

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výzkum korony na přenosových vedeních

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan KLIER**
Osobní číslo: **E15N0103P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Výzkum korony na přenosových vedeních**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Výzkum korony na přenosových vedeních.

1. Popište současný stav výzkumu korony, možnosti měření, testování.
2. Proveďte simulaci výbojů na vedeních AC/DC vhodným SW (Comsol Multiphysic).
3. Navrhněte možnosti aplikace na reálná přenosová vedení.


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. **CIGRE Technical Brochure 61/74 about Corona Emission/ Calculation and Testing (CIGRE 1996)**
2. **Techn.Standard CISPR 18-3 ?Radio Noise Interference of Overhead Lines?**
3. **Zaffanella et al: ?Radio Noise, audible noise and Corona Losses of EHV and UHV transmission lines?, IEEE- Trans.PAS, Vol.89, Nr.6, (1970)**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Rainer Haller, Dr.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou korony, primárně na přenosových vedeních. Ta způsobuje ztráty na vedení, rušení rádiových signálů, slyšitelný zvuk a další problémy. Cílem práce je popsat chování korony, stanovit rozdíly mezi střídavým a stejnosměrným napětím a teoreticky i prakticky zkoumat různé metody měření.

Praktická měření byla provedená v laboratorních podmínkách na speciálních modelech a měla mimo jiné ukázat, zda se metody i modely dají přímo použít pro měření na přenosovém vedení, příp. zda mohou alespoň přinést stejné výsledky jako měření na reálném vedení – tento předpoklad byl nakonec z části potvrzen. Rovněž bylo zjištěno, že chování korony na AC a DC není tak odlišné.

Klíčová slova

Korona, přenosové vedení, střídavý, stejnosměrný, proud, rádiové rušení, slyšitelný zvuk, ztráty, měřící metoda

Abstract

The submitted master thesis deals with the corona phenomenon, especially on overhead lines. Corona is the source of power losses, radio and audible noise and other negative problems. The objective of this work is to describe the corona behavior under alternating current and direct current conditions and finally research different methods of measurement on theoretical and practical basis.

Practical measurements were performed on special models in laboratory conditions. Both methods and models should show, among other things, that they can be used for direct measurement on overhead lines or at least demonstrate similar results as overhead line measurement. These assumptions have been partly proven. It was also determined, that the AC and DC corona behavior is not that different.

Key words

Corona, transmission line, alternating, direct, current, radio noise, audible noise, losses, measuring method

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 15.5.2017

Bc. Milan Klier

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Raineru Hallerovi, Dr. a konzultantovi Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a také za asistenci a obrovskou pomoc při časově náročných měřeních.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1. TEORIE KORONY	13
1.1 DEFINICE	13
1.2 MECHANISMUS KORONOVÉHO VÝBOJE	14
1.2.1 Korona při kladném napětí	14
1.2.2 Korona při záporném napětí	17
1.2.3 Korona při střídavém napětí	19
1.3 ZTRÁTY KORONOU NA PŘENOSOVÝCH VEDENÍCH	19
1.3.1 Peekův vztah	19
1.3.2 Petersonův vztah	21
1.3.3 Ztráty na stejnosměrných vedeních	21
1.4 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ VZNIK A VELIKOST KORONY	22
1.4.1 Atmosférické podmínky, znečištění	22
1.4.2 Elektrické faktory, geometrie	23
1.5 RÁDIOVÉ RUŠENÍ A SLYŠITELNÝ ZVUK	24
2 MOŽNOSTI MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ KORONY	27
2.1 MĚŘENÍ ZTRÁT KORONOU	28
2.2 DETEKCE ZVUKOVÝCH PROJEVŮ	29
2.3 INFRAČERVENÉ KAMERY	30
2.4 DETEKCE ULTRAFIALOVÉHO ZÁŘENÍ	30
2.5 DETEKCE RÁDIOVÉHO RUŠENÍ	31
3 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ A SIMULACE	31
3.1 MĚŘENÉ MODELY	32
3.1.1 Vodič - deska	32
3.1.2 Hrot - miska	32
3.2 TESTOVACÍ OBVODY A METODY	33
3.2.1 Základní měření proudu korunou	33
3.2.2 Detektor částečných výbojů	35
3.2.3 Měření anténou	39
3.3 SIMULACE	40
3.3.1 Model vodič-deska	41
3.3.2 Model hrot-miska	42
4 VÝSLEDKY	43
4.1 KORONA PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ	43
4.1.1 Zapalovací napětí, intenzita pole	43
4.1.2 Závislost proudu korunou na napětí, ztráty	46
4.1.3 Četnost výbojů, frekvenční spektrum	48
4.2 KORONA PŘI STŘÍDAVÉM NAPĚTÍ	52
4.2.1 Zapalovací napětí, intenzita pole, ztráty	52
4.2.2 Četnost výbojů, frekvenční spektrum	54
4.2.3 Měření pomocí antény	61
ZÁVĚR	64
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	66

PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – MĚŘENÉ MODELKY, OBECNÉ MĚŘENÍ PROUDU KORONOU	1
PŘÍLOHA B – MĚŘENÍ NA DETEKTORU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	3
PŘÍLOHA C – MĚŘENÍ ANTÉNOU	6

Seznam symbolů a zkratek

AC.....	„Alternating current“ - střídavý proud
DC.....	„Direct current“ - stejnosměrný proud
DČV.....	Detektor částečných výbojů
O ₂	Molekula kyslíku
N ₂	Molekula dusíku
U _s	Sdružené napětí (V)
U _f	Fázové napětí (V)
P _K	Ztráty korunou (kW/km a fázi, kW/km nebo kW)
δ.....	Korekční faktor hustoty vzduchu (-)
p.....	Atmosférický tlak (kPa)
t.....	Teplota okolí (°C)
f.....	Frekvence (Hz)
r _v	Poloměr vodiče (mm)
r _{ekv}	Ekvivalentní kapacitní poloměr svazkového vodiče (mm)
k.....	Horizontální vzdálenost mezi vodiči (mm)
U _{krit}	Zápalné napětí korony (kV)
U _v	Vrcholová (maximální) hodnota napětí (V)
U _{Qv}	Kvazivrcholová hodnota napětí (V)
U _{stř}	Střední hodnota napětí (V)
E _v	Elektrická pevnost vzduchu (kV/mm)
m _d	Činitel nepravidelnosti vodiče (-)
F.....	Konstanta závislá na poměru U _f /U _{krit} (-)
l.....	Délka vedení (km)
n.....	Počet vodičů ve svazkovém vodiči (-)
b.....	Vzdálenost vodičů ve svazkovém vodiči (mm)
r _{imag}	Imaginární poloměr kružnice opsané svazkovému vodiči (mm)
AM.....	Amplitudová modulace
FM.....	Frekvenční modulace
MATLAB.....	„Matrix laboratory“ – numerické výpočetní prostředí
LTspice.....	„Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis“
VN, VVN, ZVN..	Vysoké, velmi vysoké a zvlášť vysoké napětí

Č/T	Doba čela / doba týlu v časovém průběhu pulzu (s)
R&S	výrobce ROHDE&SCHWARZ
PD	výrobce Power Diagnostics
EMC.....	„Electromagnetic compatibility“ – Elektromagnetická kompatibilita
EMI	„Electromagnetic interference“ – Elektromagnetické rušení
Ø.....	Znak pro průměr vodiče (mm)
Q.....	Náboj (C)
I	Proud (A)
t	Čas (s)
L _I , L _U	Amplituda proudu (dB μ A), napětí (dBmV)
$\Delta P\%$	Procentní ztráty na vedení bez uvažování korony (%)
c.....	Rychlost světla (m/s)
R _K	Činný odpor na kilometr vedení (Ω /km)
L _K	Indukčnost na kilometr vedení (H/km)
RFID	„Radio Frequency Identification“ – Radiofrekvenční identifikační systém
PC.....	„Personal computer“ – Počítač/Notebook
RIV.....	„Radio Influence Voltage“ – Napětí ovlivňující rádiové vysílání

Úvod

Práce se zabývá problematikou korony, která je často diskutovaným jevem na všech vysokonapěťových i dalších zařízeních. Jedním z hlavních míst jejího výskytu jsou také přenosová vedení velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Už od počátků elektrifikace bylo nutné koronu řešit na střídavých vedeních a její chování je tak poměrně dobře zmapované. Dnes se však zdrojem korony stávají i rozšiřující se stejnosměrná vedení, kde je mechanismus korony odlišný a je potřeba ho také řádně popsat. Práce by tak měla mimo jiné porovnat i rozdíly mezi korunou na AC a DC napětí. U DC navíc závisí velikost korony i na polaritě napětí.

Důvodů, proč je třeba se korunou zabývat a lépe ji zkoumat, je hned několik. Mezi nejdůležitější patří fakt, že korona způsobuje poměrně velké výkonové ztráty, hlavně za deště. Dále dochází k rušení rádiových signálů, někdy i ve značné vzdálenosti od vedení a v neposlední řadě korona způsobuje také slyšitelný zvuk. Ten je nutné řešit speciálně v obydlených oblastech kvůli spokojenosti obyvatel žijících v blízkosti vedení. Mimo těchto hlavních důvodů existuje ještě řada vedlejších jako: stárnutí izolace, oteplování vedení, vznik chemických procesů atd.

Cílem práce by měla být rešerše různých způsobů měření výše uvedených primárních problémů a případně také rozbor teoretických výpočtů. Jednou z forem pro stanovení teoretických hodnot by měla být také simulace korony provedená v simulačním softwaru pro řešení fyzikálních polí. Teoretický rozbor by měl být dále doplněn řadou praktických měření v laboratorních podmínkách.

Nakonec by mělo dojít k vyhodnocení jednotlivých metod měření a pokud možno srovnání s teoretickými předpoklady. Závěrem by také mělo být, zda se měření v laboratoři dá aplikovat i na reálná přenosová vedení nebo zda je alespoň výsledek z laboratorních měření porovnatelný s reálným vedením a použitelný v praxi.

1. Teorie korony

Korona je jev známý již několik desetiletí a teorie jejího vzniku je dnes již také velice přesně a podrobně popsána. Je vymyšlena řada způsobů jejího omezení a některé jsou již na vedení standardem. I přesto existují oblasti korony, které jsou stále neprozkoumané. Následující odstavce by měli shrnout současné základní znalosti o chování korony a tím pádem i současný stav jejího výzkumu.

1.1 Definice

Slovo korona doslovně představuje kotouč světla, který je viditelný okolo Slunce. Termín byl převzat fyziky a elektroinženýry speciálně pro popis částečných výbojů, které vznikají v místech o vysoké intenzitě elektrického pole. Částečné průrazy ve vzduchu jsou totiž povahou i vzhledem odlišné od úplného průrazu vzduchu mezi elektrodami. To platí i v ostatních plynech.

Korona je rovněž odlišná od výbojů, které vznikají ve vzduchových bublinách u pevných a kapalných izolací, nicméně základní princip výbojů v plynech je totožný. Koronový výboj je doprovázen řadou pozorovatelných efektů, jako viditelné světlo, slyšitelný zvuk, elektrický proud, energetické ztráty, rušení rádiového signálu, mechanické vibrace a chemické reakce. Chemické reakce doprovázející koronu ve vzduchu navíc produkují zápach ozonu a oxidů dusíku. [1]

Již od počátku je korona jedním z hlavních problémů pro přenosová vedení, jelikož způsobuje ztráty na vedení a také rušení rádiových, televizních, internetových a dalších radiofrekvenčních přenosů. Laviny pohybujících se elektronů představují totiž elektrické proudy a jako takové jsou zdrojem magnetických a elektrostatických polí v jejich okolí. Elektrony jsou vytvořené velice náhle a existují pouze krátce, magnetické a elektrostatické pole tudíž naindukuje v okolní rádiové technice napětí o vysoké frekvenci. [2] Na druhou stranu má korona i praktické využití, např. ve Van der Graaffových generátorech, elektrostatických odlučovačích, elektrostatickém tisku, elektrostatickém nanášení, výrobě ozonu, ionizačních detektorech apod. [1]

V případě aplikování definice korony pouze na přenosová vedení, je možné ji dále zpřesnit následujícím způsobem: „Korona je svítivý výboj způsobený ionizací vzduchu obklopujícího vodič, okolo kterého existuje napěťový spád přesahující určitou kritickou hodnotu.“ [2]

1.2 Mechanismus koronového výboje

Proces výboje je závislý na polaritě přiloženého napětí. Proto je nutné ho popsat zvlášť pro kladnou a zápornou polaritu u DC a také pro AC.

1.2.1 Korona při kladném napětí

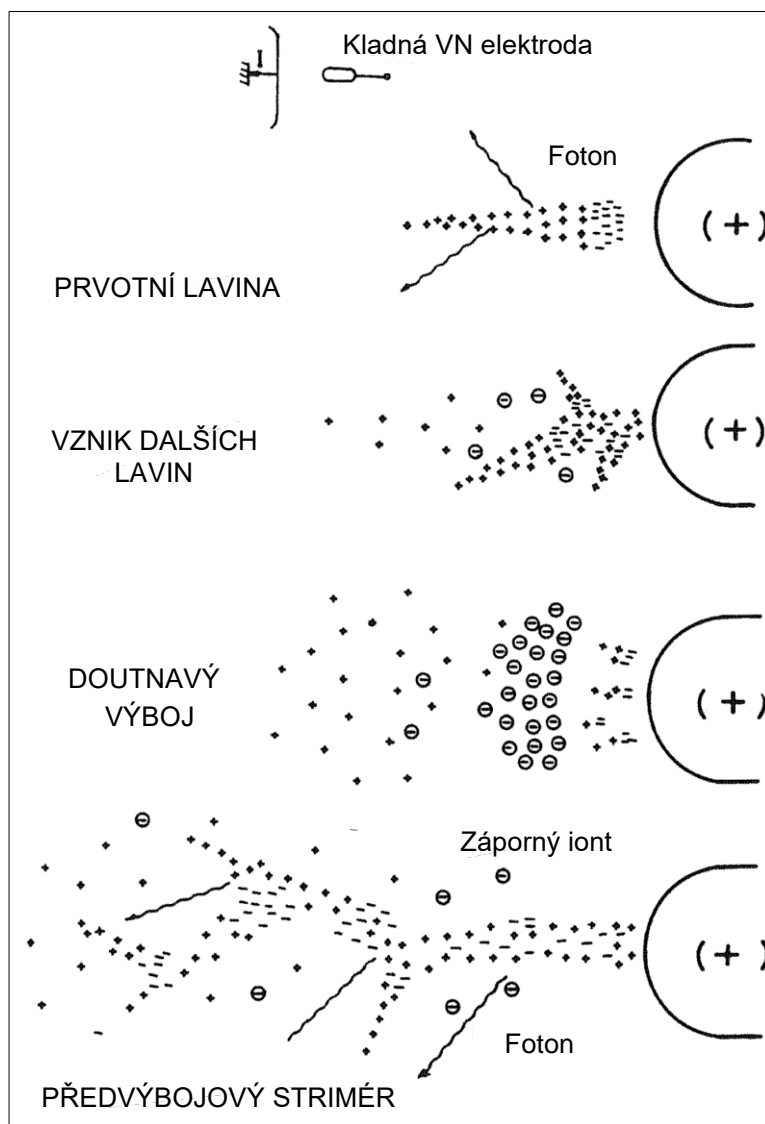
Ve vzduchu se vždy vyskytuje několik volných elektronů jako důsledek stopových množství radioaktivních materiálů v zemské kůře a kosmického záření. Tyto elektrony mají vlastní záporný náboj a jsou tudíž přitahované ke kladně nabitému vodiči. [1]

Rychlost dosažená volným elektronem je závislá na intenzitě elektrického pole. Když intenzita není příliš vysoká, je srážka mezi elektronem a molekulou vzduchu jako kyslík (O_2) nebo dusík (N_2) pružná. To znamená, že elektron se od molekuly odrazí bez toho, aby odevzdal svoji energii. Naopak, když intenzita elektrického pole přesáhne určitou kritickou hodnotu, každý volný elektron v tomto poli dosáhne dostatečné rychlosti, takže jeho srážka s molekulou vzduchu je nepružná. To znamená, že elektron má dostatečnou energii na vyražení jednoho z valenčních elektronů z některého atomu molekuly vzduchu. Tento jev je známý jako ionizace a molekula s chybějícím elektronem se stává kladným iontem.

Původní elektron, který srážku způsobil, ztratil většinu svojí rychlosti. Elektron vyražený z molekuly vzduchu má rovněž nízkou rychlost. Oba elektrony jsou tak následně urychleny elektrickým polem a při další srážce jsou již oba schopné provést ionizaci molekuly vzduchu. Po druhé srážce už jsou ve vzduchu čtyři elektrony a takto dochází ke zdvojnásobení počtu po každé srážce. Po celou dobu jsou všechny elektrony stále přitahované ke kladné elektrodě a po mnoha srážkách je jejich množství obrovské. Při tomto procesu vzniká již zmiňovaná elektronová lavina v počátku vyvolaná jedním elektronem, který se dostal do elektrostatického pole o vysoké intenzitě. [2]

Při zapalovacím napětí korony a lehce nad ním, je na povrchu vodiče malý prostor, kde je dostatečně silná intenzita pole, aby způsobila ionizaci při srážce. Vzniklé elektronové laviny

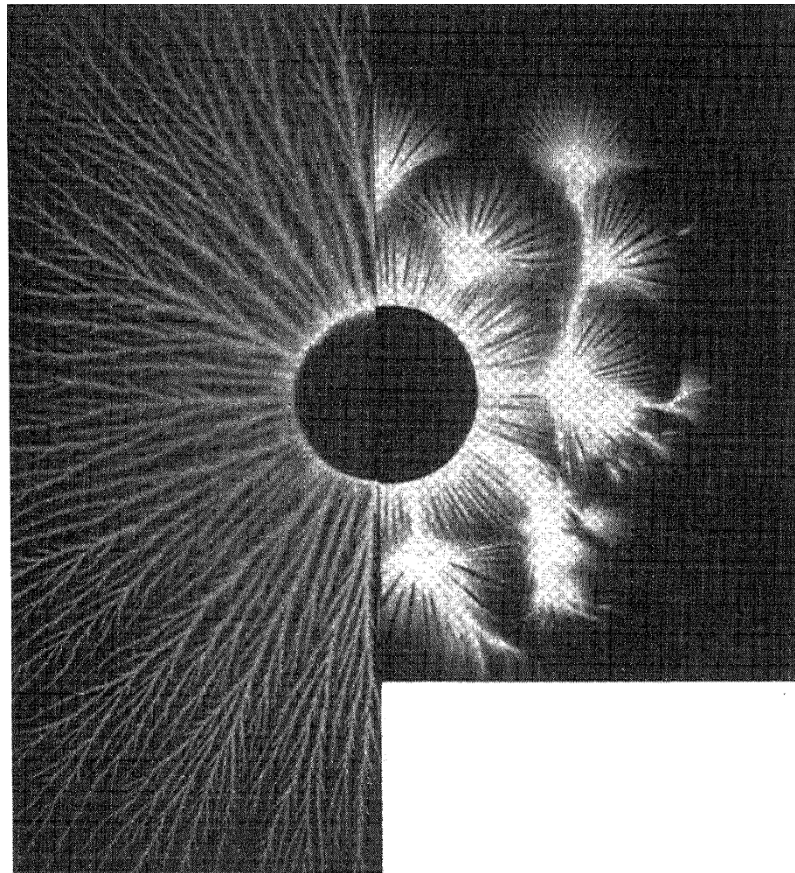
postupují směrem k povrchu vodiče a nakonec do něj naráží, přitom v poslední fázi vzniká tzv. počáteční strimér, který proces ještě urychluje. Fáze výboje jsou na *Obr. 1.1*. Těžké ionty zůstávající pozadu vytvářejí kladný prostorový náboj ve formě hrotu, který vyčnívá ven z povrchu vodiče a fiktivně tak zvětšuje jeho rozměry. Zvětšená intenzita pole v této špičce napomáhá vzniku dalších elektronových lavin. Důsledkem je neustálý růst kladného prostorového náboje směrem od vodiče.



Obr. 1.1: Jednotlivé fáze kladného koronového výboje [1]

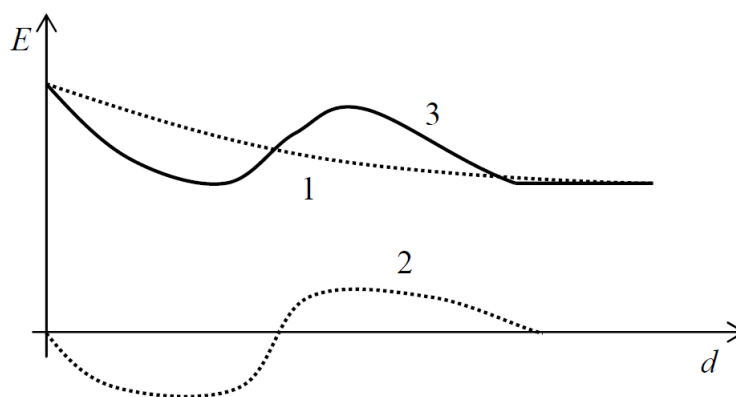
Při dalším zvyšování napětí se může v blízkosti povrchu vodiče vytvořit také mrak záporných iontů a počet počátečních strimérů strmě naroste. Jsou velice krátké, překrývají se v čase i prostoru a vytvářejí tzv. doutnavý výboj zabírající podstatnou část povrchu vodiče. Doutnavý výboj produkuje nejasné, slabé světlo, které obklopuje povrch vodiče, ale z povrchu moc nevystupuje.

Dále začne docházet k tomu, že elektronové laviny nyní mohou do vzniklého hrotu postupujícího kladného prostorového náboje prostupovat z různých směrů a tudíž produkují pozitivní ionty, které se větví do všech směrů z původně vzniklého hrotu (kmene). Většina těchto větví pokračuje v růstu a opět se rozvětvují, celek formuje tvar podobný stromu a označuje se jako sršivý výboj (tvar je viditelný na *Obr. 1.2 vlevo*). Tento růst pokračuje, až nakonec sršivý výboj dosáhne takové velikosti, že intenzita pole na hrotech jednotlivých větví s kladným nábojem je nedostatečná pro vyvolání další ionizace. Sršivý výboj se projevuje fialovou září a charakteristickým intenzivním louskavým a syčivým zvukem.



Obr. 1.2: Fotografie tvaru koronového výboje okolo vodiče při kladné polaritě (vlevo) a záporné polaritě (vpravo) [1]

Při ještě větším napětí již nedokáží mraky záporných iontů udržet svoji stabilitu a jsou narušeny předvýbojovými striméry, které putují k záporné elektrodě a po chvíli vedou k úplnému přeskoku přes vzduchovou mezeru. [1,2]



Obr. 1.3: Rozložení intenzity elektrického pole v závislosti na vzdálenosti mezi vodičem a zemí při kladné koruně: 1 – Intenzita způsobená vnějším zdrojem, 2 – Intenzita způsobená kladným prostorovým nábojem, 3 – Výsledné rozložení intenzity pole [3]

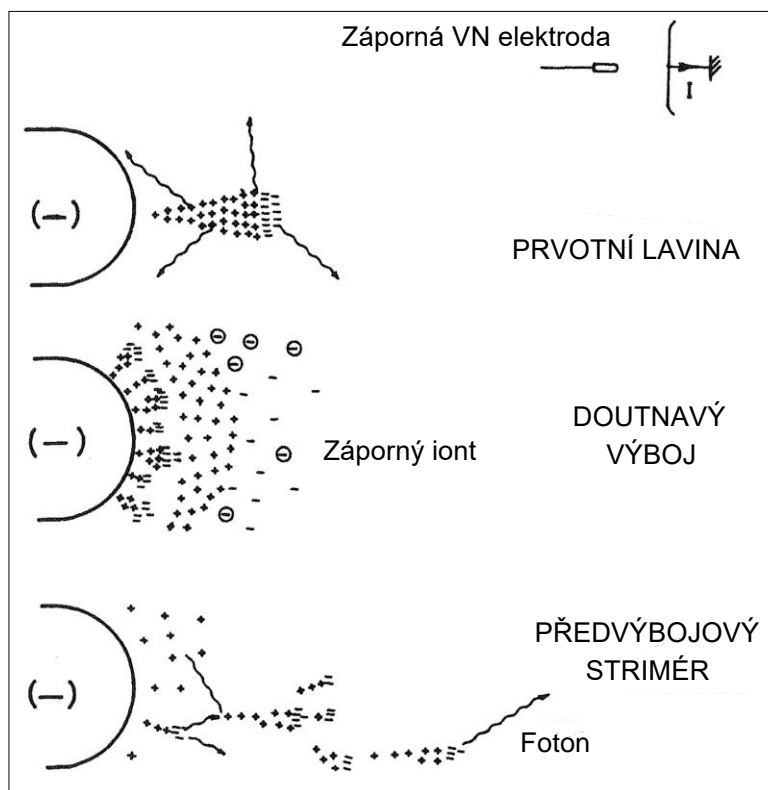
Na Obr. 1.3 je zobrazeno rozložení intenzity elektrického pole v závislosti na vzdálenosti mezi vodičem a zemí. Je vidět, že kladný prostorový náboj snižuje intenzitu v okolí vodiče a naopak ji navyšuje ve vzdálenějším prostoru.

1.2.2 Korona při záporném napětí

Jednotlivé fáze tvorby výboje jsou viditelné na Obr. 1.4. Při zapalovacím napětí má korona na vodiči pulzující charakter. Každý pulz odpovídá jedné elektronové lavině vznikající v ionizační zóně. Ta je nejsilnější u vodiče a rozprostírá se až do takové vzdálenosti, ve které je intenzita pole již natolik slabá, že ionizace není možná. Za touto oblastí se stále více elektronů z laviny váže na molekuly a vznikají záporné ionty, které se díky jejich vysoké hmotnosti velmi pomalu přesunují ke kladné elektrodě. Při tomto procesu se mohou z laviny šířit fotony do všech směrů a produkovat fotoelektrony, které vytvářejí další laviny jdoucí k anodě.

