

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektromagnetické emise vysokonapěťových zařízení

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

Jméno a příjmení: **Bc. Vítězslav DYK**
Osobní číslo: **E13N0070P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Elektromagnetické emise vysokonapěťových zařízení**
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 :

1. Popište fyzikální principy vzniku rušivých signálů způsobených činnostmi vysokonapěťových zařízení.
2. Popište používané metody vyšetřování rušení vysokonapěťových zařízení.
3. Navrhněte metodiku sledování elektromagnetických emisí pomocí měřicího přijímače.
4. Proveďte a vyhodnoťte výsledky měření rušení na vybraném vysokonapěťovém zařízení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na elektromagnetické emise vysokonapětových zařízení. Text práce je rozdělen do čtyř částí a závěru. V úvodu práce jsem se soustředil na sumarizaci a popis jednotlivých rušivých vlivů způsobovaných vysokonapětovými zařízeními. Na úvodní část jsem navázal dalším teoretickým blokem, který popisuje způsoby měření těchto jevů pomocí antén, což byla zároveň i hlavní měřicí metodika této práce. Druhá polovina práce pak přináší popis a vlastnosti použitých prvků, měřících metod a resumé jejich výsledků. Měřícími metodami byla již zmiňovaná měření pomocí antén, která jsem navíc rozšířil o měření částečných výbojů. Do závěru jsem zanesl zhodnocení výsledků a celkový náhled na přínos práce.

Klíčová slova

Koróna, anténa, vodič, šum, vysoké napětí, vysokofrekvenční, částečný výboj, gradient, elektromagnetické pole, vedení, napětí, prostředí, rušení, měřicí přijímač.

Abstract

This diploma thesis is focused on electromagnetic emissions of high-voltage equipment. The text of thesis is divided into four parts and conclusion. I focused on summarizing and description of the particular interference influences of high-voltage equipment at the beginning. On the introductory part, I have developed with other theoretical bloc, which describes methods for measuring of these phenomena through the antenna, which is also the main measurement methodology of this work. The second half of the work brings the description and characteristics of the elements used for measurement, measurement methods and resume of their results. Measurement methods were already mentioned measurement using antennas that I additionally expanded about a measurement of partial discharges. In conclusion, I enter the evaluation of results and overall outlook on the contribution of the work.

Key words

Corona, antenna, cable, noise, high voltage, high frequency, partial discharge, gradient, electromagnetic field, power line, voltage, surroundings, interference, measuring receiver.

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 7.5.2015

Bc. Vítězslav Dyk

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Laurencovi, CSc. za metodické vedení práce, veškeré rady, připomínky k práci a za cenné předané zkušenosti k dané problematice. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lubomíru Kočišovi z EGÚ, který mi předal další důležité poznatky k tématu práce. V neposlední řadě patří mé poděkování konzultantovi diplomové práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za pomoc s měřeními a ochotnou konzultací mých dotazů k práci.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
1.1 ZDROJE RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ A JEJICH TŘÍDĚNÍ	11
1.1.1 Třídění podle původu	11
1.1.2 Třídění podle kmitočtové oblasti	12
1.1.2.1 Definice oblastí	12
1.1.2.2 Nízkofrekvenční rušení	12
1.1.2.3 Vysokofrekvenční rušení	13
1.1.3 Šíření rušivých signálů	14
1.1.3.1 Cesty šíření	14
1.1.3.2 Šíření po vedení	15
1.1.3.3 Šíření vazbami	16
1.1.3.4 Šíření vyzářováním	17
1.1.4 Prostředí	17
2 JEDNOTLIVÉ DRUHY RUŠENÍ OD VYSOKONAPĚŤOVÝCH ZAŘÍZENÍ	19
2.1 ÚVOD	19
2.2 VYSOKOFREKVENČNÍ ŠUM ELEKTRICKÝCH VEDENÍ	20
2.2.1 Mechanismus vzniku šumového pole	20
2.3 ÚČINKY KORÓNY NA VODIČÍCH	21
2.3.1 Fyzikální vlastnosti koróny na vodičích	21
2.3.1.1 Všeobecně	21
2.3.1.2 Činitelé při vzniku koróny	22
2.3.1.3 Povrchový gradient vodiče	22
2.3.1.4 Průměr vodiče	23
2.3.1.5 Stav povrchu vodičů	23
2.3.1.6 Atmosférické a povětrnostní podmínky	23
2.4 VÝPOČET GRADIENTU NAPĚTÍ NA POVRCHU VODIČE VENKOVNÍHO VEDENÍ	24
2.5 HLADINY VYSOKOFREKVENČNÍHO ŠUMU ZPŮSOBENÉ IZOLÁTORY, ARMATURAMI A ZAŘÍZENÍM ROZVODEN (S VÝJIMKOU NEDOKONALÝCH SPOJENÍ)	27
2.5.1 Fyzikální vlastnosti zdrojů vysokofrekvenčního šumu	27
2.5.2 Vysokofrekvenční šum vlivem výboje koróny na armaturách	28
2.5.3 Vysokofrekvenční šum izolátorů	28
2.6 JISKŘENÍ VLIVEM NEDOKONALÝCH SPOJENÍ	31
2.6.1 Fyzikální vlastnosti vysokofrekvenčního šumu	31
2.6.2 Příklady zdrojů	33
2.7 ZVLÁŠTNÍ STEJNOMĚRNÉ VLIVY	34
2.7.1 Všeobecně	34
2.7.2 Účinky koróny na vodičích	35
2.7.3 Konstrukční parametry	36
2.7.4 Napětí vedení, povrchový gradient a polarita	36
2.7.5 Povětrnostní podmínky	36
3 METODY MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	37
3.1 MĚŘENÍ POMOCÍ ANTÉN	37
4 MĚŘENÍ	44
4.1 ZÁKLADNÍ POPIS	44
4.2 POUŽITÉ PŘÍPRAVKY PRO MĚŘENÍ	44
4.2.1 Model vodič-zem:	44
4.2.2 Uspořádání hrot-miska	45

4.2.3	<i>Průchodka</i>	46
4.3	MĚŘENÍ V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE POMOCÍ ŠIROKOPÁSMOVÉ ANTÉNY.....	47
4.3.1	<i>Popis metody</i>	47
4.3.2	<i>Použité antény</i>	48
4.3.3	<i>Měřicí přijímač</i>	49
4.3.4	<i>Průběh měření</i>	50
4.3.5	<i>Příklad výsledné charakteristiky</i>	51
4.4	MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V LABORATOŘI VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	52
4.4.1	<i>Popis metody</i>	53
4.4.2	<i>Vazební jednotka</i>	54
4.4.3	<i>Vysokonapěťový zdroj zkušebního napětí</i>	55
4.4.4	<i>Průběh měření</i>	56
4.4.5	<i>Příklad výsledku</i>	56
5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	57
5.1	ORIENTAČNÍ MĚŘENÍ.....	57
5.1.1	<i>Výsledky měření rámovou anténou, vzdálenost 1 m</i>	57
5.1.2	<i>Výsledky měření rámovou anténou, vzdálenost 3 m</i>	58
5.1.3	<i>Výsledky měření BiLog anténou, vzdálenost 3 m</i>	59
5.2	HLAVNÍ MĚŘENÍ.....	59
5.2.1	<i>Naměřené hodnoty - přípravek vodič-zem, vodič 0,6 mm</i>	60
5.2.2	<i>Naměřené hodnoty - přípravek vodič-zem, vodič 1,6mm</i>	62
5.2.3	<i>Naměřené hodnoty - přípravek hrot-miska</i>	64
5.2.4	<i>Naměřené hodnoty - přípravek průchodka</i>	66
5.3	MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	67
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	72
	PŘÍLOHY	73

Seznam symbolů a zkratek

CISPR	Mezinárodní výbor pro vysokofrekvenční rušení (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques)
ČSN EN	Česká státní norma, identický překlad evropské normy
DVB-T	Digitální televizní vysílání-pozemní (Digital Video Broadcasting-Terrestrial)
EMC.....	Elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic compatibility)
EMI.....	Elektromagnetická interference (Electromagnetic interference)
FM.....	Frekvenční modulace
FMT	Rychlá modální transformace (Fast modal transform)
HDO.....	Hromadné dálkové ovládání
HW FFT.....	Hardwarová rychlá fourierova transformace (Hardware fast fourier transform)
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise (International electrotechnical commission)
MIL-Std	Vojenská norma (Military-standard)
nn	nízké napětí
PC.....	Počítač
TV	Televize
VF	vysokofrekvenční
VHF	Velmi krátké vlny (Very high frequency)
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
zvn.....	zvláště vysoké napětí

Úvod

Moderní doba je typická fungováním člověka v prostředí plném elektrických zařízení. Díky zvyšování spotřeby elektrické energie, nárůstu elektrických spotřebičů v lidském okolí a rozšiřování druhů výroby elektrické energie, může docházet ke stále většímu vzájemnému ovlivňování funkcí jednotlivých částí elektroenergetického řetězce výroba-přenos-spotřeba. Z tohoto důvodu je důležité průběžně sledovat a vyhodnocovat možnosti vzájemné koexistence různých prvků elektrické sítě. Jelikož je tato práce zaměřena na vysokonapětová zařízení, soustředím se dále hlavně na tento problém.

Počátky největšího rušení různými zdroji elektromagnetických emisí a koróny sahají do první poloviny 20. století. V těchto dobách docházelo k ovlivňování především dlouhých a středních vln. S postupem času tento vliv přešel také k velmi krátkým vlnám a televiznímu vysílání. Nejčastěji se problémy rušení vyskytovaly u přenosu energie, proto často docházelo k přezbrojování stožárů a zpříšňování daných norem. Nejvíce problémů pak přišlo s nástupem barevných televizorů, které byly na rušení velmi citlivé. V černobílých TV se rušení tolik neprojevovalo díky jejich nižší výrobní kvalitě. V dnešní době se již rušení korónou a dalšími zdroji nevěnuje příliš velká pozornost. Jednak díky tomu, že dle slov odborníků dnes tvoří většinu stěžovatelů na rušení pouze hrstka radioamatérů a někteří piloti letadel při přeletu v blízkosti rozvodů apod., ale hlavně díky nástupu plošného digitálního vysílání, které nabízí dojem dobré odolnosti proti rušení. Tento náhled na věc je sice z části oprávněný, ale dalo by se říci, že platí pouze při kvalitním vysílání. Řada odborníků zastává tvrzení, že pokud dojde k rušení přes hranici, kterou je DVB-T schopno vydržet díky své vyrovnávací paměti, nastanou mnohem horší následky, než u rušeného analogového vysílání. Rozpadání, zpoždění a zastavování obrazu je typickým příkladem takového rušení. Není tedy úplně správné odvádět pozornost od problematiky vysokonapětového rušení. Odolnost proti rušení se sice zvýšila, ale zdroje rušení stále zůstávají. Proto je důležité tyto emise sledovat, aby při náhlém vzniku problémů, mohlo být jednáno včasným a adekvátním řešením.

1 Úvod do problematiky

Abychom se mohli hlouběji seznámit s problémem elektromagnetické kompatibility, je třeba začít tam, kde elektromagnetické rušení vzniká. V následujících odstavcích si tedy popíšeme základní vlastnosti daných jevů a způsoby jejich řešení.

1.1 Zdroje rušivých signálů a jejich třídění

1.1.1 Třídění podle původu

Zdrojů elektromagnetického rušení je celá řada, proto jsou v následujících odstavcích uvedena základní hlediska pro třídění těchto jevů. Pro úplně nejjednodušší roztřídění rušivých signálů postačí charakter jejich původu:

- Přírodní
- Umělé

Přírodní rušivé signály nevznikají důsledkem činnosti člověka. Do této kategorie patří zejména přírodní elektromagnetické jevy v atmosféře (výboj blesku) a jevy mimozemského původu (polární záře, rušivé emise Slunce apod.). Nejčastěji se jedná o nepravidelné vysokofrekvenční rušivé signály. [1]

Umělé rušivé signály vznikají v důsledku činnosti člověka a můžeme je dále dělit na signály vytvářené:

- Záměrně
- Nezáměrně

Signály záměrně vytvářené se po proniknutí na nežádoucí místa stávají rušivými signály. Jsou to např. signály rádiových, televizních a radarových vysílačů, signály HDO, mobilních telefonů, ale také výkonové přenosy elektrické energie o velkých napětích a proudech. [1]

Nezáměrně vytvářené rušivé signály jsou vedlejším produktem přeměn a řízení elektrické energie a dalších činností. Do této skupiny zařazujeme zejména rušivé jevy vznikající na nelineárních zátěžích (např. obloukové pece, zářivky, polovodičové měniče), při poruchách napájení (zkratky, zemní spojení, činnost výkonových spínačů a pojistek apod.) a mnoho

dalších jevů, včetně elektrostatických výbojů vznikajících při pohybu hmot v izolujícím prostředí. [1]

1.1.2 Třídění podle kmitočtové oblasti

1.1.2.1 Definice oblastí

Třídění rušivých signálů dle kmitočtu je z mnoha hledisek zásadní, protože nám poskytne dobrý přehled o charakteru a rozdílech mezi danými ději, úzce také souvisí jak se způsoby řešení, tak s výběrem vhodných omezujících a odrušovacích prostředků. Dělení na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční oblast je obecně vymezeno kmitočtem 9 kHz. Pod touto hranicí můžeme nalézt některé nízkofrekvenční jevy spojené s frekvencí elektrorozvodné sítě a jejími harmonickými, které se nejčastěji uvažují do řádu padesát. Nad hranicí 9 kHz můžeme najít vysokofrekvenční rušení, které je však často normami sledováno pro oblast až od 150 kHz výše. [1]

1.1.2.2 Nízkofrekvenční rušení

Nízkofrekvenční rušení nejčastěji spojujeme s jevy, jako jsou pomalé změny napájecího napětí, flickr, zvlnění stejnosměrného napájecího napětí, krátkodobé poklesy a přerušení napájecího napětí, nesymetrie napětí, signály v napájecích sítích a elektrická a magnetická pole, dále stručně charakterizovanými. [1]

Pomalé změny napájecího napětí mimo přípustné tolerance nejčastěji způsobují významné změny výkonu odebíraného z rozvodné sítě. Spotřebiče způsobující tento jev jsou obloukové pece, svařovací, elektrolytická a galvanizační zařízení, pohony s velkými výkony a další zařízení charakteru trvalé zátěže s měnícími se parametry. [1]

Flickr neboli opakující se krátkodobá změna napájecího napětí se nejčastěji projevuje kolísáním svítivosti žárovkových svítidel (blikání). Důvodem flickru jsou opakované prudké změny zatížení rozvodné sítě kolísáním odběru např. při bodovém svařování apod. Pro lidské oko byla shledána jako nejkritičtější kmitočtová oblast od zlomků do několika desítek hertzů.

Zvlnění stejnosměrného napájecího napětí má projev pomocí trvalé přítomnosti střídavé složky v důsledku např. nedokonalé filtrace usměrněného síťového napětí, nebo na zařízení napájeném z akumulátorů při jejich dobíjení za provozu. [1]

Krátkodobé poklesy a přerušení napájecího napětí způsobené spínáním zátěží, poruchovými jevy a jejich odstraňováním (opětné zapínání). Tyto jevy jsou charakteristické zbytkovým napětím a dobou trvání. Některé druhy připojených zařízení mohou bez zvláštních opatření v případě takové poruchy zkolabovat, popř. ztratit data. [1]

Nesymetrie napětí se zpravidla projevuje jako kombinace amplitudové a fázové nesymetrie třífázového napájecího systému způsobená připojením nesymetrické třífázové zátěže nebo velkými jednofázovými či dvoufázovými zátěžemi (např. u střídavé trakce). [1]

Signály v napájecích sítích reprezentuje především signál HDO, popř. další komunikační přenosy v sítích nn, vn a vvn. Kmitočty těchto signálů nejsou shodné s kmitočtem sítě a jeho násobky, ale spadají zpravidla do nízkofrekvenční oblasti. Při náhodném vzniku rezonancí např. s kompenzačními prostředky a reaktancemi sítě a zátěží může dojít k haváriím. [1]

Elektrická a magnetická pole se šíří prostorem, na rozdíl od všech předchozích případů, kde se rušivé signály šíří po vedení. Rušivá elektrická pole jsou vytvářena hlavně vodiči vedení vn, vvn a zvn. Významná magnetická pole, co se vlivu týče, vytvářejí vodiče protékané značnými proudy, jako svařovací kabely, přívody elektrod obloukových pecí, galvanizačních a elektrolytických lázní apod. Mohou se také přechodně vyskytovat v blízkosti vodičů při zkratech a jiných proudových rázech v elektrizační soustavě. [1]

1.1.2.3 Vysokofrekvenční rušení

U vysokofrekvenčního rušení dochází k významnějšímu rozlišení způsobu šíření, než je tomu u rušení nízkofrekvenčního. Musíme brát zřetel na to, že při vhodných podmínkách může rušivý signál šířený po vedení využít toto vedení jako vysílací anténu a pokračovat ve formě elektromagnetického pole. Stejně tak může nastat i opačný jev, může dojít k zachycení elektromagnetického pole vedením nebo další částí zařízení jako přijímací anténou a dále k šíření rušení „po vedení“. O tom, zda rušivý signál přijde k rušenému zařízení po vedení, nebo polem, rozhoduje především konkrétní konfigurace zdroje a příjemce rušení, charakter prostředí, vzájemná vzdálenost a způsob propojení apod. [1]

K vysokofrekvenčnímu rušení v oblasti od 9 do 150 kHz dochází především díky signálům generovaným výkonovými polovodičovými měniči a spínanými zdroji zejména v rozsahu kmitočtů odvozených od nosného kmitočtu pulsně šířkové modulace. [1]

I když se jedná o poměrně silné rušivé signály, normy tuto oblast z hlediska emisí zatím většinou nepokrývají. [1]

Rušení v oblasti nad 150 kHz bývá zpravidla označováno jako rušení rádiové. Zdroji emisí jsou opět především polovodičové měniče a spínané zdroje s ději spojenými se spínáním a rozpínáním polovodičových součástek budícími vysokofrekvenční kmitání spolupůsobením parazitních indukčností a kapacit připojených součástek a obvodů. Mezi další zdroje můžeme zařadit průmyslová, vědecká a lékařská vysokofrekvenční zařízení produkující tyto kmitočty jako hlavní produkt, tj. např. zařízení pro dielektrický, indukční a mikrovlnný ohřev, elektroerozní obrábění atd. Zdrojem vyzařovaného rušení jsou rovněž výboje a jiskření na velmi namáhaných částech izolátorů, korónové výboje a jiskření na nedokonalých kontaktech. Zcela evidentním rušivým zdrojem jsou také pevné a mobilní rádiové vysílače. [1]

Přechodné děje si můžeme představit jako jednorázové nebo různě často opakované napětěvé nebo proudové impulsy tvaru rázové nebo tlumené kmitavé vlny. Mezi vysokofrekvenční jevy jsou zařazeny právem, protože vzhledem ke strmé náběžné hraně rušivých impulsů spadá generované spektrum do vysokofrekvenční oblasti (v některých případech sahá až po desítky MHz). Tyto jevy často spojujeme především s atmosférickými a elektrostatickými výboji a dále se spínacími jevy v elektrických sítích a rozvodech, jako např. vypínáním indukčních zátěží, poruchami a průrazy izolace, spínáním kompenzačních kondenzátorů apod. Zdrojem výše uvedených jevů bývají také rychle spínané moderní výkonové polovodičové součástky. Tyto jevy mohou nepříjemně projevit tak, že jsou zesilovány při odrazech šířících se vln na koncích impedančně nepřizpůsobeného vedení. Některé z těchto vlivů mohou být energeticky vydatné, např. rušení vyvolané přímým nebo blízkým úderem blesku s možnými destrukčními účinky. Jiné jevy jsou zas natolik rychlé, že dochází k jejich snadnému šíření parazitními cestami i vyzařováním do širokého okolí. [1]

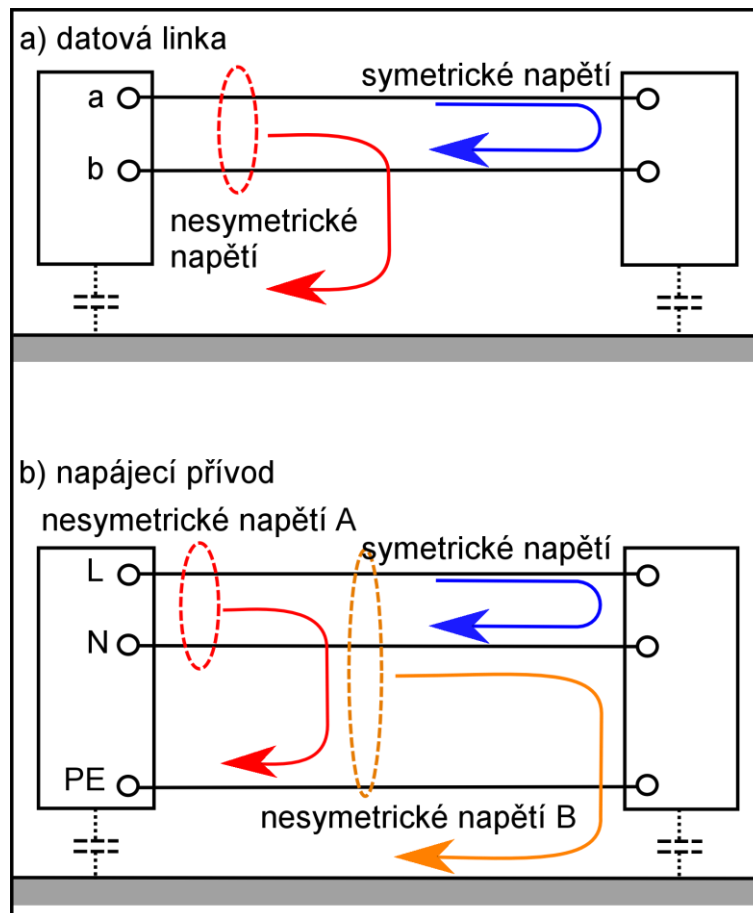
1.1.3 Šíření rušivých signálů

1.1.3.1 Cesty šíření

Základním předpokladem pro „úspěšné rušení“ je existence cesty, kterou se rušivý signál šíří od zdroje k zařízení citlivému na rušení. Signály rušení se v zásadě šíří třemi způsoby: kontaktně po vedení nebo bezkontaktně vazbami či vyzařováním. [1]

1.1.3.2 Šíření po vedení

Aby došlo k šíření rušivého signálu je nutné přímé propojení napájecími nebo datovými vodiči. Galvanické propojení je pro elektrický signál velmi vhodným prostředím, ačkoliv se impedanční poměry pro rušivé signály mohou od impedančních poměrů pro kmitočet pracovního signálu výrazně lišit. Na vedení pak rozeznáváme dva typy rušivého napětí: symetrické a nesymetrické (obr. 1). [1]

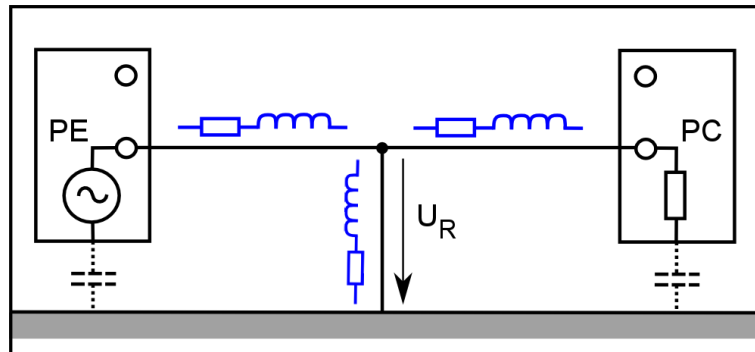


Obr. 1: Typy rušivých signálů šířících se po vedení [1]

Symetrické napětí můžeme charakterizovat jako napětí mezi dvěma libovolnými vodiči daného vedení. Toto napětí je vyvolané rušivým zdrojem připojeným mezi tuto dvojici vodičů, např. připojeným polovodičovým měničem. Symetrické rušivé napětí vyvolá rušivý proud, který se uzavírá ve smyčce tvořené dotčenou dvojicí vodičů. [1]

Nesymetrické napětí se nachází mezi pracovními vodiči (z hlediska rušení na společném potenciálu) a vztažným bodem – např. zemí nebo kostrou zařízení. Jedná se o rušení vyvolané např. napětím indukovaným rušivým polem společně do všech vodičů vedení proti zemi.

