

Fakulta elektrotechnická  
Katedra materiálů a technologií

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
Akustické metody detekce částečných výbojů

Autor práce: **Bc. Martin Mañas**  
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Pihera, Ph.D

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin MAŇAS**  
Osobní číslo: **E22N0009P**  
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**  
Téma práce: **Akustické metody detekce částečných výbojů**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

## Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši diagnostických metod a postupů v elektrotechnice využívajících akustickou emisi částečných výbojů.
2. Navrhněte vhodné diagnostické postupy využívající vhodné mikrofony a snímače pro snímání akustické odezvy částečných výbojů.
3. Navrhněte vhodný experiment pro sledování vybraných akustických parametrů výbojové činnosti
4. Ověřte navržený experiment a vyhodnoťte získaná data.

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

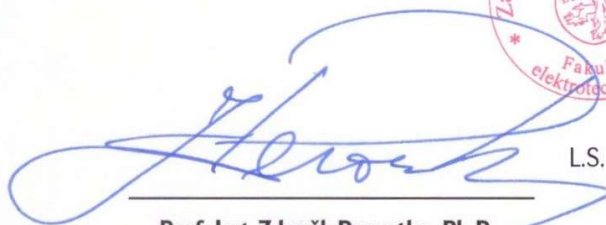
Seznam doporučené literatury:

1. Hauschild, W.: High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2019.
2. Kuchler, A.: High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2018.
3. Stone, G.C.: Electrical insulation for rotating machines, Wiley-IEEE Press 2014.
4. Mentlík, V. et al.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008, 1.vydání, ISBN 978-80-7300-232-9.
5. Kreidl, M. a kol.: Diagnostické systémy, ČVUT Praha 2001.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Pihera, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



  
L.S.  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
**Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá měřením částečných výbojů pomocí akustické metody. Úkolem této práce bylo navržení vhodného diagnostického postupu pro sledování vybraných akustických parametrů výbojové činnosti.

Tato práce se dělí do několika částí. V první části byla provedena rešerše částečných výbojů a metod kterými se dají měřit. Druhá část se zabývala rozborem akustických metod měření. Ve třetí části byla navržena vhodná diagnostická metoda, kterou tvořil výběr mikrofonu a měřicí karty. V poslední části byla provedena analýza experimentálních měření a jejich porovnání s referenční metodou. Na závěr práce jsou uvedeny výsledky experimentálního měření.

## **Klíčová slova**

Akustika, částečné výboje, povrchové výboje, korónové výboje, frekvence, zisk, četnost, intenzita, fázorový diagram.

## **Abstract**

This thesis addresses the measurement of partial discharges using the acoustic method. The task of this work was to design a suitable diagnostic procedure for monitoring selected acoustic parameters of discharge activity.

The thesis is divided into several parts. The first part involved a review of partial discharges and the methods by which they can be measured. The second part dealt with the analysis of acoustic measurement methods. In the third part, an appropriate diagnostic method was proposed, which consisted of selecting a microphone and a measurement card. In the last part, an analysis of experimental results and their comparison with a reference method was conducted. The conclusions of the thesis present the results of the experimental measurements.

## **Key Words**

Acoustics, partial discharges, surface discharges, corona discharges, frequency, gain, frequency (in the context of occurrence), intensity, phasor diagram.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval doc. Ing. Josefu Piherovi, Ph.D za odbornou pomoc, ochotu a vedení při zpracování této diplomové práce. Také bych rád poděkoval Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D za pomoc při zpracování akustických dat.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2024-008 „Materiály a technologie pro elektrotechniku“.

# Obsah

Úvod do problematiky měření částečných výbojů .....	- 1 -
1 Částečné výboje .....	- 2 -
1.1 Druhy částečných výbojů .....	- 2 -
1.2 Metody detekce částečných výbojů .....	- 5 -
1.3 Detekce částečných výbojů pomocí elektrických veličin .....	- 6 -
1.4 Detekce částečných výbojů pomocí neelektrických veličin .....	- 8 -
2 Akustické metody detekce částečných výbojů .....	- 9 -
2.1 Rozbor akustické metody .....	- 9 -
2.2 Lokalizace částečného výboje akustickou metodou .....	- 10 -
2.3 Charakteristika akustického signálu .....	- 11 -
2.4 Charakteristika korónového výboje .....	- 12 -
2.4.1 Režim zpožděného průrazu .....	- 13 -
2.4.2 Frekvenční režim Trichelova impulzu .....	- 13 -
2.4.3 Tlumený Trichelův výboj (monotónního nárůst proudu) .....	- 14 -
2.4.4 Režim streamerového výboje (vysoký proud) .....	- 14 -
3 Návrh vhodné diagnostické metody .....	- 15 -
3.1 Zvolení mikrofону .....	- 15 -
3.1.1 Výběr mikrofónů .....	- 15 -
3.2 Výběr měřicí karty .....	- 16 -
4 Experimentální akustické měření .....	- 18 -
4.1.1 Povrchové výboje .....	- 19 -
4.2 Korónového výboje .....	- 26 -
5 Porovnání akustického měření s referenční metodou .....	- 30 -
5.1 Povrchové výboje .....	- 30 -
5.2 Korónového výboje .....	- 33 -
Zhodnocení a závěr .....	- 39 -
Literatura .....	- 40 -
Přílohy .....	I

5.3	Vytvoření programu .....	I
5.4	Uzemnění karty a nastavení profilu měření.....	II
5.5	Testování karty pomocí frekvenčního generátoru .....	IV
5.6	Testování kalibrace mikrofonu.....	VI



## Seznam symbolů a zkratk

$I$	A	elektrický proud
$U$	V	elektrické napětí
$U_z$	V	zapalovací napětí
$Z$	$\Omega$	impedance
$E$	V/m	intenzita elektrického pole
$f$	Hz	frekvence
$Zisk$	dB	akustický zisk
$R$	1/s	četnost výbojů
$Q$	nC	náboj

## Úvod do problematiky měření částečných výbojů

Měření a monitorování částečných výbojů je důležité kvůli rychlému nárůstu nových technologií, které zvyšují četnost částečných výbojů v elektrických zařízeních, kde doposud neexistovaly nebo byly omezené. Tento jev má přímý dopad na snížení živostnosti a spolehlivosti zařízení, což zvyšuje požadavky na včasnou diagnostiku k jejich odhalení.

