovaného a polarizovaného záření.



Obrázek 18 Lineární polarizace světla

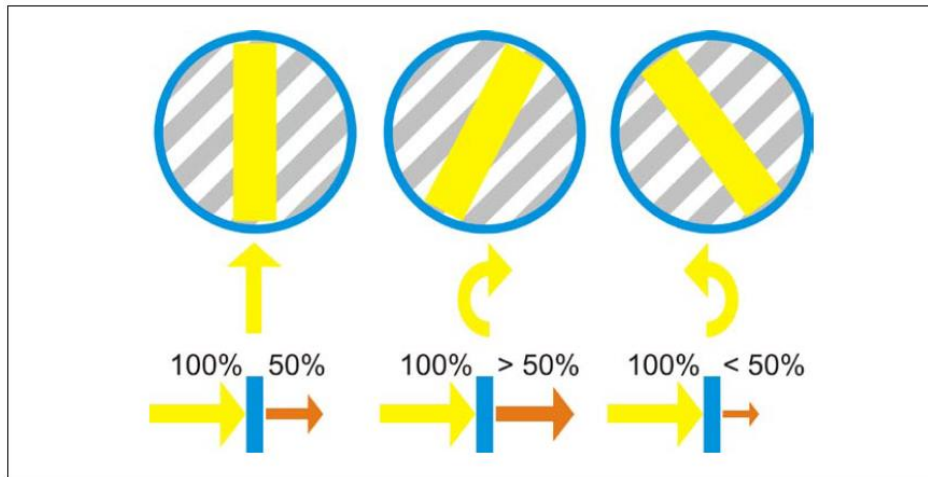
V magneto-optickém senzoru, znázorněném na *obrázku č. 15*, se využívá detekce úhlu natočení lineárně polarizovaného paprsku světla. Světlo o specifické intenzitě vyslané do senzoru, projde vstupním polarizátorem a dojde k jeho polarizaci. Takto natočené světlo prochází akční částí senzoru a podléhá působení magnetického pole, vyvolaného měřeným proudem. Magnetické pole otáčí rovinu polarizace kolem podélné osy a mění tím úhel vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} . Čím větší je měřený proud, tím větší je i úhel natočení polarizace. Následně je světlo

nuceno projít výstupním polarizátorem, který je pootočen o úhel 45° oproti polarizátoru vstupnímu. Vyhodnocení velikosti a polarity měřeného proudu probíhá podle obrázku č. 4.



Obrázek 19 Magneto-optický senzor

Pokud neprotéká měřeným vodičem žádný elektrický proud, vzhledem k pootočení výstupního polarizátoru o 45° se zaznamená na výstupu pouze 50 % světla. Jestliže dojde k průchodu kladného bleskového proudu, natočení osy polarizace bude mít kladný směr a zaznamenaný světelný tok bude více než 50 %. Úhlu $+45^\circ$ odpovídá 100 % bleskového proudu. Naopak záporný bleskový proud vyvolá záporné pootočení osy polarizace a zaznamenaný tok bude menší než 50 %. Úhlu -45° odpovídá 100 % bleskového proudu.



Obrázek 20 Vyhodnocení měřeného proudu

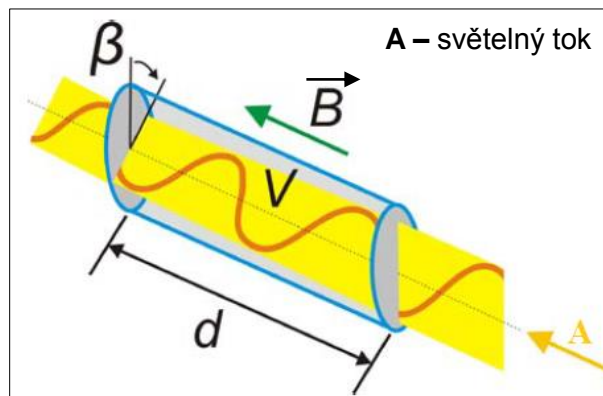
Určení změny úhlu polarizace, respektive vztah mezi úhlem natočení β a magnetickým polem, je dán vztahem v. 13.

$$\beta = V \cdot d \cdot \vec{B} \quad [\text{rad}] \quad (\text{v. 13})$$

Kde: V je Verdetova empirická konstanta pro světlovodný materiál [$\text{rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]

d je délka dráhy světla ovlivňovaná magnetickým polem [m]

\vec{B} je magnetická indukce [T]



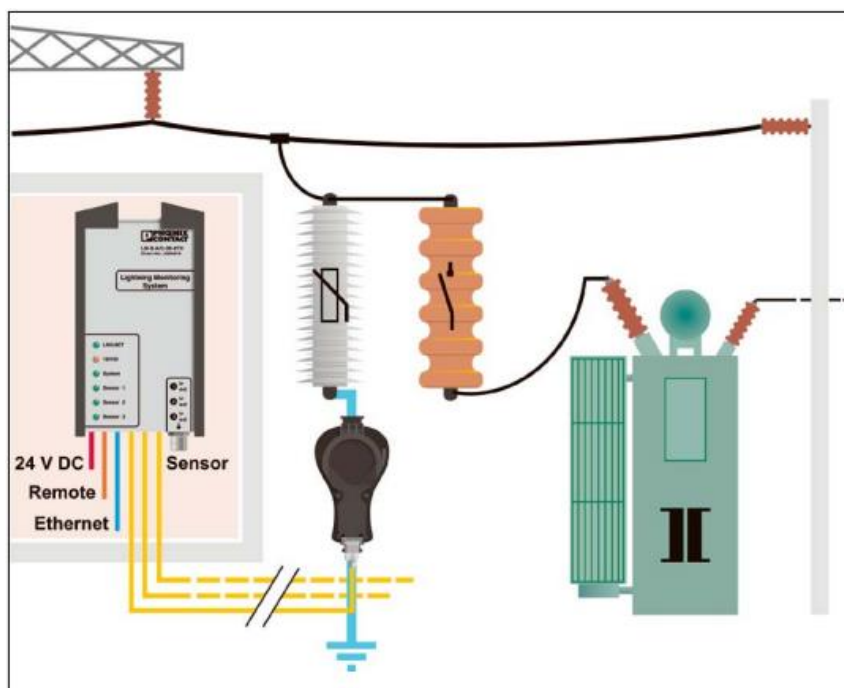
Obrázek 21 Změna úhlu polarizace

Při provádění instalace magneto-optického senzoru je třeba dbát co nejtěsnějšího spojení senzoru s měřeným vodičem bleskového proudu. Vyhodnocená velikost proudu je totiž závislá na intenzitě magnetického pole ve vzdálenosti r proudovodiče vycházející ze vztahu v. 14. Ze vztahu v. 15 vyplývá vliv vzdálenosti r instalovaného senzoru od měřeného vodiče proudu.

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot 2\pi r \text{ [A]} \quad (\text{v. 14})$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \text{ [A.m}^{-1}\text{]} \quad (\text{v. 15})$$

Magneto-optický senzor je v době zpracování této práce velmi zajímavým a inovativním čidlem, které dokáže jednak měřit bleskové proudy s dokonalým oddělením měřicí části od měřeného objektu, a jednak má velmi malou vlastní spotřebu. Jeho velkou nevýhodou je bohužel, alespoň prozatím, velmi vysoká cena, která brání masovějšímu rozšíření a přirozeně limituje jeho použití pouze na strategicky a ekonomicky významné objekty.



Obrázek 22 Příklad použití magneto-optického senzoru

3 Návrh konstrukce čítače bleskových proudů pro konkrétní objekt

Výše uvedené metody jsou vhodné pro prediktivní účely lokalizace místa možného úderu bleskového výboje do objektu či infrastruktury. Pokud však dojde k přímému zásahu objektu bleskovým výbojem, je tento ovlivněn interakcí tepelných a dynamických účinků vyvolaných bleskovým výbojem. Následně může dojít k poškození elektroinstalace a vnitřního vybavení požárem. Obtížné doložitelnosti, zda k požáru došlo vlivem bleskového výboje či jinými okolnosti, velmi využívají nejrůznější pojišťovací instituce, které bez průkazných metod nechtějí uznat škody.

Ve spolupráci s Ing. Janem Mikešem, Ph.D., Ing. Ondřejem Hanušem a Ing. Jakubem Kákonou jsem měl možnost sledovat přípravu a podílet se rešeršemi na vzniku prvního prototypu bezdrátového senzoru informujícího o zásahu objektu bleskovým výbojem.

3.1 Stanovení cílů

Spolu s kolegy jsme stanovili cíle, které musí být u senzoru zajištěny:

- 1) Systém musí včasné reagovat na průchod bleskového výboje svodem
- 2) Systém musí informovat správce či vlastníka objektu o okamžiku zásahu (nejlépe prostřednictvím bezdrátových technologií)
- 3) Systém musí být nízkoenergetický (pro dlouhodobý provoz)
- 4) Systém musí umožnit bezporuchový provoz po celou dobu mezi periodickými revizemi svodů a hromosvodných systémů (nejdelší periodičita 4 roky)
- 5) Systém musí být autonomní na napájecí síti objektu (nesmí dojít k zavlečení nebezpečného potenciálu do vnitřních instalací)
- 6) Systém musí být plombovatelný z pohledu vyššího certifikačního orgánu

V rámci prvních testů jsme navrhli pro nejkratší možné časové konstanty reakce na průchod bleskového proudu svodem elektromagnetické senzory, jejichž spínací doby dosahují řádově milisekund. Komerčními řešeními jsou nejběžněji toroidní cívky. K tomuto řešení nás vedl především fakt, že velmi často při přímém průchodu bleskového proudu svodem dochází k roztržení magnetického jádra cívky, nebo k indukci přepětí do elektronických vyhodnocovacích obvodů. Vyhodnocení klasifikace třídy bleskového proudu prošlého svodem bychom chtěli provádět na základě různé citlivosti elektromechanických kontaktů a jejich vzdálenosti od jímacího svodu. Pro bezpečné a

robustní řešení jsme navrhli i ochranné obvody vnitřní elektroniky, kompletní stínění. V neposlední řadě zbývá dořešit vhodné odstínění anténního výstupu pro bezdrátovou komunikaci.

Při analýze komerčních řešení jsme dospěli k závěru, že budoucí zařízení musí vykazovat především schopnost energetické autonomie, bezúdržbovosti a že s ohledem na možné typy napájení musí být minimálně energeticky náročné. Po pečlivé analýze energetické bilance napájení bezdrátových nodů jsme získali závěr, že možnými zdroji dobíjení energie systému mohou být: a) teplotní denní cyklus (noc vs. den), kdy termoelektrické Peltierovy články fungují jako zdroje energie. Pro tuto ideu jsou však potřeba specifické články schopné fungovat spíše na Seebeckově, než Peltierově jevu, neboť klasické Peltierovy články dostupné v cenách řádově akceptovatelných komercí se při laboratorních testech ukázaly jako zcela ekonomicky neefektivní s velmi nízkou účinností. Simulace dobíjecího cyklu je uvedena na obrázku. Možností za b) pro dobíjení by se mohlo použít solárních článků, které podle simulací poskytnou dostatek energie, avšak pouze za dobrých světelných podmínek. Tato varianta je uvažována jako alternativní, neboť jejím problémem je dislokace čidel většinou do stinných, zakrytých míst svodů. Jako úložiště energie, schopné napájet nody, byly zvoleny a testovány dvě metody: a) superkondenzátory, v omezených podmínkách definovaných finanční náročností nepřinesly dobré výsledky (předpokládáme nákup dražšího typu kondenzátorů s lepšími parametry) a b) baterie a akumulátory byly akceptovány jako poslední (nejjednodušší) možnost návrhu, ale jsou problematické z hlediska životnosti (vliv mají neustálé změny teploty, samovybíjení, chemická degradace, aj.) a vysoké ceny.

