

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vysokofrekvenční charakteristika korónového výboje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub TOMEČEK**  
Osobní číslo: **E15N0123P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Vysokofrekvenční charakteristika korónového výboje**  
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 korónový výboj.
2. Popište možnosti měření koróny.
3. Navrhňte vhodný postup pro měření vysokofrekvenční charakteristiky koróny.
4. Realizujte měření na modelu vedení a zhodnoťte výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Antonín Veverka: Technika vysokých napětí
2. Publikace v databázi IEEE Xplore
3. Chang, Lawless, Yamamoto: Corona discharge processes

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018

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



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

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření vysokofrekvenčních charakteristik korónového výboje na několika modelech vedení v laboratoři.

Teoretická část práce je věnována fyzikálním zákonům, popisující děje, které jsou v blízké souvislosti s elektrickými výboji. Také je popsána podstata vysokofrekvenčního šumu elektrických vedení. Dále je rozvedena problematika korónového výboje spolu s možnostmi jak lze měřit či detekovat.

V praktické části práce je podle navrženého postupu pro měření vysokofrekvenčních charakteristik korónového výboje realizováno měření. Získaná data, pro různá uspořádání vysokonapěťových vodičů, jsou následně zpracována do frekvenčních charakteristik, porovnána mezi sebou a zhodnocena.

## **Klíčová slova**

Ionizace, nehomogenní pole, korónový výboj, vysokofrekvenční rušení, svazkový vodič, vysokofrekvenční charakteristika, anténa, signálový přijímač.

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on the measurement of the high frequency characteristics of the corona discharge on several models of transmission line in the laboratory.

The theoretical part is devoted to physical laws, describing events that are in close connection with electrical discharges. The gist of the high frequency noise of power lines is also described. Furthermore, the problem of corona discharge is discussed, together with the possibilities of measuring or detecting.

In the practical part of the work, measurements are made according to the proposed procedure for measuring the high frequency characteristics of the corona discharge. The data obtained for the various high-voltage conductor configurations are then processed into frequency characteristics, compared to each other and evaluated.

## **Key words**

Ionization, non-uniform field, corona discharge, radio-frequency interference, bundle conductor, high frequency characteristic, antenna, signal 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 17.5.2018

Bc. Jakub Tomeček

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné materiály, profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Byl hlavní oporou při tvorbě praktické i teoretické části práce. Dále děkuji Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. za poskytnutí materiálů k vypracování teoretické části.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A JEDNOTEK VELIČIN</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TEORIE FYZIKÁLNÍCH DĚJŮ</b> .....	<b>13</b>
1.1 IDEÁLNÍ PLYN .....	13
1.2 IONIZACE PROSTŘEDÍ.....	13
1.3 IONIZACE, REKOMBINACE, VYRAŽENÍ A POHLČENÍ ČÁSTIC .....	15
1.4 DRIFT A POHYBLIVOST ČÁSTIC.....	17
1.5 DIFÚZE A DIFÚZNÍ TOK.....	18
1.6 TOWNSENDŮV IONIZAČNÍ KOEFICIENT.....	18
1.7 ELEKTRICKÉ POLE .....	19
<b>2 VYSOKOFREKVENČNÍ ŠUM ELEKTRICKÝCH VEDENÍ</b> .....	<b>20</b>
2.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI VYSOKOFREKVENČNÍHO ŠUMU .....	21
2.1.1 Podélné šíření.....	21
2.1.2 Elektromagnetické pole .....	22
2.1.3 Definice šumu .....	22
2.1.4 Spektrum.....	23
2.2 VLIV VNĚJŠÍCH PARAMETRŮ.....	23
<b>3 POPIS KORÓNOVÉHO VÝBOJE</b> .....	<b>25</b>
3.1 Kladná koróna .....	25
3.2 Záporná koróna .....	26
3.3 Účinky koróny na vodičích .....	27
3.4 Činitele při vzniku korony .....	28
3.4.1 Povrchový gradient vodiče .....	28
3.4.2 Průměr vodiče .....	28
3.4.3 Stav povrchu vodičů.....	29
3.4.4 Atmosférické a povětrnostní podmínky.....	29
3.5 Ztráty korónou na vedení.....	29
<b>4 MOŽNOSTI MĚŘENÍ KORÓNY</b> .....	<b>31</b>
4.1 Měření akustických projevů koróny .....	31
4.2 Měření IR kamerou a UV detektorem.....	31
4.3 Měření pomocí detektoru částečných výbojů .....	32
4.4 Metoda zkušební klece .....	33
4.5 Metoda zkušebního vedení .....	33
4.6 Detekce vysokofrekvenčních signálů .....	34
<b>5 NÁVRH VHODNÉHO POSTUPU PRO MĚŘENÍ</b> .....	<b>36</b>
5.1 Popis modelů vedení .....	36
5.2 Zápalné napětí korónového výboje .....	36
5.3 Frekvenční charakteristiky .....	37
<b>6 MĚŘENÍ VYSOKOFREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK</b> .....	<b>38</b>
6.1 Stanovení počátečního napětí korónového výboje .....	38
6.2 Měření VF charakteristik anténami .....	40
6.2.1 Měření vysokofrekvenčních charakteristik v laboratoři .....	41
6.2.2 Měření VF charakteristik na venkovním vedení 400 kV .....	47



<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>49</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>1</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>3</b>
<b>7 PŘÍLOHY</b> .....	<b>6</b>
7.1 ZÁZNAMY Z DETEKTORU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	6
7.1.1 <i>Jednoduchý vodič 0,4 mm</i> .....	6
7.1.2 <i>Jednoduchý vodič 1,6 mm</i> .....	7
7.1.3 <i>Dvousvazkový vodič</i> .....	8
7.1.4 <i>Trojsvazkový vodič</i> .....	9
7.1.5 <i>Čtyřsvazkový vodič</i> .....	10
7.1.6 <i>Šestisvazkový vodič</i> .....	11
7.2 NAMĚŘENÉ VF CHARAKTERISTIKY KORÓNOVÝCH VÝBOJŮ V LABORATOŘI.....	12
7.2.1 <i>Pozadí v laboratoři</i> .....	12
7.2.2 <i>Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV</i> .....	14
7.2.3 <i>Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV</i> .....	15
7.2.4 <i>Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV</i> .....	17
7.2.5 <i>Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV</i> .....	18
7.2.6 <i>Dvousvazkový vodič; 15,2 kV</i> .....	20
7.2.7 <i>Dvousvazkový vodič; 20,4 kV</i> .....	21
7.2.8 <i>Trojsvazkový vodič; 19,1 kV</i> .....	23
7.2.9 <i>Trojsvazkový vodič; 24,9 kV</i> .....	24
7.2.10 <i>Čtyřsvazkový vodič; 22,1 kV</i> .....	26
7.2.11 <i>Čtyřsvazkový vodič; 27,2 kV</i> .....	27
7.2.12 <i>Šestisvazkový vodič; 27,8 kV</i> .....	29
7.2.13 <i>Šestisvazkový vodič; 32,3 kV</i> .....	30
7.2.14 <i>Srovnání jednotlivých VF charakteristik</i> .....	32
7.3 NAMĚŘENÉ VF CHARAKTERISTIKY KORÓNOVÝCH VÝBOJŮ NA VEDENÍ ZVN.....	38
7.3.1 <i>Různá orientace měřících antén</i> .....	38
7.3.2 <i>Srovnání s modelem trojsvazkového vodiče</i> .....	41

## Úvod

Předkládaná práce je rozdělena do dvou hlavních sekcí. Na teoretický úvod sloužící k popisu fyzikálních procesů a na praktickou část práce zabývající se měřením vysokofrekvenčních charakteristik korónového výboje.

Teoretický úvod je zaměřený na problematiku fyzikálních dějů týkajících se elektrických výbojů v plynném médiu a též na vysokofrekvenční šum elektrických vedení. Také na popis korónového výboje včetně ztrát korónou a způsoby měření takovýchto typů výbojů. Na základě popisu alternativních metod měření výbojů je pro praktickou část práce vybrána a navržena vhodná metoda k měření vysokofrekvenčních charakteristik korónových výbojů.

Cílem první kapitoly je popis fyzikálních procesů korónového výboje potřebných k následnému návrhu praktických experimentů a vyhodnocení naměřených výsledků. Jsou zde definovány a vyjasňovány fyzikální procesy, které úzce souvisí s korónovými výboji ve vzduchu, jako je ionizace neutrálních molekul, tvorba a destrukce negativních iontů, iontová rekombinace atd. Mezi další patří Townsendův ionizační koeficient, stejně jako fyzikální význam síly elektrického pole, povrchového náboje, prostorového náboje aj.

Druhá kapitola popisuje rušivé vlivy vysokonapěťových venkovních vedení. Je zde uvažováno především vysokofrekvenční rušení střídavých vedení způsobované nejen korónovými výboji na povrchu vodičů nebo armatur, ale také výboji a jiskřením na vysoce namáhaných částech izolátorů nebo na přerušených či nedokonalých spojeních.

Cílem třetí kapitoly je popis korónového výboje a jeho účinky na vodičích vedení. Popsány jsou aspekty ovlivňující intenzitu korónových výbojů a také související ztráty.

Čtvrtá kapitola obsahuje popis několika nejčastějších metod pro měření a detekci koróny. Z těchto metod je vybrána nejvhodnější metoda k naměření vysokofrekvenčních signálů, které jsou korónou produkovány.

Návrh vhodného postupu měření VF charakteristik pro praktickou část je zmíněn v kapitole páté.

Praktické části je věnována kapitola šestá, kde je realizováno měření vysokofrekvenčních charakteristik korónového výboje na různých typech svazkových

či jednoduchých vodičů, které představují modely vedení. Měření probíhá v laboratoři za pomoci speciálních měřících přístrojů, např. detektoru částečných výbojů, několika typů VF antén a VF analyzátoru měřených signálů. Pro provedení měření je nutno tyto modely vyrobit, nastavit parametry antén, měřících přístrojů a analyzátoru.

Naměřená data jsou zpracována, porovnána a vyhodnocena v dalších částech práce.

## Seznam symbolů, zkratek a jednotek veličin

U	napětí
I	proud
Z	impedance
P	výkon
r	poloměr
E	intenzita elektrického pole
H	intenzita magnetického pole
p	tlak
V	objem
d	vzdálenost
T, $T_i$	termodynamická teplota
$N_A$	Avogadrova konstanta
$k_B$	Boltzmannova konstanta
$\delta$	koef. poměrné hustoty vzduchu
$\gamma, \sigma$	vodivost
$\epsilon, \epsilon_0, \epsilon_r$	permitivita
$\varphi$	elektrický potenciál
$\sigma, \rho$	povrchový a prostorový náboj
F	síla na náboj
q, $q_i$	náboj
E	intenzita elektrického pole
$R_{ion}, R_0$	rychlost ionizace
w, $w_i$	rychlost posunu částic
$\mu, \mu_e, \mu_i$	hybnost částic
$v_i$	moment hybnosti částic
$m_i$	hmotnost částice
W	energie
$\lambda$	střední volná vzdálenost
$N, N_0, n_0, n, n_e, n_p, n_n, n_i$	hustota částic v plynu
J, j	proudová hustota
$\alpha$	Townsendův ionizační koeficient
$R_{det}$	rychlost vzniku volného elektronu
$k_{det}$	koeficient vzniku volného elektronu
$R_{att}$	rychlost pohlcení volného elektronu
$\eta$	koeficient pohlcení volného elektronu
$R_{rec}$	rychlost rekombinace
$\beta_{ie}$	koeficient rekombinace
$\Gamma_{drift}$	tok částic (drift)
$\Gamma_{diff}$	difúzní tok
$D_i$	difúzní koeficient
e	elektron
hf	foton
A, $A^*, A^+, A^-$	stav a typ částic
$\nabla$	matematický operátor nabra
$\zeta$	útlumový součinitel
IR	infračervené záření
UV	ultrafialové záření

VF	vysokofrekvenční
AlFe	ocelohliníková lana
VVN	velmi vysoké napětí
ZVN	zvláště vysoké napětí
el. pole	elektrické pole
mag. pole	magnetické pole
ss	stejnoseměrný
st	střídavý
ČV	částečný výboj
PC	personal computer
aj.	a jiné
char.	charakteristika
koef.	koeficient
konst.	konstanta, konstantní
např.	například
tab.	tabulka
tzv.	takzvaný
tj.	tj.

# 1 Teorie fyzikálních dějů

Pro lepší chápání výbojových procesů je důležité mít jasný obraz o fyzikálních dějích, které je doprovázejí. Následující kapitola podává obecný náhled na elementární procesy, které úzce souvisí s problematikou korónového výboje.

## 1.1 Ideální plyn

Většina plynů vystavených normálním teplotám a tlakům dodržuje klasické termodynamické zákony. Pokud na plynné médium nepůsobí žádné vnější pole, plyn je v rovnováze, což znamená, že dochází ke stejnému množství ionizačních a rozpadových procesů. Konstantní množství plynu o konstantní teplotě má určitý tlak  $p$  a objem  $V$ .

$$pV = konst. \quad (1)$$

Derivováním rovnice (1) dostáváme rovnici, která může být vyjádřena rovnicí (2).

$$p = N_A k_B T \quad (2)$$

Kde  $N_A$  je Avogadrova konstanta ( $6.022\ 140\ 857e^{23}\ \text{mol}^{-1}$ ) respektující počet částic v jednotkovém látkovém množství. Boltzmannova konstanta  $k_B$  ( $1.380\ 648\ 520e^{-23}\ \text{J}/^\circ\text{K}$ ) vyjadřuje množství energie potřebné k zahřátí jedné částice ideálního plynu o jeden stupeň Kelvinovi stupnice a  $T$  je termodynamická teplota plynu.

Vzhledem k tomu, že velký počet referenčních hodnot použitých pro výpočty vysokého napětí je odvozen z empirických dat, je nezbytné provést korekci rozdílů v atmosférických podmínkách. Korekce teploty a tlaku je zohledněna koeficientem poměrné hustoty vzduchu označeným symbolem  $\delta$  viz (3).

$$\delta = \frac{T_0 p}{p_0 T} \quad (3)$$

$T_0$  je referenční termodynamická teplota ( $293\ ^\circ\text{K}$ ),  $p_0$  je hodnota normálního atmosférického tlaku ( $101.325\ \text{kPa}$ ), a  $T$  a  $p$  jsou parametry aktuální teploty a tlaku [6][7].

## 1.2 Ionizace prostředí

Vzduch při normální teplotě a tlaku působí jako dobrý izolátor s elektrickou vodivostí v rozmezí  $10^{-12} \div 10^{-13}\ \text{S/m}$ . Vodivost prostředí existuje kvůli konečnému počtu volně nabitých částic (typicky iontů) vytvořených kosmickým zářením a radioaktivními látkami, tzv. ionizace prostředí s charakteristickou rychlostí  $R_0$ . Rychlost ionizace se liší

v závislosti na okolním prostředí. Při absenci externě aplikovaného elektrického pole je ionizační proces potlačován rozpadovými procesy, a tím je udržována rovnováha.

Každý iontový pár nese náboj  $q$ , který se rovná elementárnímu náboji  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C za předpokladu, že převládají jednotlivě ionizované atomy či molekuly. Podle Coulombova zákona na nabitě částice působí elektrostatičká síla  $F$  při vystavení elektrickému poli  $E$ .

$$F = qE \quad (4)$$

Síla  $F$  způsobuje drift iontů v plynu. Rovnice (5) definuje příslušnou rychlost unášených částic  $w$ , kde  $\mu$  je pohyblivost částice.

$$w = \mu E \quad (5)$$

Částice v plynu se pohybují neuspořádaně (nahodile), proto dochází ke kolizím s dalšími částicemi. Tyto srážky mohou být pružné a nepružné (elastické a neelastické). Ve slabém elektrickém poli převládají elastické srážky. To znamená, že kolize jsou čistě mechanické, což vede ke kinetické výměně energie. Neelastické srážky znamenají, že dochází k přenosu energie z kinetické na potenciální mezi narážející a sráženou částicí a naopak. Mezi nepružné srážky patří např. ionizace, vázání a vyrazení elektronů.

Mezi kolizemi částic v plynném prostředí získá částice od elektrického pole energii  $W$ , která je rovna síle působící na částici vynásobené střední uraženou vzdáleností  $\lambda$ .

$$W = qE\lambda \quad (6)$$

Střední volná vzdálenost  $\lambda$  uražená částicí v elektrickém poli (7).

$$\lambda = (N_0\sigma)^{-1} \quad (7)$$

$N_0$  vyjadřuje hustotu molekul v plynu a  $\sigma$  je účinný průřez, tj. pravděpodobnost interakce částic čili vodivost plynného média (10).

Obecný vztah proudové hustoty je dán vodivostí plynného média násobenou intenzitou elektrického pole.

$$j = \sigma E \quad (8)$$

Dosažením rovnice (10) do rovnice (8) dostáváme výraz pro celkovou proudovou hustotu, která je daná předpisem (9).

$$j = j_i + j_e = n_0 q E (\mu_i + \mu_e) \quad (9)$$

Vodivost plynného média dle (10).

$$\sigma = n_0 q (\mu_i + \mu_e) \quad (10)$$

Vzhledem k tomu, že je vzduch poměrně elektronegativní plyn, jeho volné elektrony neexistují dlouhou dobu, proto je třeba brát v úvahu nejen iontovou pohyblivost  $\mu_i$ , ale i pohyblivost elektronovou  $\mu_e$  [1][6][7].

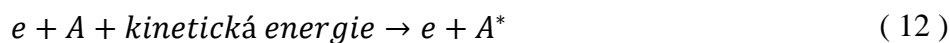
### 1.3 Ionizace, rekombinace, vyražení a pohlcení částic

Nabitě částice se v elektrickém poli pohybují ve směru orientace působícího pole. Zvýšením intenzity el. pole se kinetická rychlost nabitých částic úměrně zvýší dle rovnice (5), čímž je umožněno částici akumulovat více energie při uražení střední volné dráhy  $\lambda$ . Při dostatečně vysokých úrovních energie elastické kolize přecházejí v neelastické, to znamená, že bude docházet k výměně energie mezi interagujícími částicemi. Proces, který je zajímavý při studiu elektrického výboje, je ionizace molekul plynu, která probíhá v důsledku elektronového nárazu.

Pokud má dopadající částice při nárazu vyšší energii (6), než je ionizační energie částice druhé, dochází k ionizaci (vytržení elektronu z elektronového obalu). Pokud energie není dostatečně vysoká, udeřená částice může přejít na zlomek sekundy do excitovaného stavu a poskytuje tak příležitost k ionizaci při nárazu dalšího elektronu s menší energií. Ionizační proces při nárazu elektronu je popsán následujícím procesem.



Elektron je označený písmenem  $e$ ,  $A$  představuje atom či molekulu a  $A^+$  kationt vzniklý vyražením elektronu z jeho obalu. Jak již bylo zmíněno, elektronový náraz nebude vždy mít za následek ionizaci, ale místo toho může vést k excitaci částic.



Jsou-li excitované molekuly nebo atomy  $A^*$  opět zasaženy elektronem, tak dochází k ionizaci při nižších hodnotách energie.

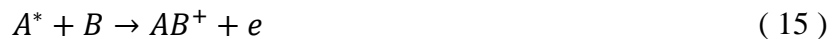


Jestliže excitovaná částice není zasažena elektronem, vrací se do základního stavu a samovolně vyzáří foton  $hf$ . K tomu dochází v časovém rozmezí  $10^{-7} \div 10^{-10}$  s. Pokud vyzářený foton zasáhne částici s dostatečně nízkou ionizační energií, ionizace se uskuteční podle (14).

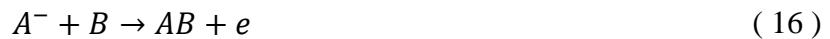




Tomuto typu ionizace se říká fotoionizace. Další ionizační procesy, které mohou vést k výskytu volných elektronů, jsou asociativní ionizace.



Pokud jsou v plynu přítomny negativní ionty, může dojít k asociativnímu oddělení. Jedná se o proces, kdy negativní iont interaguje s atomem nebo molekulou, čímž zapříčiní vznik jiné molekuly a uvolní elektron.



Rychlost vzniku volného elektronu (rychlost oddělení) je dána hustotou plynu  $N$ , koncentrací negativních iontů  $n_n$  a oddělovacím koeficientem (detachment coefficient)  $k_{det}$ .

$$R_{det} = k_{det} n_n N \quad (17)$$

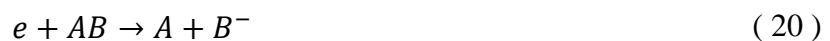
Různorodost ionizačních mechanismů lze považovat za obecný proces. Proto je obecně rychlost ionizace vyjádřena rovnicí (18). Townsendův ionizační koeficient  $\alpha$  (charakterizován v kapitole 1.6),  $n_e$  hustota elektronů a  $w_e$  je rychlost posuvu elektronů v poli, popsána rovnicí (5).

$$R_{ion} = \alpha n_e w_e \quad (18)$$

Zde bylo popsáno několik elementárních procesů, při kterých vznikají volné elektrony. Samozřejmě existují procesy, kdy jsou volné elektrony pohlcovány a dochází tak k deionizaci (zánik volných elektronů v ionizační oblasti). K tomuto procesu dochází v elektronegativních plynech díky tomu, že iontům plynu chybí valenční elektrony, a tak přitahují volné elektrony ve snaze vytvořit stabilní iont. Jedním takovým plynem je kyslík, kterému ve valenční vrstvě chybí dva elektrony. Absorpcí elektronu může být vyzářen foton, což je opak fotoionizace.



Také může dojít k rozdělení molekuly na neutrální částici a negativní iont.



Obecný koeficient pohlcení (attachment coefficient)  $\eta$ , vyjádřený jako počet pohlcení na 1 cm uražené vzdálenosti elektronem ve směru pole. Analogicky k (18), rychlost pohlcení daná následujícím vztahem.

$$R_{att} = \eta n_e w_e \quad (21)$$

Proces, při kterém dochází k zachycení elektronu kladným iontem a je vytvořen neutrální atom, se nazývá rekombinace. Tento proces se vyskytuje hlavně v plynech s velkým počtem ionizovaných částic (plazma).



Rychlost rekombinace elektronu s iontem (electron-ion recombination) závisí na koncentraci elektronů  $n_e$  a kladných iontů  $n_p$  v plynu a rekombinačním koeficientu  $\beta_{ei}$ .

$$R_{rec}^{ei} = \beta_{ei} n_e n_p \quad (23)$$

Ne všechny procesy obsahují volné elektrony. K rekombinaci dochází i mezi kladnými a zápornými ionty (ion-ion recombination) [6][7].

Popisované procesy patří mezi fundamentální. V některých případech jsou zobecnovány a zjednodušovány pro snadnější pochopení. Odvozené ionizační konstanty zřídka odpovídají experimentálním hodnotám. Důvodem je teoretický předpoklad, že každý elektron s energií vyšší, než je energie ionizační, automaticky způsobí ionizaci. Ve skutečnosti dochází k ionizaci při 4 až 6násobku ionizační energie, a to nejvýše v 50 % interakcí. Pro širší popis procesů je možno použít literaturu [7].

## 1.4 Drift a pohyblivost částic

V předchozích kapitolách bylo zmíněno, že elektrony nebo ionty se pohybují ve směru působícího pole. Částice získají průměrnou rychlost driftu  $w_i$  vyjádřenou rovnicí (5). Pohyblivost částic v plynu může být odvozena z rovnice (5) nebo definována následující rovnicí.

$$\mu_i = \frac{w_i}{E} = \frac{q_i}{m_i v_m} \quad (24)$$

Náboj jakékoli částice označen  $q_i$ , její hmotnost  $m_i$  a  $v_m$  je moment hybnosti částice. Hybnost částic je obecně charakterizována pro každý plyn tvořený ionty. Hodnota iontové pohyblivosti může být rozdílná díky rozdílným parametrům atmosféry, a proto je korigována relativním součinitelem hustoty vzduchu  $\delta$  (3). Výpočet toku částic pohybujících se ve směru pole je počítán s korigovaným součinitelem hustoty vzduchu.

$$\Gamma_{drift} = \mu_i n_i E \quad (25)$$

Drift spolu s difúzí jsou složky tvořící celkový tok částic [6].

## 1.5 Difúze a difúzní tok

Difúze je obecný pojem popisující pohyb částic z oblastí vyšší koncentrace do oblastí s nižší koncentrací. Je to přirozeně se vyskytující jev, který vždy konsoliduje na novém ustáleném stavu. Při korónovém výboji se kolem vodiče vyskytuje nerovnoměrná koncentrace nabitých částic (koncentrační gradient) a dochází tak k difúzi.

Gradient iontové koncentrace vyvolává sílu na nabité částice. Tok způsobený difúzí je popsán pomocí následující rovnice.

$$\Gamma_{diff} = -D_i \nabla n_i \quad (26)$$

Difúzní tok je dán záporně vzatým difúzním koeficientem  $D_i$  násobeným gradientem koncentrace částic  $\nabla n_i$ . Difúzní koeficient je spjat s pohyblivostí částic a tuto skutečnost popisuje Einsteinův vztah.

$$D_i = \mu_i k_B \frac{T_i}{q} \quad (27)$$

Mobilita částic, Boltzmannova konstanta a elementární náboj ( $\mu_i$ ,  $k_B$ ,  $q$ ),  $T_i$  popisuje iontovou teplotu [6].

## 1.6 Townsendův ionizační koeficient

Townsendův ionizační koeficient  $\alpha$  je definován jako počet ionizačních kolizí způsobených jedním elektronem při pohybu o jeden centimetr ve směru elektrického pole. Celkový počet elektronů  $n$  produkovaných jedním počátečním elektronem na vzdálenost  $d$  je pak dán vztahem (28).

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (28)$$

Parametr  $n_0$  je počáteční množství elektronů. Při konstantní teplotě plynného média je rozložení energie  $W$  závislé pouze na poměru intenzity el. pole a tlaku  $E/p$ .

$$\alpha = p f(E/p) \quad (29)$$

Jelikož je tlak  $p$  úměrný hustotě plynu  $N$ ,  $p \propto N$ , rovnice (29) může být zapisována rovnicí (30) [6].

$$\alpha/N = f(E/N) \quad (30)$$

## 1.7 Elektrické pole

Vzájemné silové působení elektrických nábojů se uskutečňuje prostřednictvím elektrických polí, která náboje obklopují. Elektrické pole popisuje fyzikální veličina intenzita elektrického pole, daná silou  $\mathbf{F}$  na náboj  $q$  viz (4). Pole může být homogenní, tj. takové pole, jehož elektrická intenzita má v kterémkoli bodě stejný směr a velikost, tudíž siločáry jsou vzájemně rovnoběžné. Anebo nehomogenní.

Většina dříve popisovaných procesů je závislá na intenzitě elektrického pole. Intenzita el. pole se obvykle získá z Poissonovy rovnice.

$$\nabla \varepsilon \mathbf{E} = \rho \quad (31)$$

$\rho$  je hustota prostorového náboje a  $\varepsilon$  dielektrická permitivita. Elektrické pole  $\mathbf{E}$  je definováno jako gradient skalárního elektrického potenciálu  $\varphi$ .

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (32)$$

Z rovnic (31) a (32) úpravou dostaneme finální tvar Poissonovy rovnice.

$$\nabla(\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi) = -\rho \quad (33)$$

Symboly  $\varepsilon_0$  a  $\varepsilon_r$  jsou permitivita vakua a relativní permitivita.

Elektrické pole má za následek vytvoření povrchového a prostorového náboje. Povrchový náboj je náboj přítomný na rozhraní mezi dvěma prostředími s různou permeabilitou. Hustota povrchového náboje  $\sigma$  je definována jako množství náboje  $q$  existující v dané oblasti  $A$ .

$$\sigma = q/A \quad (34)$$

Náboj prostorový je spojitě rozložený v prostoru a je dán elementárním nábojem  $q$  a koncentrací nabitých částic  $n$  [6].

$$\rho = q(n_p - n_e - n_n) \quad (35)$$

V této kapitole byly objasněny nezbytné fyzikální procesy, které popisují vývoj elektrických výbojů v dielektrickém prostředí. Následující část pojednává o existenci rušivých vysokofrekvenčních signálů, které jsou generovány výboji na elektrických vedeních.

## 2 Vysokofrekvenční šum elektrických vedení

Korónový výboj se mimo jiné vyznačuje tím, že produkuje vysokofrekvenční signály, které mohou způsobovat rušení. To může být generováno několika způsoby:

- a) výboji koróny na povrchu vodičů či armatur,
- b) jiskřením na přerušených anebo nedokonalých spojeních,
- c) jiskřením a výboji na vysoce namáhaných částech izolátorů.

Zdroje a) a c) jsou rozprostřeny zpravidla po délce vedení. Zdroje b) bývají lokální. U vedení o napětí nad 100 kV může elektrické namáhání vzduchu na povrchu vodičů a armatur zapříčinit výboj koróny. Jiskření na nedokonalých spojeních nebo porušených izolátorech způsobuje vznik lokálních zdrojů vysokofrekvenčního šumu. Vysokonapěťové přístroje v rozvodnách mohou také generovat šum, který může být šířen podél venkovního vedení.

V případě, že u antén používaných pro příjem televizních a rozhlasových služeb je intenzita pole VF šumu nadměru vysoká, může způsobit snížení kvality zvukového výstupu, v případě televize též obrazu.

Generování vysokofrekvenčního šumu je ovlivněno povětrnostními podmínkami. Koróna na vodičích se vyskytuje častěji za mokra díky kapkám vody, které se vytvářejí za těchto podmínek na vodičích. Nedokonalé kontakty však mohou být vodou přemostěny a generování vysokofrekvenčního šumu ustává. Z toho plyne, že nedokonalé spojení jiskří nejpravděpodobněji za suchého počasí. Suché a čisté izolátory mohou způsobit rušení za pěkného počasí, nicméně jiskření na povrchu izolátorů se více vyskytuje, jsou-li znečištěné zvláště při vlhku, mlze a námraze.

Pro nerušený příjem televizního a rozhlasového signálu je podstatné, aby byl na vstupu přijímače dostatečný poměr signálu žádaného k nežádoucímu šumovému signálu. Rušení může být zaregistrováno, pokud je intenzita signálu nízká a povětrnostní podmínky napomáhají vzniku vysokofrekvenčního šumu.

Při zkoumání vysokofrekvenčního šumu by se mělo mít na zřeteli, že místní pole mohou být zapříčiněna vzdálenými zdroji, protože šum se může šířit podél vedení do velkých vzdáleností [9].

## 2.1 Fyzikální vlastnosti vysokofrekvenčního šumu

Korónové výboje na vodičích, armaturách vedení, izolátorech anebo jiskření na nedokonalých spojeních mohou produkovat vysokofrekvenční šum, protože generují proudové pulzy do vodičů vedení. Pulzy jsou šířeny v obou směrech podél vodičů od místa vzniku. Rozdílné složky kmitočtového spektra těchto pulzů mají odlišné účinky.

V kmitočtovém pásmu od 0,15 MHz do několika MHz je šum důsledkem efektu šíření podél vedení. Zdroj pulzu přímým elektromagnetickým vyzařováním nepřispívá ve větší míře k hodnotám šumu. Vlnová délka je vzhledem k délkám vedení v tomto případě velká, vedení proto není účinným zářičem. Zároveň se s každou spektrální složkou podél vedení šíří elektrické a magnetické pole. Z hlediska relativně nízkého útlumu šíření je šum dán sumou účinků veškerých výbojů rozprostřených v několika kilometrech po délce vedení v obou směrech od místa vstupu. Mělo by být poznamenáno, že v blízkosti vedení dominuje složka pole vedeného a ve větších vzdálenostech od vedení převažuje složka vyzařovaného pole. Rozhraní mezi poli není ostré a jev není důkladně vyšetřen.

Pro kmitočtové spektrum nad 30 MHz jsou vlnové délky porovnatelné délkám vedení, a tak mohou být účinky šumu ze značné části vysvětleny pomocí teorie antén aplikované na zdroje šumu, jelikož podélné šíření není významné. Avšak je třeba poznamenat, že 30 MHz nepředstavuje hraniční čáru mezi těmito dvěma odlišnými mechanismy produkujícími šumová pole [9].

### 2.1.1 Podélné šíření

V případě samostatného vodiče zavěšeného nad zemí dochází k současnému šíření napěťové vlny  $U(t)$  a proudové vlny  $I(t)$ . Tyto veličiny jsou vázány výrazem (36) pro daný kmitočet, kde  $Z$  je vlnová impedance vedení.

$$U(\omega) = ZI(\omega) \quad (36)$$

Při šíření do okolního prostředí jsou vlny tlumeny útlumovým součinitelem  $\zeta$ ,

$$U_x = U_0 e^{-\zeta x} \quad (37)$$

$$I_x = I_0 e^{-\zeta x} \quad (38)$$

kde  $U_0$  a  $I_0$  jsou amplitudy zdroje a  $x$  je vzdálenost šíření podél vedení.

V případě vícefázových vedení lze také říci, že se útlum mění se vzdáleností šíření a také se liší pro každý vodič. Teorie šíření a konkrétní měření na vedeních ukazují, že šumová napětí fázových vodičů mohou být složena z řady „módů“, každý z nich mající složky na každém vodiči. Jeden mód se šíří mezi všemi vodiči paralelně a zemí, jiné se šíří mezi vodiči. Je důležité podotknout, že útlum módu vodič – zem je poměrně vysoký, asi 2 až 4 dB/km, zatímco útlum různých módů vodič – vodič je malý, zlomek jednoho dB/km na kmitočtu 0,5 MHz [9].

### 2.1.2 Elektromagnetické pole

Napětí a proudy šířící se podél vedení vytvářejí elektromagnetické pole v blízkosti vedení. Elektrické a magnetické pole vyzařované elektromagnetickými vlnami jsou kolmé jak k sobě navzájem, tak ke směru šíření. Poměr jejich amplitud má konstantní hodnotu a jedná se o vlnovou impedanci nebo impedanci vakua.

$$\frac{E \text{ (V/m)}}{H \text{ (A/m)}} = 377 \Omega \quad (39)$$

Pro nekonečně dlouhý jednoduchý vodič vedení má indukční zóna, neboli blízké pole, stejný jednoduchý poměr elektrického a magnetického pole jako vzdálené pole od rozhlasového vysílače, asi 377  $\Omega$ . V případě vícefázového vedení je elektrické pole vektorový součet jednotlivých polí náležících každému fázovému vodiči [9].

### 2.1.3 Definice šumu

Okamžitá hodnota šumu se spojitě a náhodně mění. Jeho průměrná hladina výkonu však v dostatečně dlouhém intervalu, např. 1 s, dává stacionární náhodnou veličinu, kterou lze měřit. Další veličinou, vhodnou pro měření, je vrcholová nebo některým způsobem vážená vrcholová (kvazivrcholová) hodnota hladiny šumu.

Souprava pro měření šumu je v podstatě laditelný a citlivý voltmetr s určenou šířkou pásma. Je-li připojen ke vhodné anténě a správně kalibrován, může měřit elektrickou nebo magnetickou složku šumového pole.

V závislosti na konstrukci měřicího přístroje může být hladina šumu měřena jako efektivní, vrcholová nebo kvazivrcholová hodnota, viz kapitola 4.6. Jednotlivé typy měření mají své přednosti, a tak jsou používány na různé druhy měření šumu [9].

### 2.1.4 Spektrum

Spektrum je změna vysokofrekvenčního šumu jako funkce měřícího kmitočtu, měřeného v daném místě v blízkosti vedení. Zahrnuje dva jevy:

- a) *Proudové pulsy* generované ve vodičích výbojem vykazují své vlastní spektrum závislé na tvaru pulsu. U tohoto typu výboje měřená hladina šumu klesá s kmitočtem. V oblasti rozhlasových kmitočtů, kde mají převážný vliv kladné výboje, je spektrum nezávislé na průměru vodiče.
- b) *Útlum* šumu šířícího se podél vedení vzrůstá s kmitočtem a mění tvar spektra tak, že se snižuje hladina šumu se vzrůstem kmitočtu.

Změřená spektra jsou často dost nepravidelná vlivem stojatého vlnění vzniklého na diskontinuitách, jako je změna směru vedení, koncové stožáry nebo prudké změny v zemi. Navíc se může generování šumu měnit během provádění měření.

Praxe naznačují, že všechna spektra mohou být rozdělena do dvou skupin. Jedna zahrnuje vodorovné uspořádání vodičů, druhá dvojité a trojúhelníkové nebo svislé uspořádání. Rozdíl mezi těmito dvěma skupinami pramení z jevu zmíněného v odstavci b) zde výše, šíření se trochu mění v závislosti na typu vedení, avšak rozdíl není veliký. Na vyšších kmitočtech se spektrum šumu předvídá obtížněji [9].

## 2.2 Vliv vnějších parametrů

Pro určení počátečního napětí  $U_0$  koróny válcového vodiče s hladkým povrchem se často užívá Peekův vzorec (40).

$$U_0(kV/cm) = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (40)$$

Pro střídavá napětí je  $U_0$  maximální hodnota napětí,  $r$  je poloměr vodiče v centimetrech, a  $\delta$  je koeficient poměrné hustoty vzduchu. Viz rovnice (3).

Praktické podmínky na venkovních vedeních však nesouhlasí s těmito idealizovanými předpoklady. Spletení lan vodičů, nedokonalosti povrchu a nepravidelnosti vedou k místnímu vzrůstu elektrického pole a následně k nižšímu zápalnému napětí koróny, než udává výše uvedený vzorec. Často to znamená, že kritický gradient pro počátek vysokofrekvenčního šumu je za nepříznivých povětrnostních podmínek asi poloviční proti hodnotě získané z Peekova vzorce.