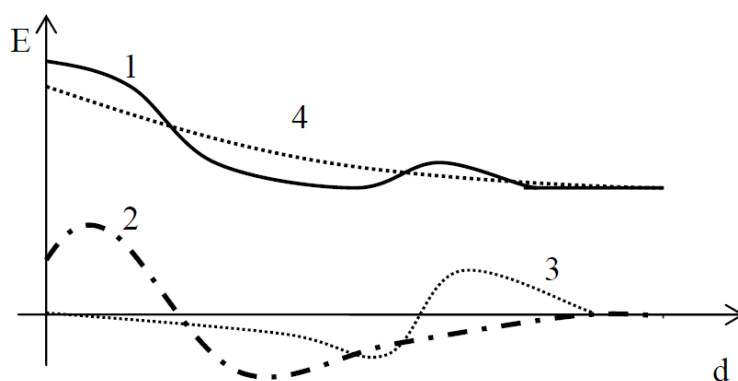
Při zvětšení napětí pulzující charakter korony zvětší frekvenci natolik, že dosáhne stálého stavu a vytváří záporný doutnavý výboj. Záporný prostorový náboj se rozšiřuje do stále většího prostoru. Tento proces je navíc kumulativní, takže prostor se záporným nábojem stále nabývá na délce, až dokud je zbývající intenzita pole na vnějším okraji nedostatečná pro pokračování ionizačního procesu. [1]

Celý proces vytváří následně výboj, který se označuje jako trsový a obklopuje celý obvod vodiče (viz Obr. 1.2 vpravo). Zvukový projev trsových výbojů je obvykle spojován s nepřetržitým syčivým zvukem jakoby v pozadí. Při dalším zvětšování napětí opět vzniknou předvýbojové striméry a může dojít k úplnému průrazu. [2]



Obr. 1.4: Jednotlivé fáze záporného koronového výboje [1]

Graf na Obr. 1.5 dále popisuje rozložení intenzity elektrického pole, podobně jako u kladné korony. Zde je však rozložení kladného prostorového náboje odlišné a intenzitu ovlivňuje také záporný prostorový náboj. Nejdůležitější na grafu je fakt, že výsledná hodnota intenzity je navýšená v okolí vodiče. To je důvod k tomu, že korona při záporném napětí má nižší zapalovací napětí než při kladném napětí.



Obr. 1.5: Rozložení intenzity elektrického pole v závislosti na vzdálenosti mezi vodičem a zemí při záporné koruně: 1 – Intenzita způsobená vnějším zdrojem, 2 – Intenzita způsobená kladným prostorovým nábojem, 3 – Intenzita způsobená záporným prostorovým nábojem 4 – Výsledné rozložení intenzity pole [3]

1.2.3 Korona při střídavém napětí

Základním rozdílem mezi DC a AC korunou je periodická změna elektrického pole při střídavém napětí a také vliv zbytkového náboje z výbojů v předcházející půl periodě. Z toho vyplývá, že počáteční striméry v kladné půl periodě se mohou objevit pouze ve velmi krátké části periody napětí a mohou být přímo následované doutnavým výbojem. Podobně je to s pulzujícími výboji a záporným doutnavým výbojem v záporné půl vlně. Když má přiložené napětí dostatečnou velikost, mohou se v závislosti na použité geometrii elektrod objevit oba druhy výbojů v obou půlvlnách. [1]

1.3 Ztráty korunou na přenosových vedeních

Mezi negativní vlivy, které korona způsobuje, patří mimo jiné také ztráty na přenosových vedeních. Korona vzniká v nevyplněných místech v izolátorech, na vodičích nebo na rozhraní izolátorů. Účinky korony se navíc kumulují a přetrvávají, takže při dlouhodobém působení může dojít k náhlé poruše. Velikost ztrát závisí na mnoha faktorech, především na napětí, průměru a tvaru vodiče, výskytu prachových částic, kapiček vody a nedokonalostech povrchu vodiče jako škrábance apod. Pro určení výsledných ztrát je třeba respektovat všechny tyto parametry a k tomu dnes slouží některý ze speciálních vztahů, které budou uvedeny níže. Ztracený výkon na vedení se díky koruně přeměňuje na proud, zvuk, rádiové rušení, teplo a také způsobuje chemické procesy. Ve výsledku tak dochází ke snížení spolehlivosti a degradaci izolačních prvků. Vedení je náchylnější na poruchy v důsledku elektrických přeskoků. [4]

1.3.1 Peekův vztah

Jedná se o nejstarší, v minulosti používaný vzorec, který byl navržen podle experimentálních výsledků. Tento vztah slouží pro výpočet ztrát korunou na AC přenosových vedeních, pokud platí, že poměr:

$$\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot U_{krit}} = \frac{U_f}{U_{krit}} \geq 1,8 \quad (1.1)$$

To znamená, že vztah lze použít, pokud jsou ztráty korunou velké. Navíc platí, že nejlepší výsledky se dosahuje, pokud je frekvence v rozmezí 25 Hz až 120 Hz a poloměr vodiče je větší než 2,5 mm. [5]

Jednotlivé proměnné jsou uvedeny v *Tab. 1.1* včetně jejich jednotek. Výsledný vztah má podobu [4]:

$$P_K = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r_V}{k}} \cdot \left(\frac{U_S}{\sqrt{3}} - U_{krit} \right)^2 \cdot 10^{-5} \quad \left(\frac{kW}{km \cdot f\acute{a}ze} \right) \quad (1.2)$$

Tab. 1.1: Seznam veličin pro Peekův a Petersonův vztah [4]

Symbol	Parametr	Jednotka
P_K	Ztráty korunou	$\frac{kW}{km \cdot f\acute{a}ze}$
δ	Korekční faktor hustoty vzduchu $\delta = \frac{2,895 \cdot p}{273 + t}$	-
p	Atmosférický tlak	kPa
t	Teplota okolí	°C
f	Frekvence	Hz
r_V / r_{ekv}	Poloměr vodiče nebo kapacitní ekvivalentní poloměr svazkového vodiče	mm
k	Horizontální vzdálenost mezi vodiči	mm
U_S	Sdružené napětí	kV
U_f	Fázové napětí	kV
U_{krit}	Kritická hodnota fázového napětí (zápalné napětí korony) $U_{krit} = \frac{E_V}{\sqrt{2}} \cdot \delta \cdot m_d \cdot r_V \cdot \ln\left(\frac{k}{r_V}\right)$	$\frac{kV}{f\acute{a}ze}$
E_V	Elektrická pevnost vzduchu	kV/mm
m_d	Činitel nepravidelnosti vodiče	-
F	Konstanta závislá na poměru U_f / U_{krit} (viz <i>Obr. 1.6</i>)	-
l	Délka vedení	km

Vzorec v základním tvaru s tabulkovými hodnotami platí pro pěkné počasí. V případě zhoršeného počasí, uvažuje se za deště/bouřky, je nutno kritické napětí vynásobit koeficientem 0,8. Vztah se později ukázal jako nedostačující a byl nahrazen vztahem Petersonovým. [4]

1.3.2 Petersonův vztah

Tento vztah je určen hlavně pro výpočty ztrát na AC vedení, když platí, že poměr:

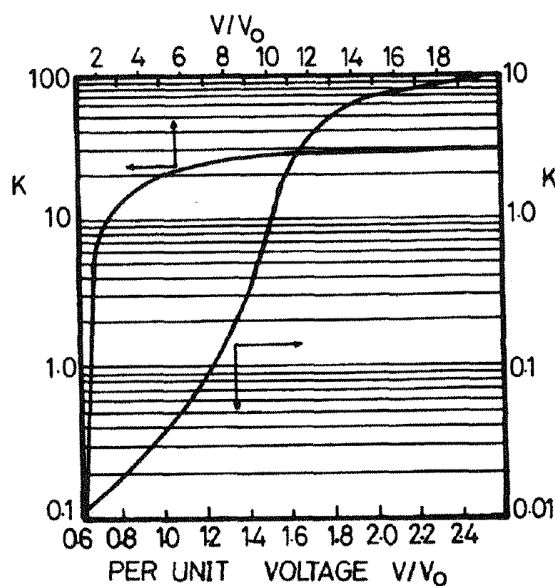
$$\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot U_{krit}} = \frac{U_f}{U_{krit}} < 1,8 \quad (1.3)$$

Nicméně často se díky jednoduchosti tento vztah používá i při poměru větším než 1,8 a způsobená chyba není velká. Tento vztah je obecně všestrannější než vztah Peekův.

Vztah má podobu [6]:

$$P_K = \frac{1,11066 \cdot F \cdot f \cdot U_f^2 \cdot 10^{-4}}{\left[\ln\left(\frac{k}{r_v}\right)\right]^2} \quad \left(\frac{kW}{km \cdot f\acute{a}ze}\right) \quad (1.4)$$

Jak již bylo řečeno, fázové napětí převyšuje kritické maximálně o 1,8 násobek, vztah je tedy nejvhodnější pro malé ztráty. Jelikož omezení ztrát korunou na co nejnižší hodnotu je u vedení prioritou, používá se tento vztah prakticky vždy. [4]



Obr. 1.6: Tabulka pro koeficient F pro Petersonův vztah [1]

1.3.3 Ztráty na stejnosměrných vedeních

Na unipolárních vedeních se v prostoru mezi vodiči a mezi vodiči a zemí vyskytují ionty pouze jedné polaroty. Nicméně u bipolárních vedení jsou v meziprostorech jak pozitivní, tak negativní ionty a je zde vysoká pravděpodobnost rekombinace. Tento jev zapříčiňuje,

že ztráty korunou na bipolárních vedeních jsou mnohem větší než na vedeních monopolárních a dokonce větší než na střídavých vedeních.

Při porovnání bipolárního stejnosměrného vedení a trojfázového střídavého vedení se stejnou efektivní hodnotou napětí a za pěkného počasí, vycházejí ztráty na bipolárním vedení přibližně dvakrát větší. Na druhou stranu, přírůstek ztrát v závislosti na napětí a zhoršeném počasí není u bipolárního vedení tak velký jako u vedení trojfázového

Zajímavý je také fakt, že ztráty na monopolárních vinutích jsou závislé na vlhkosti vzduchu, kdy se mohou měnit v rozsahu až 20 %. Nárůst ztrát je také patrný při zvětšení rychlosti větru v horizontálním směru. [1]

1.4 Parametry ovlivňující vznik a velikost korony

V následující části bude uvedena závislost ztrát korunou na některých parametrech. Podobná pravidla jako pro ztráty však platí i pro samotný vznik a „velikost“ korony a samozřejmě také pro rádiové rušení, které je na ztrátách přímo závislé.

1.4.1 Atmosférické podmínky, znečištění

Asi největší vliv na ztráty korunou má už samotná stavba vodiče a celkově vedení. Všechny vodivé části by měly být co nejhladší, na vedení by se neměly vyskytovat ostré úhly a všechny komponenty (izolátory, spojky, závaží proti rozkývání atd.) musí být optimalizovány tak, aby vykazovaly co nejmenší ztráty. Úplně nejhorší jsou malé ostré výstupky z vodiče, kde vzniká velmi vysoká intenzita pole. Problém je tak jakékoliv znečištění vodiče a také mastnota.

Paradoxně nejvyšší ztráty vykazuje vedení, které je úplně nové. Ztráty se zmenšují se stárnutím lan. Pokud tak dojde například k odpojení vedení od napětí na delší dobu a poté k jeho opětovnému připojení, je nutné vedení několik hodin zatěžovat, než se ztráty zmenší zpět na své původní hodnoty. [7]

Teplota vzduchu a tlak vzduchu ovlivňují ztráty pouze mírně, při výpočtu jsou zahrnuty v korekčním faktoru δ . Vítr na ztráty korunou nemá žádný měřitelný efekt. To samé platí o vlhkosti vzduchu, ale jen do té míry než dosáhne hodnoty 100 %. Při kondenzaci vody a zvláště za deště dochází ke zvýšení ztrát korunou až deseti násobně i více, v závislosti

na množství srážek. Zvětšení ztrát v důsledku deště nebo nečistot je navíc daleko výraznější u vodičů větších průměrů než u menších průměrů. Může za to větší povrch vodiče a tudíž i větší prostor, kde se nečistoty mohou vyskytovat. [1]

1.4.2 Elektrické faktory, geometrie

Z rovnic (1.2) a (1.4) pro ztráty vyplývá, že korona je závislá na použité frekvenci sítě. Čím vyšší je frekvence, tím vyšší jsou ztráty korunou. Z toho se dá také usuzovat, že projevy korony na DC vedení budou zpravidla menší než na ekvivalentním vedení AC, platí to však pouze za určitých předpokladů. Problém je také to, že v důsledku korony vznikají vyšší harmonické, které koronu navyšují. [4]

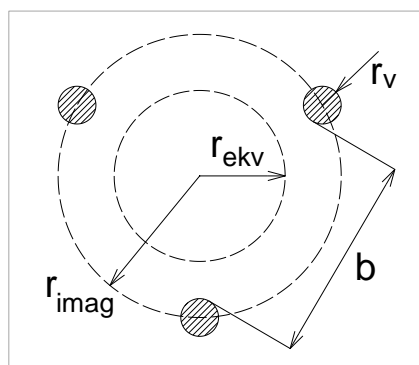
Dále ztráty závisí samozřejmě také na napětí. Pro nízké napětí nemusí korona vůbec vznikát, ale po překročení kritického napětí už se ztráty projevují. Čím vyšší je napětí, tím větší jsou i ztráty. Obecně je na vedení nutné se korunou zabývat až od hladiny 110 kV, v České republice se to tedy týká hladin 110, 220 a 400 kV. [8]

Také platí, že čím větší je poloměr vodiče, tím menší je zakřivení, tím pádem intenzita pole a ve výsledku i nižší ztráty. V případě svazkových vodičů se zvětšuje fiktivní poloměr vodiče a dochází ke snižování ztrát. Peekův i Petersonův vztah lze pro svazkový vodič použít, je však nutno počítat namísto s poloměrem jednoho vodiče s kapacitním ekvivalentním poloměrem svazkového vodiče [1], který lze vypočítat podle vztahu [9]:

$$r_{ekv} = \frac{1}{n^2} \sqrt{r_v^n \cdot b^n} \quad (mm) \quad (1.5)$$

kde r_{ekv} je kapacitní ekvivalentní poloměr svazkového vodiče, n je počet vodičů ve svazku, r_v je poloměr jednoho vodiče, b je vzdálenost vodičů ve svazku a r_{imag} je poloměr imaginární kružnice opsané svazkovému vodiči, viz *Obr. 1.7*. Pro omezení korony je také důležité dodržovat větší rozestupy jednotlivých fází a vzdálenost mezi fází a zemí, resp. stožárem. Rovněž rozložení více paralelních linek musí být na stožáru správně provedeno a dodržena potřebná vzdálenost fází obou vedení. [9]

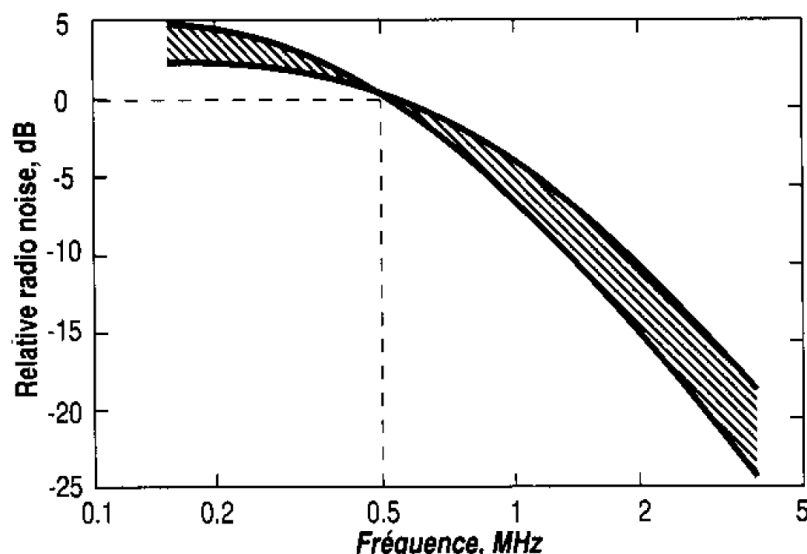
Existuje vždy optimální vzdálenost vodičů ve svazku, poloměr jednotlivých vodičů a počet vodičů ve svazku, při kterém jsou ztráty korunou nejmenší. [1]



Obr. 1.7: Rozměry svazkového vodiče pro výpočet kapacitního ekvivalentního poloměru

1.5 Rádiové rušení a slyšitelný zvuk

Rádiové rušení je jakýkoliv nechtěný efekt na příjem žádaného rádiového signálu vlivem rušení v rámci radiofrekvenčního spektra. Televizní rušení je speciální případ rádiového rušení pro vlivy působící na frekvenční pásma užívané pro televizní vysílání. Rádiové rušení ovlivňuje primárně amplitudově modulované systémy (AM rádiové a televizní signály) jelikož další formy modulace jako frekvenční (FM) jsou obecně méně náchylné na jakákoliv rušení.

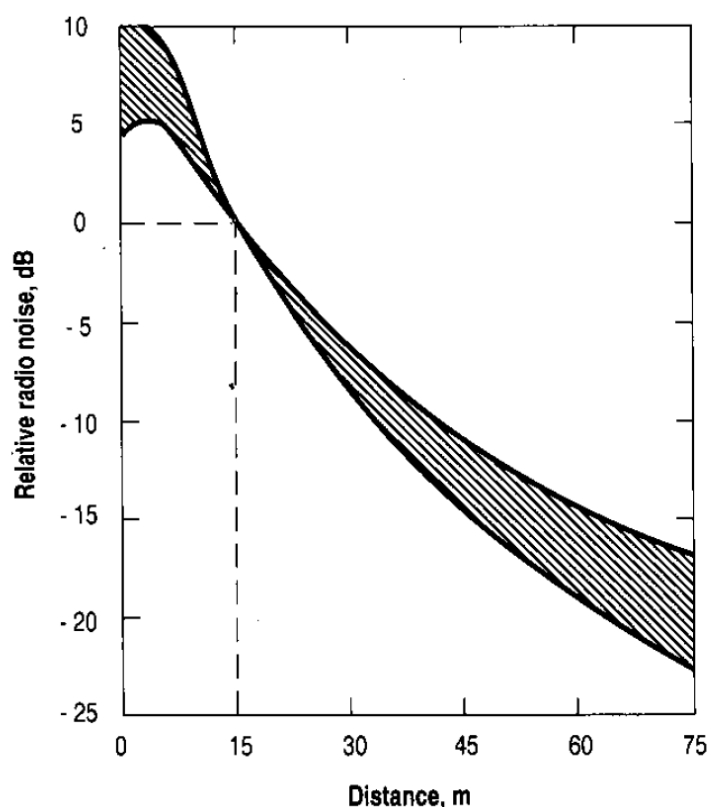


Obr. 1.8: Závislost rádiového rušení na frekvenci pro běžná vedení, referenční hodnota = velikost rušení na frekvenci 0,5 MHz (úroveň 0 dB) [10]

Každé rušení, tak jako korona, má své charakteristické průběhy, amplitudy a dobu opakování. Korona je charakteristická frekvenčním spektrem do několika MHz a tím pádem moc neovlivňuje televizní frekvence. Ty začínají přibližně na 30 MHz a s příchodem digitálního vysílání se posouvají do pásem dosahujících až 1 GHz. Pouze v případě velkých koronových výbojů může dojít k ovlivnění televizních frekvencí až v pásmu 40 až 60 MHz.

Rozložení rádiového rušení v závislosti na frekvenci je na *Obr. 1.8* pro běžná vedení s určitým rozsahem možných hodnot. Rušení je uváděno v decibelech (obecně podle rovnice (3.2)), kdy je počítán poměr změřené velikosti intenzity elektrického pole k referenční hodnotě, která je uvedena u obrázků.

Díky malým frekvencím je rušení nejvíce přítomné právě v těsné blízkosti podél vedení. Pro typické délky linek je rušení podél celého vedení konstantní, zeslabuje se ve všech směrech stejně a útlum je závislý na uspořádání vedení, elektrických vlastnostech země a také na terénu krajiny. Rozložení rádiového rušení v závislosti na vzdálenosti od vodiče je na *Obr. 1.9* s rozsahem hodnot respektující různé konfigurace vedení a tvar krajiny. Jak již bylo řečeno, výskyt korony a rádiového rušení je silně závislý na stavu vodiče a přítomnosti kapek vody. Z tohoto důvodu je nejlepší měřit rušení statisticky, např. ve formě percentilů za určité období, čím delší, tím lepší. [10]



Obr. 1.9: Závislost rádiového rušení na vzdálenosti od běžných vedení, referenční hodnota = velikost rušení ve vzdálenosti 15 m (úroveň 0 dB) [10]

Sršivé výboje při kladných polaritách napětí jsou značným zdrojem elektrického rušení o velikosti až 10 krát větší než je rušení při trsovém výboji v záporné půlvlně napětí. Doutnavé výboje se objevují pouze zřídka, rušivé napětí generované těmito výboji je obvykle velmi malé.[2]

Pokud jde o rozdíl mezi AC a DC, platí podobný princip. Měřením bylo dokázáno, že největší rušení u bipolárního vysokonapětového stejnosměrného vedení vzniká pod kladným vodičem, zatímco pod vodičem záporným je rušení nevýrazné. U AC vedení je útlum rádiového signálu obecně méně výrazný. V případě AC korony vznikají kladné výboje během kladné půlplny a jsou rovněž hlavním zdrojem rušení. Při napětích lehce nad zapalovacím napětím má však korona v kladné půlplně podobu rovnoměrného vyzařování doplněného zápornými ionty vytvořenými při předchozí záporné půlplně. Tím pádem jsou DC vedení při napětích lehce nad zapalovacím více zarušené než AC vedení, hlavně za pěkného počasí.[1]

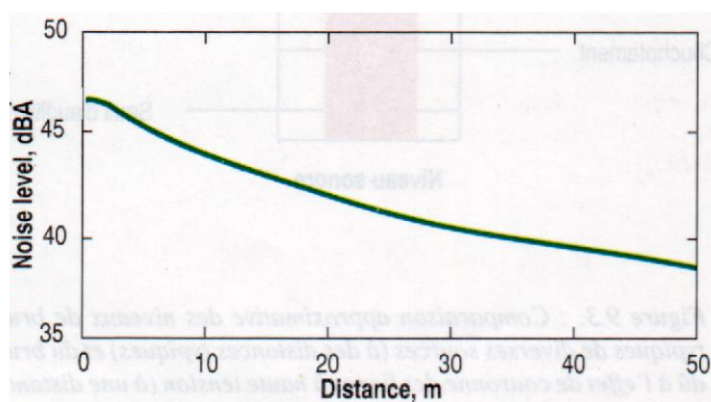
Elektrická rušení jsou obvykle měřena v laboratorních podmínkách pomocí měřiče rádiového rušení, který je spárován se zkušebním vzorkem. Tímto postupem lze měřit generované rádiové rušení daného vzorku nazývané RIV (Radio Influence Voltage) neboli napětí ovlivňující rádiové vysílání. [2]

Slyšitelný zvuk

Slyšitelný zvuk způsobený korunou se projevuje širokopásmovým hlukem připomínajícím praskání a také jednotlivými tóny připomínajícími bzučení. Širokopásmová část je převládající složkou hluku a zapřičiňuje unikátní zvuk korony, který se nedá zaměnit s žádným jiným běžným zvukem okolí. Unikátní je proto, že ostatní zvuky mají hlavní energii koncentrovanou v nižším pásmu slyšitelných frekvencí, kdežto korona se projevuje ve středních a vysokých frekvencích, tzn. nad 500 Hz. Pro tyto frekvence je právě charakteristický praskající nebo syčící zvuk.

Jednotlivé tóny vznikají na frekvencích, které jsou převážně sudými násobky frekvence sítě. Dominantní tóny vznikají na dvojnásobku frekvence sítě a jsou podobné hučení transformátorů nebo fluorescenčních světelných zdrojů. Tento šum se vyskytuje na různých místech s různou intenzitou a často není rozeznatelný. Když už se zvuk vyskytne, může se značně měnit i na malé vzdálenosti, takže měření je problematické a volba místa měření má značný vliv na výsledky. Slyšitelný zvuk je nutné řešit až u vedení s napětím větším než 300 kV. Měření je opět nejlepší provádět statisticky pomocí percentilů, díky závislosti na změnách počasí.

Lidé v jinak klidné venkovské nebo obytné zástavbě si mohou u energetických společností stěžovat na hluk z okolních přenosových vedení a celkově může být hluk velmi těžce kritizován a přítomnost vedení odsuzována. Rozložení úrovně slyšitelného hluku v závislosti na vzdálenosti od vedení je na *Obr. 1.10*. Hodnoty v dBA vyjadřují hladinu akustického tlaku vypočtenou obecně podle vztahu (3.2), počítáno je s velikostí změřeného akustického tlaku vztaženého na referenční hodnotu $20 \mu\text{Pa}$ (práh slyšení). Jeden z příkladů z praxe pro ilustraci ukazuje, že u jednoho vedení nebyly ohledně slyšitelného rušení téměř žádné stížnosti, zatímco u druhého vedení s rušením pouze mírně vyšším už bylo stížností velké množství. Z toho vyplývá, že ačkoliv jsou stanovené dovolené hodnoty rušení, nemohou být aplikované plošně na všechny situace.



Obr. 1.10 Závislost úrovně slyšitelného zvuku na vzdálenosti od běžného vedení, referenční hodnota = práh slyšení (úroveň 0 dB) [10]

Na každém místě jsou různé faktory, které dovolené hodnoty ovlivňují, např. četnost výskytu deštivého počasí, hodnoty běžného rušení v dané oblasti a množství a poloha lidí bydlících v okolí. Také záleží na tom, v jaké části dne se hluk projevuje, jak často a jak dlouho trvá. Navíc se potvrdilo, že zvuk způsobený korunou je poněkud více „otravný“ než jiné zvuky se stejnou úrovní rušení. Na druhou stranu je hluk největší za deštivého počasí, kdy samotný déšť již způsobuje dostatek hluku, aby zvuk korony zamaskoval, navíc dlouhodobější pobyt venku za deště také není běžný. [10]

2 Možnosti měření a testování korony

Způsobů měření korony existuje nepřehledné množství, některé způsoby se liší pouze v maličkostech, jiné jsou zcela speciální. Většina způsobů má však jednu zásadní vlastnost, lze je řádně a jednoduše použít pouze v laboratorních podmínkách a většinou také pouze na zmenšených laboratorních modelech. Velké množství také dokáže spolehlivě detekovat

pouze přítomnost korony, tvar pulzů a další údaje, ale nedokáže lokalizovat místo koronového výboje.