3.2 Vytvoření prototypu

Členové týmu vytvořili reálný prototyp budoucího bezdrátového čítače zásahů bleskovým výbojem do objektů. V prvním přiblížení bylo použito komerční řešení bezdrátového přenosu signálu od firmy IQRF. Po sérii testů, které byly s modulem provedeny, byly vyhodnoceny příliš vysoké nároky na spotřebu elektrické energie. Modul v době spánku odebírá proud 2 μA a při běhu 2 mA při napětí 3,7 V. Pokud modul očekává příjem bezdrátového přenosu, dosahuje proud 14 mA a při vysílání dokonce 24 mA. Z důvodu maximální úspory energie byl pro moduly zvolen mód provozu, ve kterém se po celou dobu nachází v režimu spánku a pouze při detekci bleskového výboje se probudí, odešlou zprávu a opět se přepnou do režimu spánku. Pouze jednou za čas automaticky odešlou zprávu o tom, že jsou stále v činnosti, aby byla zaručena integrita sítě. V takovémto módu provozu je nutné zajistit konstantní příkon alespoň 78 μW

(špičkově daleko vyšší). Z těchto důvodů byl pro další použití navržen koncept s mikrokontrolerem CC 1310 od firmy Texas Instruments, který v době spánku odebírá 185 nA a při běhu 51 μ A/MHz a maximální taktování je 48 MHz. Předpokládáme jeho koupi v roce 2016 a implementaci do druhého prototypu. Uvedený mikrokontroler se vyznačuje i integrovaným vysílačem na sub 1GHz pásma. Maximální výkon je +14 dBm a spotřeba při vysílání je 12,9 mA při výkonu +10 dBm. Pro praktické využití je tento modul mnohem efektivnější a nabízí možnost minimalizovat celé řešení z pohledu Energy Harvestingu.

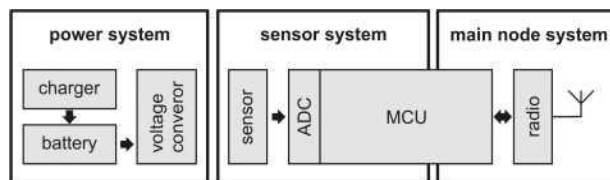
U modulu IQRF bylo provedeno testování energetické náročnosti a zároveň byla navržena a vyzkoušena komunikace. Byly akceptovány i stavy a především odolnosti zařízení z pohledu, kdy by mohly vysílat i dva nody ve stejném časovém úseku. Metodika technického řešení byla představena v odborné studii ^[w15] a ve zprávě SGS15/151/OHK5/2T/13 – Ekonomická reliabilita objektů zasažených bleskovým výbojem.

3.3 Metodologie návrhu druhého prototypu bezdrátového čítače bleskových proudů

- 1) Implementovaný senzor nesmí ovlivnit funkci svodu, jímače ani žádné jiné komponenty hromosvodního ochranného systému
- 2) Senzor ani jeho montáž nesmí zasáhnout ani ovlivnit činnost objektu, pro který je instalován
- 3) Zařízení musí být snadno instalovatelné jak do nového, tak původního objektu
- 4) Příklad nesmí výrazně zatížit rozpočet objektu
- 5) Příklad musí vykazovat dlouhodobou bezúdržbovost
- 6) Příklad musí odolávat vnějším elektrickým polím, která mohou s průchodem bleskového proudu vznikat v jeho okolí

Blokové schéma navrhovaného systému

Celé zařízení lze rozdělit do tří integrálních celků, 1) systému napájení, 2) systému EVENT (zařízení čekající na vnější podnět – elektromagnetický impulz), 3) systému vlastního zpracování a odeslání informace. Přehled o koncepci poskytuje následující blokové schéma.



Obrázek 23 Blokové schéma navrženého řešení

Koncepce zařízení sledujícího bleskový proud ve svodech vyhovující výše uvedeným podmínkám musí pracovat s technologií Wireless Sensor Network (WSN). Technologie by měla být schopná přenášet data, případně fungovat jako preprocesor a data zpracovávat v logickém uzlu a z něho posílat do centrální jednotky – musí se vycházet z nutnosti, že bude potřeba integrovat data z více svodů a případně z více logických jednotek.

WSN čítač by se obvykle měl skládat ze snímače, počítače, napájecí zdroj, a rádiový modul (viz obrázek). Krucíální podmínkou funkce čítače je především jeho vlastní velmi nízká spotřeba vedoucí až k energetické autonomii. WSN čítač by měl používat různé úrovně „spánku“, výkon procesoru, paměti a periferie by měl být řízen podle aktuálních potřeb (dle parametrů testu, dle zpracování dat, při komunikaci, neaktivitě, atd.).

Takto řešené sítě se mohou skládat z několika segmentů, kromě energetické soběstačnosti, anebo nízké energetické náročnosti, není žádný teoretický limit na jejich množství. Navržená koncepce sítě pracuje s hvězdicovitou topologií.

Byly testovány vývojové soupravy IQRF a Texas Instruments CC 1310

Pro účely snímání vlastního bleskového proudu byla testována komerční pasivní čidla bleskového proudu od firmy Dehn and Söhne, toroidní cívky i elektromechanické převodníky. Elektromechanické převodníky vykazovaly největší spolehlivost i ve ztížených meteorologických podmínkách.

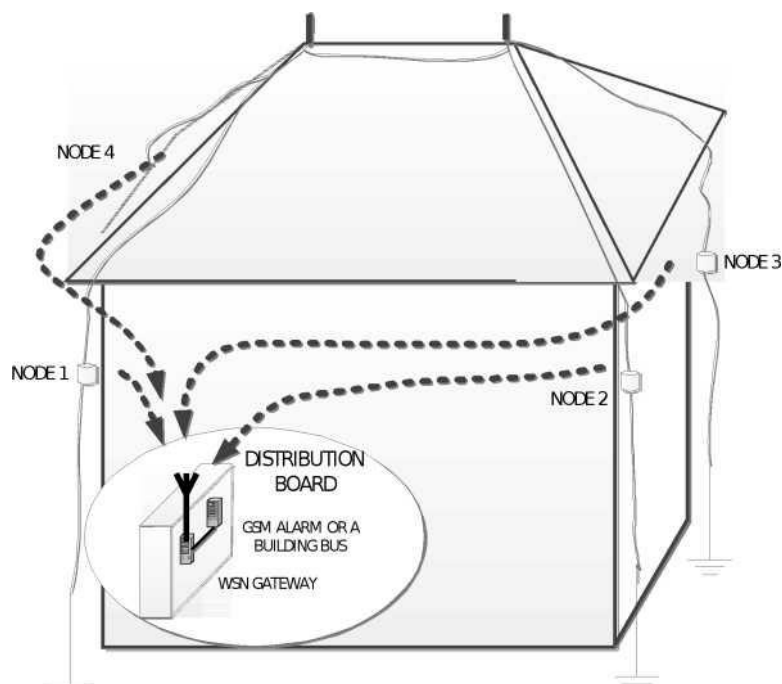
Zvolená technologie WSN zajišťuje spolehlivé údaje:

Přenos po dobu několika let. Při napájení z baterie, potřebuje napájení baterii vyměnit jednou za několik let. Pro zvýšení životnosti systému, jsme obohatili energetický systém solárním panelem, tepelným energetickým převodníkem a superkondenzátory – výsledky však nebyly příliš úspěšné v řádu experimentů a technologií, které bylo možné zkoušet. V naší aplikaci jsme zkoušeli i připojení detektoru na mikrorelé, které sloužilo především jako galvanické oddělení a blokovalo vznik přepětí v sekundárním okruhu

snímací cívky. Tento prvek se však opět stal stupněm mechanické nejistoty uvnitř celé koncepce vyvíjeného zařízení.

Jako dále studovanou problematikou, která fungovala spolehlivě po celou dobu experimentu, jsme zvolili akumulční zdroje energie s životností po celou dobu revizního období.

Pro řízení energetické spotřeby jsme zvolili mód, kdy celé zařízení je do příchodu podnětu EVENT v „hlubokém“ spánku s nízkou energetickou náročností. Spouštěcím podnětem je bleskový proud procházející svodem, nebo poruchový stav v podobě nízkého napětí zdroje, či jiné chyby. Po probuzení, uzel odešle „zprávu o události“. Centrální uzel má rádiovou komunikaci neustále vypnutou, a když přijde zpráva od mikrokontroléru, probudí GSM modul, který aktivuje vstup komunikátoru a odešle hlášení uživateli.



Obrázek 24 Nákres modelového domu

V další části práce jsem se soustředil především na ekonomickou optimalizaci navrženého řešení.

4 Ekonomické zhodnocení navržené systémové ochrany druhého prototypu

Ekonomická optimalizace navržené systémové ochrany by měla být koncipována s ohledem na co nejnižší cenu výsledného zařízení za současného splnění technických požadavků na koncový výrobek, které se projeví na funkčnosti, spolehlivosti, bezpečnosti, konkurenceschopnosti, ale i na uživatelském komfortu. Důraz bude kladen na co nejnižší cenu a na dlouhodobý provoz zařízení bez potřeby vnějšího zásahu. Dle normy ČSN EN 62305-3 – je nezbytný na každých 10 m délky objektu jeden svod, minimální počet svodů objektu jsou dva, umístěné na protilehlých částech objektu. Proto jsem provedl výpočty pro systém 2 čítačů a 2 svodů, kde pouze jeden z nich plní funkci master čítače s komunikačním GSM modulem.

Při ekonomickém rozboru řešení jsem se držel stanovených požadavků na výsledný systém, definovaných v předchozí kapitole.

4.1 Metodika výpočtu efektivnosti investice

Při ekonomické analýze daného problému jsem jak pro vyčíslování provozních a investičních výdajů, tak pro hodnocení investic, použil metody čisté současné hodnoty NPV (z anglického Net Present Value). Jedná se o metodu pro investiční rozhodování v delším časovém horizontu, kde je nutno zohlednit faktor času. NPV je součtem diskontovaných hotovostních toků podle vzorce v. 16

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \times (1 + r)^{-t} \quad (\text{v. 16})$$

Kde: **CF_t** je hotovostní tok v čase **t**

r je diskontní sazba

Diskontní sazbu **r**, neboli alternativní náklad kapitálu, jsem stanovil dle předpokladu využití systému převážně soukromými subjekty, a to ve výši 2,4 %. 1% úrokovou sazbu nabízí na trhu výhodnější spořicí účty ^[w13], průměrná inflace minulého roku byla dle statistik ČNB 0,4 % ^[w14] a zbylé 1 % je prémie za riziko.

4.2 GSM komunikace

Žádné z doposud dostupných řešení na komerčním trhu nenabízejí bezdrátovou komunikaci s autonomními čidly bleskových proudů. Pouze čítají zásahy blesku s mechanickým odečtem (řešení od firmy Dehn and Söhne), nebo sice odesílají data,

ale výsledný systém je velice nákladný a nemůže být z ekonomického hlediska implementován v širším měřítku, respektive jsou velmi energeticky náročná a potřebují externí napájení distribuční sítě (řešení od firmy Phoenix Contact).