Atmosférické podmínky rovněž hrají důležitou roli. Za deště, mlhy, sněžení nebo během rosy se na povrchu vodiče vytvářejí kapky vody, při nízkých teplotách může vznikat námraza. Ta snižuje počáteční napětí koróny a zvyšuje hladinu šumu.

Co se týče nedokonalých spojení a vzniku malých jisker, účinkem deště a vlhkosti se přemostují jednotlivá jiskřiště, a to buď vodními kapkami, nebo vlhkým povlakem, což snižuje tento typ šumu.

Děšť a vlhkost tedy ovlivňují šum koróny vodičů opačně než nedokonalá spojení. Z toho lze usoudit, že jestliže se rušení projevuje za deště, je způsobeno korónou. Na druhé straně, jestliže se projevuje za pěkného počasí a zmizí nebo se sníží během deště nebo mlhy, je způsobeno nedokonalými spojeními [9].

### 3 Popis korónového výboje

V homogenním, tj. v rovnoměrně rozloženém elektrickém poli, překročení dielektrické pevnosti okolních médií obvykle vede k úplnému průrazu. Pokud je rozložení pole mezi elektrodami silně nehomogenní, je možné pozorovat elektrické výboje před úplným proražením dielektrika. Mezi tyto výboje patří koróna.

Napětí připojené na elektrodu musí být tak vysoké, aby vyvolalo dostatečnou intenzitu elektrického pole, které způsobí ionizaci izolačního plynného média. V běžné praxi se korónové výboje vyskytují u vysokonapěťových elektrických vedení nebo zařízení, které jsou vystaveny vysokému napětí. Zde jsou korónové výboje považovány za nežádoucí jev, jelikož způsobují ztráty na vedení a generují rušivý vysokofrekvenční šum. Nicméně, koróna může být také používána v průmyslových aplikacích, jako jsou např. vysokorychlostní tisk, elektrostatické odlučovače nebo Geigerův-Müllerův čítač [6].

Koróna je považována za neúplný samostatný výboj vznikající u elektrod s malým poloměrem zakřivení nebo obecně v místech s vysoce nehomogenním elektrickým polem. V silném elektrickém poli v blízkém okolí vodiče ionty způsobují nárazovou ionizaci. Koróna vzniká při dosažení tzv. počátečního, zápalného nebo také kritického napětí koróny  $U_0$  a náhle se tvoří slabě svítící obal doprovázený šuměním a praskáním. Skutečný průměr korónové vrstvy je větší než průměr viditelný okem, protože část vyzařovaného záření se nachází v ultrafialové oblasti spektra a lidské oko jej není schopno zaznamenat.

Stav povrchu vodiče má rozhodující vliv na kritické napětí koróny. Nečistoty, drobné nerovnosti na povrchu komplikují stanovení napětí, při kterém koróna vzniká. V laboratorních podmínkách je možno toto napětí lépe stanovit díky zajištění velmi hladkých a čistých povrchů elektrod, při optimálním tvaru pole a s neměnnými atmosférickými podmínkami. Tuto problematiku vystihuje kapitola 3.3 a 3.4. V takovém případě se při zvyšování napětí náhle zvětší proud anebo hladina šumu koróny na velikost měřitelnou přístroji. S dalším zvyšováním přivedeného napětí se proud či šum rychle navyšují [1][2][3][4].

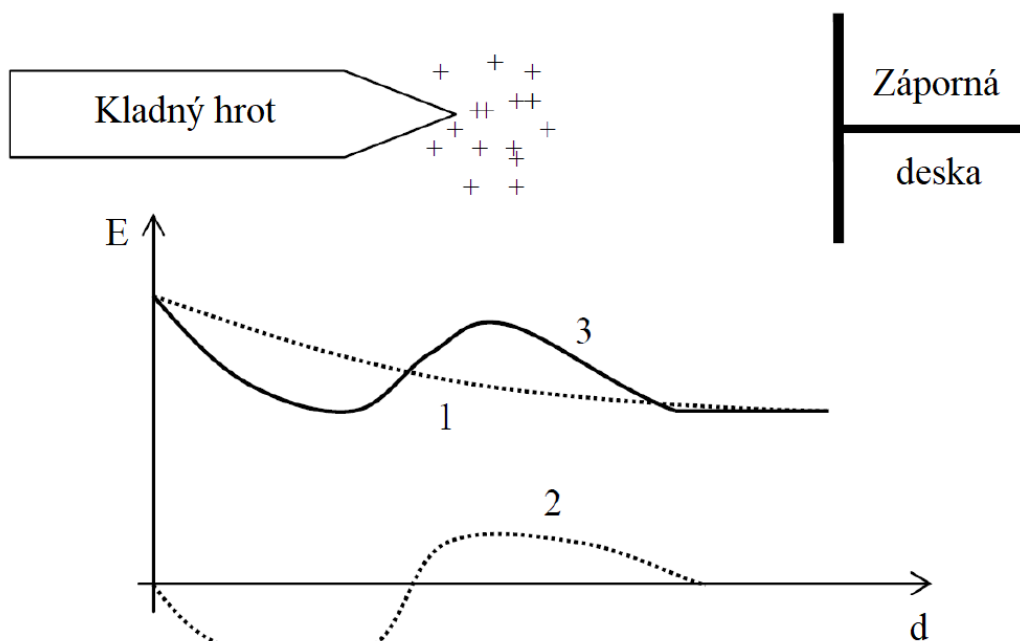
#### 3.1 Kladná koróna

Ke kladnému hrotu a záporné desce je připojeno dostatečně vysoké napětí způsobující nárazovou ionizaci vlivem vysoké intenzity el. pole. Vytvářejí se volné elektrony a dochází k nekontrolovatelnému lavinovému šíření elektronů směrem od desky k hrotu. K záporné

desce jsou přitahovány pomalé kladné ionty vytvářející v blízkosti hrotu kladný prostorový náboj. Díky tomu dochází v okolí hrotu k poklesu intenzity pole a také k zastavování lavinového šíření elektronů. K obnovení výboje dochází ve chvíli, kdy se intenzita pole vrátí na hodnotu potřebnou pro vznik ionizace, tj. když se kladné ionty vzdálí od hrotu. Na Obr. 1 jsou v průbězích některé části označeny číslicemi:

- 1 – Průběh intenzity pole vyvolaný externím zdrojem
- 2 – Průběh intenzity pole zapříčiněný kladným prostorovým nábojem
- 3 – Výsledné rozložení intenzity el. pole

Jedná se o pole pulzního charakteru [4][5][8].



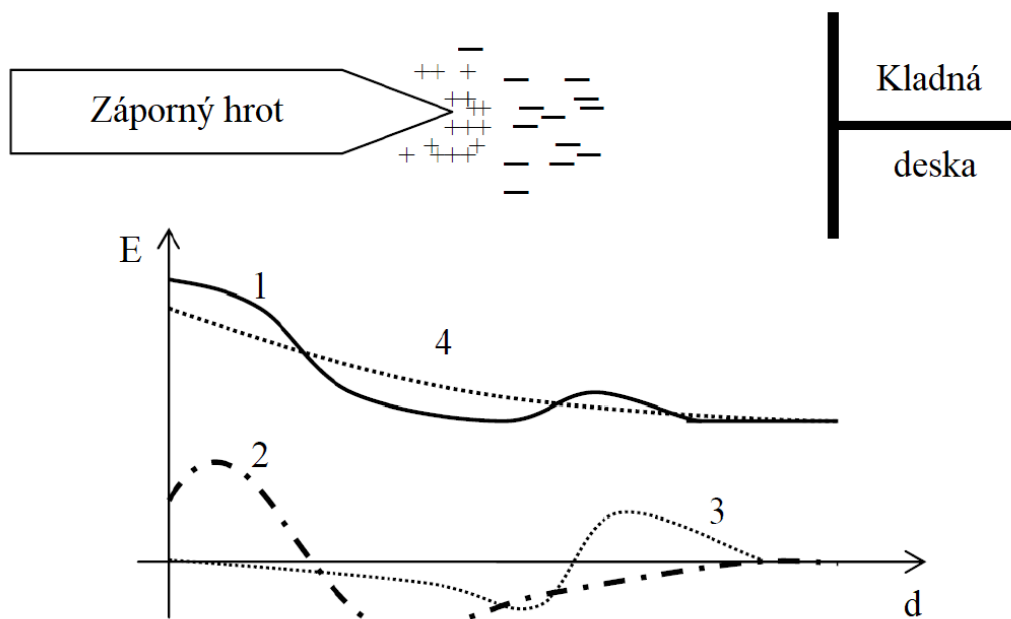
Obr. 1\_Kladná koróna [8]

### 3.2 Záporná koróna

Nyní má hrot zápornou a deska kladnou polaritu. K nárazové ionizaci dochází přibližně při stejné intenzitě pole, ale rozložení náboje mezi elektrodami je rozdílné. Rychlost elektronů pohybujících se od hrotu k desce je tak vysoká, že v okolí hrotu vzniká kladný prostorový náboj. Elektrony vzdalující se od hrotu mohou být absorbovány neutrálními molekulami a vznikají tak záporné ionty. Záporný prostorový náboj způsobuje snižování intenzity pole v okolí hrotu a kladný naopak. Poté, co se záporný prostorový náboj dostatečně oddálí od hrotu, dojde k opětovnému vzniku výboje. Na Obr. 2 jsou v průbězích některé části označeny číslicemi:

- 1 – Průběh intenzity el. pole zapříčiněný externím zdrojem
- 2 – Průběh intenzity el. pole vyvolaný kladným objemovým nábojem
- 3 – Rozložení intenzity el. pole způsobené záporným prostorovým nábojem
- 4 – Výsledný průběh intenzity pole

Záporný korónový výboj je také pulsního charakteru [4][5][8].



Obr. 2\_Záporná koróna [8]

### 3.3 Účinky koróny na vodičích

S korónou je spjato generování vysokofrekvenčního šumu prostřednictvím rychlých změn elektrického pole v oblastech s nerovnostmi. To vyvolává výboje objevující se na povrchu vodičů nebo v jejich blízkosti, a odtud se rušivý signál šíří na všechny strany, jednak do prostoru a také podél vedení. A způsobuje rušení radiového a televizního signálu. Mnoho vlastností korónového výboje je neznámých a nedefinovaných. Základní fyzikální pochod je však množení elektronů neboli formování laviny. Gradient na povrchu vodičů vedení je gradientem nejvyšším. Jestliže je elektrické namáhání neboli gradient dostatečně vysoký, jakýkoliv elektron v okolí vodiče ionizuje molekuly plynu. Elektrony vzniklé touto ionizací způsobí lavinu.

V případě vodiče vedení se lze domnívat, že podstatným sekundárním pochodem je vyražení elektronů z molekul plynu vysokoenergetickým ultrafialovým zářením

(fotoionizací) vznikajícím v původní lavině. Při několika výzkumech se zjistilo, že hladina vysokofrekvenčního šumu generovaného při kladném stavu vodiče je podstatně vyšší, než když je vodič záporný [1][9].

### 3.4 Činitelé při vzniku korony

Vznik korónového výboje není samovolný, je závislý na několika faktorech, které ho více či méně ovlivňují.

- Teoretický povrchový gradient vodiče
  - napětí systému
  - průměr vodiče
  - vzdálenosti vodiče od ostatních fázových vodičů a od země
  - počet vodičů ve fázi či ve svazku
- Průměr vodiče
- Stav povrchu vodiče
- Atmosférické a povětrnostní podmínky [9]

#### 3.4.1 Povrchový gradient vodiče

Jednou z nejdůležitějších veličin při určování vysokofrekvenčního šumového pole vedení, obzvláště určuje-li ho koróna na vodičích, je intenzita elektrického pole ve vzduchu u povrchu vodiče, tedy povrchový gradient napětí.

Protože vodiče jsou obvykle spletené, povrchový gradient napětí kolem obvodu vodiče kolísá kolem střední hodnoty. Je však zvykem určit povrchový gradient pro hladký povrch se stejným vnějším průměrem vodiče, i když se musí zavádět experimentální činitel beroucí v úvahu spletení lan.

Na paměti je třeba mít, že hodnoty z měření jsou odlišné pro každou topologii a typ systému [9].

#### 3.4.2 Průměr vodiče

Hladina vysokofrekvenčního šumu se zvyšuje se zvyšujícím se průměrem vodiče, přestože povrchový gradient vodiče je neměnný. Tento jev nastává díky faktu, že klesání intenzity elektrického pole od povrchu vodiče se snižuje se zvětšujícím se průměrem.

Proto elektrické pole obklopující vodiče s velkými průměry může živit delší trsy korony než elektrické pole kolem vodičů s průměry menšími [9].

### 3.4.3 Stav povrchu vodičů

Typy vodičů, jako třeba kruhové nebo segmentové zapletení, stav jejich povrchů, kupříkladu stupeň hladkosti nebo drsnosti, existence či nepřítomnost znečištění, kapky vody, sněhové vločky, jinovatka atd., mají velký vliv na vznik koróny. Nové vodiče mají obvykle intenzivnější korónu vlivem anomálií povrchu jako je drsnost hliníku, ptačí výtrusy, prach, hlína, bahno nebo další usazeniny způsobující korónu i za pěkného počasí. Jak jen je na vedení přivedeno napětí, postupem času ztráty korónou a vysokofrekvenční šum klesají. Koróna spálí prach a jiné částice usazené na vodiči. Delší čas je potřebný k tomu, aby vodič zcela zčernal, zestárnul a zmizeli mastnoty na novém vodiči. Pokud je povrch velmi hrubý a mastný, můžou ztráty narůst oproti hladkému nemastnému povrchu dokonce několikanásobně.

Je také odůvodněno, že jak vodič stárne, hladina šumu klesá, a to i za deště. Povrch nového vodiče je hydrofobní kvůli zbytkům oleje z výrobních procesů. Voda se na tomto olejovém povrchu shlukuje do kapek. Při stárnutí vodiče se stává hydrofilní, čímž vodní kapky vnikají dovnitř spletených pramenů vodiče [9].

### 3.4.4 Atmosférické a povětrnostní podmínky

Snížení atmosférického tlaku nebo vzrůst okolní teploty nebo obojí může snížit hustotu vzduchu, což snižuje elektrickou pevnost vzduchu, a tím se zvyšuje pravděpodobnost výskytu koróny na vodiči. Barometrický tlak je obvykle důležitý pouze v nadmořských výškách nad 1000 m n. m. Na územích, kde je vlhko, mlha, mráz či nízké teploty, a kde se mohou tvořit vodní kapky nebo led na povrchu vodiče, je díky těmto podmínkám přítomnost koróny více pravděpodobná. Déšť a sníh jsou příčinami nejintenzivnější koróny na povrchu vodiče. Hladina vysokofrekvenčního šumu takto může vzrůst o více než 20 dB ve srovnání s podmínkami za sucha. Výboj se může také objevit v okamžiku, kdy sněhová vločka anebo kapka vody mívá vodič a podnítl výboj mezi vodičem a částicí [9].

## 3.5 Ztráty korónou na vedení

Při přenosu elektrické energie dochází ke ztrátám na vedení. Na těchto ztrátách se podílejí i ztráty korónou. Zvyšováním střídavého napětí na vedení, které je v běžně

znečistěném provozním stavu, můžeme pozorovat stádia korónového výboje. Při napětí nad  $0,3U_0$  se na vodiči objeví malé svítící body, které jsou na drobných nečistotách a nerovnostech povrchu (hrotová koróna). Přestoupí-li napětí  $0,5$  až  $0,6U_0$ , nastávají na větších nerovnostech (na mastných skvrnách, poškozeném povrchu, vodních kapkách) trsové výboje dlouhé několik desítek milimetrů. Je slyšet charakteristické praskání (přechodová koróna). Dosáhne-li napětí velikosti počátečního napětí koróny  $U_0$ , utvoří se slabě svítící obal, který postupně se zvyšováním napětí do sebe pojímá svítící body a trsy (obalová koróna). Zde je možno detekovat rychlý nárůst nabíjecího proudu a kapacity vedení. Ztráty při hrotové koróně jsou nepatrné, u přechodové koróny už dosahují významných hodnot a u obalové koróny jsou velké, v praxi nepřijatelné. Ztráty mohou být rozděleny na dvě složky:

- ionizační ztráty (v trsech či ve svíticím obalu)
- ztráty spojené s úbytkem iontů z ionizační oblasti

Úbytek iontů z ionizační oblasti vodiče do okolního prostoru je kvůli tomu, že v jedné půlperiodě ionty absolvují dráhu dlouhou několik desítek milimetrů, v další půlperiodě, kdy se mění polarita vodiče, částečně rekombinují ve vzduchu a částečně neutralizují při návratu na povrch vodiče. Pro stejnosměrné napětí je mechanismus ztrát rozdílný. V případě, že napájíme vodič stejnosměrným napětím, se ionty zpátky nevracejí. Ztráty zapříčiněné pohybem iontů jsou proti ionizačním ztrátám zanedbatelné.

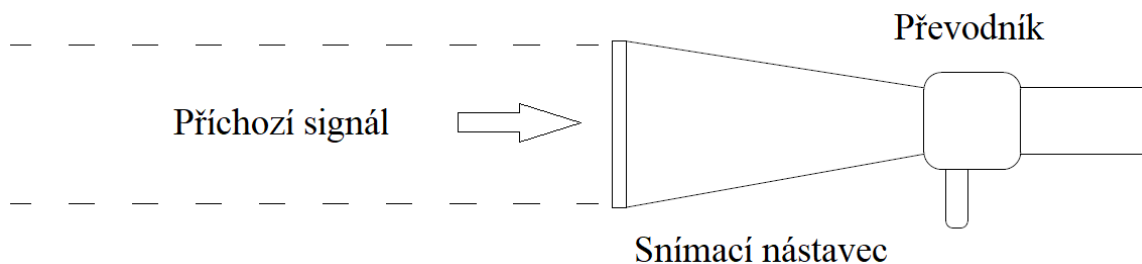
Vše stále souvisí s intenzitou elektrického pole na povrchu vodiče. K udržení intenzity pod kritickou hranicí je nutno zvyšovat průměr vodiče úměrně s nominálním provozním napětím. A to díky AlFe lanům nebo měděným dutým lanům. V přenosové soustavě 220 kV (VVN) se již většinou užívá svazkových vodičů, při napětí 400 kV (ZVN) jsou v podstatě naprosto nutné [1].

Pro výpočet ztrát slouží empirické vztahy (Peekův, Petersonův), které byly vytvořené na základě mnoha měření.

## 4 Možnosti měření koróny

### 4.1 Měření akustických projevů koróny

Korónový výboj lze detekovat ultrazvukovými detektory. Tyto detektory snímají zvuky o vysokých frekvencích a převádí je na nižší pásma, která jsou pro obsluhu slyšitelná ve sluchátkách, nebo je také možno použít zobrazovací display pro odečet intenzity rušivého signálu.



Obr. 3\_Zařízení k detekci zvukových projevů koróny [12]

Pak je na zkušenostech pracovníka vyhodnotit informace získané z měření. Koróna je svou vyzařovanou intenzitou a frekvencí charakteristická, proto je rozeznatelná od elektrického oblouku či od rušení jiného původu.

Metoda nachází uplatnění v laboratorních i externích podmínkách na kterékoliv napěťové hladině, kde k výboji dochází. Měření je možno provádět i v hlučných prostředích díky potlačování běžně slyšitelného zvuku. Také bezpečná vzdálenost od měřeného vedení patří k výhodám [12][13].

### 4.2 Měření IR kamerou a UV detektorem

Korónový výboj vyzařuje záření o různých vlnových délkách. Proto je možné se setkat s odlišnými detektory pro měření těchto výbojů.

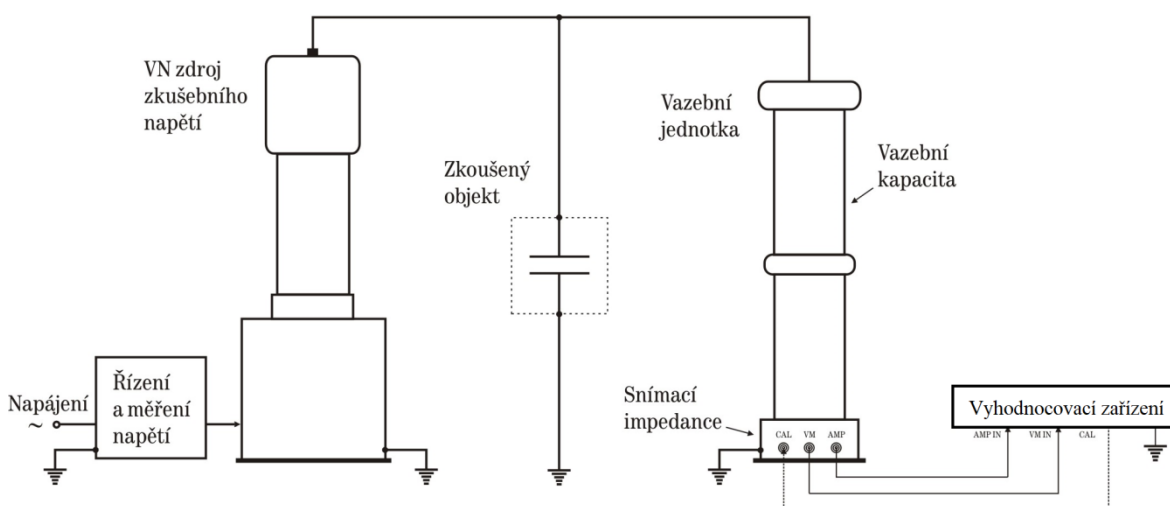
Infračervené (IR) kamery měří intenzitu IR záření, pod kterým si můžeme představit vyzářené teplo. Kvůli tomu, že korónový výboj nevyzařuje velké množství tepla, je tento typ měření účinnější až od vyšších intenzit výboje. Je také velmi obtížné nastavení samotného zařízení pro detekci např. korektní určení emisivity povrchů, eliminace odrazů atd. Běžné kamery mají špatné rozlišení a málo funkcí, nicméně nejnovější zařízení určují i vyzářený výkon.



Vhodnější, ale dražší technologií pro měření výbojů jsou detektory detekující ultrafialové záření (UV). Vhodnější proto, že koróna vyzařuje mnohem větší množství UV než IR záření [12][14][15].

### 4.3 Měření pomocí detektoru částečných výbojů

Měřicí systém se skládá z vysokonapěťového zdroje zkušební napětí, vazební jednotky, kalibrátoru a vyhodnocovacích zařízení. Na Obr. 4 je schematicky zakresleno zapojení zkušební obvodu pro měření částečných výbojů (ČV). Detekovat korónový výboj pomocí detektoru ČV vyžaduje správné zapojení měřicí sestavy, nastavení detektoru a znalost ovládacího softwaru v PC.



Obr. 4 Zapojení zkušební obvodu pro měření částečných výbojů

Vysokonapěťový zdroj je určený k napájení zkušební obvodu. Konstrukce je kombinací autotransformátoru určeného k regulaci velikosti zkušební napětí a vysokonapěťového transformátoru. Transformátor je zcela zbaven částečných výbojů, aby nedocházelo ke zkreslování vlastního měření.

Signál částečných výbojů na zkoušeném objektu je snímán pomocí vazební jednotky, která je tvořena sériovou kombinací snímací impedance a vazební kapacity umístěné v její spodní části, viz Obr. 4. Pro odfiltrování kapacitních proudů síťové frekvence je v měřicí impedanci využita indukčnost.

Před započítím měření je potřeba kalibrovat systém referenční hodnotou náboje. K tomu slouží externí kalibrátor, který generuje na svém výstupu kalibrační náboj o zvolené velikosti a také polarity. Kalibrace se realizuje v beznapěťovém stavu

přivedením kalibračního náboje na svorky zkoušence zapojeného do kompletního měřicího obvodu.

Nejmodernější vyhodnocovací zařízení určené pro měření částečných výbojů jsou digitální. Na rozdíl od analogových detektorů, kde jsou impulzy částečných výbojů získávané na snímací impedanci průběžně zobrazovány na osciloskopické obrazovce detektoru, u digitálních detektorů je měřený signál po zesílení zesilovačem převeden A/D převodníkem do digitálního tvaru, a poté softwarově zpracován počítačem s nainstalovaným ovládacím softwarem [17].

#### **4.4 Metoda zkušební klece**

Měření probíhá na části vedení, které je umístěno do trubky neboli klece obklopující jej. Proud vysokofrekvenčního rušení koróny na jednom konci vodiče nebo svazku prochází vysokofrekvenčním vazebním členem a je měřen kalibrovanými přístroji. Impedance přístrojů a členu je ve shodě s vlnovou impedancí vedení, aby nedocházelo k odrazům.

Metoda je spíše vhodná na měření v laboratorních podmínkách, ale pokud není kladen velký důraz na přesnost, je možné ji použít i na reálných aplikacích. Je to díky tomu, že délka vodiče v kleci je obecně poměrně malá, aby představovala skutečné, dlouhé vedení [9][12].

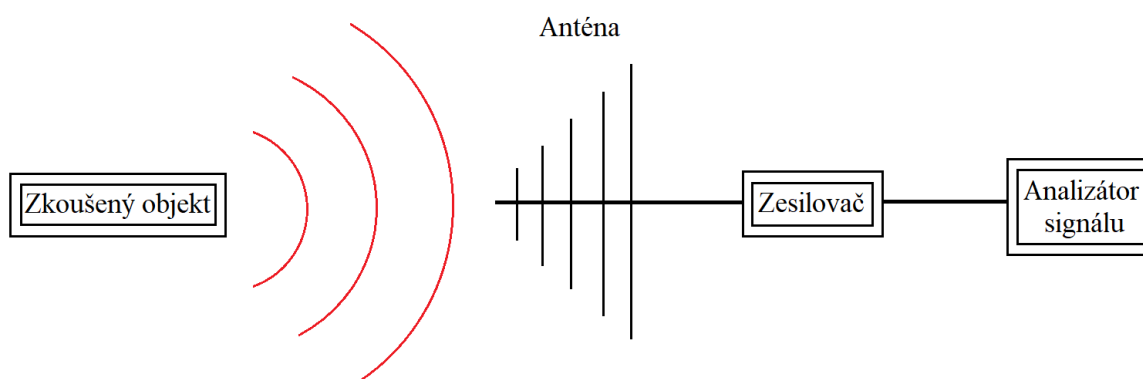
#### **4.5 Metoda zkušebního vedení**

Zatímco zkušební klece jsou sestrojovány s cílem ekonomického a snadného zkoušení výbojových efektů, také se staví zkušební vedení, na kterých jsou zkoumány vlastnosti koróny. Tyto vedení jsou takřka rovnocenná reálným vedením. Zkušební vedení jsou budována jednofázová, třífázová i stejnosměrná, dlouhá až několik kilometrů, ale i krátká několik set metrů.

U dlouhých přenosových vedení kmitočtové spektrum vysokofrekvenčního šumu rovnoměrně klesá se vzrůstajícím kmitočtem. Pro krátká zkušební vedení to ale neplatí. Vlivem odrazů vysokofrekvenčních napětí a proudů na koncích vedení je ve spektru znatelné stojaté vlnění. Toto spektrum je vyznačováno ostrými vrcholky a širokými poklesy, jejichž přesná forma je závislá na délce vedení, způsobu zakončení a situování měřicího bodu [9].

## 4.6 Detekce vysokofrekvenčních signálů

Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, signály o vysokých frekvencích generované korónovými výboji se šíří do okolí, a to do značných vzdáleností, a mohou způsobovat rušení. Tyto signály je možno přijímat anténami, které jsou napojeny k vyhodnocovacím zařízením, a měřit intenzitu signálu pro předem definovanou frekvenci, nebo lze zobrazit kmitočtové spektrum přijímaného signálu. Avšak záleží na frekvenčním rozsahu antény a zařízení, aby byl signál zpracovatelný a zobrazitelný.



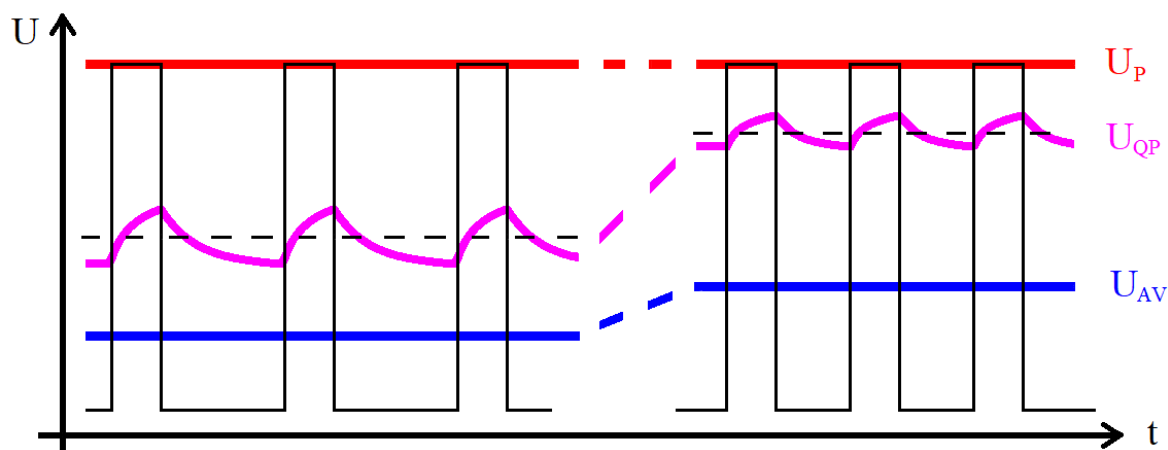
Obr. 5\_Blokové schéma detekce vysokofrekvenčního rušení

Vyhodnocovací zařízení obsahují několik detektorů. Proto mohou indikovat rozdílné typy hodnot měřeného signálu. Jsou to hodnoty vrcholové (špičkové, peakové), kvazivrcholové (quasi-peakové) anebo střední (average), viz Obr. 6. Volba dané hodnoty signálu ovlivňuje výsledný, zobrazený signál. Vše je řízeno počítačem s příslušným softwarem.

Vrcholová hodnota (peak) je rovna maximální velikosti vstupního rušivého napětí, tedy maximální hodnotě obálky napětí na mezifrekvenčním výstupu měřiče rušení.

Kvazivrcholová hodnota (quasi-peak) je úměrná napěťově-časové ploše obálky vstupního mezifrekvenčního signálu a je ovlivňována velikostí, ale i opakovacím kmitočtem vstupních impulzů rušivého napětí.

Střední hodnota (average) je rovna aritmetické střední hodnotě obálky vstupního mezifrekvenčního rušivého napětí.



Obr. 6\_Porovnání rozdílných hodnot měřeného signálu

Měření na vedení ve venkovním prostředí je odlišné od měření v laboratorních podmínkách. Mimo laboratoř není odstíněno rušení, které produkují jiné vlivy, a proto je zapotřebí naměřená data porovnat s vedením, kde zaručeně koróna nevzniká, a korektně zhodnotit výsledky. Nejlepší variantou by bylo měřit na vedení v zapnutém a vypnutém stavu, ale to je prakticky nerealizovatelné kvůli zajištění nepřetržitosti dodávky [12].

## 5 Návrh vhodného postupu pro měření

### 5.1 Popis modelů vedení

Měření je realizováno na šesti modelech vedení, které bylo potřeba vyrobit. Jedná se o dva jednoduché vodiče s průměrem 0,4 mm a 1,6 mm, dále o čtyři svazkové vodiče, a to konkrétně o dvousvazek, trojsvazek, čtyřsvazek a šestisvazek. Svazky jsou vyrobeny z 0,4 mm tlustého vodiče a mezi jednotlivými vodiči je totožná vzdálenost. Modely o délce 120 cm jsou upevněny v izolátorech 17 cm nad měděnou deskou. Užito bylo trubkového vodiče pro přívod napětí a kapacitních kruhů, aby se eliminovaly další zdroje rušení na přívodu a na zakončeníh.



Obr. 7\_Celkový pohled na model jednoduchého vodiče 1,6 mm

Pro naměření vysokofrekvenčních charakteristik korónového výboje je vhodná ta metoda, která je schopna analyzovat vyzařované signály, které se šíří do okolí od zdroje takovýchto signálů. Sestava složená z antény, analyzátoru signálu a počítače s řídicím softwarem je pro tento typ měření nejvhodnější.

### 5.2 Zápalné napětí korónového výboje

Před měřením vysokofrekvenčních signálů anténami je třeba stanovit zápalné napětí koróny, aby se neprovádělo měření na modelech vedení ve stavu, kdy korónový výboj ještě není vyvinut. Na tuto část měření je vhodná metoda měření částečných výbojů popsána v kapitole 4.3. Pro kontrolu je možné použít alternativní metodu, která je založena na měření stejnosměrného korónového proudu mikroampérmetrem. Tato metoda je principiálně stejná s metodou zkušební klece popisované v kapitole 4.4. Nicméně je třeba zdůraznit, že metoda poslouží pouze ke kontrole, protože zápalné napětí koróny je odlišné pro stejnosměrná a střídavá napětí. Avšak, dle teoretických předpokladů,

hodnoty kritických napětí naměřené na detektoru částečných výbojů by neměly být vyšší než hodnoty zaznamenané při měření korónového proudu.

### 5.3 Frekvenční charakteristiky

Vysokofrekvenční rušivý signál vyzařovaný korónovými výboji je zapotřebí měřit v širokém frekvenčním pásmu, aby bylo důkladně zhodnoceno, při jakých frekvencích je rušivý signál produkován a při kterých už ne. Pro příjem signálů poslouží antény připojené k analyzátoru, který je řízen počítačem. V laboratoři či ve venkovním prostředí měření vyžaduje nejprve zaznamenat tzv. pozadí (vysokofrekvenční signály, které vznikají bez přítomnosti korónových výbojů), a poté provést vlastní měření. Porovnání charakteristik změřeného pozadí a korónových výbojů na vedení je dobrým postupem jak určit frekvence, na nichž výboj vykazuje podíl rušivých signálů.

Také je potřeba porovnat velikost výbojů a jejich četnost. K tomu se použije dvou odlišných detektorů, a to peakového, který je schopen zaznamenat maximální náboj měřených výbojů, a quasi-peakového, který zohledňuje i četnost.

Měření by mělo ukázat již zmíněné hodnoty rušivých signálů na dané frekvenci a také podat přehled o tom, jaký z daných typů vodičů vykazuje tyto hodnoty nejnižší.

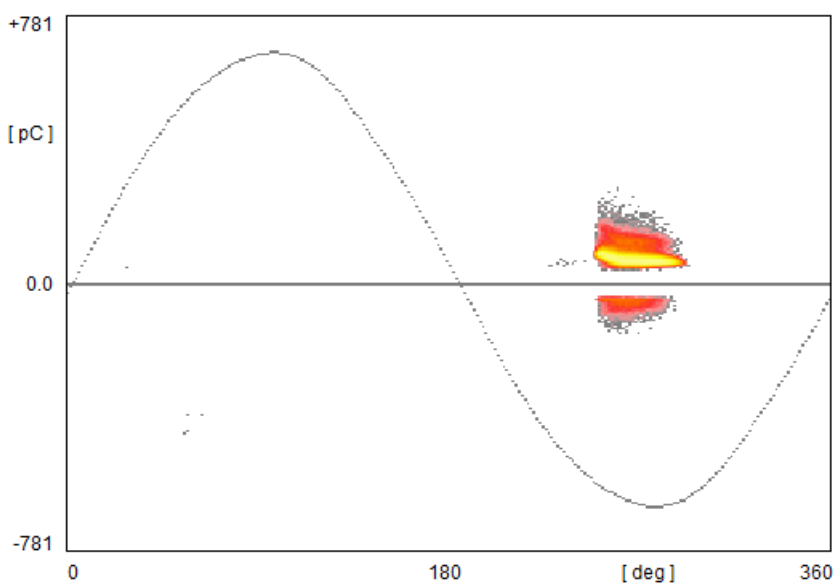
## 6 Měření vysokofrekvenčních charakteristik

Realizace měření korónového výboje na modelech vedení poskytne frekvenční spektrum, ze kterého je možno určit intenzitu rušivých vysokofrekvenčních signálů. Z frekvenčních charakteristik lze určit, zda koróna může produkcí vysokofrekvenčních signálů negativně ovlivňovat radiové či televizní vysílání anebo internet či telefonní komunikaci.

### 6.1 Stanovení počátečního napětí korónového výboje

Před samotným měřením vysokofrekvenčních charakteristik anténovým přijímačem bylo zapotřebí stanovit zápalné napětí koróny. Pro stanovení kritické hodnoty napětí, tedy hodnoty napětí, kdy korónový výboj vykazuje zvýšený podíl rušivých signálů, byla provedena měření. Na detektoru částečných výbojů pro střídavá napětí a také měření korónového proudu mikroampérmetrem při stejnosměrných napětích korónového výboje.

Pro měření částečných výbojů byl použit přístroj ICM system od firmy Power Diagnostix. Při měření, kdy každý z šesti modelů byl napájen střídavým napětím, bylo autotransfornátorem plynule navyšováno napětí až do hodnoty, kdy na detektoru částečných výbojů bylo zřejmé zapálení koróny. Poté byla spuštěna analýza částečných výbojů.



Obr. 8\_Záznam z detektoru ČV (čtyřsvazek při napětí 21,6 kV)

Výboje v maximu sinusovky ukazují na korónový výboj, který zapaluje při záporném napětí dříve. Výsledky z měření na všech typech modelů jsou umístěny

v příloze na konci této diplomové práce. Barevné rozlišení znázorňuje četnost výbojů. Pro představu, kolik výbojů se za minutový časový úsek naměřilo, poslouží následující obrázek, vyjmutý z měřicího softwaru.