Některé z těchto způsobů byly využité i při praktickém měření v této práci a jsou zjednodušeně popsány v kapitole 3. Jedná se především o měření proudu korony a to pomocí osciloskopu na vloženém odporu, pomocí proudové sondy, s využitím detektoru částečných výbojů a v neposlední řadě také pomocí antény. Posledně jmenovaný způsob je obzvláště zajímavý, mimo jiné také proto, že je aplikovatelný i při měření mimo laboratoř.

V této kapitole se tedy zaměřím pouze na některé způsoby měření, které jsou, tak jako měření anténou, v něčem speciální a pokud možno aplikovatelné na reálném přenosovém vedení v terénu. Různými metodami se dá zjistit místo výskytu korony, její intenzita, vliv na rušení rádiových signálů, slyšitelný zvuk, ztráty a další důležité parametry.

2.1 Měření ztrát korunou

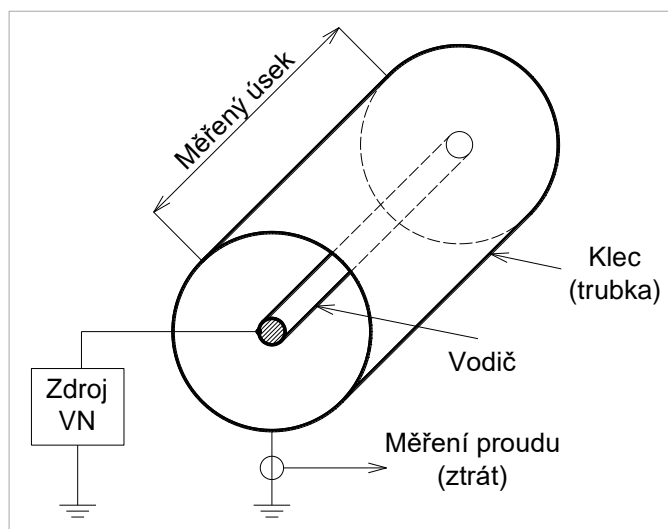
Měření ztrát je důležité pro každou společnost provozující přenosová vedení, jelikož velikost ztrát znamená ušlý zisk. Pro stanovení ztrát se používá základní měření na měřicích transformátorech v rozvodnách na obou stranách linky. Změří se napětí a proud a vyhodnotí se výkon, z rozdílů výkonů na začátku a na konci vedení se vypočítají celkové výkonové ztráty na vedení. Poté se teoretickým výpočtem stanoví ztráty na tomto vedení bez působení korony, k tomu se použije např. vztah uvedený v [11] ve tvaru:

$$\Delta P_{\%} = 1 - e^{-l \cdot \frac{R_K}{L_K \cdot c}} \quad (\%) \quad (2.1)$$

Kde $\Delta P_{\%}$ jsou procentní ztráty na vedení bez uvažování korony, l je délka vedení, R_K činný odpor na km, L_K indukčnost na km a c rychlost světla. Poté se od naměřených celkových ztrát odečtou vypočtené ztráty a zbývající ztráty připadají z největší části na koronu. Malé množství ztrát ještě připadá na další jevy, které v použitém teoretickém vztahu nevystupují. Další metodou je stanovení ztrát korunou celkově teoretickým výpočtem, např. podle uvedeného Peekova nebo Petersonova vztahu.

V laboratorních podmínkách je ještě možné měřit ztráty v tzv. kleci, viz *Obr. 2.1*. Část měřeného vedení nebo ekvivalentního vodiče se umístí do klece nebo trubky obklopující vodič.

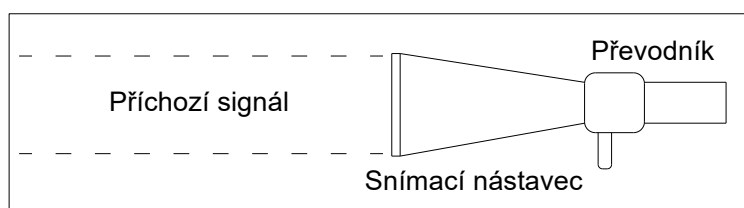
Klec se uzemní buď přes citlivý wattmetr, nebo ampérmetr a měří se buď přímo ztráty korunou, nebo proud korunou, ze kterého se vypočítají ztráty. Tuto metodu je možné v jednoduché formě případně použít i na reálném vedení. [12]



Obr. 2.1: Schéma měření ztrát klecovou metodou v laboratorních podmínkách

2.2 Detekce zvukových projevů

Pro detekci rušení korunou v ultrazvukovém pásmu lze použít speciální běžně prodávané přístroje, viz Obr. 2.2. Výhodou je uplatnění na uzavřených i otevřených elektrických zařízeních na všech napěťových hladinách. Korona způsobuje ionizaci, která vede k rušení okolních molekul. Ultrazvuková sonda poté detekuje zvuky o vysoké frekvenci způsobené tímto rušením a transformuje je do pásma nižších, slyšitelných frekvencí. Zvuk je vyveden do sluchátek a zároveň je možné na displeji zobrazit intenzita signálu.



Obr. 2.2: Náčrt přenosného zařízení pro měření ultrazvukového rušení

Pracovník pak na základě zkušeností musí dané rušení vyhodnotit, a jelikož je korona svojí frekvencí a intenzitou charakteristická, lze jí většinou rozeznat od rušení jiného původu, např. působení elektrického oblouku či šumem na pozadí. Běžně slyšitelné zvuky jsou navíc přístrojem potlačené a lze tak pracovat i v hlučném prostředí prakticky za jakýchkoliv podmínek. Výhodou je, že pracovník může být od zkoušeného zařízení v bezpečné vzdálenosti. V případě přenosových vedení stačí, když se použije vhodný přijímač, přesně se zaměří

a zařízení poté lze bez problému použít přímo ze země. Přístroj je lehký, snadno přenositelný a přesný. [13,14]

Jak již bylo řečeno, korona je rovněž zdrojem slyšitelného zvuku, ten je při silnějších projevech slyšitelný i pouhým lidským uchem z větší vzdálenosti. Pro detekci menších zdrojů korony je potřeba zvuk řádně zaměřit, dostatečně zesílit a vyfiltrovat veškeré rušivé signály, které mají často mnohem větší intenzitu. Ačkoliv existují rozsáhlejší experimenty s touto metodou, v praxi se zatím používá pouze jako první varianta, čili detekce běžně slyšitelné korony pro zběžnou kontrolu vedení. Nebo se naopak v obydlených oblastech měří jenom úroveň rušení způsobená vedením bez ohledu na detekci místa rušení. [15]

2.3 Infračervené kamery

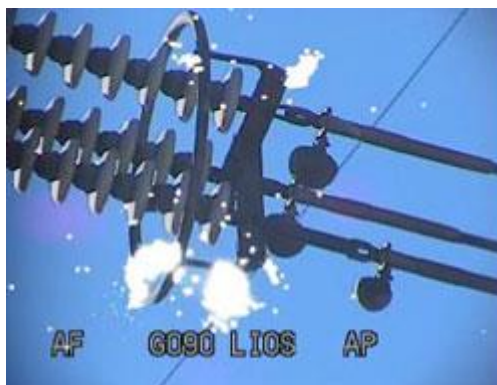
Jsou to zařízení, která měří intenzitu infračerveného záření a tím pádem teplotu. Korona je detekována jako malé záblesky na změřeném obrazu a četnost impulzů může být určena podle počtu záblesků za sekundu. Na přenosových vedeních je možné tuto technologii použít na dálku ze země, ale vzhledem k malému rozlišení kamer je lepší, speciálně pro detekci korony, být ke zkoumanému místu co nejbliže. Nejnovější zařízení dokáží určit i výkon koronových výbojů.

Technologie má ale řadu problémů. Mezi největší patří správné určení emisivity měřených povrchů, eliminace odrazů a celkově správné detekování místa, které skutečně vyzařuje vyšší teplotu a které se tak pouze tváří díky množství nepříznivých vlivů. Pro měření je proto nejlepší porovnávat stejné komponenty na stejném vedení, dodržet stejný úhel, teplotu prostředí, zatížení zkoumaného vedení atd. Výskyt korony by za dodržení stejných podmínek měl být na stejných částech velice podobný. Pokud jsou v nějakém místě výboje silnější nebo častější, lze zde očekávat, že něco není v pořádku. [16]

2.4 Detekce ultrafialového záření

Tato technologie na rozdíl od předchozí využívá detekci ultrafialového záření. Ačkoliv jsou tato zařízení dražší a tím pádem i méně rozšířenější, jsou pro detekci korony mnohem vhodnější. Koronové výboje totiž neprodukují velké množství tepla a infračervená technologie je schopná je detekovat až při větší intenzitě a vždy s obtížemi. Ultrafialová detekce je navíc nazývána jako „Solar blind“, tzn. není ovlivňována solárním zářením, jelikož jeho UV složka

se zachytává z většiny v atmosféře. Koronový výboj naopak ultrafialového záření produkuje velké množství. Příklad záznamu z kamery je na Obr. 2.3. [17,18]



Obr. 2.3: Záznam korony pomocí ultrafialové kamery [19]

2.5 Detekce rádiového rušení

Rádiové rušení způsobené korunou se může v malé míře šířit i na velké vzdálenosti. Zjistit tedy, že někde k rušení dochází, není až tolik problematické, horší je lokalizovat místo poruchy a poté určit, zda se opravdu jedná o koronu. Pro tento účel se nejlépe hodí všesměrové antény, kterými se lokalizuje přibližné místo výskytu korony na vedení a poté směrové antény, kterými se dohledá přesné místo zdroje rušení. Anténa je dále připojena do vyhodnocovacího přístroje. Ten může mít buď podobu jednoduchého měření intenzity signálu pro naladěnou frekvenci, nebo se může jednat o složitější zařízení, které zobrazí celé frekvenční spektrum signálu. V obou případech je většinou nutné porovnat signál s částí vedení, kde ke koruně zaručeně nedochází a správně vyhodnotit změřený výsledek. Případně lze měřit vedení ve vypnutém a zapnutém stavu a výsledky porovnat, to je většinou nepřijatelné.

V každém případě je tato metoda náročná na zkušenosti a přesnost obsluhy a rovněž je zapotřebí, pro přesnou lokalizaci korony, pracovat s rozměrnými anténami. Navíc se rozměry antény zvětšují s potřebnou měřicí vzdáleností, tzn. i s větší napětíovou hladinou vedení při manipulaci ze země. [20]

3 Praktická měření a simulace

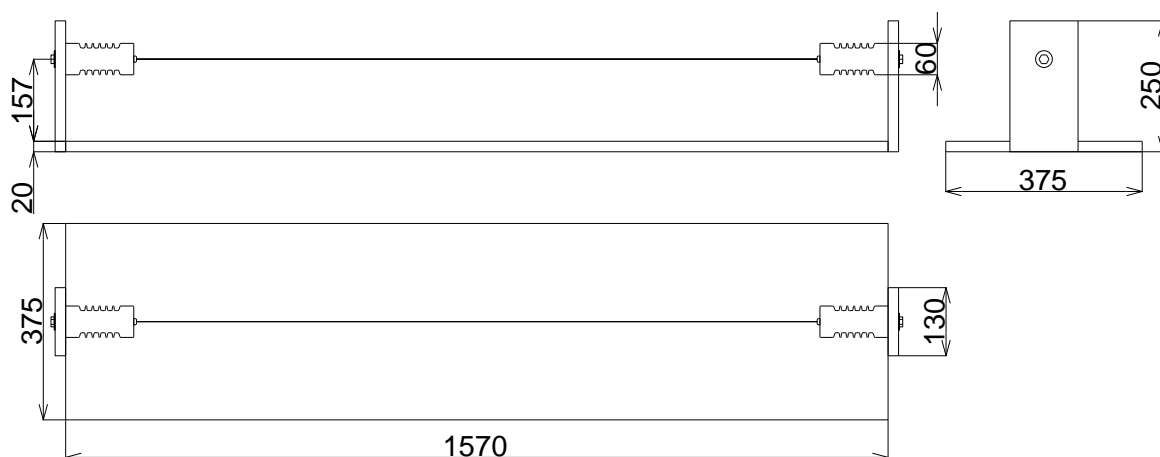
Poznámka: Na střídavém napětí byla vždy při měření sledována efektivní hodnota napětí. Pro práci s korunou a obecně s výboji se však lépe hodí maximální hodnota. U AC je tedy všude uvedená přepočtená maximální hodnota napětí a pro jistotu je vyznačena pomocí jednotek jako kV_{max} . Pokud je někde údaj o efektivní hodnotě, je doplněn jednotkou kV_{eff} . U časových

průběhů pulzů korony je vždy u obrázku uvedená doba čela a doba týlu, tzn. doba zvětšení signálu z hodnoty 10 % na 90 % a naopak. Hodnoty jsou uvedené v poměru doba čela/doba týlu, resp. ve zkrácené podobě Č/T. Fotografie z měření, převážně měřících aparatur a přístrojů jsou v příloze A, B, C.

3.1 Měření modely

3.1.1 Vodič - deska

Jedná se o dřevěnou desku pokrytou měděným plechem. Na obou koncích jsou uchycené dřevěné podpěry s plastovými izolátory. Mezi izolátory je následně napnutý měděný vodič. Konkrétně byl při měření použitý vodič průměru 0,5 a 1,5 mm. Rozměry modelu jsou viditelné na *Obr. 3.1*, fotografie v *příloze A*.

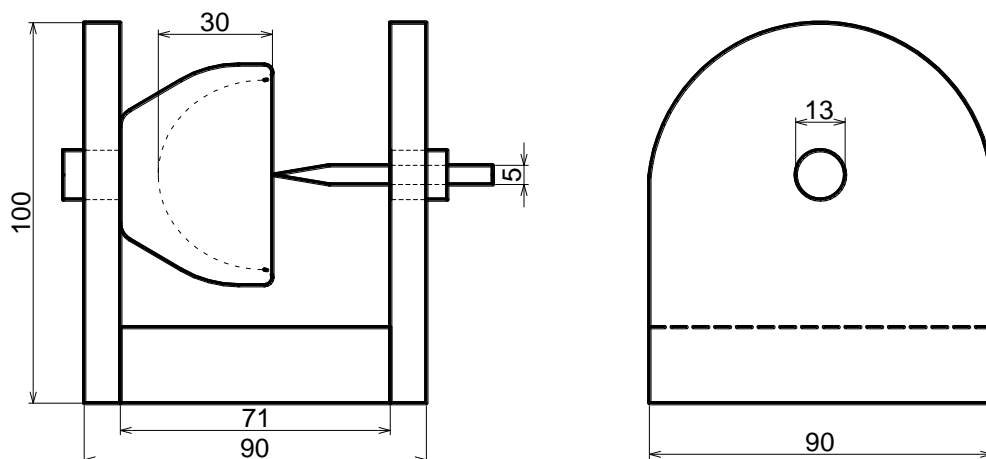


Obr. 3.1: Náčrt a rozměry modelu vodič-deska

Tento model by měl sloužit jako náhrada hladkého reálného vedení pro potřeby laboratorních měření.

3.1.2 Hrot - miska

Jedná se o mosaznou „misku“ naproti které je železná závitová tyčka zbroušená do špičky. S její pomocí lze nastavit libovolnou vzdálenost mezi hrotem a miskou. V této práci byla vždy použita vzdálenost 30 mm. Další rozměry modelu jsou viditelné na *Obr. 3.2*, fotografie v *příloze A*. Tento model dokáže přiblížit chování korony na ostrých hrotech, např. nečistotách na povrchu vodiče a dalších elementech vedení s ostrými hranami (izolátory, závaží proti rozkývání vedení apod.).

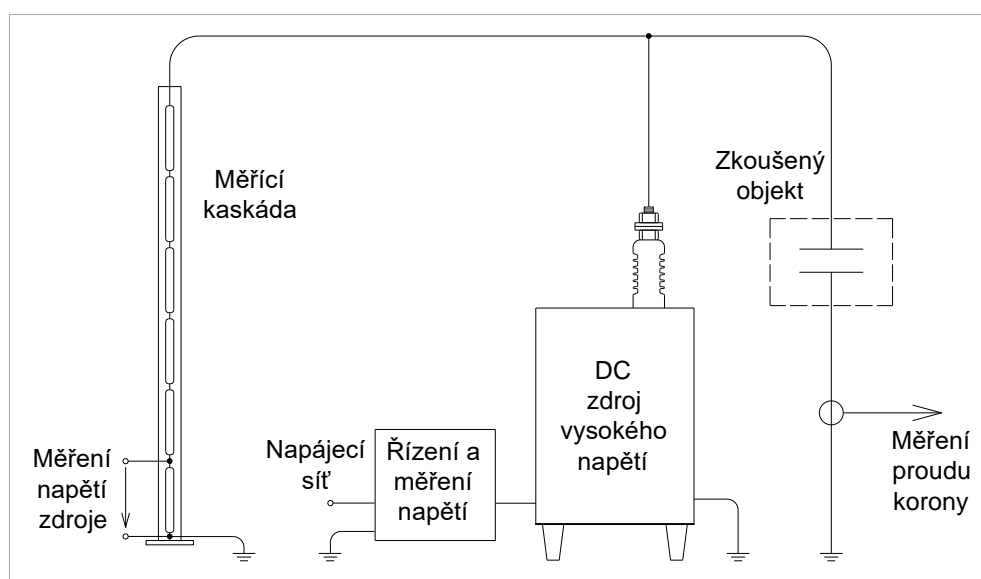


Obr. 3.2: Náčrt a rozměry modelu hrot-miska

3.2 Testovací obvody a metody

3.2.1 Základní měření proudu korunou

Měření probíhalo pouze na stejnosměrném napětí na měřícím modelu vodič-deska a posloužilo pro něj jednoduché měřící uspořádání, kdy se na vodič přivádělo napětí z vysokonapěťového stejnosměrného zdroje schopného dodávat jak kladné, tak záporné napětí. Další část modelu, tzn. deska, byla vhodně uzemněná. Pro měření napětí byla ještě ke zdroji připojená odporová měřící kaskáda s dělicím poměrem 1:1000 doplněná digitálním multimetrem METRA Hit 18S. Obecné schéma zapojení je na Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma aparatury pro základní měření proudu korunou (s DC zdrojem)

3.2.1.1 Počáteční napětí korony

Pro zjištění toho, při jakém napětí vůbec začíná korona vznikat, bylo nutné nejprve změřit počáteční nebo také někdy zvané zápalné napětí korony. Tato zkouška probíhala na obou vodičích a to tak, že uzemnění bylo provedeno přes analogový mikroampérmetr výrobce Metra Blansko a na vodič se přivádělo stejnosměrné napětí jak záporné, tak kladné polarity. Zápalné napětí se určilo tak, že při něm začal růst proud tekoucí z desky do uzemnění. Pro jakékoliv nižší napětí je proud nulový.

3.2.1.2 Závislost proudu korunou na napětí

Toto měření bylo opět provedeno na vodičích obou průměrů a zapojení bylo shodné s měřením počátečního napětí. Jen se měřilo napětí od zápalné hodnoty (proudu cca 1 μA) až do hodnoty napětí, při které byl proud roven cca 100 μA a pro příslušné hodnoty napětí se vždy odečetla i hodnota proudu.

3.2.1.3 Měření s osciloskopem

Měření bylo prováděné na vodiči průměru 0,5 mm, kdy mezi desku a uzemnění byl přidán speciální bezindukční SMD odpor tak, aby na něm vzniklo měřitelné napětí. To bylo zavedeno do osciloskopu typ Wavepro 7300A Od výrobce LeCroy.

I přes spoustu pokusů o zprovoznění tohoto měření, s cílem zobrazit tvar koronového výboje na stejnosměrném napětí, nebyl výsledek použitelný. Problémem bylo velké rušení měření a malá hodnota měřeného napětí, takže nebylo možné koronový impulz v šumu rozeznat, natož ho řádně zobrazit a zpracovat. Nepomohlo ani použití kalibračního impulzu o náboji 100 pF z kalibrátoru typ CAL1A výrobce Power Diagnostics. Měření tedy bylo přerušeno a nepřineslo žádné nové výsledky.

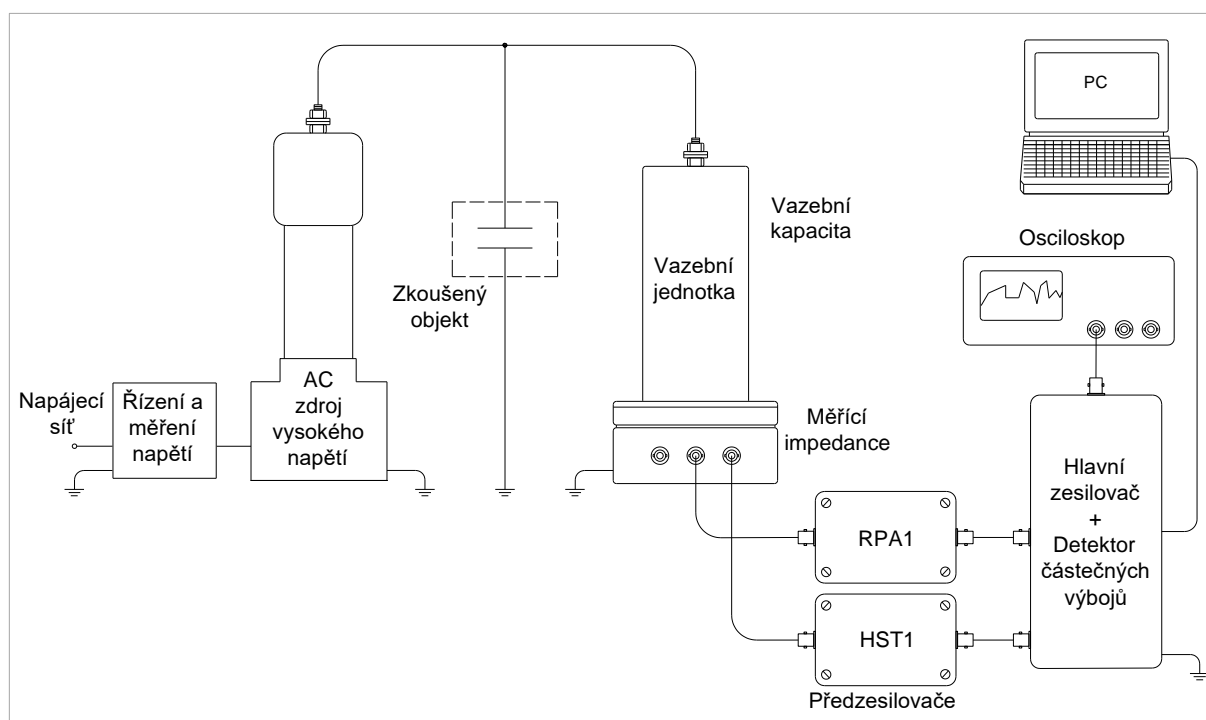
3.2.1.4 Měření na EMC-metru

V tomto případě byl testován pouze vodič průměru 0,5 mm a uzemnění bylo provedené přímo pomocí zemnicího pásku. Na pásek se následně umístila proudová sonda používaná pro měření EMC typ EZ-17 od firmy ROHDE&SCHWARZ (R&S) s měřicím rozsahem 20 Hz až 100 MHz. Ta se připojila do měřicího přístroje určeného rovněž pro měření EMC, typ ESR 7 – EMI TEST RECEIVER opět od výrobce R&S. Tento přístroj však umí zobrazit signál pouze ve frekvenční oblasti, nikoliv v časové. Měření bylo provedené ve frekvenčním

rozsahu 150 kHz až 30 MHz a to pouze pro pozadí (všechny zdroje vypnuté), a poté pro 20, 25, 30, 35, 40 a 45 kV.

3.2.2 Detektor částečných výbojů

Měření probíhalo ve vysokonapěťové laboratoři se střídavým zdrojem vysokého napětí 150 kV efektivních, 10 kVA, se síťovým kmitočtem 50 Hz. Dále byla použita vazební jednotka tvořená v základu sériovou kombinací vazební kapacity a snímací impedance (zajišťuje převod proudu na měřitelné napětí a zároveň odfiltrování kapacitních proudů). Měřený signál byl pomocí koaxiálních kabelů přiveden přes předzesilovače a hlavní zesilovač na digitální měřicí systém pro měření částečných výbojů. Výsledky jsou zobrazované přes sériové USB rozhraní na připojeném počítači. Do obvodu se dále připojil zkoušený objekt, celé zapojení je na *Obr. 3.4*.



Obr. 3.4: Schéma aparatury pro měření částečných výbojů (s AC zdrojem)

Zobrazení četnosti výbojů na PC je v použitém programu ICMsystem pro detektor částečných výbojů (DČV) barevně rozlišeno. Přiřazení barev se řídí následující tabulkou na *Obr. 3.5*, kdy každá barva představuje uvedené rozmezí četností. Velikost výbojů je vyjádřena pomocí velikosti jejich náboje, který je na proudu závislý podle vztahu:

$$Q = \int_0^T i(t) \cdot dt \quad (C) \quad (3.1)$$

Modely byly zapojené tak, že napětí bylo přivedené na hrot, resp. vodič a miska, resp. deska byla uzemněná. DČV posloužil také pro stanovení zapalovacího napětí korony a to tak, že se sledoval moment, kdy se začnou objevovat první výboje. Důležité je také po prvních výbojích počkat a ověřit, zda se nejednalo pouze o překmitý nebo rušení ze zdroje.