Rušivý proud je vyvolán rušivým napětím a uzavírá se ve smyčce mezi vedením a zemí, popř. kostrou spotřebiče. Na *obr. 1b* jsou ukázány možné rozdíly v případě výkonového napájení, kdy se rušivý proud vyvolaný nesymetrickým napětím může uzavírat buď uvnitř přívodu ochranným zemním vodičem (případ A), nebo mezi všemi přívodními vodiči a zemí, popř. uzemněnou konstrukcí (případ B). Díky tomu, že impedance jednotlivých vodičů proti zemi je různá, různé napěťové úbytky při nesymetrickém rušení často současně vyvolají symetrické rušení a výsledkem vznikne kombinované rušení obou typů. [1]



Obr. 2: Vazba společnou impedancí [1]

Velmi záluďný způsob přenosu rušení můžeme nalézt prostřednictvím společné impedance (někdy též vazba společnou impedancí), kdy zdroj rušení a rušený přístroj nemají společný živý nebo datový vodič, ale mají společnou impedanci – často v obvodu zemnicího vodiče. Rušivý proud, který je sváděn do země ze zdroje rušení vyvolává na společné impedanci úbytek napětí U_R , působící jako rušení na druhém, „odděleném“ přístroji (*obr. 2*). Tento společný vodič přitom může zcela vyhovovat z bezpečnostního hlediska, tedy hlediska síťového kmitočtu, při kterém je její impedance zanedbatelná. Pro vysokofrekvenční rušivý proud ovšem může reaktanční složka impedance vyvolat značné napěťové úbytky. [1]

1.1.3.3 Šíření vazbami

U šíření vazbami mezi zdrojem a příjemcem dochází především mezi blízkými vodiči, např. při vedení po společné trase nebo společném kabelu. Při tom se uplatňují vzájemné indukčnosti mezi vodiči a kapacita mezi vodiči. Vzájemná indukčnost se pohybuje zhruba v desetinách μH na metr délky vzájemného souběhu vodičů při jejich vzdálenostech do deseti centimetrů. Přitom při blízkosti uzemněných konstrukčních částí dochází k výraznému zmenšování této vazby. Pro kapacitu platí podobné hodnoty v jednotkách pF na metr délky. [1]

1.1.3.4 Šíření vyzařováním

Šíření vyzařováním je takový stav, kdy je rušivý signál k rušenému zařízení předáván prostřednictvím vyzařovaného elektromagnetického pole. Je vhodné uvažovat dva níže uvedené případy:

- v blízkém poli neplatí popis rovinnou vlnou a konstantní poměr elektrické a magnetické složky pole, tj. v obvyklých případech ve vzdálenostech kratších, než je dvojnásobek vlnové délky vyzařovaného rušení (např. pro 100 MHz je to vzdálenost přibližně 6 m),
- vzdálené pole je pro posuzování úrovně rušení vhodnější, protože může být popsáno rovinnou vlnou a přijímač i vysílač mohou být uvažovány jako náhradní anténa (uplatňuje se ve vzdálenostech větších, než je uvedeno shora, jestliže jsou oproti ní rozměry vysílače i přijímače podstatně menší). [1]

Popisované pole můžeme charakterizovat buď vyzařovaným výkonem, např. ve wattech na čtvereční metr, nebo intenzitou elektrického pole ve voltech na metr, popř. intenzitou magnetického pole v ampérech na metr. Úrovně se nejčastěji vztahují k referenční úrovni, např. v decibelech na mikrovolt na metr. [1]

1.1.4 Prostředí

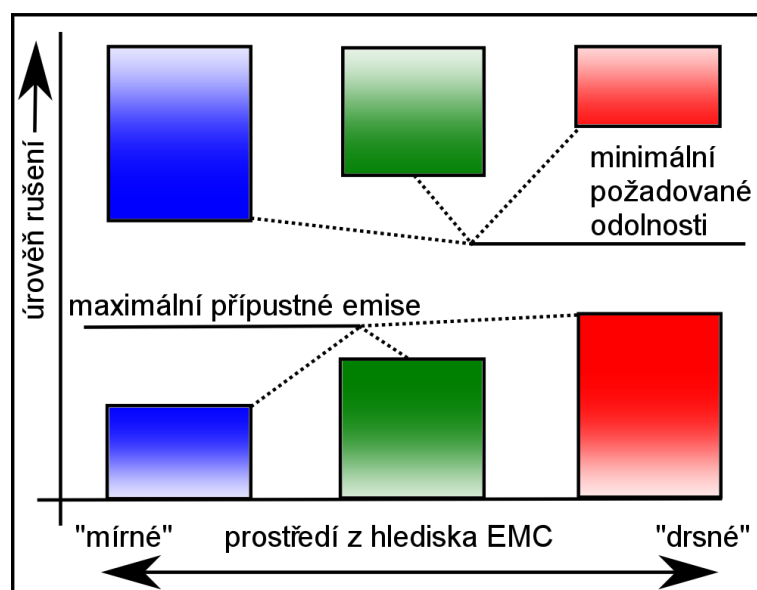
Pro stanovení EMC výrobku je hlavním aspektem to, pro jaké elektromagnetické prostředí je určen. Toto prostředí má své charakteristické úrovně elektromagnetického rušení jak v elektromagnetickém poli obklopujícím výrobek, tak v napájecích či datových vodičích k výrobku. Podle očekávané intenzity rušení rozlišujeme tyto kategorie prostředí:

- chráněné prostředí, které se vyznačuje velmi nízkými úrovněmi rušení, zajišťovanými např. odrušovacími prostředky na vstupech vedení do místnosti, zálohovaným napájením apod. (prostředí typické např. pro výpočetní centra, některé laboratoře apod.),
- obytné prostředí, charakteristické relativně nízkými úrovněmi rušení, kde se nevyskytují silně rušící zdroje (zejména prostředí v obytných objektech napájených z veřejné rozvodné sítě nn, ale i v dalších takto napájených prostorech, jako jsou např. obchody, kanceláře, banky, kina, provozovny lehkého průmyslu, dílny apod.),

- průmyslové prostředí, které je typické vysokými úrovněmi rušení, kde se vyskytují silně rušící zdroje a které je napájeno z neveřejné průmyslové rozvodné sítě, která není určena pro napájení obytných objektů. [1]

Mimo výše uvedené příklady prostředí, můžeme najít i další zvláštní elektromagnetická prostředí vyznačující se specifickými rušivými signály, jako např. rozvodny vn a vvn, nemocniční prostředí, prostředí telekomunikačních ústředen, trakčních vozidel apod. [1]

Každé prostředí má své stanovené meze emisí, tzn. maximální přípustné úrovně jednotlivých typů emitovaného rušení, a příslušně vyšší meze odolnosti, tzn. minimální přípustné hodnoty odolnosti výrobku proti jednotlivým typům rušení. Odstup mezi maximální přípustnou úrovní konkrétního emitovaného rušení a minimální přípustnou hodnotou odolnosti proti tomuto rušení v daném prostředí označujeme jako rezervu kompatibility a respektuje vzájemné spolupůsobení několika rušivých zdrojů v daném prostředí. [1]



Obr. 3: Vztah mezi přípustnými emisemi a požadovanou odolností podle typu prostředí [1]

Vztah mezi rušením a odolností zařízení pro určitá prostředí je ukázán na obr. 3. Je evidentní, že výrobek určený pro méně rušivé prostředí musí mít nižší (přísnější) mez emisí, ale současně je pak možné připustit nižší (méně přísnou) mez odolnosti v porovnání s výrobkem určeným pro prostředí „více rušivé“. Je-li např. výrobek určen pro použití v obytném i průmyslovém prostředí, musí mít meze emisí odpovídající pro obytné prostředí a meze odolnosti odpovídající pro průmyslové prostředí. [1]

2 Jednotlivé druhy rušení od vysokonapětových zařízení

2.1 Úvod

U vedení vysokého napětí, asi nad 1 kV, může být generován vysokofrekvenční šum v širokém pásmu kmitočtů

- a) výboji koróny ve vzduchu na povrchu vodičů a armatur
- b) výboji a jiskřením na vysoce namáhaných plochách izolátorů
- c) jiskřením na přerušených nebo nedokonalých spojeních [2]

Zdroje a) a b) bývají obvykle rozprostřeny po délce vedení. Zdroje c) jsou nejčastěji lokální. Elektrické namáhání vzduchu na povrchu armatur a vodičů může způsobit výboje koróny u vedení, kde se napětí pohybuje zhruba nad 100 kV. Mezi lokální zdroje vysokofrekvenčního šumu můžeme zařadit např. jiskření na nedokonalých spojeních nebo prasklých či porušených izolátorech. Ke generování šumu může docházet také u vysokonapětových přístrojů v rozvodnách, kdy se pak vzniklý šum může šířit podél venkovního vedení. [2]

Dojde-li k tomu, že má pole vysokofrekvenčního šumu u antény používané pro příjem rozhlasových a televizních signálů příliš vysokou intenzitu, může dojít ke snížení kvality jak u zvukového výstupu, tak i obrazu pro TV. [2]

Generování vysokofrekvenčního šumu závisí na povětrnostních podmínkách. Výskyt koróny na vodičích můžeme pozorovat nejčastěji za mokra, je to způsobeno kapkami vody, které se v těchto podmínkách tvoří na vodičích. U nedokonalých kontaktů může ale dojít jejich k přemostění vodou a generování vysokofrekvenčního šumu v tomto případě ustává. Z toho vyplývá, že různá přerušení a nedokonalá spojení jiskří nejčastěji za suchého počasí. Za pěkného počasí se rušení vyskytne spíše na čistých a suchých izolátorech, naproti tomu k delšímu jiskření na povrchu izolátorů dojde na znečištěných částech, zejména ve vlhkém prostředí, námraze či mlze. [2]

Abychom mohli zajistit příjem nerušeného rozhlasového a televizního signálu, je důležité, aby byl na vstupu přijímače dostatečný poměr žádaného signálu k nežádanému

šumovému signálu. Rušení můžeme proto nejčastěji zjistit v situaci, je-li intenzita signálu malá a povětrnostní podmínky přispívají ke vzniku VF šumu. [2]

Při zkoumání vysokofrekvenčního šumu je důležité zahrnout myšlenku, že místní pole mohou být způsobena zdrojem nebo více zdroji, protože šíření šumu podél vedení se může nést do značných vzdáleností. [2]

2.2 Vysokofrekvenční šum elektrických vedení

2.2.1 Mechanismus vzniku šumového pole

Výboje koróny (*obr. 4*) na vodičích, izolátorech nebo armaturách vedení nebo jiskření na nedokonalých spojích mohou být zdrojem vysokofrekvenčního šumu, protože injektují proudové pulsy do vodičů vedení. Ty se šíří podél vodičů v obou směrech od místa vstupu. Různé složky kmitočtového spektra těchto pulsů mají různé účinky. [2]



Obr. 4: Typický korónový výboj na izolátoru a armaturách [17]

V kmitočtovém pásmu od 0,15 MHz do několika MHz je šum výsledkem efektu šíření podél vedení. Přímé elektromagnetické vyzařování zdrojem pulsu nepřispívá ve větší míře

k úrovni šumu. Vlnová délka je v tomto případě velká vzhledem k rozměrům vodiče a tak vedení není účinným zářičem. Současně se však podél vedení šíří s každou spektrální složkou elektrické a magnetické pole. Z pohledu relativně nízkého útlumu tohoto šíření je šumové pole dáno souhrnem účinků všech výbojů rozprostřených v mnoha kilometrech podél vedení v obou směrech od místa příjmu. Nutno poznamenat, že blízko vedení převládá složka pole vedeného, zatím dále od vedení převládá složka vyzařovaného pole. Rozhraní není ostré a jev není dobře prozkoumán. Není důležitý na nízkých kmitočtech, avšak na středních kmitočtech je patrný. [2]

Pro spektrální složky nad 30 MHz, kde jsou vlnové délky blízké rozměrům vodičů nebo menší, mohou být však účinky šumu vysvětleny z velké části pomocí teorie antén aplikované na zdroj šumu, protože šíření podél vedení není podstatné. [2]

Zde však je třeba poznamenat, že 30 MHz nepředstavuje jasnou dělící čáru mezi těmito dvěma různými mechanismy produkujícími šumová pole. [2]

2.3 Účinky koróny na vodičích

2.3.1 Fyzikální vlastnosti koróny na vodičích

2.3.1.1 Všeobecně

Elektrický výboj koróna se nejčastěji objevuje na povrchu vodiče nebo v jeho blízkosti, prostřednictvím tohoto děje dochází ke generování vysokofrekvenčního šumu. Definice koróny je interpretována jako „slabě světélkující výboj vznikající v blízkosti vodiče a omezený na oblast obklopující vodič, kde elektrické pole překračuje určitou hodnotu“. Základní fyzikální pochod koróny je vysvětlován generováním elektronů neboli formování laviny, nicméně mnoho vlastností korónového výboje je dosud neznámých a nedefinovaných. Gradient v blízkosti vodičů je gradient s nejvyšší hodnotou. Pokud je tento gradient nebo elektrické namáhání dostatečně vysoké, kterýkoliv elektron ve vzduchu kolem vodiče způsobuje ionizaci molekuly plynu. Elektrony, které vzniknou při této ionizaci, způsobují lavinu. Pokud dojde k uvolnění dalšího elektronu v tomto gradientu procesem originální elektronové laviny, vznikne pak tímto sekundárním pochodem nová lavina a výboj koróny se vyvíjí dále. [2]

U vodičů vedení se můžeme domnívat, že tímto důležitým sekundárním pochodem je vystřelování elektronů z molekul plynu vysokoenergetickým ultrafialovým zářením, tzv. fotoionizací, která vzniká v původní lavině. Výsledkem několika výzkumů bylo to, že při kladném stavu vodiče je hladina generovaného vysokofrekvenčního šumu podstatně vyšší, než u záporného vodiče. Pro případ kladného vodiče venkovního vedení je katoda natolik daleko, že emise katody není důležitá a sekundární pochod existující v tomto případě je fotionizace plynu. [2]

Při procesu vytváření trsového výboje koróny na určitém místě povrchu vodiče jsou přítomna dvě pulsní pole. V blízkosti trsu vznikne místní pole, podél vedení pak přímé pole vlivem pulsů probíhajících vedením. Při návrhu vedení vvn se považuje pouze přímé pole jako důležité. Nejvíce užitečná měření jsou prováděna v určité vzdálenosti od místa trsu na vodiči vedení. [2]

2.3.1.2 Činitelé při vzniku koróny

To, aby měl výboj možnost na povrchu vodiče vzniknout, závisí na několika činitelích, např. na:

- a) Teoretickém povrchovém gradientu vodiče, který závisí na:
 - 1) Napětí systému
 - 2) Průměru vodiče
 - 3) Vzdálenosti vodiče od země a od ostatních fázových vodičů
 - 4) Počtu vodičů ve fázi nebo ve svazku
- b) Průměr vodiče
- c) Stavů povrchu vodiče
- d) Atmosférických a povětrnostních podmínkách [2]

O každém z těchto činitelů bude pojednáno samostatně

2.3.1.3 Povrchový gradient vodiče

Intenzita elektrického pole vodiče neboli povrchový gradient napětí, je jednou z nejdůležitějších veličin při určování vysokofrekvenčního šumu vedení, zejména určuje-li ho koróna na vodičích. Díky těsné závislosti koróny na vodiči na tomto napěťovém gradientu je velice důležité použít metodu výpočtu, která dává hodnotu gradientu s přesností asi 1%. Jelikož jsou vodiče obvykle splétané, povrchový napěťový gradient podél obvodu vodiče

kolísá kolem střední hodnoty. Obvykle se však vypočte gradient pro hladký povrch se stejným vnějším průměrem, i když se pak zavádí experimentální činitel respektující zapletení lana. [2]

V kapitole 2.4 jsou uvedeny vzorce pro výpočet gradientu napětí na povrchu vodiče pro některé jednoduché případy vedení.

2.3.1.4 Průměr vodiče

Se zvyšujícím průměrem vodiče stoupá i hladina vysokofrekvenčního šumu, i když povrchový gradient vodiče zůstává stejný. Tento jev nastane díky tomu, že pokles elektrického pole od povrchu vodiče se zmenšuje se vzrůstajícím průměrem. Tím pádem může elektrické pole obklopující velký vodič podporovat delší trsy koróny, než elektrické pole kolem malých vodičů. [2]

2.3.1.5 Stav povrchu vodičů

Vznik koróny ovlivňuje z hlediska typu a vlastností vodičů mnoho faktorů. Vodiče, například kruhové nebo segmentového zapletení, podmínky jeho povrchu jako třeba stupeň hladkosti nebo drsnosti, přítomnost či absence znečištění, kapky vody, sněhové vločky atd. Nové vodiče mívají často intenzivnější korónu díky nepravidelnosti povrchu, jako drsnosti hliníku, ptačích výtrusů, prachu, hlíny a bahna nebo dalších usazenin způsobujících korónu i za dobrého počasí. Jakmile je však vedení pod napětím, s postupem času dojde k poklesu ztrát korónou a vysokofrekvenčního šumu. Obvykle se pak mluví o dvou obdobích: první trvá několik minut po připojení vedení pod napětím. Koróna spálí částice a prach usazené na vodiči předtím, než byl pod napětím. Delší čas zase způsobí to, že vodič zcela zčerná, zestárne a zničí se mastnota z nového vodiče. [2]

Další věc, prokázaná stárnutím vodiče je to, že klesá jeho hladina šumu a to i za deště. Nový vodič má hydrofobní povrch díky zbytkům oleje z výroby. Voda se na mastném povrchu shlukuje do kapek. Při stárnutí se povrch vodiče stává hydrofilním, čímž vodní kapky vnikají do pramenů vodiče. [2]

2.3.1.6 Atmosférické a povětrnostní podmínky

Pokles atmosférického tlaku nebo nárůst okolní teploty nebo oba dva tyto faktory mohou snížit hustotu vzduchu. Tím pádem klesá elektrická pevnost vzduchu a dochází ke zvýšení

pravděpodobnosti výskytu koróny na vodiči. Atmosférický tlak bývá důležitý pouze v nadmořských výškách nad 1000 m. Přítomnost koróny je více pravděpodobná v oblastech, kde je dostatečně vlhko, mlha, mráz nebo nízké teploty, a kde se může vytvořit led nebo vodní kapky na povrchu vodiče. Déšť a sníh mají za příčinu nejintenzivnější korónu vodiči. Takto může dojít k nárůstu vysokofrekvenčního šumu o více než 20 dB oproti podmínkám za sucha. Kapky vody nebo sníh, které se shromažďují na povrchu vodičů během bouřek, způsobují významné změny elektrického pole a vytvářejí velký počet zdrojů koróny. K výboji může také dojít, když sněhová vločka nebo kapka vody míjí vodič a inicializuje se výboj mezi vodičem a částicí. [2]

2.4 Výpočet gradientu napětí na povrchu vodiče venkovního vedení

Výpočet povrchového gradientu se realizuje pomocí dvou metod. Jejich výsledky jsou velmi podobné jak pro nesvazkové vodiče, tak i pro symetrické svazky složené z nízkého počtu svazkových vodičů - do tří až čtyř. U svazků s větším počtem vodičů a pro nesymetrické svazky je nejlepší použít metody založené na principu postupného zrcadlení (Rovnice 1). Software, který se v této době používá pro řešení těchto problémů nejčastěji, využívá tyto metody. Jednoduchá metoda zrcadlení může být použita v případech, kde je výška vodičů vůči zemi a mezifázová nebo mezipólová vzdálenost velká vůči průměru vodičů nebo rozměru svazků a vzdálenost vodičů ve svazku je velká vůči průměru vodičů ve svazku. [18]

Postup metody je takový, že se vypočítá náboj na každém vodiči nebo vodiči ve svazku za pomoci Maxwellových potenciálních koeficientů, poté se vypočte povrchový gradient napětí vodiče (bere se v úvahu pouze náboj na vodiči, pro který se provádí výpočet). U svazkových vodičů ho můžeme nahradit jedním ekvivalentním vodičem, který má stejnou kapacitu jako svazek. Určení gradientu napětí u jednoduchých vodičů a symetrických svazků s malým počtem vodičů lze pomocí jednoduchých vzorců. [18]

Průměrný gradient, $g_{stř}$, získáme pomocí Gaussova teorému, podle něhož je elektrické pole v okolí povrchu vodiče rovno podílu povrchové hustoty náboje δ a permitivity ϵ_0 .

$$g_{stř} = \frac{\delta}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 n \pi d} \quad (\text{Rovnice 1}) [18]$$

kde:

q = povrchový náboj na jednotku délky

n = počet vodičů ve svazku

d = průměr svazkového vodiče [cm]

$\varepsilon_0 = 1/(36 \cdot \pi \cdot 10^9)$, permitivita vakua [F/m]

Pro jednofázové vedení se zpětnou zemní cestou nebo jednopólní stejnosměrné vedení je výpočet náboje q jako funkce U velmi jednoduchá, protože kapacita na jednotku délky C je dána:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_{eq}}} \quad (\text{Rovnice 2})[18]$$

kde:

h = výška vodiče nad zemí [cm]. Obvykle se uvažuje průměrná výška, což je výška vodiče u stožáru nebo střední hodnota výšek dvou stožárů, pokud se výšky liší, a odečtení 2/3 průhybu s nejnižším bodě vodiče. [18]

r_{eq} = poloměr vodiče nebo poloměr ekvivalentního vodiče svazku v centimetrech

$r_{eq} = d/2$ v případě jednoduchého vodiče

$r_{eq} = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{nd}{b}}$ v případě svazkového vodiče, kde b je průměr roztečné kružnice svazkových vodičů

Pak je

$$g_{str} = \frac{q}{\pi\varepsilon_0 nd} = \frac{CU}{\pi\varepsilon_0 nd} = \frac{U}{\frac{nd}{2} \ln \frac{2h}{r_{eq}}} \quad (\text{Rovnice 3})[18]$$

Aby se získal g_{str} v kilovoltech na centimetr, je třeba U vyjádřit v kilovoltech, v případě střídavých vedení je obvykle použita efektivní hodnota. [18]

Obecný případ vícefázových vedení nebo vícepólových stejnosměrných vedení vyžaduje výpočet nábojů na každém vodiči řešení následující soustavy rovnic:

$$[p] \cdot [q] = [U] \quad (\text{Rovnice 4})[18]$$

Kde $[q]$ a $[U]$ jsou sloupcové matice nábojů a napětí na vodičích nebo svazcích a $[p]$ je čtvercová matice potenciálových koeficientů vícevodičové konfigurace:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{eqi}} \quad (\text{Rovnice 5})[18]$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (\text{Rovnice 6})[18]$$

kde:

D_{ij} = vzdálenost mezi vodičem nebo svazkem i a j

D'_{ij} = vzdálenost mezi vodičem nebo svazkem i a zrcadlovým obrazem vodiče nebo svazku j

Co se týče napětové matice, je nutno uvažovat následující prvky pro tyto praktické případy:

a) Jednoduchá třífázová vedení

$$[U] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \text{ kde } a = -\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (\text{Rovnice 7})[18]$$

kde U je modul fázového napětí vedení.

Matice je platná pro vedení bez zemního lana (lan). Pokud se bere v úvahu přítomnost zemních lan, je třeba vložit do napětové matice ta napětí, která jsou rovna nule na těchto lanech. Řád matice se zvýší, ale to není velkým problémem při řešení rovnic (Rovnice 4). Je zde i možnost rozdělení matic potenciálových koeficientů do submatic pro fázové vodiče a zemní lana a do vazebních matic snížit řád na takový, jako by byl pro vedení bez zemních lan. Zemní lana zvyšují gradient napětí vodičů, nicméně u obvyklých konfigurací je takový vzrůst nízký, 1% až 3%. [18]

b) Třífázová vedení s více potahy

Pro tento případ matice napětí [U] obsahuje řadu prvků, které berou v úvahu všechny fázové vodiče nebo svazky a také zemní lana, pokud jsou použita. Například, matice napětí dvojitého třífázového vedení se dvěma zemními lany je sloupcová matice osmého řádu. Odpovídající matice potenciálových koeficientů je čtvercová matice osmého řádu, jejíž inverze vyžaduje počítač. V současné době je však mnoho možností takových výpočtů pro většinu typů třífázového vedení s více potahy. [18]

Je důležité říci, že relativní pozice odpovídajících fází v různých potazích ovlivňují náboje na vodičích a je důležité je brát v úvahu při výpočtu gradientů vícepotahových vedení. [18]

c) Bipolární stejnosměrná vedení

$$[U] = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (\text{Rovnice 8})[18]$$

kde U je hodnota napětí pólu k zemi.

Zemní lana mohou být brána v úvahu stejně tak, jako v případě třífázových střídavých vedení. Gradient napětí odvozený ze vzorce (Rovnice 1) je střední hodnota $g_{stř}$ podél obvodu vodiče nebo svazkového vodiče, podle toho, jak je počítán ze střední hustoty náboje na vodiči. [18]

$$\left(\delta = \frac{q}{n\pi d} \right) \quad (\text{Rovnice 9})[18]$$

Pro jednoduché vodiče může být tato hustota náboje považována jako rovnoměrná podél obvodu a proto se gradient uvažuje jako konstantní. U vodičů ve svazku není hustota náboje rovnoměrná vlivem vzájemného stínícího efektu vodičů. Hustota náboje a tím i gradient jsou větší směrem ven a menší směrem do svazku. [18]

Následujícím vzorcem je zjednodušeně možné zjistit změnu gradientu kolem obvodu:

$$g_{\Theta} = g_{stř} \left(1 + \frac{(n-1)d}{b} \cos \Theta \right) \quad (\text{Rovnice 10})[18]$$

Kde Θ je úhel mezi:

- poloměrem od středu svazkového vodiče ke zvolenému bodu na povrchu svazkového vodiče
- přímkou procházející středem svazku a bodem, kde je maximální gradient na stejném svazkovém vodiči [18]

Maximální gradient g_{\max} je dán:

$$g_{\max} = g_{stř} \left(1 + \frac{(n-1)d}{b} \right) \quad (\text{Rovnice 11})[18]$$

2.5 Hladiny vysokofrekvenčního šumu způsobené izolátory, armaturami a zařízeními rozveden (s výjimkou nedokonalých spojení)

2.5.1 Fyzikální vlastnosti zdrojů vysokofrekvenčního šumu

Izolátory, armatury a zařízení rozveden se mohou stát zdrojem vysokofrekvenčního šumu, který může rušení rozhlas a v některých případech i televizi. K tomu může dojít i vlivem různých jevů, jako jsou výboje koróny ve vzduchu u izolátorů a armatur, povrchové výboje na izolátorech a jiskření vlivem nedokonalých spojení. Komutační jevy

konvertorových zařízení, které mohou také být zdrojem vysokofrekvenčního šumu, jsou rozebrány v kapitole 2.7. Tato kapitola řeší vlastnosti koróny a povrchových výbojů z hlediska fyzikálního. [2] Jiskření vlivem nedokonalých spojení je vysvětleno v kapitole 2.6.