Norm	Log
0	0
1 - 141	1 - 2
142 - 282	3 - 4
283 - 423	5 - 8
424 - 564	9 - 16
565 - 705	17 - 32
706 - 846	33 - 64
847 - 987	65 - 128
988 - 1128	129 - 256
1129 - 1270	257 - 512
1271 - 1411	513 - 1024
1412 - 1552	1025 - 2048
1553 - 1693	2049 - 4096
1694 - 1834	4097 - 8192
1835 - 1975	8193 - 16384
1976 - 2116	16385 - 32768
2117 - 2257	32769 - 65536

Obr. 9\_Barevné rozlišení četnosti výbojů

V případě napájení stejnosměrným napětím bylo napětí zvyšováno regulovatelným zdrojem do hodnoty, kdy na mikroampérmetru bylo možné odečítat jednotky  $\mu\text{A}$ . Měření proběhlo pro obě polaritu přiloženého napětí.

Hodnoty zápalných napětí byly detekovány zmíněnými metodami a také bylo možno korónový výboj slyšet bezprostředně po zapálení. V následující tabulce je souhrn naměřených hodnot počátečního napětí koróny pro jednotlivé typy modelů vedení.

Typ vodiče	Zápalné napětí korónového výboje (kV)		
	Stejnosečné		Střídavé
	Kladná polarita	Záporná polarita	
jednoduchý 0,4 mm	20,5	16	10,6
jednoduchý 1,6 mm	33	28,5	21,5
dvousvazkový	24,5	21	15,2
trojsvazkový	29,8	29	18,9
čtyřsvazkový	32,5	31	21,6
šestisvazkový	38	35	27,7

Tab. 1\_Zápalné napětí všech modelů

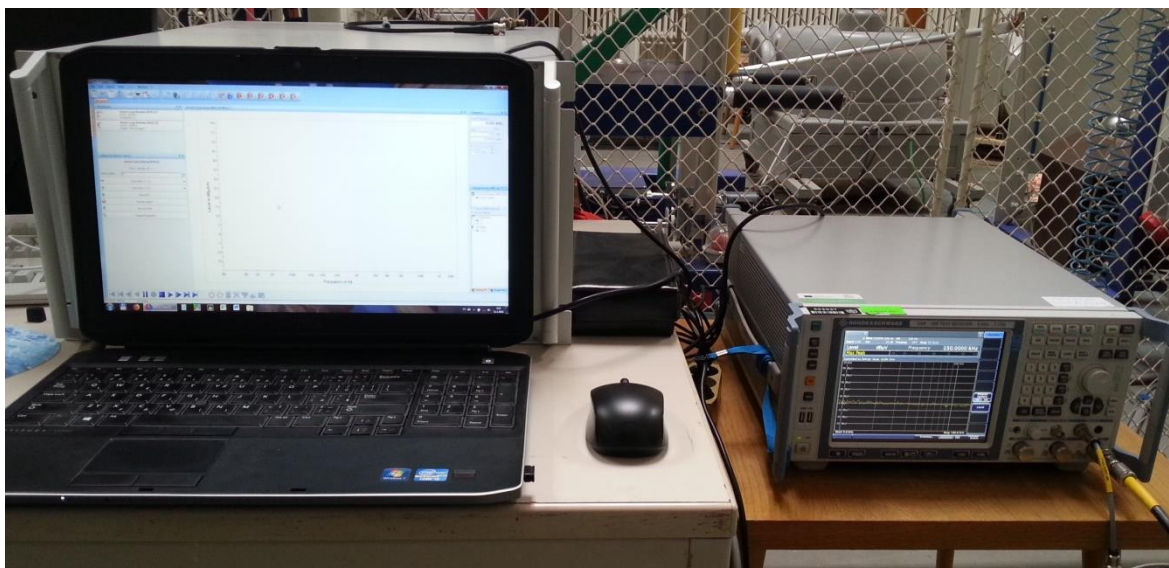


Při náhledu do tabulky naměřených hodnot lze obecně říci, že kritické napětí koróny je nejnižší u jednoduchého vodiče s průměrem 0,4 mm. Použitím svazkového vodiče hodnota zápalného napětí roste úměrně s počtem vodičů ve svazku. Tlustý vodič vykazuje podobné hodnoty napětí jako čtyřsvazkový vodič. Neznamena to však, že v praxi je výhodnější použít silný vodič namísto svazkového. Vlivy mechanické a také skin efekt prosazují svazkové vodiče, ale tato problematika není předmětem této diplomové práce.

Hodnoty naměřené při stejnosměrném napětí ověřily správnost výsledků při střídavém napětí tím, že *ss* počáteční napětí, při kterých koróna vzniká, je vyšší než hodnoty při *st* napětích. Také kladná polarita a záporná polarita napětí vyšla dle předpokladů.

## 6.2 Měření VF charakteristik anténami

Každý z modelů je napájen ze zvyšovacího transformátoru. Na transformátoru se nastaví napětí odpovídající hodnotě zápalného napětí, viz Tab. 1, a poté se spouští příjem vysokofrekvenčních signálů prostřednictvím měřicí soustavy. Je měřena intenzita magnetického pole  $H$  udaná v jednotce  $\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$  a intenzita elektrického  $E$  pole v  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ .



Obr. 10\_Počítač s řídicím softwarem a přijímačem signálů

Antény jsou připojeny k signálovému přijímači přes koaxiální kabely. Počítačovým softwarem řízený analyzátor zpracovává přijatá data a odesílá je do počítače. Pro reálné a korektní výsledky měření je důležité pečlivě nastavit parametry antén, kabelů, přijímače, a také volba správných měřicích schémat je zárukou správně naměřených dat.

Doba záznamu signálu, frekvenční rozsah měření, typy měřených hodnot atd. také ovlivňují měření.



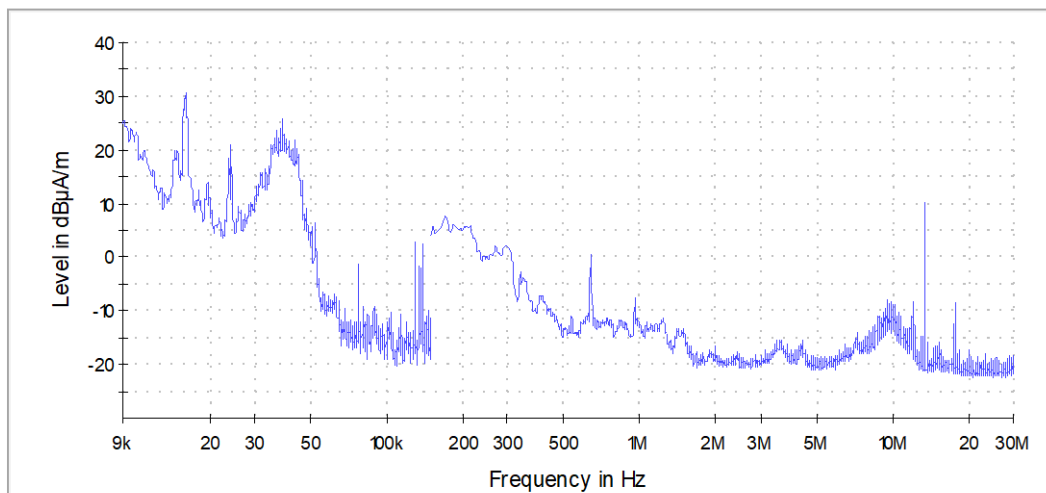
Obr. 11\_Realizace měření v laboratoři VN

Jsou použity tři typy antén pro pokrytí širokého frekvenčního pásma. Smyčková anténa snímající magnetické pole v rozsahu 9 kHz – 30 MHz, dále antény snímající elektrické pole, těmi jsou bikónická anténa 30 MHz – 200 MHz a logaritmicko-periodická anténa mající rozsah 200 MHz – 2,7 GHz. Měřeno bylo pouze pro jednu polarizaci antén.

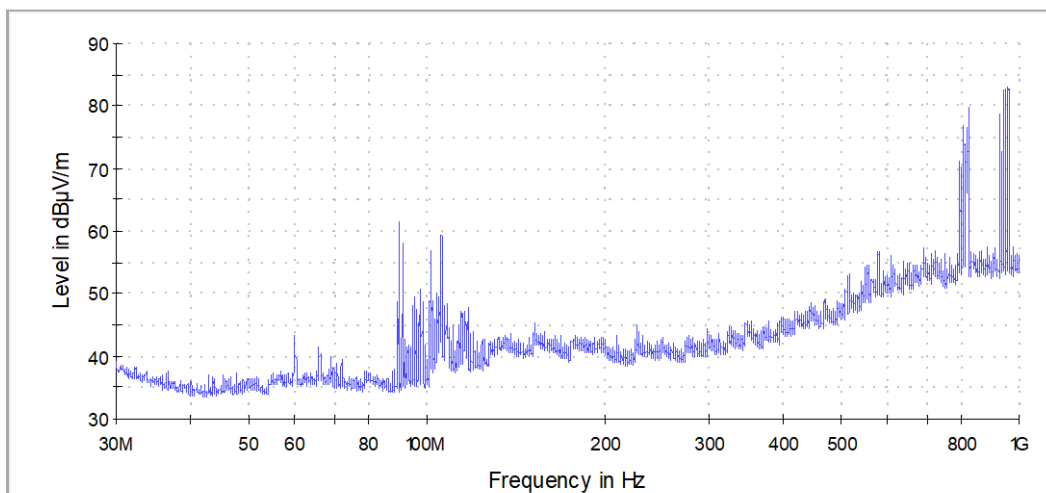
### 6.2.1 Měření vysokofrekvenčních charakteristik v laboratoři

Zde je prezentováno několik nejdůležitějších frekvenčních spekter, která vykazují důležité poznatky z měření. Bylo měřeno šest typů vedení, na kterých byly nastavovány dvě hodnoty napětí. Vždy při zapalovacím napětí koróny, a poté při napětí o cca 5 kV zvýšeném nad zapalovací. Pro všechny varianty měření bylo použito dvou signálových detektorů. Veškeré zaznamenané vysokofrekvenční charakteristiky jsou k nahlédnutí v příloze této práce.

Po naměření VF charakteristik ve frekvenčním pásmu od 9 kHz do 1 GHz na všech modelech bylo potřeba také naměřit, jak vypadá frekvenční spektrum pozadí v laboratoři. To poslouží jako referenční hodnota, aby bylo možné analyzovat rušení korónovým výbojem. Pozadí bylo měřeno při napětí 5 kV nastavené na sekundární straně transformátoru.



**Obr. 12\_Frekvenční spektrum pozadí při napětí 5 kV (9 kHz – 30 MHz)**

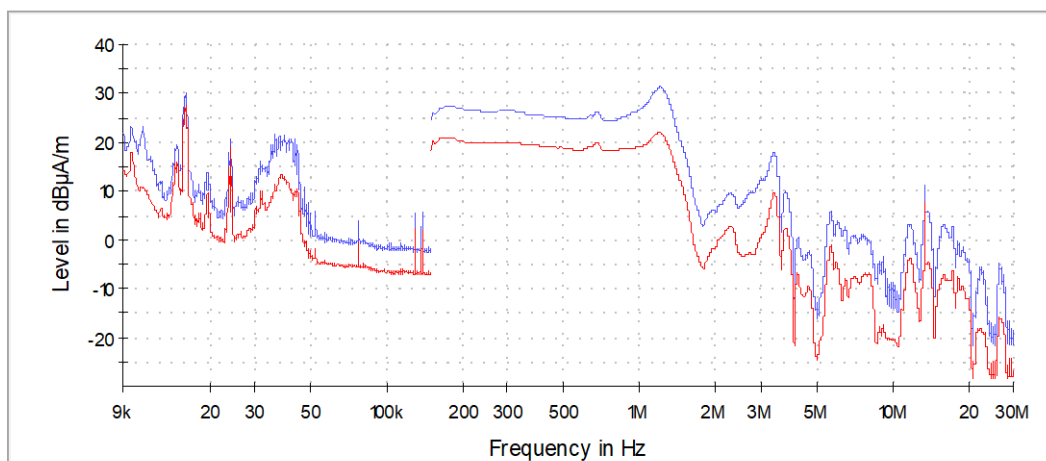


**Obr. 13\_Frekvenční spektrum pozadí při napětí 5 kV (30 MHz – 1 GHz)**

Frekvenční spektrum pozadí (Obr. 12 a 13) vykazuje šumový signál, ale hlavně signály, které jsou využívány pro radiové či televizní vysílání, mobilní sítě, letecké a námořní aplikace, družicové a meteorologické systémy, necivilní účely a jiné.

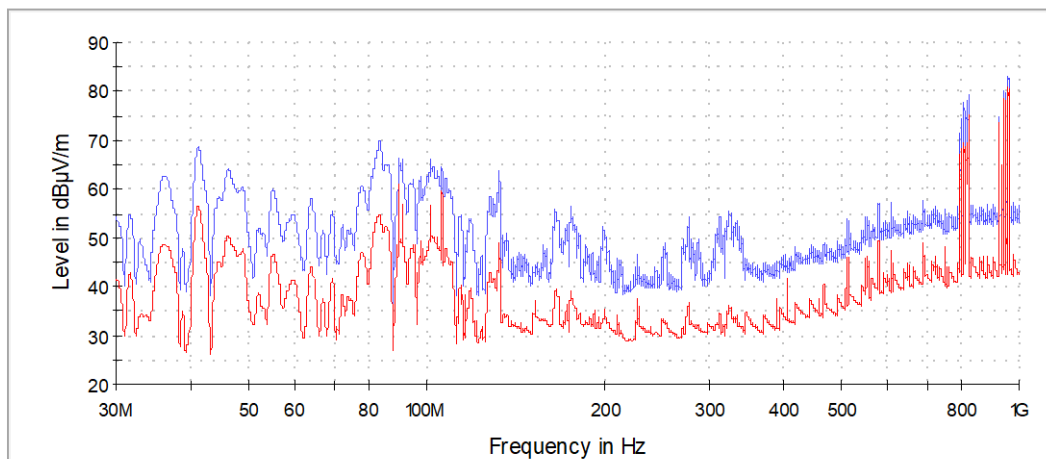
Nejvýraznější je FM rozhlasové pásmo (87,5 – 108 MHz), také televizní vysílání (790 – 838 MHz) spolu se signálem mobilních operátorů (870 – 960 MHz).

Dále je třeba porovnat vliv použitého detektoru na měřené hodnoty signálů.



— jedno duchy vodič 0,4 mm; Peak — jedno duchy vodič 0,4 mm; Quasi-Peak

**Obr. 14\_Porovnání peakového a quasi-peakového detektoru (9 kHz – 30 MHz)**

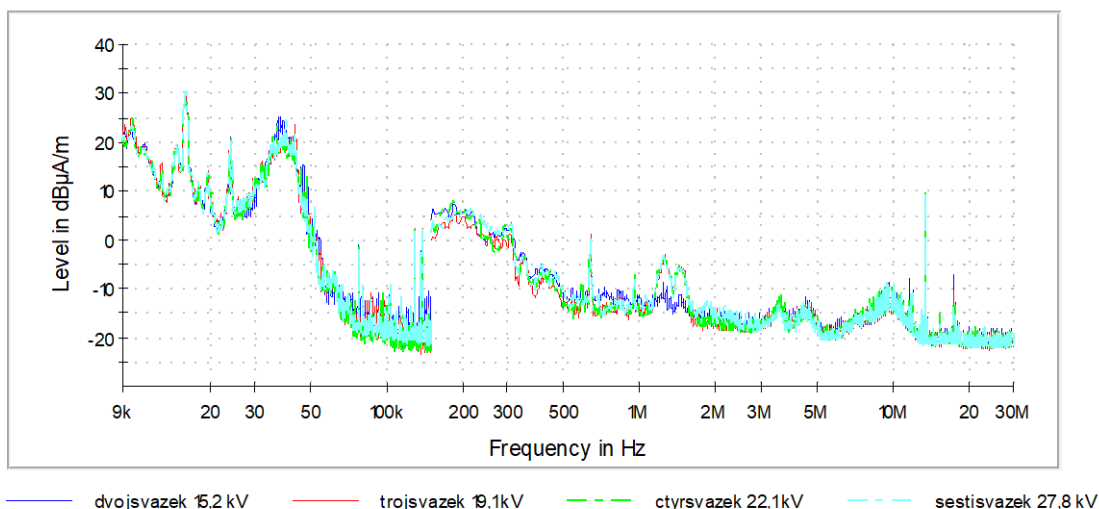


— jedno duchy vodič 0,4 mm; Peak — jedno duchy vodič 0,4 mm; Quasi-Peak

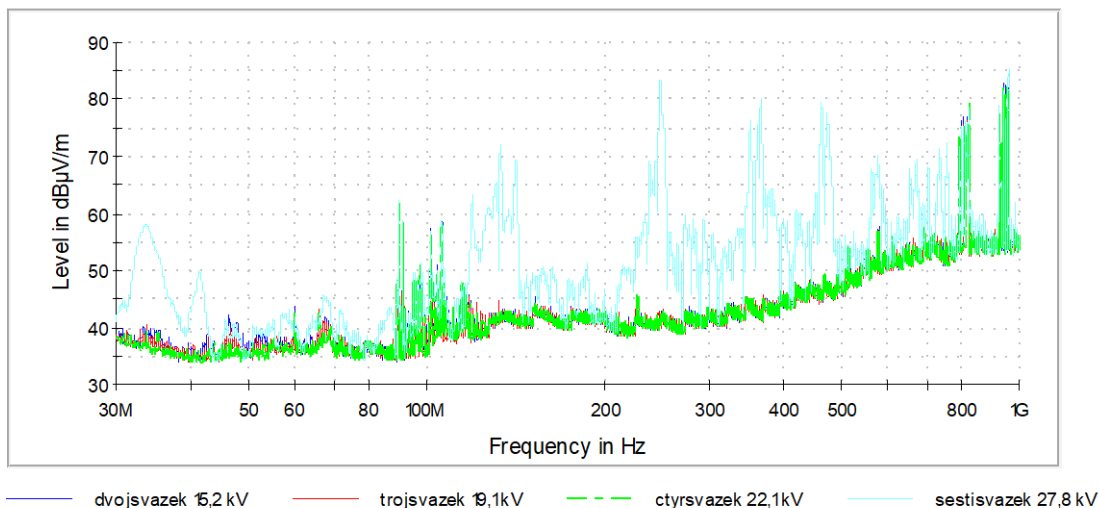
**Obr. 15\_Porovnání peakového a quasi-peakového detektoru (30 MHz - 1 GHz)**

Porovnání měřících detektorů na jednoduchém vodiči o průměru 0,4 mm ukazuje, že hodnoty peakové převyšují hodnoty quasi-peakové, což není v rozporu s fyzikálním principem jednotlivých detektorů popisovaných v kapitole 4.6. Rozdíl mezi detektory je také možno komentovat tím, že koróna vykazuje impulzní charakter.

Měřeny byly čtyři svazkové vodiče, které bylo také nezbytné porovnat.



**Obr. 16\_Porovnání svazkových vodičů (9 kHz – 30 MHz)**



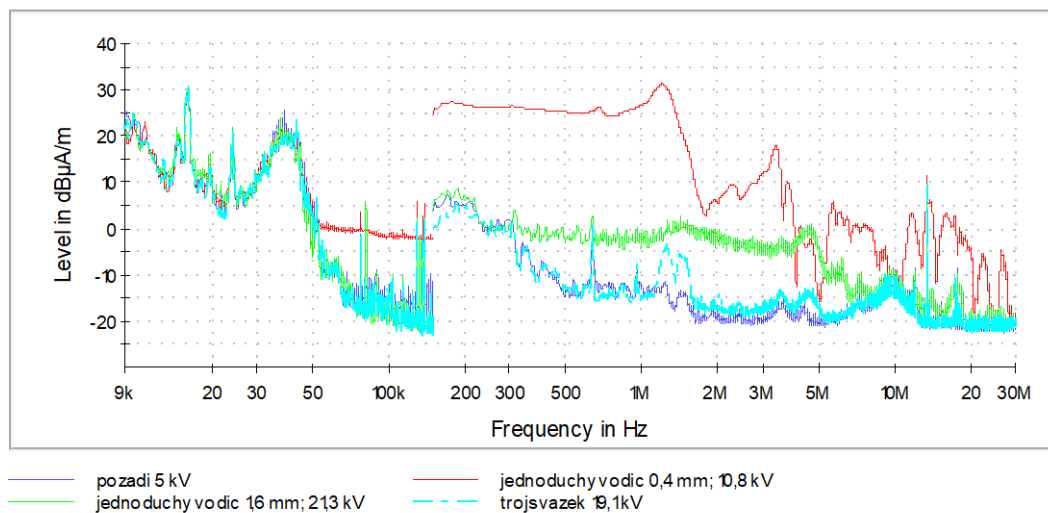
**Obr. 17\_Porovnání svazkových vodičů (30 MHz - 1 GHz)**

Na předchozích obrázcích je porovnáváno frekvenční spektrum svazkových vodičů při nastavených hodnotách zápalného napětí. Na frekvenčním pásmu od 9 kHz do 30 MHz, kde signály přijímá smyčková anténa snímající mag. pole, mají svazky velice podobný charakter rušení. V pásmu od 30 MHz do 1 GHz, zde signál snímá bikónická a logaritmicko-periodická anténa, tři svazkové vodiče vykazují podobné spektrum, ale šestisvazkový vodič nikoli. Okamžitě po změření charakteristik byl šestisvazkový model vodiče odpojen a byl testován vysokonapěťový zdroj na stejné hladině napětí. Takovýto typ rušení nebyl ale patrný, takže rušení nepocházelo z napěťového zdroje, ale nejspíše z nějaké jiné výbojové činnosti na modelu (např. klouzavý výboj).

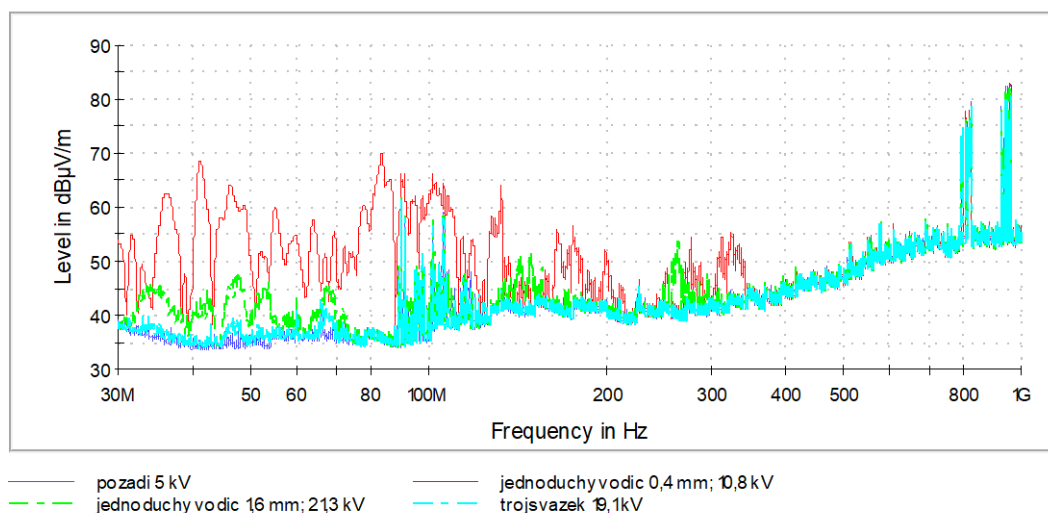


Obecně však můžeme říci, že svazkové vodiče vykazují podobný charakter šumového pole a při dalších porovnáváních k nim lze přistupovat jako k totožným. To sníží počet křivek v grafech a zprehlední je.

Zde jsou srovnány modely vodičů, na kterých je vyvinut korónový výboj s pozadím naměřeném v laboratoři VN. Jedná se o vrcholové hodnoty naměřených signálů.



**Obr. 18\_Frekvenční spektrum pozadí s vodiči (9 kHz - 30 MHz)**

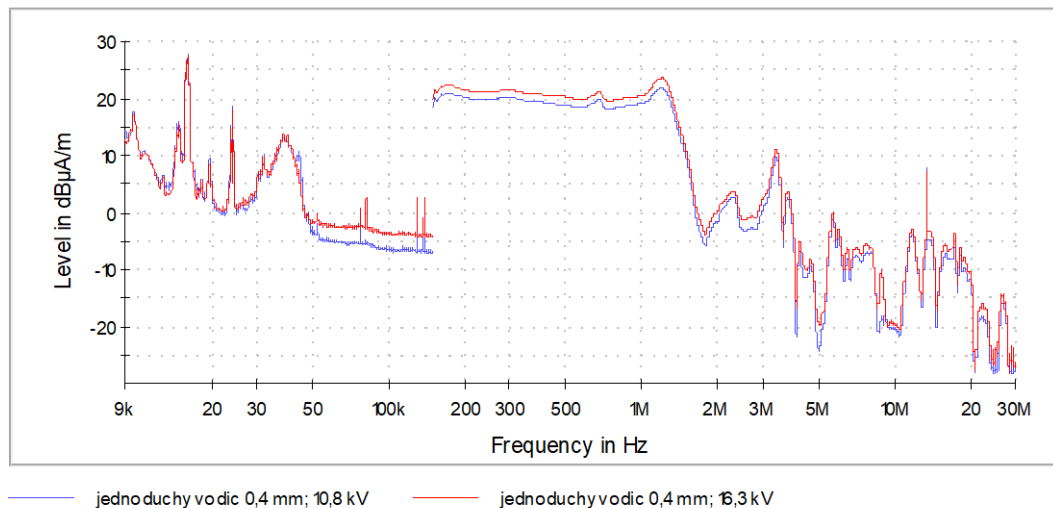


**Obr. 19\_Frekvenční spektrum pozadí s vodiči (30 MHz - 1 GHz)**

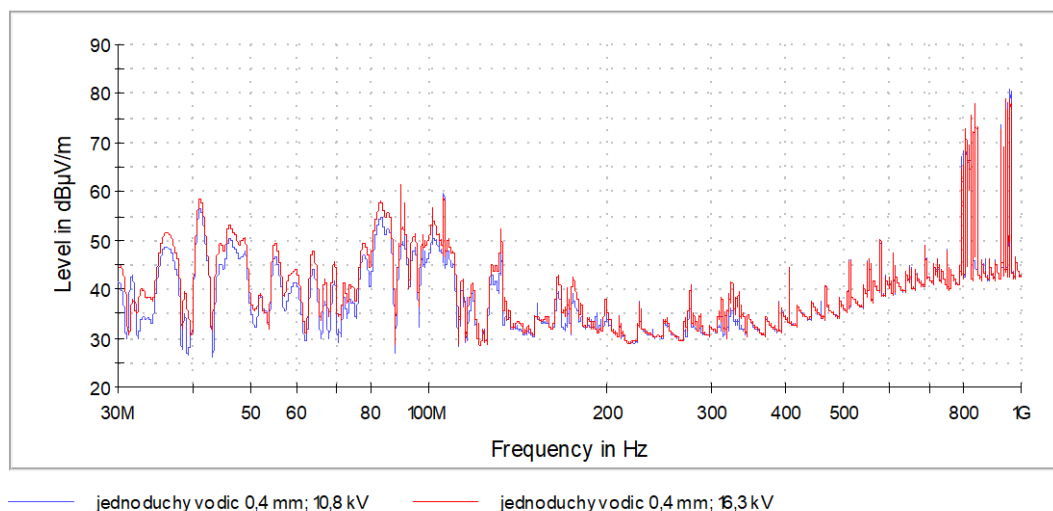
Jednoduchý vodič o průměru 0,4 mm, na němž koróna zapaluje už při napětí 10,8 kV, produkuje nejvíce rušivého signálu ve srovnání s pozadím. Jednoduchý vodič o průměru 1,6 mm a  $U_0 = 21,3$  kV v některých částech frekvenční charakteristiky produkuje nižší hodnoty rušení, v některých zase rušení nevytváří. Naopak u trojsvazkového vodiče s počátečním napětím koróny 19,1 kV k rušení takřka nedochází.

Přibližně od frekvence 350 MHz, korónový výboj rušení nezpůsobuje. Proto nebylo měřeno na plném rozsahu antény do 2,7 GHz, ale pouze do 1 GHz.

Navýšení napětí nad hodnotu kritického napětí koróny je další částí měření. Měření ukáže, zda navýšení napětí ovlivní emise signálů.



**Obr. 20\_Navýšení napětí nad  $U_0$ , jednoduchý vodič 0,4 mm (9 kHz - 30 MHz)**



**Obr. 21\_Navýšení napětí nad  $U_0$ , jednoduchý vodič 0,4 mm (30 MHz - 1 GHz)**

Navýšení počátečního napětí koróny přibližně o 5 kV u jednoduchého vodiče s průměrem 0,4 mm navýšilo intenzitu vyzařovaných rušivých signálů. Zvýšením napětí došlo k vyšší četnosti výbojů, jak je možno vyzorovat z kvazivrcholových hodnot (Obr. 20, 21). Při pohledu na peakové hodnoty (Obr. 102, 103 viz přílohy) je zřejmé, že velikost výbojů je pro dvě odlišná napětí stejná. V přílohách jsou také záznamy pro dvousvazkový vodič (Obr. 104, 105 kvazivrcholové hodnoty a 106, 107 vrcholové).

Pokud bude vedení vystaveno vysokým napětím, může docházet k jiskření a výbojům nejen na povrchu vodičů a armaturách stožáru, ale i na vysoce namáhaných částech izolátorů nebo přerušených či nedokonalých spojení. To povede k navýšení emisí rušivých signálů šířících se do okolí.

### 6.2.2 Měření VF charakteristik na venkovním vedení 400 kV

Vedení 400 kV u obce Krasavce nedaleko rozvodny Přeštice poskytlo reálná data vysokofrekvenčního rušení. Na vedení byla slyšitelná koróna na místech rozpěrek. Měření VF charakteristik bylo realizováno na „dvoupotahu“ linek 431 mezi Přešticemi a Chrástem a 432 mezi Přešticemi a Kočínem.

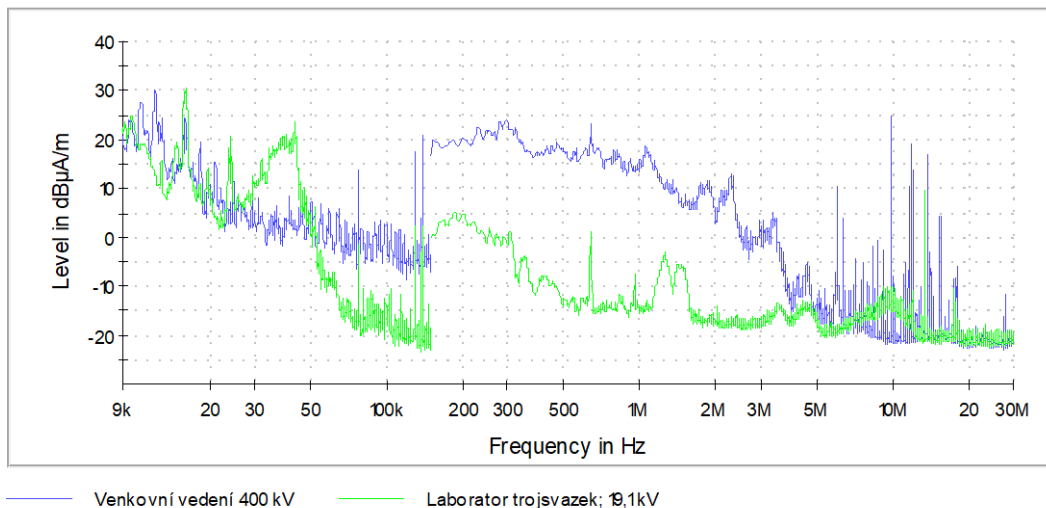


Obr. 22\_Měření na vedení 400 kV

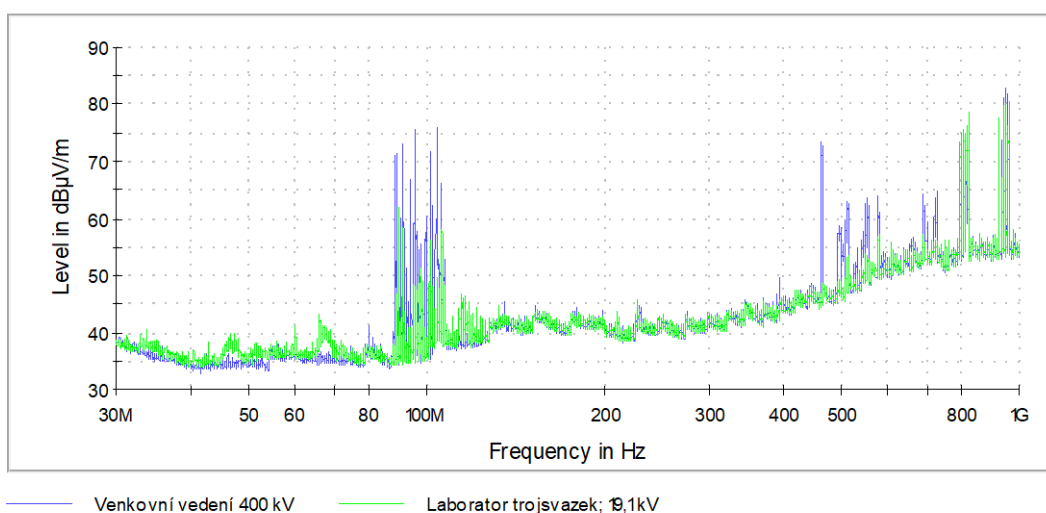
Napájení VF přijímače a PC bylo zajištěno pomocí elektrocentrály. Měřeno bylo opět peakovým a quasi-peakovým detektorem v rozsahu od 9 kHz do 1 GHz. Bylo také provedeno měření pro horizontální a vertikální polarizaci bikónické a logaritmicke-periodické antény a smyčková anténa byla nastavena paralelně k vedení, poté kolmo.



Vedení ZVN je konstruováno jako trojsvazkové, a proto je vhodné porovnat naměřené charakteristiky s charakteristikami trojsvazkového vodiče, na kterém bylo měřeno v laboratorních podmínkách.



**Obr. 23\_Porovnání venkovního vedení s modelem trojsvazku (9 kHz - 30 MHz)**



**Obr. 24\_Porovnání venkovního vedení s modelem trojsvazku (30 MHz - 1 GHz)**

Z charakteristik naměřeného VF signálu na venkovním vedení a modelu vedení je možné vidět, že smyčková anténa snímající magnetické pole ve frekvenčním rozsahu 9 kHz – 30 MHz zaznamenala vyšší intenzitu mag. pole na venkovním vedení. To díky tomu, že vedení je na napětí 400 kV a je zatížené, tím produkuje vyšší hodnoty rušení. V rozsahu, kde snímá bikónická a logaritmicke-periodická anténa elektrické pole, tedy 30 MHz – 1 GHz, není rozdíl tolik patrný.

V laboratoři může docházet ke stínění radiových a televizních signálů, tudíž tyto signály jsou silnější při venkovním měření, což je také zřejmé z grafů.

## Závěr

Cílem práce bylo naměřit vysokofrekvenční charakteristiky korónového výboje na různých modelech vedení a vyhodnotit, jaký charakter rušení může tato výbojová činnost produkovat.

Měření v laboratoři byla realizována na zjednodušených modelech vedení s různým uspořádáním vodičů. Na vodič modelu bylo přivedeno napětí z VN transformátoru a druhý konec modelu nebyl nijak zatížen. Přivedené napětí zapálilo obalovou korónu okolo celého vodiče, zatímco na venkovním vedení nejspíše koronovaly pouze některé konstrukční prvky a nehomogenity. I přesto se na modelu podařilo naměřit obdobný charakter rušení jako na reálném 400 kV vedení. Na venkovním vedení však byla naměřena větší intenzita rušení, což mohlo být způsobeno větším počtem zdrojů rušení (dvě linky o 3 fázích, rozpěrky ve svazcích, uchycení izolátorů atd.) anebo také tím, že v laboratoři byla některá vnější rušení odstíněna.

Vysokofrekvenční charakteristiky byly naměřeny na všech modelech vedení a navíc i na reálném vedení. Proměřeno bylo frekvenční spektrum od 9 kHz do 1 GHz. Z charakteristik je možno pozorovat pokles emisí se zvyšujícím se průměrem vodiče. Korónový výboj na jednoduchých vodičích intenzivněji produkuje rušivý signál než na svazkových. Generování rušivých polí korónovým výbojem začíná na 50 kHz a končí zhruba na 350 MHz. Nicméně v tomto frekvenčním pásmu intenzita vyzařovaných signálů není konstantní, ale značně se mění. Koróna tedy může způsobovat rušení radiových signálů, avšak použití svazkových vodičů toto rušení minimalizuje. Na frekvencích, kde jsou provozovány dnešní televizní vysílání, mobilní sítě, družicové systémy aj., k rušení nejspíše nedochází.

Při srovnávání frekvenčních spekter svazkových vodičů se došlo k závěru, že mají téměř totožné průběhy. Jen šestisvazkový vodič se odlišoval od ostatních svazků. Pravděpodobně to bylo způsobeno vysokým zapalovacím napětím, při kterém došlo k zapálení jiného typu výboje.

Navýšení napětí přibližně o 5 kV nad hodnotu počátečního napětí koróny u všech modelů vedení neprokázalo zesílení rušivých signálů pocházejících z výbojové činnosti.