Velkou výhodou navrhovaného systému je včasné upozornění majitele či správce objektu o vzniklé události. Ten pak může adekvátně reagovat. Buďto může být hlášení o průchodu bleskového proudu podmětem k zalarmování složek IZS (integrováný záchranný systém) v případě požáru či úrazu, nebo pro kontrolu stavu objektu (např. pultem centralizované ochrany – PCO). Případně také pro nadstandartní revizi jímací, svodové a zemnicí soustavy zajišťující ochranu před bleskem. Vlivem průchodu bleskového proudu totiž dochází k nadměrnému ohřevu svodové soustavy, a tím k uvolňování svorek a spojek. Následkem toho může dojít při opětovném zásahu k požáru. V neposlední řadě může být toto hlášení prokazatelným důkazem pojišťovací instituci o původu pojistné události a následného plnění.

Klíčové pro ekonomickou optimalizaci je ekonomika provozu GSM/GPRS komunikátoru. Jednotlivé snímače na svodech musí komunikovat s příjemcem zprávy jak v případě hlášení o průchodu bleskového proudu, tak v případě periodicitního hlášení o bezporuchovém stand-by režimu (to je nutné k zajištění integrity systému). Komunikace je realizována pomocí SMS a datových paketů komerčních operátorů. Jejich nejvhodnější měsíční tarifní nabídka s ohledem na nejnižší cenu pro květen 2016 je uvedena v tabulce č. 3.

Operátor	T-Mobile	O2	Vodafone
Tarif	M2M mini	O2 Machine	0 SMS fér
Jednotka	[Kč]	[Kč]	[Kč]
Měsíční paušální platba	14,52*	45,98	0
1MB/50MB** dat	21,0177	v ceně	49**
SMS	3,025	1,94	1,51
1 MB/50 MB*** dat nad rámec paušálu	21,0177	20	49***
* cena v případě závazku na min. 24 měsíců			
** /*** nabídka balíčku Data 50 MB LTE - Vodafone			

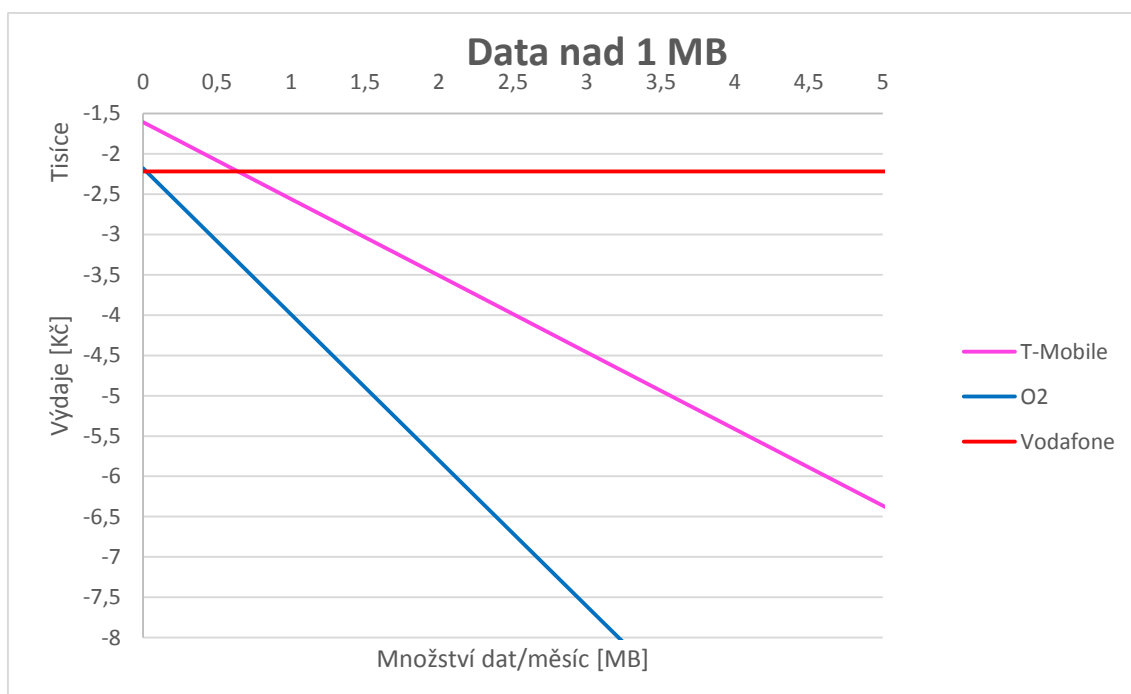
Tabulka 3 Nabídka tarifů komerčních operátorů

Ekonomická efektivita navrhnutého systému závisí z pohledu GSM komunikace jak na cenách tarifů nabízených operátory, tak samozřejmě na množství přenášených dat. Frekvence odesílání dat bude mít také významný dopad na provozní výdaje. Data

mohou být odeslána buď pomocí SMS nebo datovými pakety (případně jejich kombinací). Optimalizací jsem se zabýval v příloženém souboru aplikace Microsoft Office Excel „Provoz GSM“.

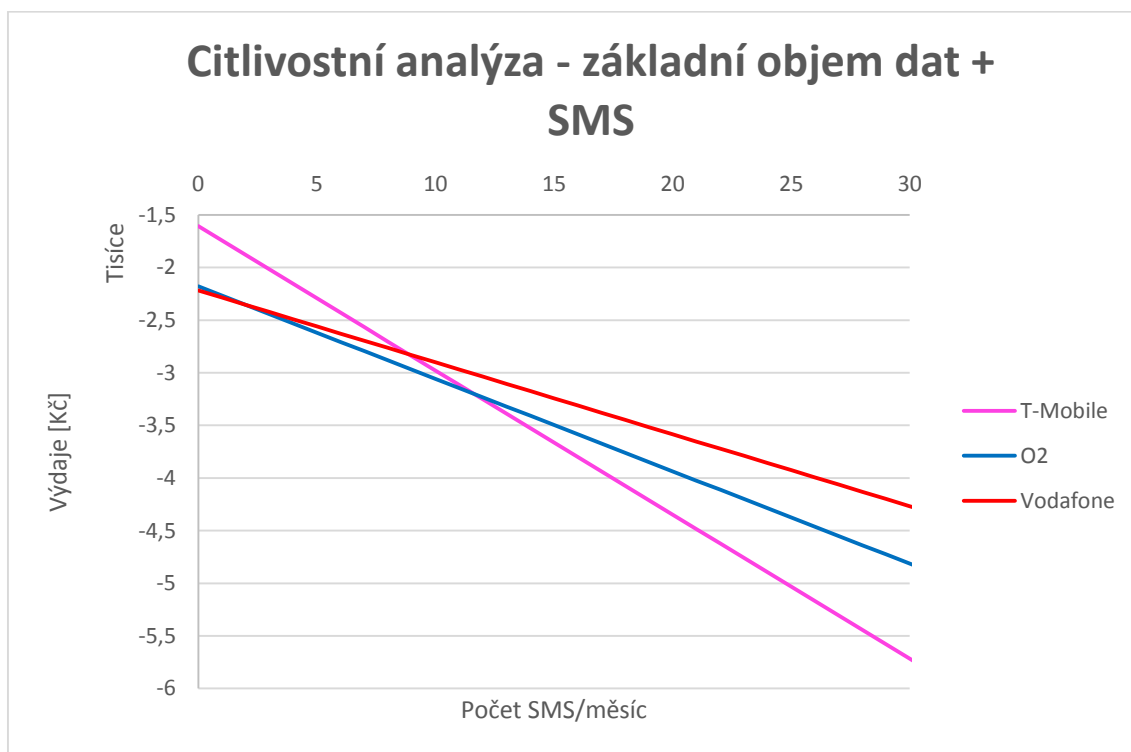
Variantní řešení komerčních operátorů byla porovnávána metodou čisté současné hodnoty (výdajového NPV) při době porovnání 4 let a diskontní sazbě 2,4 %.

Provoz systému by bylo možné optimalizovat do několika kategorií. První z nich je systém komunikující pouze přes GPRS, který bude využívat jen minimální objemy dat do 1 MB za měsíc. Takto navržený systém je ekonomicky nejšetrnější, ale jeho praktické využití je díky velmi malému objemu přenášených dat a absenci SMS komunikace diskutabilní. Na *grafu č. 1* je patrné, že pokud by byl takový systém využíván v základním datovém objemu 1 MB s dodatečným objemem 0,64 MB, tedy do 1,64 MB dat/čidlo/měsíc, měl by nejnižší možné provozní výdaje, a to ve výši do 2 156 Kč. Volba operátora by do tohoto objemu dat připadla na společnost T-Mobile Czech Republic a.s. (dále jen T-Mobile) s tarifem M2M mini. Společnost Vodafone Czech Republic a.s. (dále jen Vodafone) však nabízí balíček „Data 50 MB LTE“ za paušálních 49 Kč vč. DPH, a tedy i mnohem větší prostor pro datovou komunikaci oproti zvolené konkurenci, která podle platného ceníku účtuje sazbu za každý kB a komunikaci tak při větších objemech dat prodražuje.



Graf 1 Citlivostní analýza – využívání datového objemu

Z technického hlediska reálnější alternativou by byl provoz v režimu základního objemu dat do 1 MB/měsíc a přiměřeného množství SMS zpráv. Neoptimálnější pak provoz s nejnižším možným počtem SMS zpráv za měsíc. Do počtu 8 SMS/měsíc by měl být zvolen operátor T-Mobile a od této hranice výše pak společnost Vodafone. Výdaje spojené se systémem by činily při 8 SMS/měsíc 2 703 Kč.



Graf 2 Citlivostní analýza – základní objem dat 1MB + vliv SMS zpráv

Ekonomické hodnocení projektu ovlivňuje i zvolená výše diskontní sazby, proto jsem provedl citlivostní analýzu i na tuto proměnnou pro nabídku společnosti T-Mobile. Provedenou analýzou jsem zjistil, že podle předpokladu má mnou zvolená diskontní sazba pouze zanedbatelný vliv na výsledný model. Hlavním důvodem je relativně krátká doba diskontování a relativně nízké hotovostní toky v jednotlivých obdobích.

4.3 Napájení

Zajištění autonomie provozu snímače je stěžejní pro naplnění podmínek stanovených v technické části práce. Důvodem k autonomnímu provedení snímače je potřeba galvanického oddělení vnějších a vnitřních obvodů pro ochranu vnitřních instalací před indukovaným napětím. Zařízení nezávislé na vnějším napájení musí splňovat především velmi nízkou spotřebu energie, protože zvyšování kapacity energetického uložení vede k rostoucí ceně, ale i rostoucí váze a velikosti.

4.3.1 Modelování spotřeby

Pro ekonomickou analýzu vhodného napájecího zdroje je nezbytnou podmínkou znát proudové zatížení v časovém horizontu jeho provozování. Modelování spotřeby jsem provedl pro oba uvažované koncepty mikrokontrolerů, jak pro IQRF, tak pro CC 1310 od firmy Texas Instruments. Jednou ve verzi s GSM komunikátorem a jednou bez něj. Velký vliv na konečnou spotřebu má nejen samotný odběr mikrokontroléru a GSM komunikátoru v jejich provozních stavech, ale samozřejmě i doba trvání těchto provozních stavů.