2.5.2 Vysokofrekvenční šum vlivem výboje koróny na armaturách

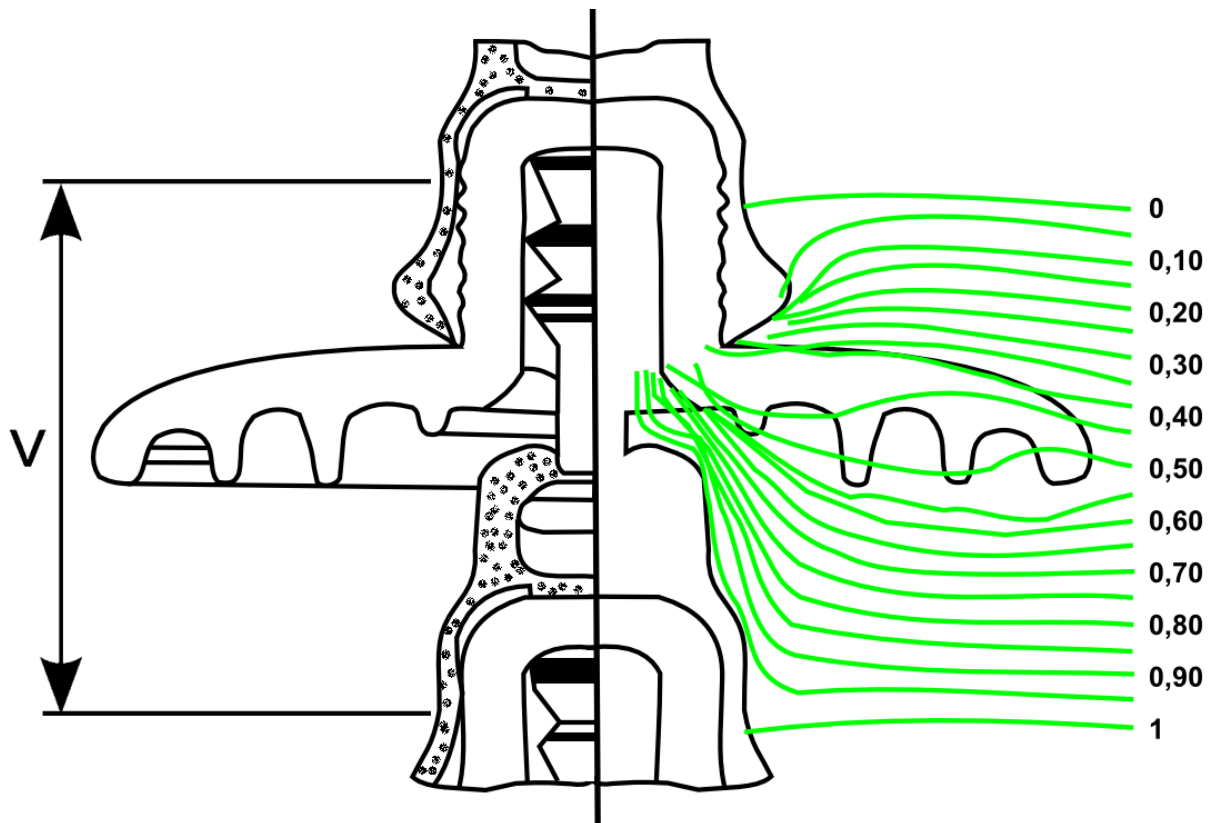
Korónové výboje jsou způsobeny vysokými gradienty napětí na některých plochách armatur, jako např. závěsné svorky, ochranné kruhy a růžky, rozpěrky a spojky. Jestliže dojde k podstatnému zvýšení napětí na armaturách, objeví se různé, početné výboje. Jen některé z těchto výbojů mohou generovat vysokofrekvenční šum, ale všechny do jisté míry světélkují a přispívají ke ztrátám korónou. Vlastnosti jsou podobné těm, které jsou popsány v kapitole 2.3 a týkají se vodičů. Podobně v tomto případě, objeví se různá stádia koróny v závislosti na napětí v tomto pořadí: jednotlivý trs pro zápornou korónu, Trichelovy nebo záporné pulsy, doutnavý a předprůrazový trs pro zápornou korónu. Doutnavý výboj nezpůsobuje vysokofrekvenční šum, ale trsy již ano. Trichelovy pulsy produkují nízké hladiny vysokofrekvenčního šumu, avšak předprůrazové trsy způsobují při velmi vysokých napětích velmi vysoké hladiny. [2]

Nejvyšší hladiny šumu můžeme najít ve stádiu předprůrazových trsů jak kladných, tak záporných. Výskyt těchto jevů je však při daleko vyšších gradientech, než jsou při normálních napětích. Proto jsou pro praxi málo zajímavé. Stejně tak jako v případě vodičů, má vysokofrekvenční šum armatur tendenci zvyšovat se za vlhka nebo za deště v důsledku zvýšení lokálních gradientů vlivem kapek vody na povrchu armatur. [2]

2.5.3 Vysokofrekvenční šum izolátorů

Šum izolátorů může vznikat různými příčinami. Většina z nich má spojitost s jevy objevujícími se na povrchu izolátorů. Jako příklad je možné dát např. drobné výboje vlivem zvýšených lokálních gradientů, výboj koróny na nerovnostech vytvořených suchými usazeninami nebo kapkami vody, jiskry přesakující přes vysušená místa na znečištěných izolátorech, která jsou způsobena svobodnými proudy. Pouze v minimu případů je šum díky jevům vyskytujícím se uvnitř izolátorů, např. na vadných izolátorech. Tím může být například jiskření ve vnitřních dutinách a prasklinách. Šum však může mít za zdroj výboje mezi cementem a porcelánem nebo sklem a může se objevit tehdy, jsou-li na těchto okrajích malé vzduchové mezery. [2]

Pokud jsou izolátory suché a čisté, proudové pulsy na počátku vysokofrekvenčního šumu jsou způsobeny výboji v místech vysokého gradientu napětí, v závislosti na geometrii a materiálu izolátoru a způsobu spojení s čapkou a roubíkem. *Obrázek 5* zachycuje ekvipotenciální čáry (vyjádřené jako zlomek napětí) podél příčného řezu čistého a suchého izolátoru. Zde je třeba říci, že čáry jdou daleko hustší a gradienty jsou tím pádem vyšší v blízkosti čapky a roubíku tam, kde se výboje způsobující šum skutečně objevují. Hodnoty lokálních gradientů v jednotce izolátoru a tím i hladin šumu, jsou závislé na napětí na izolátoru. V případě, že je izolátor složen z několika jednotek, závisí také na rozložení napětí podíl izolátorového řetězce. Toto rozdělení bývá s nárůstem jednotek méně rovnoměrné. Pro delší izolátorové řetězce nebo podpěrné izolátory je nezbytné disponovat zařízením, jako jsou např. kovové kruhy, pro zlepšení rozdělení napětí. [2]



Obr. 5: Ekvipotenciální čáry suché a čisté izolátorové jednotky [19]

Proudové pulsy, které způsobují vysokofrekvenční šum na čistých a suchých izolátorech, se od sebe podstatně neliší při kladné a záporné polaritě. Vyskytují se mezi nulovou a maximální hodnotou síťového napětí na izolátoru. Tvar pulsů a mezní kmitočet jejich spektra závisí na vlastní kapacitě izolátorů a vlnové impedanci vedení, ke kterému je připojen. Pro běžné hodnoty těchto parametrů je mezní kmitočet udáván asi 1 MHz. Šum čistého a suchého izolátoru je proto omezen na kmitočty do 30 MHz. Obecně pak izolátory s průměrnými

charakteristikami produkují nízké hladiny šumu. Špatná konstrukce nebo nevhodné upevnění ale může způsobit vyšší hladiny stoupající k vyšším kmitočtům. Příjem televize není obvykle tímto typem vysokofrekvenčního šumu nijak ovlivněn, což je i případ korónového výboje na armaturách. [2]

Budeme-li sledovat lehce znečištěný a přiměřeně suchý izolátor například za pěkného počasí, výše popsaný jev je doprovázen výbojem koróny na nepravidelnostech povrchu způsobených nečistotami na izolátoru. Tento druhý jev je méně závažný než jev první, takže hladiny šumu s výjimkou některých speciálních druhů znečištění (např. v blízkosti chemických závodů) se výrazně neliší nebo jsou pouze mírně vyšší, než hladiny šumu suchých a čistých izolátorů. [2]

Je-li izolátor na povrchu čistý, avšak je vlhký nebo mokrý, možnost výskytu kapek vody zapříčiňuje zřetelný výboj koróny, který obecně produkuje vyšší hladiny vysokofrekvenčního šumu, než hladiny produkované vlivem bodového znečištění povrchu. Tento poslední jev, za vlhkých podmínek, může být méně důležitým díky lepšímu rozložení napětí. Hladina šumu je pak vyšší než na suchých izolátorech, avšak je omezena na několik MHz. [2]

Je-li izolátor silně znečištěný a mokrý, jev je úplně jiný, protože vysokofrekvenční šum je produkován proudovými pulsy tekoucími při jiskrových přeskocích přes suchá místa vzniklá topným efektem svodových proudů na povrchu izolátoru. Amplituda a počet těchto pulsů je závislá na napětovém namáhání izolujících suchých míst, na tvaru a rozměrech izolátoru, na povrchové vodivosti povlaku nečistot a na charakteristikách materiálu u povrchu izolátoru. Mezní kmitočet spektra těchto pulsů může být až několik desítek MHz, šum tak může ovlivnit televizní příjem. U mokrých a znečištěných skleněných nebo porcelánových izolátorů může vysokofrekvenční šum (za normálního napětového namáhání, které je dáno požadavky na elektrickou pevnost) dosahovat podstatně vyšších hladin než za jiných podmínek popsaných výše. [2]

Tyto hladiny mohou být redukovány nejen díky snížení napětového namáhání, ale také např. použitím izolátoru se speciálními charakteristikami. Izolátory z porcelánu, skla nebo organických hmot potažené vrstvou tuku zabrání díky vodoodpudivým účinkům tuku vzniku souvislého vlhkého povlaku a tím i svodovým proudům a suchým místům. Tímto můžeme dostat adekvátní řešení pro snížení hladin šumu za mokra a znečištění. Jakmile však dojde

k zestárnutí a kontaminaci jejich povrchu, stane se nasáklivý a skončí jejich bezšumovost. Izolátory s polovodivou glazurou jsou také možným řešením pro snížení šumu, protože vodivá glazura zlepšuje řízení rozložení napětí a teplo vzniklé tokem svodového proudu v glazuře udržuje suché pásy tak široké, že udrží napětí bez přeskočení jisker. [2]

2.6 Jiskření vlivem nedokonalých spojení

2.6.1 Fyzikální vlastnosti vysokofrekvenčního šumu

Pokud se v silném elektrickém poli vedení VN a návazného zařízení nachází nespojené vodivé části vedení, rozvoden a nebo takové předměty, jako jsou kovové ploty a svody dešťové vody, může dojít k jejich elektrickému nabití. Rozdíl potenciálů mezi sousedními částmi bude vzrůstat i v případě, že jsou obě na plujícím potenciálu, nejsou tedy připojeny k vodiči vedení nebo k zemi. [2]

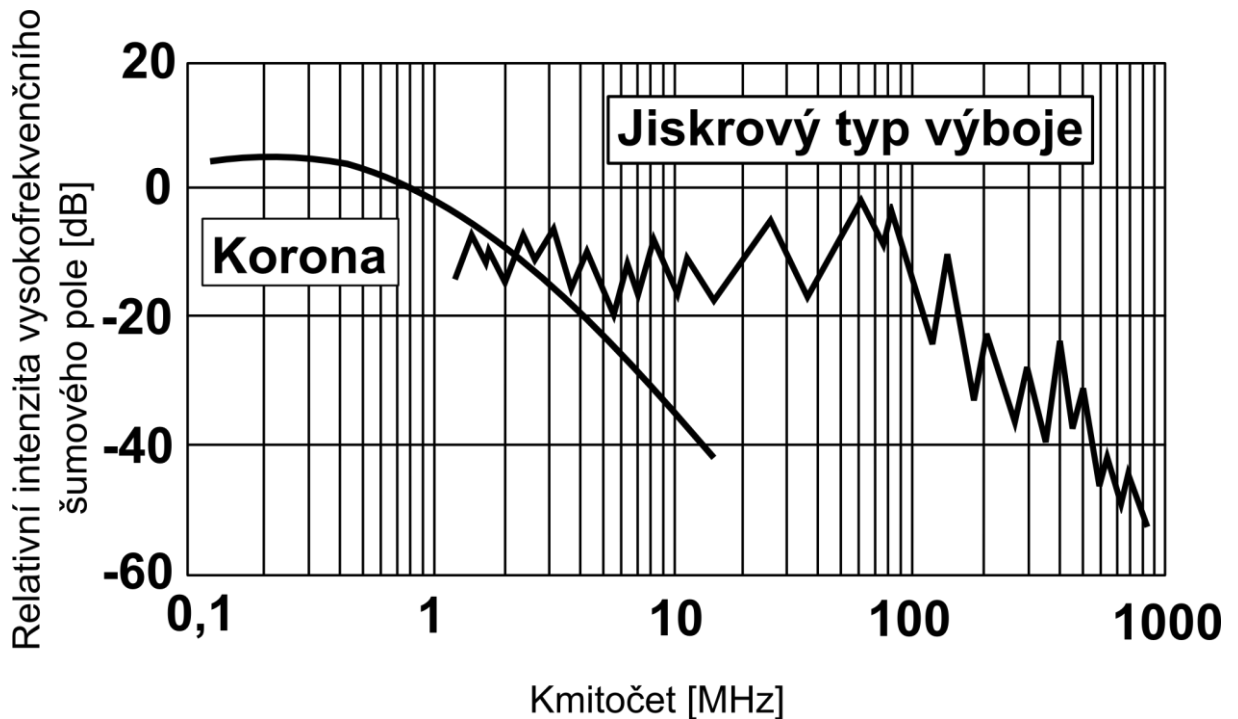
Pokud mají mezi sebou vodivé části malou vzdálenost, může vzrůstající intenzita pole v mezeře překročit kritickou hodnotu a může vést k celkovému průrazu mezery. Díky lavinové ionizaci dojde iniciaci oblouku a na mezeře se objeví výboj. Při tom dojde k poklesu napětí na obou jejích částech a oblouk zhasne. Jakmile se části opět nabijí, mezera mezi nimi bude opět pod elektrickým namáháním a bude následovat další výboj. [2]

Frekvence opakování tohoto pochodu závisí na nabíjecí a vybíjecí časové konstantě obvodu a na hodnotě okolního elektrického pole, stejně tak jako na délce přeskové vzdálenosti. Počet jisker za sekundu se může pohybovat od stovek do několika tisíců za sekundu. Frekvence opakování je však alespoň o řád nižší než rozsah opakovacích kmitočtů korónového výboje. [2]

Jiskření na mezeře je pravděpodobnější v čase maximální křivky síťového napětí. Když napětí vedení a intenzita pole v mezeře přesáhnou kritickou hodnotu, dojde ke generování skupiny výbojů během každé půlperrody. [2]

Důležitým faktorem ve tvaru pulsu výboje je jeho krátká doba náběhu, z čehož vychází široký rozsah produkovaných a emitovaných kmitočtů. Porovnání kmitočtového spektra vysokofrekvenčního šumu koróny a spektra výboje na mezeře v konkrétní vzdálenosti od vedení je ukázán na *obrázku 6*. Kmitočty v těchto případech mohou dosahovat několika

stovek MHz. Je-li pochod výboje vybuzen armaturou nebo součástí schopnou vzhledem ke svým geometrickým rozměrům oscilovat na konkrétním kmitočtu, může dojít ke vzniku intenzivního úzkopásmového vyzařování na tomto kmitočtu, protože armatura se pak chová jako naladěná anténa. Takový typ výboje poté může rušit příjem jak amplitudově modulovaných rozhlasových signálů, tak obrazový signál televize. Frekvenčně modulovaný rozhlas v pásmu VHF a zvukový signál televize je tímto typem šumu rušen méně. [2]

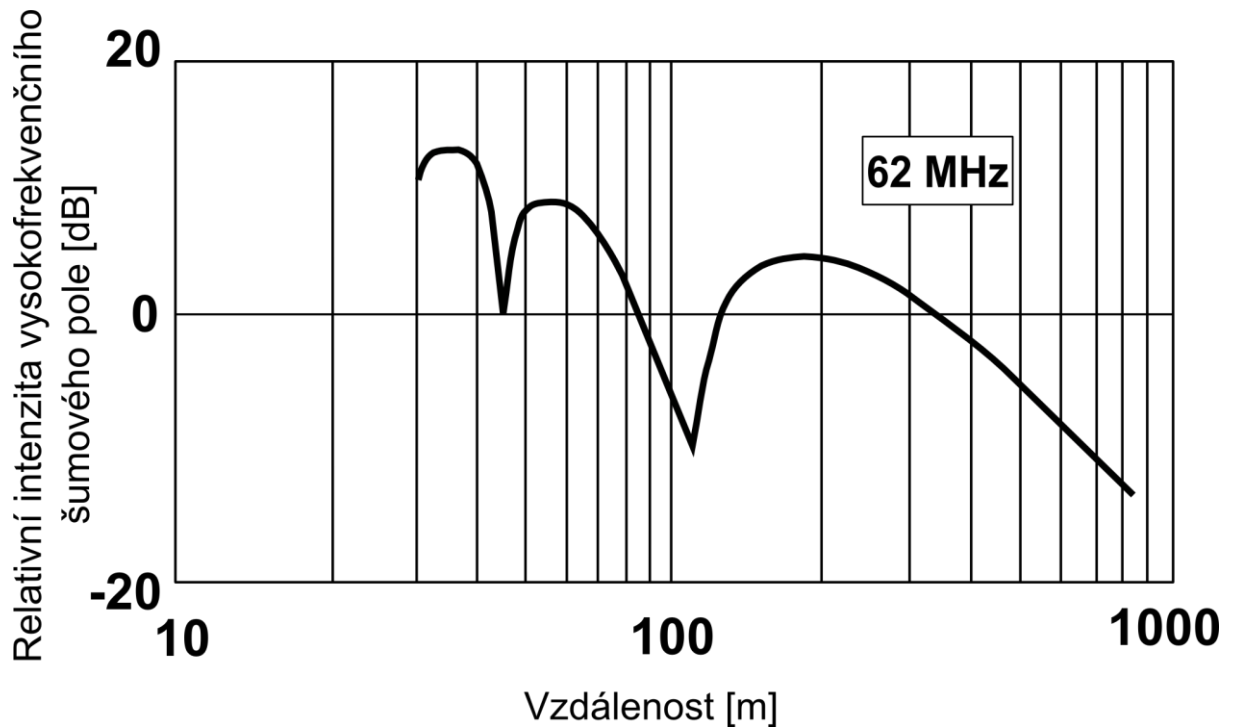


Obr. 6: Příklad relativní intenzity vysokofrekvenčního pole jako funkce kmitočtu [19]

Šíření podél vedení spolu se svým elektrickým a magnetickým polem a vyzařování jsou cesty, díky kterým se rušivé vysokofrekvenční kmitočty dostanou až k přijímacím anténám. V praxi bylo zjištěno, že u šumu o kmitočtech odpovídajících dlouhovlnnému a středovlnnému pásmu dochází k šíření desítky kilometrů podél vedení. Pro televizní a FM rozhlasové kmitočty je šíření podél vedení důležité méně, než vyzařování od zdroje. Hlavní vliv na šíření závisí na geometrii vedení, odporu půdy pod vedením a kmitočtu. Útlum podél vedení vyšších kmitočtů je větší a tím je pak jejich dosah kratší. [2]

Významnější hladiny vysokofrekvenčního pole bývají normálně omezeny od bezprostřední blízkosti vedení, sahající několik set metrů na obě strany. Dojde-li však k výskytu rezonanční podmínky na armaturách nebo jejich součástech, může být měřeno úzkopásmové vyzařování do vzdáleností až několika kilometrů. Na obrázku 7 je zobrazena

křivka typického vztahu mezi intenzitou pole a vzdáleností. Kolísání je následkem interakce přímé vlny a vlny odražené od země. [2]



Obr. 7: Příklad relativní intenzity vysokofrekvenčního pole jako funkce vzdálenosti od vedení [19]

2.6.2 Příklady zdrojů

Zdroje rušení druhu mezer na venkovních vedeních mohou vzniknout na vedeních vlivem málo zatížených čapek a roubíků izolátorů, je-li váha izolátorů nedostatečná na to, aby zabránila vzniku oxidace na povrchu kovových součástí. Dalšími zdroji jsou zkorodované kovové části nebo jejich nedostatečný styk. [2]

V případě porcelánových izolátorových řetězců se zjistilo, že může dojít ke vzniku jiskry výboji v malých dutinách porcelánu. Takovýto typ výbojů může vzniknout také u prasklých izolátorů, vrstev nátěru a dokonce v objektech netvořících součástí přenosového vedení, jako jsou nepropojené kovové ploty a žlaby pro dešťovou vodu. [2]

V oblastech, kde se pro vedení používají dřevěné stožáry, se může objevit jiskření mezi částmi kovových armatur, což může vést k silnému rušení televizního příjmu. Obvykle se to děje díky změnám objemu dřeva v závislosti na změně vlhkosti. Když se například objem zmenšuje, matice a šrouby, které upevňují příčníky nebo izolátorové roubíky ke sloupu nebo k příčníku, se mohou uvolnit. Nastane-li koroze mezi maticí a šroubem nebo podložkou (je-li použita), vznikne nedokonalé spojení a dojde k jiskření. [2]

Jiným zdrojem rušení televize od vedení s dřevěnými stožáry může být uchycení svorky zemního lana ke stožáru. Jelikož jsou mezi různými úseky stožáru potenciálové rozdíly, mohou přeskakovat jiskry ze svorek na zemní lano, hlavně v případech, jsou-li zkorodované. [2]

Také dotyk mezi roubíkovým izolátorem a fázovým vodičem může být zdrojem jiskření v místě upevnění vázacím drátem, kde je vodič v drážce, nebo u třmenu v boční drážce. Problémem je malá vrstvička vzduchu mezi vodičem a izolátorem, která je vysoce namáhána, a u níž může dojít k přeskoku jisker. [2]

Během výstavby vedení, mu musí věnována patřičná odborná péče. Při provozu pak musí být zajištěno, že poruchy způsobené např. vandalstvím, budou zjištěny a bude uskutečněna náprava. Konstrukci a údržbě zařízení by měla být věnována zvláštní pozornost, aby byly trvale zajištěny dostatečné kontakty, např. u vzduchových odpojovačů, pružných spojení použitých v konstrukci takových odpojovačů, připojení pojistek a odboček.