Naměřené frekvenční charakteristiky peakovým a quasi-peakovým detektorem jsou odlišné a ukazují na to, že korónový výboj má impulzní charakter. Quasi-peakový detektor totiž respektuje velikost výbojů, ale i jejich četnost, kdežto peakový pouze maximální velikost.

Porovnání vyzářovaných spekter při střídavém a stejnosměrném napájení modelů vedení může být pro případné zájemce námětem k doplnění problematiky vysokofrekvenčního rušení korónovými výboji.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. Vydání třetí, přepracované. Praha: SNTL/ALFA, 1982.
- [2] FABŠIC, Jiří. *Částečné výboje v plynném izolantu*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] PROCHÁZKA, Petr. *Protikorónová ochrana napájecího vodiče v laboratoři VN*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] AJGLOVÁ, Lenka. *Dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] ČERNÁ, Kateřina. *Charakteristiky koróny na vysokonapěťových zařízeních*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] MACKEN, Martin. *Modelling and Simulations of Corona Discharge Currents in a Large Scale Coaxial Geometry with a Dielectric Barrier due to Low Frequency Triangular Voltages* [online]. , 88 str. [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/215798/215798.pdf>
- [7] KUFFEL, Edmund., Walter. S. ZAENGL a John. KUFFEL. *High Voltage Engineering; Fundamentals* [online]. , 539 str. [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://www.mv.helsinki.fi/tpaulin/Text/hveng.pdf>
- [8] ŠEBEK, Radoslav. *Elektromagnetické emise korónového výboje*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] ČSN CISPR 18-1: *Charakteristiky rušení od venkovních vedení a zařízení vysokého napětí: Část 1: Popis jevů*. Český normalizační institut, Únor 1995.
- [10] ČSN CISPR 18-2+A1: *Charakteristiky rušení od venkovních vedení a zařízení vysokého napětí: Část 2: Metody měření a postup pro určení mezí*. Český normalizační institut, Říjen 1998.
- [11] ČSN CISPR 18-3: *Charakteristiky rušení od venkovních vedení a zařízení vysokého napětí: Část 3: Praktické způsoby pro omezení vzniku vysokofrekvenčního šumu*. Český normalizační institut, Prosinec 1997.
- [12] KLIER, Milan. *Výzkum koróny na přenosových vedeních*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [13] WSZOŁEK, Tadeusz. *Noise Indicators for Corona Acoustic Signal from Power Lines – Estimation in Intensified Interference Conditions*. *Archives of Acoustics* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://acoustics.ippt.gov.pl/index.php/aa/article/view/565/496>

- [14] Practical Issues for Effective Aerial Patrols of Overhead Lines. *INMR Transmission and Distribution Magazine* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://www.inmr.com/practical-issues-effective-aerial-patrols-overhead-lines-2>
- [15] Ultraviolet (UV) Corona Detection Services offered through Infrared Predictive Surveys, Inc. Infrared Predictive Surveys Incorporated [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.infraredpsi.com/uvinspect.php>
- [16] *IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7882595>
- [17] MARTÍNEK, Petr. *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Plzeň, 2005. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

## Seznam obrázků

Obr. 1_Kladná koróna [8].....	26
Obr. 2_Záporná koróna [8].....	27
Obr. 3_Zařízení k detekci zvukových projevů koróny [12] .....	31
Obr. 4_Zapojení zkušebního obvodu pro měření částečných výbojů .....	32
Obr. 5_Blokové schéma detekce vysokofrekvenčního rušení.....	34
Obr. 6_Porovnání rozdílných hodnot měřeného signálu .....	35
Obr. 7_Celkový pohled na model jednoduchého vodiče 1,6 mm .....	36
Obr. 8_Záznam z detektoru ČV (čtyřsvazek při napětí 21,6 kV).....	38
Obr. 9_Barevné rozlišení četnosti výbojů .....	39
Obr. 10_Počítač s řídicím softwarem a přijímačem signálů.....	40
Obr. 11_Realizace měření v laboratoři VN.....	41
Obr. 12_Frekvenční spektrum pozadí při napětí 5 kV (9 kHz – 30 MHz).....	42
Obr. 13_Frekvenční spektrum pozadí při napětí 5 kV (30 MHz – 1 GHz).....	42
Obr. 14_Porovnání peakového a quasi-peakového detektoru (9 kHz – 30 MHz).....	43
Obr. 15_Porovnání peakového a quasi-peakového detektoru (30 MHz - 1 GHz) .....	43
Obr. 16_Porovnání svazkových vodičů (9 kHz – 30 MHz) .....	44
Obr. 17_Porovnání svazkových vodičů (30 MHz - 1 GHz).....	44
Obr. 18_Frekvenční spektrum pozadí s vodiči (9 kHz - 30 MHz).....	45
Obr. 19_Frekvenční spektrum pozadí s vodiči (30 MHz - 1 GHz).....	45
Obr. 20_Navýšení napětí nad $U_0$ , jednoduchý vodič 0,4 mm (9 kHz - 30 MHz) .....	46
Obr. 21_Navýšení napětí nad $U_0$ , jednoduchý vodič 0,4 mm (30 MHz - 1 GHz).....	46
Obr. 22_Měření na vedení 400 kV .....	47
Obr. 23_Porovnání venkovního vedení s modelem trojsvazku (9 kHz - 30 MHz).....	48
Obr. 24_Porovnání venkovního vedení s modelem trojsvazku (30 MHz - 1 GHz).....	48

## Přílohy

Obr. 25_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,6 kV.....	6
Obr. 26_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 15,4 kV.....	6
Obr. 27_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,5 kV.....	7
Obr. 28_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,7 kV.....	7
Obr. 29_Dvousvazek 15,2 kV .....	8
Obr. 30_Dvousvazek 20,3 kV .....	8
Obr. 31_Trojsvazek 18,9 kV .....	9
Obr. 32_Trojsvazek 23,9 kV .....	9
Obr. 33_Čtyřsvazek 21,6 kV .....	10
Obr. 34_Čtyřsvazek 26,8 kV .....	10
Obr. 35_Šestisvazek 27,7 kV .....	11
Obr. 36_Šestisvazek 32,9 kV .....	11
Obr. 37_Pozadí při 5 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	12
Obr. 38_Pozadí při 5 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	12
Obr. 39_Pozadí při 5 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	13
Obr. 40_Pozadí při 5 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	13
Obr. 41_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	14
Obr. 42_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	14
Obr. 43_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz).....	14

Obr. 44	Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	15
Obr. 45	Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	15
Obr. 46	Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	16
Obr. 47	Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	16
Obr. 48	Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	16
Obr. 49	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	17
Obr. 50	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	17
Obr. 51	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	17
Obr. 52	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	18
Obr. 53	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	18
Obr. 54	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	19
Obr. 55	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	19
Obr. 56	Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	19
Obr. 57	Dvousvazek; 15,2 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	20
Obr. 58	Dvousvazek; 15,2 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	20
Obr. 59	Dvousvazek; 15,2 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	20
Obr. 60	Dvousvazek; 15,2 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	21
Obr. 61	Dvousvazek; 20,4 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	21
Obr. 62	Dvousvazek; 20,4 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	22
Obr. 63	Dvousvazek; 20,4 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	22
Obr. 64	Dvousvazek; 20,4 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	22
Obr. 65	Trojsvazek; 19,1 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	23
Obr. 66	Trojsvazek; 19,1 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	23
Obr. 67	Trojsvazek; 19,1 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	23
Obr. 68	Trojsvazek; 19,1 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	24
Obr. 69	Trojsvazek; 24,9 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	24
Obr. 70	Trojsvazek; 24,9 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	25
Obr. 71	Trojsvazek; 24,9 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	25
Obr. 72	Trojsvazek; 24,9 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	25
Obr. 73	Čtyřsvazek; 22,1 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	26
Obr. 74	Čtyřsvazek; 22,1 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	26
Obr. 75	Čtyřsvazek; 22,1 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	26
Obr. 76	Čtyřsvazek; 22,1 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	27
Obr. 77	Čtyřsvazek; 27,2 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	27
Obr. 78	Čtyřsvazek; 27,2 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	28
Obr. 79	Čtyřsvazek; 27,2 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	28
Obr. 80	Čtyřsvazek; 27,2 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	28
Obr. 81	Šestisvazek; 27,8 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	29
Obr. 82	Šestisvazek; 27,8 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	29
Obr. 83	Šestisvazek; 27,8 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	29
Obr. 84	Šestisvazek; 27,8 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	30
Obr. 85	Šestisvazek; 32,3 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	30
Obr. 86	Šestisvazek; 32,3 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	31
Obr. 87	Šestisvazek; 32,3 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)	31
Obr. 88	Šestisvazek; 32,3 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)	31
Obr. 89	Peakový a Quasi-Peakový detektor; 10,8 kV (9 kHz - 30 MHz)	32
Obr. 90	Peakový a Quasi-Peakový detektor; 10,8 kV (30 MHz - 1 GHz)	32
Obr. 91	Srovnání svazkových vodičů; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)	32
Obr. 92	Srovnání svazkových vodičů; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)	33
Obr. 93	Srovnání svazkových vodičů; Peak (9 kHz - 30 MHz)	33

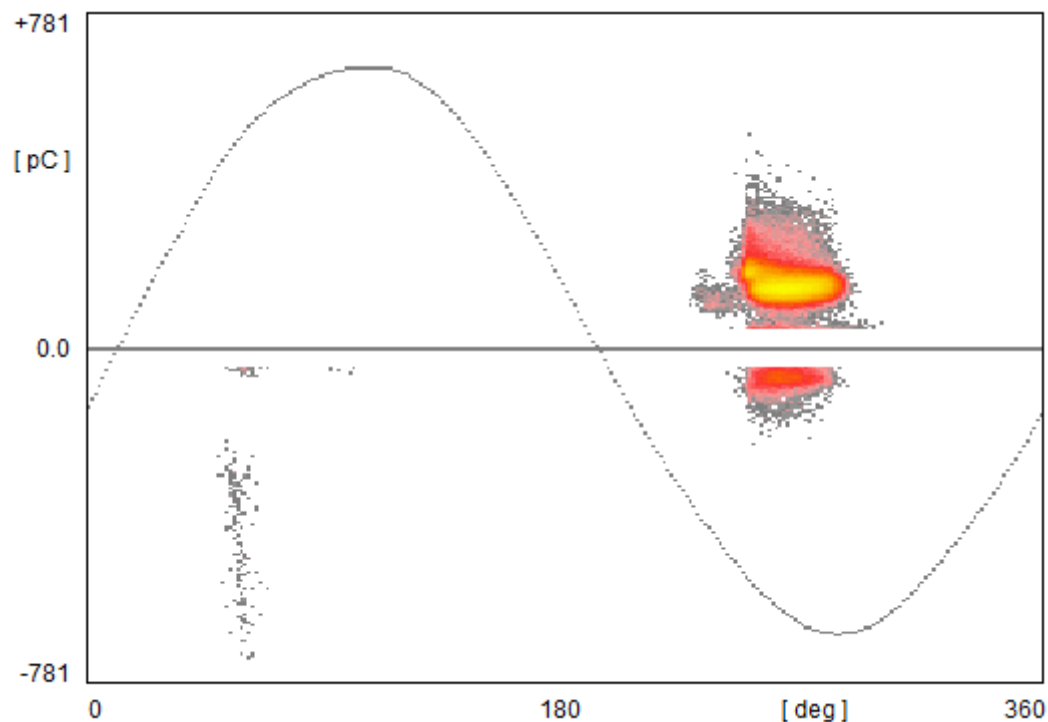
Obr. 94_Srovnání svazkových vodičů; Peak (30 MHz – 1 GHz) .....	33
Obr. 95_Pozadí a šestisvazek .....	34
Obr. 96_Pozadí s vodiči; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	34
Obr. 97_Pozadí s vodiči; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	34
Obr. 98_Pozadí s vodiči; Peak (9 kHz - 30 MHz).....	35
Obr. 99_Pozadí s vodiči; Peak (30 MHz - 1 GHz).....	35
Obr. 100_Navýšení napětí nad $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz).....	35
Obr. 101_Navýšení napětí nad $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	36
Obr. 102_Navýšení napětí nad $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Peak (9 kHz - 30 MHz) ...	36
Obr. 103_Navýšení napětí nad $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Peak (30 MHz - 1 GHz)...	36
Obr. 104_Navýšení napětí nad $U_0$ ; dvousvazkový vodič; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz) .	37
Obr. 105_Navýšení napětí nad $U_0$ ; dvousvazkový vodič; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz).	37
Obr. 106_Navýšení napětí nad $U_0$ ; dvousvazkový vodič; Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	37
Obr. 107_Navýšení napětí nad $U_0$ ; dvousvazkový vodič; Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	38
Obr. 108_Paralelně nastavená smyčková anténa; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	38
Obr. 109_Horizontální polarizace antén; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	39
Obr. 110_Paralelně nastavená smyčková anténa; Peak (9 kHz - 30 MHz).....	39
Obr. 111_Horizontální polarizace antén; Peak (30 MHz - 1 GHz).....	39
Obr. 112_Kolmo nastavená smyčková anténa; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz).....	40
Obr. 113_Vertikální polarizace antén; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	40
Obr. 114_Kolmo nastavená smyčková anténa; Peak (9 kHz - 30 MHz).....	40
Obr. 115_Vertikální polarizace antén; Peak (30 MHz - 1 GHz).....	41
Obr. 116_Venkovní vedení a model trojsvazku; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz).....	41
Obr. 117_Venkovní vedení a model trojsvazku; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz).....	42
Obr. 118_Venkovní vedení a model trojsvazku; Peak (9 kHz - 30 MHz) .....	42
Obr. 119_Venkovní vedení a model trojsvazku; Peak (30 MHz - 1 GHz) .....	42