0
1 - 2
3 - 4
5 - 8
9 - 16
17 - 32
33 - 64
65 - 128
129 - 256
257 - 512
513 - 1024
1025 - 2048
2049 - 4096
4097 - 8192
8193 - 16384
16385 - 32768
32769 - 65536

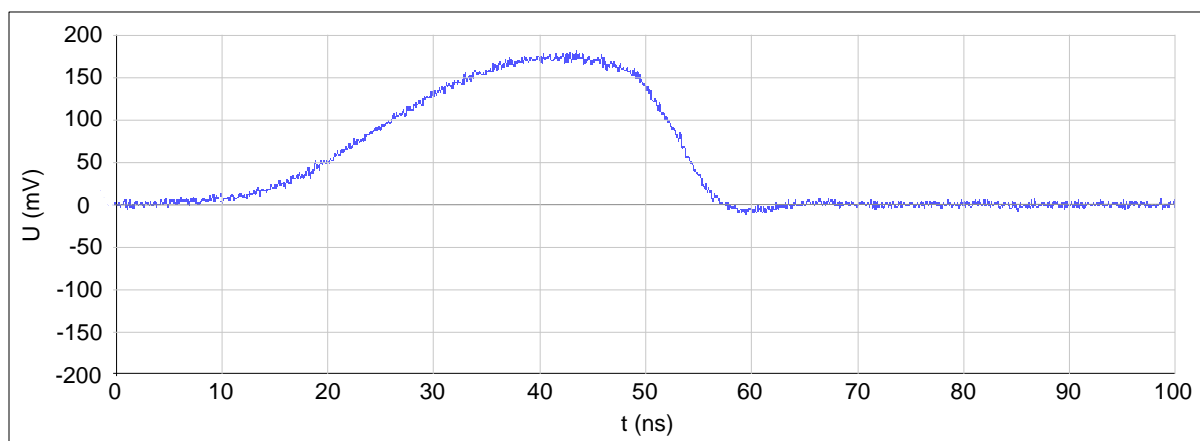
Obr. 3.5: Tabulka pro přiřazení četnosti výbojů k dané barvě na grafech z DČV

3.2.2.1 Zkouška vlivu měřící aparatury na výsledek měření

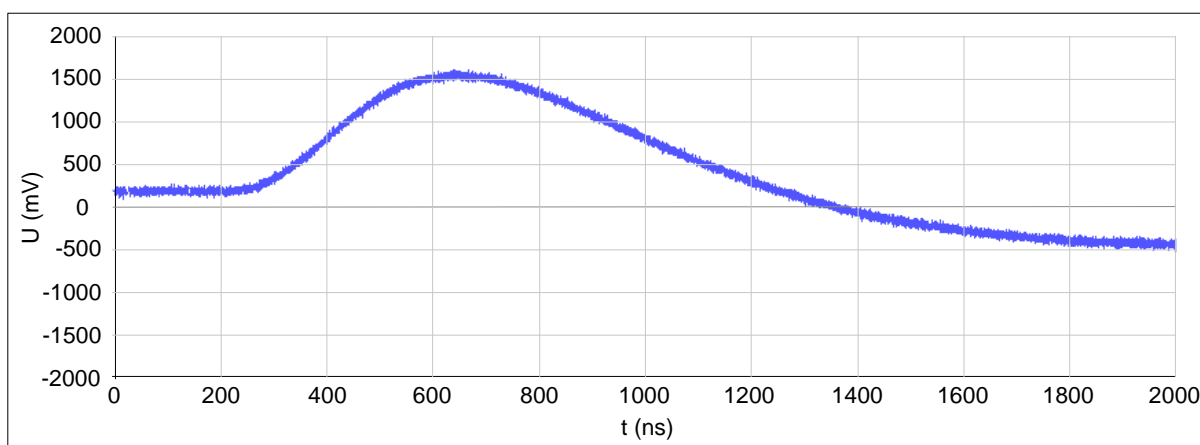
Před započítáním samotného měření bylo vhodné otestovat, jak vypadá průběh signálu přivedeného přímo na osciloskop a jak vypadá stejný signál měřený přes měřící aparaturu, tzn. přes vazební jednotku, předzesilovač a hlavní zesilovač. K tomu posloužil zkušební impulz o náboji 100 pC, který má dostatečnou velikost, přesnou frekvenci a není tak ovlivňovaný rušením. Lze ho tedy bez větších problémů zobrazit přímo na osciloskopu. Vazební jednotka pro tuto zkoušku byla použita stejná jako pro všechna měření na střídavém napětí, tzn. do 150 kV s dělicím poměrem 1:1000.

Z této zkoušky vyplývá, že měřící uspořádání má na výsledek zásadní vliv, především co se tvaru signálu týče. Za prvé dochází k dělení napětí na vazební kapacitě, poté k převodu proudu na napěťový signál, k zesílení signálu a také k přenosu přes signálové vodiče. Na Obr. 3.7 je např. zesílení nastavené na hodnotu 1/40 (tzn. předzesilovač má zesílení 1 a hlavní zesilovač 40) a průběh měřený přes aparaturu je oproti přímému měření zesílený pouze cca 8,8 krát, délka pulzu je cca 22 krát delší a tvar je rovněž značně deformovaný.

Rozdíly mezi signály na *Obr. 3.6 a Obr. 3.7* jsou natolik velké, že nelze s určitostí říct, jestli toto měření přineslo správné výsledky, ale zřejmě ano. Zkreslení se navíc nedá nijak jednoduše eliminovat a zjevně ovlivňuje výsledky v celém měření částečných výbojů na střídavém a pravděpodobně i na stejnosměrném napětí. Je tedy třeba s ním uvažovat. Problém je také s tím, že osciloskop měří a zobrazuje napětí, kdežto primární měřenou veličinou je proud korunou. Vzhledem k výše zmíněným problémům to však už není příliš důležité.



Obr. 3.6: Zkušební impulz 100 pC přivedený přímo na osciloskop ($\check{C}/T = 40/10$ ns)



Obr. 3.7: Zkušební impulz 100 pC měřený přes vazební jednotku a zesilovače DČV ($\check{C}/T = 300/700$ ns)

Alespoň výsledky z DČV by však měly být přesné. Před započítím měření se vždy DČV kalibračním impulzem zkalibroval tak, že se připojil paralelně ke zkoušenému objektu a na detektoru se určil jeho náboj jako referenční. Tím bylo mimo jiné dosaženo toho, že pulzy na vysokonapěťové straně a na detektoru měly stejný náboj.

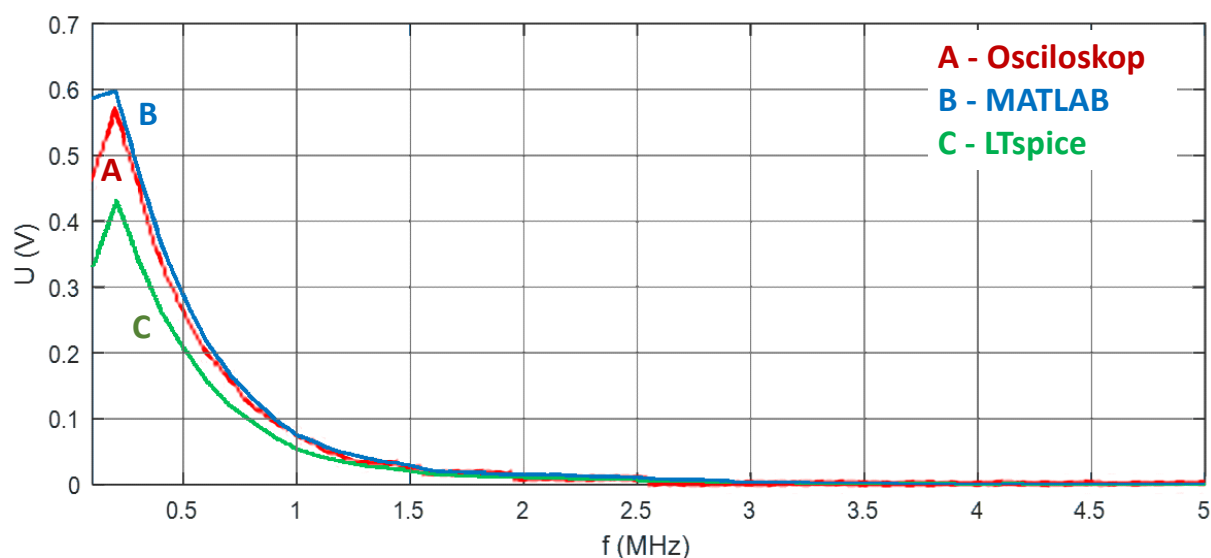
3.2.2.2 Měření na střídavém napětí

Jak již bylo řečeno, při tomto měření se použila vazební jednotka s napěťovým převodem 1:1000. Cílem bylo zobrazit jak průběh a tvar koronového pulzu v kladné i záporné půlplně napětí, tak i četnost výbojů v jednotlivých částech sinusového průběhu napájecího napětí. Při měření byl tedy do obvodu připojený jak DČV, tak osciloskop, jak ukazuje *Obr. 3.4*.

Pro lepší popis impulzů z osciloskopu bylo ještě vykresleno jejich frekvenční spektrum. V první fázi přímo na osciloskopu, potom na namodelovaném signálu v MATLABu a také v LTspice. Výsledky byly pouze zkušebně porovnané pro model vodič-deska s vodičem průměru 0,5 mm a jsou viditelné na *Obr. 3.8*. Porovnání probíhalo na grafech, kde osa y byla ve voltech a to z důvodu, že v této podobě byly i výsledy získané z osciloskopu a lépe se tak vzájemně porovnávaly. Z výsledných průběhů je jasné, že frekvenční spektrum z osciloskopu a z MATLABu se až na úplný začátek téměř neliší. Výsledek z LTspice má potom odlišnou amplitudu, ale průběh je podobný MATLABu. Na základě tohoto zkušebního porovnání budou další grafy ve výsledcích vykreslované už pouze v MATLABu, jelikož se jedná o nejjednodušší metodu. Grafy také budou mít osu y již v dBmV, aby byl lépe čitelný širší rozsah hodnot, výpočet probíhá podle rovnice:

$$L_U = 20 \cdot \log \left(\frac{U_P}{U_{REF}} \right) \quad (dBmV) \quad (3.2)$$

Kde L_U je velikost signálu v dBmV, U_P je skutečná amplituda napětí pulzu a U_{REF} je referenční (vztažná) hodnota, v tomto případě 1 mV.



Obr. 3.8: Porovnání frekvenčního spektra pro uspořádání vodič-deska (vodič \varnothing 0,5 mm) získaného z osciloskopu, MATLABu a LTspice

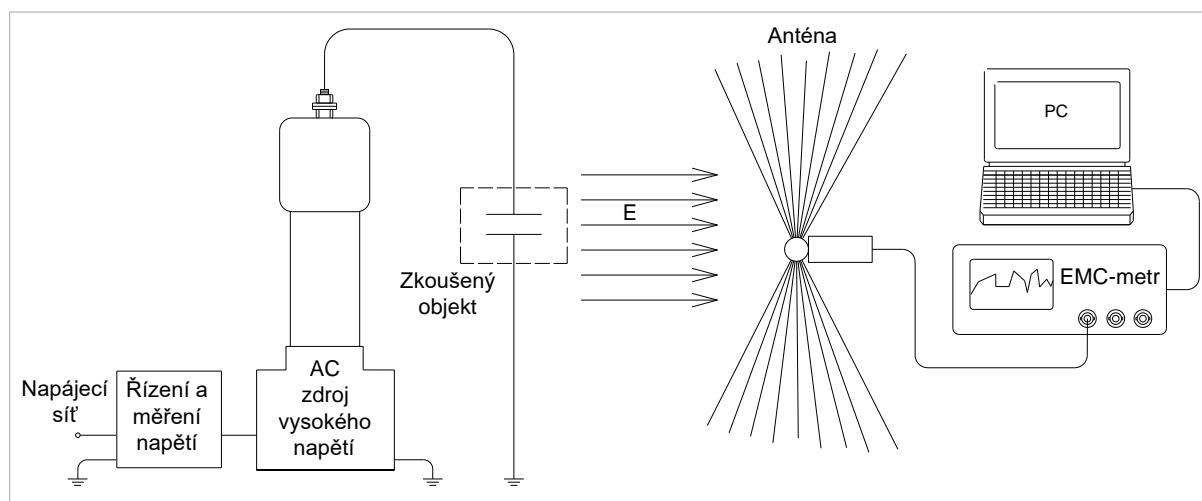
3.2.2.3 Měření na stejnosměrném napětí

Měřicí aparatura byla podobná jako při měření na střídavém napětí. Pouze vazební jednotka byla použita menší, do 25 kV, s vazební kapacitou s dělicím poměrem 1:250 a osciloskop nebyl připojen. Při tomto měření bylo cílem zjistit četnost a náboj impulzů bez ohledu na tvar. Z důvodu nezapojeného osciloskopu nebyl zjišťován ani vliv měřicí aparatury na zkreslení signálu, ale lze očekávat, že by byl podobný jako na střídavém napětí.

Měření bylo opět provedené na obou modelech, jen z důvodu zapalovacího napětí pro vodič 1,5 mm nad maximální hodnotou vazební jednotky, nebyl tento vodič testován.

3.2.3 Měření anténou

Při tomto měření byl použit pouze model vodič-deska, kdy na vodič bylo přiváděné střídavé napětí, a deska byla uzemněná. Ve vzdálenosti 2 m od vodiče byla umístěná bikónická anténa v horizontální poloze od výrobce PMM, typ BC-01 s frekvenčním rozsahem 30 až 200 MHz. Ta byla koaxiálním kabelem spojena s již dříve použitým EMC metrem a výstup byl opět zobrazován na připojeném počítači. Zapojení měřicí aparatury je na *Obr. 3.9*. Výstupem bylo frekvenční spektrum koronových pulzů v měřícím rozsahu antény. Jak bylo uvedeno v teoretické části – korona způsobuje i rádiové rušení, čili rušení šířící se prostorem.



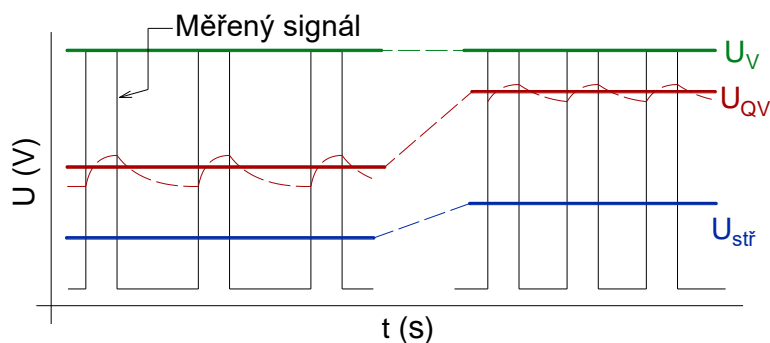
Obr. 3.9: Schéma aparatury pro měření anténou (s AC zdrojem)

Měření nebylo prováděné v odstíněné ani bezodrazové místnosti, takže výsledek je zatížen šumem a rušením pomocí rádiových signálů, které se vyskytují právě v rozsahu cca 30 MHz až 300 MHz a nejvíce v FM pásmu 87 až 108 MHz. Rušení rovněž ovlivňuje výsledek nejvíce

při vyšších frekvencích – nad 90 Mhz, v tomto pásmu už výsledný signál není jednoznačný a mírně se měnil při každém měření. Na druhou stranu tento způsob měření odpovídá reálným podmínkám při měření v terénu na přenosovém vedení.

Měření byly úrovně napětí 5; 10; 12,7 (zapalovací napětí); 15; 20; 25; 30 a 35 kV_{eff}. To odpovídá hodnotám 7; 14,1; 17,96 (zapalovací napětí); 21,2; 28,3; 35,4; 42,4 a 49,5 kV_{max}. Hlavním rozdílem oproti všem předchozím měřením je fakt, že se neměří velikost proudu korony ani náboj, ale intenzita elektrického pole způsobená korunou.

Měření dále probíhalo ve dvou režimech. V prvním je měřena vrcholová hodnota (U_V) průběhu, tzn. plné nabití kapacity v měřicím obvodu. Ve druhém se měří tzv. kvazivrcholová hodnota (U_{QV}), která mimo velikosti impulzů respektuje i jejich četnost. Pro každou frekvenci se měří po delší dobu, kdy v měřicím obvodu dochází vždy k nabití kondenzátoru a poté k jeho vybíjení přes odpor. Je-li četnost pulzů větší, nestačí se kapacita vybíjet a kvazivrcholová hodnota je tak větší a naopak. Toto měření je časově poměrně náročné, ale výsledek může posloužit k lepší představě o chování signálu. Rozdíl mezi oběma hodnotami je na *Obr. 3.10*.



Obr. 3.10: Rozdíl mezi vrcholovou, kvazivrcholovou a střední hodnotou signálu

3.3 Simulace

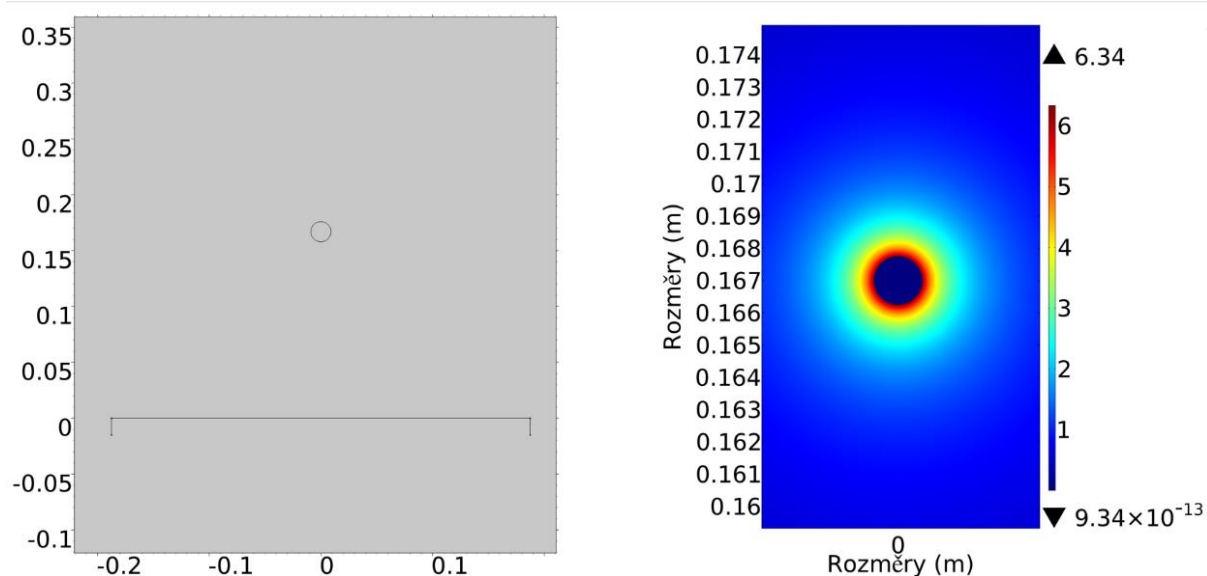
Jedním z cílů práce byla také simulace výbojů na přenosových vedeních. Účelem simulace bylo hlavně získání potřebných výsledků, které by se následně dali použít pro porovnání s naměřenými či vypočtenými hodnotami a které by lépe přiblížili chování koronových výbojů. Pro tento účel se jako nejlepší volba jevil výpočet intenzity elektrického pole. Podle ní lze zcela přesně určit, kde k výboji dojde a pokud je známá elektrická pevnost vzduchu v místě vedení, tak lze poměrně přesně určit i zda vůbec k výboji dojde.

Spolehlivou náhradu vedení tvoří model vodič-deska, případně i v kombinaci s modelem hrot-miska. Pro simulaci byl použit výkonný simulační program COMSOL Multiphysics ve verzi 5.2. Konkrétně „AC/DC“ modul pro řešení elektrostatického pole. Práce s programem je velice snadná. Potřebné rovnice jsou již implementované a je třeba pouze nakreslit geometrii a určit počáteční a okrajové podmínky.

Okrajové podmínky jsou nulový náboj na okraji řešené oblasti, dále zadaná hodnota napětí na všech částech pod napětím a nulová hodnota napětí na uzemněných částech. Jako počáteční podmínka byl zvolen nulový potenciál v celé řešené oblasti.

3.3.1 Model vodič-deska

Pro simulaci posloužilo jednoduché 2D uspořádání (*Obr. 3.11 vlevo*) s rozměry reálného modelu. Na *Obr. 3.11 vpravo* je viditelné výsledné rozložení pole v těsném okolí vodiče o průměru 0,5 mm. Podle předpokladů je největší intenzita těsně na povrchu vodiče a právě zde je nejpravděpodobnější vznik výboje.



Obr. 3.11: Nákres modelu vodič-deska a výsledné rozložení intenzity pole v COMSOL

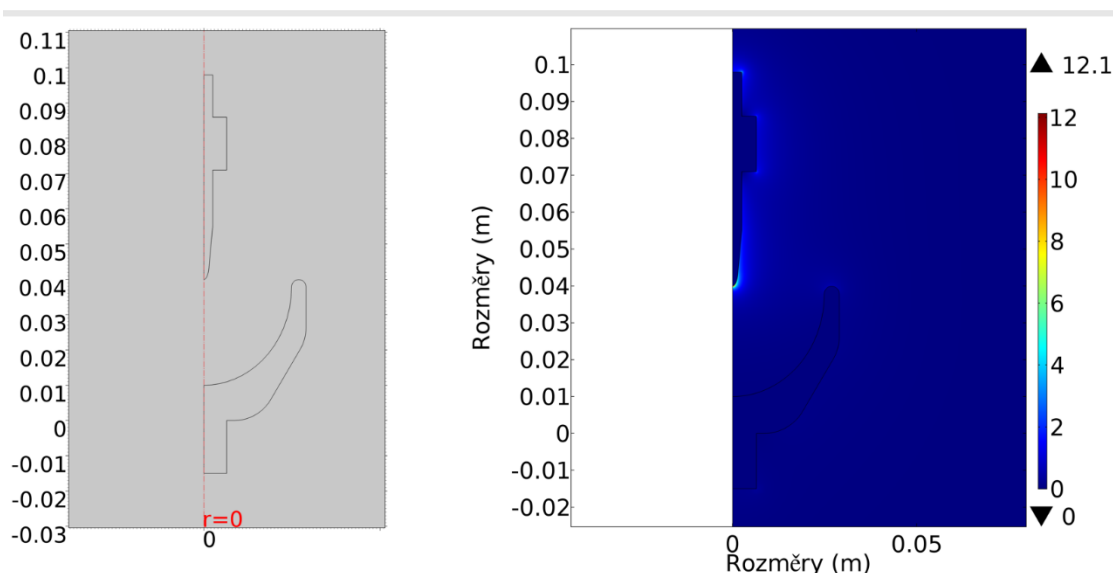
Pro následné ověření výsledků simulace bylo nutné spočítat hodnoty elektrického pole také teoretickým výpočtem. Pro model vodič deska existuje jednoduchý a poměrně přesně odpovídající vztah pro intenzitu odvozený z Maxwellových rovnic a určený s použitím metody zrcadlení. Vztah má podobu:

$$E = \frac{U_V}{r_{sp} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h - r_v}{r_v}\right)} \quad \left(\frac{V}{m}\right) \quad (3.3)$$

Kde r_{sp} je libovolná vzdálenost mezi vodičem a deskou, kde chceme určit velikost pole, h je vzdálenost mezi deskou a středem vodiče, r_v je poloměr vodiče a U_V maximální (vrcholová) hodnota napětí na vodiči.

3.3.2 Model hrot-miska

Pro simulaci opět posloužilo 2D uspořádání, tentokrát osově symetrické. U tohoto modelu je největší problém hlavně se stanovením poloměru hrotu, jelikož ten nikdy není ve formě ideální špičky, ale je vždy mírně zaoblený. Model byl proto co nejvěrohodněji nakreslen a hlavně u modelování hrotu byl kladen důraz na dodržení poloměru špičky 0,2 mm, jelikož takto byl přibližně amatérsky změřený pomocí posuvného měřítka na reálném modelu. Nákres modelu je na *Obr. 3.12 vlevo* a celkové rozložení pole okolo modelu je na *Obr. 3.12 vpravo*.



Obr. 3.12: Nákres modelu hrot-miska a výsledné rozložení intenzity pole v COMSOL

U tohoto uspořádání již stanovení intenzity elektrického pole teoretickým výpočtem není tak triviální. Za prvé je problém s geometrickým uspořádáním a hlavně se stanovením poloměru hrotu. Jako nejlepší náhrada, pro zkoumaný prostor mezi hrotem a miskou, se nakonec ukázalo základní koaxiální uspořádání, pro které lze odvodit jednoduchou rovnici ve tvaru:

$$E = \frac{U_V}{r_{sp} \cdot \ln\left(\frac{h}{r_v}\right)} \quad \left(\frac{V}{m}\right) \quad (3.4)$$

Kde za poloměr r_v (tzn. poloměr zakřivení hrotu) byla zvolena velikost 0,2 mm a za výšku h (tzn. vzdálenost misky a hrotu) velikost 30 mm.

4 Výsledky

4.1 Korona při stejnosměrném napětí

4.1.1 Zapalovací napětí, intenzita pole

Výsledné hodnoty z měření mikroampérmetrem a z měření na DČV jsou viditelné v *Tab. 4.1 a Tab. 4.2* společně s nejdůležitějšími simulovanými a vypočtenými hodnotami intenzity elektrického pole, tzn. hodnotami maximální intenzity na povrchu vodiče právě pro uvedená zapalovací napětí.