Výboje v mezerách jsou silně ovlivňovány počasím. Pouze za suchého počasí zabezpečují malé mezery (např. mezi dvěma vodivými částmi) dostatečnou izolaci, která se může prorazit. Za mokrého počasí se mezera může přemostit vodou a vznikne tak vodivá cesta. Proto je tento typ rušení obvykle spojen se suchým slunečným počasím a za deště a vlhka se nevyskytuje. V důsledku toho je často nazýván suchým šumem. [2]

2.7 Zvláštní stejnosměrné vlivy

2.7.1 Všeobecně

Vysokonapětové přenosové systémy stejnosměrného provedení mohou generovat vysokofrekvenční šum dvěma různými způsoby: zaprvé normálním provozem ventilů konvertorů, které mohou být rtuťové-obloukové nebo tyristorové, zadruhé výbojem koróny na zařízení vysokého napětí a s ní souvisejícími jevy, přípojnicích a venkovních vedeních. Proto je nutné uvažovat:

- a) účinky stejnosměrné koróny
- b) účinky ventilů usměrňovačů [2]

Ve srovnání se systémy přenosu střídavého provedení není problém vysokofrekvenčního šumu od stejnosměrných systémů tak důležitý, protože ve světě je jich v provozu malý počet. V důsledku toho je také zkušeností s problémy vysokofrekvenčního rušení od těchto systémů méně než od střídavých. Většina informací o vysokonapětovém rušení stejnosměrných systémů byla získána z pokusných vedení a zbytek z existujících soustav. V současné době fungují stejnosměrné přenosové systémy o velikosti napětí do 500 kV obou polarit, v budoucnu dojde k použití vyšších napětí. [2]

2.7.2 Účinky koróny na vodičích

Příčiny vysokofrekvenčního šumu koróny jsou zhruba stejné jak u střídavých, tak u stejnosměrných systémů, přesto je třeba zmínit některé důležité rozdíly v účincích. Fyzikální vlastnosti střídavé koróny jsou zmíněny v kapitole 2.3. Mechanismus koróny stejnosměrné je odlišný, protože:

- a) kolem každého vodiče se nachází plášť stacionární ionizace
- b) ve zbylém prostoru mezi vodičem a zemí a mezi vodiči se vytváří prostorový náboj [2]

Ionizace funguje z části jako stínění, které mění elektrické pole blízko vodiče a díky prostorovému náboji se skutečné elektrické pole dosti odlišuje od teoretického statistického pole. [2]

U střídavého vedení se nenachází prostorový náboj a ionizační jevy kolem vodičů se projevují odlišně. Výboj koróny je vždy zapříčiněn srážkou volných elektronů se stabilními atomy. Tyto elektrony jsou v atmosféře za veškerých normálních podmínek a pohybují se směrem od záporného ke kladnému vodiči. To způsobuje významný rozdíl mezi dvěma formami koróny vyplývající z těchto tvrzení. Záporný výboj koróny se objeví s vysokou frekvencí opakování a mírnou amplitudou, výboje u kladného vodiče mají sice nižší kmitočet, avšak mají vyšší amplitudu. [2]

Vlastnosti vysokofrekvenčního šumu stejnosměrné koróny (hladina, spektrum a příčný profil) jsou určeny:

- konstrukčními parametry
- napětím nebo povrchovým gradientem vodiče, polaritou
- povětrnostními podmínkami [2]

Vlastní účinky stejnosměrného šumového pole jsou menší než od pole střídavého vedení o stejné intenzitě, vlivem jiného charakteru šumu. [2]

2.7.3 Konstrukční parametry

Oproti střídavým vedením jsou stejnosměrná buď monopolární (země nebo moře je zpětná cesta) nebo bipolární, s jednoduchými či svazkovými vodiči. Délka izolátorů a vzdálenost mezi póly může být relativně malá, protože interní přepětí jsou o dost nižší než střídavá, vlivem rychlého odstranění poruchového stavu blokováním ventilů. Délka izolátorů je určena spíše díky znečištění než přepětími. [2]

2.7.4 Napětí vedení, povrchový gradient a polarita

U stejnosměrných vedení je volba napětí ovlivněna jak z ekonomických stránek, tak i měřicími a ventily. Toto napětí sice není normalizováno, ale v současné době jsou provozována vedení s napětími ± 200 kV až ± 450 kV. V budoucnosti však bude docházet ke zvyšování těchto hladin. Napětí jakéhokoliv vedení vysokého napětí má největší vliv na vznik vysokofrekvenčního šumu. Tento vliv je závislý na povrchovém gradientu (namáhání) vodičů. Pokud se u střídavých vedení používá gradient E [kV_{ef}/cm], srovnatelný gradient pro stejnosměrná vedení je $\sqrt{2} \cdot E$ [kV/cm]. Stejnosměrná vedení však budou vyzařovat rušení méně než střídavá. [2]

Pokus zanedbáme vliv ionizace a prostorového náboje, můžeme teoretický gradient vypočítat stejně jako u střídavých vedení (kapitola 2.3) a tuto hodnotu použít pro výpočet vysokofrekvenčního šumu. Vliv takového gradientu na šumovou hladinu byl zkoumán na několika pokusných vedeních. Výsledky byly takové, že v rozmezí 20 kV/cm až 27 kV/cm vzrůstá šum asi o 1,6 dB při přírůstku 1 kV/cm. Nad 27 kV/cm se pak hladina šumu narůstá pomaleji. [2]

2.7.5 Povětrnostní podmínky

Je dobře známé, že vysokofrekvenční šum střídavých vedení je dosti ovlivněn povětrnostními podmínkami, mezi slunečným počasím a silným deštěm může hladina šumu narůst až o 25 dB. U stejnosměrných vedení ale déšť přispívá ke snížení hladiny šumu. [2]

Maximální hladina vysokofrekvenčního šumu u stejnosměrných vedení je proto při dobrém počasí. Na začátku deště nebo při suchém sněžení může hladina na malou dobu

vzrůst, ale když jsou vodiče zcela mokré, hladina klesne až o 10 dB, v některých případech je to více. [2]

Jiné je sledování vlivu větru na stejnosměrných a střídavých vedeních. V některých výzkumech bylo naznačeno, pokud je směr větru od záporného ke kladnému vodiči, hladina vysokofrekvenčního šumu narůstá při rychlostech větru nad 3 m/s od 0,3 dB do 0,5 dB na každé zvýšení rychlosti o 1 m/s. Pro opačný směr větru je tento jev podstatně nižší. [2]

Při dlouhodobém sledování je pak šum stejnosměrných vedení ovlivněn sezónními jevy. V letním období je asi o 5 dB vyšší oproti zimnímu období. To může způsobit jak prach a hmyz na povrchu vodiče, tak i absolutní vlhkost vzduchu. [2]

3 Metody měření rušivých signálů

Měření rušivých signálů vycházejících ze zařízení je jednou z nejdůležitějších částí problematiky EMC. Jelikož jsou proměřovaná zařízení různorodá a mají specifické pracovní podmínky, je důležité, aby testy a měření byly dobře reprodukovatelné a získané výsledky vzájemně porovnatelné. Všechna měření v EMC, jejich postupy, metody atd., jsou jednoznačně specifikovány a závazně předepsány příslušnými mezinárodními, příp. národními normami a dalšími regulačními předpisy. K měření těchto signálů se používá několik základních metod, které jsou velmi podrobně popsány ve většině literatury věnující se EMC. Těmito základními metodami jsou:

- Měření s umělou sítí
- Měření s napěťovou sondou
- Měření s proudovou sondou
- Měření s absorpčními kleštěmi
- Měření pomocí antén [3]

Jelikož se tato práce dále zaměřuje především na měření pomocí antén, bude v následujících odstavcích popsána pouze problematika těchto měření. [3]

3.1 Měření pomocí antén

Rušivé signály, jenž jsou vyzařovány vyšetřovaným zařízením do okolí na kmitočtech od 10 kHz do 1000 MHz a výše jsou měřeny pomocí několika různých druhů měřících antén.

Měření rušivých magnetických polí má význam hlavně v oblastech velmi vysokých kmitočtů (od 300 MHz výše), protože měření rušivých proudů a napětí je u těchto kmitočtů dosti problematické, někdy zcela nemožné. Rušivé elektromagnetické pole se měří pomocí přístroje pro měření rušení (měřicím přijímačem) doplněným o vhodnou měřicí anténu. Jejich celkový přehled je uvedený v *tab. 1.* [3]

Druh antény	Rozsah kmitočtů	Měřená složka
rámová (smyčková) anténa	9 kHz - 30 MHz	H
prutová anténa (monopól)	9 kHz - 30 MHz	E
symetrické (laděné) dipóly	30 MHz - 1000 MHz	E
bikónická anténa	20 MHz - 300 MHz	E
log-per anténa	200 MHz - 3000 MHz	E
kón-log anténa	200 MHz - 3000 MHz	E
složená širokopásmová anténa	30 MHz - 2000 MHz	E
trychtýřové antény	1 GHz - 40 GHz	E,H

Tab. 1. Přehled měřicích antén pro systémy EMI[3]

Pro nejnižší kmitočtové pásmo 9 kHz až 150 kHz se používají především rámové (smyčkové) antény (*orb. 8a*). Většina jevů v tomto frekvenčním pásmu je totiž způsobována magnetickou složkou pole. Princip antény je takový, že cívka antény je umístěna v kovovém stínění, aby došlo k vyloučení parazitního vlivu elektrické složky pole. Antény mohou být pasivní nebo aktivní, některé z nich mohou být vybaveny měřicími zesilovači pro daná frekvenční pásma. [3]

Těmito typy antén se měří rušivé magnetické pole i v pásmu 150 kHz až 30 MHz. Pro měření rušivého elektrického pole těchto kmitočtů se používají prutové (tyčové) antény, tzv. monopóly (*orb. 8b*) s doporučenou délkou 1 m. Tyto antény nejsou příliš vhodné pro měření v blízkém poli rušivého zdroje, protože kromě vazby vysokofrekvenčním polem se zde uplatňuje i přímá kapacitní vazba mezi anténou a zdrojem rušení. Vůči tomu se však měření pomocí prutových antén vykonává, protože při přesně stanovených podmínkách je spolehlivě reprodukovatelné. [3]

Určení přesné intenzity rušivého pole v blízkém poli se v uvedeném pásmu hodí použití symetrické dipólové antény o malých rozměrech. Pomocí této antény je dále možné určit směr měřeného pole i průběh siločar v okolí rušivého zdroje. Je důležité zdůraznit, že je její efektivní výška velmi malá a tak se používá pouze při laboratorních měřeních. Běžná měření v provozu se provádí pomocí antén prutových. [3]

Nejčastěji užívanými anténami pro pásmo 30 až 80 MHz jsou tzv. symetrické půlvlnné dipóly (*obr. 8c*). Ve vyšších kmitočtových pásmech (až do 1 GHz) slouží tyto dipóly jako přesné, případně kalibrační antény, pro běžná provozní měření ovšem nejsou příliš vhodné z toho důvodu, že jejich nastavení je velmi pracné. Délka ramen musí být vždy nastavena na příslušný měřicí kmitočet, dipól potřebuje vhodný transformační obvod pro připojení k napájecí, připojení ke vstupu měřiče rušení musí být provedeno prostřednictvím symetrizačního obvodu. [3]

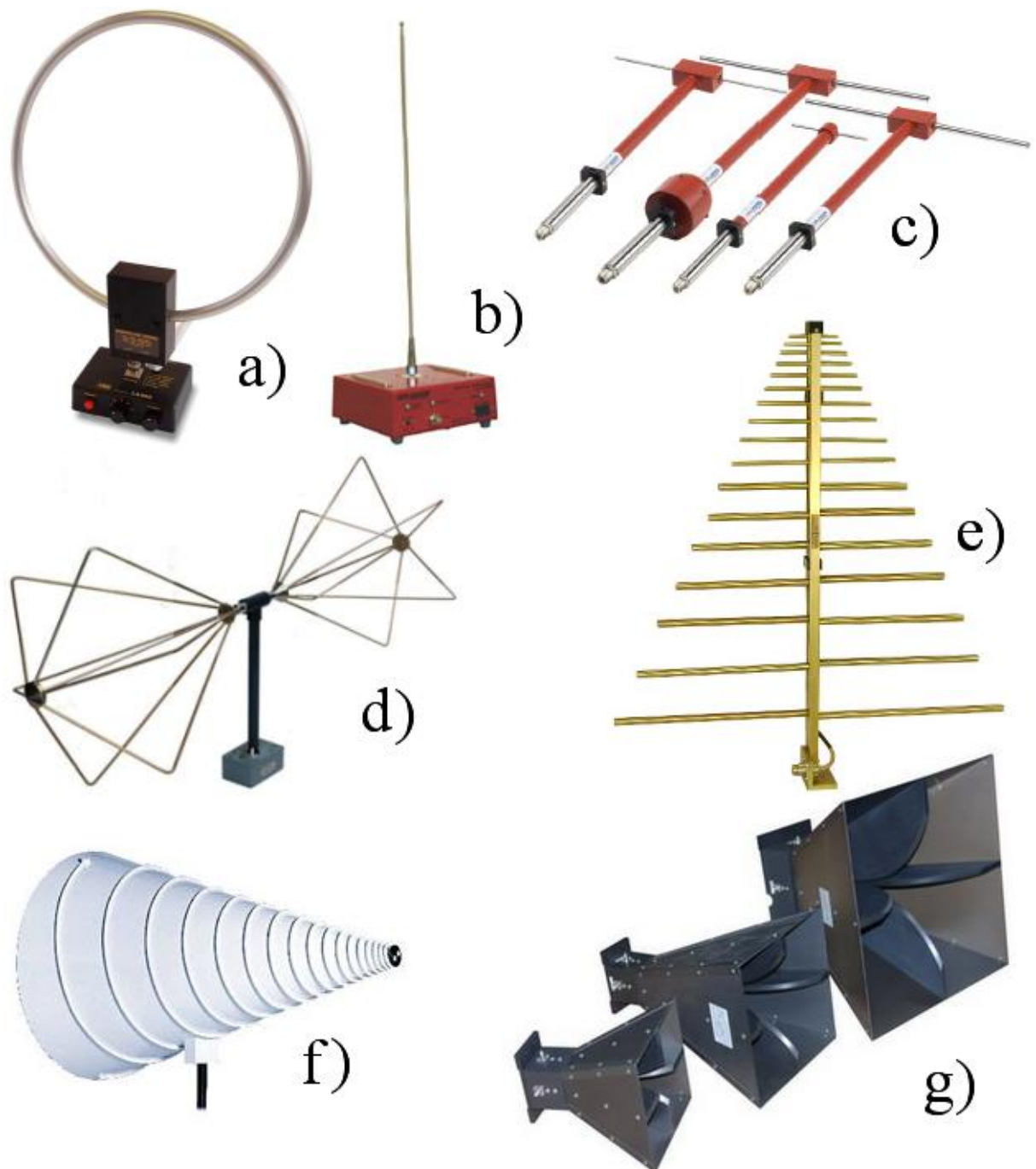
Měření elmag. rušení v pásmu od desítek MHz až 2000 MHz se nejčastěji užívají širokopásmové antény. Mezi ně patří: bikónické antény (*obr. 8d*), logaritnicko-periodické antény (*obr. 8e*), kónicko-logaritnické (spirálové) antény (*obr. 8f*), příp. složené širokopásmové antény, které jsou konstrukčně řešeny jako kombinace předchozích typů. Anténa bikónická je určitým druhem širokopásmového zkráceného dipólu. Je to typická anténa pro měřicí pásmo 20 až 300 MHz. Pro pásmo od 200 MHz až do cca 3000 MHz je nejrozšířenější měřicí anténou logaritnicko-periodická anténa. Anténa je složena z řady vhodně fázově napájených rezonančních dipólů, délky a vzájemné vzdálenosti dipólů jsou pro sousední prvky v pevném poměru daném podílem logaritmů jejich rezonančních kmitočtů. Taková konstrukce má za následek prakticky konstantní tvar vyzařovacího diagramu a konstantní hodnotu vstupní impedance log-per antény v celém pracovním pásmu. [3]

Kónicko-logaritnická (spirálová) anténa je speciálním typem širokopásmové antény se schopností fungovat až do oblasti GHz (*obr. 8f*). Oproti ostatním anténám na *obr.8* jsou spirálové antény určeny pro příjem (vysílání) kruhově polarizovaného elmag. pole. Kónická anténa proto není vhodná pro testy EMC podle civilních norem IEC nebo CISPR., protože veškeré tyto normy předepisují testy s lineární polarizací měřených signálů. Některé testy EMC pro vojenské odvětví (např. testy elektromagnetické imunity dle amerických vojenských norem MIL-Std) je však založena na použití kruhově polarizovaných vln a pro jejich provedení jsou právě kónické antény typické. [3]

U kmitočtů v jednotkách GHz se jako hlavní měřicí antény užívají především pyramidální kovové vlnovody - tzv. trychtýřové antény (*obr. 8g*). [3]

Přestože lze pomocí některých konstrukčních úprav (vlnovody typu H nebo II) rozšířit šířku jejich pracovního kmitočtového pásma, jsou trychtýřové antény svou podstatou relativně

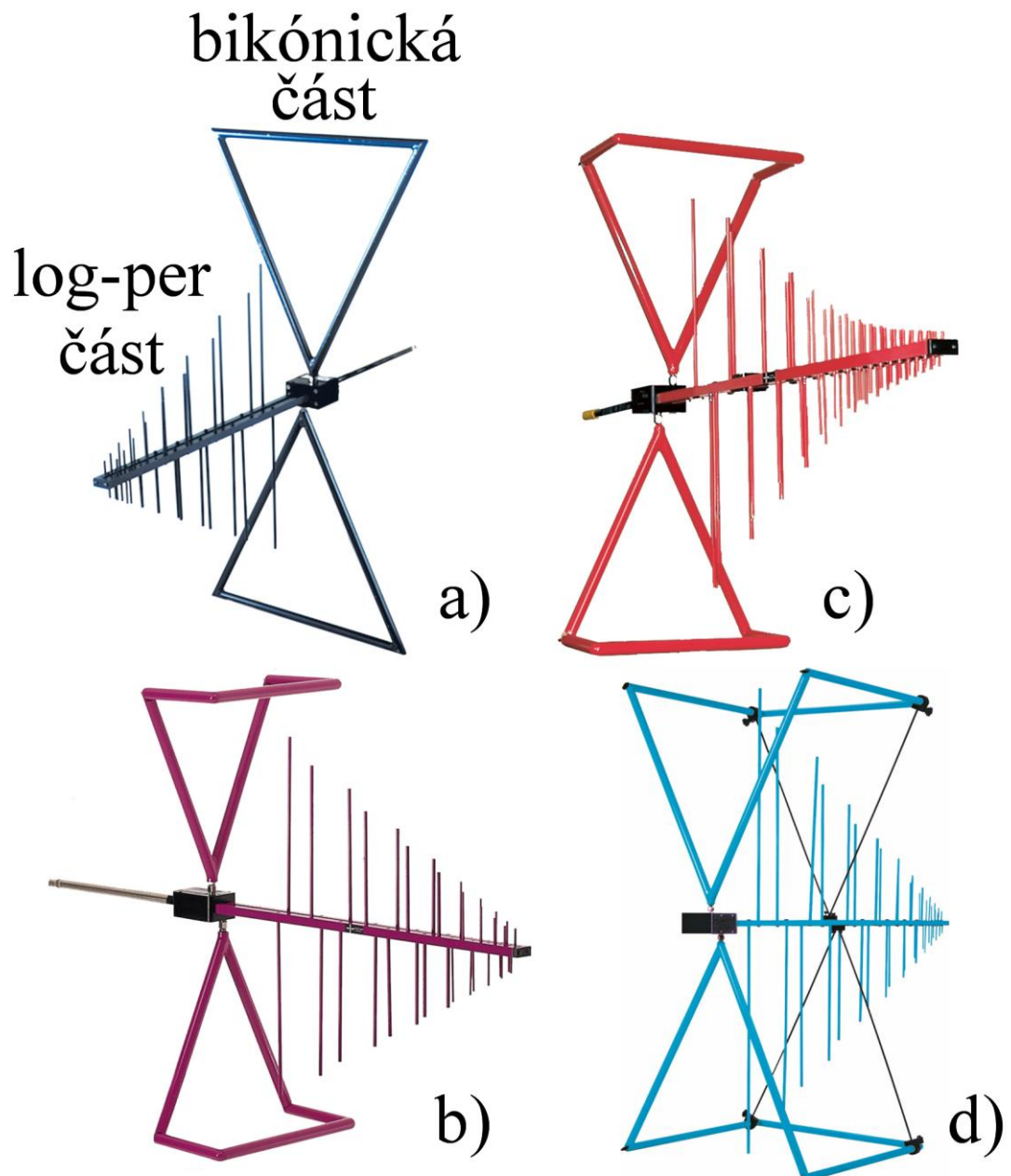
úzkopásmové. K pokrytí kmitočtů jednotek až několika desítek GHz je proto třeba sada několika (8 až 10) takových antén pro jednotlivé dílčí kmitočtové rozsahy (obr 8g). [3]



Obr. 8: Měřicí antény pro systémy EMI:

- a) aktivní rámová anténa pro magnetická měření do 30 MHz [8];
- b) aktivní prutová anténa (monopól) 1-30 MHz [9];
- c) sada laděných symetrických dipólů 30-1000 MHz [10];
- d) bikónická anténa 30-300 MHz [11];
- e) logaritmicko-periodická anténa 200-1000 MHz [12];
- f) kónicko-logaritmická anténa 200-1000 MHz [13];
- g) sada trychtýřových antén 1-12 GHz [15];

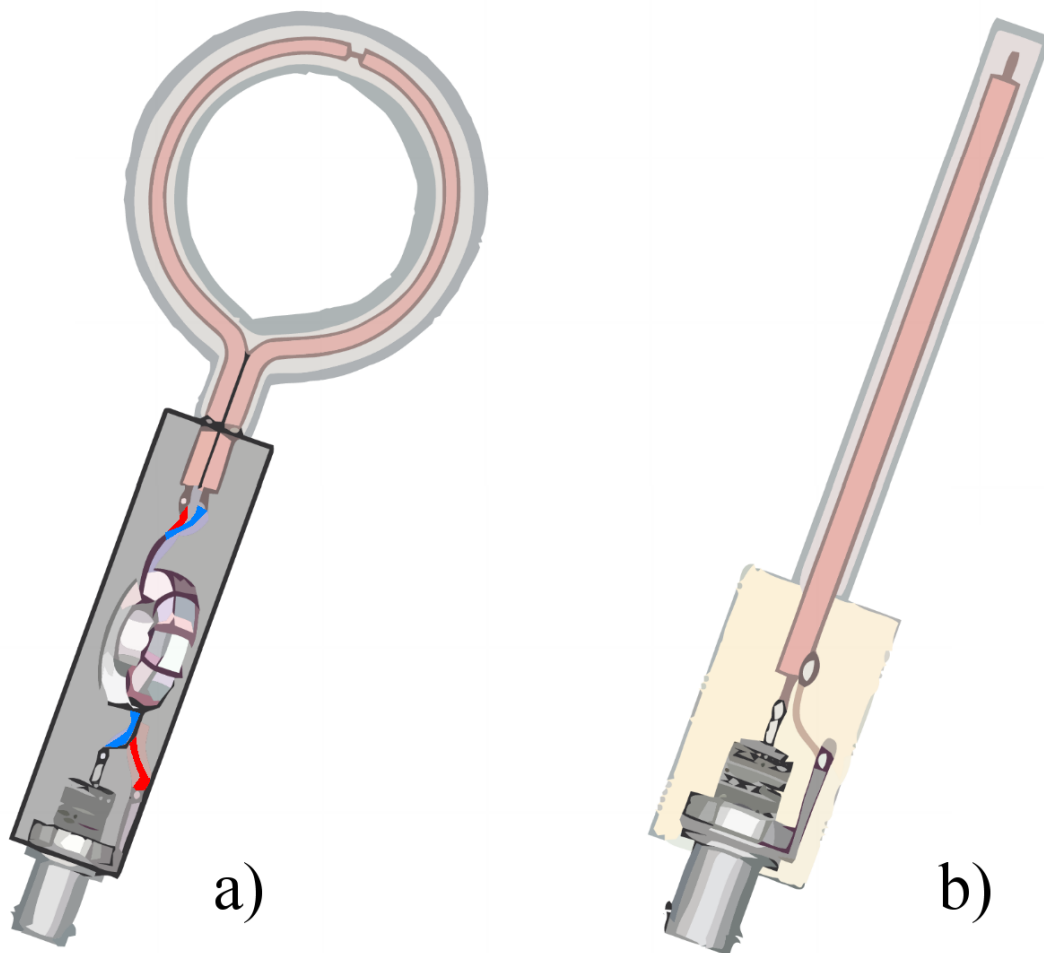
S postupem času a stále většími požadavky na EMC postupně došlo ke snaze najít širokopásmovou anténu pro měření rušivých elektromagnetických signálů, která by byla schopná pokrýt celý nejčastěji využívaný rozsah měření EMI, tedy pásmo od 30 MHz až do kmitočtu 1 až 2 GHz. Jak již bylo uvedeno, tento rozsah je pokrýván dvěma druhy antén: bikónickou od 30 do 300 MHz a logaritmicko-periodickou od 300 MHz výše. Proto byly kombinací těchto dvou druhů antén v 90. letech vytvořeny nové druhy složených širokopásmových antén, které spojují vlastnosti obou typů a jsou tak schopny pokrýt celé pásmo od 30 MHz do 1000-2000 MHz. Díky vhodné konstrukci se podařilo dojít k přijatelně malým rozměrům těchto složených antén. Jejich vlastnosti jsou u nízkých kmitočtů dány vlastnostmi bionické (dipólové) části, u vysokých kmitočtů je to pak díky vlastnostem log-per části. První taková anténa byla vytvořena anglickou firmou CHASE a nesla obchodní název BiLog (*obr. 9a*). Tyto antény mají mnoho konstrukčních možností, některé z nich jsou na *obr. 9. b až d*. Tato různá konstrukční uspořádání mají za cíl zvětšit širokopásmovost složených antén a také zlepšit některé jejich elektrické vlastnosti (tvar vyzařovacího diagramu, impedanční přizpůsobení apod.), a to zejména v oblasti nízkých měřených kmitočtů. Díky svým vlastnostem si antény vydobily důležité postavení v měření elektromagnetického rušení, protože umožňují vykonat měření v celém pásmu pomocí jedné antény. Aby měření pomocí těchto antén bylo dostatečně přesné a věrohodné, je důležité antény pravidelně kalibrovat, a to opět díky srovnání s výsledky měření pomocí laděného symetrického dipólu, který i zde zastává pozici referenční (kalibrační) antény. [3]



Obr. 9: Složené širokopásmové antény typu "Bilog" [15];
a) základní provedení; b) až d) konstrukční modifikace

Rušivé signály, které do prostoru vyzařují obvody a jednotlivé funkční bloky, jsou často měřeny pomocí speciálních měřících sond elektrického či magnetického pole. Tyto malé ruční antény (v praxi často zvané jako "očichávací") jsou používány hlavně při vývoji a diagnostikování elektronických zařízení. Zde je často důležité sledovat nežádoucí vyzařování jednotlivých součástí a bloků přímo uvnitř sledovaného zařízení a určit co nejpřesněji i místo vzniku (zdroj) rušivého signálu. Měřicí sonda blízkého magnetického pole (obr. 10a) je nejčastěji tvořena pomocí malé smyčky o průměru několika cm. Kompenzace nežádoucího

vlivu elektrického pole se občas provádí pomocí dvou smyček, které jsou vzájemně zapojeny v protifázi. Měřicí sonda elektrického pole, jejímž základem je obnažený konec středního vodiče koaxiálního kabelu o délce $6 \div 10$ mm je vyobrazena na *obr. 10b*. Měření zprostředkovaná pomocí měřících sond nejsou příliš dobře reprodukovatelná, protože výsledek závisí na mnoha neurčitých faktorech (vzdálenost sondy od zdroje rušení, úhel a natočení sondy vůči zdroji rušení atd.). Tato měření nejsou dána žádnými normami či předpisy a jejich výsledkem je spíše relativní představa o intenzitě rušivého vyzařování v daném místě či v daném obvodu. Velké využití nacházejí tyto sondy při kontrole elektromagnetické "těsnosti" stínicích krytů a k identifikaci míst největšího "úniku" záření z nich. [3]



Obr. 10: Měřicí sondy pro blízké magnetické (a) a elektrické pole (b) [16]

Správnost a věrohodnost výsledků měření elmag. rušení anténami záleží jak na technických parametrech použitých antén, tak i na uspořádání a vlastnostech měřicího pracoviště (místa). Současné normy EMC popisují tři typy měřících míst pro měření elektromagnetického rušení pomocí antén:

- Měření na volném prostranství
- Měření v elektromagneticky stíněných prostorech
- Měření v bezodrazových (absorpčních) prostorech [4]

4 Měření

4.1 Základní popis

K ověření rušení korónovými výboji jsem aplikoval dvě různé metody měření. První z nich je měření v bezodrazové komoře pomocí širokopásmové antény. Druhá metoda je sledování výbojů v laboratoři vysokého napětí, kterou jsem použil jako doplňující metodu díky své zajímavosti. V obou metodách jsem podrobil vysokému napětí čtyři zkoušence:

- Model vodič-zem (průměr vodiče = 0,6 mm)
- Model vodič-zem (průměr vodiče = 1,6 mm)
- Uspořádání hrot-miska
- Průchodka

4.2 Použité přípravky pro měření

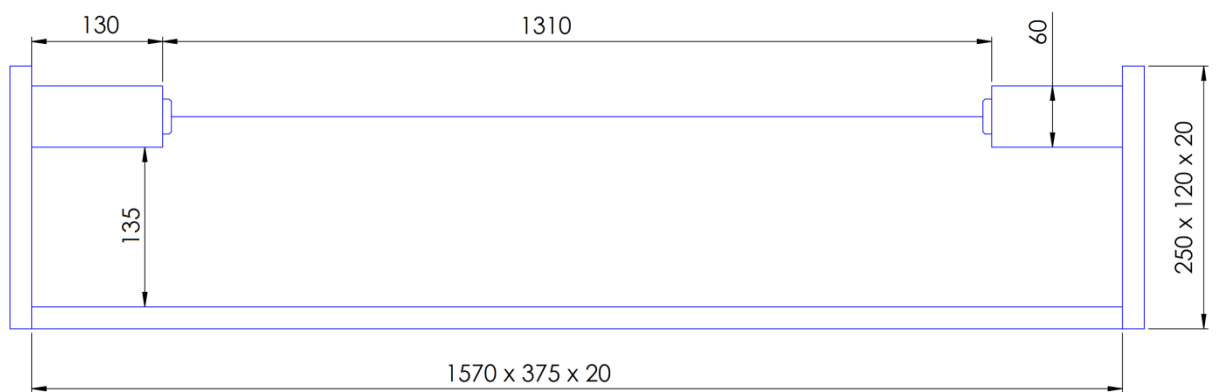
Tento bod v bližším náhledu ukazuje jednotlivé zkoušence, jejich přibližné rozměry (sloužící pro představu prostorového uspořádání prvku) a popis jejich vlastností.