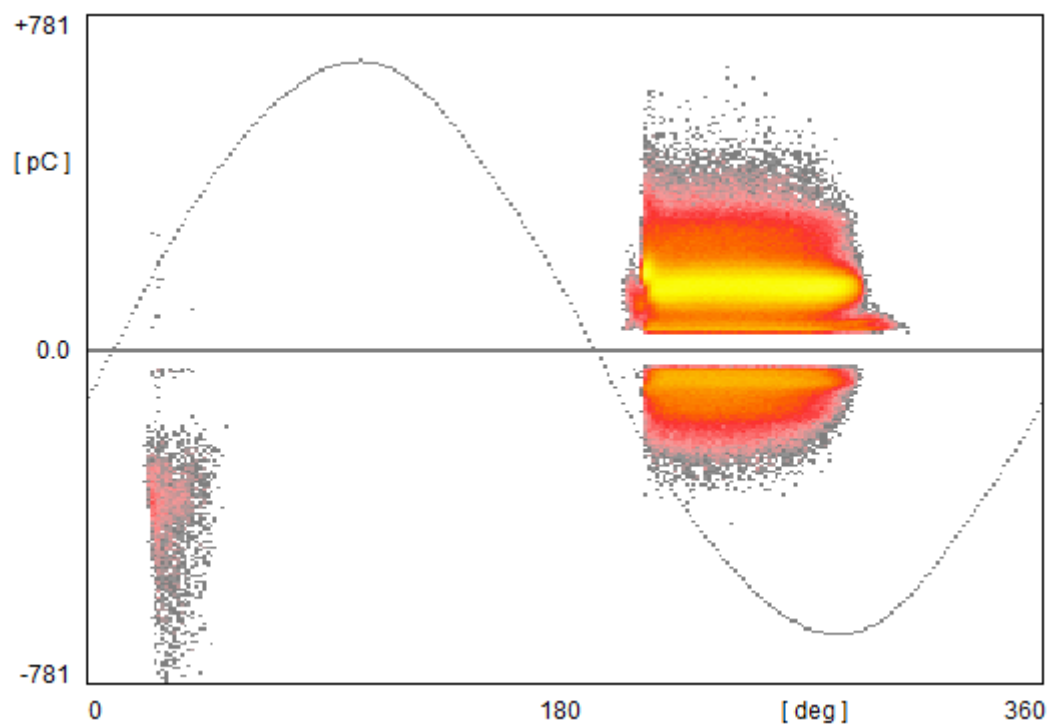
## 7 Přílohy

### 7.1 Záznamy z detektoru částečných výbojů

#### 7.1.1 Jednoduchý vodič 0,4 mm

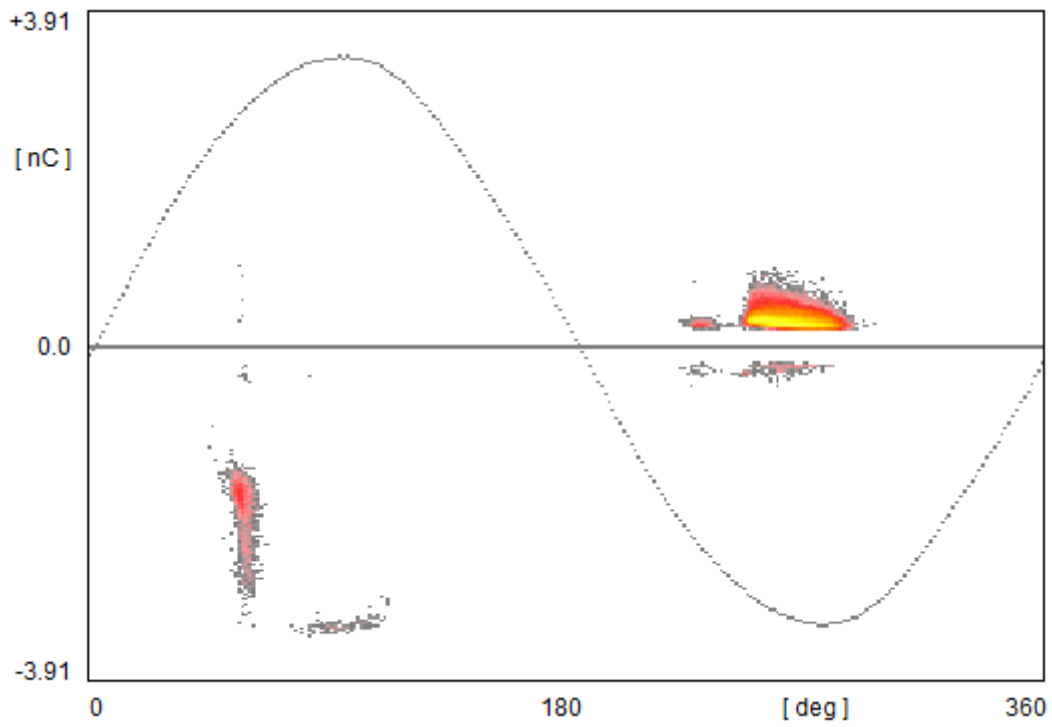


Obr. 25\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,6 kV

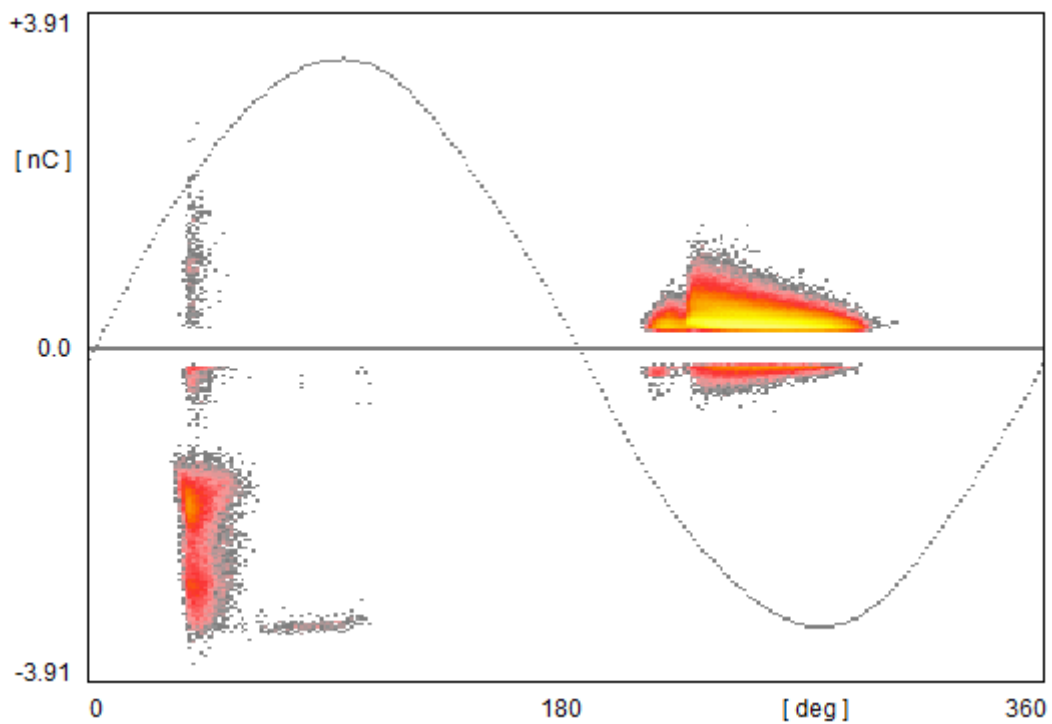


Obr. 26\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 15,4 kV

### 7.1.2 Jednoduchý vodič 1,6 mm

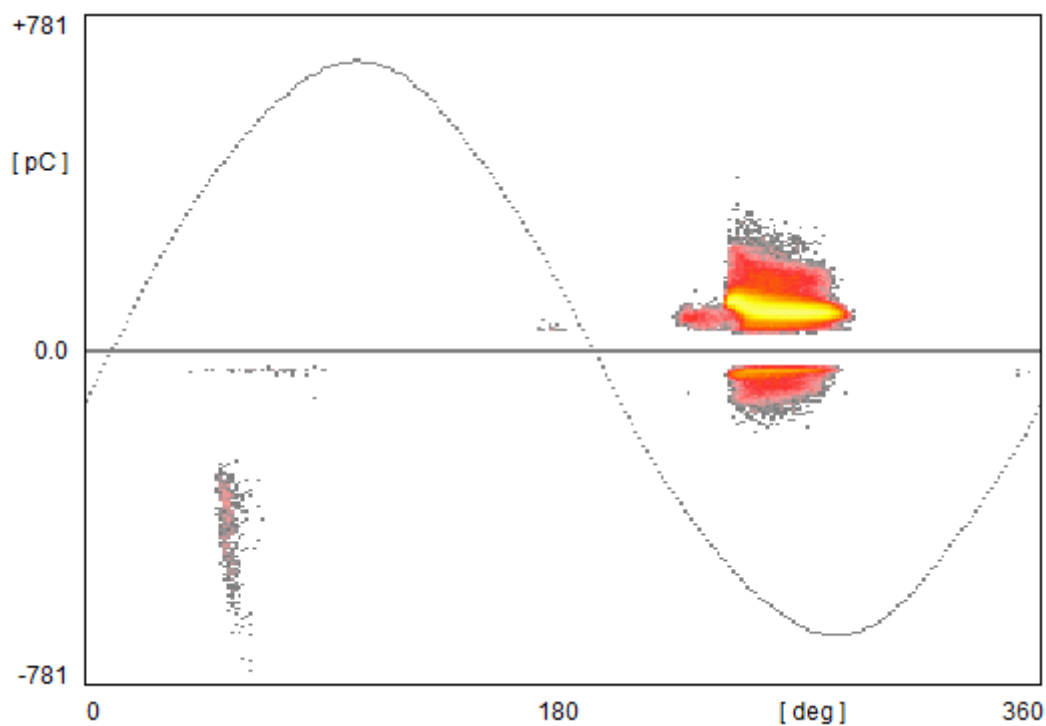


Obr. 27\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,5 kV

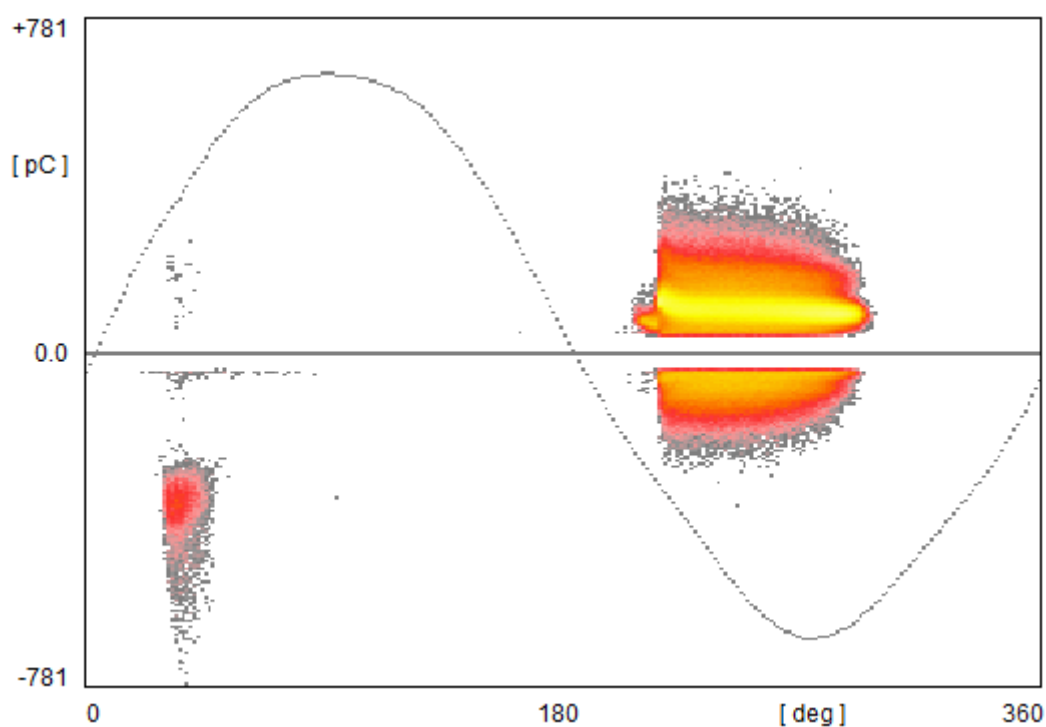


Obr. 28\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,7 kV

### 7.1.3 Dvousvazkový vodič

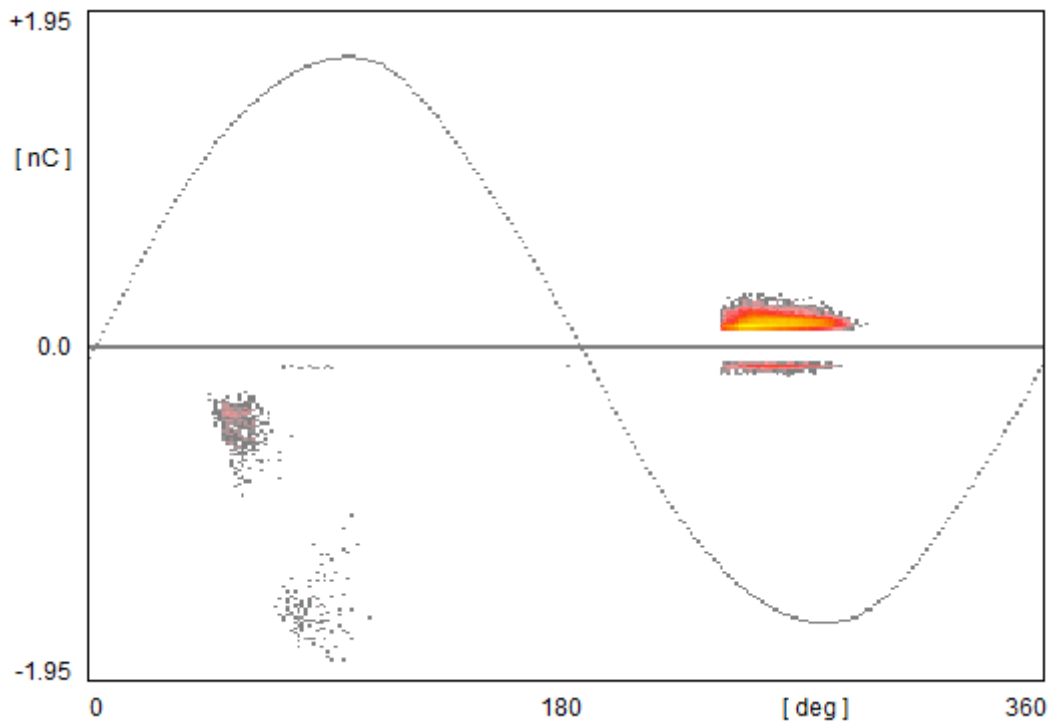


Obr. 29\_Dvousvazek 15,2 kV

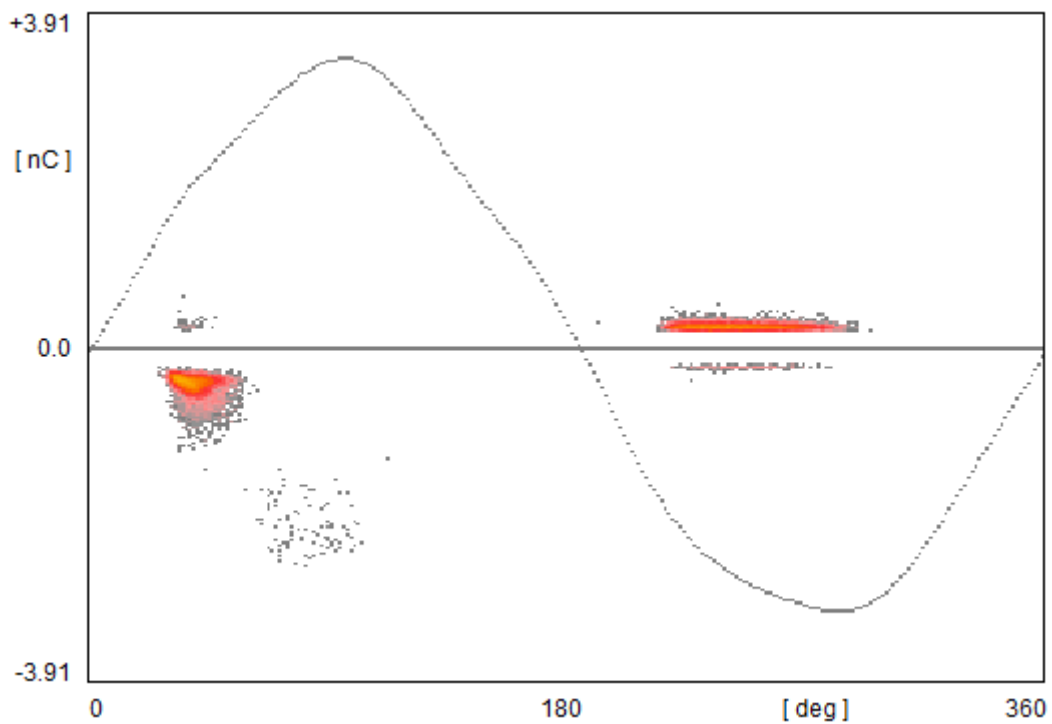


Obr. 30\_Dvousvazek 20,3 kV

### 7.1.4 Trojsvazkový vodič

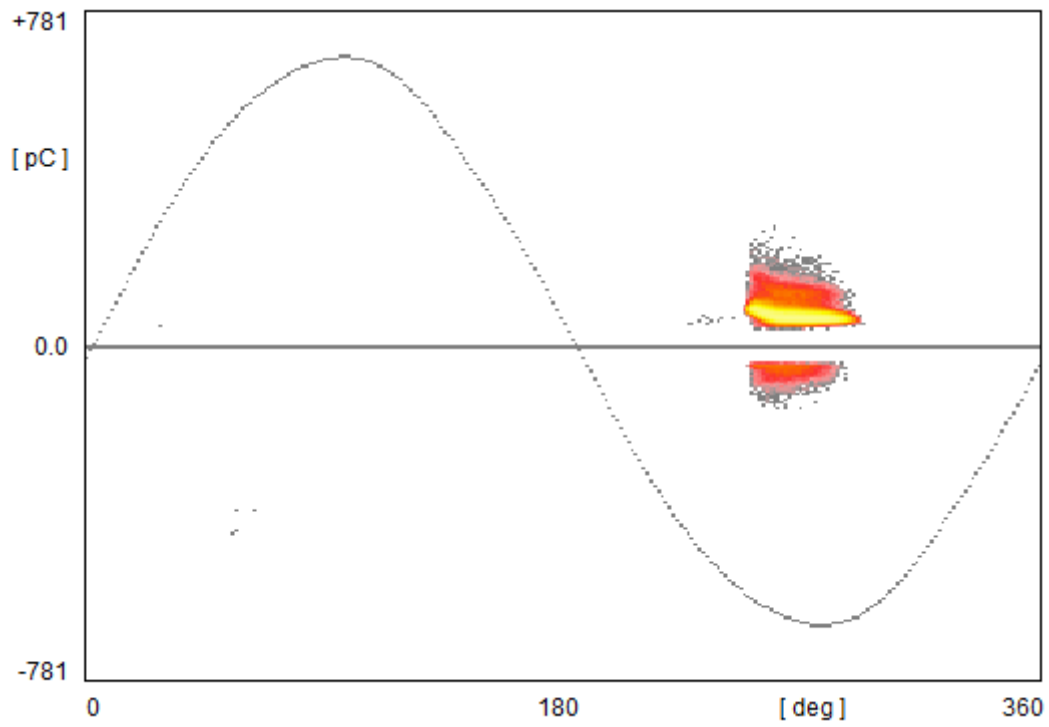


Obr. 31\_Trojsvazek 18,9 kV

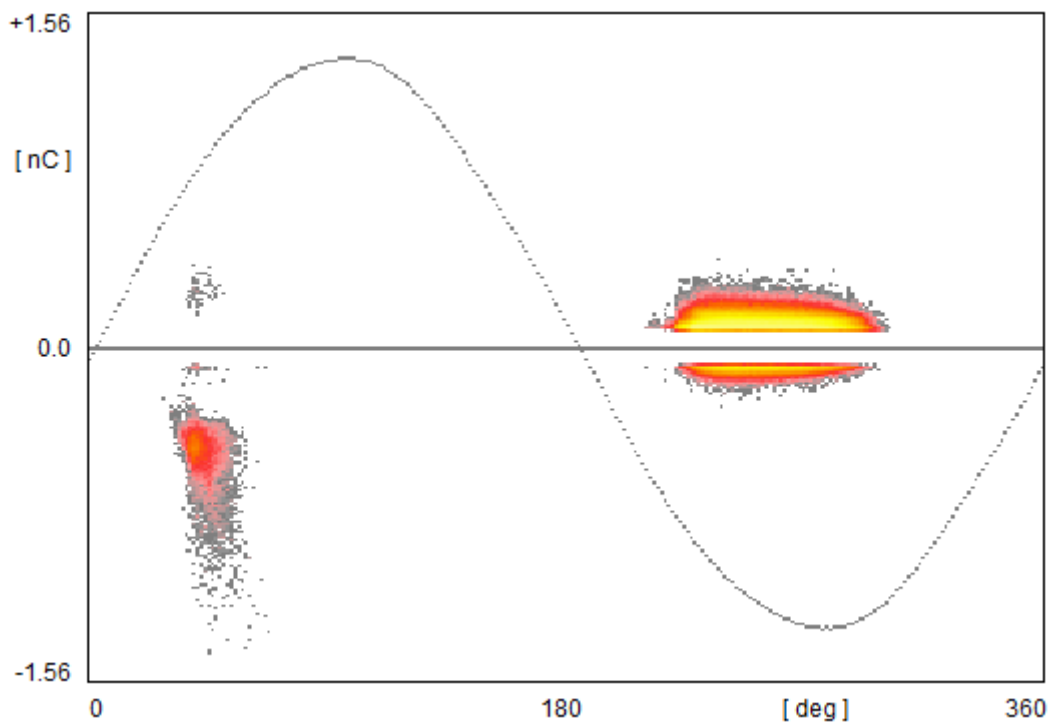


Obr. 32\_Trojsvazek 23,9 kV

### 7.1.5 Čtyřsvazkový vodič

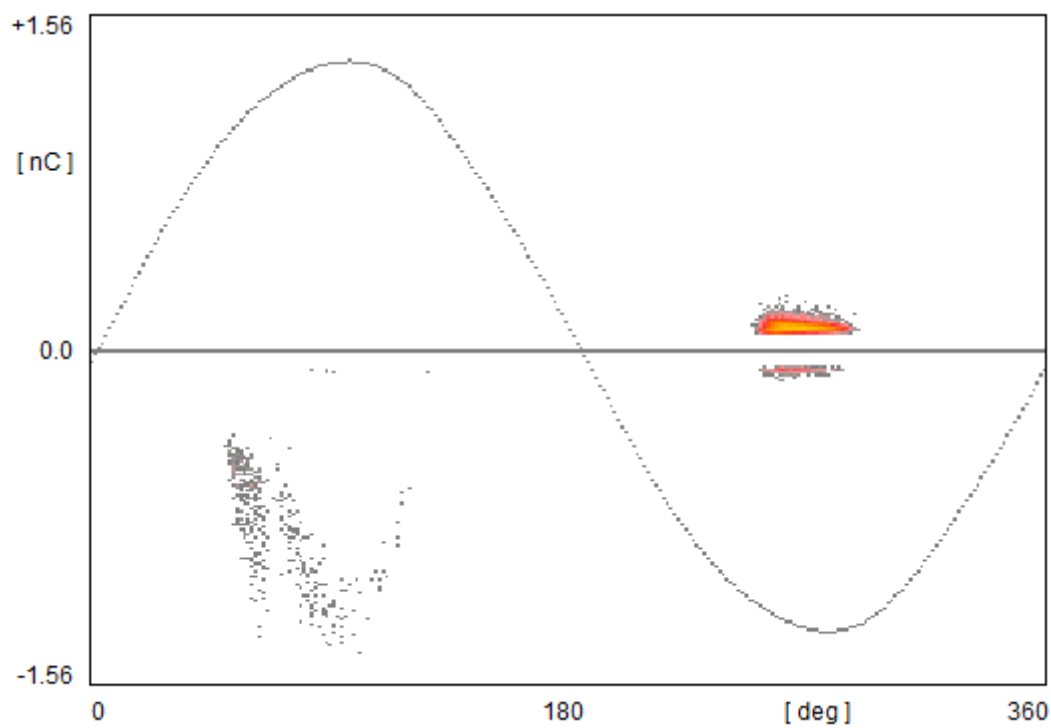


Obr. 33\_Čtyřsvazek 21,6 kV

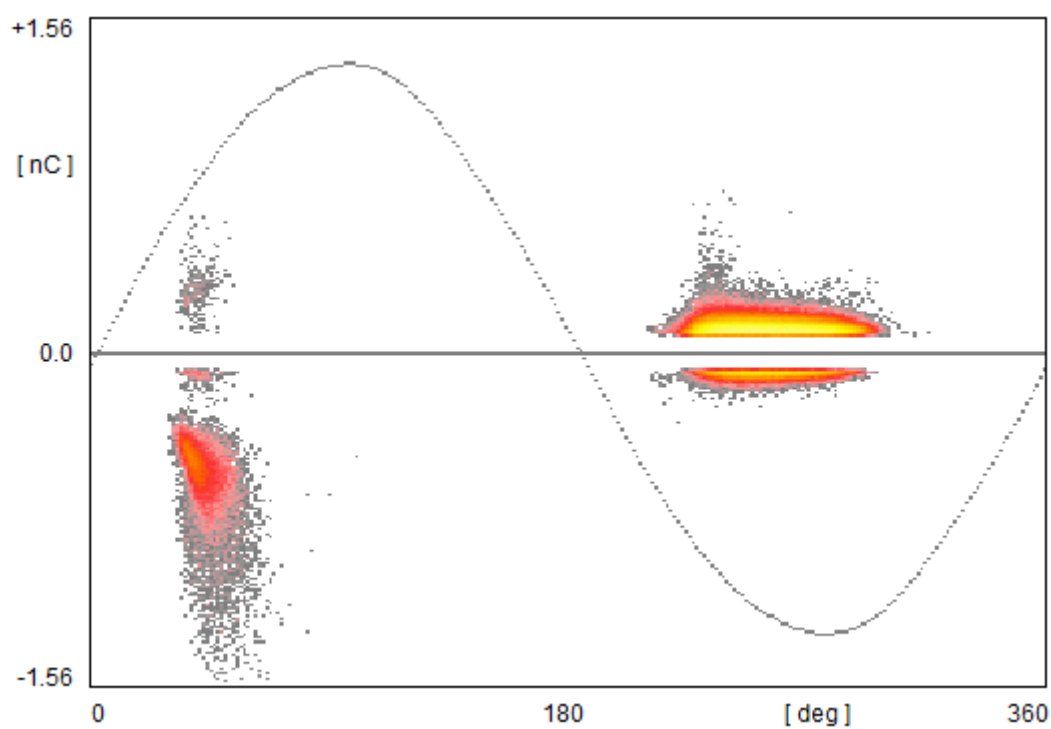


Obr. 34\_Čtyřsvazek 26,8 kV

### 7.1.6 Šestisvazkový vodič



Obr. 35\_Šestisvazek 27,7 kV

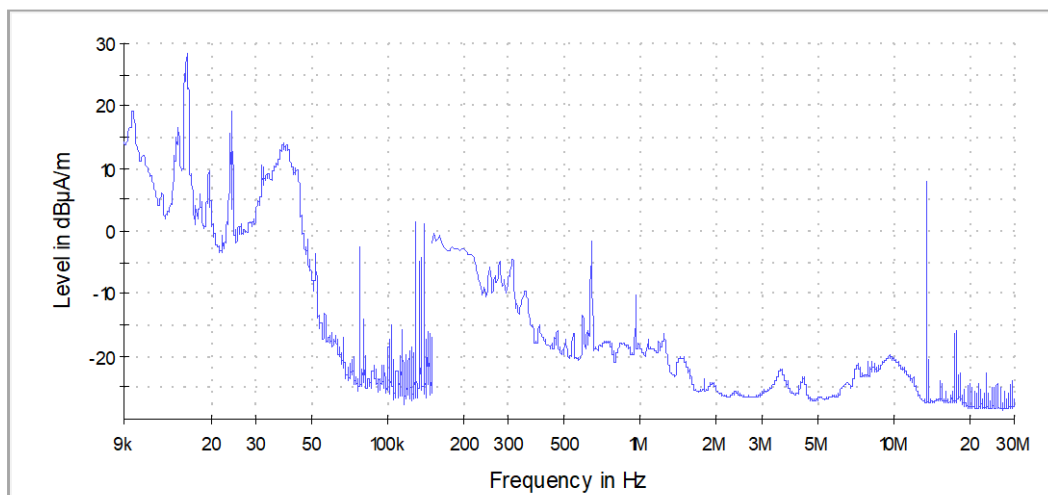


Obr. 36\_Šestisvazek 32,9 kV

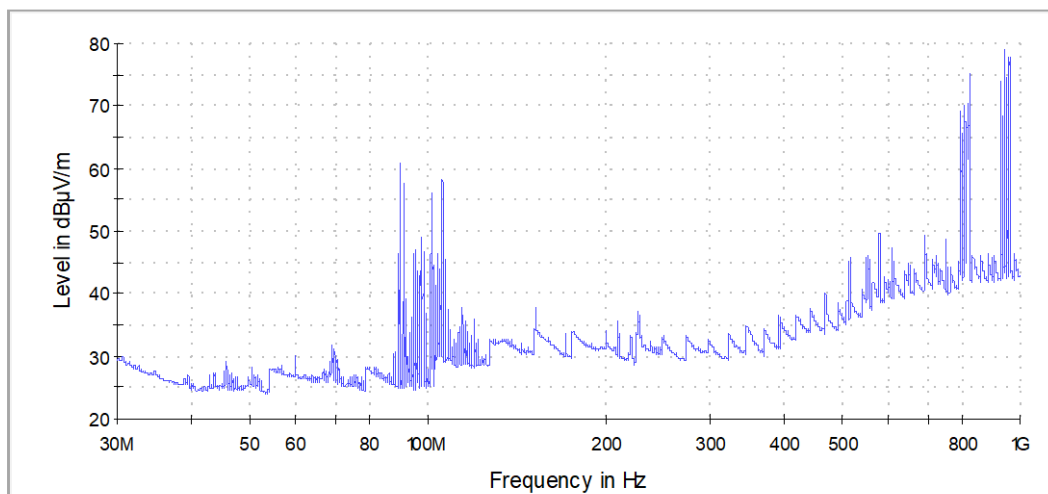
## 7.2 Naměřené VF charakteristiky korónových výbojů v laboratoři

Měření bylo provedeno pro Peakový a Quasi-Peakový detektor a také pro dvě hodnoty napětí na všech modelech vedení. Poté bylo prováděno srovnávání jednotlivých vysokofrekvenčních charakteristik.

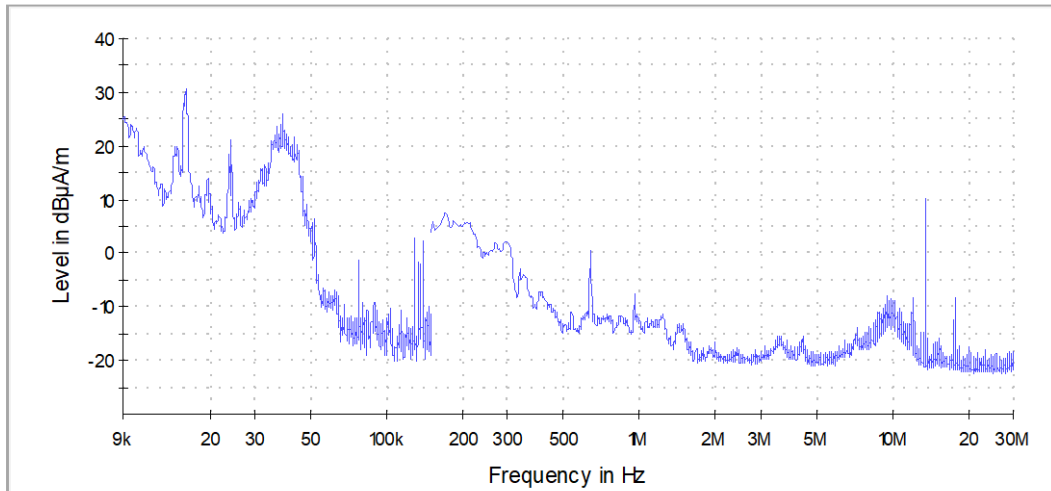
### 7.2.1 Pozadí v laboratoři



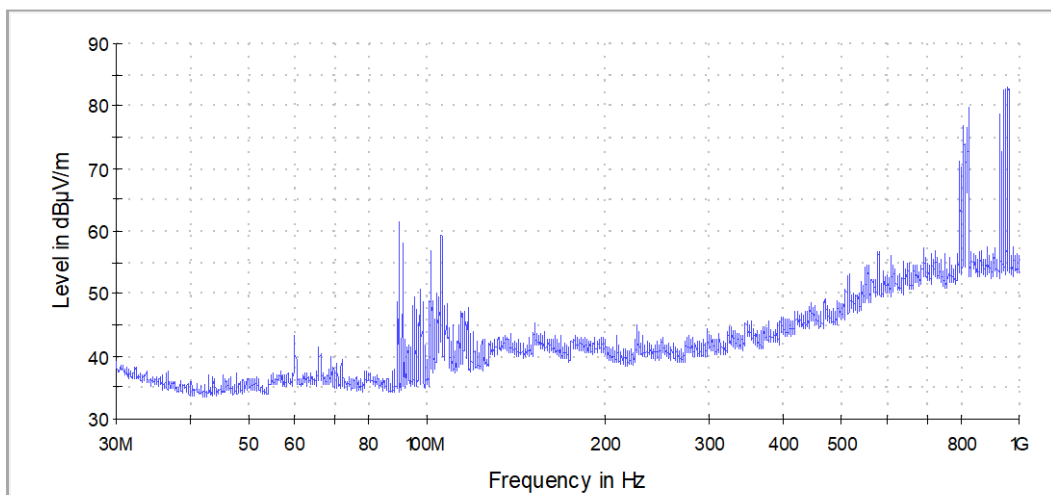
Obr. 37\_Pozadí při 5 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 38\_Pozadí při 5 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)



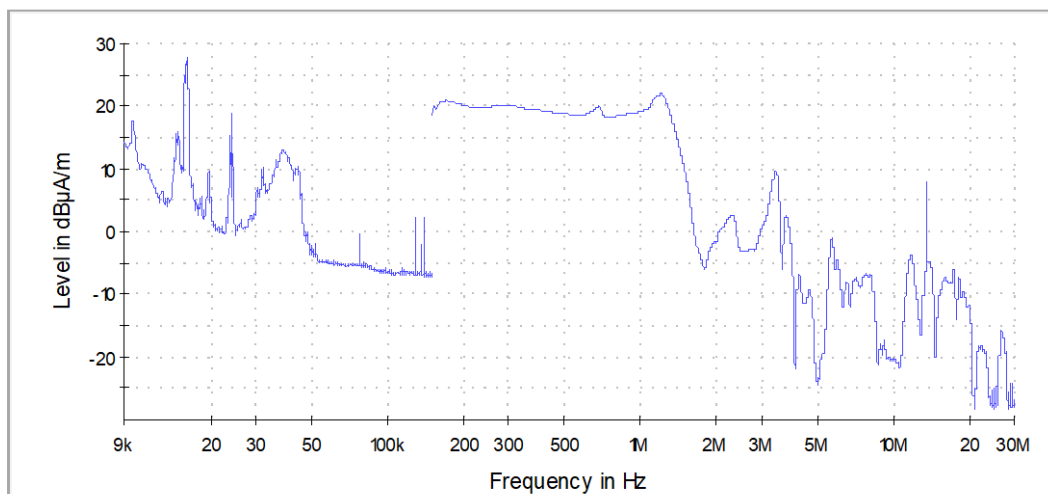
**Obr. 39\_Pozadí při 5 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)**



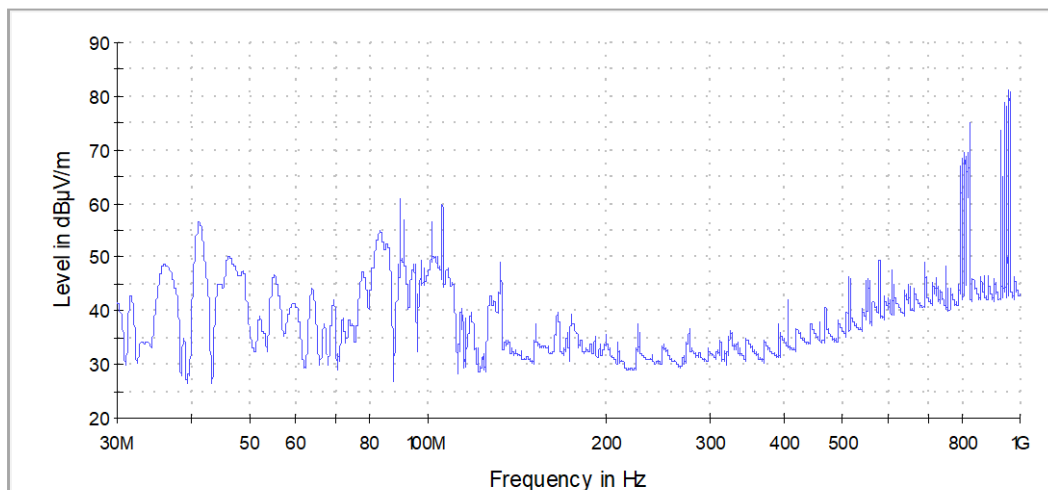
**Obr. 40\_Pozadí při 5 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)**



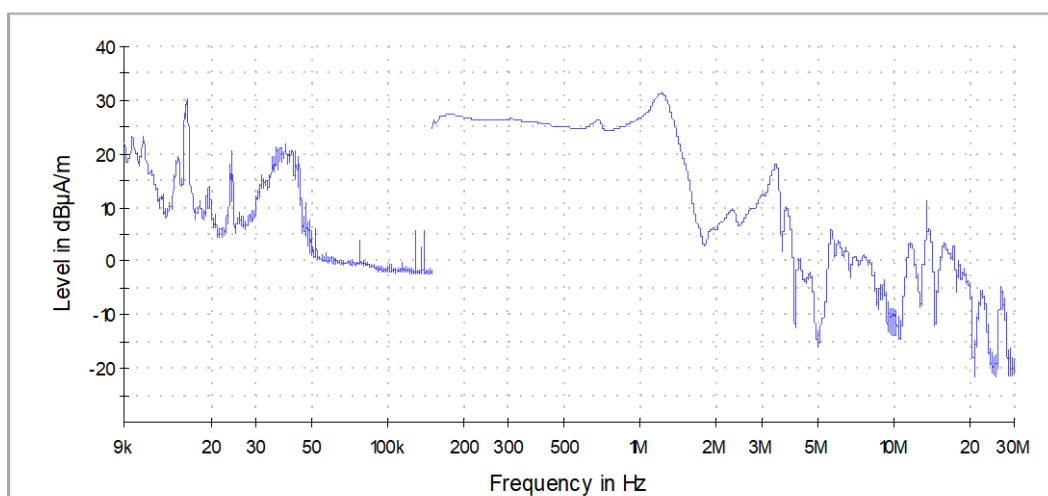
## 7.2.2 Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV



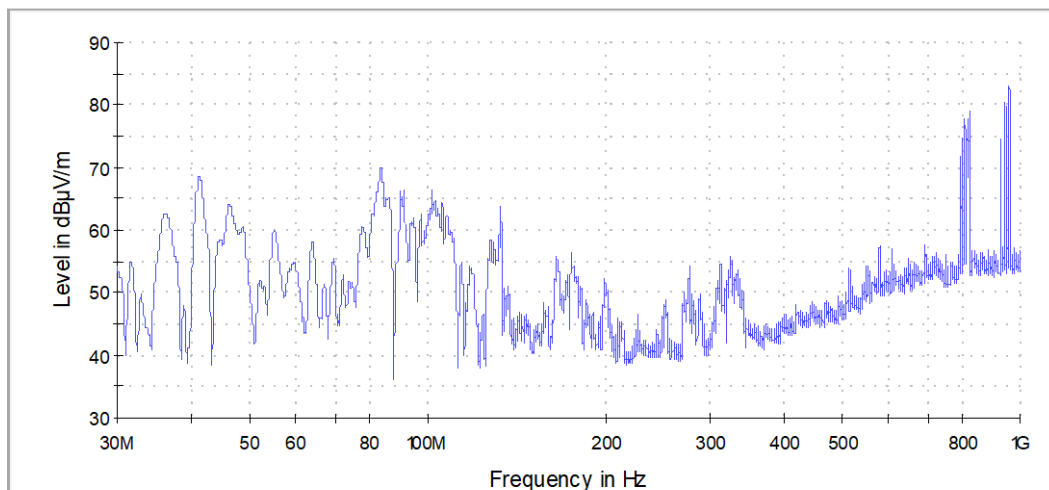
Obr. 41\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 42\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

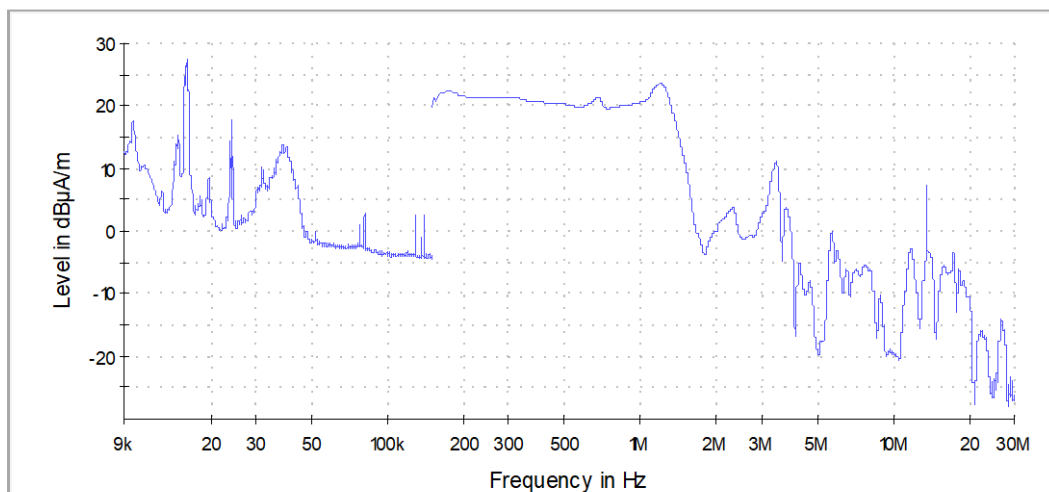


Obr. 43\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)

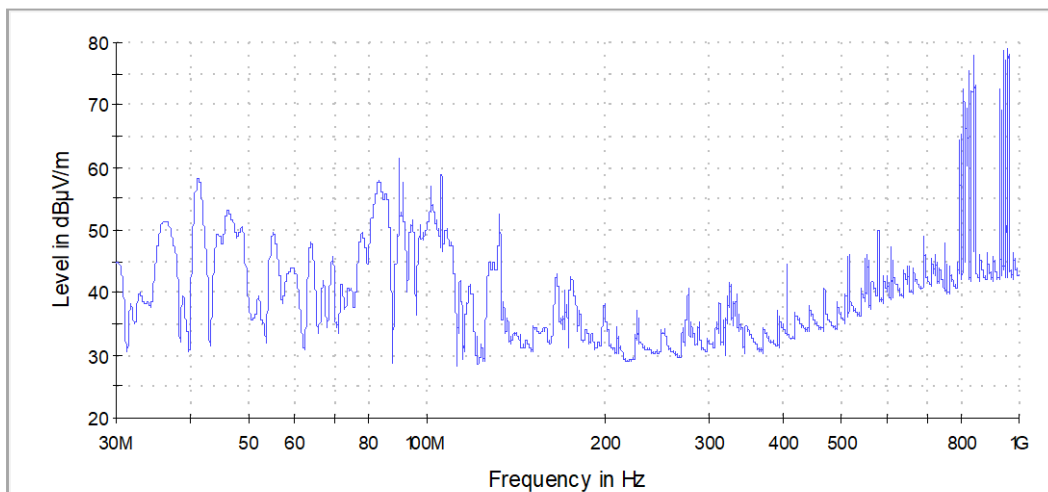


Obr. 44\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 10,8 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

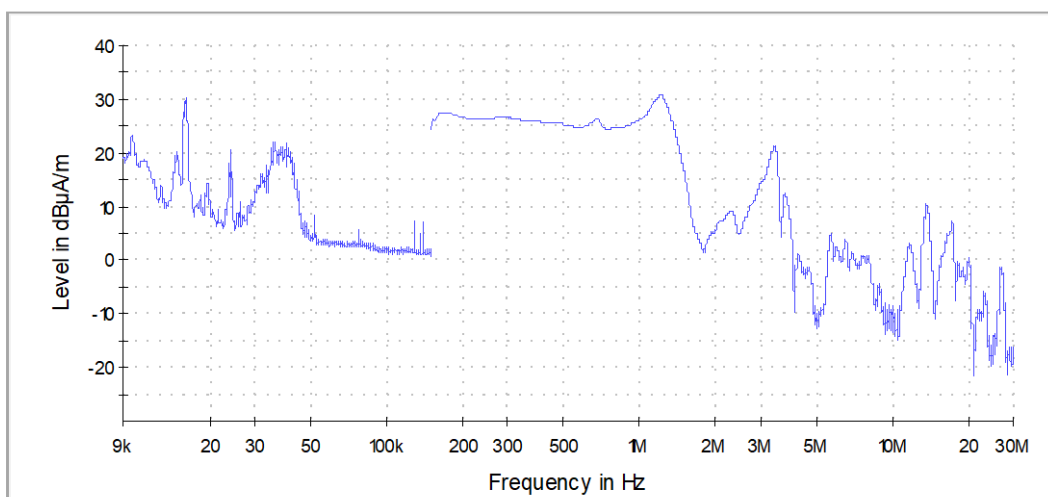
### 7.2.3 Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV



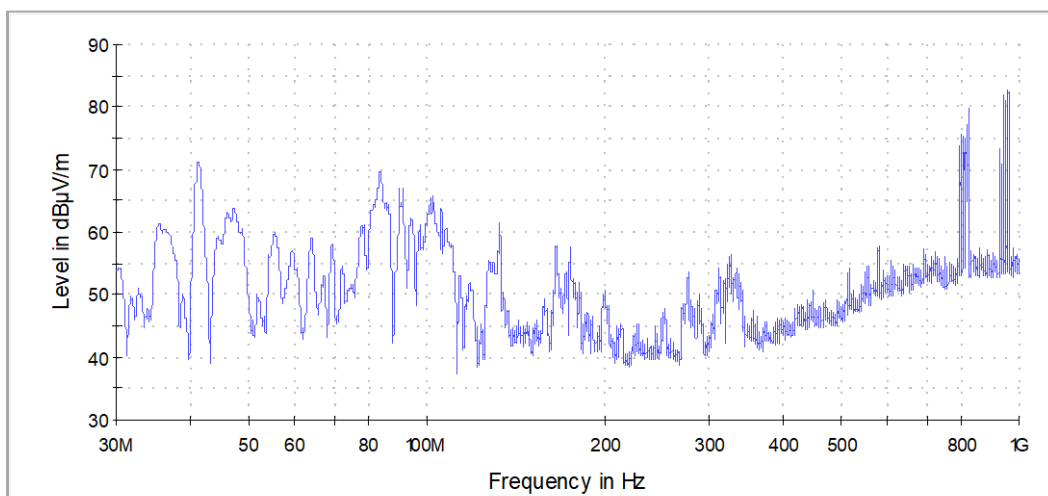
Obr. 45\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



**Obr. 46\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**

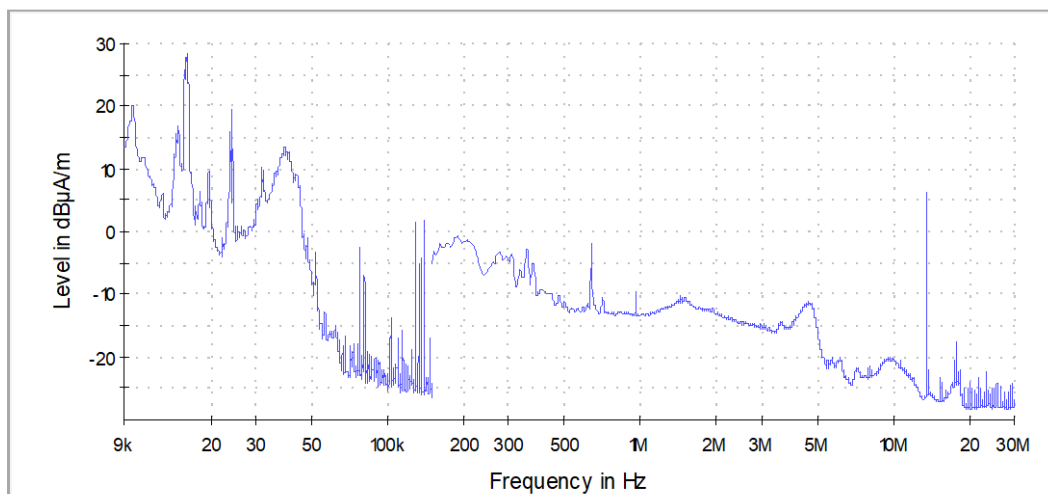


**Obr. 47\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)**

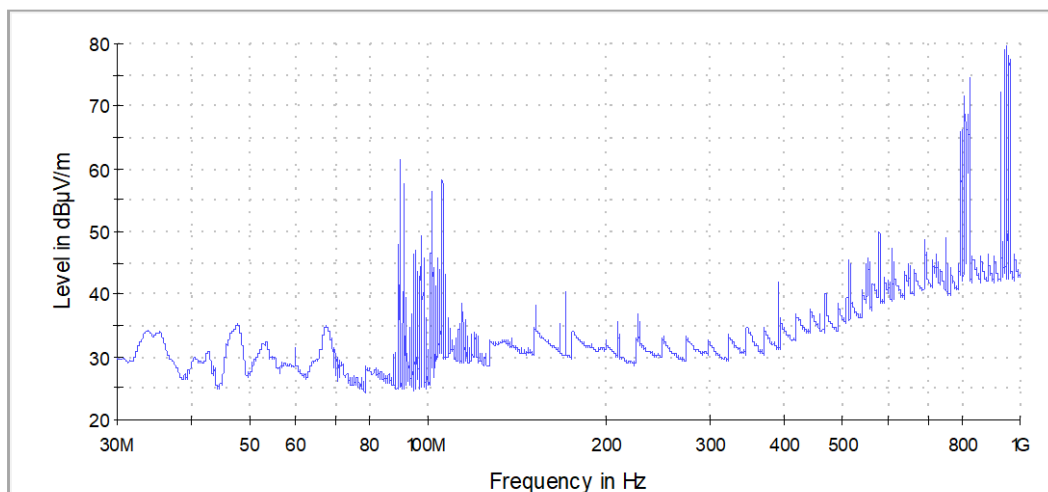


**Obr. 48\_Jednoduchý vodič 0,4 mm; 16,3 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)**

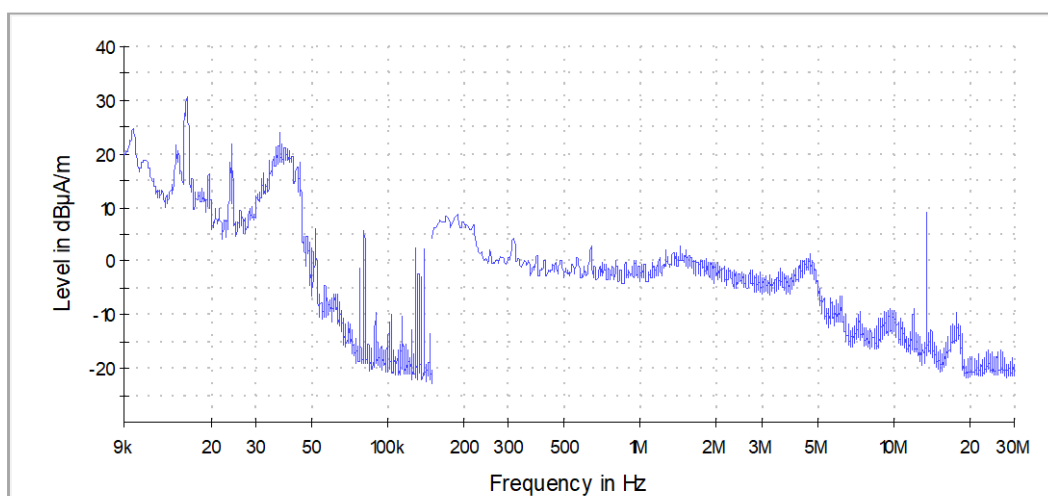
## 7.2.4 Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV



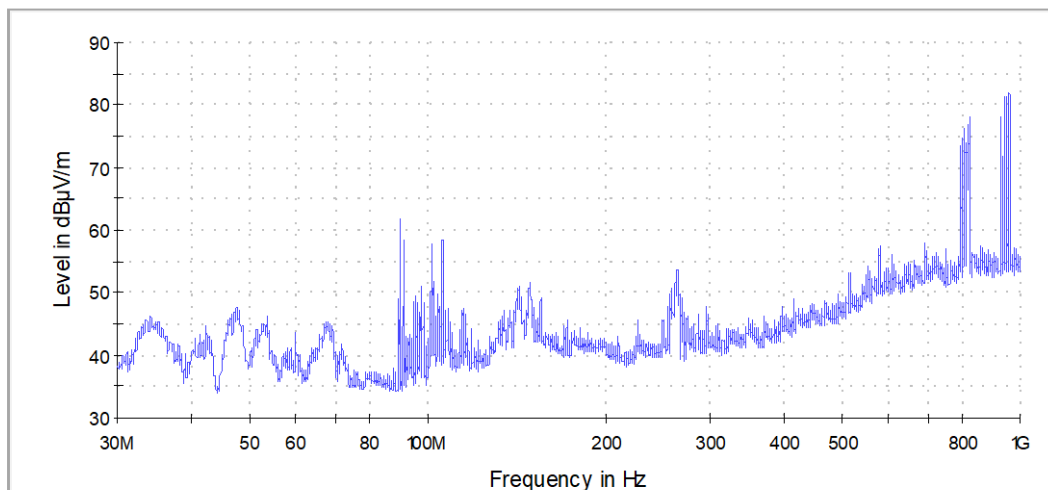
Obr. 49\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 50\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

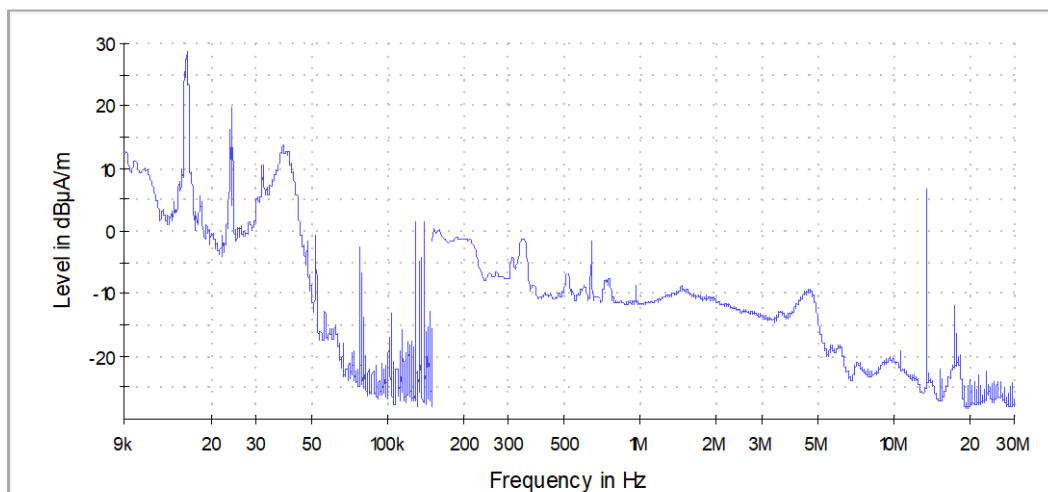


Obr. 51\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)

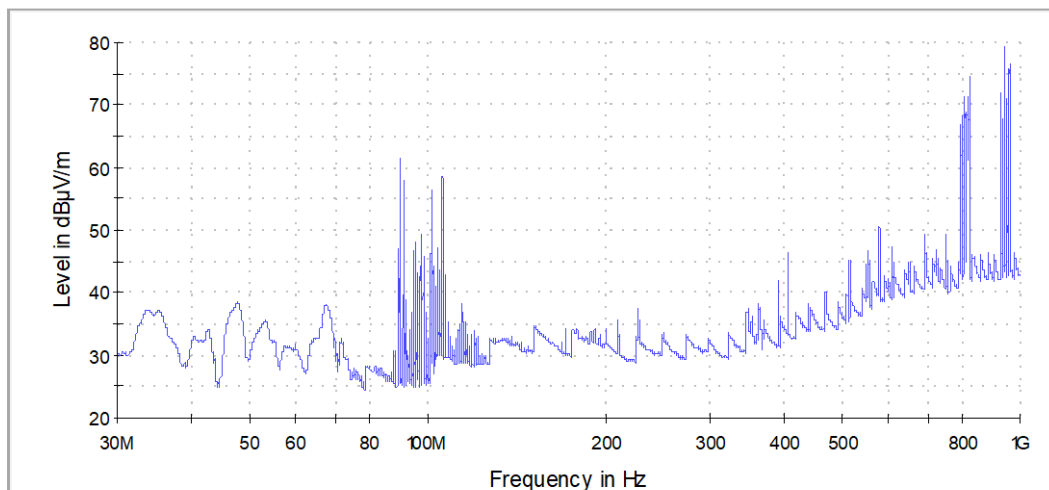


Obr. 52\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 21,3 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

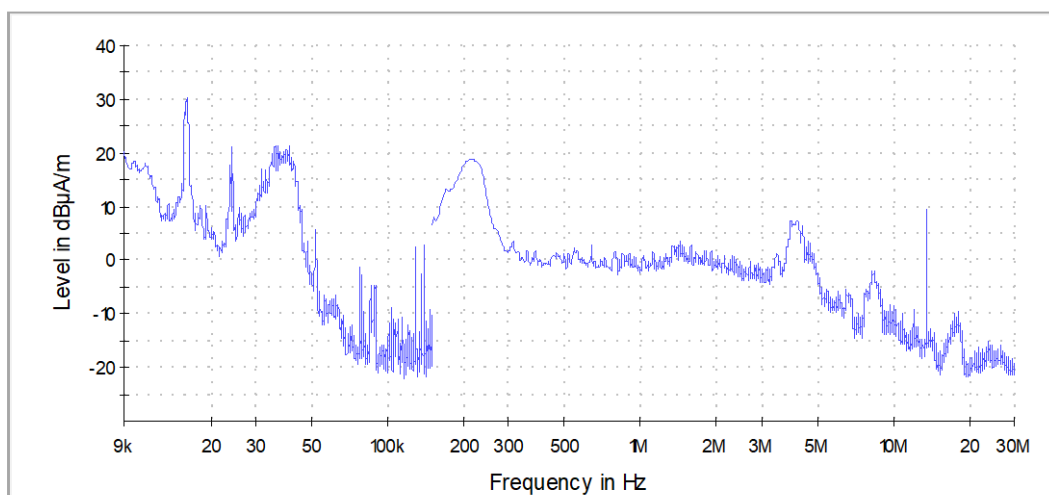
### 7.2.5 Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV



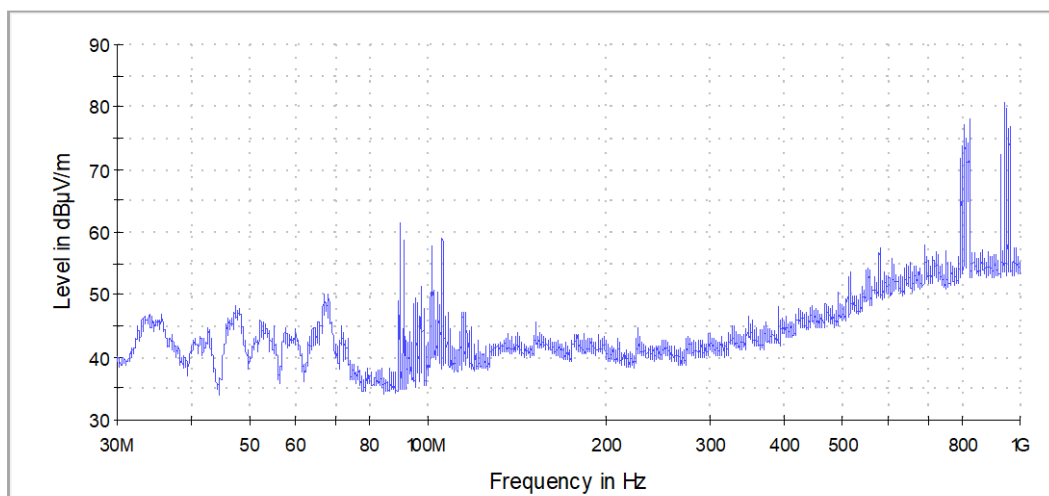
Obr. 53\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