Tato práce se věnuje tématu detekce částečných výbojů za použití akustických metod. Cílem této práce byl návrh vhodného experimentálního měření využívající akustických emisí generovaných částečnými výboji a porovnání naměřených akustických hodnot s referenční globální galvanickou metodou, která je uvedena v literatuře [1].

Hlavní otázka této práce je, jestli je možné pomocí analýzy akustického spektra efektivně rozlišit mezi různými druhy částečných výbojů.

Pro měření částečných výbojů byl použit ultrazvukový mikrofon, jehož signál byl zpracován pomocí FFT analýzy. Pomocí této analýzy byl časový signál převeden a průměrován do frekvenčního spektra. Naměřené průběhy byly vyhodnoceny pomocí významných frekvenčních oblastí. Tyto průběhy byly porovnány s referenční metodou, která sloužila k ověření výsledku měření.

# 1 Částečné výboje

Podle normy IEC 60270 jsou částečné výboje definovány jako výboje, které nezpůsobují kompletní přemostění mezi elektrodami. Tyto výboje obvykle vznikají v důsledku lokálního elektrického namáhání uvnitř i na povrchu dielektrického materiálu v místech nehomogenit materiálu nebo na rozhraních dvou dielektrik. Rozhraní mohou být vytvořena záměrně pro rozložení elektrického potenciálu, nebo mohou být výsledkem vady z nedokonalé výroby [2].

Částečné výboje jsou generovány v plynových dutinkách elektroizolačního systému různých velikostí. Tyto výboje závisí na Paschenově zákonu a jejich aktivita se mění v závislosti na velikosti dutinek. Pro zahájení výboje jsou nezbytné dvě podmínky, a to dostatečně silné elektrické pole pokrývající dostatečně velkou oblast a přítomnost prvotního elektronu, který zahajuje ionizační proces [1].

Výbojová aktivita zahrnuje vytvoření elektronové laviny a generování ionizační vlny, známé jako streamer. Tento proces je velmi rychlý, probíhá v nanosekundovém rozsahu. Změna napětí ovlivňuje intenzitu a frekvenci výbojů, přičemž cyklus výboje se opakuje s každým zotavením a zvýšením napětí [3].

Frekvenci částečných výbojů ovlivňuje mnoho faktorů, včetně rozdílu potenciálů na nehomogenitách, geometrie nehomogenit, kvality izolace, teploty a vlhkosti materiálu. Tyto faktory ovlivňují dobu mezi jednotlivými výboji a celkovou stabilitu izolačního systému [1].

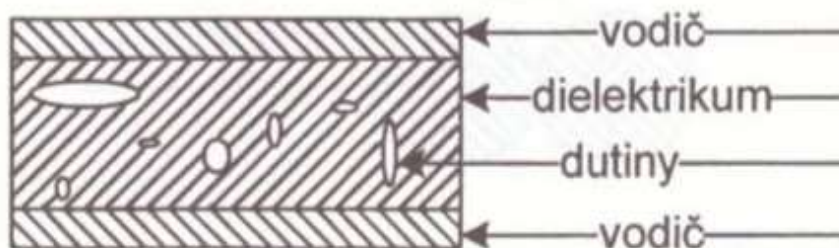
Účinky částečných výbojů na izolační materiál zahrnují chemické změny, vznik plyných, kapalných a pevných produktů, které mohou ovlivnit izolační vlastnosti. Elektrické, erozivní a tepelné účinky mohou vést k degradaci a fyzickému poškození izolačního materiálu, čímž urychlují jeho stárnutí [1].

## 1.1 Druhy částečných výbojů

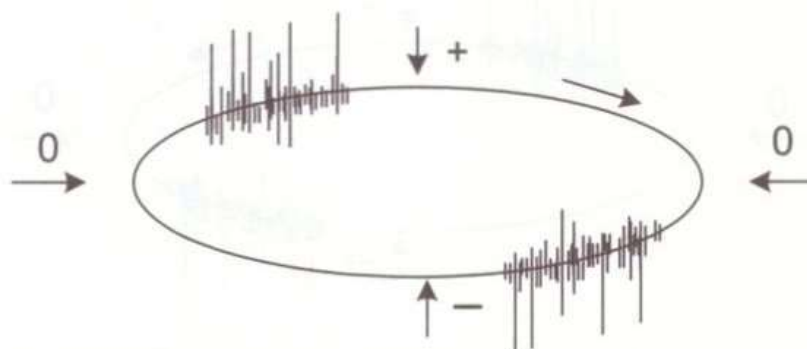
Druhy částečných výbojů se dělí na tři základní typy, které je možné identifikovat pomocí fázorového diagramu. Tyto typy mohou být rozděleny podle umístění výbojové činnosti na fázorovém diagramu. To umožňuje identifikaci charakteru a lokalizace výboje.

Vnitřní výboje se vyskytují v dutinkách izolačního systému na bázi pryskyřic viz Obr. 1. Tyto dutinky vznikají kvůli nedokonalostem výrobní technologie. Vnitřní výboje mají

charakteristickou pozici na fázorovém diagramu, kde jsou rozmístěny v první polovině kladné a záporné části amplitudy viz Obr. 2 [1].