4.2.1 Model vodič-zem:

Již z názvu je patrné, že tento model simuluje praktický případ vodiče pod napětím vůči zemi. Na *obr. 11* můžeme vidět, že se jedná o vodič uchycený mezi dvěma izolátory nad měděnou deskou. Na vodič je při měření přivedeno napětí a deska je uzemněna. Vodič je v izolátorech uchycen pomocí závitových kontaktů, takže je možné v modelu použít rozměr vodiče dle potřeby (v našem případě Cu vodič, průměry 0,6 mm a 1,6 mm). *Obr. 12* ukazuje orientační rozměry prvku.



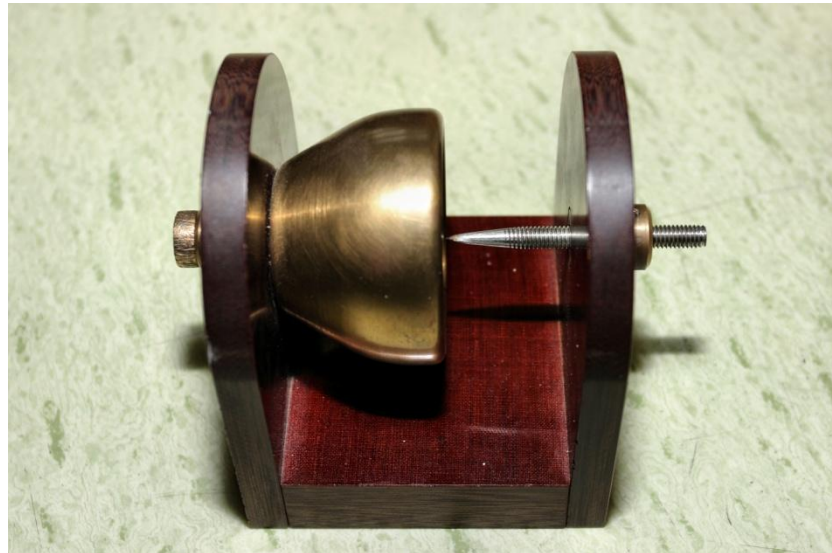
Obr. 11: Foto zkoušeň vodič-zem



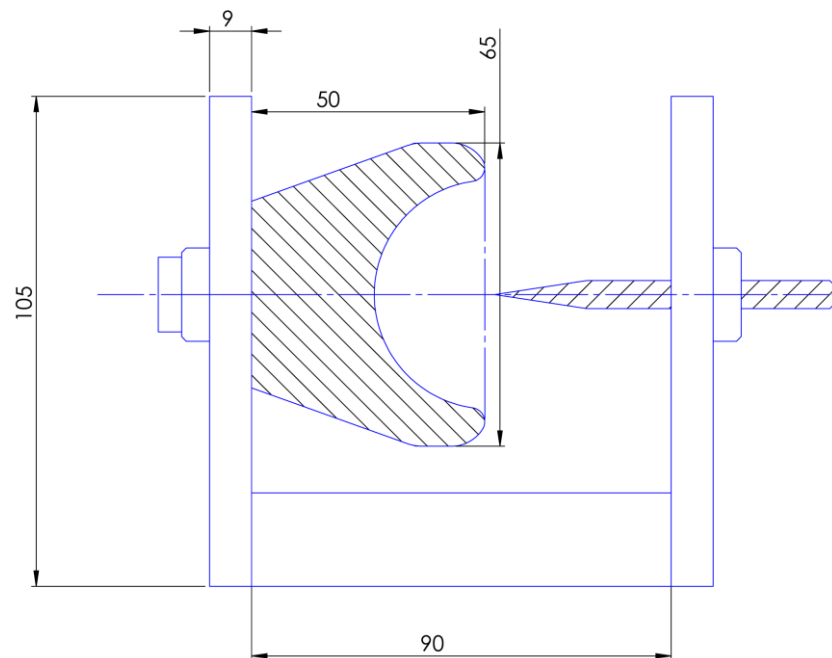
Obr. 12: Orientační rozměrový výkres zkoušeň vodič-zem

4.2.2 Uspořádání hrot-miska

Klasické uspořádání hrotu, který je pod napětím, vůči uzemněné kovové misce. V tomto případě je hrot zhotoven ze závitové tyče, takže je možné velmi jednoduše měnit jeho polohu vůči misce dle vlastních potřeb. Foto prvku a rozměry, viz *Obr. 13* a *Obr. 14*.



Obr. 13: Foto zkoušence hrot-miska



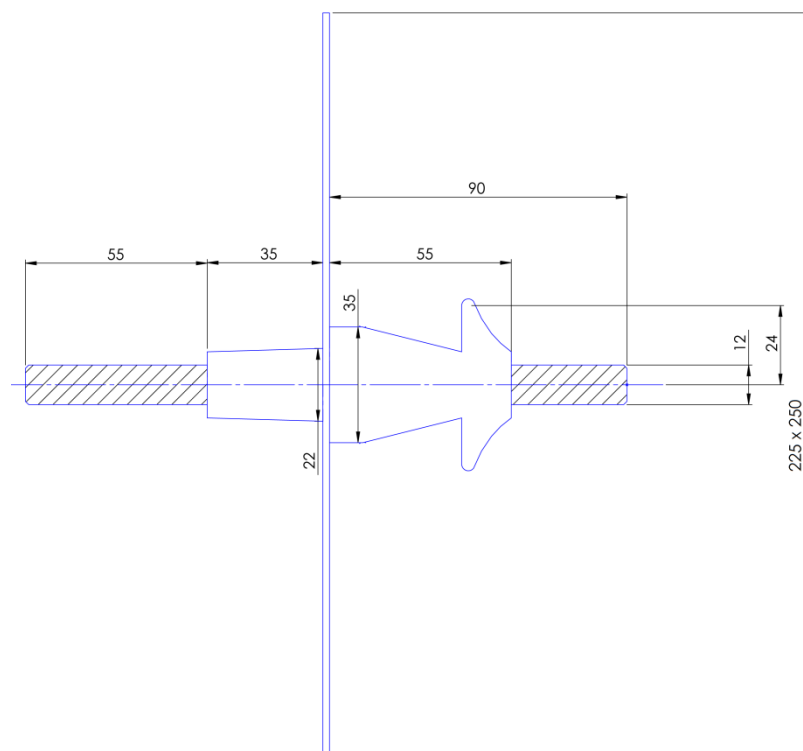
Obr. 14: Orientační rozměrový výkres zkoušence hrot-miska

4.2.3 Průchodka

Posledním zkoušeným prvkem je keramická průchodka, která je uchycena na kovové desce ve tvaru obdelníka. Během měření je na průchodku přivedeno napětí a deska je uzemněna. Foto prvku a rozměry, viz obr. 15 a obr. 16.



Obr. 15: Foto zkoušence průchodka



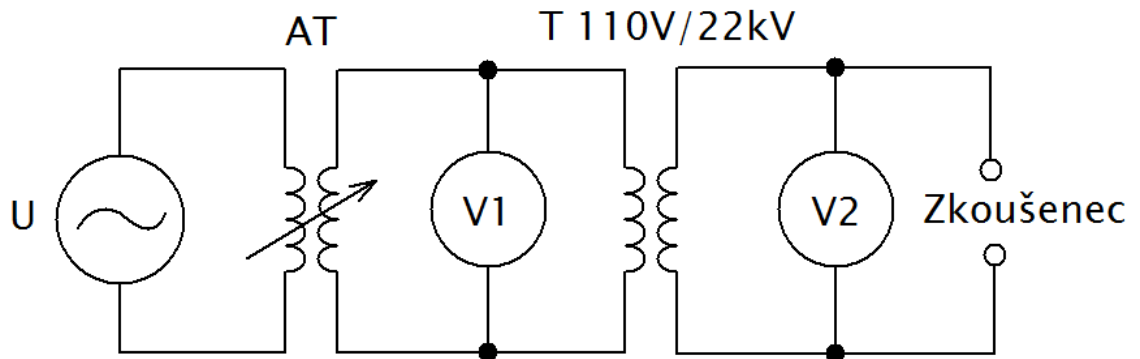
Obr. 16: Orientační rozměrový výkres zkoušence průchodka

4.3 Měření v bezdrazové komoře pomocí širokopásmové antény

4.3.1 Popis metody

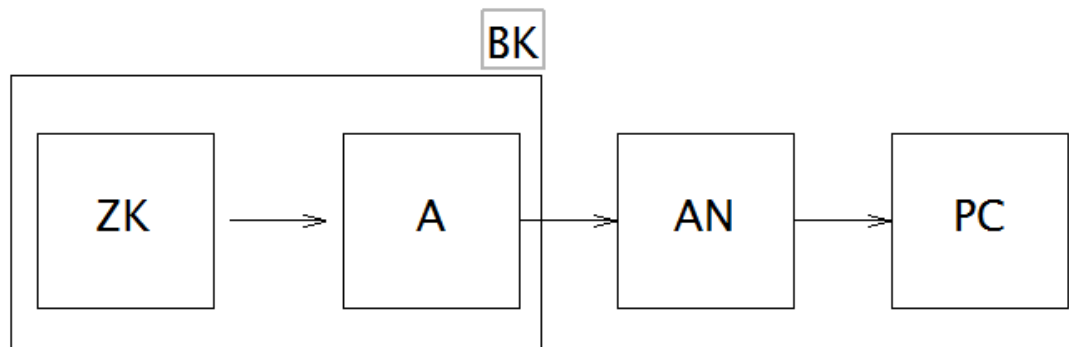
Tato metoda spočívá ve sledování rušení elektromagnetického pole korónou pomocí antény. Měřicí úloha je zapojena dle *obr. 17*. Na svorky zdroje napětí v bezdrazové komoře je připojen autotransfornátor AT, který slouží k plynulé regulaci napětí v celém obvodu. Voltmetrem V1 je sledováno výstupní napětí autotransfornátoru, aby nedošlo k přetížení

transformátoru T. Dále je v obvodu připojen zvyšovací transformátor T, 110 V/22 kV, který přivádí vysoké napětí na svorky, mezi které je připojen zkoušený prvek. Voltmetrem V2 je pak sledováno výstupní napětí transformátoru T, resp. napětí na zkoušenci.



Obr. 17: Schéma zapojení

Vyzařované rušení ze zkoušence ZK zapojeného v obvodu, ruší pole antény A v bezodrazové komoře BK. Signál z antény je pomocí analyzátoru AN přenesen do PC, kde je pomocí příslušného programu zobrazena charakteristika rušícího signálu (obr. 18.).



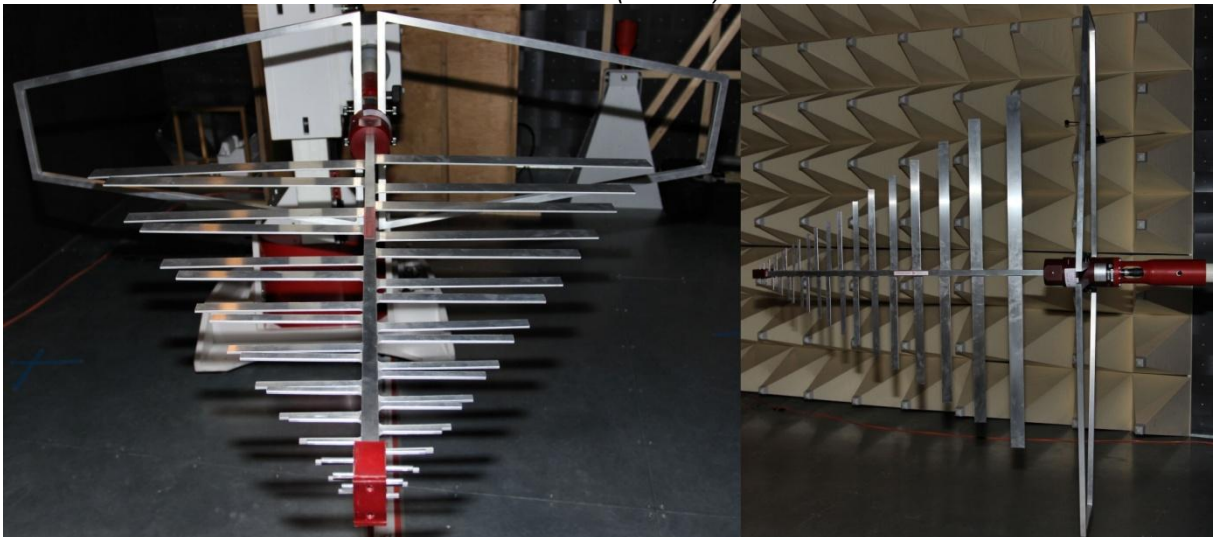
Obr. 18: Blokové schéma měření v bezodrazové místnosti

4.3.2 Použité antény

Během měření jsem použil dva typy antén. Kruhovou a logaritmickeo-periodickou s bikonickým dipólem. Kruhová anténa ROHDE & SCWARZ (viz obr. 19) s měřicím rozsahem 9 kHz-30 MHz byla použita spíše při prvotním odhadování rušení korónou a volbě metody. Log-per (BiLog) anténa FRANKONIA (viz obr. 20) s měřicím rozsahem 30 MHz-3 GHz byla použita jako hlavní měřicí anténa.



Obr. 19: Kruhová (rámová) anténa



Obr. 20: Logaritmicke-periodická anténa s bikonickým dipólem (BiLog)

4.3.3 Měřicí přijímač

K analýze signálu získaného anténou jsem použil měřicí přijímač ROHDE & SCWARZ (obr. 21), EMI TEST RECEIVER, ESR7. ESR7 je EMI testovací přijímač pro frekvenční rozsah od 9 kHz do 7 GHz a je v souladu s normou CISPR 16-1-1. Slouží k měření elektromagnetického rušení pomocí klasické metody krokování frekvence nebo pomocí vysokorychlostního skenování měřené oblasti na bázi FFT. Díky schopnosti měření v reálném čase nabízí měřicí přijímač širokou škálu diagnostických nástrojů, umožňuje podrobnou analýzu rušivých signálů a zobrazení jejich historie. Mezi vlastnosti ESR7 patří: možnost certifikačního měření, režim spektrálního analyzátoru, extrémně rychlá měření díky HW FFT výpočtům, měření v reálném čase se sledováním kvazi-vrcholových a průměrných hodnot,

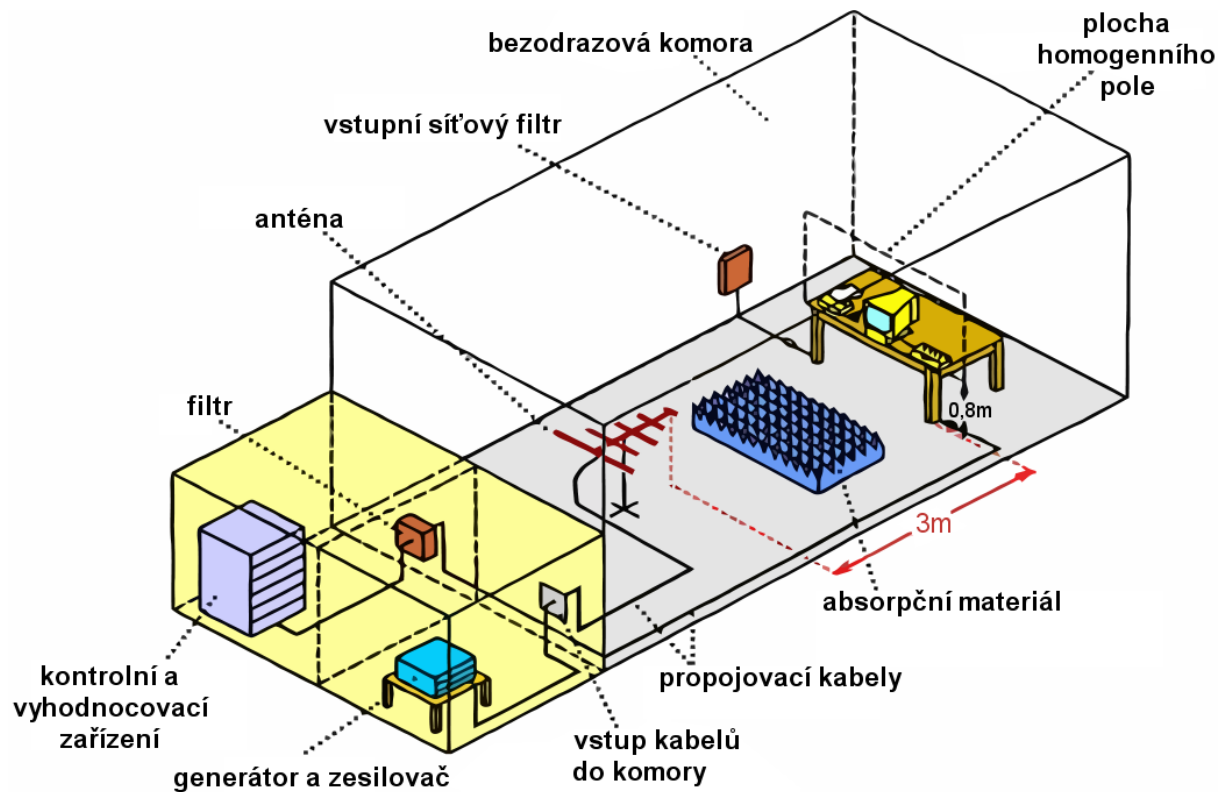
spektrogram pro zobrazení problémových/bezproblémových oblastí, FMT sledování spektrálních stavů, výkonová měření ve frekvenční a časové oblasti, současné zobrazení několika stop a grafů měření, vlastní operační systém a mnoho dalších funkcí. [5, 6]



Obr. 21: Měřicí přijímač ROHDE & SCWARZ [6]

4.3.4 Průběh měření

Při měření v bezdrazové komoře jsem uplatnil dva následující kroky. V prvním kroku se jednalo spíše o testování jednotlivých metod a vybavení pro měření. Testoval jsem různé nastavení antén, spektrum měřených frekvencí, jejich polohu, použití zesilovače, vzdálenost antény (1m a 3m od stolu se zkušencem, dle norem). Měřicí stůl byl celodřevěný (tj. nevodivý) a 80 cm vysoký, dle norem pro zkoušky odolnosti vůči VF elektromagnetickým polím: ČSN EN 61000-4-3(-4-6). Na obrázku 22 je zobrazen orientační náčrt měření v bezdrazové komoře. [20, 21]



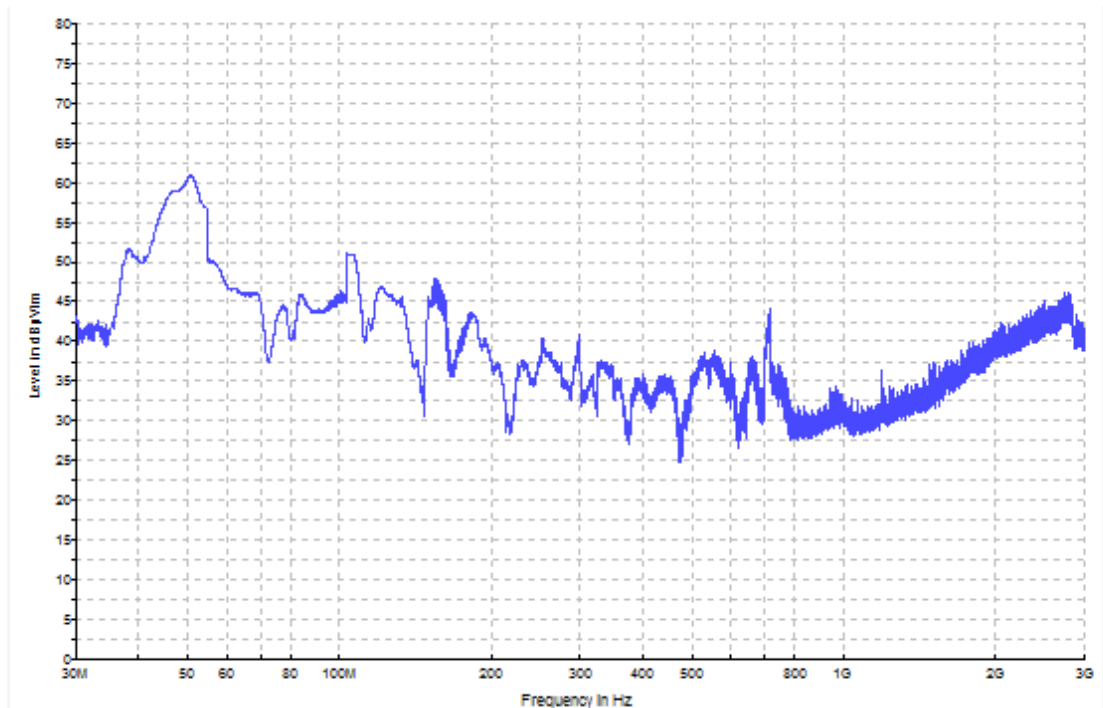
Obr. 22: Princip měření v bezodrazové komoře [21]

V druhém kroku měření bylo vybráno takové nastavení, které mělo nejlepší výsledky v měření předchozím. Rozhodl jsem se pro použití logaritmicko-periodické antény s bikonickým dipólem (BiLog), měřící rozsah 30 MHz – 3 GHz, anténa byla ve vzdálenosti 3 m od stolu se zkoušencem, stůl zůstal stejný, tj. celodřevěný, 80 cm vysoký. Měření jsme vykonali pro vertikální a horizontální polohu antény.