**Obr. 54\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**

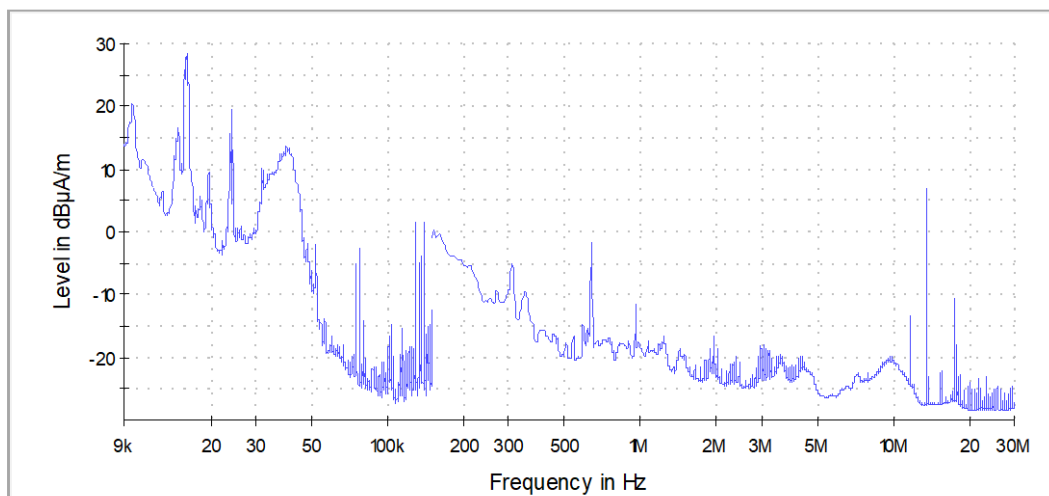


**Obr. 55\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)**

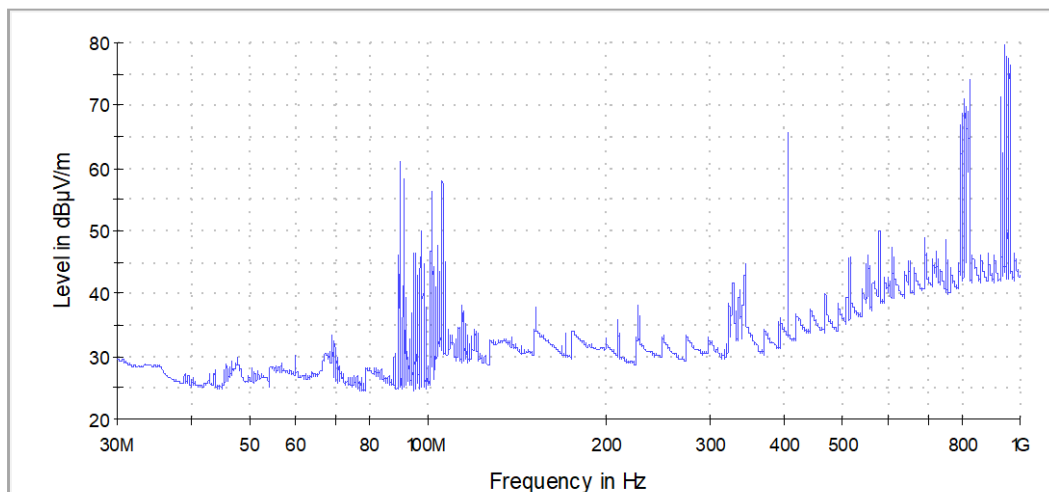


**Obr. 56\_Jednoduchý vodič 1,6 mm; 26,5 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)**

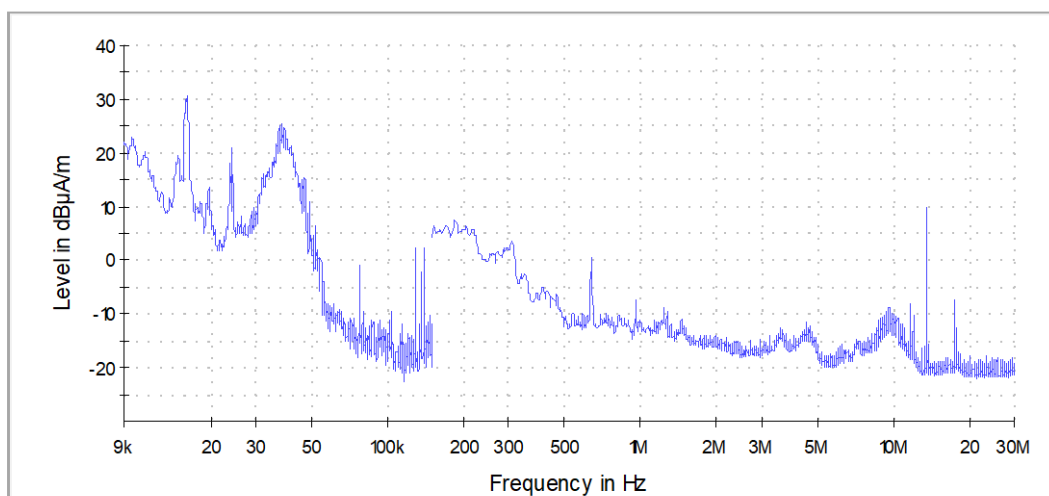
### 7.2.6 Dvousvazkový vodič; 15,2 kV



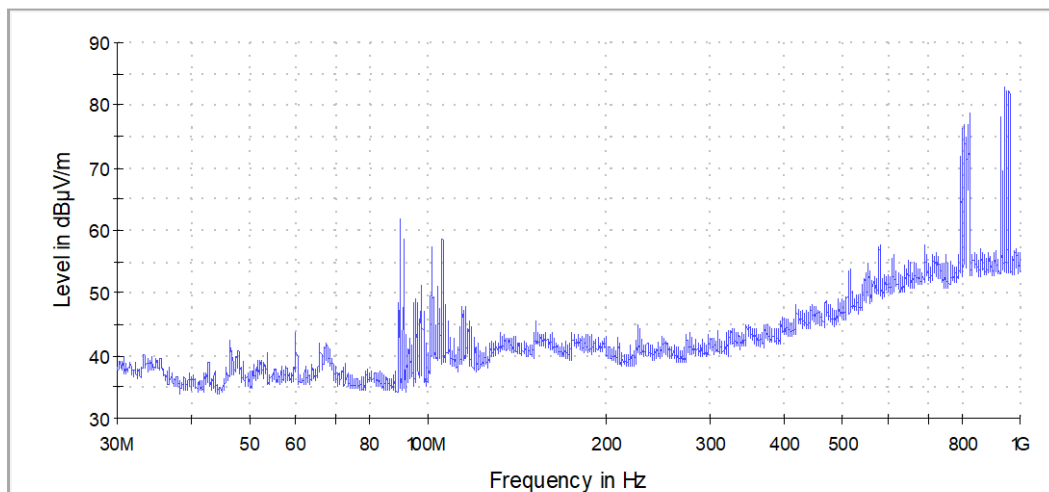
Obr. 57\_Dvousvazek; 15,2 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 58\_Dvousvazek; 15,2 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

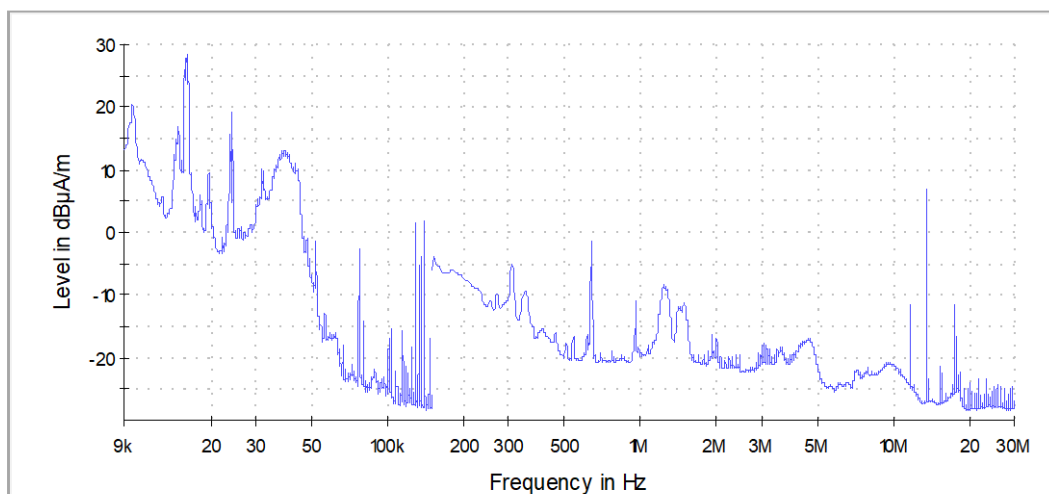


Obr. 59\_Dvousvazek; 15,2 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)



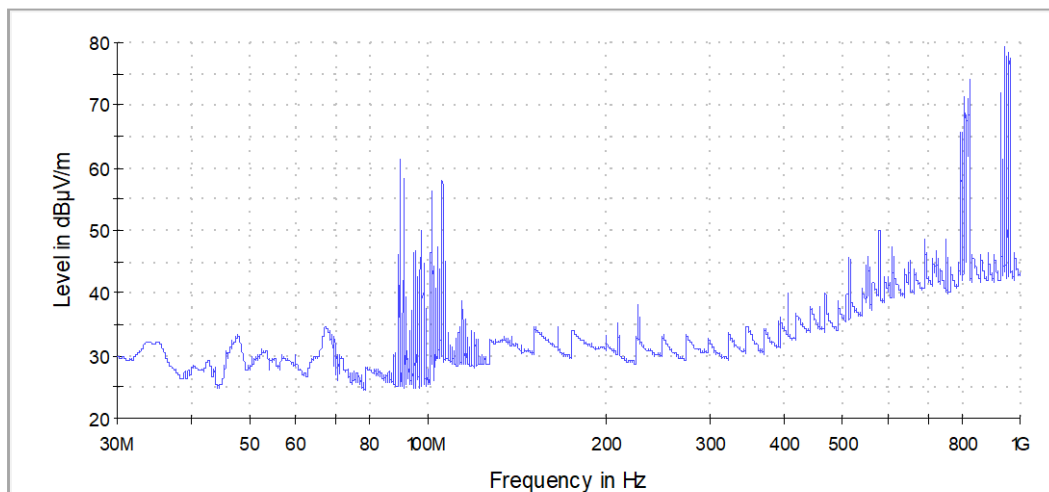
Obr. 60\_Dvousvazek; 15,2 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

### 7.2.7 Dvousvazkový vodič; 20,4 kV

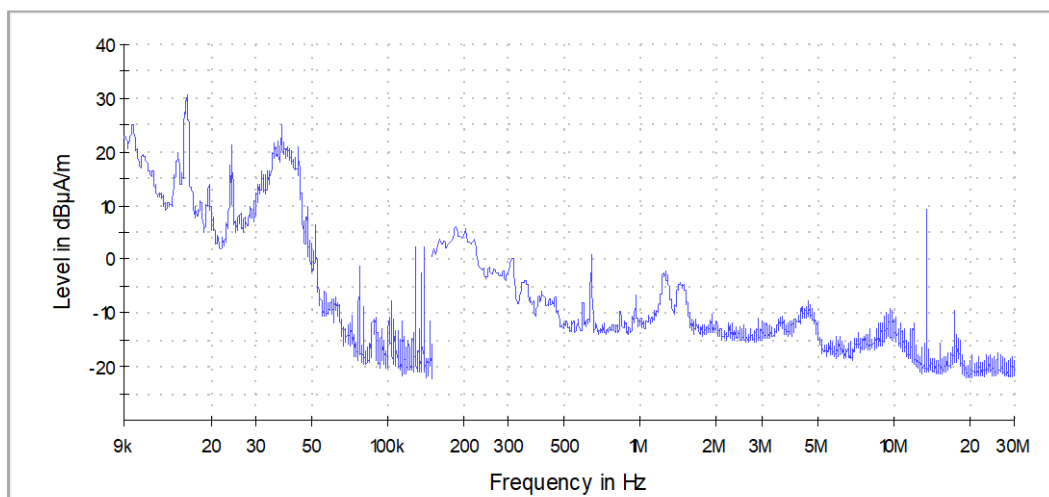


Obr. 61\_Dvousvazek; 20,4 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)

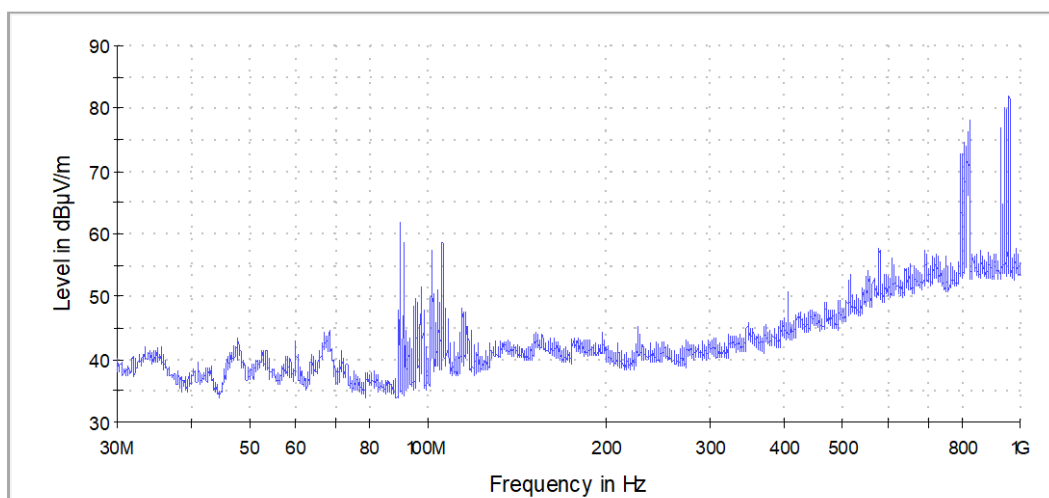




**Obr. 62\_Dvousvazek; 20,4 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**

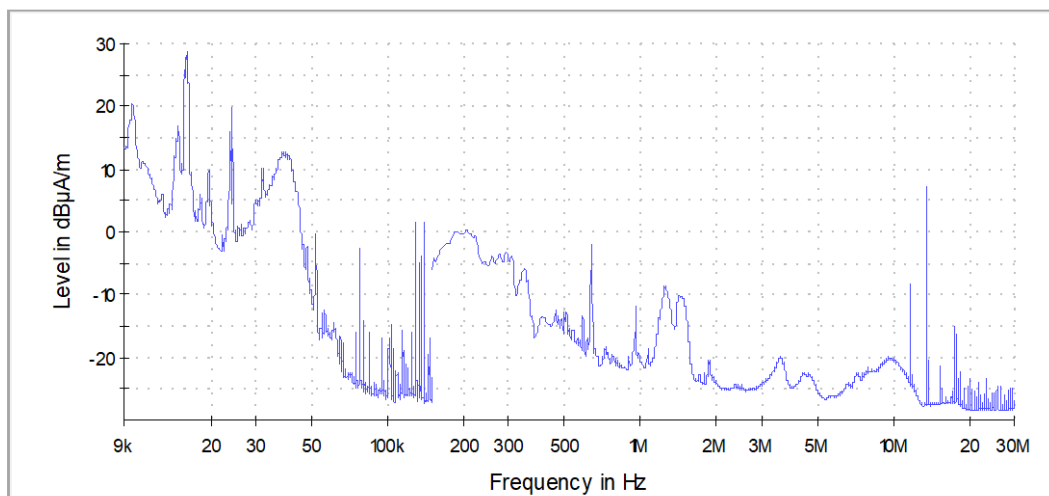


**Obr. 63\_Dvousvazek; 20,4 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)**

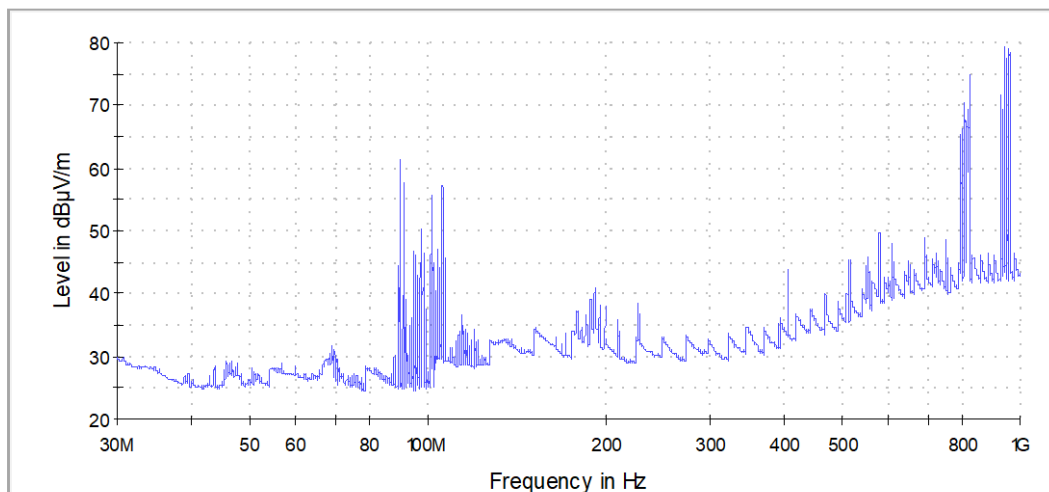


**Obr. 64\_Dvousvazek; 20,4 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)**

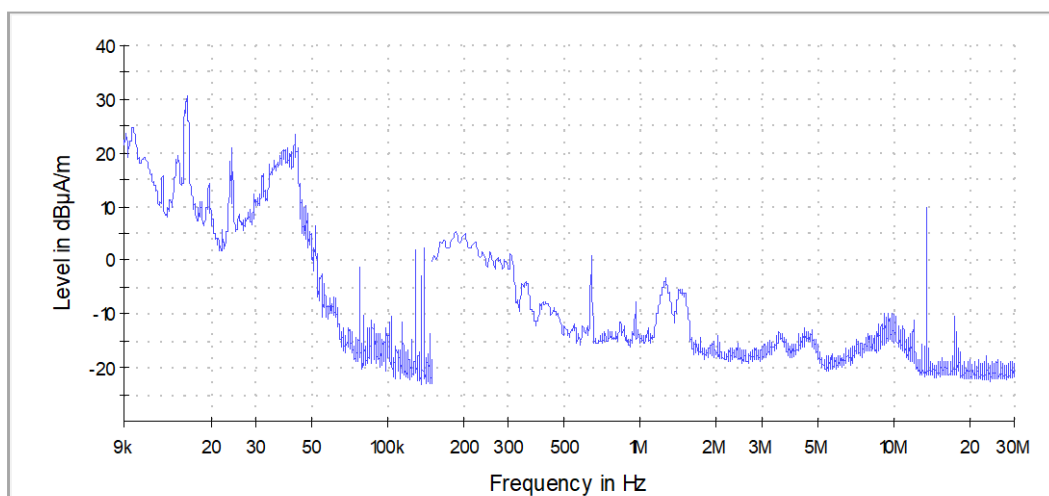
### 7.2.8 Trojsvazkový vodič; 19,1 kV



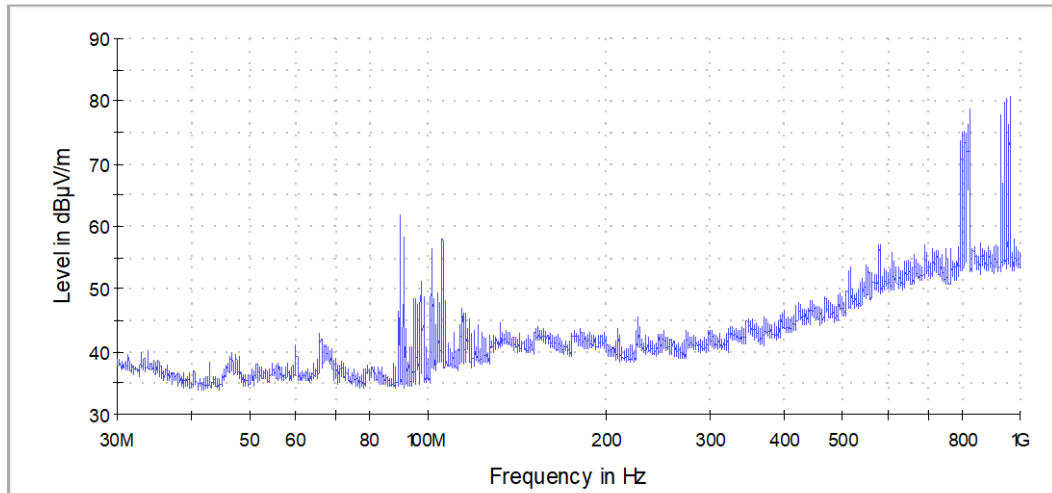
Obr. 65\_Trojsvazek; 19,1 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 66\_Trojsvazek; 19,1 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

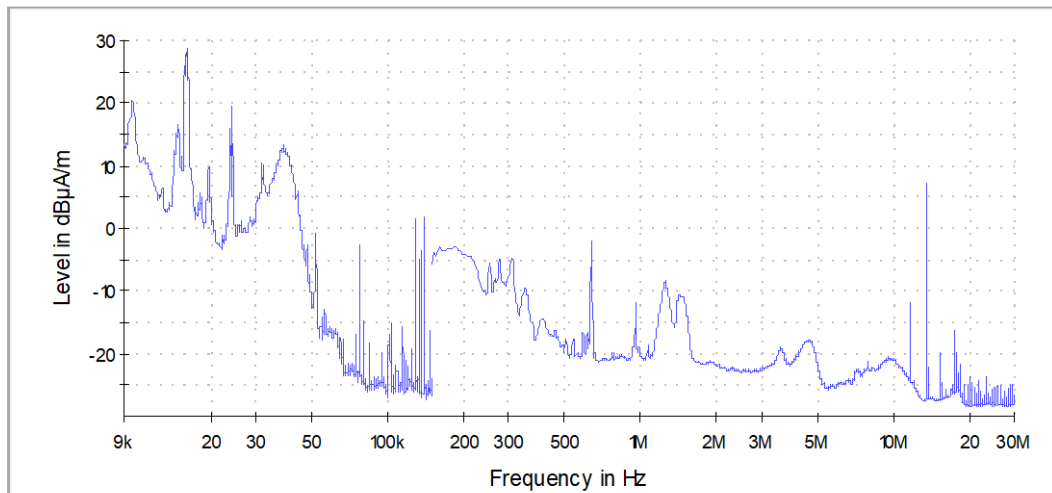


Obr. 67\_Trojsvazek; 19,1 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)

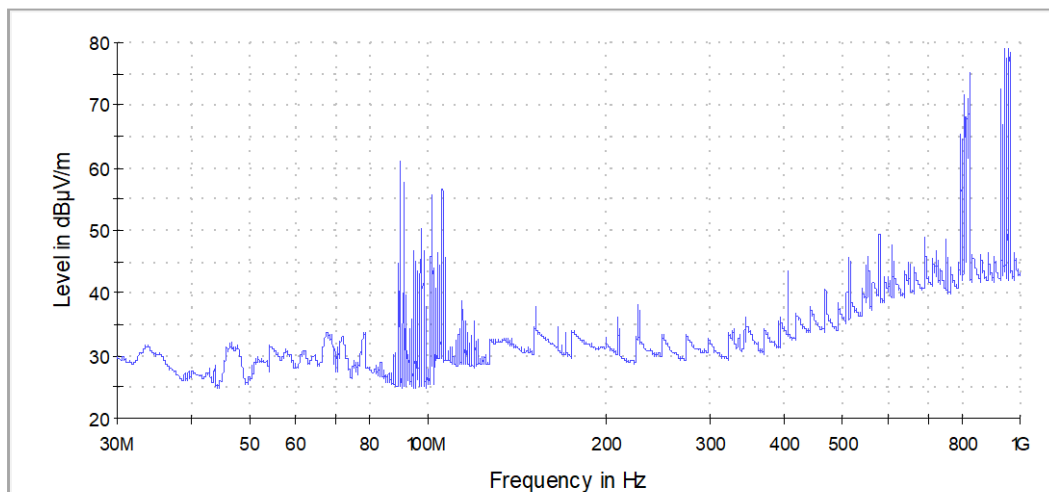


Obr. 68\_Trojsvazek; 19,1 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

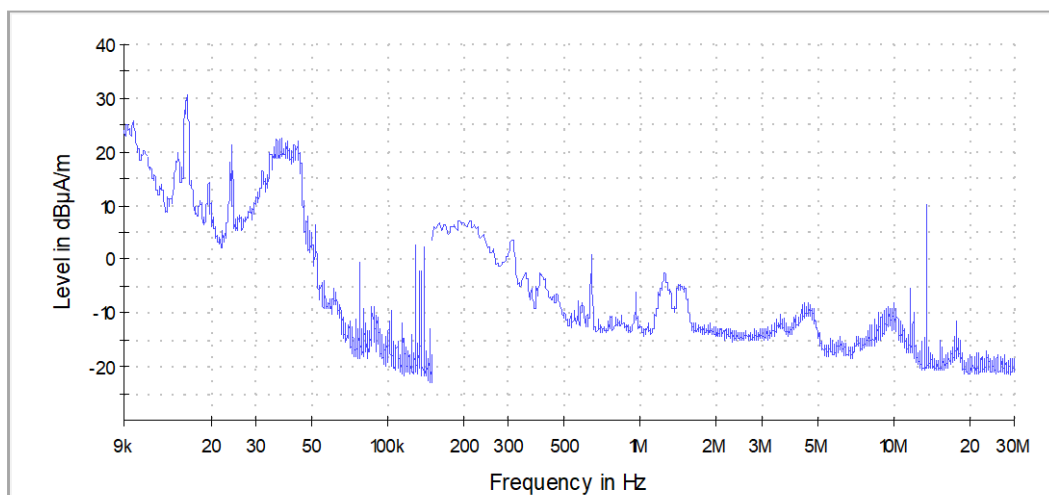
### 7.2.9 Trojsvazkový vodič; 24,9 kV



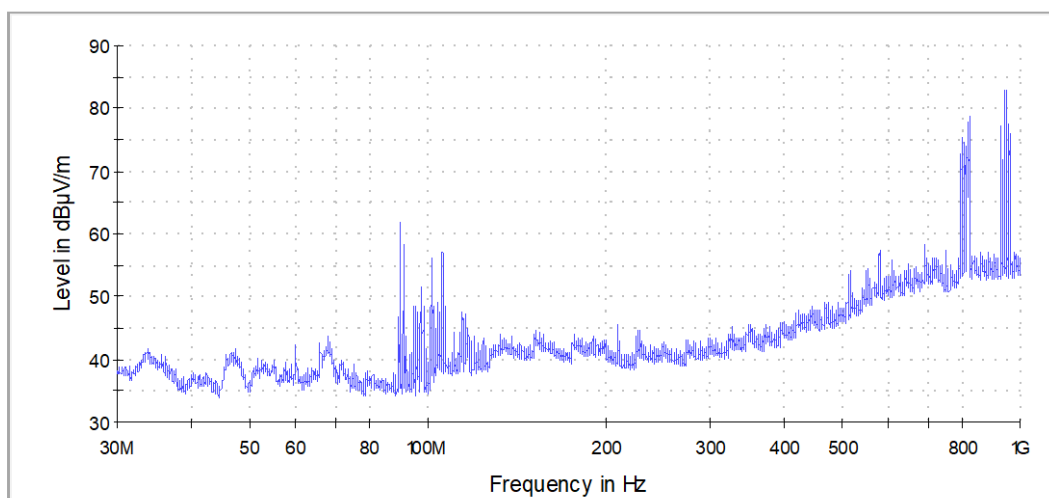
Obr. 69\_Trojsvazek; 24,9 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



**Obr. 70\_Trojsvazek; 24,9 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**

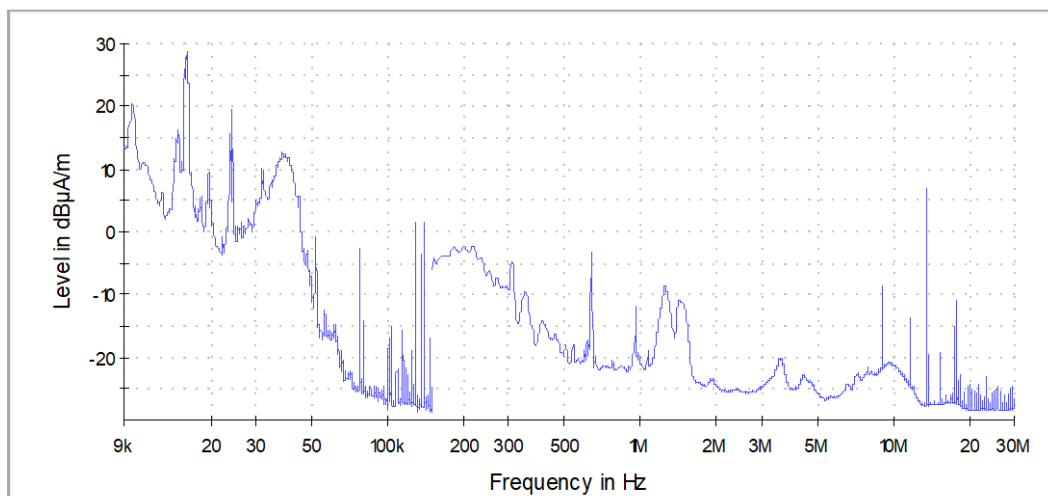


**Obr. 71\_Trojsvazek; 24,9 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)**

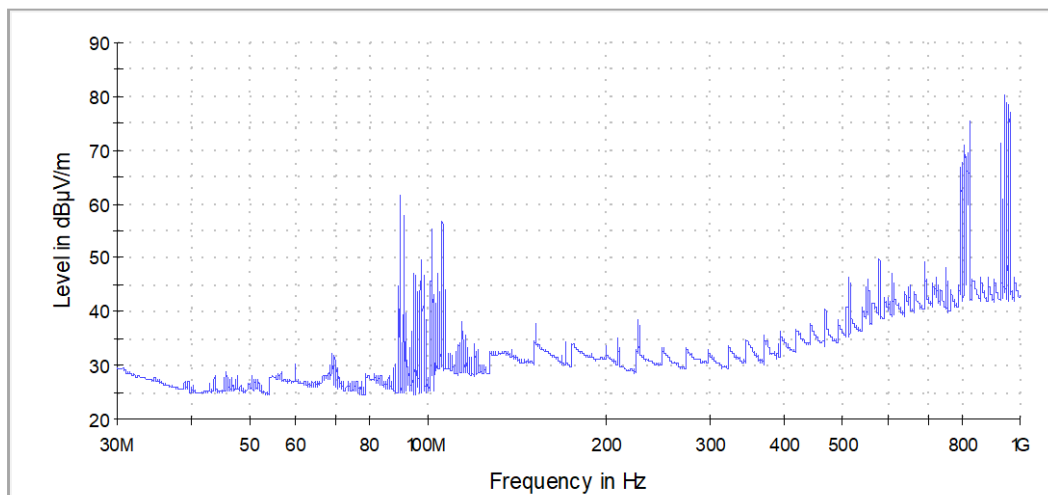


**Obr. 72\_Trojsvazek; 24,9 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)**

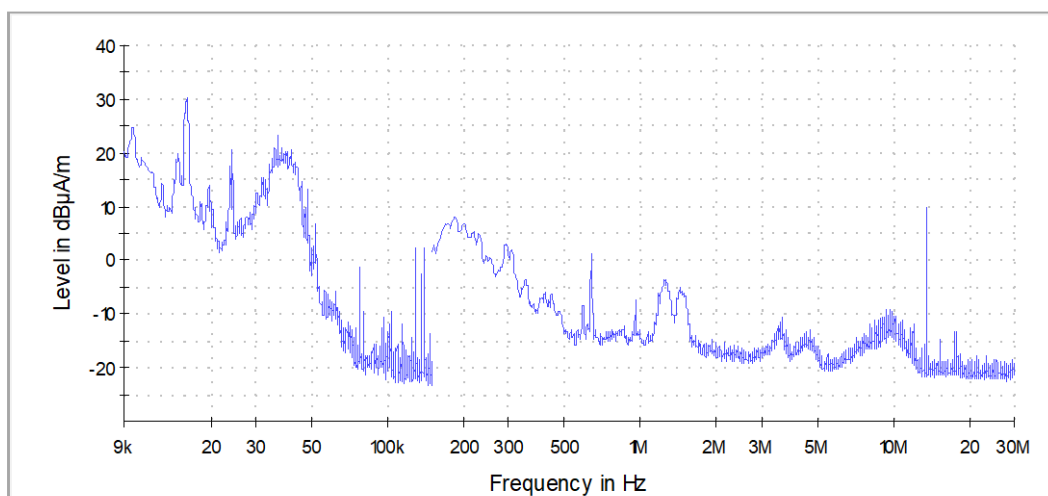
## 7.2.10 Čtyřsvazkový vodič; 22,1 kV



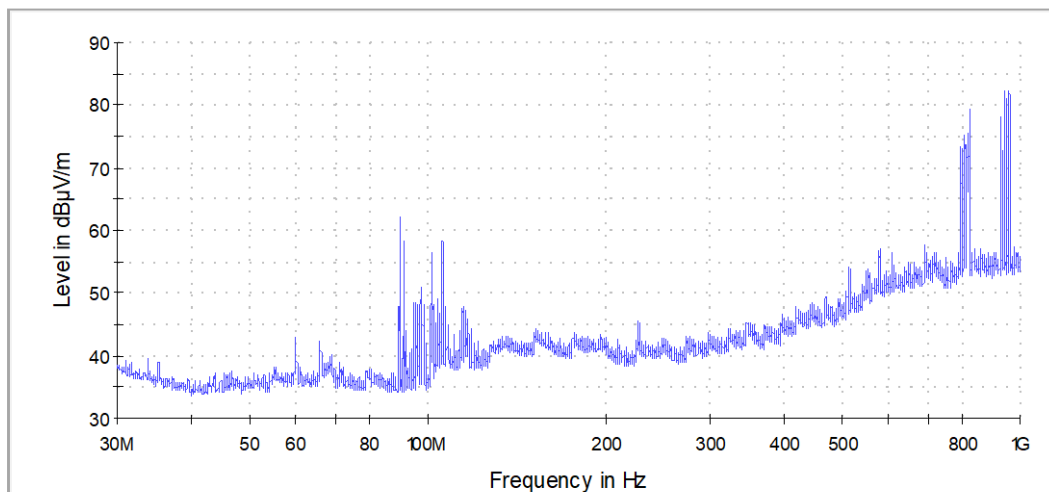
Obr. 73\_Čtyřsvazek; 22,1 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 74\_Čtyřsvazek; 22,1 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

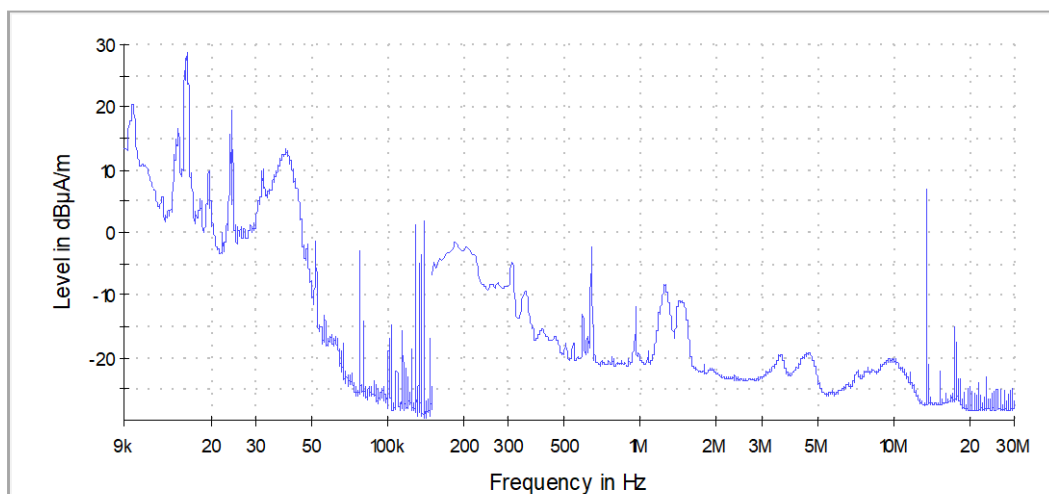


Obr. 75\_Čtyřsvazek; 22,1 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)