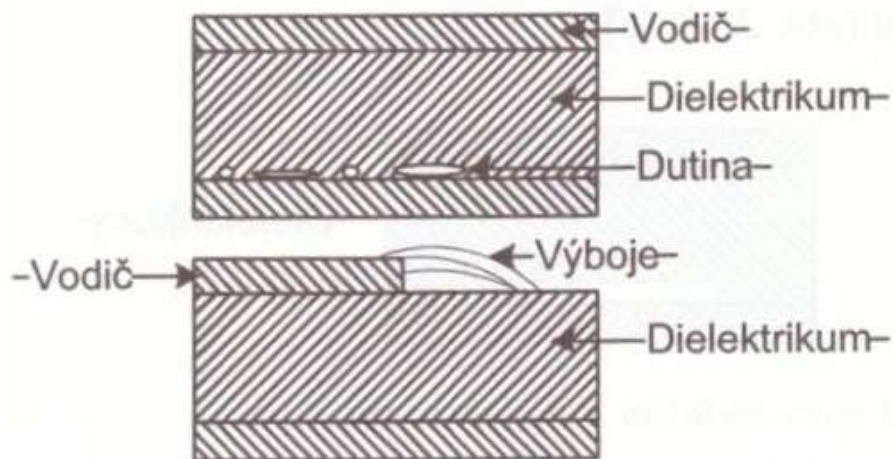


**Obr. 1. Vnitřní výboje [1]**

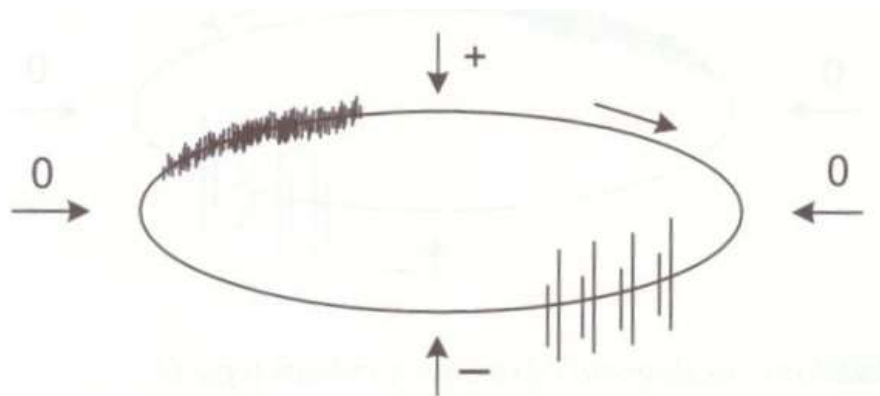


**Obr. 2. Modelový oscilogram vnitřních výbojů [1]**

Povrchové výboje vznikají v dutinkách a delaminacích mezi izolačním systémem a vodičem viz Obr. 3. Tyto výboje jsou rozmístěny v první polovině kladné a záporné části amplitudy, přičemž v kladné části amplitudy dosahují vyšší četnosti než v záporné viz Obr. 4.

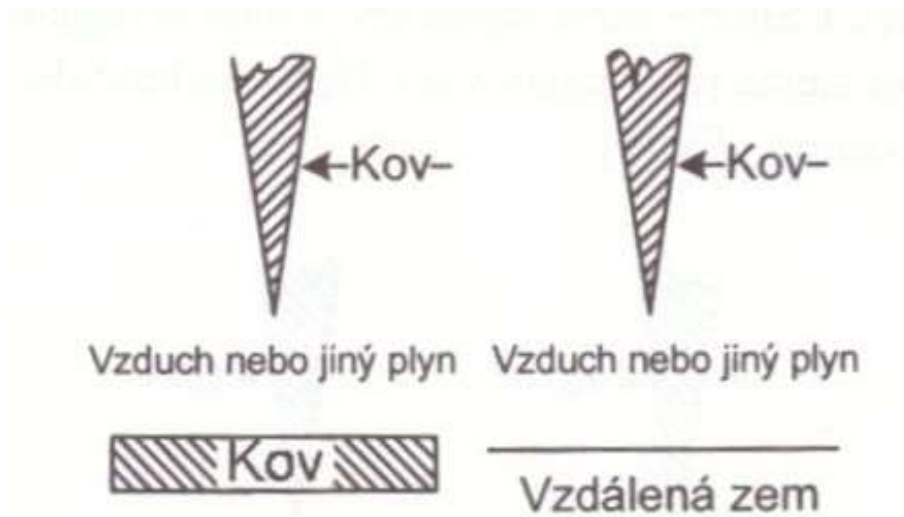


**Obr. 3. Povrchové výboje [1]**

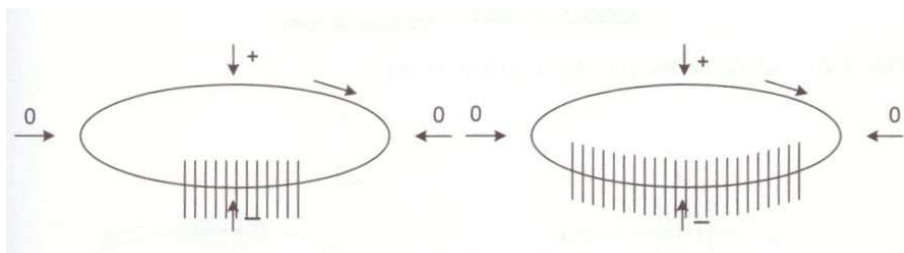


**Obr. 4. Modelový oscilogram povrchových výbojů [1]**

Korónové výboje se vyskytují v okolí ostrých kovových hrotů a hran, které jsou lokalizovány ve vzduchovém rozhraní viz Obr. 5. Na fázorovém diagramu jsou tyto výboje typické svým umístěním kolem maxima záporné části amplitudy.



**Obr. 5. Uspořádání způsobující korónové výboje [1]**



**Obr. 6. Modelový oscilogram korónových výbojů [1]**

## 1.2 Metody detekce částečných výbojů

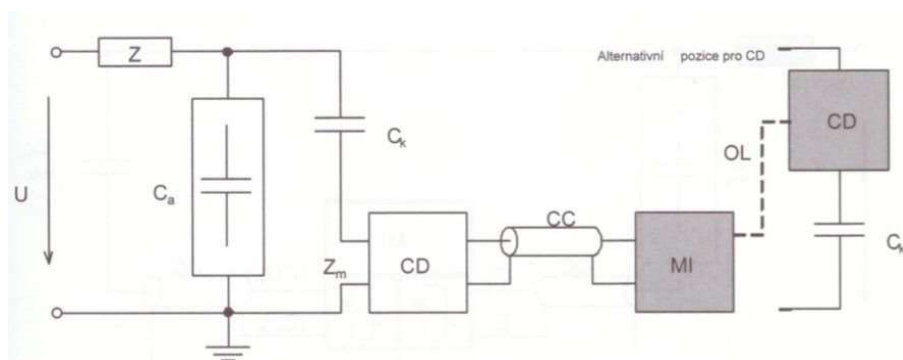
Metody měření jsou kategorizovány na základě typu fyzikálních jevů, které mohou být elektrické či neelektrické. Pro měření částečných výbojů se obvykle využívají elektrické metody založené na detekci proudových impulzů. Kromě toho částečné výboje generují vysokofrekvenční elektromagnetické pole a projevují se také akusticky, chemicky, světelně a tepelně, což lze monitorovat neelektrickými měřicími metodami [1].