Po nastavení všech bodů z předchozího odstavce proběhlo měření na každém z měřených modelů stejně. Nejprve jsme pomalu projeli celou napětovou charakteristiku od 0 kV (rozpojená úloha kvůli zachycení pozadí antény) do 22 kV (max. U dle prvku). Během ní jsme sledovali jak výrazné změny v měřené charakteristice na PC, tak i fyzické chování vzorku (zapalovací napětí koróny, hluk koróny apod.). Z tohoto výjezdu pak bylo stanoveno několik hodnot pro každý měřený prvek, které byly poté nastaveny a změřeny a poznamenány.

4.3.5 Příklad výsledné charakteristiky

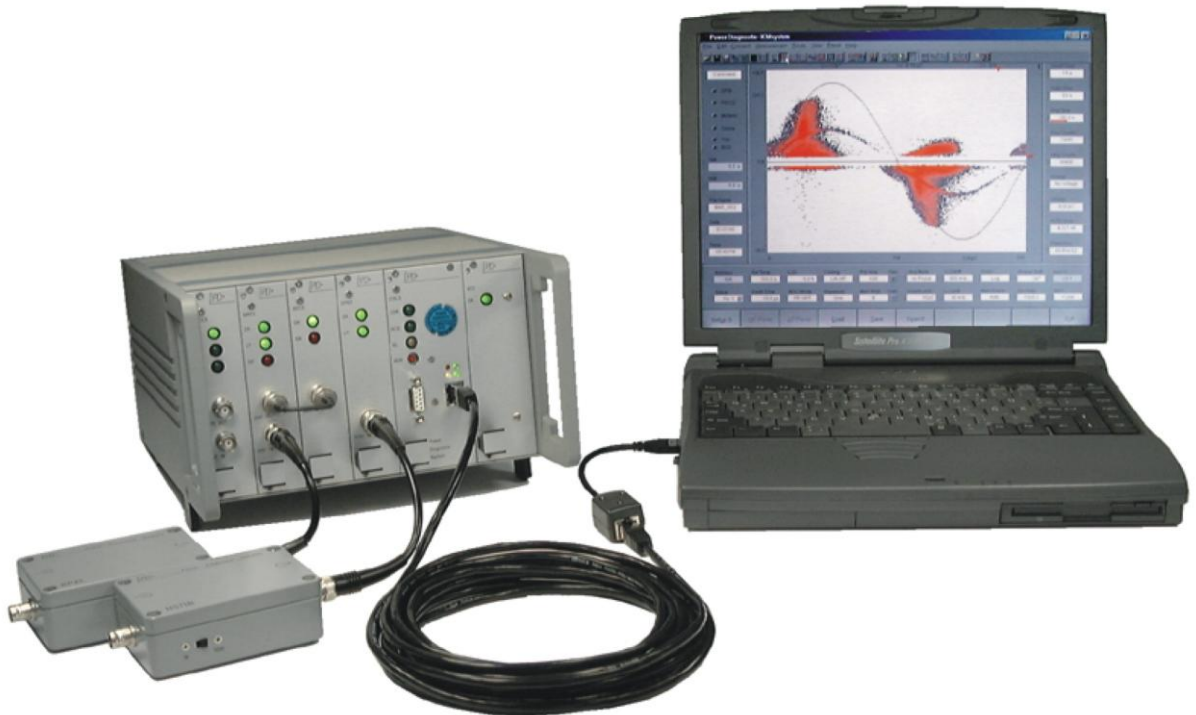
Na obr. 23 je charakteristika měřeného rušení v bezodrazové komoře. Na vodorovné ose se nachází měřená frekvence v Hz, na svislé ose je rušení v dB μ V/m.



Obr. 23: Příklad naměřené charakteristiky

4.4 Měření částečných výbojů v laboratoři vysokého napětí

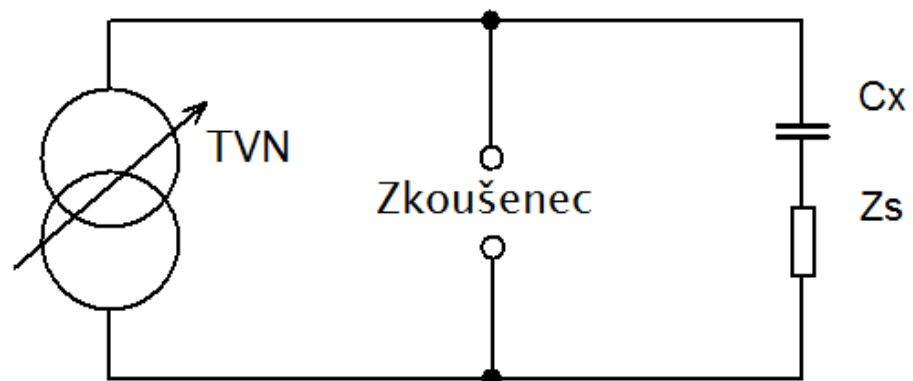
K měření jsem použil digitální měřicí systém pro měření částečných výbojů (obr. 24). Systém se skládá z digitálního měřicího detektoru, aktivních předzesilovačů a vazební jednotky se snímací impedancí. Měřený signál impulzů částečných výbojů získaný na snímací impedanci je po zesílení zesilovačem převeden analogově digitálním převodníkem do digitální podoby a následně softwarově zpracován počítačem s nainstalovaným ovládacím softwarem. Zaznamenané impulzy částečných výbojů jsou v digitální formě vyhodnoceny a rozříděny podle velikosti jednotlivých impulzů, fáze jejich výskytu ve vztahu k fázi zkušební napětí a četnosti výskytu jednotlivých impulzů. Vyhodnocení dále nabízí možnost zaznamenání počtu výbojů v kladné a záporné části měřené charakteristiky. [7]



Obr. 24: Digitální měřící systém Power Diagnostix [7]

4.4.1 Popis metody

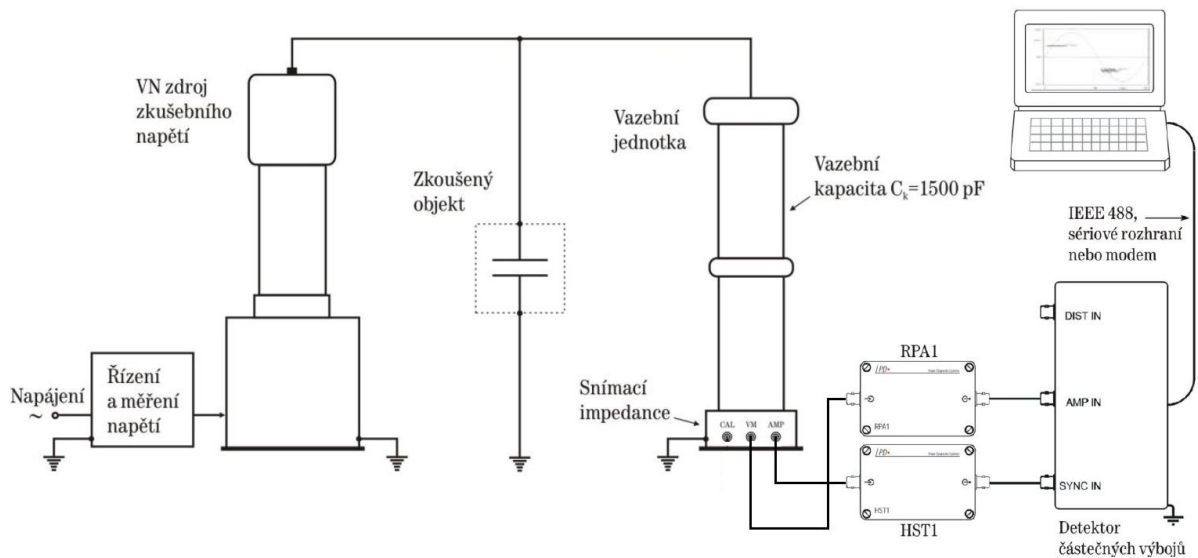
Schéma zapojení metody na obr. 25 spočívá ve sledování částečných výbojů pomocí snímací impedance Z_s .



Obr. 25: Schéma zapojení metody sledování výbojů)

Na principiálním schématu na obr. 26 je zakresleno kompletní zapojení měřícího obvodu určeného pro měření částečných výbojů. Zkoušený objekt v obvodu charakterizovaný kapacitou je připojen paralelně k vazební jednotce tvořené sériovou kombinací vazební kapacity a snímací impedance. [7] „Měřený signál částečných výbojů je z výstupu snímací

impedance přiveden do předzesilovače RPA1 a odtud je po zesílení zaveden na vstup (AMP IN) měřicího detektoru. Signál zkušební napětí získaný na výstupu ze snímací impedance je po zesílení předzesilovačem HST1 zaveden na vstup (SYNC IN) měřicího detektoru. Měřicí detektor komunikuje s řídicím počítačem prostřednictvím GPIB, sériového nebo modemového rozhraní.“(Martínek, 2005, s. 77) [7]



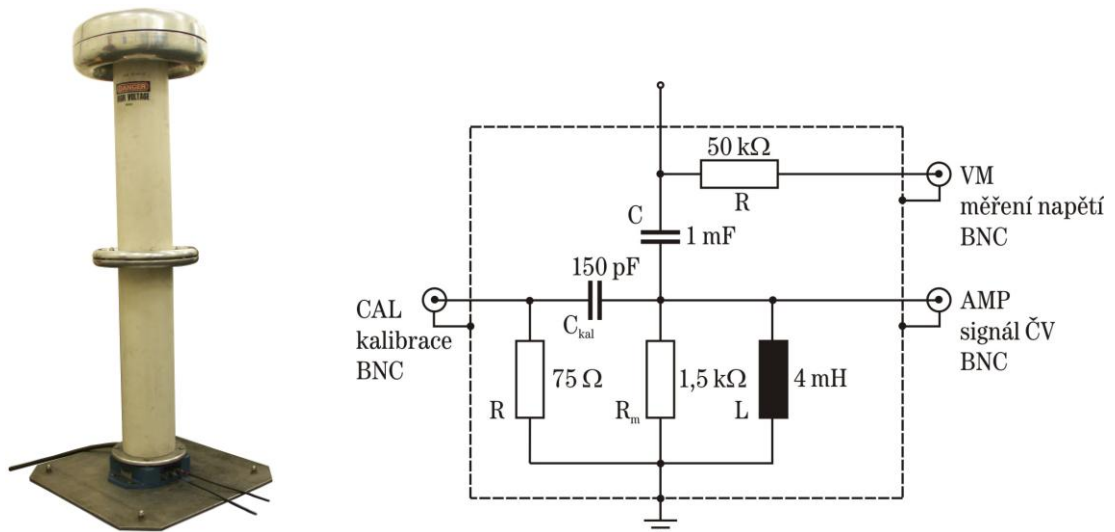
Obr. 26: Principiální schéma měřicího obvodu částečných výbojů [7]

4.4.2 Vazební jednotka

Vazební jednotka se podílí na procesu kvazi-integrace proudových impulzů částečných výbojů přiváděných na její vstup. Snímací impedance je umístěna ve spodní části vazební kapacity a je připojena k jejímu nízkonapětovému výstupu. Sériová kombinace vazební kapacity a snímací impedance v tomto případě tvoří společně jeden kompaktní celek tzv. vazební jednotku, viz obr. 27. Na zmíněném ilustračním obrázku je dále uvedeno také zjednodušené schéma zapojení snímací impedance. [7]

„Snímací impedance obsahuje nízkonapětovou (600 V) kapacitu $C = 1 \mu\text{F}$, která společně s vazební kapacitou $C_k = 1500 \text{ pF}$ tvoří kapacitní dělič s napětovým převodem 1:1000. Na výstupu (VM) z měřicí impedance je tak přítomen synchronizační signál zkušební napětí. Odpor R_m ve snímací impedanci převádí proudové impulzy částečných výbojů na jejich napětový průběh, přičemž indukčnost L zajišťuje odfiltrování kapacitních proudů na nichž jsou proudové impulzy superponovány. Signál částečných výbojů je z výstupu snímací impedance veden koaxiálním kabelem na vstup zesilovače detektoru (AMP IN). Součástí snímací impedance je i vnitřní kalibrační člen tvořený kalibrační kapacitou $C_{\text{kal}} = 150 \text{ pF}$ a

přizpůsobovacím odporem 75Ω . Vnitřní kalibrační člen slouží k tzv. nepřímé kalibraci měřicího obvodu.“ (Martínek, 2005, s. 70) [7]



Obr. 27: Vazební jednotka společně s obvodovým zapojením snímací (měřicí) impedance [7]

4.4.3 Vysokonapětový zdroj zkušebního napětí

Zkušební obvod je napájen pomocí zdroje zkušebního napětí 150 (188) kV, 10 kVa, 50 Hz. Vysokonapětový zdroj zkušebního napětí je kombinace autotransformátoru sloužícího k regulaci a měření velikosti zkušebního napětí a vysokonapětového transformátoru. Vysokonapětový transformátor, viz obr. 28, je vyroben tak, aby v něm nedocházelo k částečným výbojům. Díky této konstrukci pak nedochází ke zkreslování vlastního měření. [7]



Obr. 28: Bezvýbojový vysokonapětový zdroj zkušebního napětí [7]

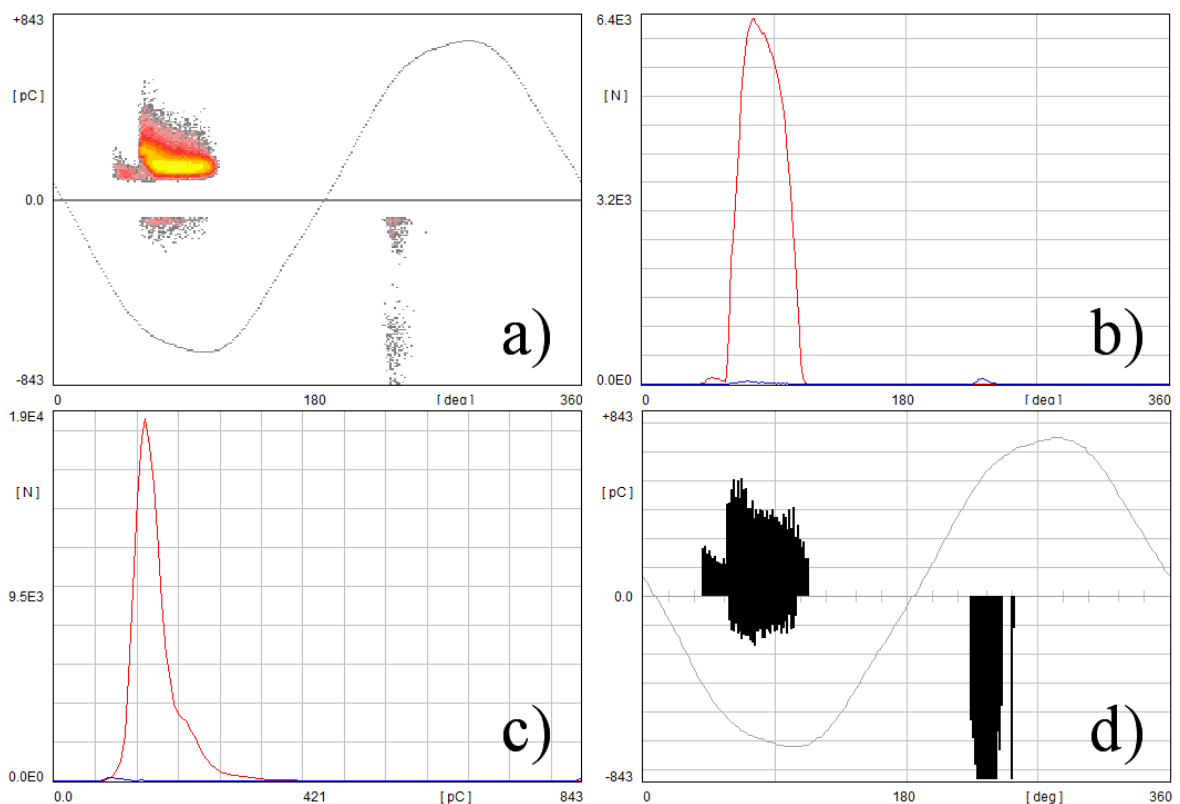
4.4.4 Průběh měření

Jako první krok jsem provedl kalibraci vazební jednotky v beznapěťovém stavu pomocí externího kalibrátoru, který na svém koaxiálním výstupu generuje kalibrační náboj volitelné polarity a velikosti. V tomto případě se jednalo o hodnotu 100 pC. Poté jsem na zapojených přípravcích v obvodu provedl měření částečných výbojů. Na prvcích jsem vždy nastavil hodnotu napětí, která byla zvolena během měření v bezodrazové komoře. Měření na každé hodnotě napětí mělo dobu trvání 1 minutu. Během této doby došlo k zaznamenání výsledků měření do PC.

4.4.5 Příklad výsledku

Z naměřených hodnot detektoru lze pomocí PC programu Power Diagnostix získat 4 druhy výsledků:

- charakter částečných výbojů v závislosti na fázi zkušebního napětí (*obr. 29a*)
- graf četnosti výbojů v závislosti na fázi zkušebního napětí (*obr. 29b*)
- rozložení četnosti výbojů v závislosti na jejich velikosti (*obr. 29c*)
- osciloskopický režim částečných výbojů (*obr. 29d*)



Obr. 29: Příklady výsledků měření částečných výbojů

5 Výsledky měření

V následujících bodech jsou zapsány a shrnuty veškeré hodnoty, které byly měřeny a zachyceny do charakteristik. Pozn.: Všechny jednotlivé a složené charakteristiky jsou v *Příloze č.1* na přiloženém CD.

5.1 Orientační měření

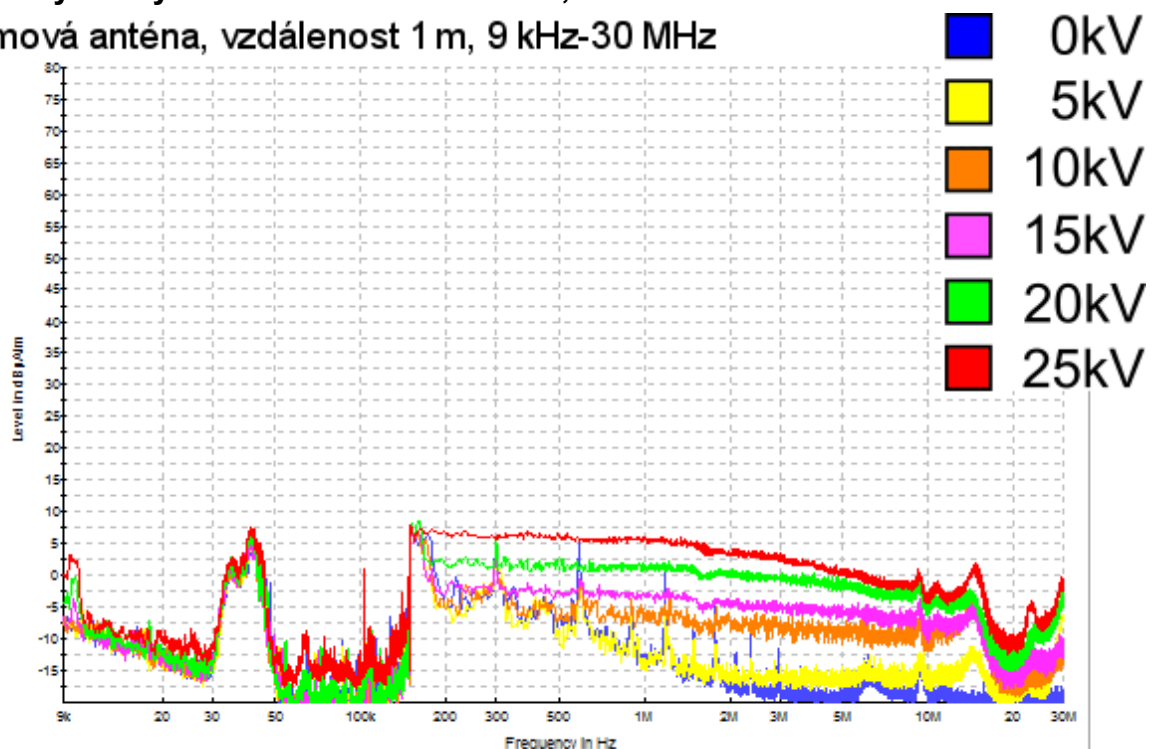
Jak již bylo zmíněno, první měření bylo spíše orientačního charakteru. Na prvku vodičzem, vodič 0,6 mm, jsme zkoušeli, v jakých frekvenčních oblastech dojde k rušení pole antény. Nejprve jsme použili rámovou anténu ve vzdálenostech 1 a 3 metry od zkoušence, měřící rozsah antény 9 kHz-30 MHz.

Graf 1 ukazuje hodnoty rušení pro vzdálenost antény 1 m. Z něj je patrné, že se zvyšujícím napětím docházelo k postupnému zvyšování rušení od 150 kHz do 30 MHz.

Na *grafu 2* jsou hodnoty rušení pro vzdálenost antény 3 m. Zde jsou si hodnoty velice podobné pro všechna měřená napětí.

5.1.1 Výsledky měření rámovou anténou, vzdálenost 1 m

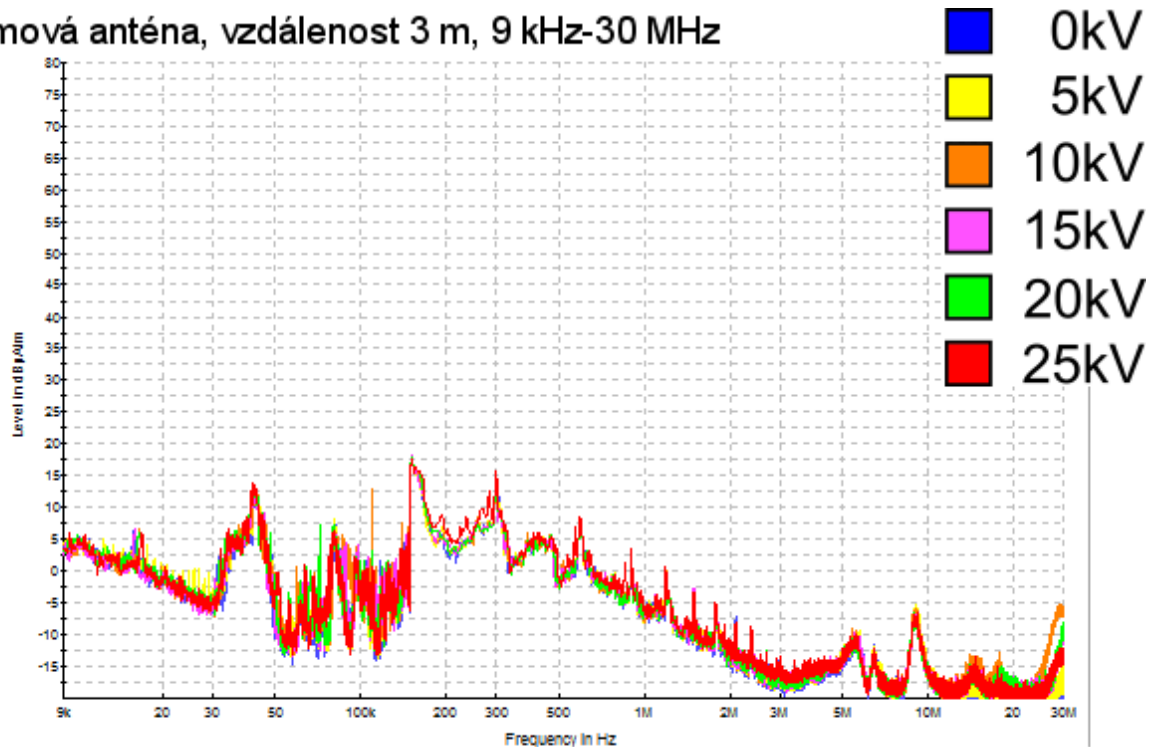
Rámová anténa, vzdálenost 1 m, 9 kHz-30 MHz



Graf 1: Výsledné hodnoty měření rámovou anténou na vzdálenost 1 m, měřící rozsah 9 kHz-30 MHz

5.1.2 Výsledky měření rámovou anténou, vzdálenost 3 m

Rámová anténa, vzdálenost 3 m, 9 kHz-30 MHz

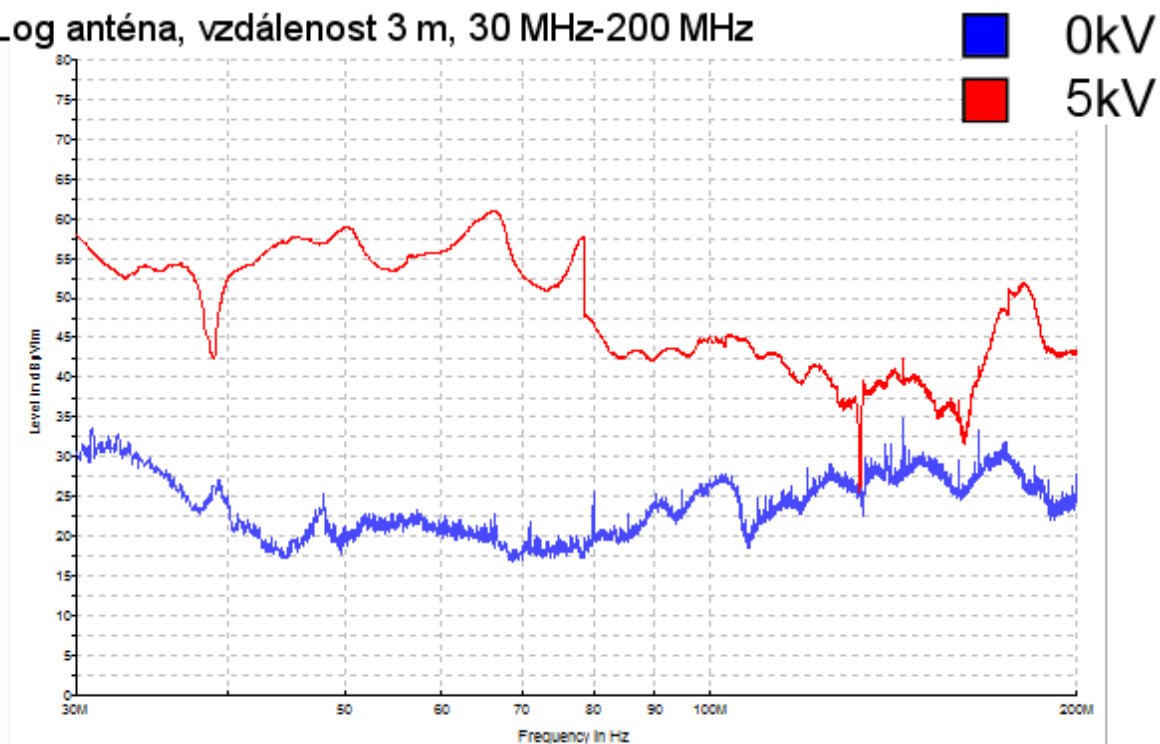


Graf 2: Výsledné hodnoty měření rámovou anténou na vzdálenost 3 m, měřící rozsah 9 kHz-30 MHz

V druhé části orientačního měření jsme pro měření použili BiLog anténu Frankonia, také na vzdálenost 1 m a 3 m. Měřící rozsah antény 30-200 MHz. V grafu 3. jsou zaneseny veškeré charakteristiky naměřené touto anténou. U vzdálenosti 3 m jsme vyzkoušeli anténní předzesilovač, který neměl vliv. Na základě těchto výsledků jsme se rozhodli pro upřednostnění log-per antény pro další měření. Protože u vyššího rozsahu frekvencí se rušení projevilo více.