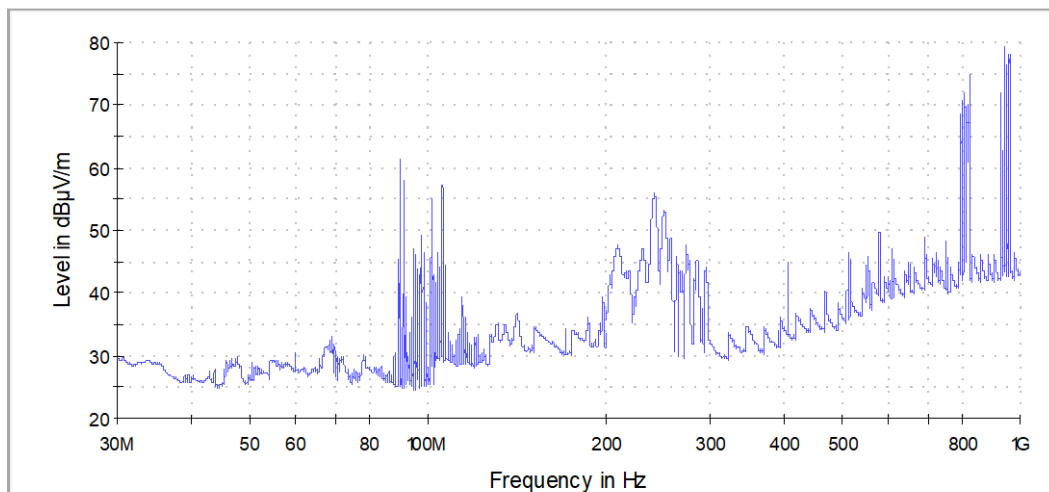


Obr. 76\_Čtyřsvazek; 22,1 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

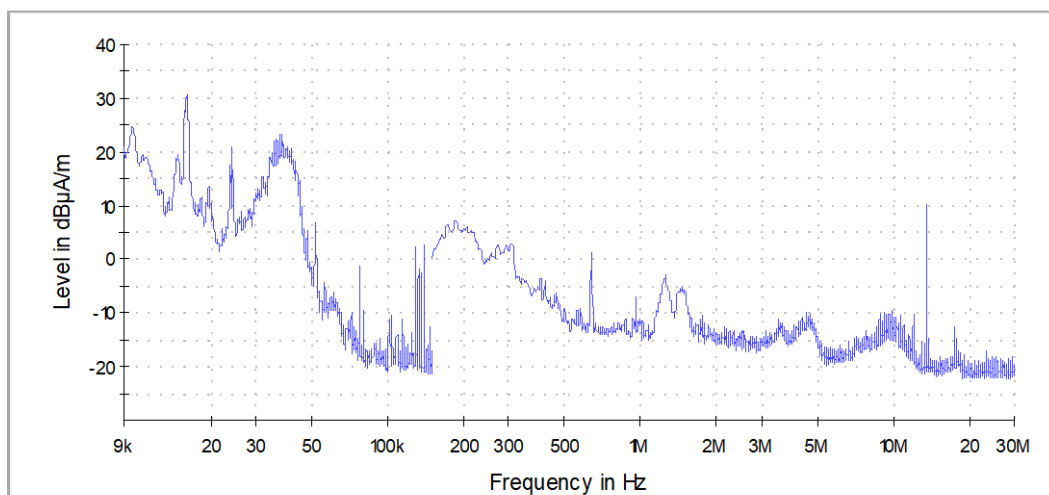
### 7.2.11 Čtyřsvazkový vodič; 27,2 kV



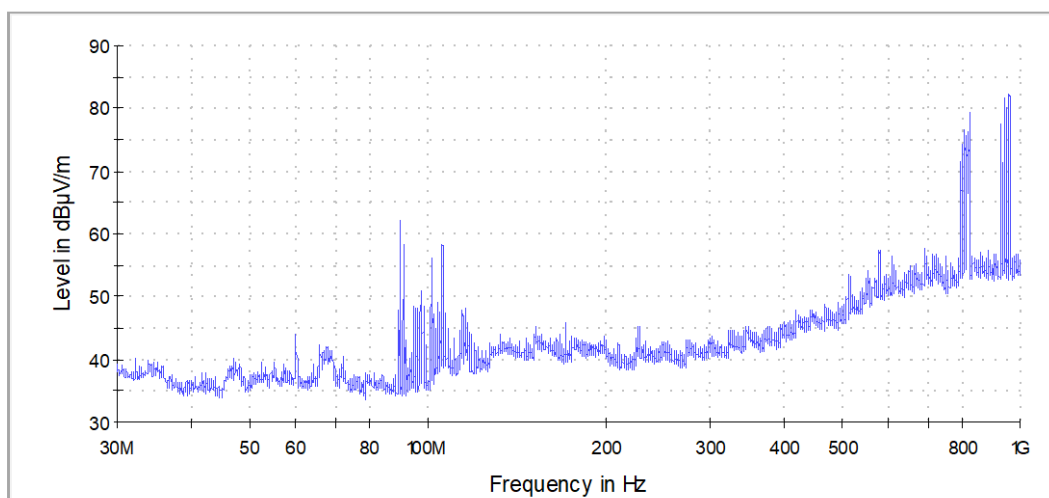
Obr. 77\_Čtyřsvazek; 27,2 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 78\_Čtyřsvazek; 27,2 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

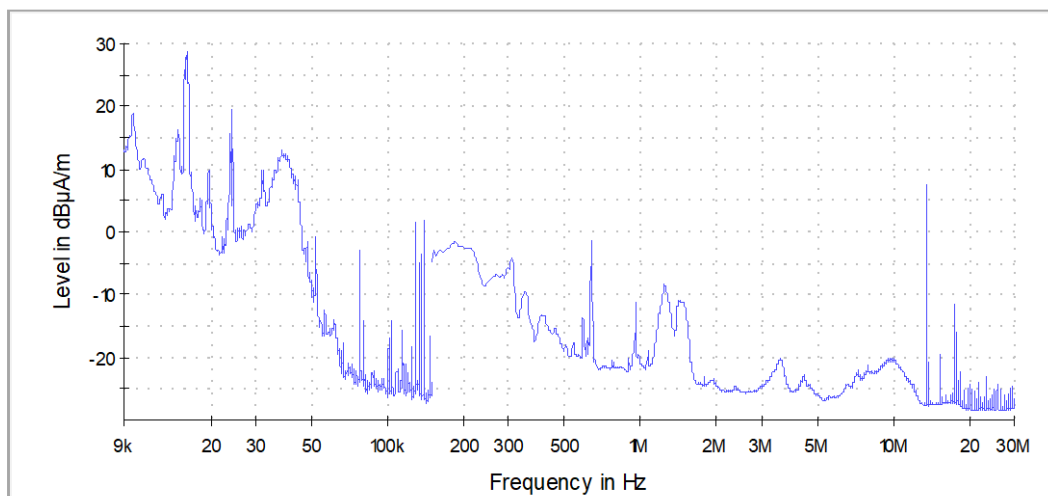


Obr. 79\_Čtyřsvazek; 27,2 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)

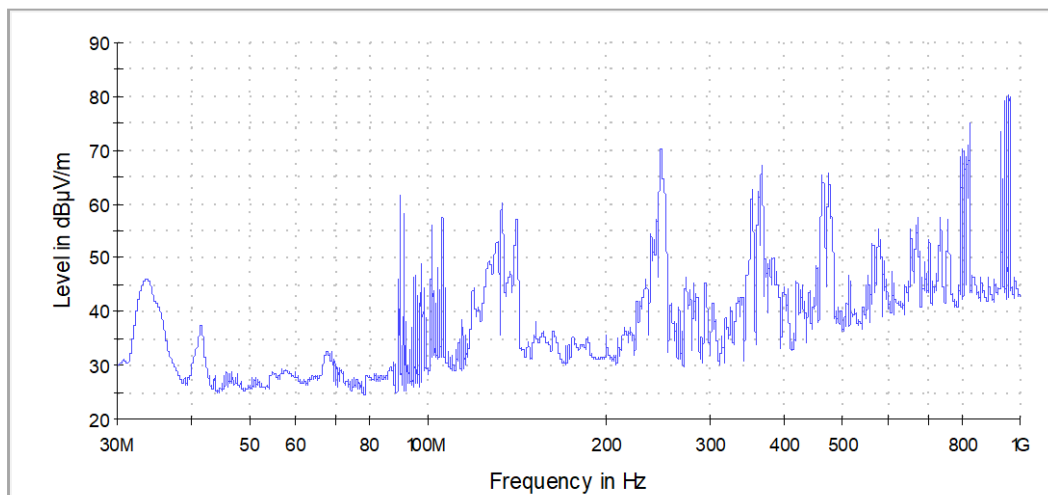


Obr. 80\_Čtyřsvazek; 27,2 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

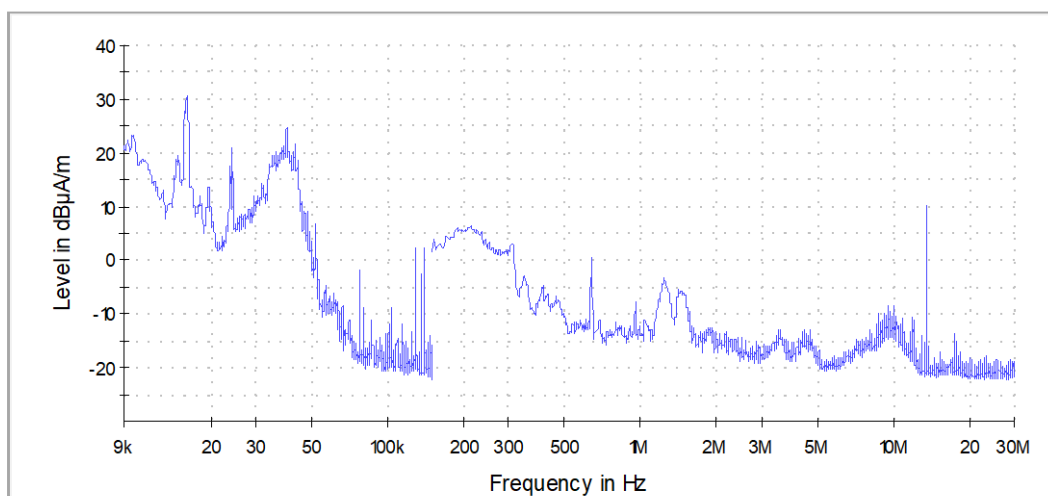
## 7.2.12 Šestisvazkový vodič; 27,8 kV



Obr. 81\_Šestisvazek; 27,8 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)

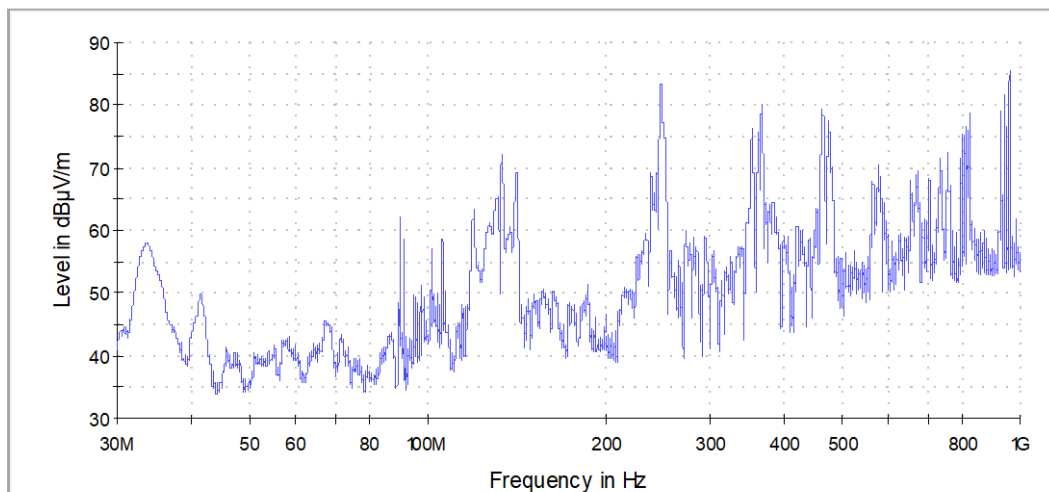


Obr. 82\_Šestisvazek; 27,8 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)



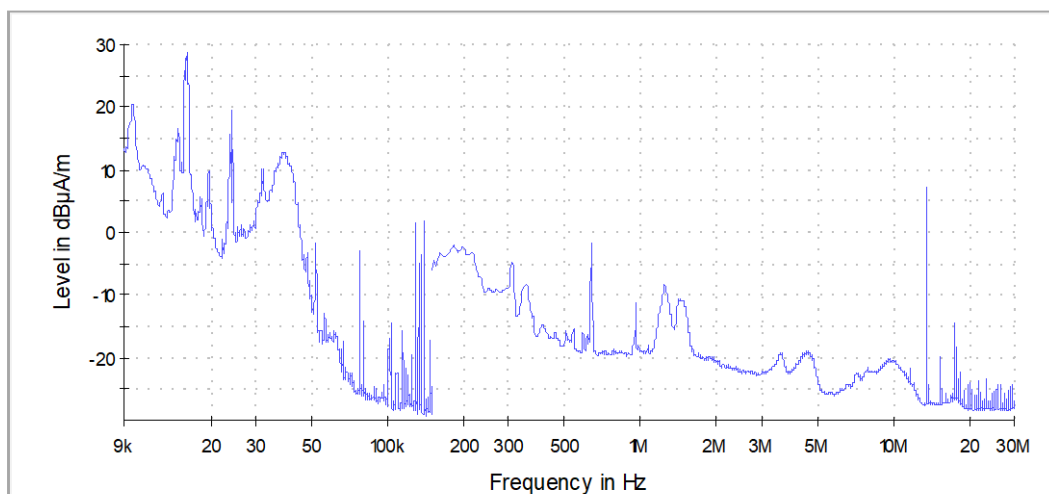
Obr. 83\_Šestisvazek; 27,8 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)



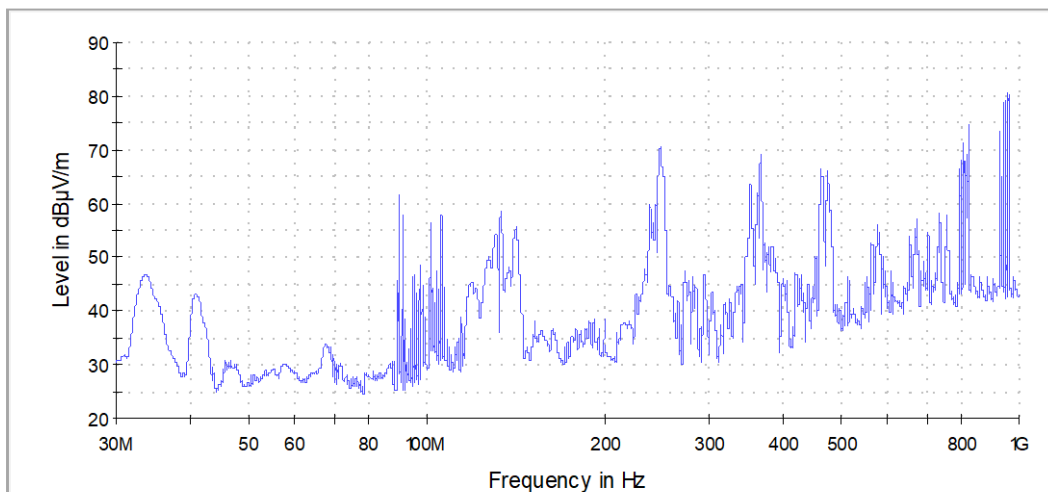


Obr. 84\_Šestisvazek; 27,8 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)

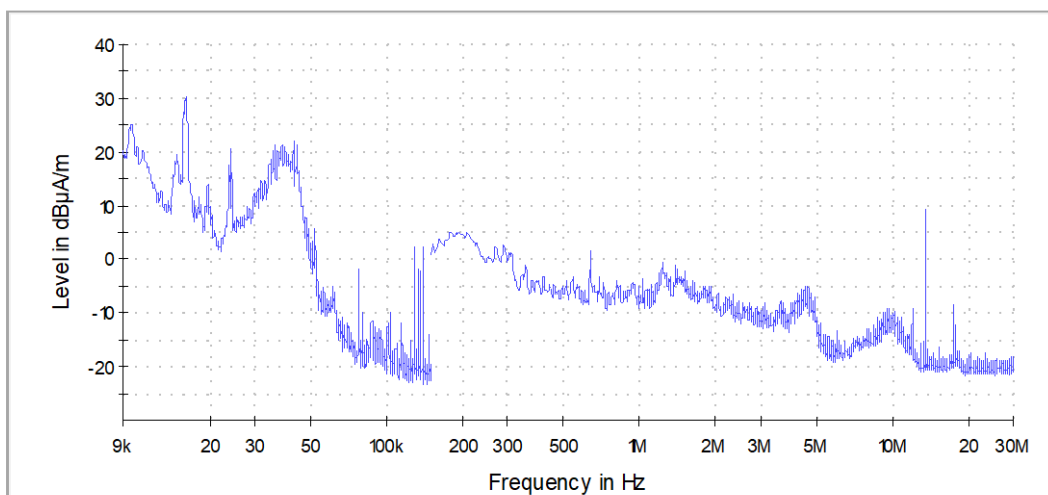
### 7.2.13 Šestisvazkový vodič; 32,3 kV



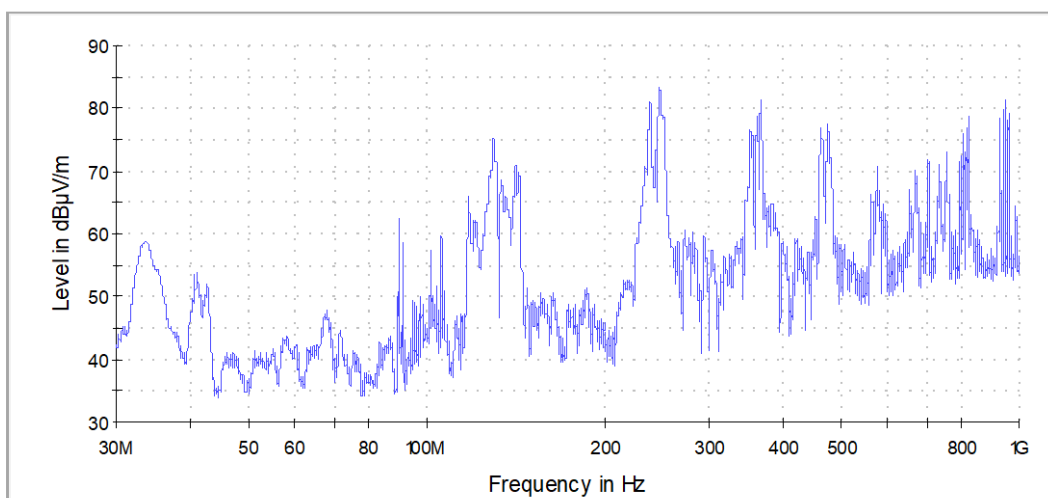
Obr. 85\_Šestisvazek; 32,3 kV; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



**Obr. 86\_Šestisvazek; 32,3 kV; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**

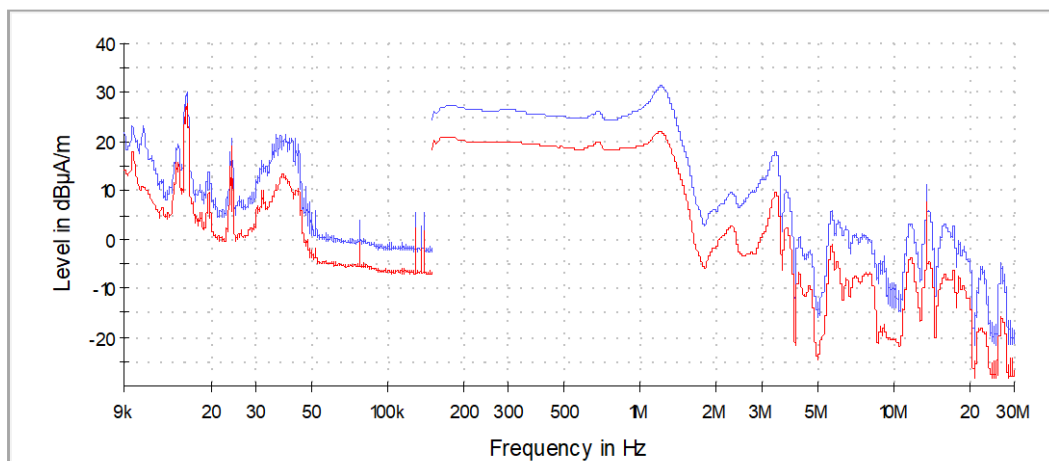


**Obr. 87\_Šestisvazek; 32,3 kV; Peak (9 kHz - 30 MHz)**



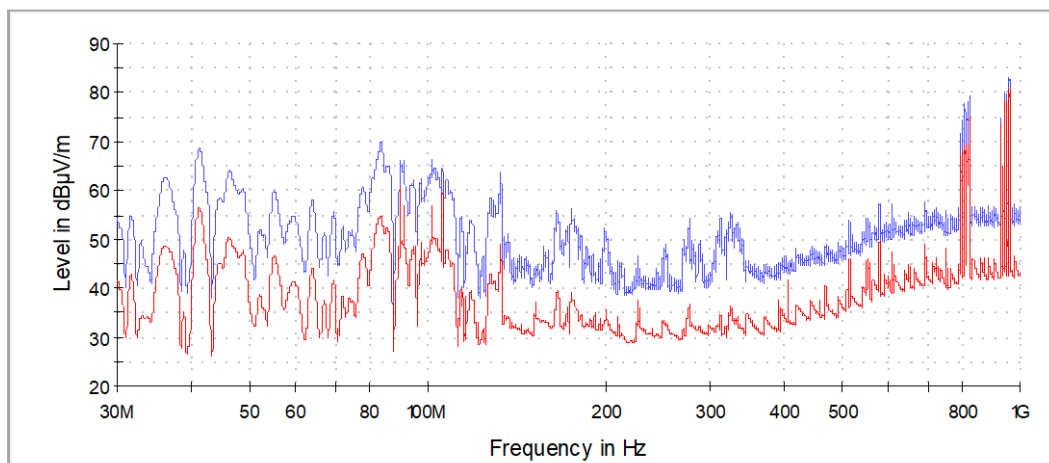
**Obr. 88\_Šestisvazek; 32,3 kV; Peak (30 MHz - 1 GHz)**

### 7.2.14 Srovnání jednotlivých VF charakteristik



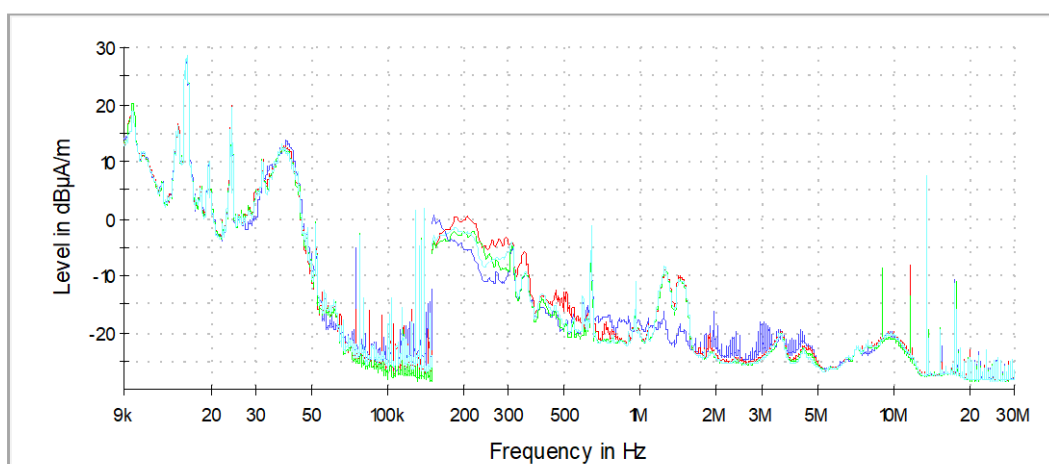
— jednoduchý vodič 0,4 mm; Peak — jednoduchý vodič 0,4 mm; Quasi-Peak

**Obr. 89\_Peakový a Quasi-Peakový detektor; 10,8 kV (9 kHz - 30 MHz)**



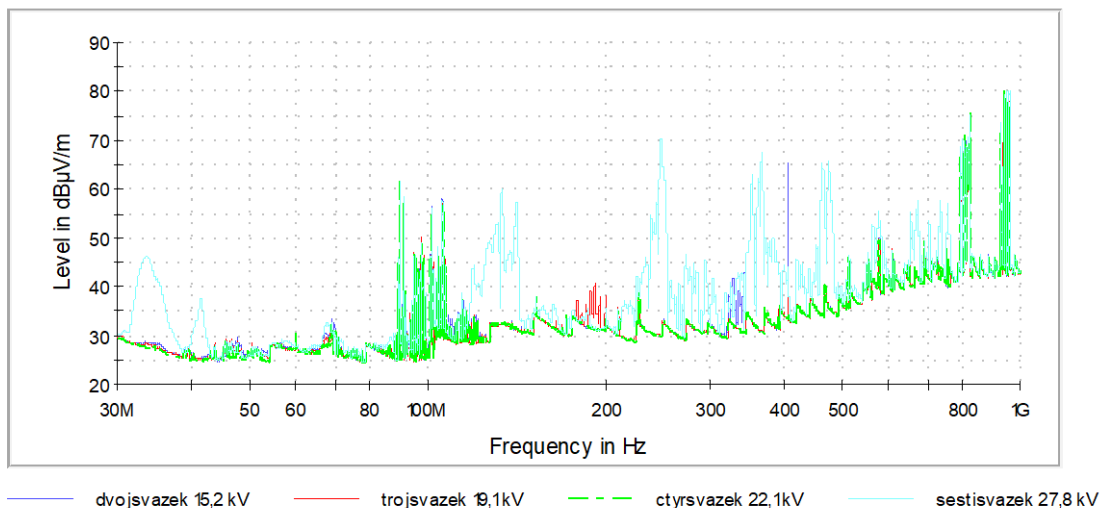
— jednoduchý vodič 0,4 mm; Peak — jednoduchý vodič 0,4 mm; Quasi-Peak

**Obr. 90\_Peakový a Quasi-Peakový detektor; 10,8 kV (30 MHz - 1 GHz)**

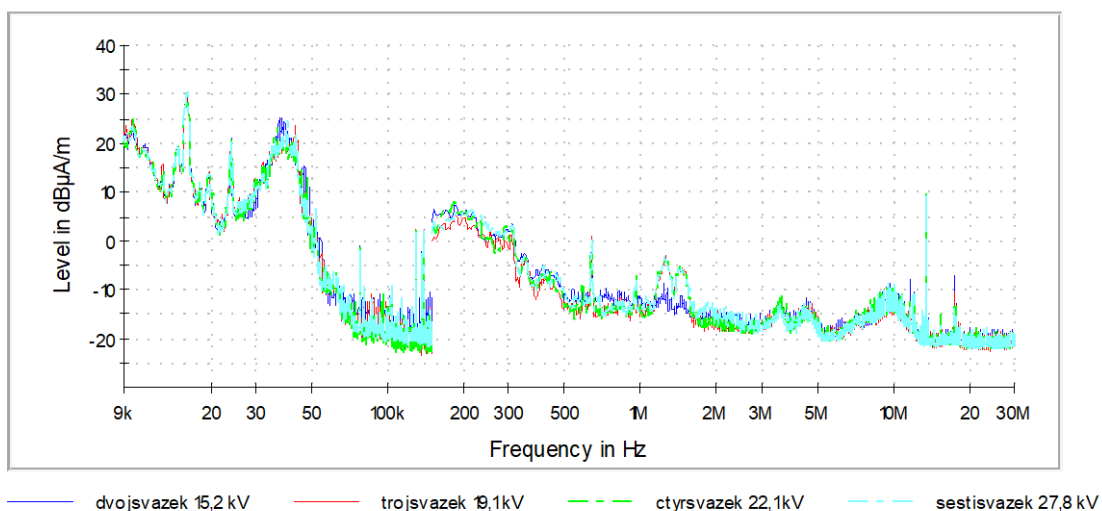


— dvojsvazek 15,2 kV — trojsvazek 19,1kV — čtyřsvazek 22,1kV — šestisvazek 27,8 kV

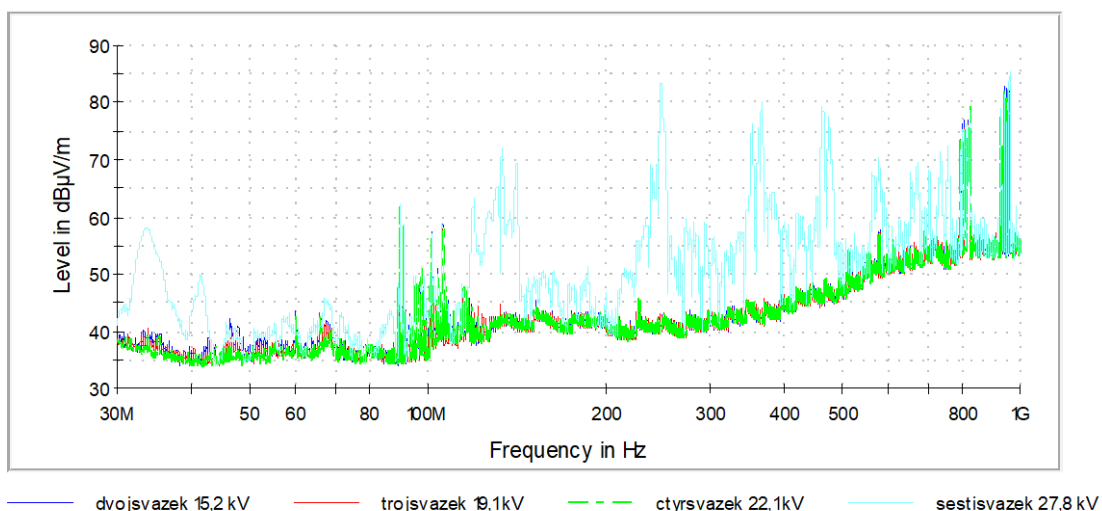
**Obr. 91\_Srovnání svazkových vodičů; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)**



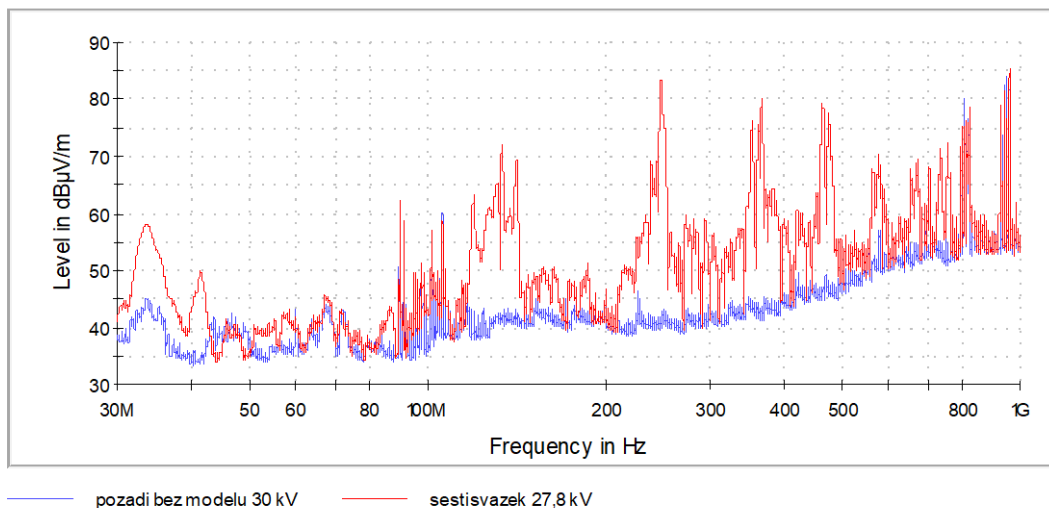
**Obr. 92\_Srovnání svazkových vodičů; Quasi-Peak (30 MHz – 1 GHz)**



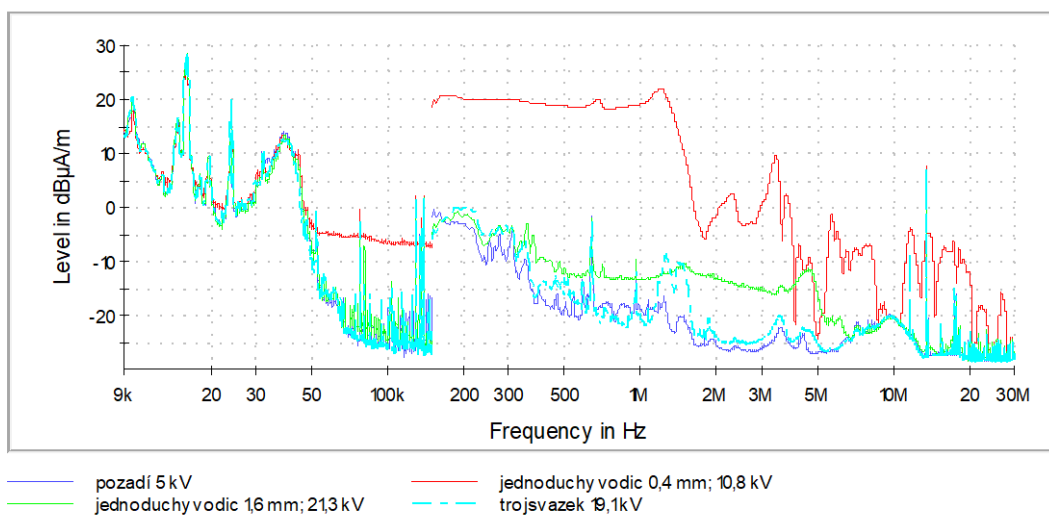
**Obr. 93\_Srovnání svazkových vodičů; Peak (9 kHz - 30 MHz)**



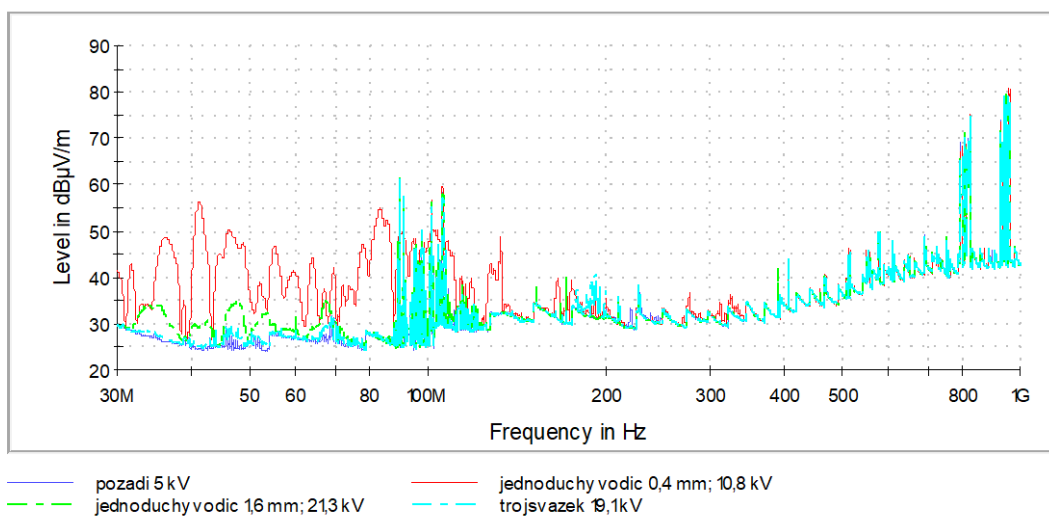
**Obr. 94\_Srovnání svazkových vodičů; Peak (30 MHz – 1 GHz)**



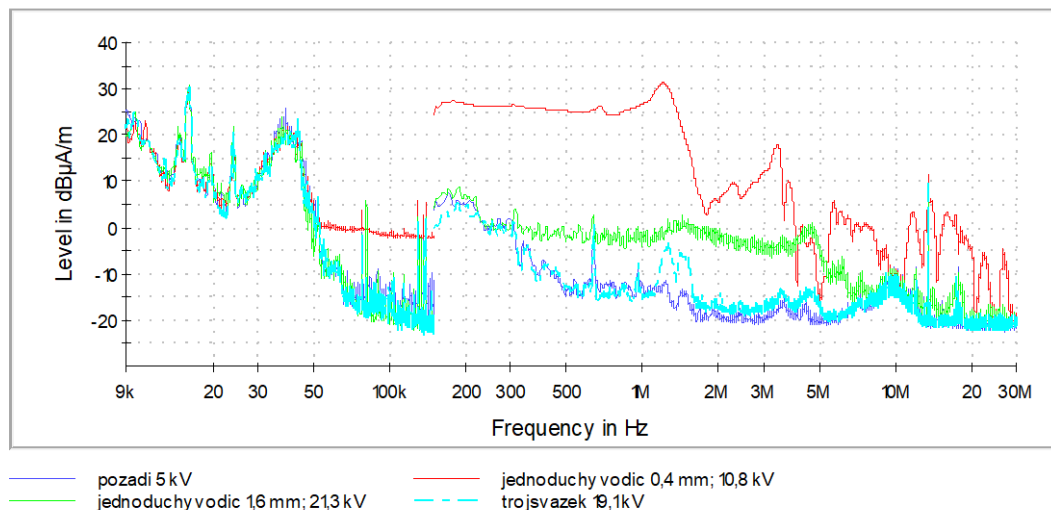
**Obr. 95\_Pozadí a šestisvazek**



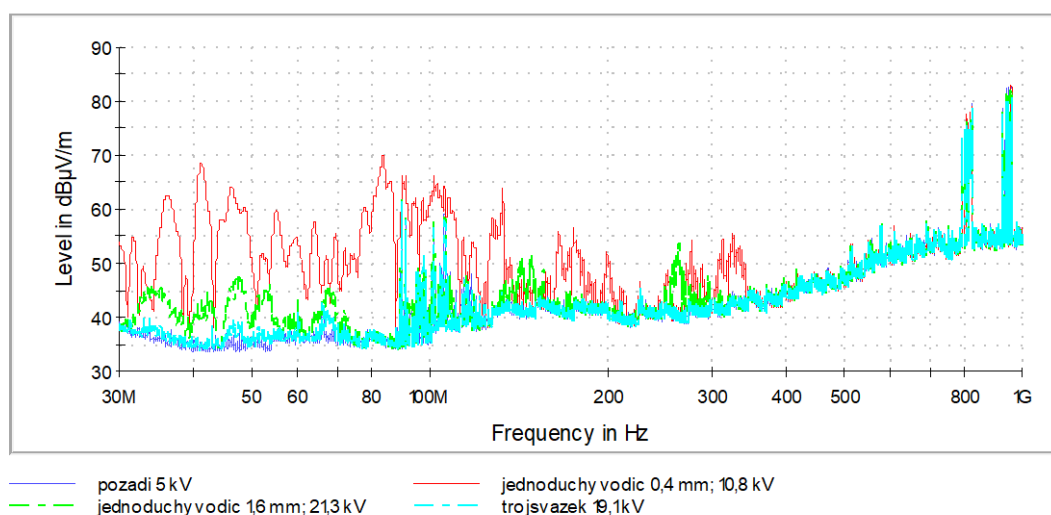
**Obr. 96\_Pozadí s vodiči; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)**