Tab. 4.1: Zapalovací DC napětí a intenzity pole z měření mikroampérmetrem

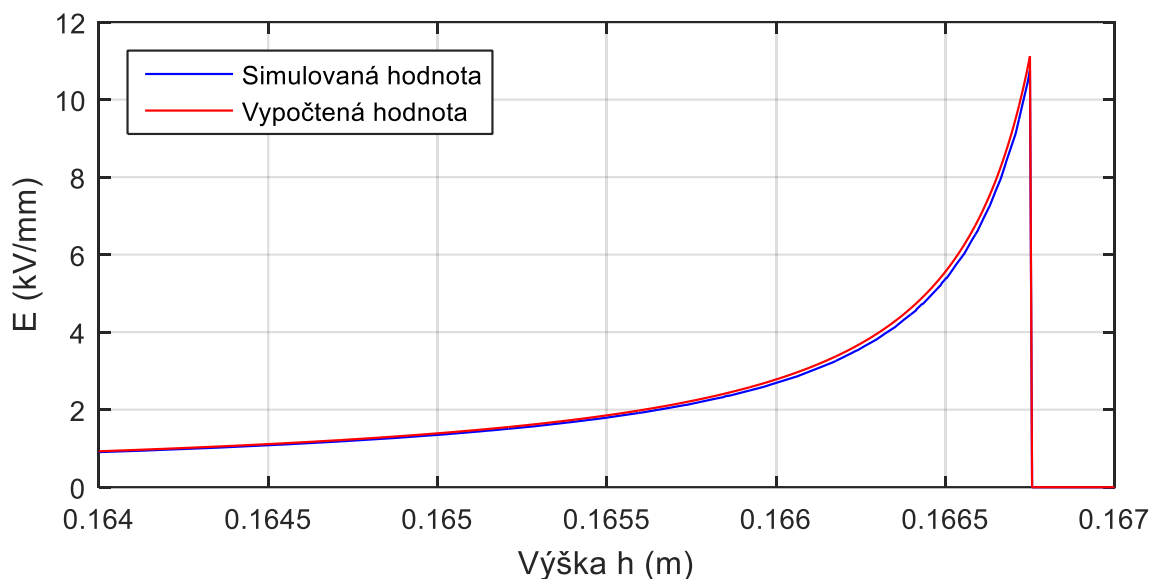
Model	Polarita napětí	Zapalovací napětí (kV)	E_{\max} simulovaná (kV/mm)	E_{\max} vypočtená (kV/mm)
Vodič-deska Ø 0,5 mm	Záporná	19,45	10,44	10,81
	Kladná	21,0	11,27	11,67
Vodič-deska Ø 1,5 mm	Záporná	28,6	6,04	6,25
	Kladná	30,4	6,42	6,65
Hrot-miska	Záporná	neměřeno	-	-
	Kladná	neměřeno	-	-

Tab. 4.2: Zapalovací DC napětí a intenzity pole z měření na DČV

Model	Polarita napětí	Zapalovací napětí (kV)	E_{\max} simulovaná (kV/mm)	E_{\max} vypočtená (kV/mm)
Vodič-deska Ø 0,5 mm	Záporná	19,5	10,47	10,84
	Kladná	20,5	11,00	11,39
Vodič-deska Ø 1,5 mm	Záporná	neměřeno	-	-
	Kladná	neměřeno	-	-
Hrot-miska	Záporná	8,5	7,93	8,48
	Kladná	13,4	12,51	13,37

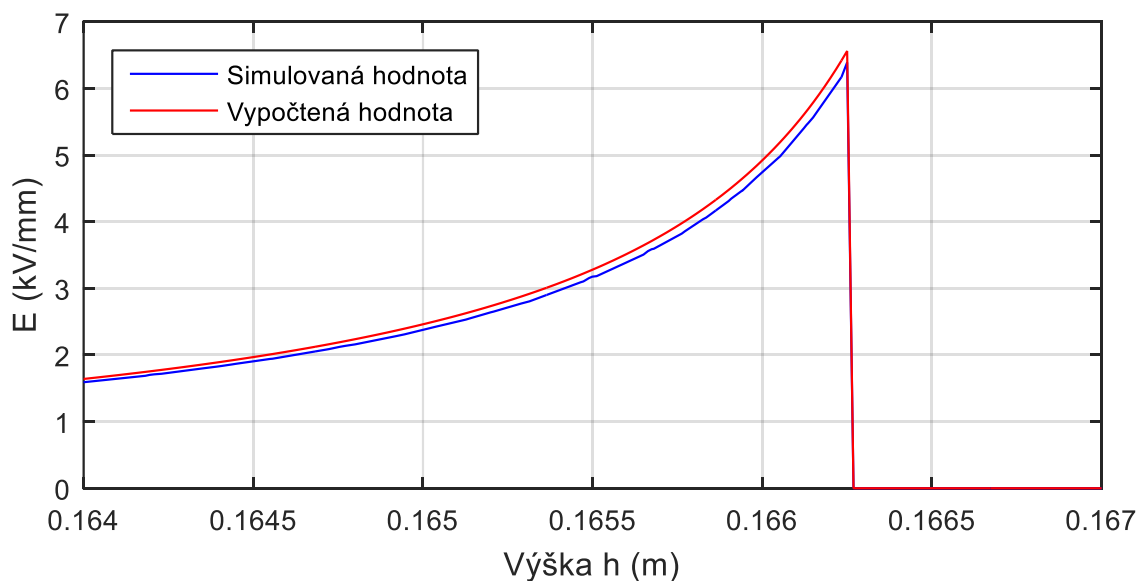
Porovnání zapalovacích napětí při měření s mikroampérmetrem i na DČV ukazuje, že hodnoty se příliš neliší a určené zapalovací napětí je tak poměrně přesné. Obě měřicí metody však byly současně použité pouze u vodiče průměru 0,5 mm.

Na *Obr. 4.1 a Obr. 4.2* jsou dále viditelné celé průběhy simulované i vypočtené intenzity pole pro vodič průměru 0,5 mm (napětí 20 kV) a 1,5 mm (napětí 30 kV). Na ose „x“ jsou rozměry modelu (výška h) na úsečce kolmé k uzemnění procházející středem vodiče, kdy hodnota „0 m“ je úroveň uzemnění a hodnota „0,167 m“ je střed vodiče, tak jak je viditelné rovněž z *Obr. 3.11 vlevo*.



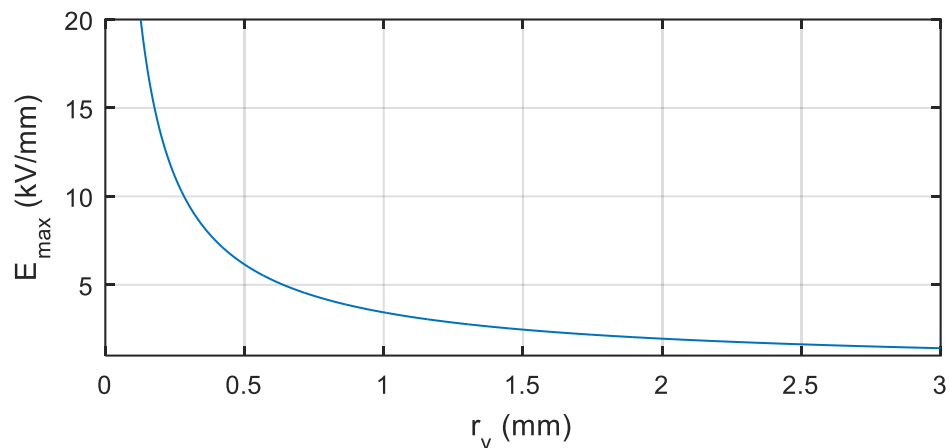
Obr. 4.1: Porovnání rozložení intenzity pole mezi vodičem a deskou získané teoretickým výpočtem a simulací pro vodič \varnothing 0,5 mm při 20 kV

Při porovnání výsledku výpočtu a simulace je vidět, že se hodnoty příliš neliší a obě metody jsou tak poměrně přesné. Rozdíl je dán tím, že teoretický vztah uvažuje nekonečné rozměry země (desky), kdežto v simulaci je použitý rozměr desky reálného modelu.



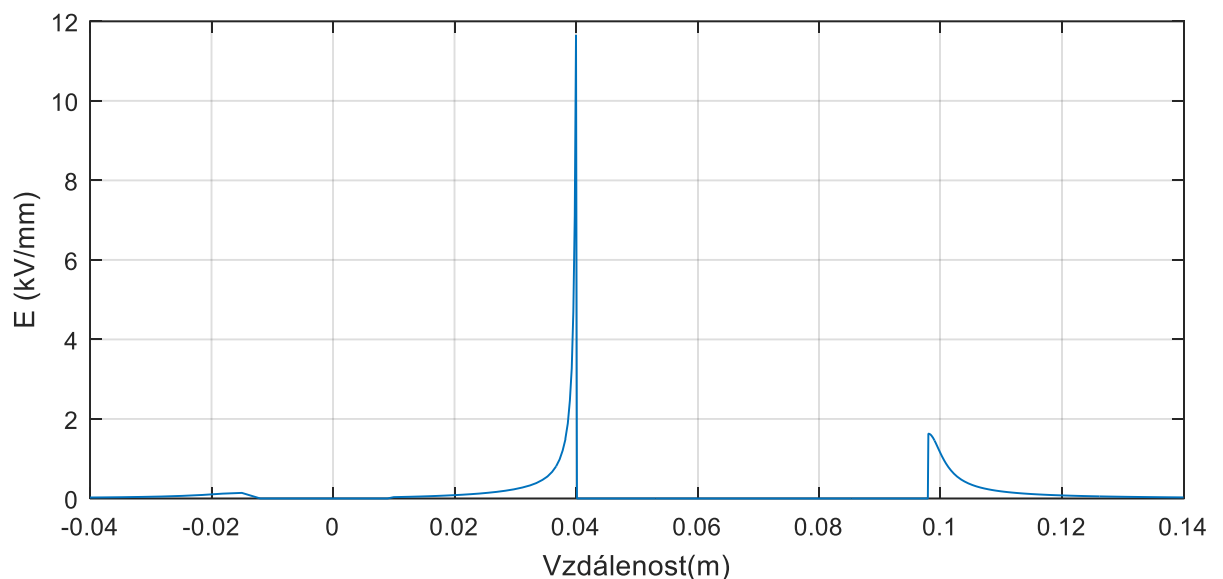
Obr. 4.2: Porovnání rozložení intenzity pole mezi vodičem a deskou získané teoretickým výpočtem a simulací pro vodič \varnothing 1,5 mm při 30 kV

Pro lepší představu byla ještě podle teoretického vztahu pro model vodič-miska vykreslena závislost maximální intenzity elektrického pole na poloměru vodiče. Je na Obr. 4.3 a ukazuje, že čím menší je poloměr vodiče, tím strměji stoupá intenzita a s ní i výskyt korony.



Obr. 4.3: Závislost maximální intenzity pole na poloměru vodiče pro model vodič-deska získaná výpočtem

Simulovaná hodnota celkového průběhu intenzity elektrického pole na modelu hrot-miska v závislosti na poloze na ose y je na Obr. 4.4. Uvnitř materiálu misky (-0,01 až 0,01 m) a hrotu (0,04 až 0,097 m) je intenzita nulová, největší je na špičce hrotu (0,04 m) a poměrně vysoká hodnota je také na „tupé“ části hrotu směřující pryč od misky (0,097 m).

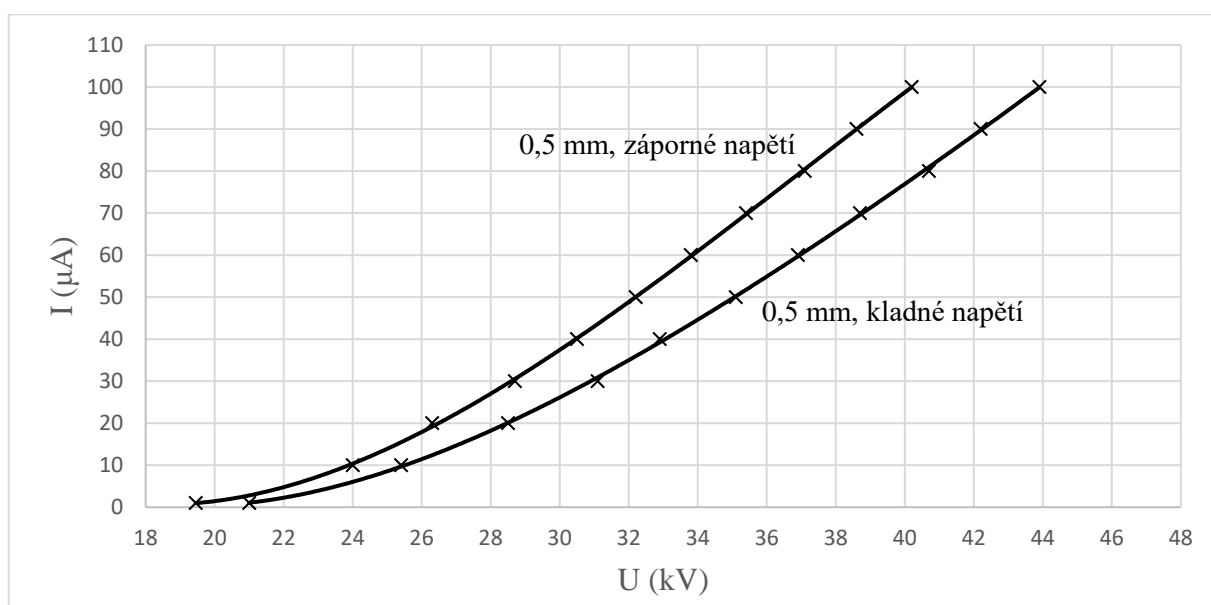


Obr. 4.4: Závislost intenzity pole na poloze na ose y pro model hrot-miska získaná simulací

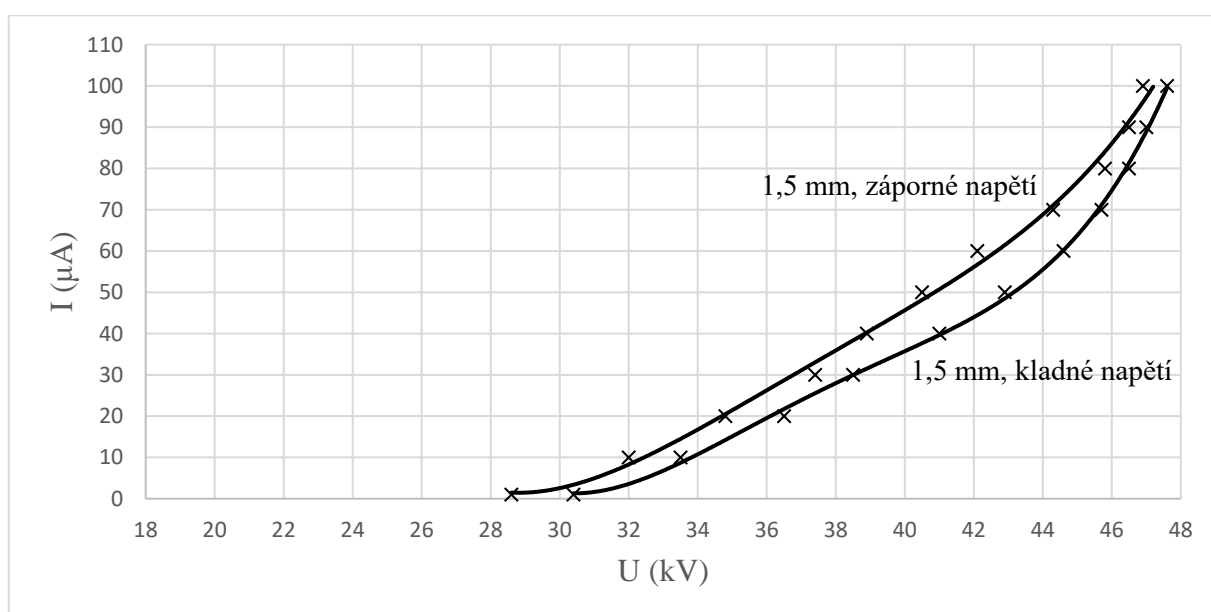
Porovnání hodnot je zde nejvýhodnější provést pouze pro maximální hodnoty intenzity pole na povrchu hrotu, jelikož teoretický vztah popisuje pouze část modelu, nejpřesněji právě na hrotu. Výsledky jsou v tabulce Tab. 4.2 pro zápalné napětí korony na hrotu při kladné a záporné polaritě. Je vidět, že hodnoty simulace i výpočtu jsou téměř shodné, ale vypočtená hodnota opět není úplně přesná, kvůli použití zjednodušeného vztahu. Pro ověření správnosti simulace jsou však výsledky všech výpočtů dostatečné.

4.1.2 Závislost proudu korunou na napětí, ztráty

Velikost proudu korony je také jedním z důležitých parametrů, jelikož nepřímo ukazuje i velikost ztrát korunou. Jak je vidět z *Obr. 4.5* i *Obr. 4.6*, proud v závislosti na napětí se nemění lineárně. Také je rozdíl mezi velikostí proudu při kladné a záporné polaritě napětí. Z měření na vodiči průměru 0,5 mm by se mohlo zdát, že čím větší napětí, tím větší jsou rozdíly ve velikosti proudu mezi oběma polaritami napětí. Tento fakt však vyvrací měření na vodiči většího průměru. Po celou dobu měření také platí, že tenký vodič má na stejném napětí větší proud než vodič silnější. Je to dáno větším zakřivením, kdy vzniká větší intenzita pole a tedy i silnější korona.



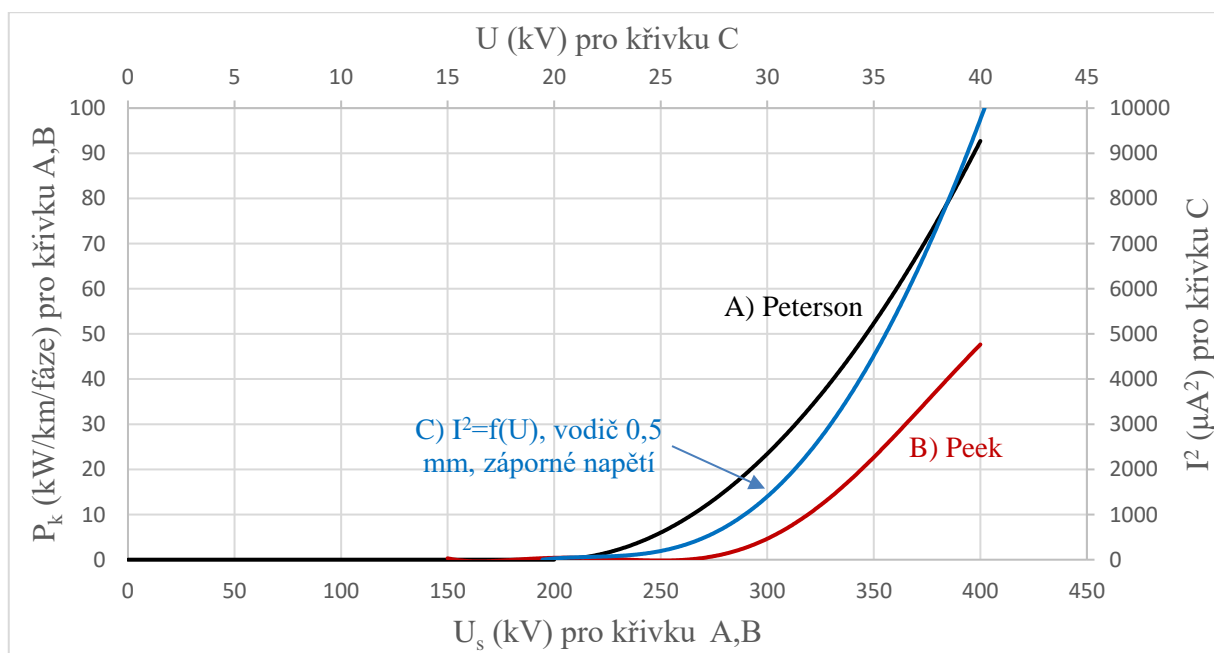
Obr. 4.5: Závislost proudu korunou na napětí pro model vodič-deska s vodičem \varnothing 0,5 mm



Obr. 4.6: Závislost proudu korunou na napětí pro model vodič-deska s vodičem \varnothing 1,5 mm

Zajímavý je také rozdíl v napětích mezi vodiči různých průměrů. Ačkoliv odchylka zapalovacích napětí při proudu $1 \mu\text{A}$ je mezi vodičem průměru 0,5 a 1,5 mm stejných polarit necelých 10 kV, při dosažení proudu $100 \mu\text{A}$ je odchylka napětí menší, u kladné polarity dokonce pouze méně než 4 kV.

Na základě teoretických vztahů pro ztráty korunou na AC přenosových vedeních, tzn. Peekova a Petersonova vztahu byly experimentálně vypočtené velikosti ztrát. Jedná se sice o záležitost střídavých vedení, nicméně se do této kapitoly hodí, jak bude řečeno dále. Pro ukázkou posloužilo jednoduché vedení 220 kV, 50 Hz tvořené nesvazkovými vodiči průřezu 350 mm^2 , tzn. s poloměrem 10,55 mm, vzdáleností lan 8 m. Výpočet byl proveden za atmosférického tlaku 100 kPa, teploty 20°C pro pěkné počasí. Jako velikost elektrické pevnosti vzduchu byla uvažována hodnota 3 kV/mm.



Obr. 4.7: Porovnání závislosti ztrát na AC napětí vypočtených podle Peeka a Petersona pro vedení 220 kV se závislostí druhé mocniny proudu korunou na DC napětí získaných měřením pro vodič $\varnothing 0,5 \text{ mm}$

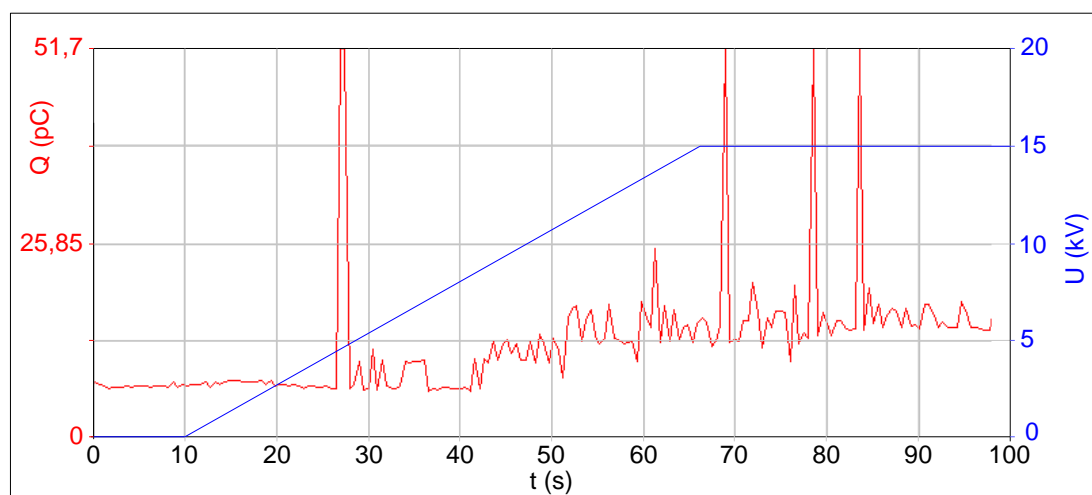
Výsledné průběhy ztrát v závislosti na napětí jsou na Obr. 4.7. Tento graf byl také použit ke srovnání vypočtených ztrát se změřeným proudem korony na druhou, kdy tato hodnota je také úměrná ztrátám. Bohužel proud byl měřený pouze na DC a vzorce pro ztráty platí pouze pro AC, navíc jsou použitelné až od větších rozměrů, než měl měřený model. Pro srovnání byl vybrán proud měřený na vodiči průměru 0,5 mm při záporné polaritě, jelikož korona při záporné polaritě vzniká dříve a je porovnatelnější s AC. I tak se dají křivky pořádně porovnat pouze podle jejich průběhu, který ukazuje velmi dobrou shodu mezi měřením a Petersonovým

i Peekovým vztahem. Pokud jde o porovnání ztrát mezi Peekem a Petersonem, jsou rozdíly na jednom kilometru vedení obrovské. Na vedení o délce 100 km by šlo už o poměrně velkou chybu. Zatím také nelze přesně určit, který vztah se lépe blíží skutečnosti

4.1.3 Četnost výbojů, frekvenční spektrum

4.1.3.1 Hrot-miska

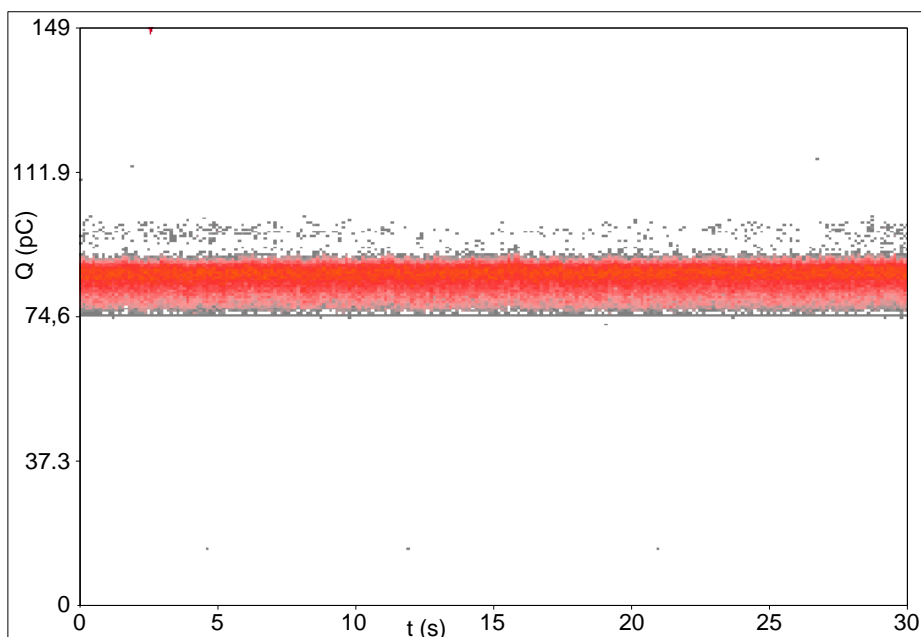
Obr. 4.8 ukazuje časový průběh při lineárním najíždění napětí z nulové hodnoty přes kladné zapalovací napětí (13,4 kV) až na 15 kV na modelu hrot-miska se zobrazením velikosti náboje. Je vidět jeden výrazný pulz ještě před dosažením zapalovacího napětí (způsobený zřejmě náhodným jevem někde na měřící aparatuře), potom nárůst náboje (na cca 15 pC) daný rušením zdroje a nakonec se po překročení zapalovacího napětí začnou objevovat stále koronové impulzy s velkým nábojem.



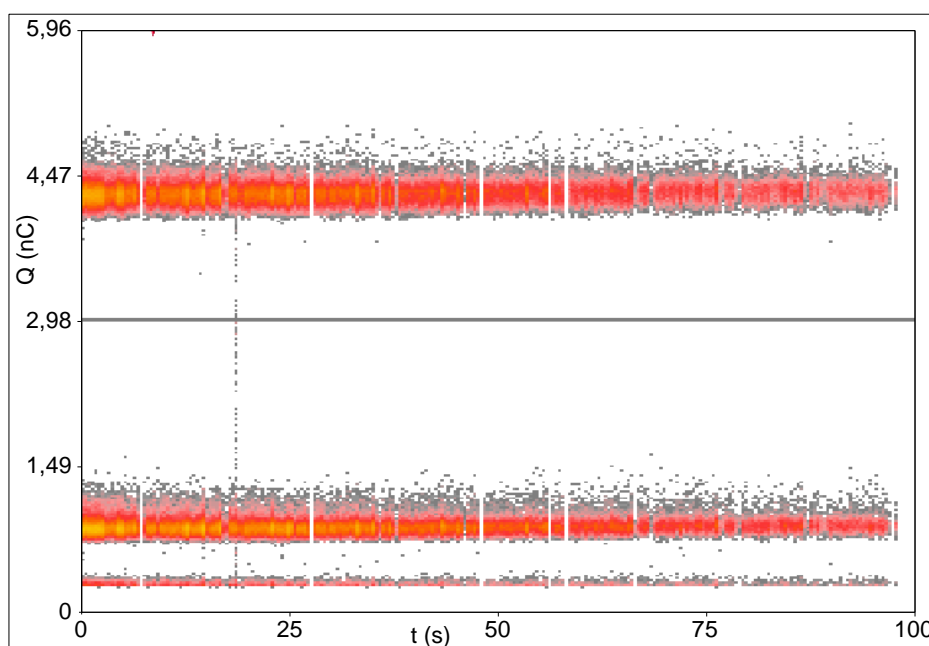
Obr. 4.8: Najíždění napětí z 0 na 15 kV a sledování velikosti náboje a výskytu pulzů pro kladné napětí na modelu hrot-miska

Na Obr. 4.9 je rozložení výbojů při záporné polaritě zapalovacího napětí na hrotu. Korona je po celou dobu měření (30 s) stálá a výboje tak mají stálou četnost i náboj. Po zvýšení napětí na 10 kV četnost výbojů několikanásobně narostla a při měření došlo dokonce k přehlcení programu. Rozložení výbojů i jejich náboj však zůstal podobný.