5.1.3 Výsledky měření BiLog anténou, vzdálenost 3 m

BiLog anténa, vzdálenost 3 m, 30 MHz-200 MHz

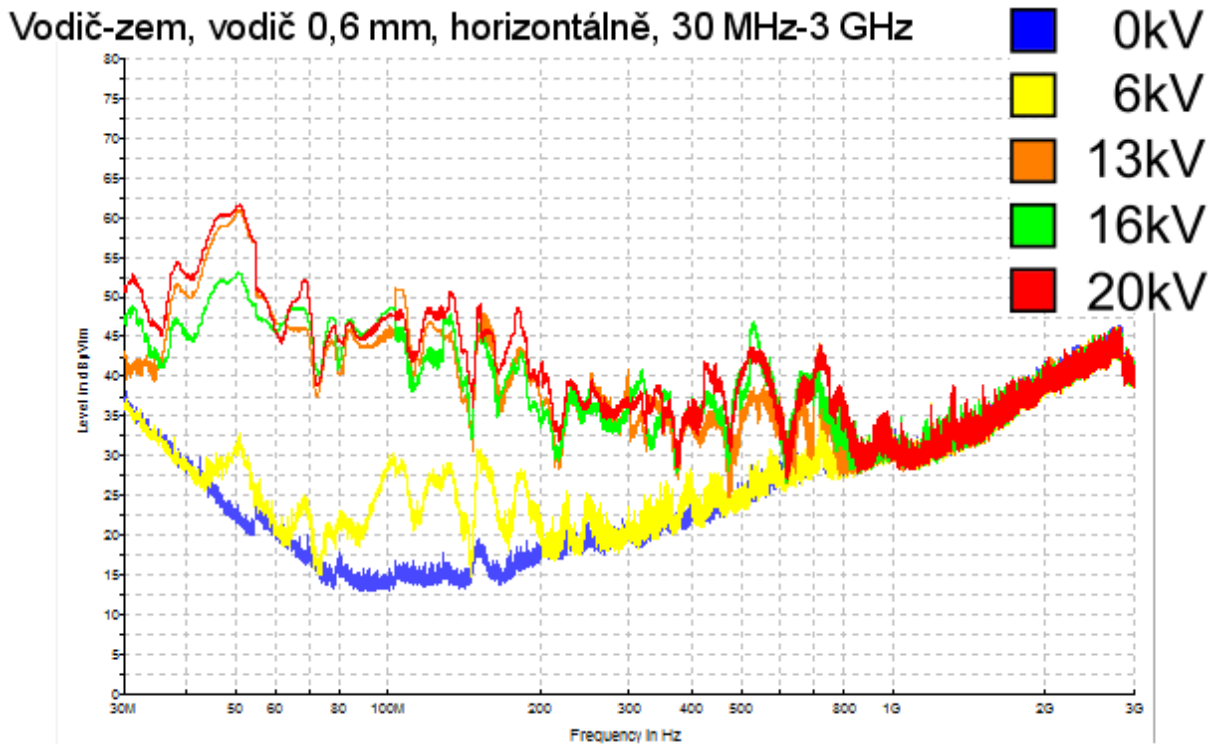


Graf 3: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, měřící rozsah 30-200 MHz

5.2 Hlavní měření

V následujících *grafech* a *tabulkách* jsou vyneseny a zhodnoceny všechny výsledky z měření v bezodrazové komoře pomocí BiLog antény. Tabulky sumarizují hodnoty měřených napětí na prvku a krátké zhodnocení naměřených charakteristik a úrovní rušení pro tato napětí. Každý graf je spjatý s následující tabulkou.

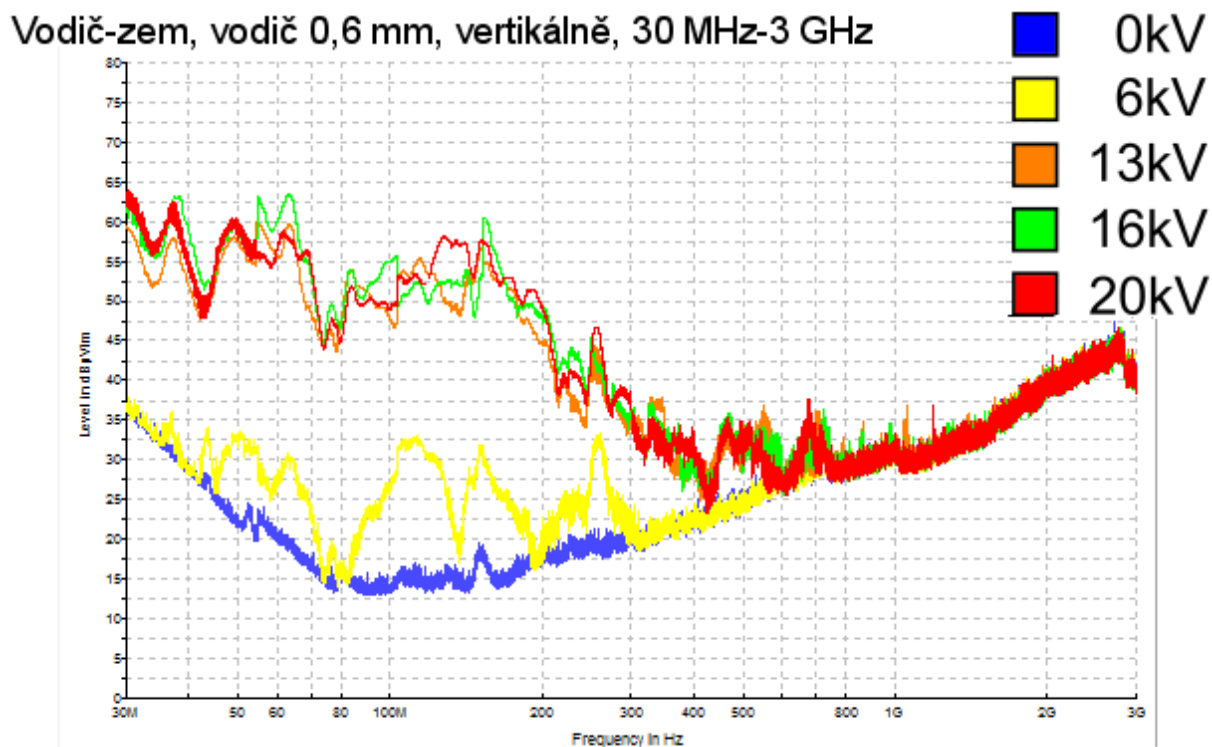
5.2.1 Naměřené hodnoty - přípravek vodič-zem, vodič 0,6 mm



Graf 4: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, vodič 0,6 mm, horizontální poloha antény, měřící rozsah 30 MHz-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení, vypnutý stav.
6	Zachyceno slabé rušení, 40-200 MHz, špičkové hodnoty 30-32,5 dBµV/m.
13	Zvýšení rušení, 40-800 MHz, špičky až 60 dB µV/m v oblasti 40-800 MHz.
16	Pokles hodnot, nestabilní charakter, rušení 40-800 MHz, špičky 52,5 dBµV/m.
20	Rušení v rozmezí 30 MHz-1 GHz, špičky až 62,5 dBµV/m v oblasti 40-60 MHz.

Tab. 2: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 4



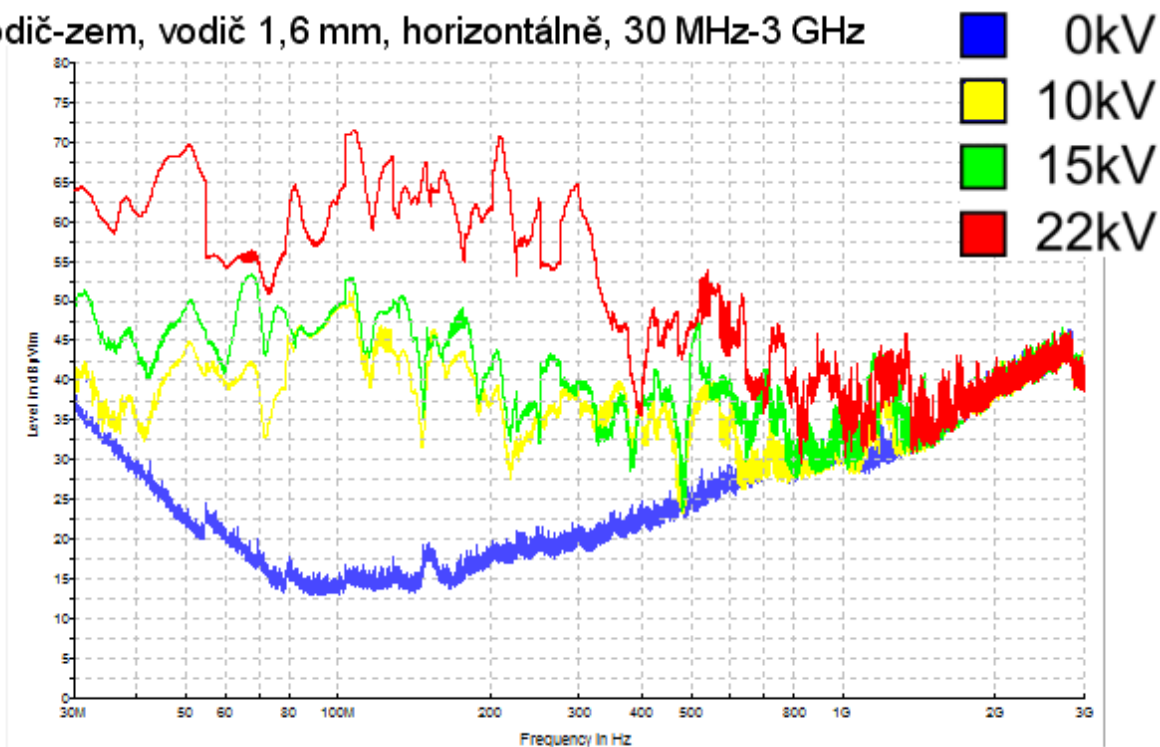
Graf 5: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, vodič 0,6 mm, vertikální poloha antény, měřicí rozsah 30 MHz-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení, vypnutý stav.
6	Zachyceno slabé rušení, 40-300 MHz, spíčkové hodnoty 32,5-35 dBµV/m.
13	Rušení v rozmezí 30 MHz-1 GHz, špičky až 60 dBµV/m v oblasti 30-200 MHz.
16	Rušení v rozmezí 30 MHz-1 GHz, špičky 60-62,5 dBµV/m v oblasti 30-200 MHz.
20	Rušení v rozmezí 30 MHz-1 GHz, špičky 55-62,5 dBµV/m v oblasti 30-200 MHz.

Tab. 3: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 5

5.2.2 Naměřené hodnoty - přípravek vodič-zem, vodič 1,6mm

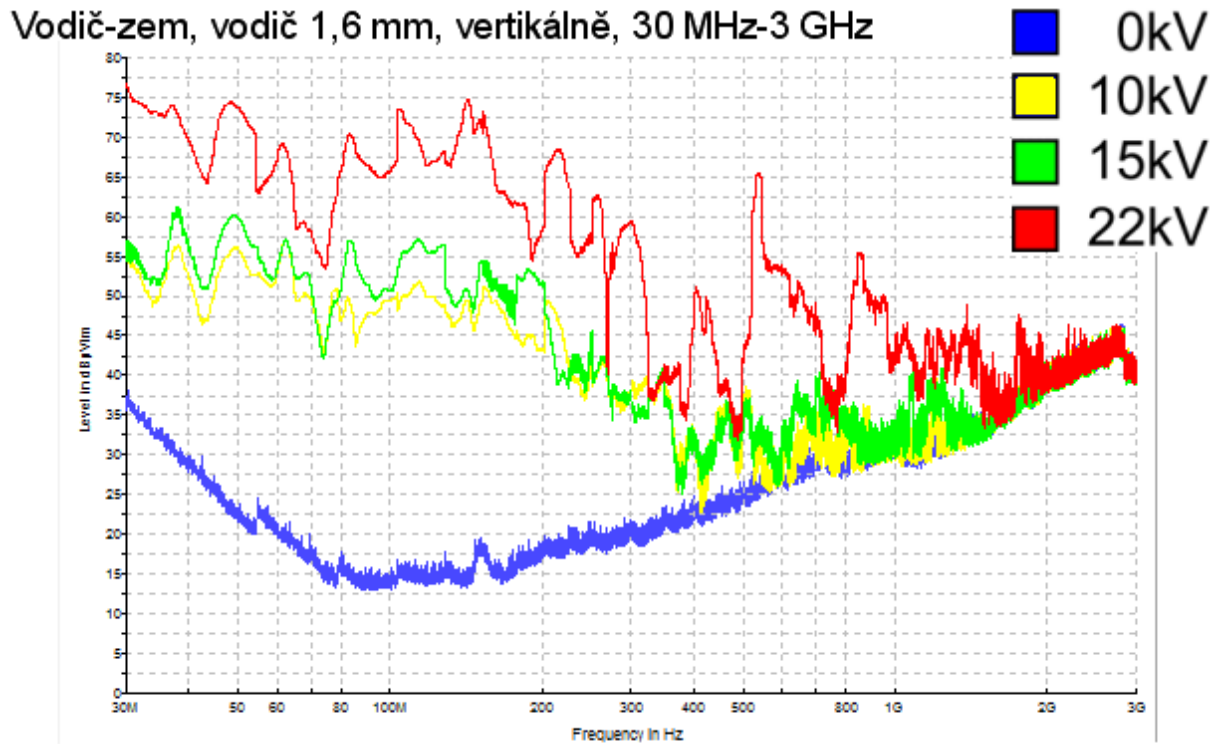
Vodič-zem, vodič 1,6 mm, horizontálně, 30 MHz-3 GHz



Graf 6: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, vodič 1,6 mm, horizontální poloha antény, měřící rozsah 30 MHz-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení
10	Rušení v rozmezí 40 MHz-1 GHz, špičky 45-50 dBµV/m v oblasti 80-200 MHz.
15	Rušení v rozmezí 30 MHz-1,5 GHz, špičky 50-53 dBµV/m v oblasti 60-200 MHz.
22	Rušení v rozmezí 30 MHz-1,8 GHz, špičky 65-72 dBµV/m v oblasti 40-300 MHz.

Tab. 4: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 6



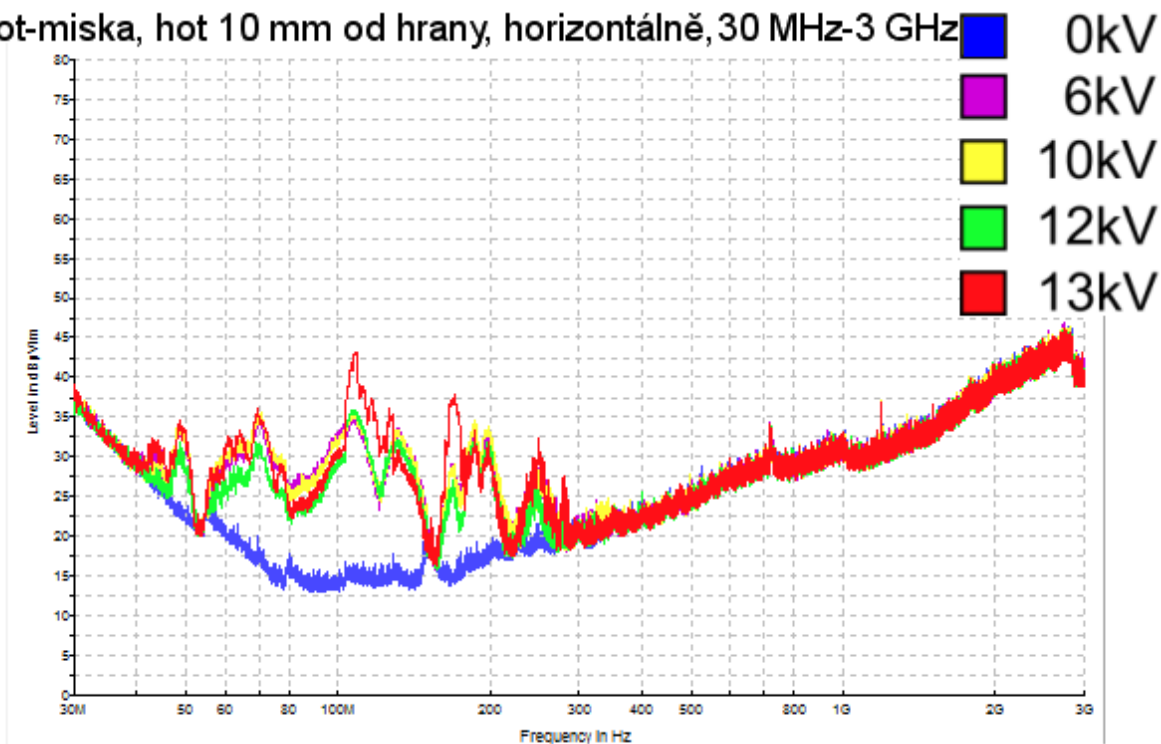
Graf 7: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, vodič 1,6 mm, vertikální poloha antény, měřicí rozsah 30 M-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení
10	Rušení v rozmezí 30-800 MHz, špičky 50-57,5 dBµV/m v oblasti 30-250 MHz.
15	Rušení v rozmezí 30 MHz-1,5 GHz, špičky 52-51 dBµV/m v oblasti 30-200 MHz.
22	Rušení v rozmezí 30 MHz-2 GHz, špičky 67-75 dBµV/m v oblasti 30-600 MHz.

Tab. 5: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 7

5.2.3 Naměřené hodnoty - přípravek hrot-miska

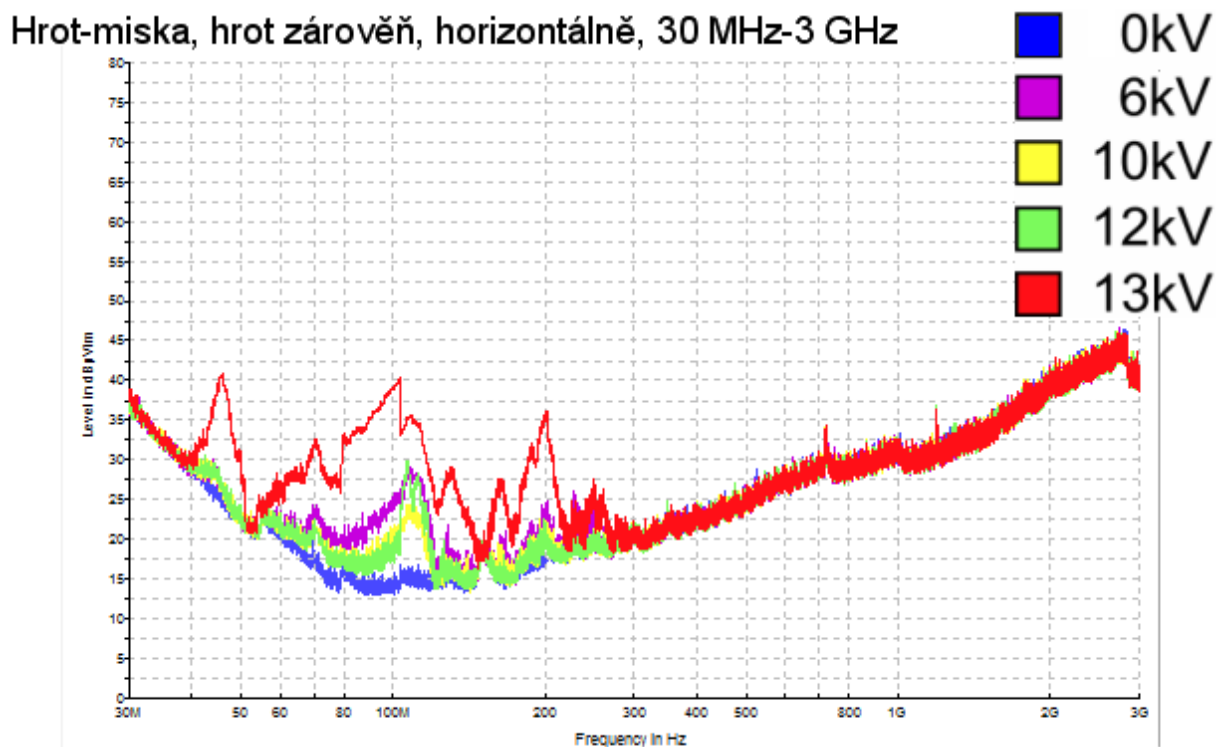
Hrot-miska, hot 10 mm od hrany, horizontálně, 30 MHz-3 GHz



Graf 8: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, hrot-miska, hrot 10 mm od hrany misky, horizontální poloha antény, měřicí rozsah 30 MHz-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení.
6	Zachyceno malé rušení kolem 100 MHz, špička 30 dBµV/m.
10	Nižší rušení, opět kolem 100 MHz, špička 25 dBµV/m.
12	Rušení 100-120 MHz, špička 30dBµV/m.
13	Vyšší rušení, 40-300 MHz, špičky 40 dBµV/m.

Tab. 6: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 8



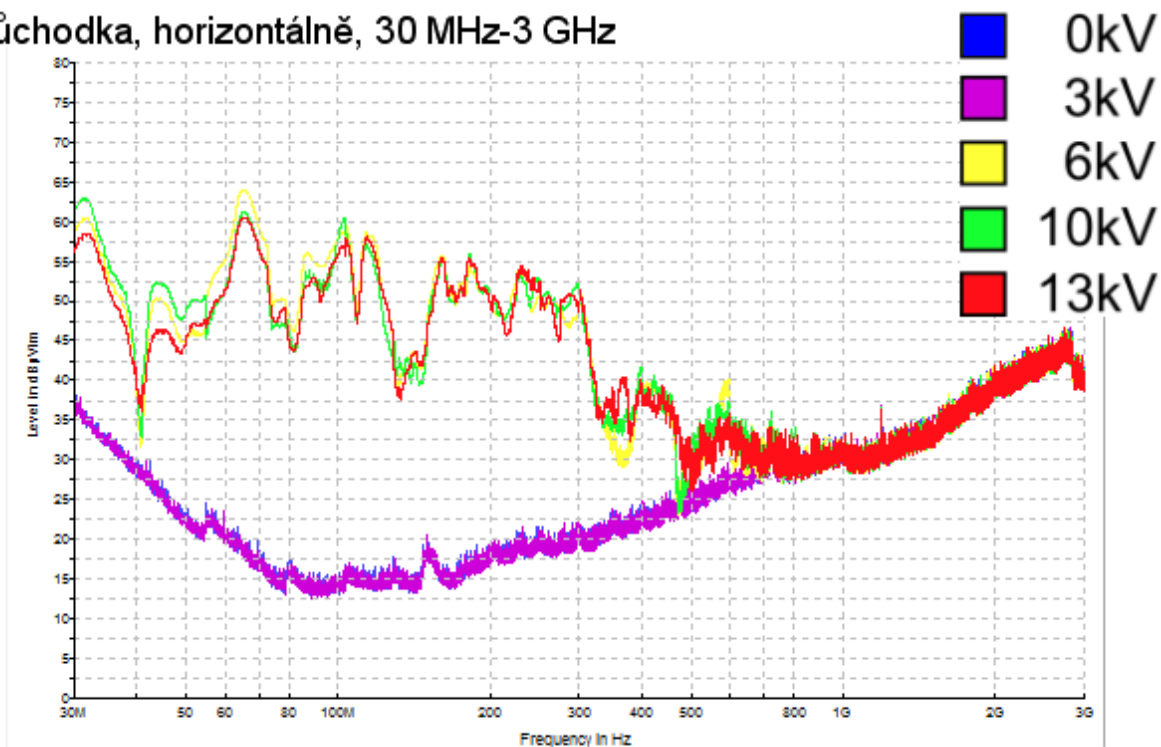
Graf 9: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, hrot-miska, hrot zároveň s hranou misky, horizontální poloha antény, měřicí rozsah 30 MHz-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení.
6	Rušení 45-300 MHz, špičky 35 dBµV/m.
10	Rušení 45-300 MHz, špičky 35 dBµV/m.
12	Rušení 45-300 MHz, špičky 35 dBµV/m.
13	Rušení 40 -300 MHz, špičky 37,5-47,5 dBµV/m.