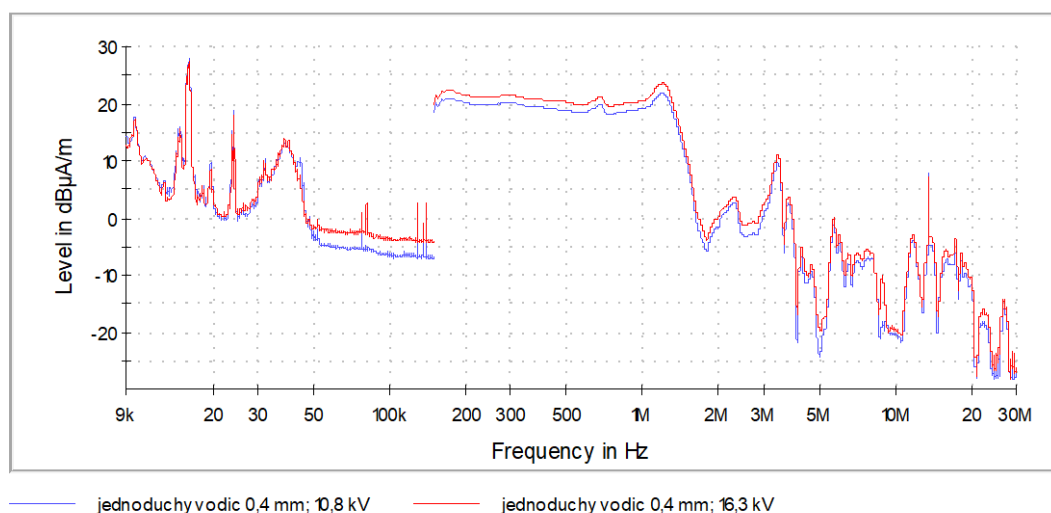
**Obr. 97\_Pozadí s vodiči; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**



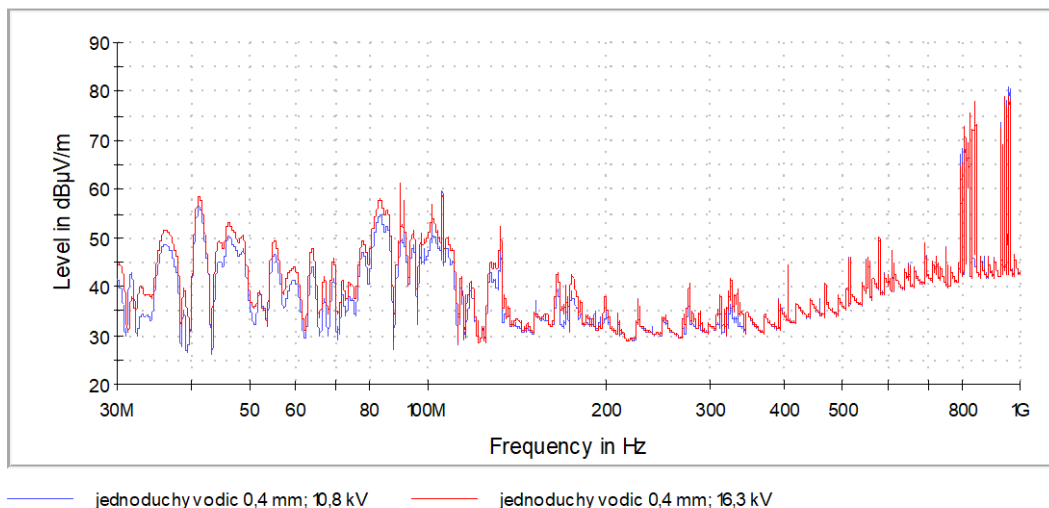
Obr. 98\_Pozadí s vodiči; Peak (9 kHz - 30 MHz)



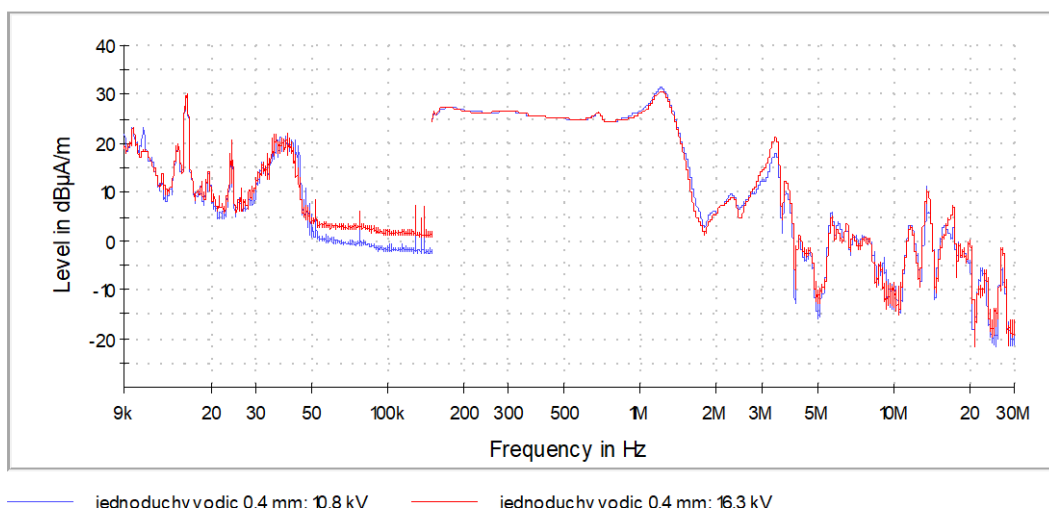
Obr. 99\_Pozadí s vodiči; Peak (30 MHz - 1 GHz)



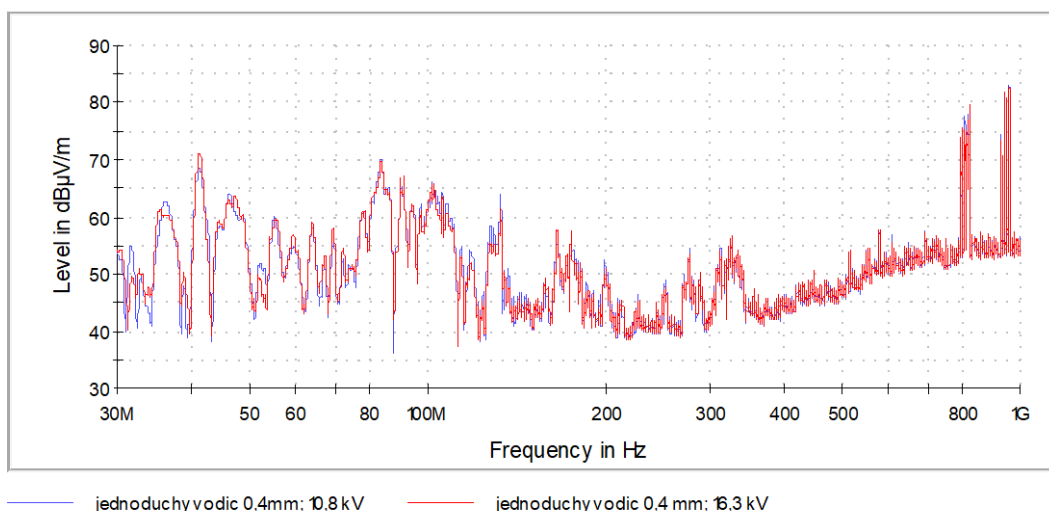
Obr. 100\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



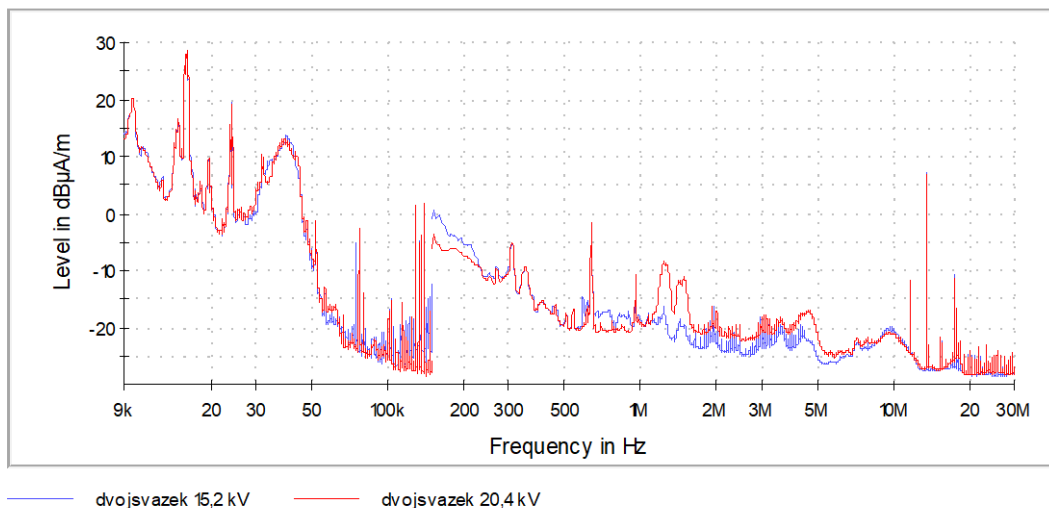
**Obr. 101\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**



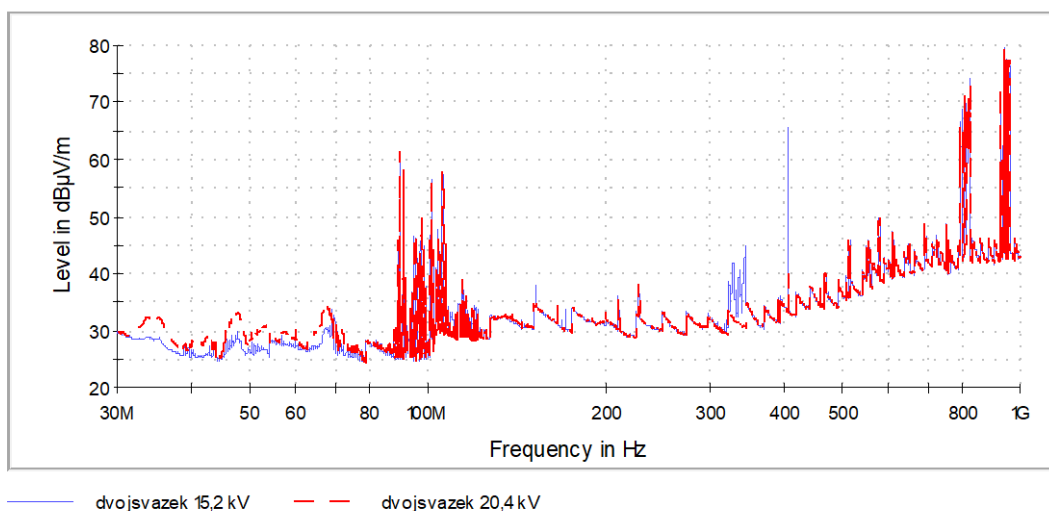
**Obr. 102\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Peak (9 kHz - 30 MHz)**



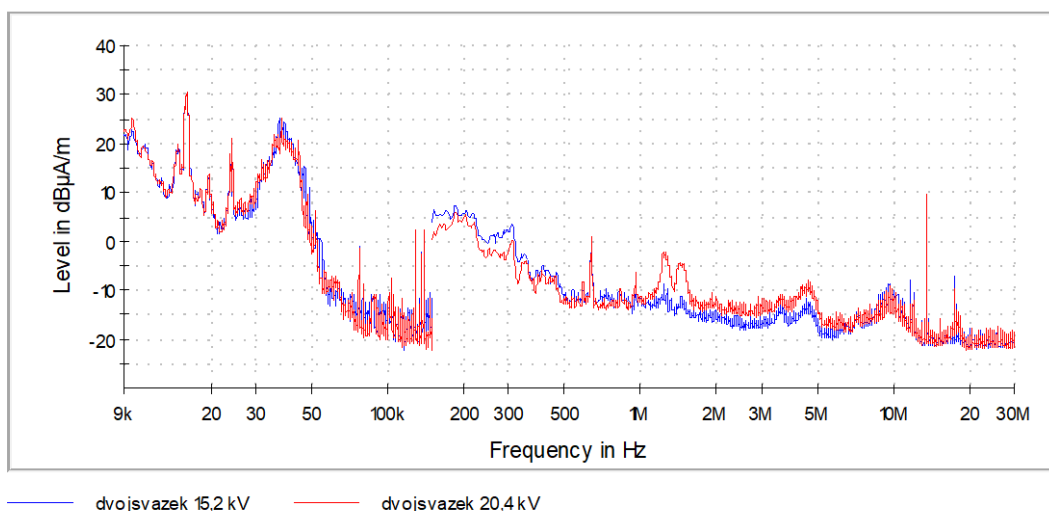
**Obr. 103\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; jednoduchý vodič 0,4 mm; Peak (30 MHz - 1 GHz)**



**Obr. 104\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; dvojsvazkový vodič; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)**

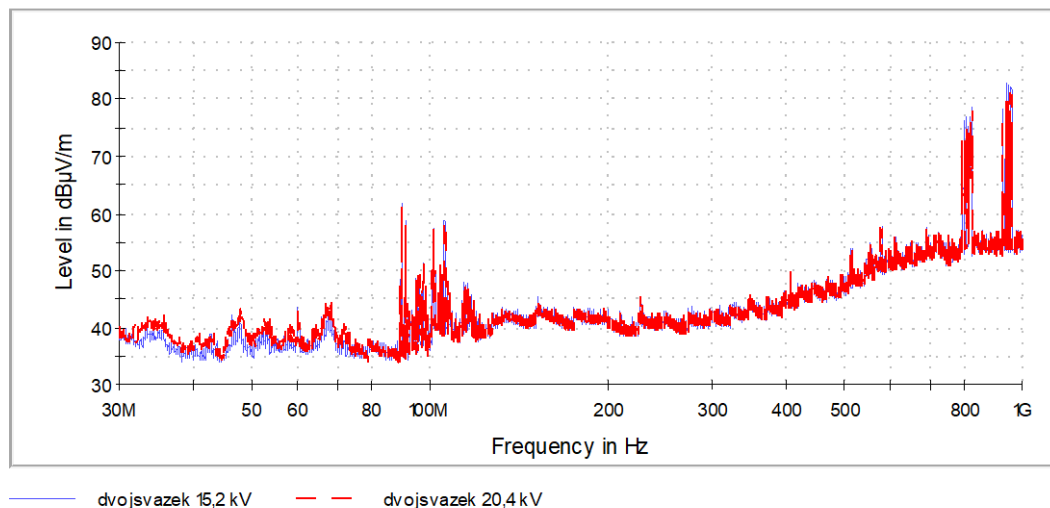


**Obr. 105\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; dvojsvazkový vodič; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**



**Obr. 106\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; dvojsvazkový vodič; Peak (9 kHz - 30 MHz)**

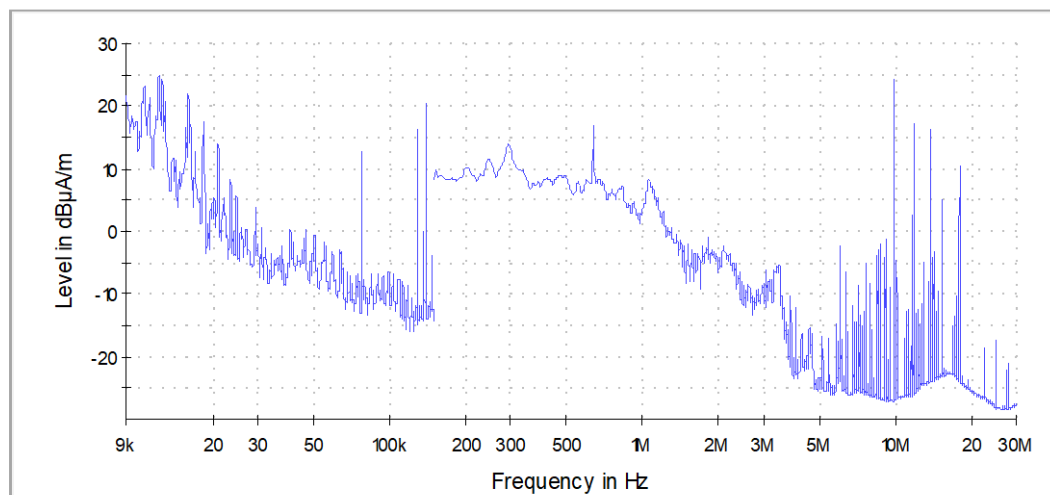




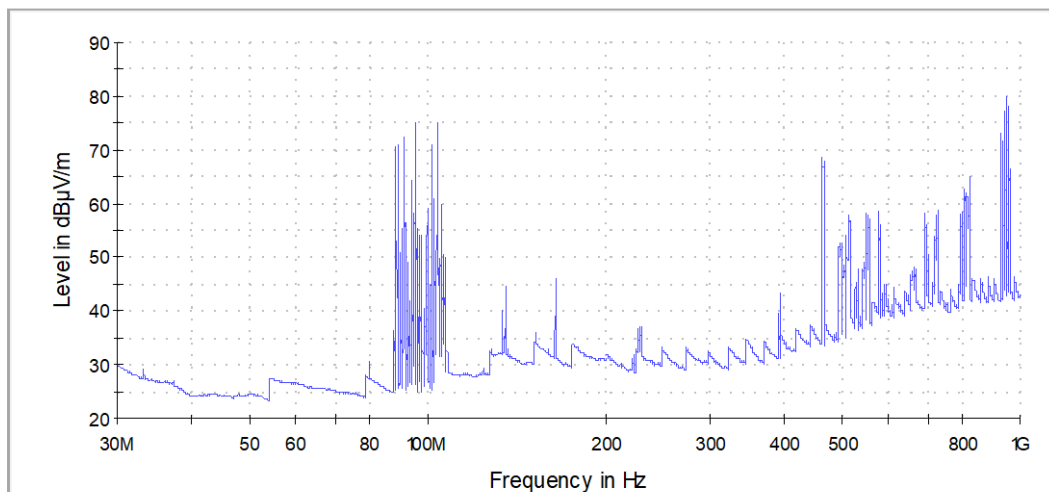
Obr. 107\_Navýšení napětí nad  $U_0$ ; dvojsvazkový vodič; Peak (30 MHz - 1 GHz)

### 7.3 Naměřené VF charakteristiky korónových výbojů na vedení ZVN

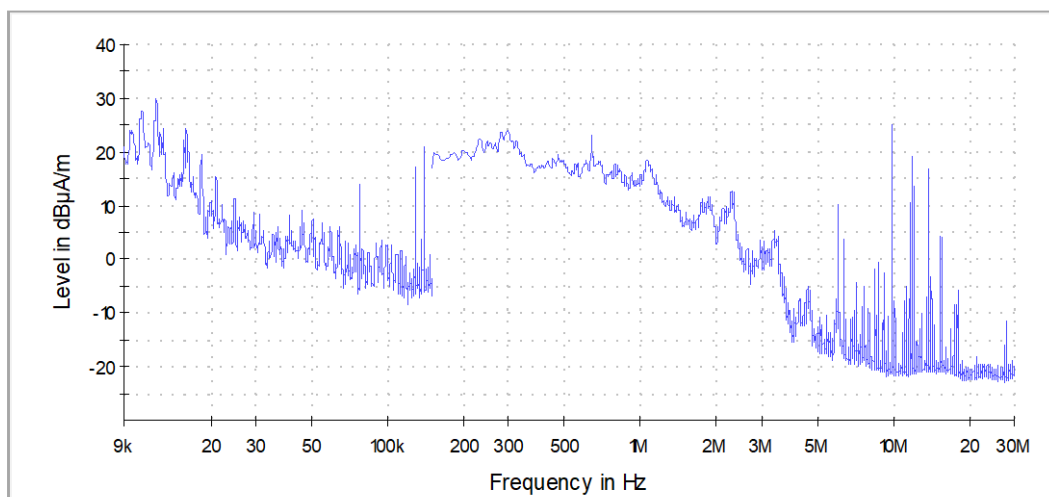
#### 7.3.1 Různá orientace měřících antén



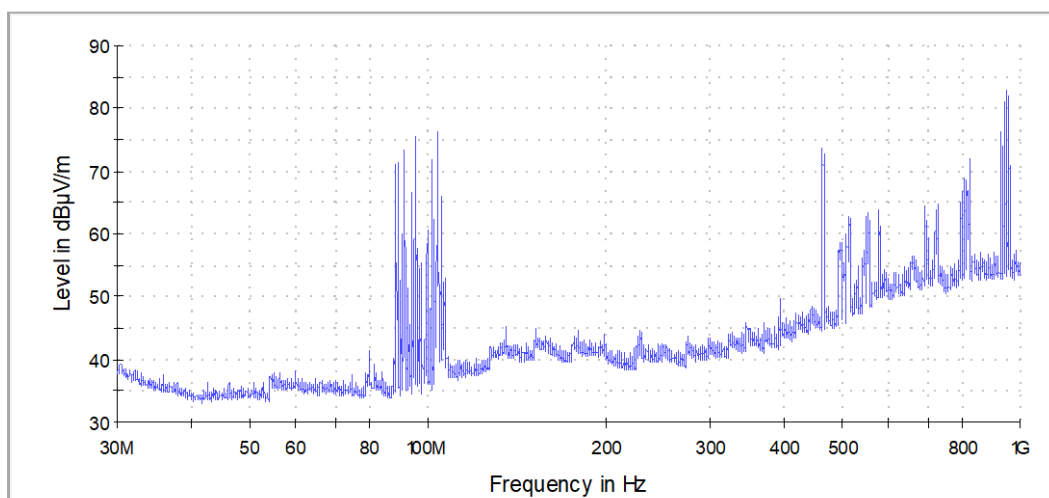
Obr. 108\_Paralelně nastavená smyčková anténa; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



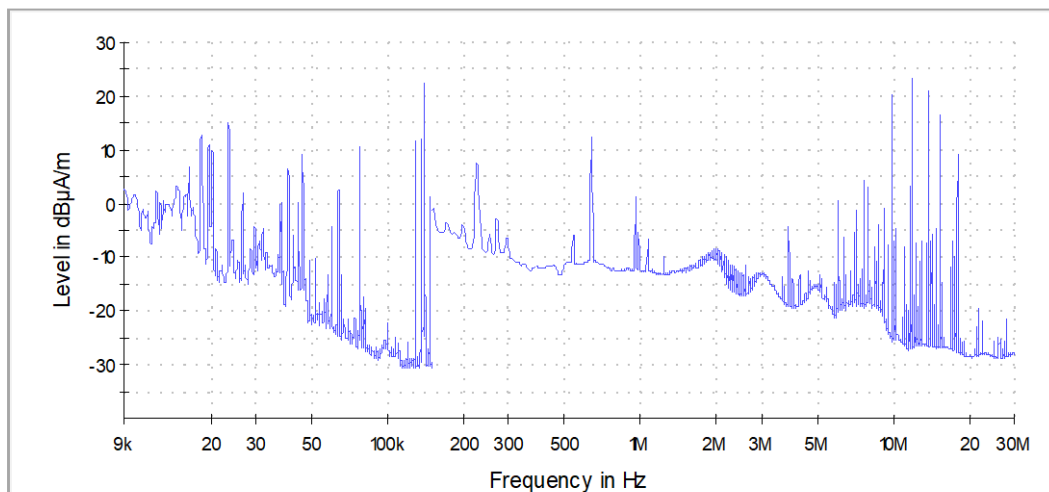
**Obr. 109\_Horizontální polarizace antén; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**



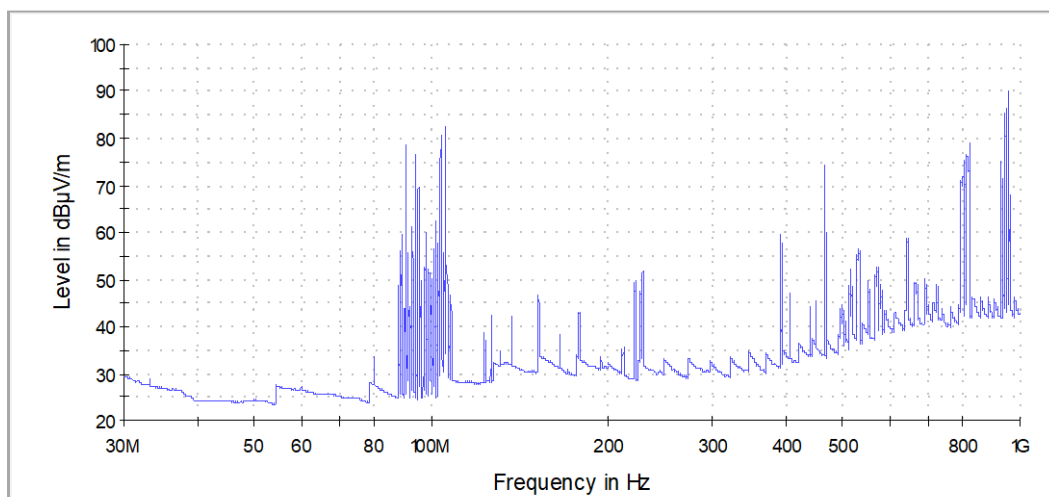
**Obr. 110\_Paralelně nastavená smyčková anténa; Peak (9 kHz - 30 MHz)**



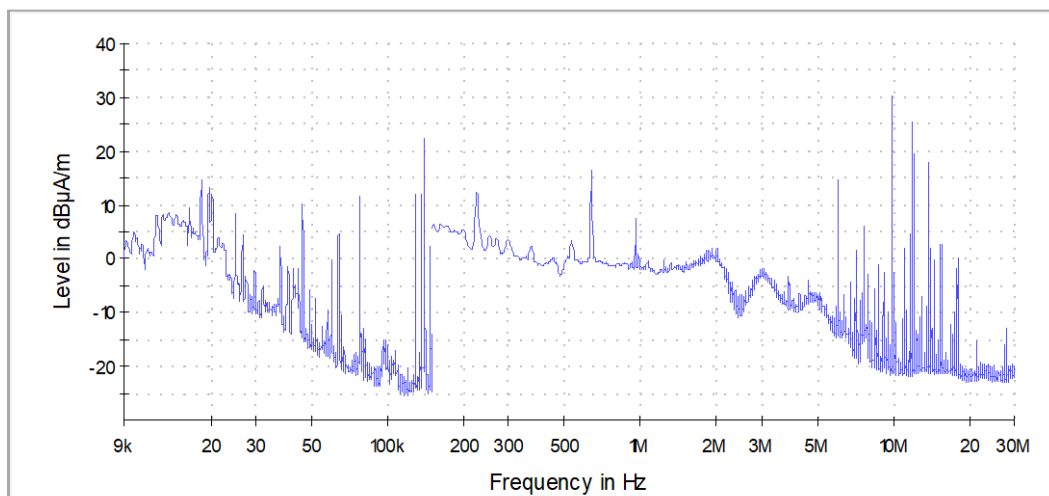
**Obr. 111\_Horizontální polarizace antén; Peak (30 MHz - 1 GHz)**



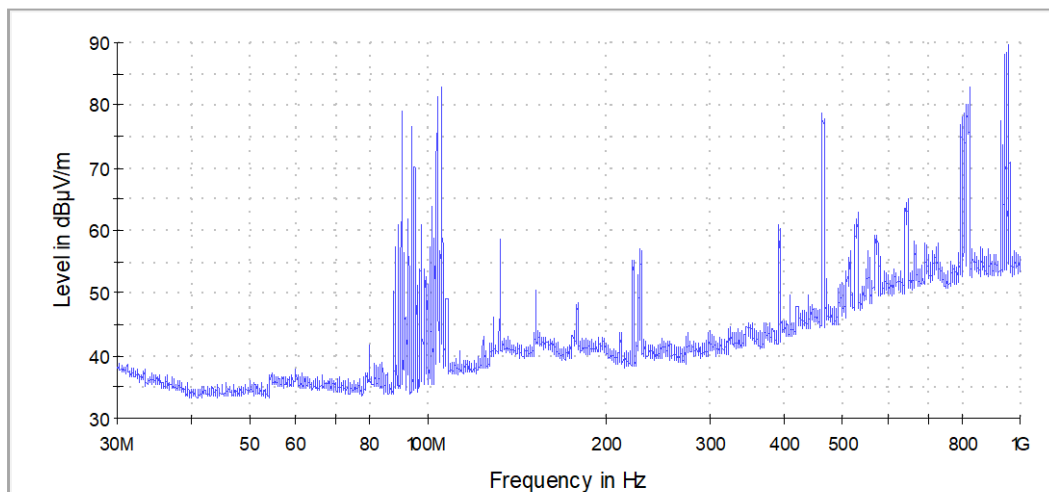
Obr. 112\_Kolmo nastavená smyčková anténa; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



Obr. 113\_Vertikální polarizace antén; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)

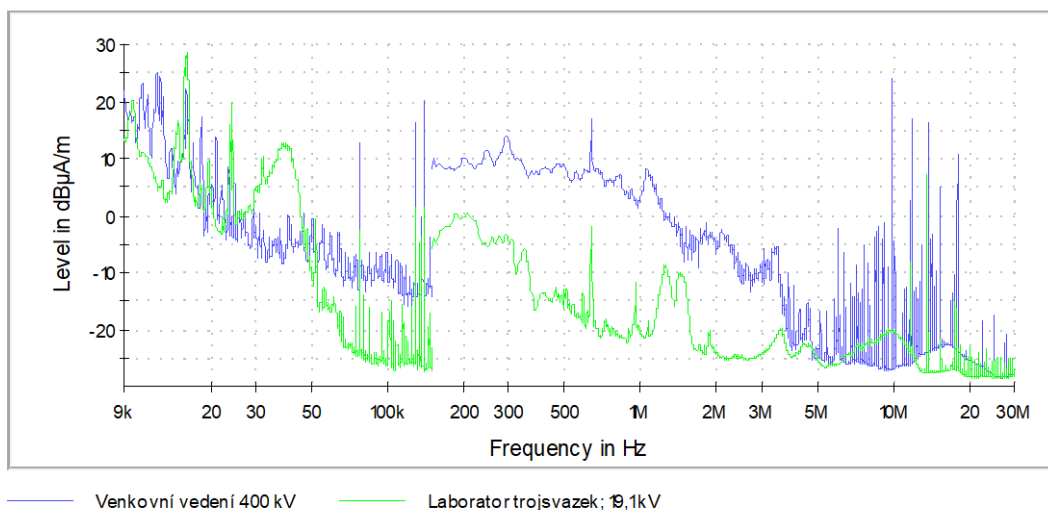


Obr. 114\_Kolmo nastavená smyčková anténa; Peak (9 kHz - 30 MHz)

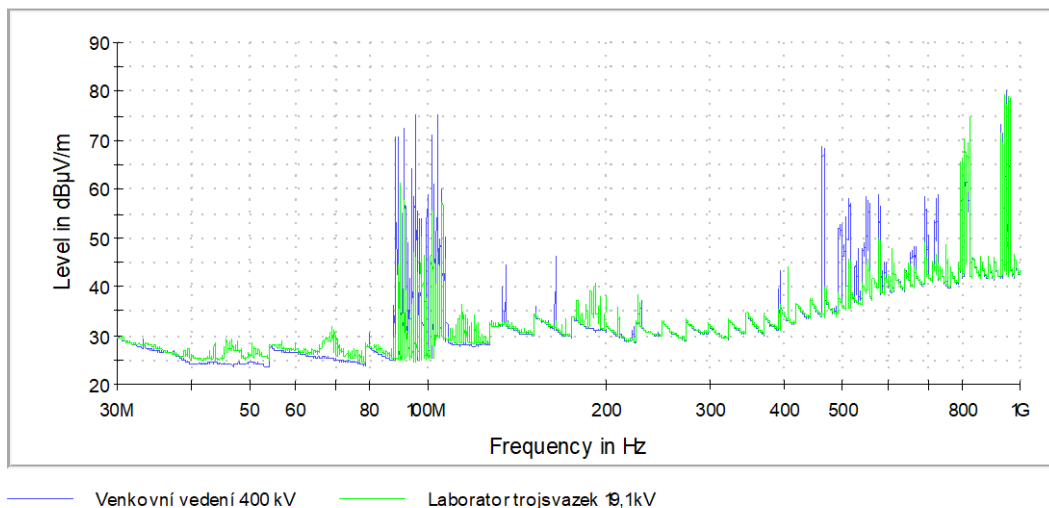


Obr. 115\_Vertikální polarizace antén; Peak (30 MHz - 1 GHz)

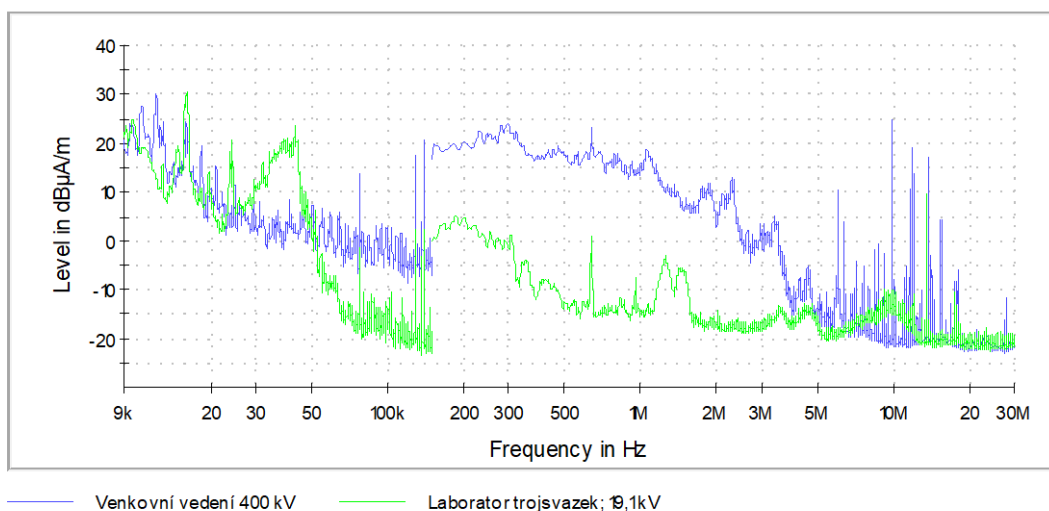
### 7.3.2 Srovnání s modelem trojsvazkového vodiče



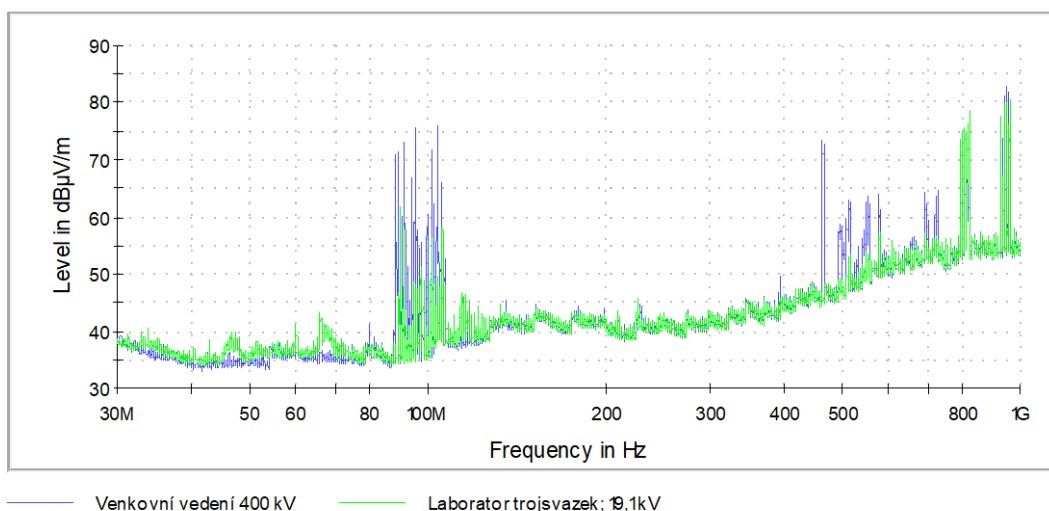
Obr. 116\_Venkovní vedení a model trojsvazku; Quasi-Peak (9 kHz - 30 MHz)



**Obr. 117\_Venkovní vedení a model trojsvazku; Quasi-Peak (30 MHz - 1 GHz)**



**Obr. 118\_Venkovní vedení a model trojsvazku; Peak (9 kHz - 30 MHz)**



**Obr. 119\_Venkovní vedení a model trojsvazku; Peak (30 MHz - 1 GHz)**