Tabulka č. 4 ukazuje část výpočtu ekvivalentního konstantního proudu sloužícího pro výpočet doby provozu snímače. Voleny byly doby provozních stavů s periodicitou a trváním podle posledního sloupce tabulky.

IQRF – s GSM/GPRS modulem

mód	I [μ A]	U [V]	P [mW]	Provoz/rok [s]	E/rok [Wh]	Režim provozu/trvání
standby	2	3,7	0,0074	31536000	0,0648	roční/nepřetržitě
probuzení	2000	3,7	7,4	87600	0,1801	hodinový/10s
připraven přijímat	14000	3,7	51,8	87600	1,2605	hodinový/10s
vysílání	24000	3,7	88,8	43800	1,0804	hodinový/5s
standby GSM	10000	3,7	37,0	87600	0,9003	hodinový/10s
vysílání GSM	250000	3,7	925,0	104	0,0267	týdenní/2s
konstantně	108,4	3,7	0,401	31536000	3,5128	roční/nepřetržitě

CC1310 Texas Instruments – s GSM/GPRS modulem

mód	I [μ A]	U [V]	P [mW]	Provoz/rok [s]	E/rok [Wh]	Režim provozu/trvání
spánek	0,185	3,6	0,0007	31536000	0,0058	roční/nepřetržitě
probuzení	1200	3,6	4,3	87600	0,1051	hodinový/10s
připraven přijímat	2500	3,6	9,0	87600	0,2190	hodinový/10s
vysílání	12900	3,6	46,4	43800	0,5650	hodinový/5s
standby GSM	10000	3,6	36,0	87600	0,8760	hodinový/10s
vysílání GSM	250000	3,6	900,0	104	0,0260	týdenní/2s
konstantně	57,0	3,6	0,20513	31536000	1,7970	roční/nepřetržitě
vysílá se v po impulsech se střídou 1/4 (špička 1A)						

Tabulka 4 Modelování spotřeby snímače – režim hodinová kontrola s týdenním hlášením SMS zprávou

Velmi subjektivní může být pohled na periodicitu vyhodnocování poruchových stavů. Na jedné z pomyslných misek vah je rostoucí spolehlivost s frekvencí testování a na druhé rostoucí spotřeba snímače. Kompromisní mezi spotřebou a spolehlivostí systému se jeví býti zvolená perioda kontroly 1 hodiny. Doba trvání byla zvolena jako odhad času potřebného pro uskutečnění komunikace s bezpečnou rezervou pro

případné opakování zprávy a pro tzv. probuzení GSM komunikátoru. Ten je ponechán vypnutý po dobu nečinnosti a uveden v činnost je až ve chvíli potřeby. Uvažoval jsem dva možné režimy vzájemné komunikace mezi snímači. Režim minutové/hodinové kontroly s týdenním hlášením o stavu systému pomocí SMS. První z nich se později ukázal jako naprosto nevhodný s ohledem na energetickou náročnost. Režim hodinové kontroly byl aplikován ve výpočtech a spolu s týdenním odesíláním SMS zpráv o stavu zvyšuje spolehlivost celého systému.

4.3.2 Uvažované zdroje energie

Vzhledem k technickým problémům s testovanými možnostmi dobíjení bylo navrženo energetické hospodářství napájené pomocí baterií, které vede k vyšší spolehlivosti celého systému. Pro napájení snímače byly voleny různé varianty zdrojů napájení.

	Technologie	Typ	Výrobce	Kapacita	Jmenovité napětí	Cena/ks včetně DPH
Varianta A	RTU NI-MH	AA/RH6	Tecxus	2300 mAh	1,2 V	66,52 Kč
Varianta B	RTU NI-MH	C/RH14	JCB	4000 mAh	1,2 V	133,5 Kč
Varianta C	Alkalické	AA/LR06	Varta	2500 mAh	1,5 V	10 Kč
Varianta D	Lithiové	AA/L91	Energizer	3000 mAh	1,5 V	39,5 Kč

Tabulka 5 Varianty zdrojů napájení

Všechny bateriové a akumulátorové zdroje byly voleny z pohledu tří kritérií. Prvním kritériem byla co možná nejvyšší kapacita v mAh. Druhým kritériem byla co nejnižší cena a posledním nejnižší možné samovybíjení.

Tyto bateriové a akumulátorové zdroje disponují jmenovitou kapacitou, ale teoretická kapacita se od reálné, v případě rozlišných zdrojů, více či méně odchyluje. Prvním aspektem vedoucím ke snížení teoretické kapacity je samovybíjení. Konvenční NIMH akumulátory jsou známy velkým samovybíjením, proto byly jako první dvě varianty (A a B) zvoleny RTU (Ready-to-Use) akumulátory s malým samovybíjením. Procentuální hodnota samovybíjení ΔE_{rok} [%] je pro tyto články cca 15 % jmenovité kapacity za rok života. ^[w16] Alkalické baterie, zvolené jako varianta C, disponují daleko nižším samovybíjecím efektem, a to v rozmezí 2–3 %. ^[w17] Poslední volenou technologií je lithiový primární článek se samovybíjením ΔE_{rok} [%] okolo 0,6 % ^[w18] za rok života. Při použití alkalických článků je třeba zohlednit i ztrátu kapacity vlivem odběru velkých proudů ΔE_{IMAX} [%]. Při odběru 1 A to může být i více než polovina jmenovité kapacity. ^[w19] Teplotní závislost kapacity ^[w19] je také velkým neduhem této technologie. Při prudkých mrazech může kapacita klesnout až na 20 % jmenovité. ^[w19] Tato teplotní

závislost nebyla zohledněna ve výpočtech, protože jedinou možností jak ji akceptovat, by bylo nasimulovat teploty během roku dle dlouhodobého průměru v dané lokalitě a z nich dopočítat průměrný úbytek kapacity. Fatální chyba by však nastala v teplotně podprůměrném roce se zimními teplotami dlouhodobě kolísajícími hluboko pod bodem mrazu. V tomto případě by byla reálná kapacita mnohem nižší než teoretická a mohlo by dojít k předčasnému vybití baterie. Je proto nutné danou skutečnost zohlednit při výběru vhodné varianty. Naopak Lithiová technologie, zvolená v poslední variantě D, disponuje velmi slabou (pro tuto aplikaci až zanedbatelnou) teplotní závislostí. [w18]

4.3.3 Výpočet doby provozu variantních zdrojů

Vzhledem k úvodnímu předpokladu zvyšování ceny a technické náročnosti řešení s rostoucím intervalem mezi výměnou zdroje napájení jsem zvolil 3 modelová řešení. Vycházel jsem z předpokladu nutné periodicity revizí dle ČSN 62305 uvedené v *tabulce* č. 6. Proto jsem volil řešení napájení, která musí být schopna bezpečně napájet zařízení po dobu 1 roku, 2 let a 4 let, za účelem zjištění cenově nejefektivnějšího provedení na stanovenou dobu životnosti $T_z = 20$ let.

Hladina ochrany	Vizuální kontrola [rok]	Úplná revize [rok]	Kritické systémy - úplná revize [rok]
I a II	1	2	1
III a IV	2	4	1

Pozn. V prostředí s nebezpečím výbuchu by měla být provedena vizuální kontrola každých 6 měsíců.

Tabulka 6 Maximální intervaly dle ČSN 62305

Pro každé řešení s intervalem 1 roku, 2 let a 4 let jsem vypočetl efektivní energii E_{skut} [Wh] obsaženou v navržených variantách napájení. Zohledněny při výpočtu byly jak veškeré výše popsané úbytky, tak i úbytek na stejnosměrném měničích napětí $\Delta E_{DC/DC}$ [%] v případech zvoleného nižšího napájecího napětí, než je potřebné pro napájení mikrokontroléru a GSM komunikátoru. V *tabulce* č. 8 je příklad obsažené efektivní energie E_{skut} pro zařízení s 2 letou periodicitou výměny baterií. Ostatní jsou k nalezení v příloze A. Volba počtu článků byla provedena s ohledem na navazující výpočet doby provozu v letech. Tomu předcházela výpočet konstantního výkonového zatížení pro zvolenou zátěž, navazující na výpočet konstantního proudového zatížení v *tabulce* č. 4.

Zátěž	Texas Instr. bez GSM	IQRF bez GSM	Texas Instr. s GSM	IQRF s GSM
U [V]	3,6	3,7	3,6	3,7
I [μ A]	28,4	79,8	57,0	108,4
P [μ W]	102,2	295,2	205,1	401,0

Tabulka 7 Výpočet výkonového zatížení pro snímač s 2 letou lhůtou výměny baterií

Zdroje	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
	AA NI-MH	typ C NI-MH	AA alkalická	AA lithiová
Počet článků	3	2	2	2
U [V]	3,6	2,4	3	3
[mAh]	2300	4000	2500	3000
E_{teor} [Wh]	8,28	9,6	7,5	9
ΔE_{IMAX} [%]	-	-	3,5%	-
$\Delta E_{\text{DC/DC}}$ [%]	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
ΔE_{rok} [%]	15,0%	15,0%	2,5%	0,6%
ΔE_{2roky} [%]	49,4%	49,4%	36,8%	30,8%
E_{skut} [Wh]	4,19	4,86	4,74	6,22

Tabulka 8 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 2 letou periodou údržby

S výpočtovou hodnotou konstantního zatížení P_{konst} již bylo možné vypočítat doby teoretického provozu v letech jednotlivých provedení mikrokontrolérů a k nim příslušné varianty napájení. Výpočet však nebere v úvahu snížení kapacity po výpočtových dobách 1, 2 a 4 let. Množství potřebných akumulátorů bylo voleno zpětně tak, aby alespoň u jednoho z mikrokontrolérů (v obou provedeních jak bez GSM komunikátoru, tak s ním), byla dosažena doba provozu alespoň v počtu let příslušného návrhu periodicity 1 roku, 2 let a 4 let pro všechny varianty napájení A–D. V případě tabulky č. 9 to jsou 2 roky. Zbýlé jsou k nalezení v příloze B. Růžové buňky s červeným popisem znázorňují nedostačující dobu provozu v letech příslušné kombinace provedení a varianty. Jinak řečeno nedostatečnou energii k napájení konkrétního provedení a varianty pro výpočtovou dobu 2 let. Oranžová pole již vyhovují a zelená pole vyhovují s dostatečnou rezervou.

		Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
		E_{skut} [Wh]			
Provedení	P [μ W]	4,19	4,86	4,74	6,22
Texas Instr. bez GSM	102,2	4,68 roku	5,42 roku	5,30 roku	6,96 roku
IQRF bez GSM	295,2	1,62 roku	1,88 roku	1,83 roku	2,41 roku
Texas Instr. s GSM	205,1	2,33 roku	2,70 roku	2,64 roku	3,46 roku
IQRF s GSM	401,0	1,19 roku	1,38 roku	1,35 roku	1,77 roku

Tabulka 9 Výpočtové doby provozu pro snímač s 2 letou periodou údržby

Množství zvolených akumulátorů je souhrnně uvedeno v tabulce č. 10.