Tab. 7: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 9

5.2.4 Naměřené hodnoty - přípravek průchodka

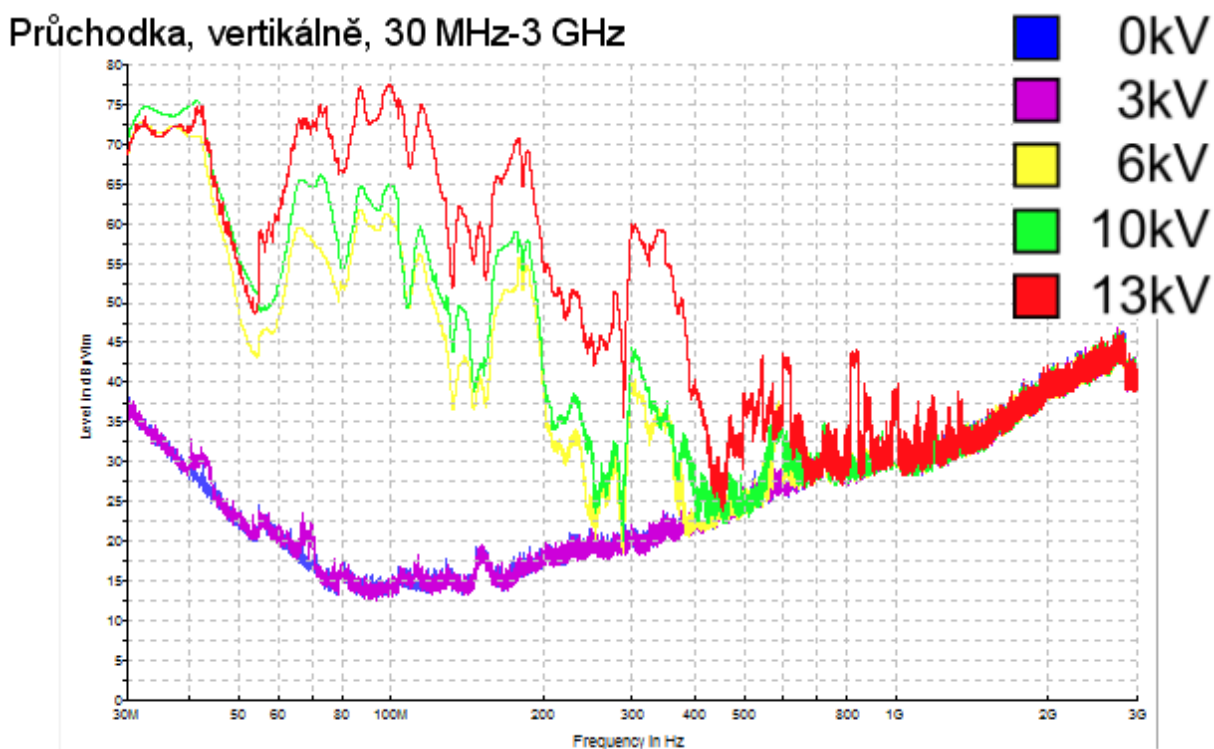
Průchodka, horizontálně, 30 MHz-3 GHz



Graf 10: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, průchodka, horizontální poloha antény, měřicí rozsah 30 MHz-3 GHz

Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení.
3	Takřka bez rušení.
6	Rušení 30-350 MHz, špičky 55-65 dBµV/m.
10	Rušení 30-350 MHz, špičky 55-63 dBµV/m.
13	Rušení 30-320 MHz, špičky 50-62 dBµV/m.

Tab. 8: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 10



Graf 11: Výsledné hodnoty měření BiLog anténou na vzdálenost 3 m, průchodka, vertikální poloha antény, měřicí rozsah 30 MHz-3 GHz

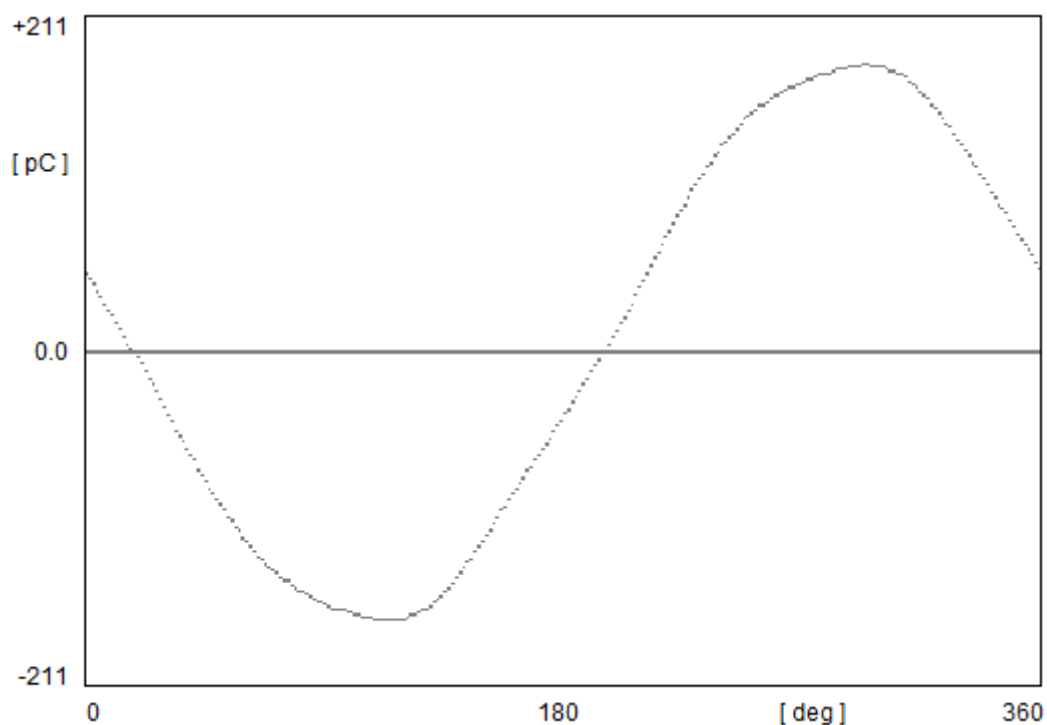
Hodnota U[kV]	Poznámka
0	Pozadí v pořádku bez rušení.
3	Takřka bez rušení.
6	Rušení 30-400 MHz, špičky 60-73 dBµV/m v rozmezí 30-100 MHz.
10	Rušení 30-400 MHz, špičky 65-75 dBµV/m v rozmezí 30-100 MHz.
13	Rušení 30MHz-1,5 GHz, špičky 70-76 dBµV/m.

Tab. 9: Hodnoty napětí a komentář průběhu charakteristik pro graf 11

5.3 Měření částečných výbojů

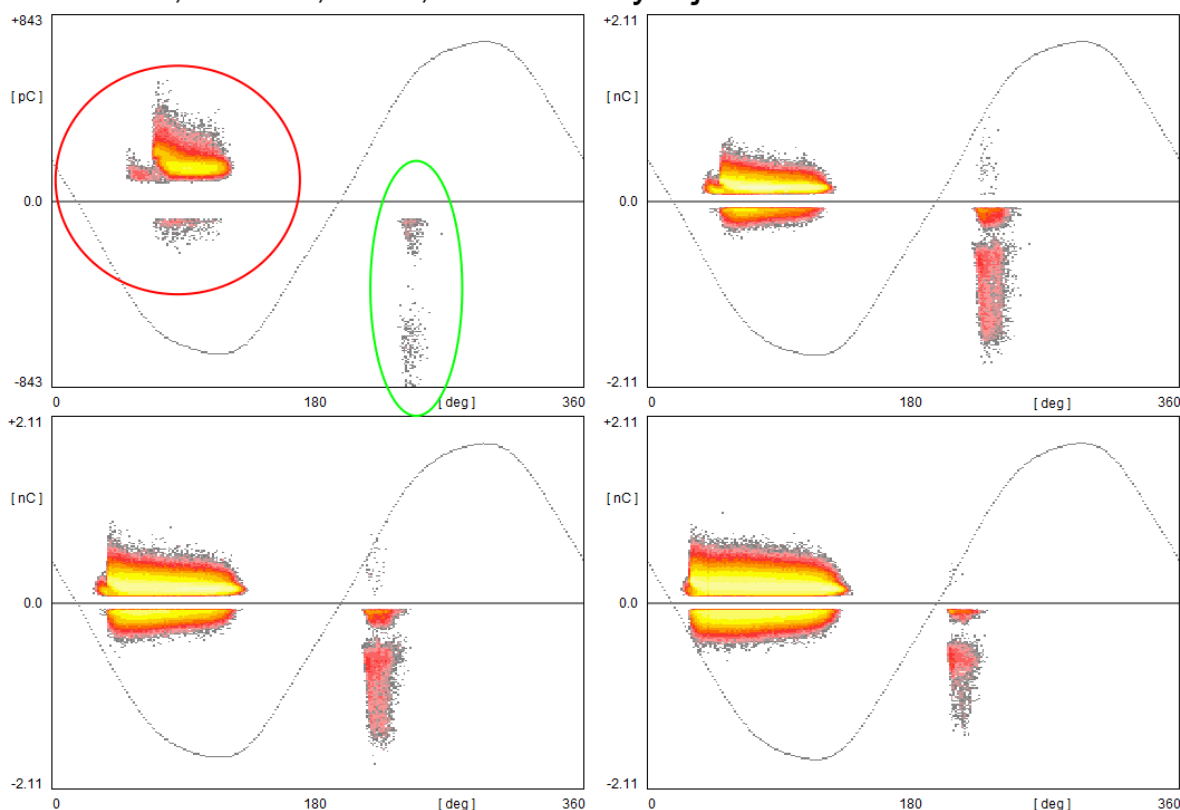
Na *obrázcích 4.2-4.5* jsou zobrazeny grafy charakteru částečných výbojů. Červeně označené části ukazují typický tvar korónových výbojů zjištěných touto metodou, v zelených částech je dle našich odhadů zachycen postupný vývoj striméru, jenž je způsoben prostorovým nábojem koróny. Na obrázcích je vidět, že díky rostoucímu napětí dochází k postupnému roztahování výbojů podél nuly. Zde se děje to, že postupně narůstá prostorový náboj, který působí proti koróně. Při pohledu na výsledky, je třeba brát ohled na zvolenou citlivost metody, jelikož u některých zkoušených prvků byly zachyceny výboje až při vyšších hodnotách napětí (u některých nízkých hodnot napětí byly charakteristiky prázdné). Taková prázdná charakteristika je zobrazena na *obrázku 4.1*. Nicméně tato citlivost je pro měření důležitá, aby došlo k zachycení důležitých výbojů a jejich projevů. Pozn. autora: Fázový

posun na obrázcích (asi 17°) se dle zkušeností kantorů vyskytuje u této metody pouze v laboratoři, z níž proběhlo měření. Na výsledky měření tento posun nemá žádný vliv. Pozn.: Jednotlivé naměřené charakteristiky pro každý prvek jsou v Příloze č.1 na přiloženém CD.



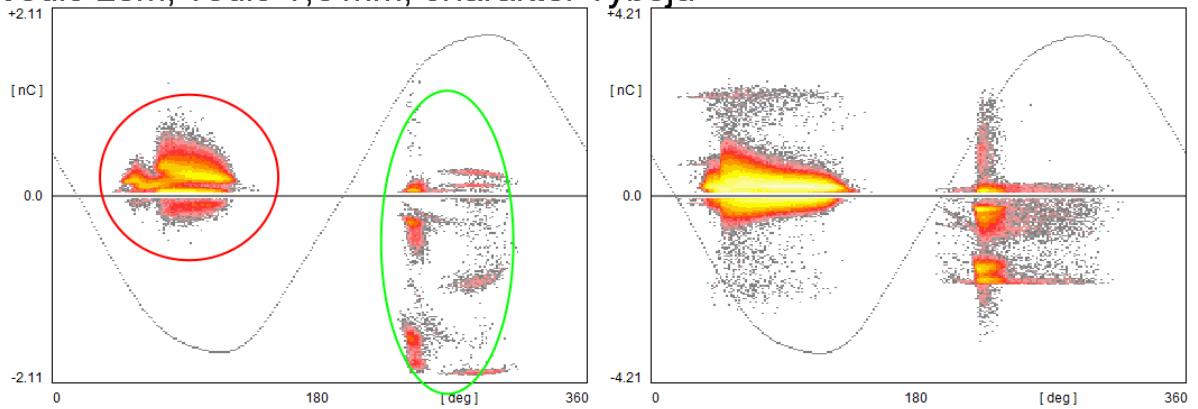
Obr. 4.1: Prázdná charakteristika částečných výbojů

Vodič-zem, vodič 0,6 mm, charakter výbojů



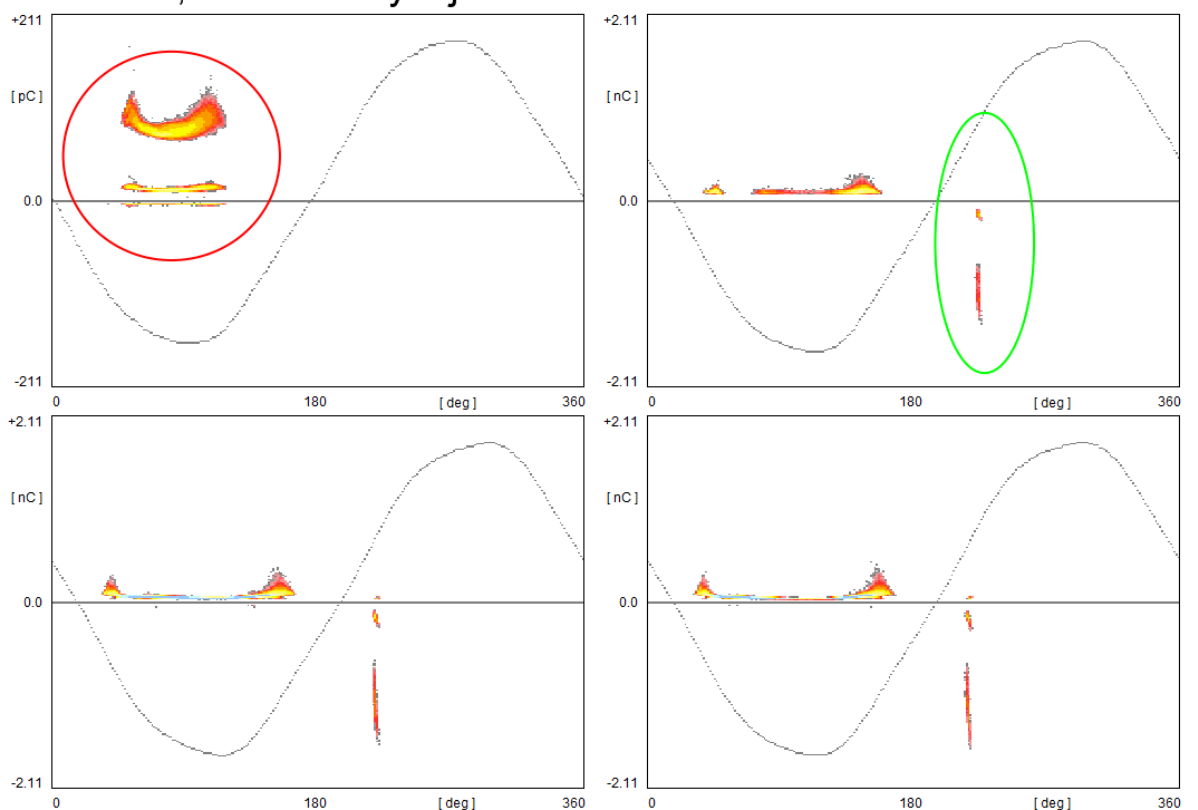
Obr. 4.2: Vývoj částečných výbojů na prvku vodič-zem, vodič 0,6 mm

Vodič-zem, vodič 1,6 mm, charakter výbojů



Obr. 4.3: Vývoj částečných výbojů na prvku vodič-zem, vodič 1,6 mm

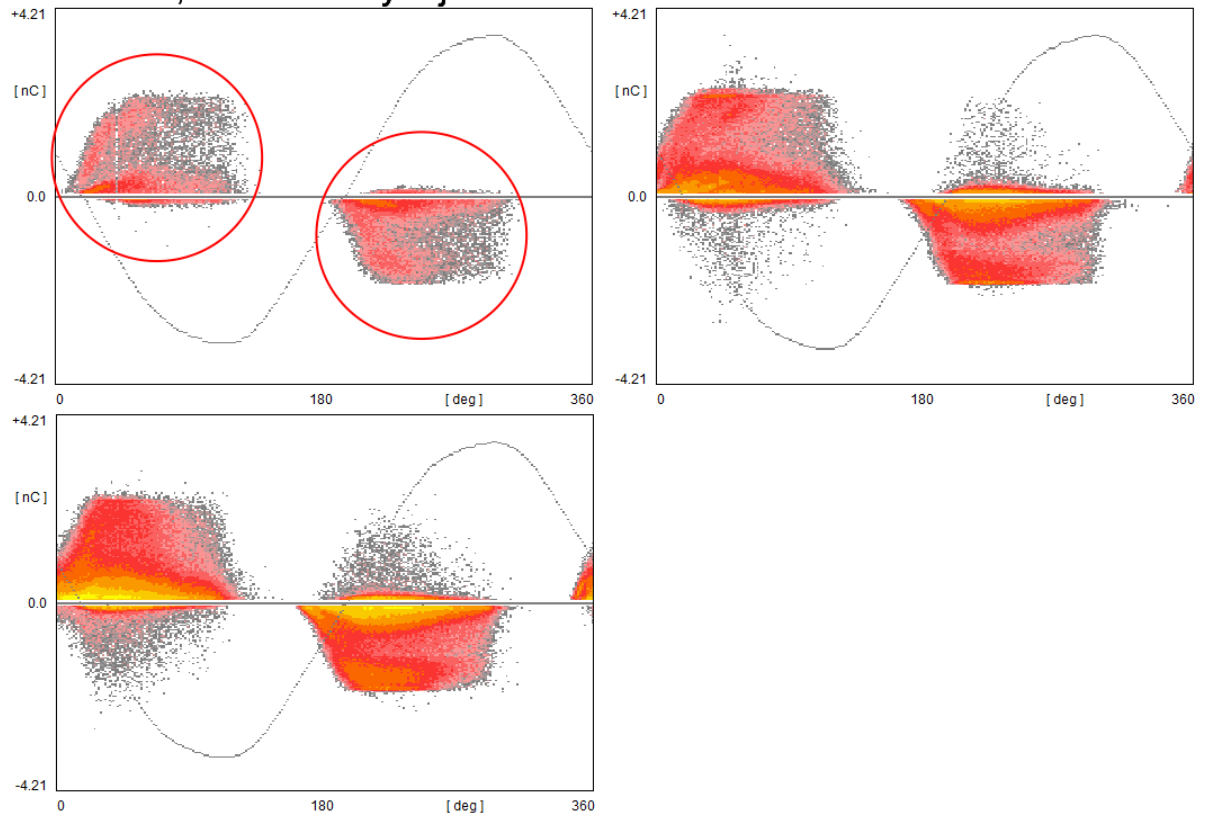
Hrot-miska, charakter výbojů



Obr. 4.4: Vývoj částečných výbojů na prvku hrot-miska

Na obrázku 4.5 je zobrazen charakter výbojů pro prvek průchodka. Obrázek se od ostatních prvků liší tím, že je zde velmi podobný charakter výbojů v kladné i záporné půlvlně. Zde hraje roli fakt, že se kromě koróny na průchodce s nárůstem napětí začínají projevovat i klouzavé výboje.

Průchodka, charakter výbojů



Obr. 4.5: Vývoj částečných výbojů na prvku průchodka

Závěr

Diplomová práce řeší všechny body zadání. V obecné části práce (tj. body 1 a 2) jsou popsány zdroje elektromagnetického rušení a teorie měřicích metod použitých v práci. Praktická část (tj. body 3 a 4) přináší popis navržené metodiky měření, souhrn výsledků a jejich vyhodnocení pomocí grafů a tabulek. Praktickou část práce jsem navíc rozšířil pomocí metody měření částečných výbojů, která potvrdila výskyt sledovaných jevů na daných zkoušených prvcích. Tento postup bylo možné zvolit díky možnostem pracoviště a zajímavým vlastnostem této metody. Variabilita výsledků, pestrost a množství získaných dat přináší dobrý podklad pro další možnosti zkoumání.

Výsledky práce přináší nový pohled na dříve zastávaný názor o charakteru elektromagnetického rušení, které má původ ve výbojové činnosti. Jak je často v literatuře uváděno, koróna bývá považována za zdroj rušení, který se projevuje v nižších frekvenčních pásmech, řádově desítkách kHz. Naše měření oproti tomu ukázalo, že koróna může svým rušením zasáhnout i do vyššího frekvenčního pásma, což je velmi zajímavé zjištění. V některých případech bylo naměřeno rušení až nad hranicí 1GHz. Není jednoduché vysvětlit tento překvapivý výsledek. Je možné, že to může spočívat v použité velmi citlivé měřicí technice, která při předchozích analýzách tohoto problému nebyla k dispozici.

Problém, který jsem řešil v této práci, disponuje velkou složitostí díky všem svým vlastnostem a vlivům, na kterých je závislý. Není možné s jistotou říci, zda jsou všechny postupy a výsledky nevyvratitelné a stoprocentně správné. Aby došlo k úplnému potvrzení, či vyvrácení postupů, metod a zkoušených prvků je třeba ještě mnoho dalšího experimentálního ověřování zjištěného jevu. Zdokonalení metod, úprava měřicích postupů, změna měřicí techniky, úprava zkoušených prvků mohou vést k dalším zajímavým výsledkům.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Automa: EMC v technické praxi II, Rušivé signály, jejich zdroje a šíření* [online]. 2006 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=30991
- [2] ČSN CISPR 18-1. *Charakteristiky rušení od venkovních vedení a zařízení vysokého napětí. Část 1: Popis jevů*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [3] *Elektrorevue: Základy elektromagnetické kompatibility (EMC), Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů* [online]. 2001 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html#kap5.1>
- [4] *Encyklopedie EMC VUTBR: Měření pomocí antén* [online]. 2009 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node44>
- [5] *Rohde&Schwarz: R&S®ESR EMI Test Receiver* [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz.cz/cz/products/test_and_measurement/emc_field_strength/ESR.html
- [6] *Rohde&Schwarz: R&S®ESR EMI Test Receiver* [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/esr-productstartpage_63493-17877.html
- [7] ING. MARTÍNEK, Petr. *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Plzeň, 2005. Disertační práce. FEL-ZČU Plzeň.
- [8] *Elix shop: LA-400 ,magnetická smyčková anténa, 10kHz-500MHz* [online]. 2009 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.elix-shop.cz/store/goodsdetail.asp?strGoodsID=70442>
- [9] *Lindgren: 3301C Active Monopole* [online]. 2014 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.ets-lindgren.com/assets/images/3301C.jpg>
- [10] *AHSystems: High Frequency Dipole Antenna* [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.ahsystems.com/catalog/FCC-4.php>
- [11] *Dynamic Sciences International: AB-301 Biconical Antenna, 30 MHz to 300 MHz* [online]. 2015. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://dynamicssciences.com/client/show_product/55
- [12] *A.H. Systems, Inc.: Log periodic antennas* [online]. 2015. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.ahsystems.com/catalog/logperiodic.php>
- [13] *TESTE: Model 3103 - kónická spirálová anténa* [online]. 2009. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.teste.cz/?produkt=643>
- [14] *The Howland Company: Measurement (Probe) Antennas* [online]. 2011. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.thehowlandcompany.com/wireless/measurement-antennas.htm>

- [15] *TESTEQ: Antennas* [online]. 2015. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:
<http://www.teseq.com/product-categories/antennas.php>
- [16] *Compliance club: Probes* [online]. 2015. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:
http://www.compliance-club.com/archive/keitharmstrong/emc_testing1.html
- [17] *Wikipedia: Corona discharge* [online]. 2013. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Talk%3ACorona_discharge
- [18] ČSN CISPR 18-1. *Charakteristiky rušení od venkovních vedení a zařízení vysokého napětí: Dodatek A*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [19] ČSN CISPR 18-1. *Charakteristiky rušení od venkovních vedení a zařízení vysokého napětí: Dodatek C*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [20] VACULÍKOVÁ, Polina. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 504 s. ISBN 80-716-9568-8.
- [21] *Encyklopedie EMC: Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím* [online]. 2009. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z:
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node66>

Přílohy

Příloha č.1 – Veškeré naměřené charakteristiky z měření pomocí antén a měření částečných výbojů (na přiloženém CD).