Obr. 4.10 zobrazuje podobnou situaci, pouze při kladném zapalovacím napětí na hrotu. Měření nyní trvalo 100 s a je vidět, že v tomto případě korona ztrácela svoji intenzitu a počet výbojů se tak časem snižoval. Nicméně i zde je vidět, že výboje se drží stále ve stejném rozmezí náboje. Velikost náboje je ale podstatně větší než u záporné polarity. To bude také zřejmě důvod k většímu rádiovému rušení popsanému v kapitole 1.5.



Obr. 4.9: Záznam z DČV pro model hrot-miska při záporném zapalovacím napětí 8,5 kV



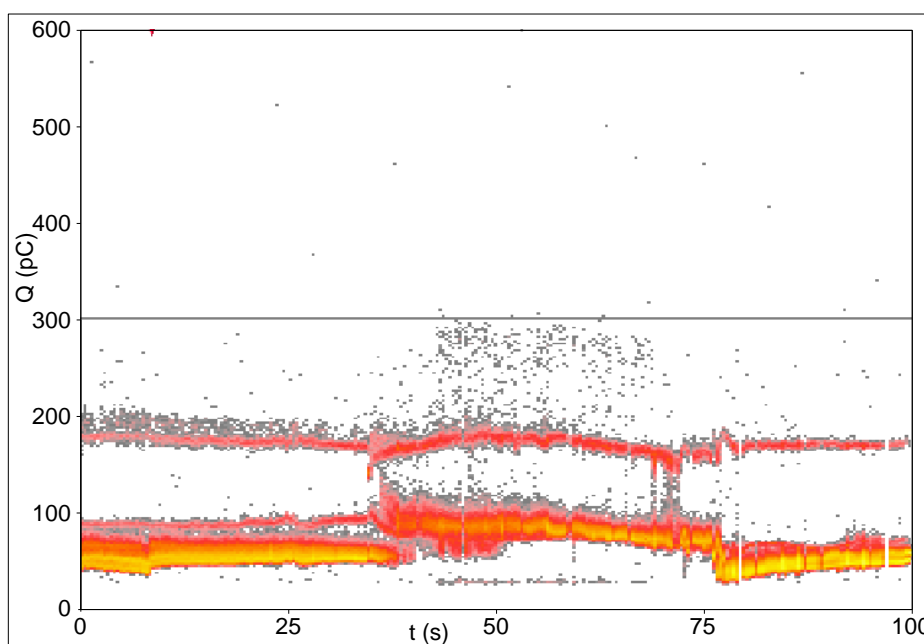
Obr. 4.10: Záznam z DČV pro model hrot-miska při kladném zapalovacím napětí 13,4 kV

Na diagramu jsou také viditelné tři úrovně výbojů. Lze se pouze domnívat, že nejnižší úroveň s nábojem cca 300 pC jsou překmity zdroje, případně zákmity větších pulzů. Další dvě úrovně zřejmě budou pulzy s kladným a záporným nábojem tak, jak to bylo pozorované v půlvlnách při střídavém napájení (obrázky nebyly zaznamenány). Zde však není rozlišena kladná a záporná polarita náboje a všechny impulzy se tak zobrazují v kladné části, různá velikost náboje zůstává. S ohledem na chování u střídavého napětí by odpovídalo, že hladina menšího náboje (cca 1 nC) budou výboje se záporným nábojem a nejvyšší hladina (cca 4,4 nC)

budou výboje s kladným nábojem. Nicméně toto je jisté v záporné půlplně, v kladné půlplně (která by měla odpovídat zde použitému kladnému DC napětí) toto chování nebylo ověřeno.

4.1.3.2 Vodič-deska

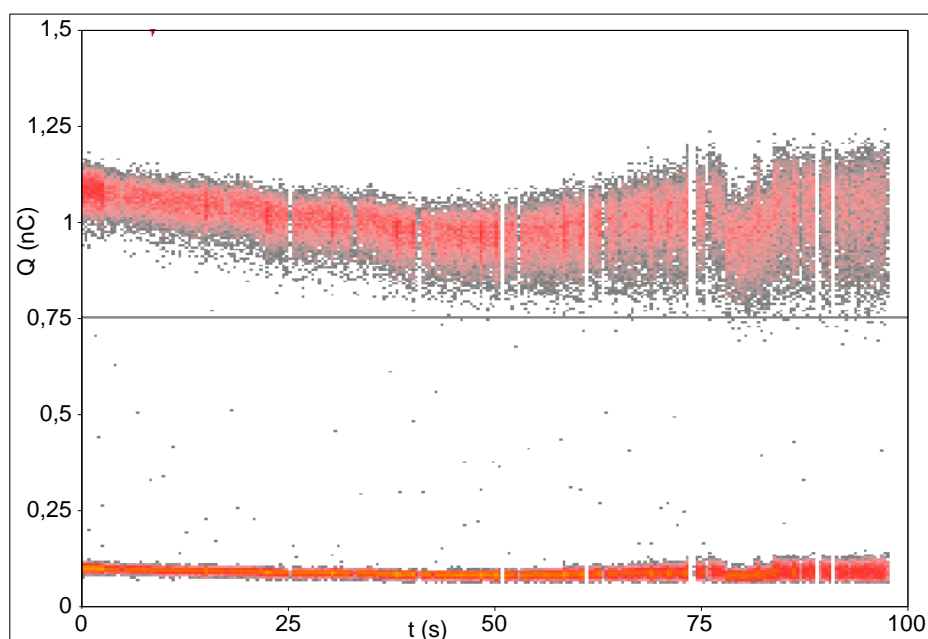
Jak již bylo zmíněno, všechny výsledky jsou zde pouze pro vodič průměru 0,5 mm. Situace s promítáním obou polarit nábojů do kladné části je zde zřejmě obdobná jako u modelu hrot- miska, nicméně zde byla přítomnost náboje obou polarit ověřená v záporné i kladné půlplně střídavého napájení. *Obr. 4.11* při zapalovacím napětí záporné polarity by tak mohl být jednoduše popsán, jelikož obsahuje 2 rozeznatelné hladiny náboje. Problém je zde s četností výbojů, kdy záporná půlplna střídavého napětí měla četnější kladné impulzy s vyšším nábojem (obrázky nejsou v práci přiložené), zde jsou četnější výboje s menším nábojem. Opět tak nelze určit, která hladina náboje je ve skutečnosti kladná a která záporná. Případně může být hladina nižšího náboje způsobena pouze zákmity pulzů s vyšším nábojem.



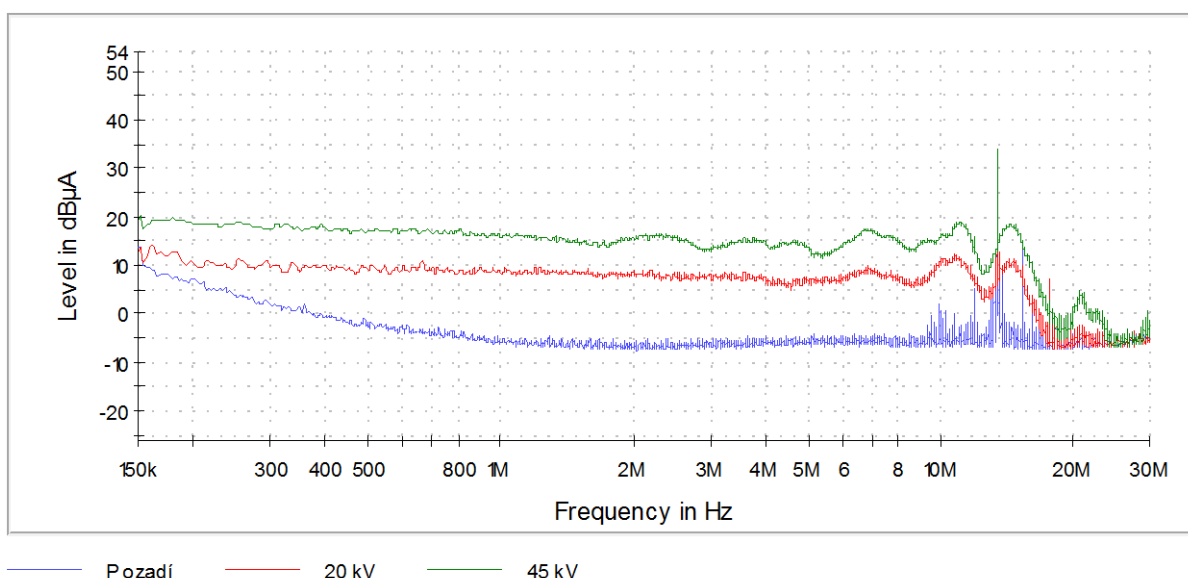
Obr. 4.11: Záznam z DČV pro model vodič-deska, vodič \varnothing 0,5 mm při záporném zapalovacím napětí 19,5 kV

Diagram na *Obr. 4.12* pro kladné zapalovací napětí by již měl být jasnější. Jak bylo ukázáno u modelu hrot- miska, napájecí zdroj při kladném napětí způsobuje výkmity o malé velikosti, to bude zřejmě hladina náboje na úrovni cca 100 pC. Hladina náboje na úrovni cca 1 nC potom budou koronové výboje se záporným nábojem, jelikož kladné se zde zřejmě nevyskytují, jak bylo dokázáno při kladné půlplně střídavého napětí (*Obr. 4.27*). Případně hladina nižšího náboje mohou být opět pouze zákmity větších pulzů.

Tento model byl také pro vodič průměru 0,5 mm měřený pomocí proudové sondy a EMC- metru a bylo pro něj tedy zaznamenané frekvenční spektrum korony. Výsledné průběhy jsou na *Obr. 4.13*. Ve výsledcích je patrný rozdíl mezi rušením pozadí a mezi změřeným frekvenčním spektrem koronového proudu při různých napětích. Vzhledem k neúspěšnému měření s osciloskopem však nelze přesně určit, jaká část signálu je čistě korona a jaká část je přídavné rušení.



Obr. 4.12: Záznam z DČV pro model vodič-deska, vodič \varnothing 0,5 mm při kladném zapalovacím napětí 20,5 kV



Obr. 4.13: Frekvenční spektrum záporné DC korony pro model vodič-deska, vodič 0,5 mm

V průběžích je jasně viditelná špička na frekvenci 13,56 MHz, která patří systému RFID (radiofrekvenční identifikační systém) a je tedy jasné, že i další špičky na pozadí patří cizímu rušení pomocí rádiových signálů. Při měření korony na 45 i 20 kV jsou však tyto špičky už většinou eliminované a lze tedy předpokládat, že korona je na těchto frekvencích silnější a tudíž lze snad měření pokládat za úspěšné a směrodatné.

Na stejnosměrném napětí u DČV nebyl použit osciloskop a měření osciloskopem na odporu v uzemnění modelu také selhalo. Výsledek z EMC-metru je tak jediným použitelným frekvenčním spektrem a není možné ho lépe popsat nebo s něčím porovnat.

4.2 Korona při střídavém napětí

4.2.1 Zapalovací napětí, intenzita pole, ztráty

Stanovení zapalovacího napětí při střídavém napájení bylo provedeno, tak jako většina měření na AC, pouze na DČV. Výsledky pro jednotlivé modely jsou v *Tab. 4.3*, opět včetně simulovaných i vypočtených hodnot intenzity elektrického pole.

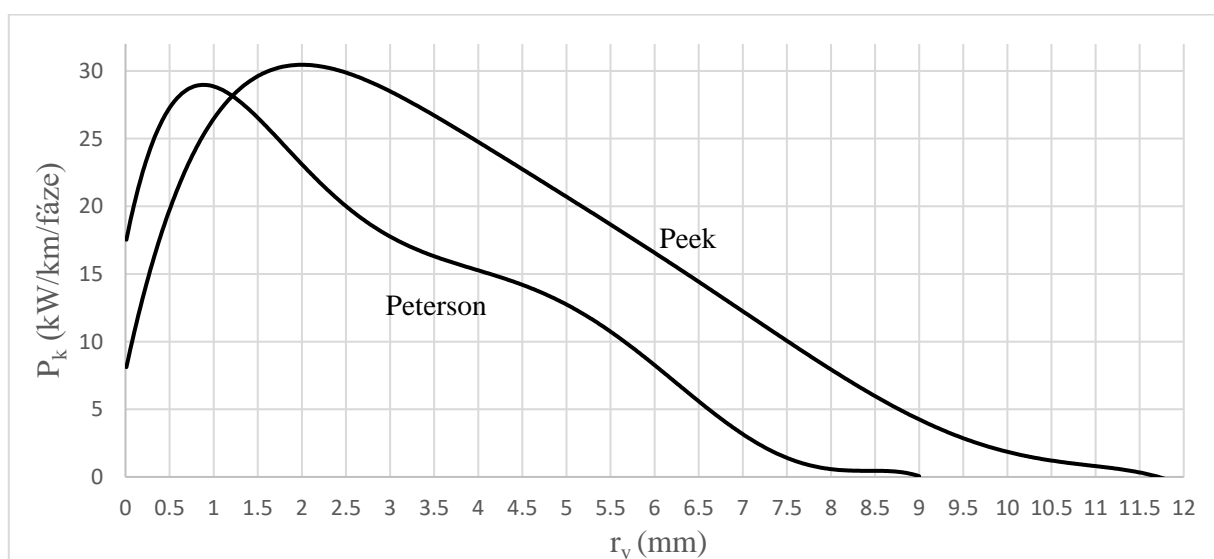
Tab. 4.3: Zapalovací AC napětí a intenzity pole z měření na DČV

Model	Zapalovací napětí (kV _{max})	E _{max} simulovaná (kV/mm)	E _{max} vypočtená (kV/mm)
Vodič-deska Ø 0,5 mm	17,96	9,64	9,98
Vodič-deska Ø 1,5 mm	30,69	6,48	6,71
Hrot-miska	6,65	6,21	6,64

Ačkoliv nelze srovnat výsledky z více metod, lze alespoň popsat rozdíl zapalovacích napětí u AC (*Tab. 4.3*) a DC (*Tab. 4.1 a 4.2*). U vodiče průměru 0,5 mm je AC zapalovací napětí menší o cca 1,5 kV_{max} než u záporného DC a o cca 3 kV_{max} než u kladného DC. U silnějšího vodiče je naopak zapalovací napětí AC o cca 0,3 kV_{max} vyšší než u kladného DC a o cca 2,1 kV_{max} než u záporného DC. Celkově však lze říct, že zapalovací napětí je u modelu vodič deska pro AC i DC podobné. Navíc odpovídá i fakt, že u AC je u slabšího vodiče při zapálení korony větší aktivita výbojů v záporné půlčluně (*Obr. 4.26*) a proto je zapalovací napětí blíže k zápornému DC. Naopak u silnějšího vodiče je aktivita v obou půlčlunách AC podobná hned po zapálení, a proto je možné, že zapalovací napětí se blíží více ke kladnému DC.

U modelu hrot-miska už jsou rozdíly mezi AC a DC velké, hlavně při uvažování poměru rozdílového napětí k zapalovacímu napětí. Je to pravděpodobně dáno zbytkovým prostorovým nábojem vždy z předchozí půl periody. AC zapaluje na nižším napětí, rozdíl mezi AC a záporným DC je $1,8 \text{ kV}_{\text{max}}$, mezi kladným DC dokonce $6,7 \text{ kV}_{\text{max}}$. I toto chování je však předpokládáno, jelikož hrot se podobá tenkému vodiči, jen poloměr zakřivení je ještě menší a proto je větší i poměrný rozdíl zapalovacích napětí mezi AC a záporným DC. Jednoduše řečeno to znamená, že čím menší je poloměr zakřivení elektrody pod napětím, tím bude větší poměrný rozdíl mezi zapalovacím napětím při AC a při záporném DC.

Co se týká hodnot intenzity elektrického pole, platí stejná pravidla a rozdíly mezi výpočtem a simulací jako u DC. Dále byla na *Obr. 4.14* ještě vykreslena závislost ztrát dle Peeka a Petersona na poloměru použitého vodiče pro vedení 220 kV s parametry uvedenými v kapitole 4.1.2. Opět je vidět, že tvar průběhů je podobný, ale velikost ztrát pro stejný poloměr se vždy velmi liší. Oba vztahy se však shodují v tom, že při napětí 220 kV a překročení poloměru vodiče cca 12 mm už jsou ztráty v podstatě nulové a korona zřejmě nevzniká.



Obr. 4.14: Porovnání ztrát vypočtených podle Peeka a Petersona pro AC vedení 220 kV na poloměru vodiče

Také byly pomocí Peekova a Petersonova vztahu vypočtené hodnoty ztrát pro typická vedení 110, 220 a 400 kV, výsledky jsou v *Tab. 4.4*.

U všech vedení bylo počítáno s atmosférickým tlakem 100 kPa, teplotou 20°C , elektrickou pevností vzduchu 3 kV/mm, frekvencí 50 Hz, délkou vedení 1 km a samozřejmě v trojfázovém systému. Vedení 110 kV bylo provedeno AlFe lanem o průřezu 185 mm^2 , tzn. s poloměrem

7,67 mm se vzdáleností lan 5 m. Vedení 220 kV bylo provedeno AlFe lanem o průřezu 350 mm², tzn. s poloměrem 10,56 mm se vzdáleností lan 8 m. A konečně vedení 400 kV bylo provedeno trojsvazkovým vodičem s AlFe lany o průřezu 3x450 mm², tzn. s kapacitním ekvivalentním poloměrem svazkového vodiče 17,52 mm a se vzdáleností lan 11 m.

Tab. 4.4: Ztráty podle Peekova a Petersonova vztahu pro běžná AC vedení za různého počasí

Vedení	110 kV		220 kV		400 kV	
	Pěkně	Děšť	Pěkně	Děšť	Pěkně	Děšť
$U_{krit} (kV_{eff})$	81,55	65,24	114,88	91,91	185,2	148,16
$P_K Peek (kW/km)$	-	-	3,18	26,69	49,75	162,96
$P_K Peterson (kW/km)$	0,024	0,056	0,367	2,45	3,85	29,97

Z výsledků je vidět, že U_{krit} , tzn. zápalné napětí korony je u vedení 110 kV až nad hodnotou jmenovitého fázového napětí. Korona tedy podle těchto výpočtů nevzniká a Peekův vztah se za těchto podmínek dokonce nedá použít, Peterson sice nějaké výsledky přináší, ale jestli korona opravdu nevzniká, tak by se ztráty bez výpočtu rovnou měly vyhodnotit jako nulové. Na vedení 220 kV už korona vzniká, stejně tak jako u vedení 400 kV. Po porovnání výsledků s měřením na reálném vedení 400 kV v [21] je jasné, že vypočtené hodnoty pomocí Petersonova vztahu skoro přesně odpovídají realitě, chyba je zanedbatelná a je nutné přihlídnout k odlišné geometrii vedení. Na základě [21] však lze usoudit, že Peekův vztah je zatížený velmi velkou chybou a je v praxi nepoužitelný.

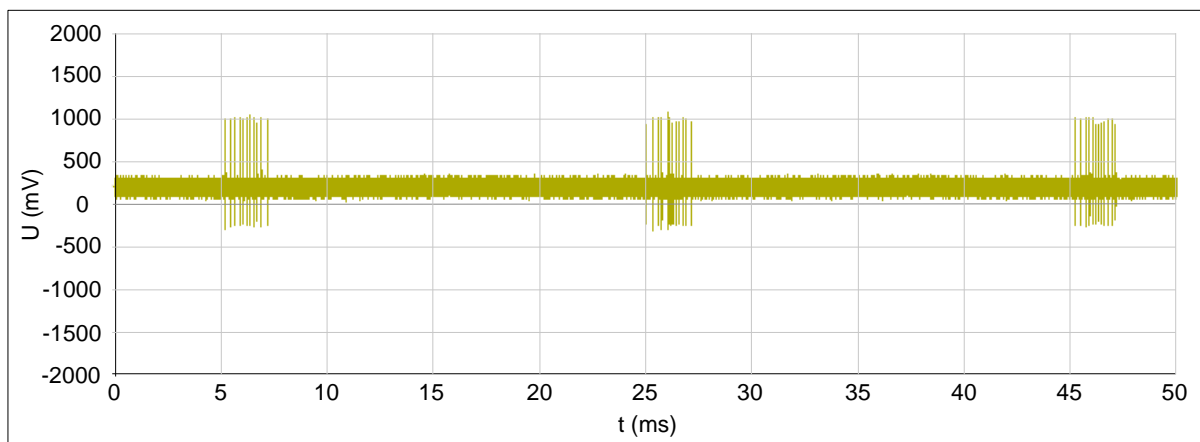
4.2.2 Četnost výbojů, frekvenční spektrum

4.2.2.1 Hrot-miska

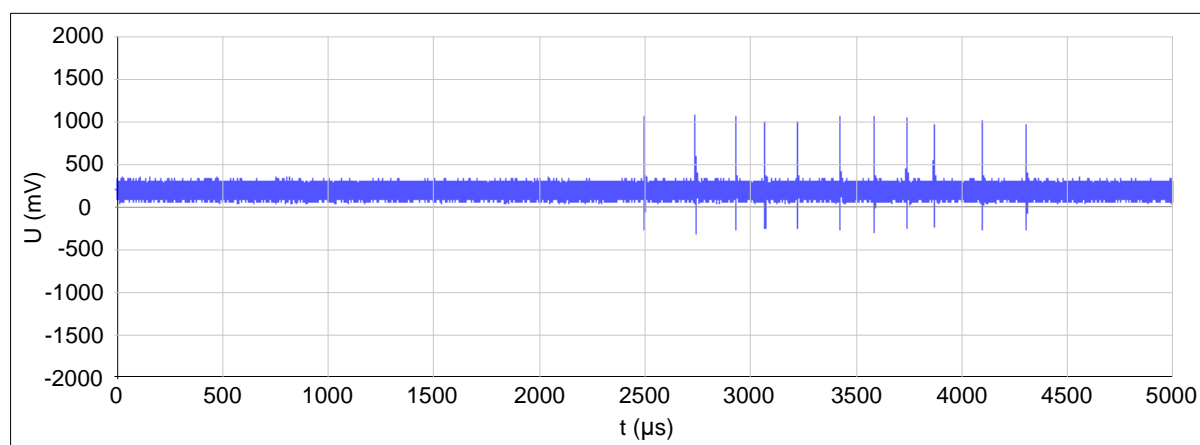
Zobrazení pulzů korony na osciloskopu ukázalo jejich rozložení v čase, počet, velikost i tvar. Nutno opět poznamenat, že výsledky z osciloskopu i následně vytvořená frekvenční spektra jsou zatížena značnou chybou popsanou v kapitole 3.2.2.1. Na Obr. 4.15 je vidět průběh impulzů korony při zápalném napětí přes více period a je zřejmé, že sady impulzů se vždy opakují po jedné periodě, tzn. po 20 ms. V jaké přesně části periody se impulzy vyskytují, bude lépe ukázáno na DČV.

Obr. 4.16 zobrazuje stejné výboje časově přiblížené a jsou tak přesněji rozeznatelné jejich rozestupy, které vznikají náhodně. Viditelná je také mírně odlišná amplituda jednotlivých pulzů. Obr. 4.17 ve stejném časovém měřítku zobrazuje nárůst počtu pulzů při zvětšení napětí

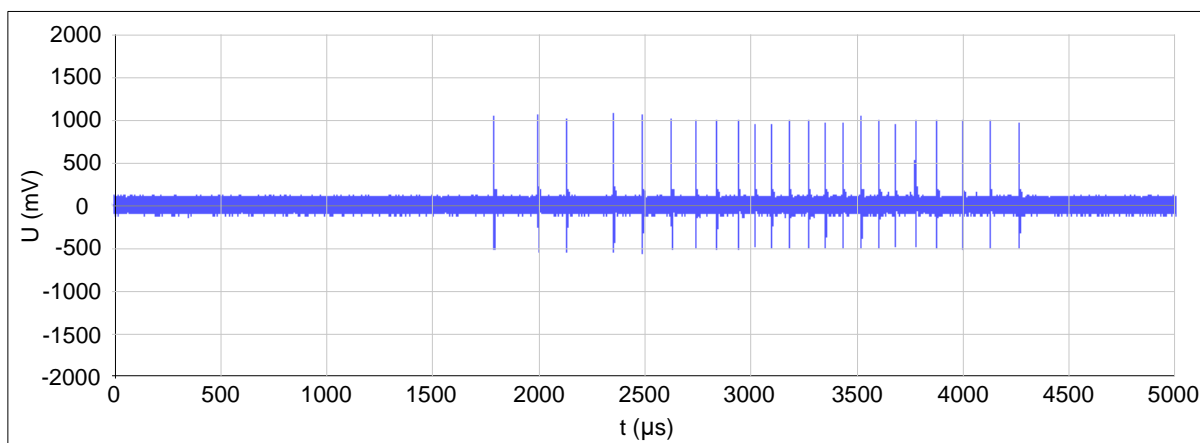
na hodnotu $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$. Dále je vidět, že velikost pulzů zůstává přibližně stejná, na hodnotě cca 1 V , jako v předchozím případě.