Životnost napájení	Počet	Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
1 rok	[ks]	2	1	1	1
2 roky	[ks]	3	2	2	2
4 roky	[ks]	6	3	3	3

Tabulka 10 Množství zvolených akumulátorů

4.3.4 Cenové hodnocení navržených variant

K problému cenového hodnocení by bylo možné přistupovat velmi jednoduchým způsobem a to: cena za kus * množství / počet let, po které musí zařízení bezpečně pracovat. Pak by se mohla porovnávat cena za rok provozu. Já jsem se však ve výpočtu rozhodl zohlednit E_{skut} a teoretickou dobu provozu z tabulky č. 9, která zohledňuje i nedostatečnou (případně i nadbytečnou) kapacitu energetického zdroje. Tato metoda tzv. měrné ceny umožňuje lepší porovnání variant s oceněním nedostatečné i rezervní kapacity. Vzorec pro výpočet měrné ceny je následující:

$$\text{měrná cena} = \frac{\text{jednotková cena za kus} \times \text{počet kusů varianty}}{E_{skut} \times \text{životnost napájení}} \text{ [Kč.Wh}^{-1}\text{.rok}^{-1}\text{]} \text{ (v. 17)}$$

Výstupem je tabulka hodnot měrných cen porovnávaných variant vyobrazená níže.

	Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
Provedení				
E_{skut} [Wh]	4,19	4,86	4,74	6,22
Řídicí jednotka	Měrná cena [Kč.Wh ⁻¹ .rok ⁻¹]			
Texas Instr. bez GSM	10,18	10,14	0,80	1,82
IQRF bez GSM	29,43	29,29	2,30	5,27
Texas Instr. s GSM	20,45	20,35	1,60	3,66
IQRF s GSM	39,98	39,79	3,13	7,16

Tabulka 11 Měrné ceny pro zařízení s 2 letou údržbou

Z tabulky je jasně patrné, že barevné škálování označuje červené buňky jako ekonomicky nejméně vhodné a naopak tmavě zelené buňky jako nejlepší s ohledem na cenu, množství dodané energie a dobu provozu.

4.4 Porovnání variantních systémů

Pro účel porovnání navrhovaných variant řešení komplexního systému čítačůbleskových proudů byla zvolena doba životnosti 20 let. Porovnávány byly výdaje na varianty napájení a mikrokontrolérů ve výsledném systému pro 3 intervaly životnosti napájení senzorů. Navrhovaný systém je tvořen vždy jedním senzorem s GSM komunikátorem a zbylými senzory do počtu alespoň minimálního množství 2 svodů. Cílem srovnání je nalezení optimálního napájení a varianty s nejnižší výslednou cenou při současném dodržení technických předpokladů celého systému.

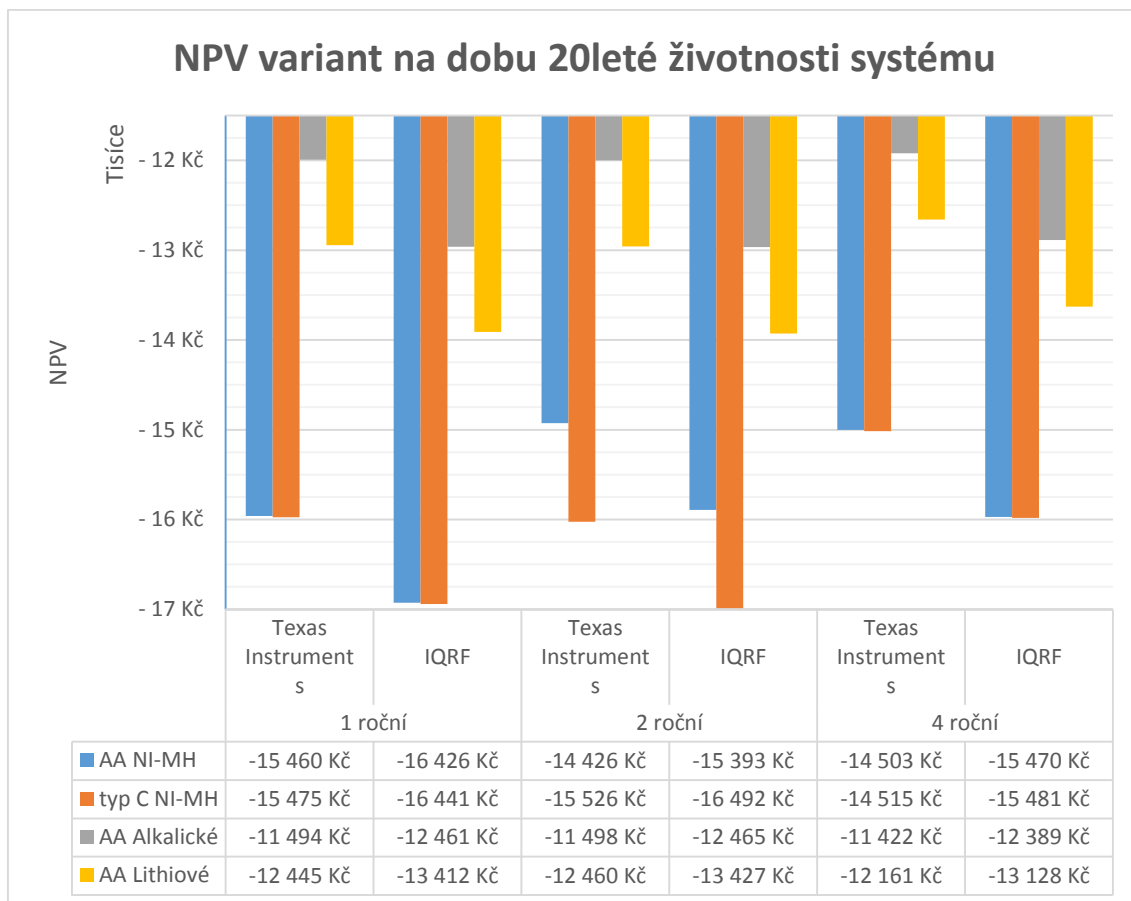
Použité součástky	Cena/kus (*senzor)
SMD součástky ^[w20]	*200,00 Kč
mikrokontrolér CC1310 Texas Instruments ^[w21]	*678,11 Kč
mikrokontrolér IQRF Kit ^[w22]	*1161,36 Kč
Akumulátor Tecxus – RTU NiMH, AA/HR6, 2300 mAh, 1,2 V ^[w23]	66,52 Kč
Akumulátor JCB – RTU NiMH, C/HR14, 4000 mAh, 1,2 V ^[w24]	133,50 Kč
Alkalická baterie – Varta Max Tech AA/LR06, 2300 mAh, 1,5 V ^[w25]	10,00 Kč
Lithiová baterie – Energizer Ultimate, AA/L91,3000 mAh, 1,5 V ^[w26]	39,50 Kč
GSM komunikátor – SIM900A ^[w27]	272,41 Kč
DC měnič ^[w28]	73,50 Kč
Kurz USD/CZK k 3. 5. 2016 ^[w29]	23,38 Kč

Tabulka 12 Ceny komponent systému

Jednotlivé komponenty systému byly voleny s ohledem na co možná nejmenší energetickou náročnost a nejnižší možnou cenu na trhu. Jedná se o součásti běžně dostupné ať již přímo na českém trhu nebo v zahraničních webových obchodech. V tabulce č. 13 je uveden kompletní přehled o počtu a ceně navržených napájecích článků. Je patrné, že s rostoucí dobou provozu roste i cena výsledného systému dle předpokladů. Komplexní pohled na výdajovou stránku poskytne ale teprve až kompletní ekonomická analýza celého systému jako celku, zhotovena metodou čisté současné hodnoty s dobou porovnání 20 let, což je stanovená předpokládaná doba životnosti.

Snímač určený pro cyklus	Napájení				
	Zvolená varianta	Varianta A AA NI-MH	Varianta B Typ C NI-MH	Varianta C AA Alkalické	Varianta D AA Lithiové
	cena/ks	67 Kč	134 Kč	10 Kč	40 Kč
1 roční	počet/senzor	2 ks	1 ks	1 ks	1 ks
	cena celkem	266 Kč	267 Kč	20 Kč	79 Kč
2 roční	počet/senzor	3 ks	2 ks	2 ks	2 ks
	cena celkem	399 Kč	534 Kč	40 Kč	158 Kč
4 roční	počet/senzor	6 ks	3 ks	3 ks	3 ks
	cena celkem	798 Kč	801 Kč	60 Kč	237 Kč