Měřicí metody se dělí na globální a lokalizační. Globální metody poskytují komplexní hodnocení částečných výbojů, zahrnující intenzitu a frekvenci výbojů, což reflektuje celkový stav zařízení a slouží k posouzení kvality systému. Lokalizační metody naopak určují specifickou pozici částečných výbojů v rámci zařízení a bývají často používány společně s globálními metodami [1].

### 1.3 Detekce částečných výbojů pomocí elektrických veličin

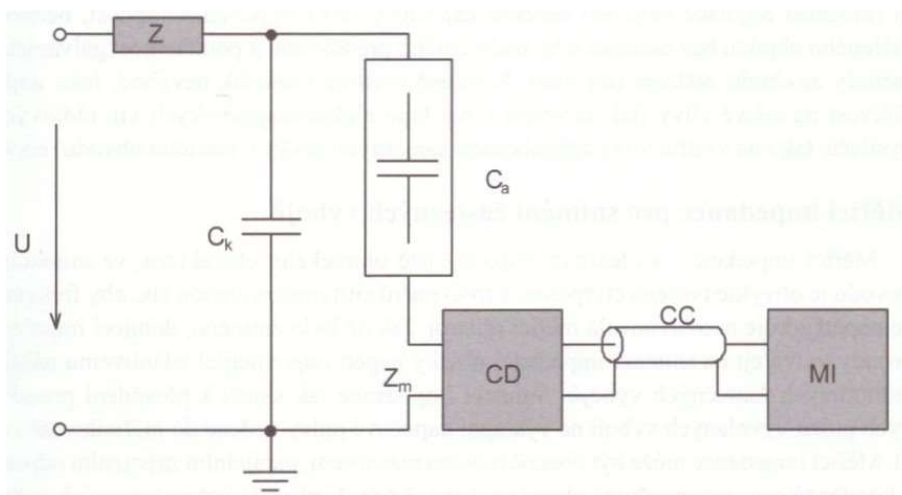
Nejčastěji používanou metodou pro detekci částečných výbojů je globální galvanická metoda. Tato metoda spočívá v měření proudových impulzů pomocí impedance realizované RLC obvodem. K základnímu RLC členu jsou přidány ochranné a filtrační prvky, které izolují systém od vnějších rušivých vlivů a filtrují vyšší frekvence od 50 Hz napájecí sítě [1].

Metoda je specifikována třemi zapojeními podle normy ČSN EN 60270. První zapojení, zobrazené na Obr. 7, se využívá pro měření uzemněných objektů s velkou kapacitou. V tomto zapojení je impedance integrována do větve vazebního kondenzátoru, což umožňuje snímání impulzů bez rizika poškození detekčního obvodu při možném průrazu zkoumaného objektu [1].



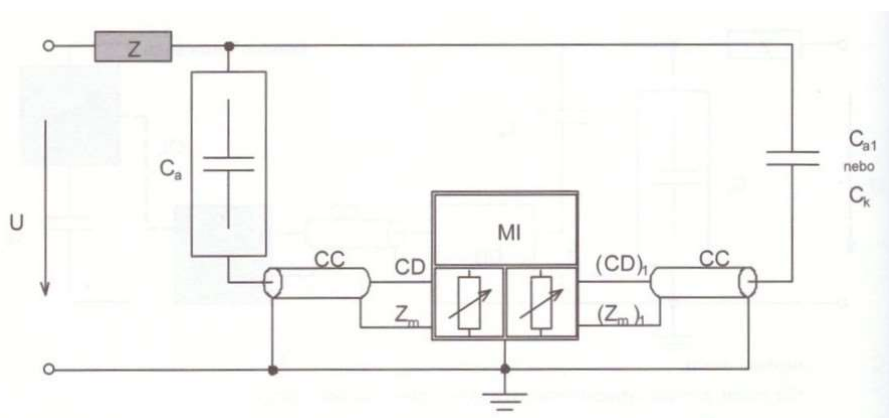
**Obr. 7. Obvod s paralelní snímací impedancí [1]**

Druhé zapojení, ilustrované na Obr. 8, se aplikuje v zařízeních, která je možné odpojit od uzemnění. Tento postup zvyšuje citlivost měření díky rozptylovým kapacitám připojeným paralelně k vazebnímu kondenzátoru. Pokud převyšuje rozptylová kapacita obvodu k zemi kapacitu zkoumaného objektu, může být vazební kondenzátor z obvodu vyřazen [1].



**Obr. 8. Obvod se sériovou snímací impedancí [1]**

Poslední zapojení, prezentované na Obr. 11, se používá přímo v místě instalace měřeného objektu a je zaměřeno na potlačení vnějšího rušení. V tomto zapojení se rozdílové proudové impulzy snímají na měřicích impedancích, které jsou individuálně nastavovány. Jako vazební kondenzátor, jehož kapacita je srovnatelná s kapacitou měřeného objektu, může být využit i jiný objekt se známou úrovní částečných výbojů [1].



**Obr. 9. Obvod v můstkovém zapojení [1]**

Všechna uvedená zapojení využívají vysokonapěťový vazební kondenzátor s vysokou kapacitou a velmi nízkou hodnotou indukčnosti, která je výrazně vyšší než kapacita měřeného obvodu. Vazební kondenzátor v obvodu musí vykazovat minimální výbojovou činnost, tj. méně než 1 pC, a slouží ke kompenzaci přechodových změn napětí, které generují proudové pulzy [1].