Obr. 4.15: Rozložení výbojů v čase pro model hrot-miska, zapalovací napětí $6,65 \text{ kV}_{\text{max}}$



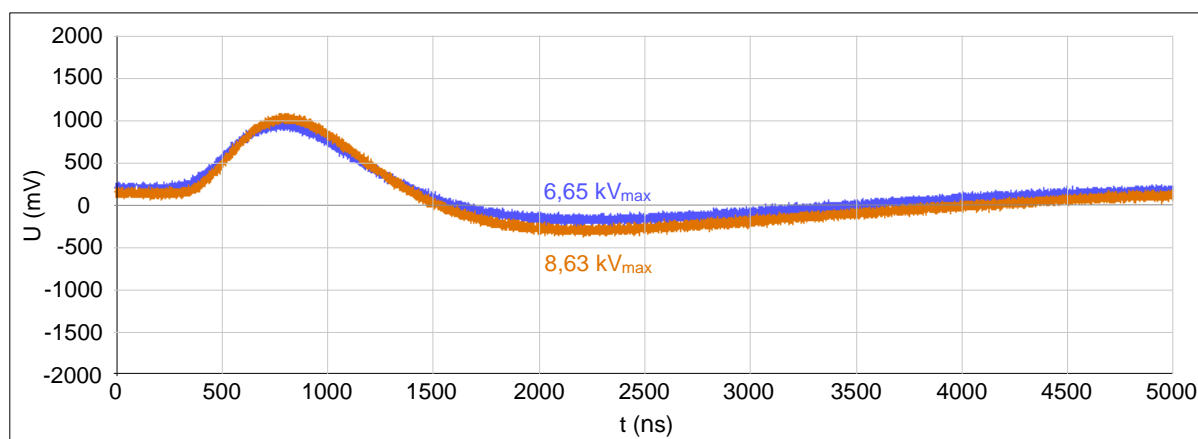
Obr. 4.16: Rozložení výbojů v čase pro model hrot-miska, zapalovací napětí $6,65 \text{ kV}_{\text{max}}$ - přiblížení



Obr. 4.17: Rozložení výbojů v čase pro model hrot-miska, napětí $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$

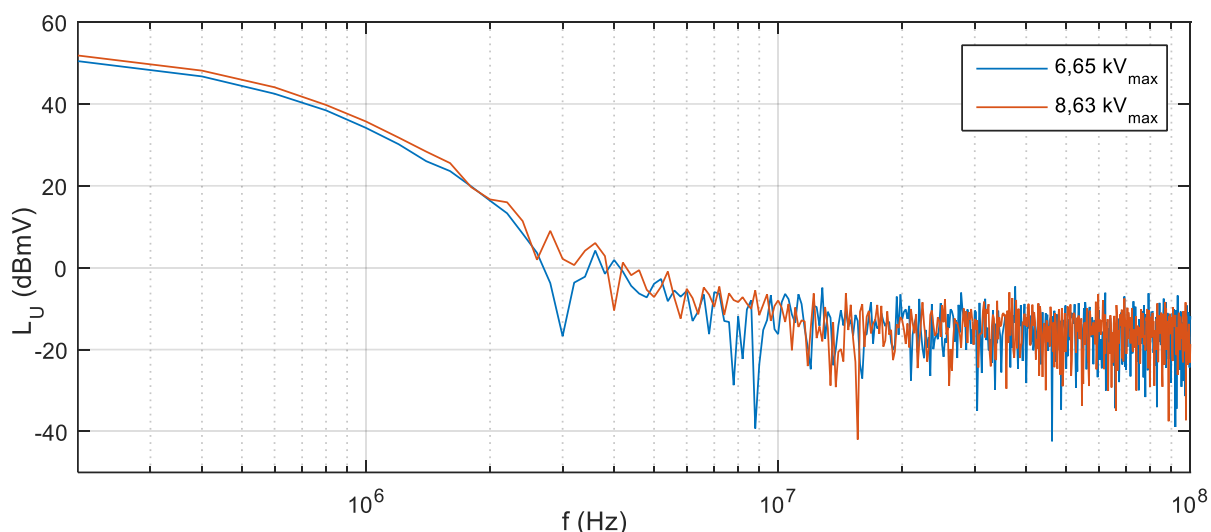
Na Obr. 4.18 je potom konečně vidět plně přiblížený impuls korony při obou diskutovaných napětích, tzn. zápalném a poté mírně větším $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$. Jak již bylo řečeno, skutečný tvar pulzů je zřejmě značně ovlivněn měřicí aparaturou. Ačkoliv aktuálně zachycený

impulz při větším napětí má rovněž i mírně větší amplitudu, je to pravděpodobně pouze náhoda, jak ukazují předchozí výsledky.



Obr. 4.18: Koronové výboje pro model hrot-miska, zapalovací napětí $6,65 \text{ kV}_{\text{max}}$ ($\dot{C}/T = 300/900 \text{ ns}$) a napětí $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$ ($\dot{C}/T = 300/900 \text{ ns}$)

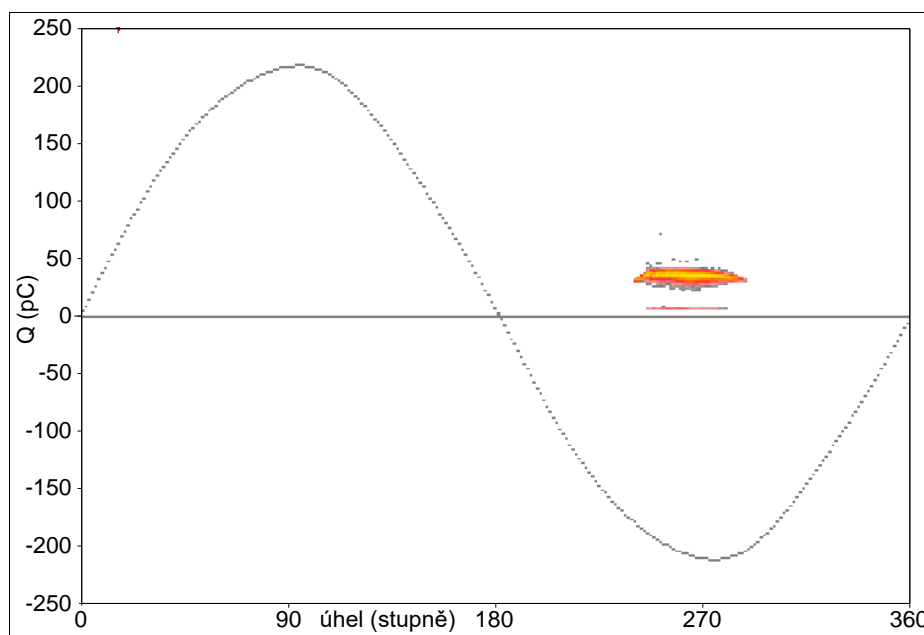
Frekvenční spektrum pro obě napětí je dále viditelné na Obr. 4.19. Při vyšším napětí má spektrum v nižších frekvencích pouze mírně vyšší amplitudu, jinak jsou průběhy téměř totožné. Kmity od cca 10 MHz už jsou způsobené pouze rušením v pozadí.



Obr. 4.19: Frekvenční spektrum výbojů pro model hrot-miska, zapalovací napětí $6,65 \text{ kV}_{\text{max}}$ a napětí $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$

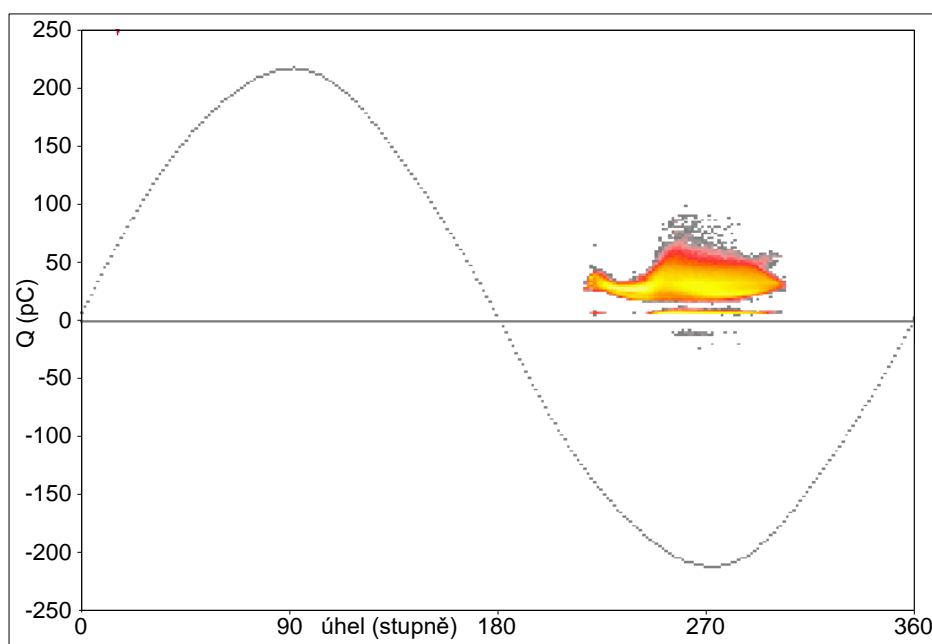
Výsledky z osciloskopu jsou doplněné o data získaná z DČV. Ten zobrazuje množství výbojů, velikost jejich náboje a pozici v jedné periodě napětí za měřenou dobu, v tomto případě za 60 sekund. Na Obr. 4.20 je snímek pro zapalovací napětí korony. Je vidět, že na modelu hrot-miska vznikají výboje pouze, když je na hrotu záporné napětí, v tomto případě v záporné půlce a pulzy mají zpočátku pouze kladný náboj, při vyšších napětích i záporný. K výbojům,

zřejmě díky zachování prostorového náboje z kladné půlplny, dochází ještě mírně před maximální hodnotou průběhu napětí a naopak po překročení maxima už výboje odeznívají.



Obr. 4.20: Záznam z DČV pro model hrot-miska při zapalovacím napětí $6,65 \text{ kV}_{\text{max}}$

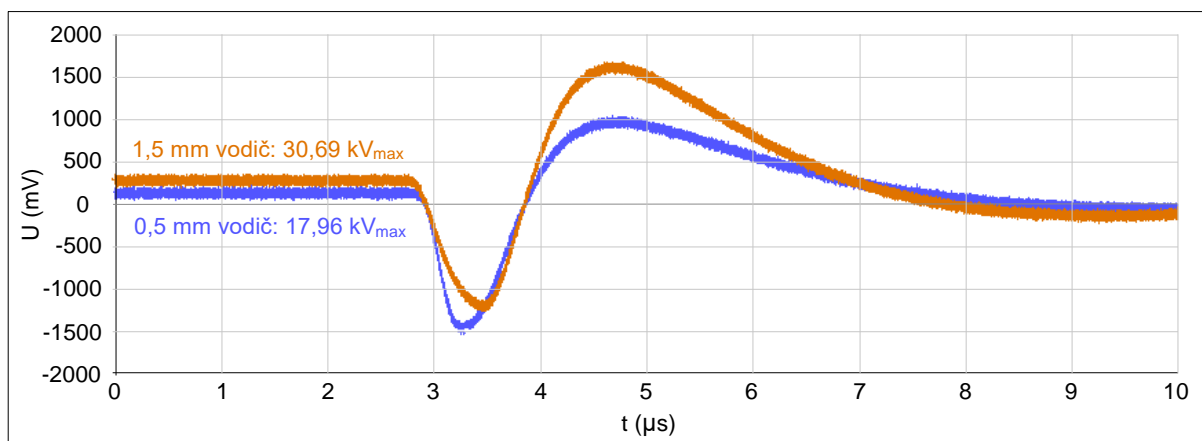
I při zvyšování napětí na $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$ na Obr. 4.21 a zkušebně i na $12,73 \text{ kV}_{\text{max}}$ zůstávají impulzy stále pouze v záporné půlplně. Při zvyšování napětí však dochází k tomu, že stále více impulzů má i záporný náboj. Také se zvětšuje doba, po kterou impulzy vznikají, to je však dáno jednoduše tím, že se úměrně zvětšuje i doba, po kterou je překročeno zápalné napětí.



Obr. 4.21: Záznam z DČV pro model hrot-miska při napětí $8,63 \text{ kV}_{\text{max}}$

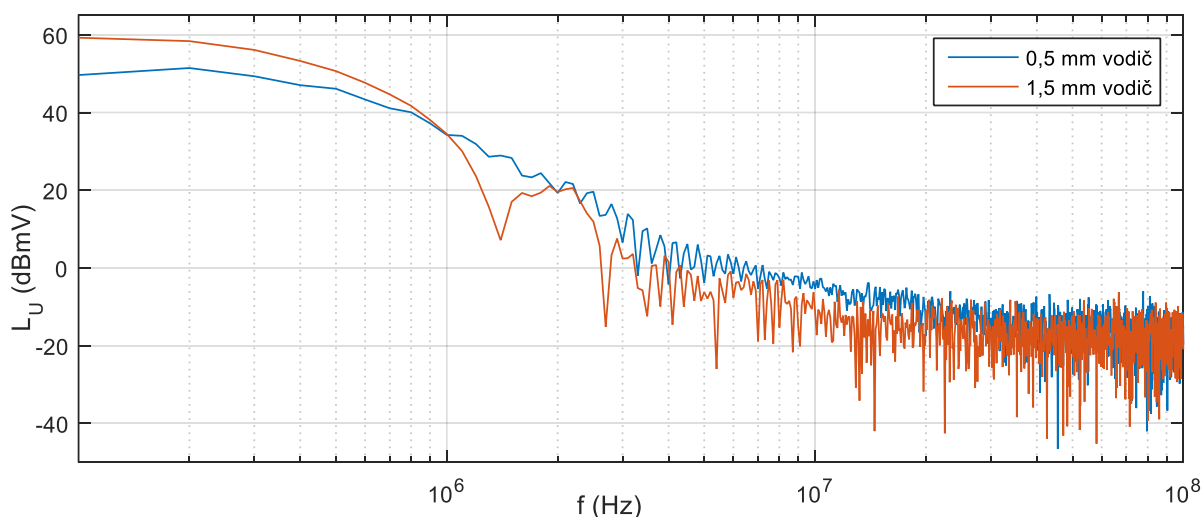
4.2.2.2 Vodič-deska

Již při prvním pohledu na *Obr. 4.22* je vidět, že tvar pulzů je odlišný od modelu hrot-miska, i když i zde je nutno poznamenat, že výsledek je zřejmě ovlivněný měřicí aparaturou. Zachycené pulzy mají kladný náboj a jsou měřené na vodiči o průměru 0,5 a 1,5 mm při zapalovacím napětí. Pulz pro silnější vodič má viditelně větší amplitudu, nicméně doba čela i týlu je téměř stejná.



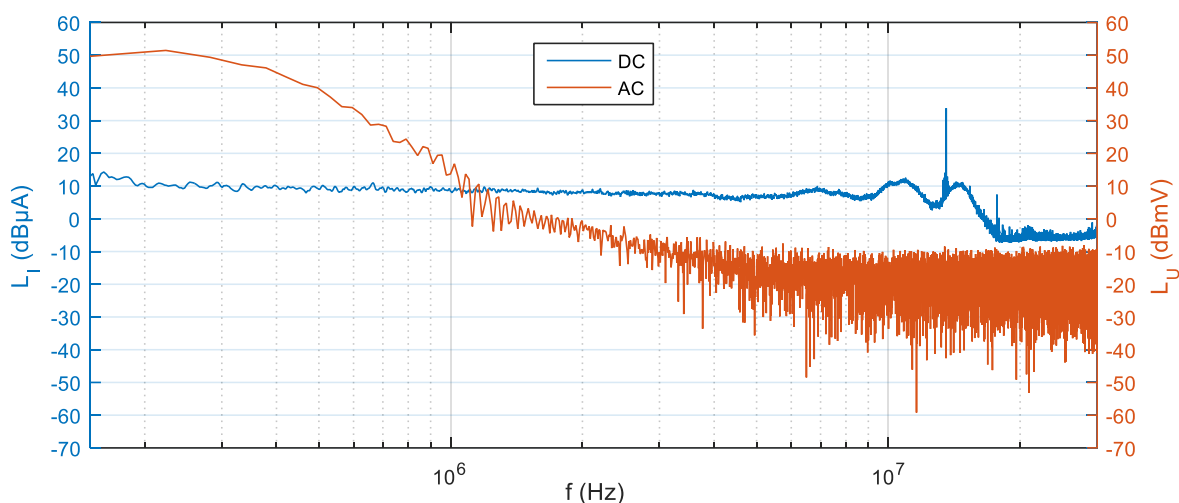
Obr. 4.22: Koronové výboje s kladným nábojem pro model vodič-deska, zapalovací napětí 17,96 kV_{max} pro vodič Ø 0,5 mm (Č/T = 1/3 μs) a 30,69 kV_{max} pro vodič Ø 1,5 mm (Č/T = 0,8/3 μs)

Frekvenční spektrum pro oba vodiče je na *Obr. 4.23*. Silnější vodič má vyšší amplitudu v počátečních frekvencích a také větší výkmity v oblasti 1 až 10 MHz. Nad 10 MHz je při tomto měření opět už pouze šum.



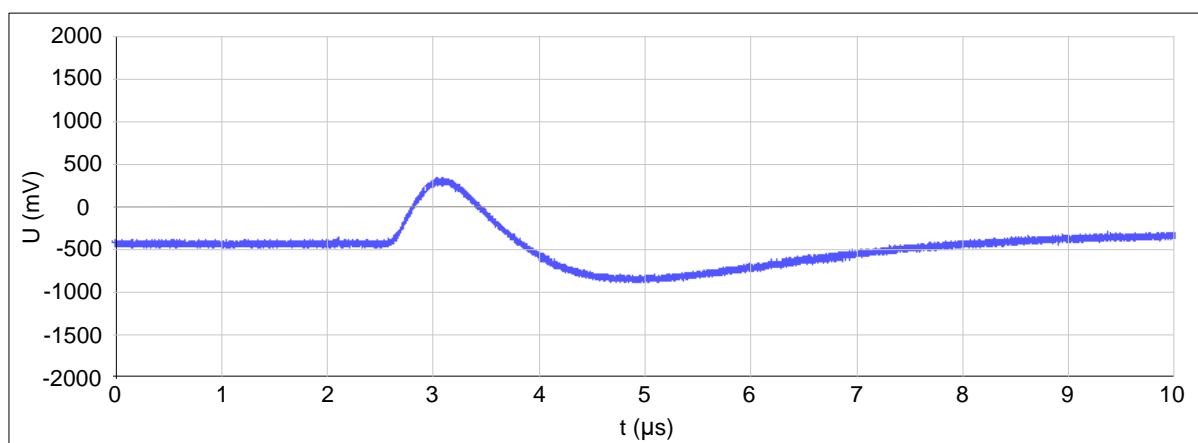
Obr. 4.23: Frekvenční spektrum výbojů pro model vodič-deska, zapalovací napětí 17,96 kV_{max} pro vodič Ø 0,5 mm a 30,69 kV_{max} pro vodič Ø 1,5 mm

Pro zajímavost je ještě na *Obr. 4.24* vykreslené frekvenční spektrum pro vodič průměru 0,5 mm pro zápalné napětí společně pro AC i záporné DC v pásmu od 0 do 30 MHz. Signály nejsou porovnatelné z hlediska amplitudy, jelikož jeden vyjadřuje proud a druhý napětí, ale dají se alespoň porovnat z hlediska jejich průběhu. Je vidět, že v pásmu od 0 do cca 10 MHz má DC výboj přibližně stejnou amplitudu všech frekvencí, kdežto AC výboj má spektrum s nejvyšší amplitudou hlavně v pásmu nižších frekvencí.



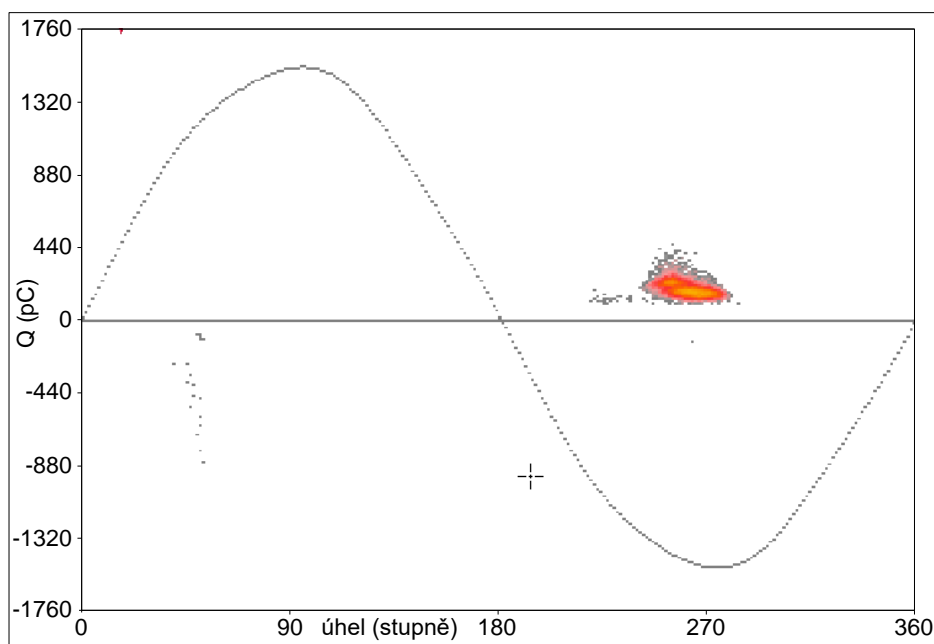
Obr. 4.24: Frekvenční spektrum výbojů pro model vodič-deska s vodičem \varnothing 0,5 mm, záporné DC zapalovací napětí 19,5 kV a AC zapalovací napětí 17,96 kV_{max}

U uspořádání vodič-deska je na rozdíl od modelu hrot-miska charakteristické, že pulzy korony vznikají už při zapalovacím napětí v obou půlvlnách, jak kladné, tak záporné. To platí pro vodiče obou měřených průměrů (viz *Obr. 4.26 a Obr. 4.27*). Na *Obr. 4.25* je proto zobrazený i impuls na tenkém vodiči při zapalovacím napětí se záporným nábojem vznikající v kladné půlvlně napětí. Pulzy na *Obr. 4.22* byly ze záporné půlvlny. Tento pulz má cca třetinovou amplitudu a je tedy vidět, že byl způsobený menším proudovým rázem.

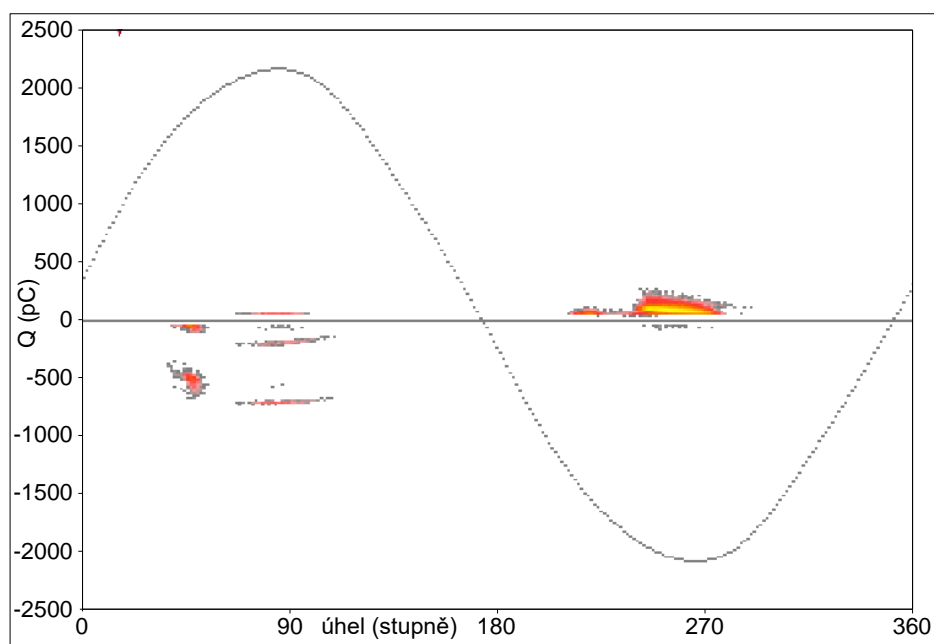


Obr. 4.25: Koronový výboj se záporným nábojem pro model vodič-deska, zapalovací napětí 17,96 kV_{max} pro vodič \varnothing 0,5 mm ($\check{C}/T = 0,2/1,1 \mu\text{s}$)

Obr. 4.26 pro vodič 0,5 mm ukazuje, že i při velmi jemném a přesném najíždění na zapalovací napětí, se vždy objevily pulzy i v kladné půlčlenně. Obrázek znázorňuje stav po několika pokusech, kdy bylo dosaženo minimálního napětí pro zapálení korony a pulzy se i přesto objevily. Jejich četnost je sice velmi malá, ale již s mírným zvýšením napětí podstatně narůstá. Zajímavé také je, že impulzy v kladné půlčlenně mají poměrně velké rozmezí hodnot jejich náboje, to je ještě viditelnější při nárůstu napětí.