Tabulka 13 Přehled o ceně a množství zvolených napájecích článků

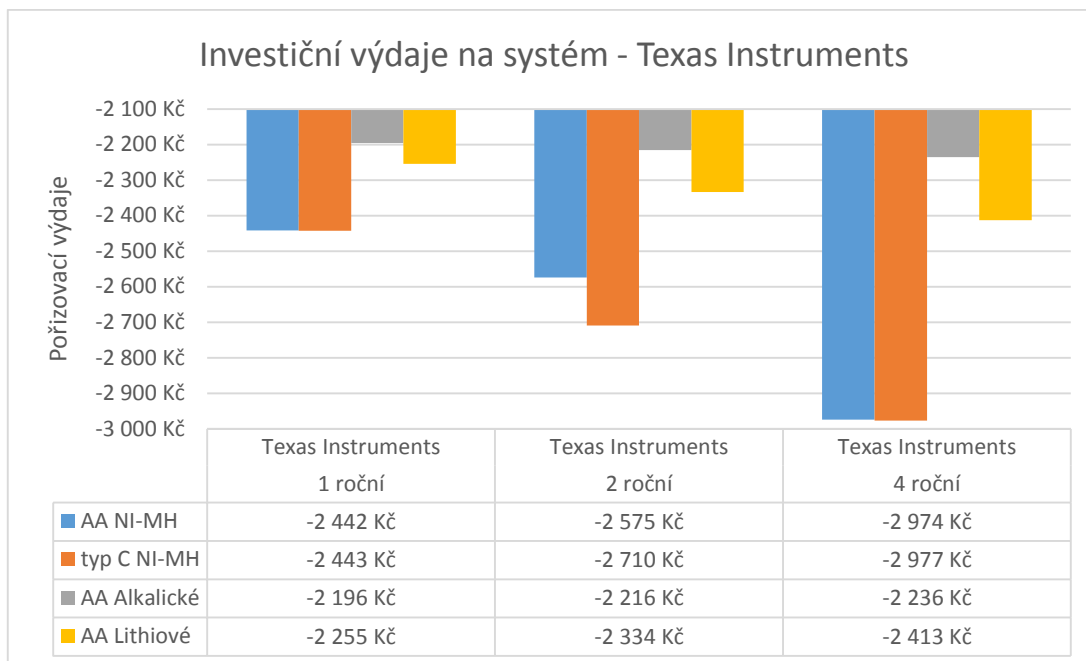


Graf 3 NPV variant na dobu životnosti 20 let celého systému o 2 zařízeních

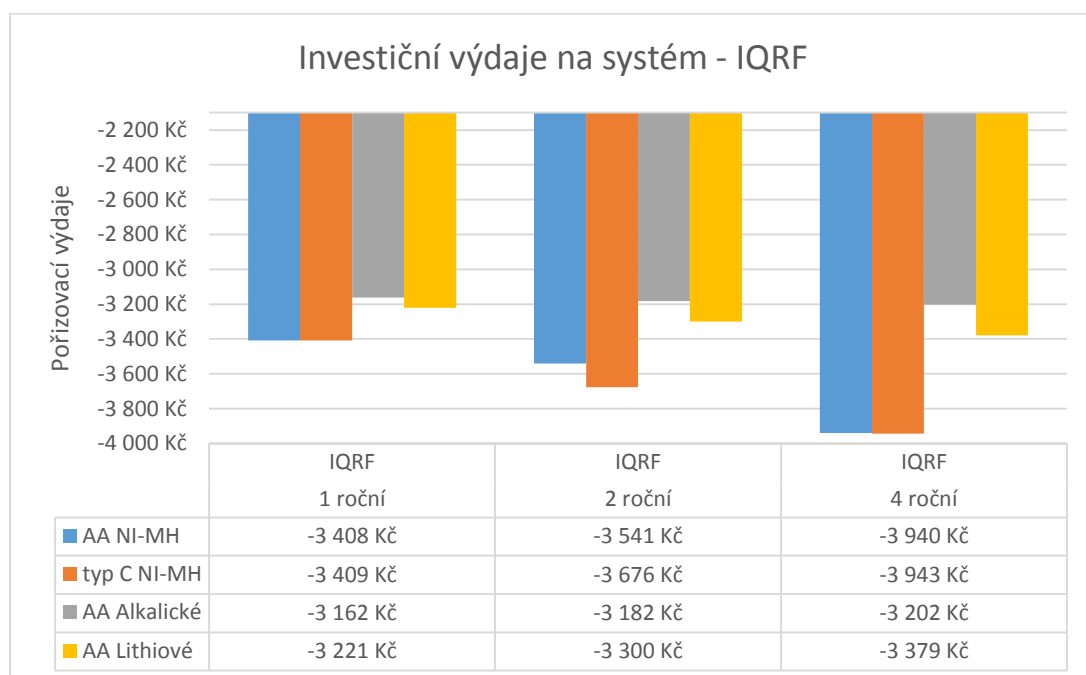
Po nacenění a rozdělení hotovostních toků do příslušných let jsem výsledné hodnoty NPV znázornil do sloupcového grafu č. 3. Lze si na první pohled všimnout, že všechny kombinace variant s mikrokontrolérem IQRF vycházejí méně příznivě oproti mikrokontroléru CC1310 od firmy Texas Instruments. To je zapříčiněno hlavně jeho vyšší pořizovací cenou, ale i jeho vyšším proudovým odběrem, který se projeví zvýšenou spotřebou a rostoucí cenou napájení.

Důležitým zjištěním je vesměs pokles výdajů s rostoucí dobou koncepce životnosti senzoru. 1 roční systém má vyšší výdaje než 4 roční systém. Na vině je častější investice do nového zdroje napájení, která se v případě jednorozhodného systému uskuteční 4 krát častěji než u 4 ročního systému, ale velikost investice není čtvrtinová, nýbrž vyšší.

Investiční výdaje rostou podle předpokladů zmíněných v předchozím textu. Jejich výše je uvedena v grafu č. 4 a grafu č. 5.



Graf 4 Investiční výdaje na systém s mikrokontrolérem od Texas Instruments



Graf 5 Investiční výdaje na systém s mikrokontrolérem IQRF

4.5 Výběr optimální varianty

Jak již bylo nastíněno v předchozí podkapitole, výsledné ekonomické zhodnocení znázorněné na grafu č. 3 jasně prokázalo, že řešení s mikrokontrolérem IQRF není vhodné jak po technické, tak po ekonomické stránce. Ohledně variantních řešení napájení je možno na základě porovnání výdajových NPV vyřadit varianty A a B, jež jsou oproti zbývajícím až několikanásobně nákladnější. Výběr se zúžil na dvě varianty napájení C a D za použití mikrokontroléru Texas Instruments. Je tedy ještě nutné provést selekci mezi variantními řešeními 1 letých, 2 letých a 4 letých koncepcí snímačů. Při pohledu na graf č. 3 je možné dohledat, ať už graficky či numericky (dle legendy), nejnižší náklady zbývajících variant C a D. Nejnižší výdaje má senzor s 4 letou periodicitou výměny baterií.

	Jednotka	Alkalické baterie	Lithiové baterie	Rozdíl	Percentil
NPV	[Kč]	-11419	-12161	742	6,1 %
Investiční výdaje	[Kč]	-2235	-2413	178	7,4 %
Provozní výdaje	[Kč]	-9184	-9748	564	5,8 %
Doba provozu*	[rok]	5,46	7,33	1,87	25,6 %
Měrná cena (napájení)	[Kč.Wh ⁻¹ .rok ⁻¹]	0,56	1,23	0,67	54,3 %

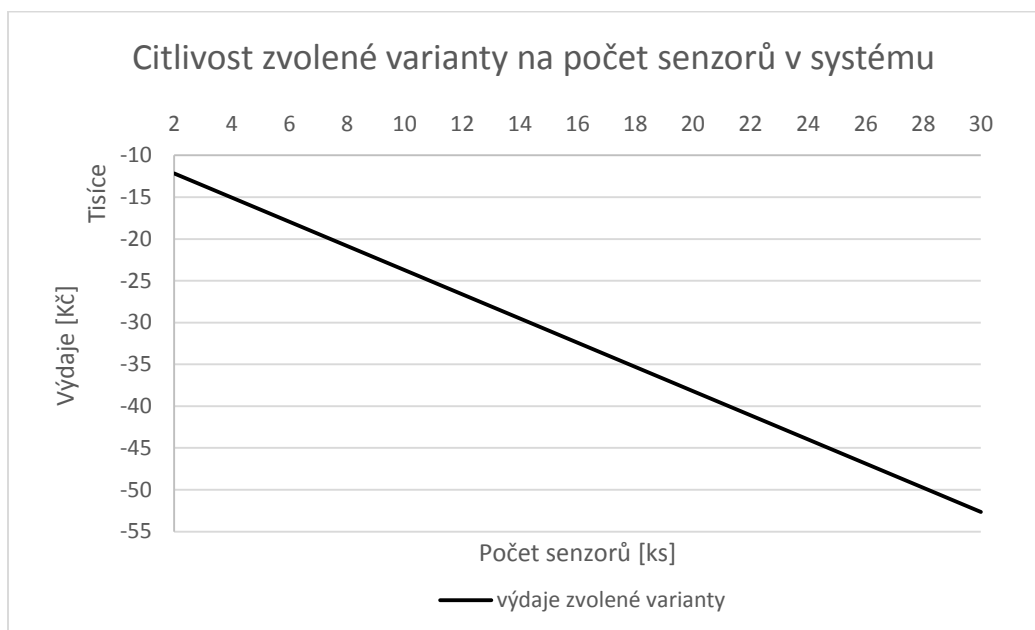
* nezohledňuje snížení kapacity po 4. roce života

Tabulka 14 Vybrané varianty pro mikrokontrolér Texas Instr. a senzor s 4 letou periodou napájení

V tabulce č. 14 jsou shrnuty ekonomicky nejdůležitější údaje pro výběr optimální varianty. Ekonomicky nejpříznivěji se jeví varianta C s alkalickými bateriemi. Tato technologie je nejlevnější jak do měrné ceny, tak celkovým ekonomickým výsledkem za dobu životnosti projektu, a má relativně přijatelné technické vlastnosti. Avšak relativita spočívá ve výrazné teplotní závislosti, která je obtížně modelovatelná za účelem simulace chování baterie v závislosti na budoucích klimatických podmínkách. Řešení s alkalickými bateriemi by mohlo být zdrojem vysoké nejistoty v zajištění spolehlivosti snímače za dlouhodobějších prudkých mrazů. Vzhledem k této technické nevýhodě alkalických baterií bych v této aplikaci upřednostnil variantu lithiových článků, které jsou sice o 742 Kč nákladnější za 20letou dobu porovnání systémů, ale toto navýšení výdajů o 6,1 % bezpečně zajistí spolehlivost celého systému za jakýchkoliv běžných klimatických podmínek. Srovnání obou variant je v tabulce č. 14.

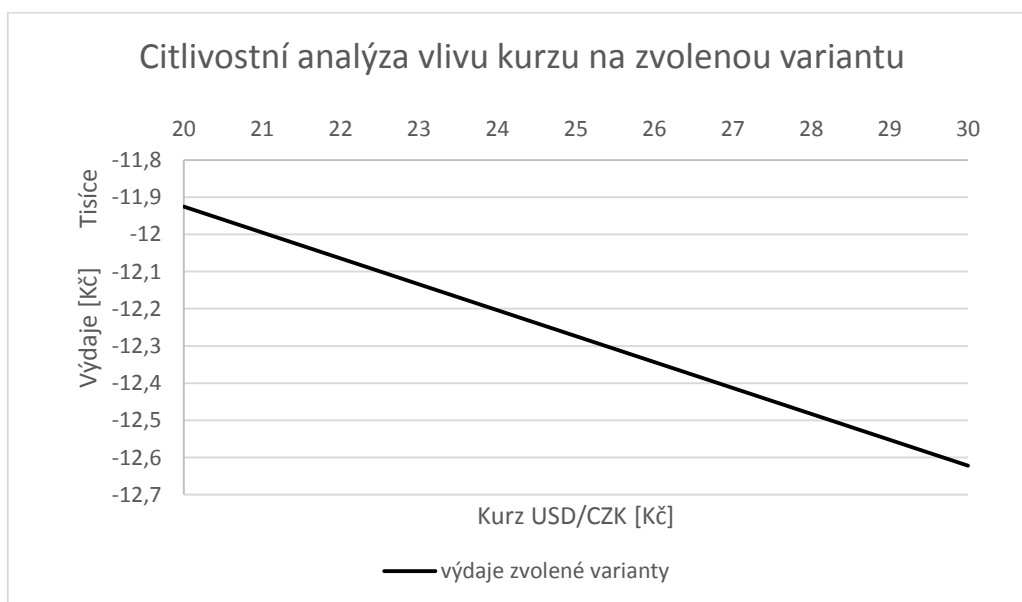
Optimální variantou je tedy zařízení osazené mikrokontrolérem CC1310 od firmy Texas Instruments, s napájením 3ks lithiových AA článků L91 a periodou výměny 4 roky.

Vzhledem k měnícím se výdajům spojeným s velikostí systému, které budou přirozeně růst s množstvím čítačů na svodech, jsem provedl citlivostní analýzu na tento faktor.



Graf 6 Citlivostní analýza provedená na změnu počtu čítačů systému po dobu 20 let

Další faktor, který bude ovlivňovat cenu výsledného systému je kurz amerického dolaru vůči české koruně. Jednak bude ovlivňovat velkou část investičních výdajů, protože oba mikrokontroléry pocházejí ze zahraničních obchodů a jednak provedená analýza počítá se stabilním kurzem USD/CZK, který se však v průběhu času mění.