Kromě této metody existují i další techniky umožňující měření elektrických veličin spojených s částečnými výboji. Měření lze provádět pomocí nepřímých metod, které



zahrnují detekci elektromagnetického pole generovaného při výbojové činnosti. Tyto metody využívají různé druhy antén, induktivních snímačů a specifických sond umístěných na vnějším plášti zařízení, uvnitř vinutí nebo kolem napájecích kabelů, sloužících k lokalizaci, identifikaci a kvantifikaci částečných výbojů [1].

Pro měření pomocí nepřímé metody se používají induktivně vázané sondy, diferenciální elektromagnetické sondy, kapacitní drážkové sondy, Lemke sondy a induktivní snímače.

Hlavní předností těchto metod je možnost využití pro online diagnostiku bez nutnosti přerušování provozu zařízení, což je zvláště cenné v aplikacích, kde je důležitá kontinuita provozu, jako je výroba energie nebo distribuční soustava. Díky těmto technologiím lze získávat podrobné informace o elektromagnetickém poli generovaném částečnými výboji, což napomáhá v rané identifikaci poruch a předcházení potenciálním výpadkům [1].

Pro měření experimentu bylo použito zapojení se sériovou snímací impedancí.

#### **1.4 Detekce částečných výbojů pomocí neelektrických veličin**

Měření částečných výbojů pomocí neelektrických metod je zaměřeno na snímání různých fyzikálních a chemických jevů, které jsou vytvářeny během výbojové činnosti. Tyto metody zahrnují detekci chemických zplodin, jež jsou produktem rozkladu izolačních materiálů, zachycení světelného záření emitovaného během výboje, měření tepelného ohřevu způsobeného uvolněním energie a snímání zvukových vln v slyšitelném a ultrazvukovém pásmu, vznikajících rychlým uvolněním energie při částečných výbojích [4].

Akustická detekce je prováděna pomocí senzorů, jež zaznamenávají ultrazvukové vlny, což umožňuje přesnou lokalizaci zdroje výbojů i v komplexních nebo nedostupných systémech. Optická detekce se zaměřuje na světelné emise, přičemž optické senzory a kamery mohou identifikovat a lokalizovat částečné výboje i na velké vzdálenosti. Chemická detekce je založena na analýze chemických změn nebo vzniku nových látek jako důsledek výbojové aktivity, což zahrnuje analýzu izolačních olejů a potahových materiálů. Kromě toho je využívána detekce ozonu generovaného elektrickými výboji, což poskytuje důležitou indikaci přítomnosti a intenzity částečných výbojů [1].

Tyto neelektrické metody měření poskytují komplexní nástroje pro diagnostiku a monitorování stavu elektrických izolačních systémů, umožňující efektivní identifikaci potenciálních problémů bez nutnosti přerušování provozu zařízení. Některé z těchto metod poskytují možnost integrování senzorů do konstrukce elektrického stroje.

## 2 Akustické metody detekce částečných výbojů

### 2.1 Rozbor akustické metody

Akustická metoda měření částečných výbojů patří mezi neelektrické metody a využívá akustické signály pro detekci a lokalizaci výbojových jevů. Akustický signál je zvuková vlna, která vzniká jako důsledek rychlého uvolnění energie během částečného výboje v izolačním materiálu.

V praxi akustická metoda používá senzory citlivé na zvukové vlny generované částečnými výboji. Tyto senzory zachytí ultrazvukové vlny, které jsou lidským uchem neslyšitelné. Tento signál poskytuje informace o změně lokálního akustického tlaku. Díky jednoduchému provedení je tato metoda použitelná v širokém spektru prostředí, jako je aplikace v energetice, kde přesné lokalizování výbojů může předcházet poruchám a zvyšovat spolehlivost zařízení.

Jednou z klíčových výhod akustické metody je její odolnost proti elektromagnetickému rušení, což umožňuje její použití i v elektricky rušivém prostředí bez ovlivnění kvality získaných dat. Tato metoda umožňuje provádět měření bezkontaktně, což zvyšuje bezpečnost při diagnostice vysokonapěťových nebo obtížně přístupných zařízení.

Akustická metoda má omezení, která jsou zásadně ovlivněna druhem izolačního a krycího materiálu, tlakem prostředí, teplotou a vlhkostí. Komplexní problém představuje vliv izolačního materiálu, který svým složením, teplotou a tloušťkou tlumí akustické vibrace vytvořené částečnými výboji. Dále dochází k přeměně akustické energie na vnitřní molekulární energii, což vede k relaxačním a ztrátovým účinkům. Tyto ztráty se zvyšují v tekutých izolačních materiálech, jako jsou oleje v transformátorech, kde útlum zvuku je exponenciální funkcí vzdálenosti od zdroje vzniku [5] [6].

Naproti tomu v pevných materiálech je akustický tlak utlumen pouze šířením vlny, přičemž amplituda sférické vlny nebo zvukového paprsku klesá nepřímo se vzdáleností od zdroje viz Tab. 1 Materiály, které vykazují ztrátové charakteristiky, mohou útlum ještě zvýšit, což komplikuje měření [5] [6].

Tato metoda tak nabízí sofistikovaný, ale zároveň náročný přístup k monitorování a diagnostice částečných výbojů, který je klíčový pro udržení kvality a funkčnosti elektrických izolačních systémů ve vysokonapěťových aplikacích.

**Tab. 1. Útlum zvuku pro různé frekvence při 20 °C a relativní vlhkosti 50 %**

Frekvence (Hz)	Koeficient absorpce (dB/m)
10	0,000000185
100	0,000000189
1000	0,000000651
10000	0,0000468
20000	0,000187
30000	0,00042
40000	0,000746
50000	0,00117
60000	0,00168
70000	0,00228
80000	0,00298
90000	0,00377
100000	0,00466
110000	0,00564
120000	0,00671
130000	0,00787
140000	0,00913
150000	0,0105

## **2.2 Lokalizace částečného výboje akustickou metodou**

Lokalizace částečných výbojů představuje jednu z nejčastějších aplikací při monitorování stavu elektrických systémů. Tato metoda se uplatňuje jak v rozsáhlých prostorách obsahujících mnoho přístrojů, tak i pro detailní lokalizaci výbojů uvnitř jednotlivých strojů [1].