Obr. 4.26: Záznam z DČV pro model vodič-deska při napětí $17,96 \text{ kV}_{\max}$ pro vodič $\varnothing 0,5 \text{ mm}$

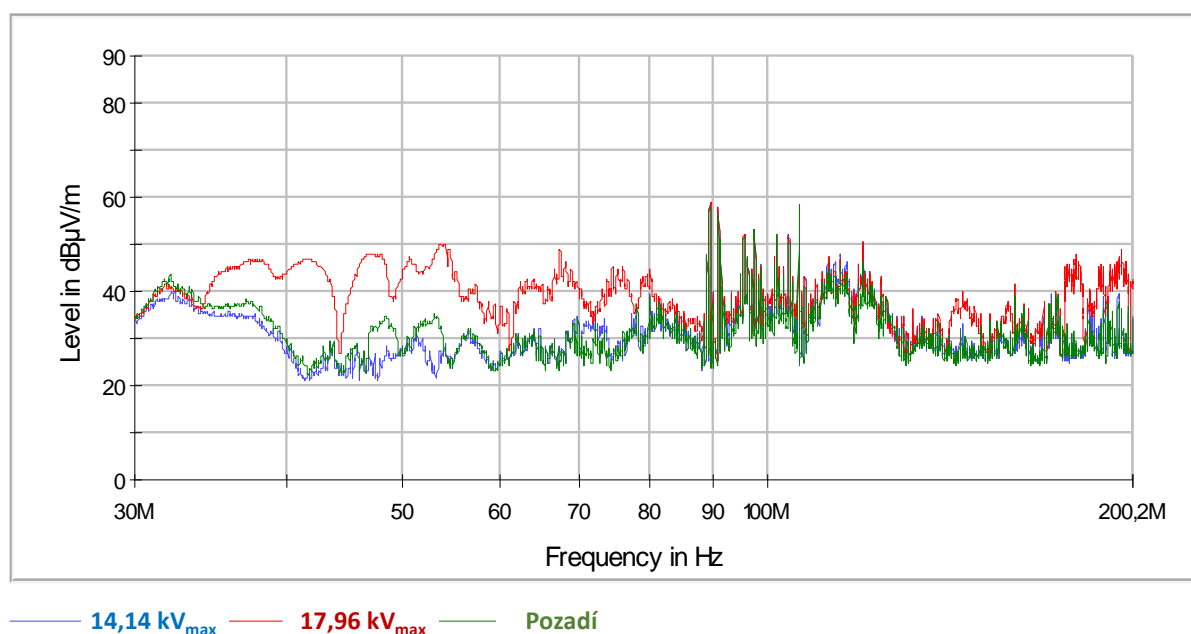


Obr. 4.27: : Záznam z DČV pro model vodič-deska při napětí $30,69 \text{ kV}_{\max}$ pro vodič $\varnothing 1,5 \text{ mm}$

Již jenom pro doplnění jsou na *Obr. 4.27* zobrazené pulzy pro silnější vodič při zápalném napětí. Zde je vidět, že množství pulzů v kladné půlčluně je již při zapalovacím napětí velké, téměř srovnatelné s množstvím v záporné půlčluně. Jedinou neznámou zde zůstává rozmístění pulzů do několika shluků a hladin s různým nábojem. Přesná příčina není známá, ale je možné, že pulzy o nižším náboji jsou způsobené např. rušením ze zdroje. Pulzy v okolí úhlu 90° s nábojem cca -200 pC mohou být také jen zákmity větších pulzů s podobnou četností a místem výskytu s nábojem cca -700 pC. Podobná situace je i okolo úhlu 45° .

4.2.3 Měření pomocí antény

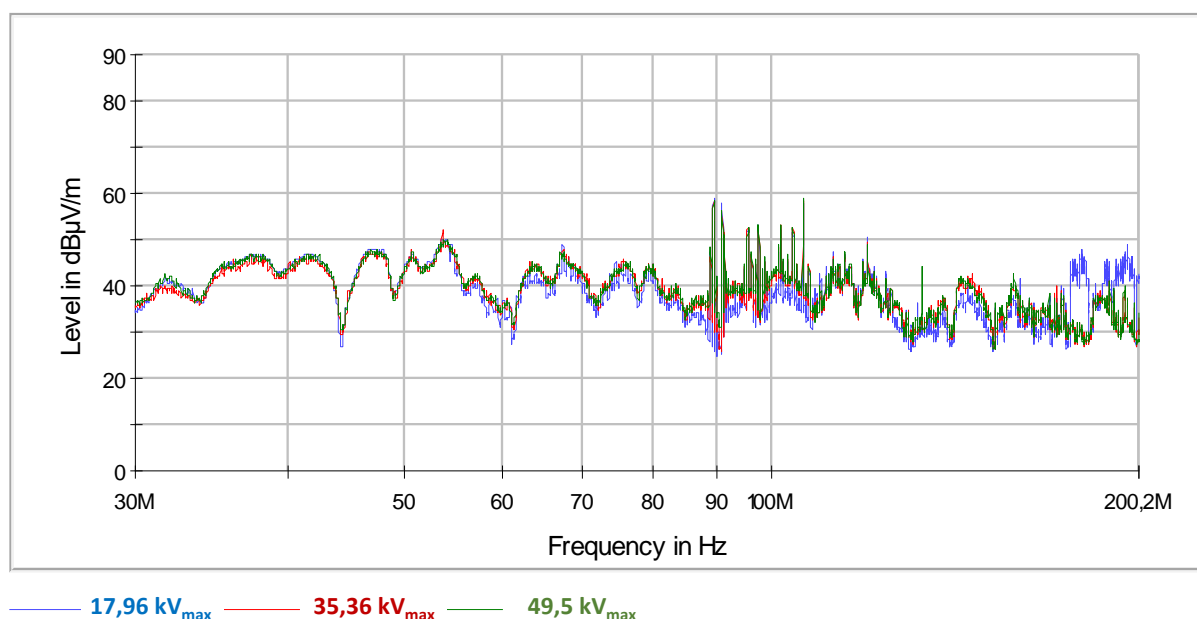
Jako první jsou uvedené výsledky z měření vrcholové hodnoty, všechna měření probíhala na modelu vodič-deska s vodičem $0,5$ mm. Na *Obr. 4.28* je jasně viditelný rozdíl mezi rušením v pozadí (při vypnutém zdroji), které je téměř shodné se stavem se zapnutým zdrojem (ale pod úrovní zapalovacího napětí korony) a poté mezi signálem změřeným po zapálení korony (překročení $17,96$ kV_{max}). Od zapálení korony při zvyšování napětí jsou už výsledné průběhy (*Obr. 4.29*) opět téměř shodné v celém měřeném rozsahu (od $17,96$ kV_{max} do $49,5$ kV_{max}). Je tedy jasné, že úroveň rušení je po zapálení korony téměř nezávislá na napětí. Lze také předpokládat, že měření je směrodatné pouze do hodnoty cca 90 MHz, poté už se může jednat pouze o šum pozadí, ačkoliv nějaké rozdíly mezi pozadím a korunou viditelné jsou.



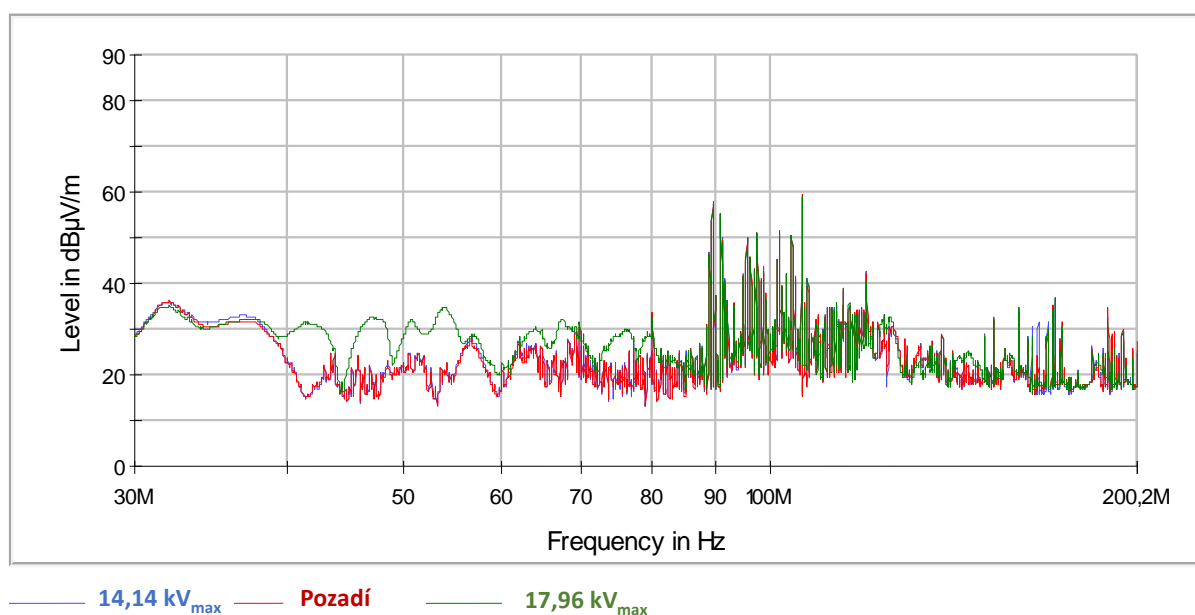
Obr. 4.28: Frekvenční spektrum z antény pro model vodič-deska s vodičem $\varnothing 0,5$ mm, vrcholová hodnota pro pozadí, napětí před zapálením a korony a při zapalovacím napětí

V dalším režimu byla měřena kvazivrcholová hodnota. Opět je vidět výrazný skok mezi stavem před zapálením korony (téměř shodně i s pozadím) a stavem po zapálení (*Obr. 4.30*).

Nicméně na rozdíl od měření vrcholové hodnoty je také vidět rozdíl při zvyšování napětí nad $17,96 \text{ kV}_{\text{max}}$, zde dochází úměrně ke zvyšování kvazivrcholové úrovně (Obr. 4.31). Lze tedy usuzovat, že toto zvyšování má na svědomí právě zvyšování četnosti výbojů při navyšování napětí. Nad hodnotou cca 90 MHz už také nelze řádně rozeznat jednotlivé signály a senzitivita antény v tomto pásmu nemusí být dostatečná pro správnou interpretaci signálu a výsledek je jistě zarušený šumem, který není konstantní.

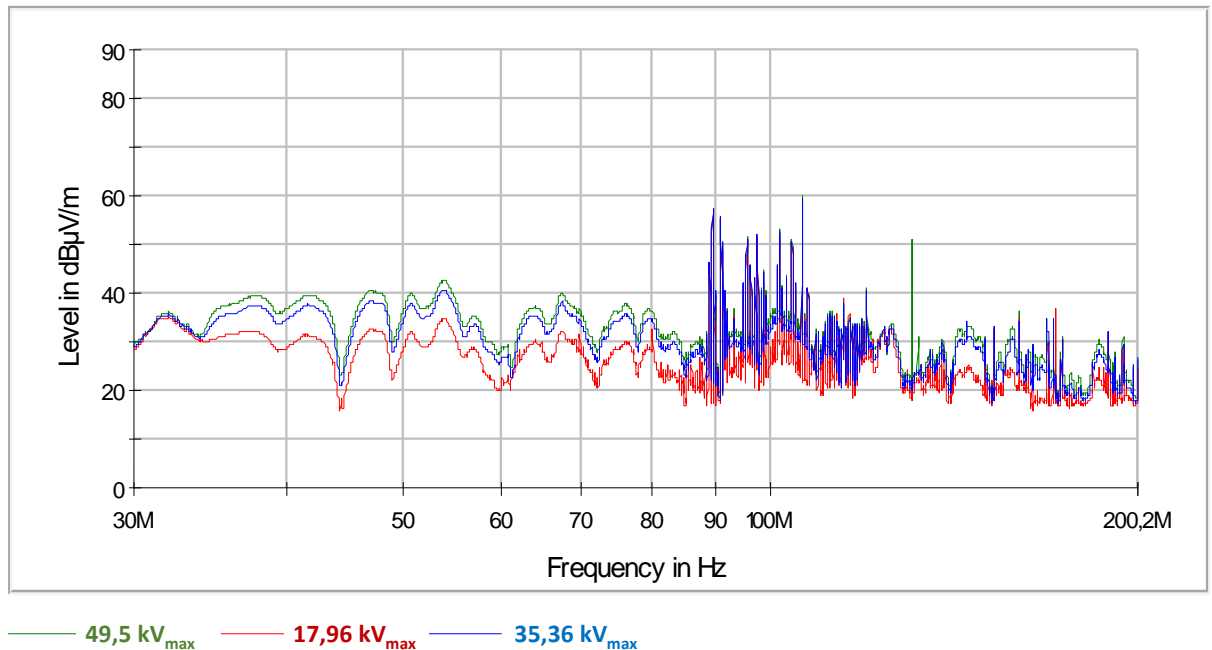


Obr. 4.29: Frekvenční spektrum z antény pro model vodič-deska s vodičem $\varnothing 0,5 \text{ mm}$, vrcholová hodnota pro zapalovací napětí a 2 vyšší hodnoty



Obr. 4.30: Frekvenční spektrum z antény pro model vodič-deska s vodičem $\varnothing 0,5 \text{ mm}$, kvazivrcholová hodnota pro pozadí, napětí před zapálením a korony a při zapalovacím napětí

Nicméně měření anténou je, jak bylo řečeno v teoretické části, jedním ze způsobů, který lze aplikovat i na reálná vedení. Z výsledků jasně vyplývá, že rozdíl mezi pozadím a korunou je zřetelně rozeznatelný. Použitá metoda by tedy skutečně mohla být pro detekci korony použitelná. Jinak nelze výsledné hodnoty s ničím porovnat, jelikož jsou jedinými výsledky, které zobrazují intenzitu elektrického pole, na rozdíl od předchozích měření.



Obr. 4.31: Frekvenční spektrum z antény pro model vodič-deska s vodičem $\varnothing 0,5$ mm, kvazivrcholová hodnota pro zapalovací napětí a 2 vyšší hodnoty

Závěr

V teoretické části byl popsán současný stav výzkumu korony a také metody pro stanovení ztrát, vyhledání korony a měření rušení, které korona způsobuje na přenosových vedeních. Metody byly dále doplněné měřením v laboratorních podmínkách a pokud možno srovnané s výsledky simulace nebo teoretických výpočtů či předpokladů tak, aby se potvrdilo, že měření na zmenšených modelech v laboratoři není tak odlišné od měření na skutečných vedeních.

Bohužel se ukázalo, že mnohdy není možné toto porovnání provést, jelikož neexistují vhodné teoretické výpočty nebo se jedná o způsob měření, který nebyl za stejných předpokladů ještě provedený. Výsledky tak byly alespoň diskutované na základě různých parametrů a byla přibližně hodnocena jejich správnost. Pro porovnání byla také vyhotovena simulace určená k výpočtům intenzity elektrického pole. Pokročilejší chování korony nebylo v této simulaci zahrnuté, jelikož práce byla již od začátku vedená spíše k praktickým měřením a zjištění reálných výsledků.

Měření zápalných napětí korony a s nimi související velikost intenzity elektrického pole byly jak na AC, tak i na DC v dobré shodě se simulacemi i teoretickými výpočty. Navíc se potvrdilo, že zápalné napětí je vždy menší při záporné polaritě DC napětí než při kladné. U AC je výsledek značně závislý na poloměru zakřivení elektrody. Při malém zakřivení je zápalné napětí mnohem menší než u DC, při větším zakřivení může být naopak i větší. Co se týká změřených průběhů proudu DC korony, byly po přepočtu také tvarem velmi podobné ztrátám korunou na reálném AC vedení. Rovněž při porovnání velikosti nábojů pulzů při DC napětí a korespondující půlplně AC napětí, jsou tyto hodnoty obdobné.

Měření anténou na AC také přineslo očekávané výsledky, tedy že při působení korony bylo naměřené rušení šířící se do okolí vyšší než hodnoty signálu na pozadí a se zvyšujícím se napětím se zvětšovala četnost výbojů, zatímco jejich velikost zůstávala stejná. Největší rušení bylo naměřeno na frekvenci 30 až 90 MHz s tím, že úroveň rádiového vysílání v FM pásmu 87 až 108 MHz nebyla rušením téměř ovlivněná.

Ze změřených tvarů koronových impulzů bylo zjištěno, že jsou silně ovlivněné použitou měřicí aparaturou na měření částečných výbojů. Ta tedy není pro zobrazení na osciloskopu příliš vhodná, zato samotný DČV přinesl velice jasnou představu o zapalovacích napětích,

výskytu, velikosti a množství pulzů. Rovněž další použité měřicí metody vedly snad ke správným výsledkům a jsou tedy pro měření korony použitelné. Obecně se při všech metodách potvrdilo, že měření korony je velmi problematické zvláště díky nízkým měřeným hodnotám, vysokému zarušení a nestálosti koronových výbojů.

Práce tedy byla přínosná tím, že na základě všech měření potvrdila, že chování korony na AC a DC není tak odlišné. Dále se z části ukázalo, že model vodič-deska je jako náhrada reálného AC i DC vedení pro laboratorní měření vhodný s tím, že působení korony na ostrých místech lépe popisuje model hrot-miska. Všechna měření se také shodují v tom, že při zvětšování napětí se velikost koronových pulzů téměř nemění, ale strmě narůstá jejich četnost. Nakonec se rovněž ukázalo, že měření anténou přináší velmi dobré výsledky a bylo by tedy aplikovatelné i na reálném přenosovém vedení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ABDEL-SALAM, Mazen. High-voltage engineering: theory and practice [online]. 2nd ed., rev. and expanded. New York: M. Dekker, 2000 [cit. 2017-05-10]. ISBN 0-8247-0402-9. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=57Eq3Mf8qdcC>
- [2] EU1234-H.pdf: What is Corona ? *Hubbell Power Systems - Products for Electric Utilities, Telecommunications and Construction Industries* [online]. 2004 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.hubbellpowersystems.com/literature/insulators/EU1234-H.pdf>
- [3] ŠEBEK, Radoslav. *Elektromagnetické emise korónového výboje* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: Databáze kvalifikačních prací ZČU. Diplomová práce.
- [4] ASIZEHI YAHAYA, Enes, Tsado JACOB, Mark NWOHU a Ahmed ABUBAKAR. Power loss due to Corona on High Voltage Transmission Lines. *IOSR-JEEE* [online]. 2013, (Volume 8, 3), 6 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/264541143>
- [5] Understanding of Power Loss due to Corona. *Help2Educate* [online]. Syed Noman ud din, 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.help2educate.com/power-loss-due-to-corona/>
- [6] GONEN, Turan. *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design* [online]. Third Edition. CRC Press, 2015 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-1-4822-3223-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=6KbNBQAAQBAJ>
- [7] ČERNÁ, Kateřina. *Charakteristiky koróny na vysokonapěťových zařízeních* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: Databáze kvalifikačních prací ZČU. Diplomová práce.
- [8] BAKSHI, Uday A. a Mayuresh V. BAKHSI. *Transmission and distribution of electrical power* [online]. Pune, India: Technical Publications, 2009 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-818-4317-107. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=f5MpfjEeUqkC>
- [9] Lecture05.pdf: Transmission Line Parameters. *University of Technology Sydney: Faculty of Engineering and Information Technology* [online]. Power Circuit Theory, 2012 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://services.eng.uts.edu.au/pmcl/pct/Downloads/Lecture05.pdf>
- [10] Electric Power Transmission and the Environment : Fields, Noise and Interference. *CIGRE Technical Brochure: 74*. CIGRE, 2000, , 62.
- [11] HAYT, William Hart a John A. BUCK. *Engineering electromagnetics* [online]. 8th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2012 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-0-07-338066-7. Dostupné z: <https://archive.org/details/EngineeringElectromagnetics8thEditionWilliamH.HaytOriginal>

- [12] GUNASEKARAN, B. a. YELLAIAH. *Corona loss measurement in corona cage on UHV Bundle conductor* [online]. 16th National power systems conference, 2010, , 4 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.iitk.ac.in/npsc/Papers/NPSC2010/7036.pdf>
- [13] Ultrasonic Electrical Inspection. *UE Systems* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.uesystems.com/applications/electrical-inspection>
- [14] ULTRA_LEAKDETECT_DS_en_V10: Ultrasonic Leak and Corona Detector. *Mouser Electronics Europe - Electronic Components Distributor* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.mouser.com/ds/2/263/ULTRA_LEAKDETECT_DS_en_V10-5387.pdf
- [15] WSZOLEK, Tadeusz. Noise Indicators for Corona Acoustic Signal from Power Lines – Estimation in Intensified Interference Conditions. *Archives of acoustics* [online]. 2009, , 9 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://acoustics.ippt.pan.pl/index.php/aa/article/view/565/496>
- [16] Practical Issues for Effective Aerial Patrols of Overhead Lines. *INMR Transmission and Distribution Magazine* [online]. 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.inmr.com/practical-issues-effective-aerial-patrols-overhead-lines/>
- [17] Ultraviolet (UV) Corona Detection Services offered through Infrared Predictive Surveys, Inc. *Infrared Predictive Surveys Incorporated* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.infraredpsi.com/uvinspect.php>
- [18] YUNFEI, Zhang a Wu TIAN. Optical System Design of Solar Blind Ultraviolet Imaging Detector. *NCEECE* [online]. 2015, , 8 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.atlantis-press.com/php/download_paper.php?id=25847086
- [19] 500kV-south-buss.jpg. In: *Infrared Predictive Surveys Incorporated* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.infraredpsi.com/images/500kV-south-buss.jpg>
- [20] *IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations* [online]. IEEE Power and Energy Society, 2017, s. 34 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-1-5044-3695-3. Dostupné z: DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.7882595
- [21] LOXTON, A.E. a A.C. BRITTEN. *The measurement and assessment of corona power losses on 400 kV transmission lines* [online]. IEEE, 2003, , 4 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: DOI: 10.1109/AFRCON.2002.1159980

Přílohy

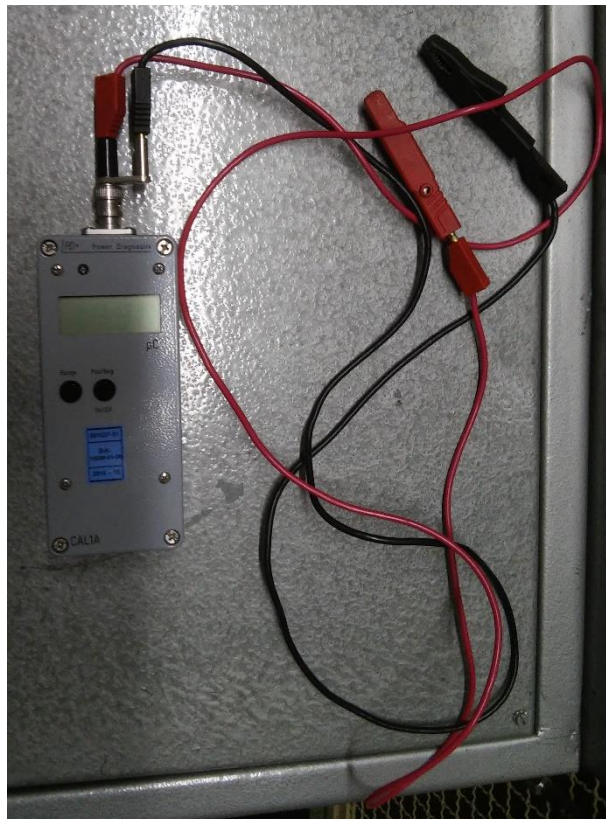
Příloha A – měřené modely, obecné měření proudu korunou



Obr. A.1: Model vodič-deska připojený do obvodu



Obr. A.2: Model hrot-miska

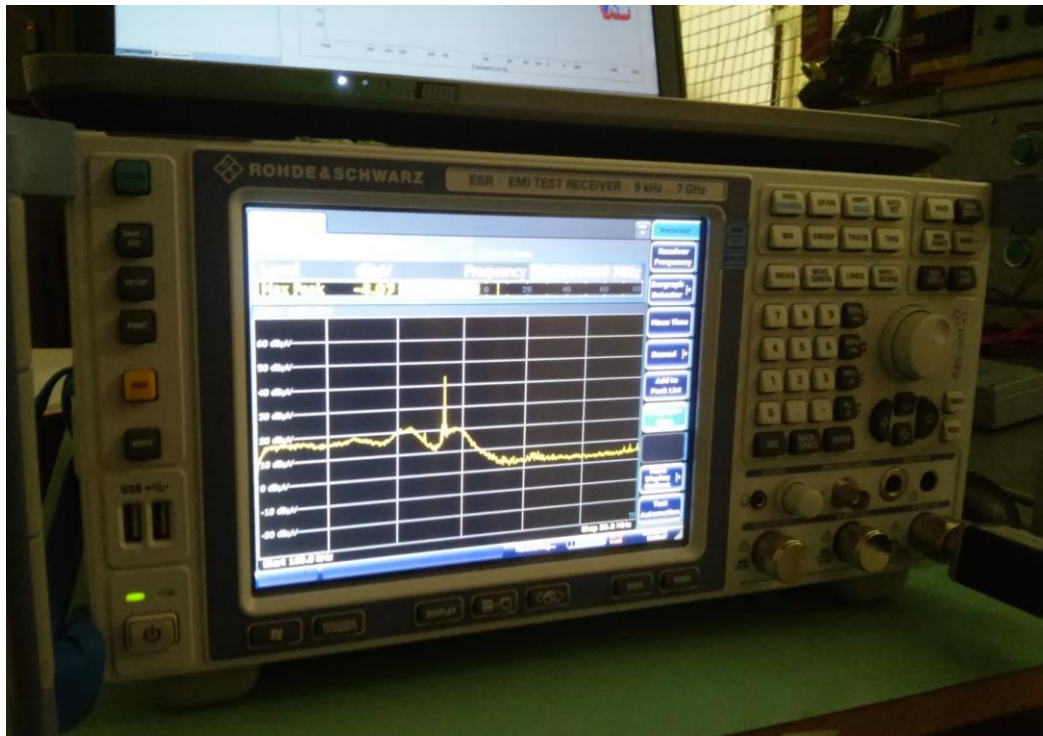


Obr. A.3 (vlevo): Bezindukční odpor pro převod proudu na měřitelné napětí s přípojným páskem

Obr. A.4 (vpravo): Kalibrátor pro generování kalibračního impulzu CAL1A od výrobce PD



Obr. A.5: Páskové uzemnění s připojenou proudovou sondou EZ-17 výrobce R&S



Obr. A.6: EMC-metr (ESR 7 - EMI Test Receiver) od výrobce R&S

Příloha B – Měření na detektoru částečných výbojů



Obr. B.1: Stanoviště pro měření částečných výbojů na AC: osciloskop a PC (vlevo), DČV (vpravo)



Obr. B.2: Detail detektoru částečných výbojů od výrobce PD: Hlavní zesilovač, měřič výbojů, měřič napětí a převodník pro výstup na PC



Obr. B.3 (vlevo): Vazební jednotka do 25 kV pro DC měření na DČV



Obr. B.4 (vpravo): Vazební jednotka do 150 kV pro AC měření na DČV a část měřící aparatury



Obr. B.5 (vlevo): AC zdroj vysokého napětí pro měření částečných výbojů



Obr. B.6 (vpravo): Měřicí aparatura pro DC měření na DČV: zleva odporová kaskáda, DC zdroj VN, model hrot- miska; dole vazební jednotka s připojeným předzesilovačem

Příloha C – Měření anténou



Obr. C.1: Měřicí uspořádání pro měření bikónickou anténou BC-01 výrobce PMM (vpředu) na modelu vodič- deska (v pozadí)



Obr. C.2: AC zdroj VN použitý při měření anténou