Graf 7 Citlivostní analýza provedená na změnu kurz USD/CZK pro výdaje na dobu 20 let

4.6 Ekonomické hledisko nutnosti implementovat ochranný systém

Při hledání odpovědi na ekonomický přínos ochran před bleskem je velmi vhodné sledovat statistiky Záchraného hasičského sboru České republiky (HSZČR), které každoročně přinášejí přehled o počtech požárů, které vznikají v důsledku zásahu objektu bleskovým výbojem, a to jak na hromosvodem chráněných, tak nechráněných stavbách. Měřítkem k posouzení je potom průměrná roční škoda vyjádřená v českých korunách, případně ztráta na lidském životě. Logickým argumentem i pro samotné pojišťovny je statistika uvedená v následující tabulce č. 12. ^[w30]

Rok	Bleskový výboj	Počet požárů	Přímá škoda (tis. Kč)	Usmrceno	Zraněno
2015	do objektu s hromosvodem	4	3 743	0	0
	do objektu bez hromosvodu	14	6 606	0	7
	ostatní zásahy	101	1 218	0	2
2014	do objektu s hromosvodem	9	1 500	0	7
	do objektu bez hromosvodu	21	8 105	0	2
	ostatní zásahy	29	1 898	0	1
2013	do objektu s hromosvodem	7	3 237	0	1
	do objektu bez hromosvodu	37	43 205	0	8
	ostatní zásahy	14	26 119	0	1
2012	do objektu s hromosvodem	13	8 953	0	1
	do objektu bez hromosvodu	30	10 727	0	5
	ostatní zásahy	26	1 096	0	1
2011	do objektu s hromosvodem	14	26 160	0	0
	do objektu bez hromosvodu	31	18 995	0	5
	ostatní zásahy	15	284	0	0
2010	do objektu s hromosvodem	13	3 041	0	0
	do objektu bez hromosvodu	24	6 912	0	3
	ostatní zásahy	17	815	0	0
2009	do objektu s hromosvodem	12	2 067	0	1
	do objektu bez hromosvodu	29	14 701	0	1
	ostatní zásahy	20	846	0	2
2008	do objektu s hromosvodem	9	1 385	0	1
	do objektu bez hromosvodu	32	10 455	0	1
	ostatní zásahy	22	631	0	0
2007	do objektu s hromosvodem	13	3 568	0	3
	do objektu bez hromosvodu	36	9 464	0	2
	ostatní zásahy	46	5 251	0	0
2006	do objektu s hromosvodem	15	3 933	0	2
	do objektu bez hromosvodu	25	6 875	0	1
	ostatní zásahy	24	1 131	0	1

Tabulka 15 Statistika škod HSZČR způsobených úderem blesku v letech 2006–2015 ^[w30]

Ze statistik vyplývá, že přibližně třetinu, až polovinu požárů tvoří systémy s hromosvodem oproti objektům nechráněným. V těchto případech je požár způsoben především nefunkční, nebo od předchozích zásahů poškozeným ochranným svodovým nebo jímacím zařízením. Dalšími faktory, které mohou při instalovaném hromosvodu zapříčinit vznik požáru, může být celá řada, například, k nim patří i neprovedení pravidelných revizních prohlídek, nebo neodborný stavební zásah do hromosvodové soustavy. Všechny tyto případy odporují normě ČSN EN 62305 O ochraně před bleskem. Chyba provedená při vizuální kontrole a absence informace, že do jímacího a svodového vedení došlo již k zásahu, může být zcela fatální při následném dalším úderu. Navrhované řešení v mé diplomové práci by mělo takovéto situace eliminovat.

Zajímavým může být i přístup samotné pojišťovny k pojištění objektu s a bez hromosvodu. Velmi často je pojištění nekomerčního objektu s a bez hromosvodní techniky považováno pojišťovnou za rovnocenné, které v případě sjednání pojistné smlouvy nijak výrazně neřeší. Důvodem je především řídkost vyskytujícího se bleskového zásahu a dostatečné finanční kapacity pojišťovny takovéto jednorázové následky pokrýt.

Dalším důvodem pro nevyžadování hromosvodu na pojištěných objektech je fakt, že v České republice není nutnost hromosvodu pevně dána (normy, pokud nejsou součástí vyhlášky nebo zákona, jsou nezávazné). V objektech, kde hrozí při zásahu blesku do něj určité riziko, je pouze nutné spočítat jeho výši (například dle souboru norem ČSN EN 62305) a na tomto základě se rozhodnout pro případnou ochranu a její rozsah. Při pojistném plnění však se může pojišťovna odvolávat na stavební zákon nebo jiné vyhlášky, které obsahují odkazy na výpočet rizika škod v ČSN EN 62305, požádat soudního znalce o rozklad a v případě, že nebylo vyhověno dostatečným zabezpečením objektu tak, aby se snížilo riziko škod dle ČSN EN 62305, výši pojistného snížit, případně nevyplatit. Klasickým příkladem jsou velké stavby, FV, bioplynové stanice, atd., kde škoda dosahuje několikamilionových hodnot

Dalším faktorem, který ovlivňuje technické řešení, je že v případě zásahu nemusí explicitně dojít k požáru, avšak může dojít k poškození vnitřní elektroinstalace, případně elektroniky uvnitř objektu. Právě zvolená metoda průkaznosti průchodu bleskového proudu svodem, může být indikativní pro případné doložení škod na elektronice proti pojistnému plnění. V ostatních případech je průkaznost, že k poškození došlo skutečně v důsledku bleskového výboje, obtížné.

Povinností při výstavbě jakékoliv stavby je řídit se stavebním zákonem a vyhláškou o technických požadavcích na zařízení, které mohou definovat nezbytnost hromosvodní ochrany, a to pro následující případy, kde by blesk mohl způsobit:

a) 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,

b) 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. ^[1n] ^[2n]

5 Závěr

V první části diplomové práce byly rozebrány rozličné principy varovných systémů před bleskem, které slouží k detekci jak bouřkové činnosti v oblaku, tak k detekci samotných bleskových výbojů svedených do země. Představeny byly také kooperující evropské detekční sítě lokalizačních senzorů tvořící efektivní celek pro včasnou výstrahu před blížící se bleskovou činností. Jako příprava pro praktickou část práce byl podrobněji objasněn princip funkce nejčastěji používaného senzoru pro měření velkých impulsních proudů konvenčního kontaktního i moderního provedení. Všechna uvedená řešení však nesledují a nedeklarují přímé místo zásahu bleskovým výbojem v konkrétním objektu a neposkytují o něm relevantní okamžitou informaci.

Technická stránka návrhu čítače bleskových proudů byla realizována v druhé části práce. Koncepčně došlo nejprve k vytyčení cílů, kterých by měl senzor dosáhnout a následně pak k popisu návrhu možných řešení, jak byly realizovány v mnoha testech výzkumným týmem pod vedením mého vedoucího práce. Testovaná řešení byla optimalizována a došlo k návrhu technicky realizovatelného prototypu čítače.

V poslední části práce byla soustředěna pozornost na technicko-ekonomickou stránku řešení. Postupně došlo k vytvoření modelu snímače, volbě variant napájení a k cenové analýze zvolených variantních zdrojů s výpočtem měrné ceny a celkových výdajů na minimální množství senzorů stanovené normou. Porovnáním těchto ekonomických ukazatelů se odvodilo konkrétní řešení. Na základě zhodnocení technických rizik pojících se s ekonomicky nejefektivnějším řešením zvolené varianty byl připraven druhý prototyp návrhu bezdrátového snímače. Byl tak zvýšen důraz na kritérium spolehlivosti a bezpečné funkčnosti před hlediskem nejnižších výdajů. Technicko-ekonomická optimalizace je proto logickým krokem k navržení funkčního, spolehlivého a konkurenceschopného zařízení.

Nejdůležitějším přínosem zvoleného řešení je především skutečnost vlastní ochrany, informovanosti majitele nebo správce, který tak vědomě může posoudit míru nebezpečí, která ze zásahu objektu bleskem vyplývá.

6 Zdroje

Internetové zdroje

[w1] INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS: ELECTRIC FIELD MEASUREMENTS. *A-tech: Electric Field Mill* [online]. 2006 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://a-tech.net/ElectricFieldMill/index.html>

[w2] Electric Field Monitor. *BOLTEK: LIGHTNING DETECTION SYSTEMS* [online]. Port Colborne, Canada: BOLTEK, 2015 [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://www.boltek.com/product/efm-100c-electric-field-monitor>

[w3] EFM-100 Electric Field Mill Kit. *Boltek: Lightning Detection Systems* [online]. [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.boltek.com/product/efm100-electric-field-mill-kit/http://a-tech.net/ElectricFieldMill/index.html>

[w4] USHIO, T., Z -I. KAWASAK, M. AKITA, S. YOSHIDA, T. MORIMOTO a Y. NAKAMURA. A VHF Broadband Interferometer for Lightning Observation. In: *Internacional Union of Radio Science* [online]. 2011 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.ursi.org/proceedings/procga11/ursi/EGH-5.pdf>

[w5] CUMMINS, Kenneth L., Martin J. MURPHY, Edward A. BARDO, William L. HISCOX, Rychard B. PYLE a Albur E. PIFEL. A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. NLDN. In: *The University of Arizona* [online]. St. Petersburg, Russia: 9th Annual International Conference on Atmospheric Electricity, 1992 [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Scientific%20papers/6.Holle%20Cummins.pdf>

[w6] CUMMINS, Kenneth L., William L. HISCOX, Albur E. PIFEL a M.W. MAIER. A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. NLDN. In: *The University of Arizona* [online]. Journal of Geophysical Research, 1998 [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring07/atmo589/articles/Cummins_JGR1998.pdf

[w7] VAISALA: *NLDN 30* [online]. 2013 [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: <http://go.vaisala.com/nldn30/>

[w8] World Wide Lightning Location Network. *WWLLN* [online]. Washington, USA [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://wwlln.net/>

- [w9]** HLAVÁČEK, Jan. *Analýza snímacích prvků proudu v elektroenergetice*. online]. Praha, 2011 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9692/TEZE_Diserta%C4%8Dn%C3%AD_pr%C3%A1ce_Hlavacek_Jan_2011.pdf?sequence=3. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Vladislav Kvasnička, CSc.
- [w10]** ARGUESO, M., G. ROBLES a J. SANZ. Measurement of high frequency currents with a Rogowski coil. In: *Scholar.google.cz* [online]. Madrid, 2005 [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Guillermo_Robles2/publication/229018070_Measurement_of_high_frequency_currents_with_a_Rogowski_coil/links/0c96051dbc1f756a1b000000.pdf
- [w11]** Kolektiv autorů. Register and measure lightning currents using the magneto-optic effect. In: *Phoenix Contact* [online]. Blomberg, Germany, 2014 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_technical_info/WP_LM-S_EN.pdf
- [w12]** Satellite detection. *The University of Arizona* [online]. Arizona, U.S.A. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/ATMO489_online/lecture_25/lect25_satellite_observations.html
- [w13]** MIKEŠ, Jan, Ondřej KREIBICH a Jan NEUŽIL. A Lightning conductor system based on a wireless sensor network. *Acta Polytechnica* [online]. 2013, 53(6/2013), p. 878-882. ISSN 1210-2709. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/AP.2013.53.0878/1874>
- [w14]** Aktuální úrokové sazby spořicíh účtů: Březen 2016. *Sporiciucty.cz* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.uctysporici.cz/news/aktualni-urokove-sazby-sporicich-uctu-brezen-2016/>
- [W15]** Měnověpolitické publikace: Zprávy o inflaci. ČNB [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/menova_politika/zpravy_o_inflaci/2015/2015_IV/download/ZOI_IV_2015_T_1_Makroindikatory.xlsx
- [w16]** NiMH LSD Battery: Low Self-Discharge battery. *TM Batteries* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://tmbatteries.com/products/nimh-lsd-battery-rtu.html>
- [w17]** Elevated Self-discharge: Estimated self-discharge. *TM Batteries* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge

- [w18] Alkaline Manganese Dioxide: Handbook and Application Manual. *Energizer Holdings, Inc.* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://data.energizer.com/PDFs/alkaline_appman.pdf
- [w19] Cylindrical Primary Lithium: Handbook and Application Manual. *Energizer Holdings, Inc.* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://data.energizer.com/PDFs/lithiuml91l92_appman.pdf
- [w20] E-mailová korespondence s Ing. Janem Mikešem, Ph.D. [online], 3. 5. 2016
- [w21] Datasheet CC1310. *Texas Instruments* [online]. 2015 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/swrs181b/swrs181b.pdf>
- [w22] IQRF Development kit. *IQRF* [online]. 2015 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/weben/products/development-tools/development-kits>
- [w23] *RTU-AA-4BL* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://shop.battex.cz/vyroby/W23820.php>
- [w24] JCB RTU NiMH C/R14. *Svářečky-obchod* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.svarecky-obchod.cz/dilenske-vybaveni/svitilny/baterie/27762-jcb-rtu-nimh-c-r14-4000mah-prednabita-baterie-blitr-2-ks.htm>
- [w25] VARTA MAX TECH AA LR06. *Hunting 24* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.hunting24.cz/baterie-varta-max-tech-aa-lr06-4ks/>
- [w26] ENERGIZER Ultimate Lithium. *Netra* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.netra.cz/energizer-ultimate-lithium-tuzkova-baterie-15-v-aa-l91-2-ks-p-193829.html>
- [w27] SIM900A Wireless GSM Module. *Aliexpress* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.aliexpress.com/item/New-SIM900A-V4-0-Kit-Wireless-Extension-Module-GSM-GPRS-Board-Antenna-Tested-Worldwide-Store/32279054726.html>
- [w28] DC 5V Voltage Step Up Boost Module. *Deal Extreme* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://eud.dx.com/product/usb-dc-1-5v-to-dc-5v-voltage-step-up-boost-module-green-844143571#.V0c5r_mLTDd
- [w29] Kurzy měn: Graf USD/CZK. *Kurzy.cz* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://eud.dx.com/product/usb-dc-1-5v-to-dc-5v-voltage-step-up-boost-module-green-844143571#.V0c5r_mLTDd
- [w30] Hasičský záchranný sbor ČR: Statistické ročenky. *Kurzy.cz* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.hzscr.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx>
- [w31] Thunderstorm activity and research on lightning position in Vietnam: Thunderstorm activity in Vietnam. *Vietnam academy of science and technology* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.vast.ac.vn/en/news/science-and-technology-news/1140-thunderstorm-activity-and-research-on-lightning-position-in-vietnam>
- [w32] Long Range Lightning Detection. *The Radar Meteorology Group* [online]. 2014 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://radarmet.atmos.colostate.edu/AT780/lectures/LongRangeLtgDet_CSU_Apr29

- [w33] Electric Field Mill. *A-tech* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://a-tech.net/ElectricFieldMill/>
- [w34] Jak se v Česku detekují blesky. *Vietnam academy of science and technology* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/detekce-blesku-18.7.2014/>
- [w35] Časovna metoda določanja lokacije atmosferske razelektritve. *Scalar* [online]. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: http://www.scalar.si/index.php?option=com_content&task=section&id=23&Itemid=71
- [w36] Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM. *FJFI ČVUT* [online]. [cit. 2016-04-5]. Dostupné z: <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2014/cd/sbpdf/tokGolem1.pdf>
- [w37] Optická aktivita látek: Polarizované záření. *Eluc* [online]. [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2532>
- [w38] What is a Rogowski Coil. *Power Electronics Measurement* [online]. 2013 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>
- [w39] USHIO, T., Z. I. KAWASAKI, M. AKITA a S. YOSHIDA. *A VHF Broadband Interferometer for Lightning Observation* [online]. [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.ursi.org/proceedings/procga11/ursi/EGH-5.pdf>

Tištěná literatura

[1L] ŘEZÁČOVÁ, Daniela. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, 2007. ISBN 978-200-1505-1.

[2L] RAKOV, Vladimír A. *Lightning: physics and effects*. New York: Cambridge University Press, 2002. 687 s. ISBN 0-521-58327-6.

[3L] BETZ, H. D., SHUMMAN, U., LAROCHE, P. *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer Science+Business Media B.V. 2009. ISBN 978-1-4020-9078-3.

Normy

[1n] ČSN EN 62305-1 ed.2. *Ochrana před bleskem – Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011.

[2n] ČSN EN 62305-3 ed.2. *Ochrana před bleskem - Část 3: Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, leden 2012.

Zdroje obrázků

Obrázek 1 Bleskový výboj – vlastní tvorba

Obrázek 2 Četnost blesků vztažených na km^2 plochy zemského povrchu zaznamenaná satelitní optickou detekcí v roce 1999 ^[w31]

Obrázek 3 Frekvenční pásma a šíření elektromagnetického signálu ^[w32]

Obrázek 4 Cylindrický mlýn ^[w33]

Obrázek 5 Mlýn s rotující clonou ^[w33]

Obrázek 6 DF Detektor na střeše MFF UK v Praze ^[w34]

Obrázek 7 Systém dvou detektorů ^[2L]

Obrázek 8 Systém tří detektorů ^[2L]

Obrázek 9 Průsečíky hyperboloidů ^[2L]

Obrázek 10 Časové diference senzorů ^[w35]

Obrázek 11 Situace se třemi senzory ^[w35]

Obrázek 12 Nejednoznačné řešení se třemi senzory ^[w35]

Obrázek 13 Lokalizace pomocí čtyř senzorů ^[w35]

Obrázek 14 Příklad 2D lokalizace shluku výbojů za použití širokopásmové interferometrie. Příklad ukazuje vertikálně vypuštěnou raketu k navedení výboje do místa měření. ^[w39]

Obrázek 15 Typy čidel pro pozemní detekci ^[w7]

Obrázek 16 Rogowského cívka ^[w36]

Obrázek 17 Měřicí rozsah RC ^[w38]

Obrázek 18 Lineární polarizace světla ^[w37]

Obrázek 19 Magneto-optický senzor ^[w11]

Obrázek 20 Vyhodnocení měřeného proudu ^[w11]

Obrázek 21 Změna úhlu polarizace ^[w11]

Obrázek 22 Příklad použití magneto-optického senzoru ^[w11]

Obrázek 23 Blokové schéma navrženého řešení ^[w13]

Obrázek 24 Nákres modelového domu ^[w13]

7 Přílohy

Příloha A

Zdroje	Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
Počet	2	1	1	1
U [V]	2,4	1,2	1,5	1,5
[mAh]	2300	4000	2500	3000
E_{teor} [Wh]	5,52	4,8	3,75	4,5
ΔE_{IMAX} [%]	-	-	0,069%	-
$\Delta E_{\text{DC/DC}}$ [%]	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
ΔE_{η} [%]	15,0%	15,0%	2,5%	0,6%
E_{skut} [Wh]	3,04	2,64	2,53	3,12

Tabulka 16 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 1 letou periodou údržby

Zdroje	Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
Počet článků	3	2	2	2
U [V]	3,6	2,4	3	3
[mAh]	2300	4000	2500	3000
E_{teor} [Wh]	8,28	9,6	7,5	9
ΔE_{IMAX} [%]	-	-	3,5%	-
$\Delta E_{\text{DC/DC}}$ [%]	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
ΔE_{rok} [%]	15,0%	15,0%	2,5%	0,6%
ΔE_{2roky} [%]	49,4%	49,4%	36,8%	30,8%
E_{skut} [Wh]	4,19	4,86	4,74	6,22

Tabulka 17 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 2 letou periodou údržby

Zdroje	Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
Počet	6	3	3	3
U [V]	7,2	3,6	4,5	4,5
[mAh]	2300	4000	2500	3000
E_{teor} [Wh]	16,56	14,4	11,25	13,5
ΔE_{IMAX} [%]			3,5%	-
$\Delta E_{\text{DC/DC}}$ [%]				
ΔE_{rok} [%]	15,0%	15,0%	2,5%	0,6%
ΔE_{4roky} [%]	47,8%	47,8%	12,8%	2,4%
E_{skut} [Wh]	8,64	7,52	9,81	13,18

Tabulka 18 Příklad výpočtu efektivní energie pro snímač s 4 letou periodou údržby

Příloha B

		Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
		E _{skut} [Wh]			
Provedení	P [μW]	3,04	2,64	2,53	3,12
Texas Instr. bez GSM	102,2	3,39 roku	2,95 roku	2,83 roku	3,49 roku
IQRF bez GSM	295,2	1,17 roku	1,02 roku	0,98 roku	1,21 roku
Texas Instr. s GSM	205,1	1,69 roku	1,47 roku	1,41 roku	1,74 roku
IQRF s GSM	401,0	0,86 roku	0,75 roku	0,72 roku	0,89 roku

Tabulka 19 Výpočtové doby provozu pro snímač s 1 letou periodou údržby

		Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
		E _{skut} [Wh]			
Provedení	P [μW]	4,19	4,86	4,74	6,22
Texas Instr. bez GSM	102,2	4,68 roku	5,42 roku	5,30 roku	6,96 roku
IQRF bez GSM	295,2	1,62 roku	1,88 roku	1,83 roku	2,41 roku
Texas Instr. s GSM	205,1	2,33 roku	2,70 roku	2,64 roku	3,46 roku
IQRF s GSM	401,0	1,19 roku	1,38 roku	1,35 roku	1,77 roku

Tabulka 20 Výpočtové doby provozu pro snímač s 2 letou periodou údržby

		Varianta A AA NI-MH	Varianta B typ C NI-MH	Varianta C AA alkalická	Varianta D AA lithiová
		E _{skut} [Wh]			
Provedení	P [μW]	8,64	7,52	9,81	13,18
Texas Instr. bez GSM	102,2	9,66 roku	8,40 roku	10,96 roku	14,73 roku
IQRF bez GSM	295,2	3,34 roku	2,91 roku	3,79 roku	5,10 roku
Texas Instr. s GSM	205,1	4,81 roku	4,18 roku	5,46 roku	7,33 roku
IQRF s GSM	401,0	2,46 roku	2,14 roku	2,79 roku	3,75 roku

Tabulka 21 Výpočtové doby provozu pro snímač s 4 letou periodou údržby

Příloha C

Provedení	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
	AA NI-MH	typ C NI-MH	AA alkalická	AA lithiová
E_{skut} [Wh]	3,04	2,64	2,53	3,12
Řídicí jednotka	Cena [Kč/Wh/rok]			
Texas Instr. bez GSM	12,92	17,14	1,40	3,62
IQRF bez GSM	37,32	49,53	4,04	10,47
Texas Instr. s GSM	25,94	34,42	2,81	7,28
IQRF s GSM	50,70	67,29	5,49	14,23

Tabulka 22 Měrné ceny pro zařízení s 1 letou údržbou

Provedení	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
	AA NI-MH	typ C NI-MH	AA alkalická	AA lithiová
E_{skut} [Wh]	4,19	4,86	4,74	6,22
Řídicí jednotka	Měrná cena [Kč/Wh/rok]			
Texas Instr. bez GSM	10,18	10,14	0,80	1,82
IQRF bez GSM	29,43	29,29	2,30	5,27
Texas Instr. s GSM	20,45	20,35	1,60	3,66
IQRF s GSM	39,98	39,79	3,13	7,16

Tabulka 23 Měrné ceny pro zařízení s 2 letou údržbou

Provedení	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
	AA NI-MH	typ C NI-MH	AA alkalická	AA lithiová
E_{skut} [Wh]	8,64	7,52	9,81	13,18
Řídicí jednotka	Cena [Kč/Wh/rok]			
Texas Instr. bez GSM	4,78	6,34	0,28	0,61
IQRF bez GSM	13,81	18,33	0,81	1,76
Texas Instr. s GSM	9,60	12,74	0,56	1,23
IQRF s GSM	18,76	24,90	1,09	2,40

Tabulka 24 Měrné ceny pro zařízení s 4 letou údržbou