Pro lokalizaci v rozlehlých prostorách se často používá zvuková kamera, podobná termokameře. Kamera obsahuje matici zvukových senzorů rozmístěných ve stálých vzdálenostech. Senzory zaznamenávají zvuk a odesílají data do procesoru zařízení, který následně vyhodnotí časové zpoždění dopadajícího zvuku mezi senzory a určí původ impulzu [7].

Lokalizace zdroje částečných výbojů uvnitř elektrických zařízení vyžaduje detailní mapování akustických signálů generovaných výboji. Při tomto postupu je kolem zařízení umístěno několik senzorů, které provádějí měření během normálního provozu. Naměřené údaje jsou integrovány do digitálního modelu zařízení, což pomáhá identifikovat původ akustického signálu. Výpočetní proces spočívá v použití komplexního matematického modelu, který zohledňuje přímé akustické vlny směřující rovnou do senzorů, odražené vlny interagující s materiály různých hustot a podélné vlny šířící se přes kovovou konstrukci zařízení. Rychlé šíření signálů kovovou strukturou může vést k chybným detekcím kvůli minimálním časovým rozdílům v příjmu signálů senzory [7] [6] [8].

Metodika lokalizace je popsána v literatuře [6] a [9]. Zahrnuje metody jako průměrování akustických signálů pro zvýšení citlivosti, automatizované určování času příchodu signálu a pokročilé de-noising techniky pomocí vlnové transformace, což zvyšuje přesnost lokalizace defektů. Tato metoda umožňuje efektivně identifikovat a lokalizovat zdroje částečných výbojů, což je klíčové pro údržbu a spolehlivost elektrických systémů.

### **2.3 Charakteristika akustického signálu**

Jak bylo uvedeno v teorii částečných výbojů, ionizace média vytváří ideální prostředí pro průchod elektrického proudu. Tyto rychlé pohyby a srážky nabitých částic, jako jsou elektrony a ionty, generují zvukové vlny prostřednictvím adiabatických procesů komprese a expanze vzduchu [5] [6] [10].

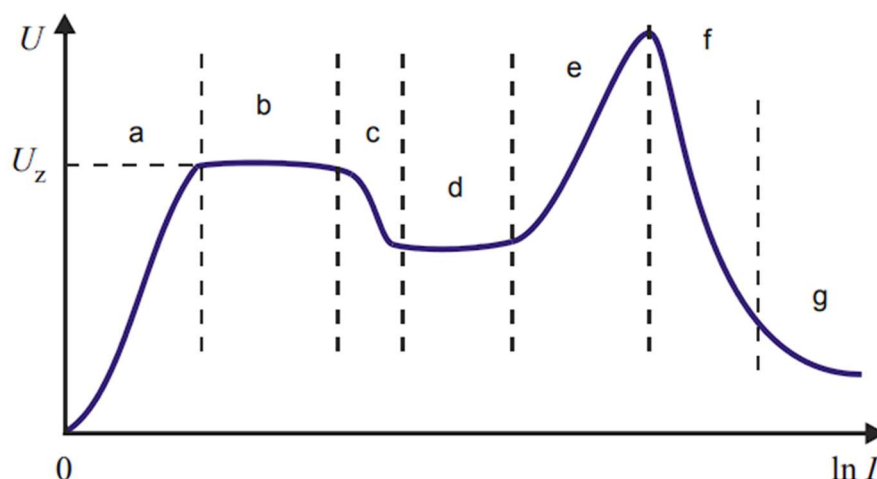
Spektrum akustického výboje může dosahovat frekvencí až několik MHz, což je způsobeno krátkým časovým úsekem, obvykle kolem 1 ns, během kterého výboj probíhá. Frekvence je rovněž ovlivněna typem výboje a materiálem, jímž se vlny šíří [1].

Při měření částečných výbojů akustickou metodou je zásadní dbát na optimální úhel a vzdálenost senzoru od měřeného objektu. Důležitým parametrem je také velikost senzoru, která může na určitých frekvencích vytvářet akustické stíny ovlivňující kvalitu měření.

Pro detekci částečných výbojů se typicky používají piezoelektrické senzory instalované na vnější stěně měřeného objektu. Výsledný frekvenční rozsah těchto senzorů se obvykle pohybuje mezi 50 a 200 kHz, což umožňuje efektivní zaznamenání akustických signálů relevantních pro identifikaci a lokalizaci výbojů [11].

## 2.4 Charakteristika korónového výboje

Pro definování charakteru koróny byla použita práce [12], definující druhy elektrických výbojů ve vzduchu. Tato práce byla porovnána s článkem [13] popisujícím fyzikální projevy na rozhraní elektrody při korónovém výboji.



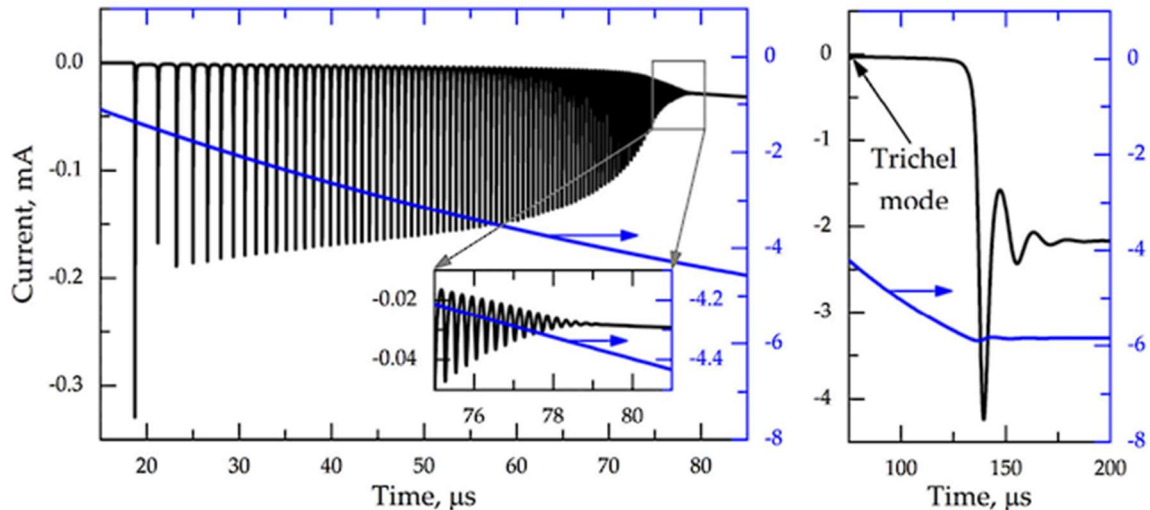
*Obr. 10. Druhy elektrických výbojů [12]*

Práce [12] udává druhy elektrického výboje, jako závislost proudu na napětí zobrazeného na Obr. 10. V oblasti *a*) se nachází nesamostatný výboj, který má dostatečně veliké ionizační činidlo pro vedení elektrického proudu. Napětí v této oblasti dosahuje úroveň zapalovacího napětí  $U_z$ .

V oblasti *b*) se vyskytuje šumění, syčení a prskání, což jsou charakteristiky Townsendových výbojů. Oblast *c*) je typická pro korónové výboje sestávající z Trichelových výbojů. Doutnavé výboje charakterizují oblast *d*) a obvykle se vyskytují se ve zředěných plynech při nízkém tlaku, až desetinách atmosférického tlaku.

Oblast *e*) je pojmenována jako anomální elektrický výboj, který se vyznačuje vyšším proudem a teplotou katody. V oblasti *f*) dochází k jiskrovým výbojům, které se zapalují při velmi vysoké intenzitě elektrického pole  $E = 10^6$  V/m. Jiskrový kanál má vysokou vodivost a přemostuje vzdálenost mezi elektrodami. Pokud je napájecí zdroj dostatečně silný, tak výboje přechází do oblasti *g*), kde převládá obloukový typ výboje [12].

Při porovnání s článkem [13], byly identifikovány čtyři různé režimy, kterými korónové výboje prochází.



*Obr. 11. Časový profil proudu v závislosti na přiloženém napětí [13]*

#### 2.4.1 Režim zpožděného průrazu

První fáze začíná, když jsou elektrony generovány exponenciálně v blízkosti hrotu elektrody. Tato fáze začíná emisí jednoho elektronu na povrchu jehlové elektrody. Na konci této iniciační fáze se proudová hustota v blízkosti hrotu zvýší na hodnotu, která nepřekračuje  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ , aniž by došlo k deformaci elektrického pole. Fáze trvá od 0 do 19 mikrosekund a je zobrazena na Obr. 11. Tato fáze předchází výbojové činnosti, která nastává s nárůstem napětí, kde začne prostorový náboj zkreslovat elektrické pole, což vyvolává kladnou zpětnou vazbu a rychlý nárůst hustoty plazmatu. Tento jev se projevuje prudkým nárůstem proudu a signalizuje přechod do další fáze korónového výboje [13].

#### 2.4.2 Frekvenční režim Trichelova impulsu

Druhá fáze korónového výboje začíná rapidním zvýšením hustoty plazmatu na povrchu jehlové elektrody, což vede k vytvoření prvního pulzu, následovaného dalšími proudovými impulzy, známými jako Trichelovy impulzy. Jak ukazuje Obr. 11, první impuls dosahuje maximální proudové amplitudy a je následován dalšími impulzy, jejichž četnost se zvyšujícím se napětím narůstá, zatímco jejich proudová amplituda klesá [13].

Tyto pulzy vznikají akumulací negativních iontů v oblasti hrotu, kde je elektrické pole relativně slabé. Mezi jednotlivými proudovými pulzy dochází k postupnému snížení hustoty negativních iontů vlivem proudového toku a dochází zde k lokálnímu zvýšení teploty. Po odstranění negativních iontů se rozdělení elektrického pole vrátí na původní úroveň, což vede k opakování tohoto procesu. [13].

Podle experimentu uvedeného v [13] se frekvence Trichelových pulzů pohybuje od 0,7 do 1,0 milionu pulzů za sekundu. Nadále experiment uvádí, že výbojový proud na konci módu Trichelových pulzů, tedy při přechodu do třetí fáze, nezávisí na zdrojovém napětí. Ukončení pulsního módu korónového výboje tak není určeno aplikovaným napětím, ale hustotou nahromaděného plazmatu v blízkosti špičky jehlové katody.

#### **2.4.3 Tlumený Trichelův výboj (monotónního nárůst proudu)**

Třetí fáze korónového výboje začíná tlumením Trichelových pulzů a je charakterizována monotónním nárůstem výbojového proudu, který vyvrcholí rychlým přechodem do módu vysokého proudu. Na konci pulsního módu se v mezeře mezi elektrodami vytváří taková hustota plazmatu, která monotónně klesá od hrotu k anodě, zatímco elektrické pole se blíží homogennímu rozdělení. Přechod z třetí do čtvrté fáze je charakterizován prudkým nárůstem proudu z mikro ampérové úrovně na mnohem vyšší hodnoty a má charakter relaxačně tlumené oscilace [13].

#### **2.4.4 Režim streamerového výboje (vysoký proud)**

V posledním režimu dochází ke vzniku streamerového výboje, který disponuje dostatečnou energií na překonání celé vzdálenosti mezi elektrodami. Tento jev je charakteristický vysokou hodnotou proudu a generováním výbojové činnosti, která je zaznamatelná i v slyšitelném spektru frekvencí [13].

## 3 Návrh vhodné diagnostické metody

### 3.1 Zvolení mikrofonu

Při výběru ultrazvukového mikrofonu je nezbytné zohlednit několik technických specifikací. Mikrofon musí být schopen detekovat frekvence až do 100 kHz s vysokou citlivostí, což umožňuje zachycení nízkých akustických signálů. Mikrofon musí mít nízkou hodnotu vlastního šumu. Mikrofon by měl mít co nejúžší tělo, aby nevytvářel akustické stíny, a robustní konstrukci, která odolá elektromagnetickému rušení uvnitř vysokonapěťového prostoru. Dalším parametrem je také lineární kalibrační charakteristika, která zajišťuje přesné a konzistentní měření napříč celým spektrem.

#### 3.1.1 Výběr mikrofonů

V této části byl vytvořen seznam mikrofonů použitelných pro měření částečných výbojů. Je zobrazený v Tab. 2 a Tab. 3, přičemž jsou zde zajímavé dva druhy mikrofonů.

Mikrofon typu 4178 od Brüel & Kjær je určen pro měření zvuku pomocí dvoumikrofonového zapojení. Tento mikrofon má externí polarizaci napájenou 200 V, dynamický rozsah 28–164 dB, frekvenční rozsah od 2.6 Hz do 180 kHz, společně s vlastním šumem 28 dB, Citlivostí 4 mV/Pa. Jeho design je optimalizován pro použití ve volném poli [14].

Mikrofon Roga Instruments MM310 je kapacitní tlakový přijímač určený pro měření ve volném poli s frekvenčním rozsahem 5 Hz až 100 kHz (+/- 2 dB). S citlivostí 3.5 mV/Pa a zkreslení limitním zvukovým tlakem při 3 % na 1 kHz až 168 dB je vhodný pro zachycení širokého spektra intenzit zvuku. Tento mikrofon má vlastní šum na úrovni 35 dB a využívá backelectret polarizaci. Jeho robustní konstrukce zajišťuje funkčnost v teplotním rozmezí od -50 do +100 °C a vlhkosti až 90 % při 70 °C [15].

Pro experimentální měření byl použit mikrofon RFT MV 201 Nr:6595, který jediný byl k dispozici na univerzitě a splňoval požadavky na parametry mikrofonu.



**Tab. 2: Kondenzátorové mikrofony**

Výrobce	Typ	Frekvenční rozsah
Brüel & Kjaer	4135	10 Hz–100 kHz
Brüel & Kjaer	4178	2,6 Hz–180 kHz
ROGA instruments	MM310	5 Hz-100 kHz
DODOTRONIC	ULTRAMIC250K	Max. 125 kHz
DODOTRONIC	ULTRAMIC384K	90 kHz-190 kHz
Avisoft-BlOacoustics	CM16/CMPA	2 kHz-200kHz
Wildlife Acoustic	SMM-U1	20kHz-190kHz

**Tab. 3: Hydrofonové mikrofony**

Výrobce	Typ	Frekvenční rozsah
Celesco	LC-10	1 kHz–100 kHz

### 3.2 Výběr měřicí karty

Pro výběr měřicí karty DAQ je rozhodující specifikovat frekvenční rozsah, zahrnující minimálně frekvence do 100 kHz a vzorkovací frekvenci minimálně dva krát větší, než je maximální frekvence rozsahu. Zvolená karta by měla disponovat dynamickým rozsahem nejméně 100 dB, umožňujícím rozlišit malé akustické signály od výrazných špiček. Bitové rozlišení je klíčové pro přesnou kvantifikaci změřených signálů. Doporučené rozlišení je 16bitů, přičemž 24bitové rozlišení nabízí výrazně vyšší přesnost. Efektivní izolace a filtrace jsou nezbytné pro minimalizaci rušení vnějších elektromagnetických zdrojů, zatímco anti-aliasingová ochrana je nutná pro eliminaci falešných signálů způsobených nízkou vzorkovací frekvencí ve vztahu k frekvenci signálu, což zaručuje spolehlivost a čistotu záznamu [16] [17] [18].

Základem experimentu je měřicí karta od firmy Nation Instruments. Tato zvuková karta je zvolena tak, aby dokázala zpracovat analogový signál do 200 kHz, měla alespoň 16bitové rozlišení naměřeného signálu, měla co největší citlivost a dokázala zpracovat i velmi malé zvukové signály, které je možné zaznamenat.

Zvolená karta, která byla dostupná na ZČU, má označení NI USB-6221. Tato karta má dva vstupní analogové kanály, které operují na 16bitech a dokážou zaznamenat signál s rychlostí

250 kS/s, což odpovídá 250 kHz. Karta splňuje další důležité parametry pro měření částečných výbojů, tyto parametry jsou uvedeny v Tab. 4

**Tab. 4 Katalogové hodnoty zvukové karty [19]**

Rozlišení	16 bit
Počet vzorků	250 kS/s
Maximální napětí	10 V
Maximální napěťový rozsah	-10 V, 10 V
Maximální přesnost napěťového rozsahu	3100 $\mu$ V
Maximální citlivost napěťového rozsahu	97,6 $\mu$ V
Minimální napěťový rozsah	-200 mV, 200mV
Minimální přesnost napěťového rozsahu	112 $\mu$ V
Minimální citlivost napěťového rozsahu	5,2 $\mu$ V
Vnitřní paměť	4095 vzorků

Zvuková karta NI USB-6221 splňuje všechny předpoklady pro měření částečných výbojů a zároveň je navržena tak, aby pracovala se softwarem Labview, sloužícím jako vizuální rozhraní, v kterém byl vytvořen program pro zpracování naměřených dat.

## 4 Experimentální akustické měření

Akustické měření povrchových výbojů bylo realizováno na třech různých materiálech v prostředí vysokonapěťové komory za standardních podmínek s teplotou přibližně 20 °C a vlhkostí vzduchu 50 %. Ultrazvukový mikrofón byl umístěn ve vzdálenosti 10 cm, orientovaný k hraně vodivé elektrody a izolační desky umístěné mezi elektrodami.

Naměřené akustické křivky pro jednotlivé materiály byly rozděleny do čtyř oblastí, z nichž byly vyhodnoceny první tři oblasti, jelikož v nich měřená výbojová činnost vykazovala významné změny v akustickém tlaku. Tyto významné oblasti byly analyzovány tak, že byly identifikovány maximální lokální zisky v daných frekvencích, ve kterých se tyto maximální hodnoty nacházely. Dále byly vypočítány průměry pro jednotlivé oblasti, z nichž byl následně vytvořen průměrný obalový profil. Dále byly specifikovány frekvence, ve kterých se významná lokální maxima vyskytovala.

Pro další hodnocení naměřených hodnot byla použita 1/3 oktávová analýza [20].

### Výpočet 1/3 oktávové analýzy

Střední frekvence:

$$f_s = f_{základní} \cdot 2^{\frac{n}{3}} \quad (1)$$

Dolní a horní frekvence:

$$f_{dolní} = f_s \cdot 2^{-\frac{1}{6}} \quad (2)$$

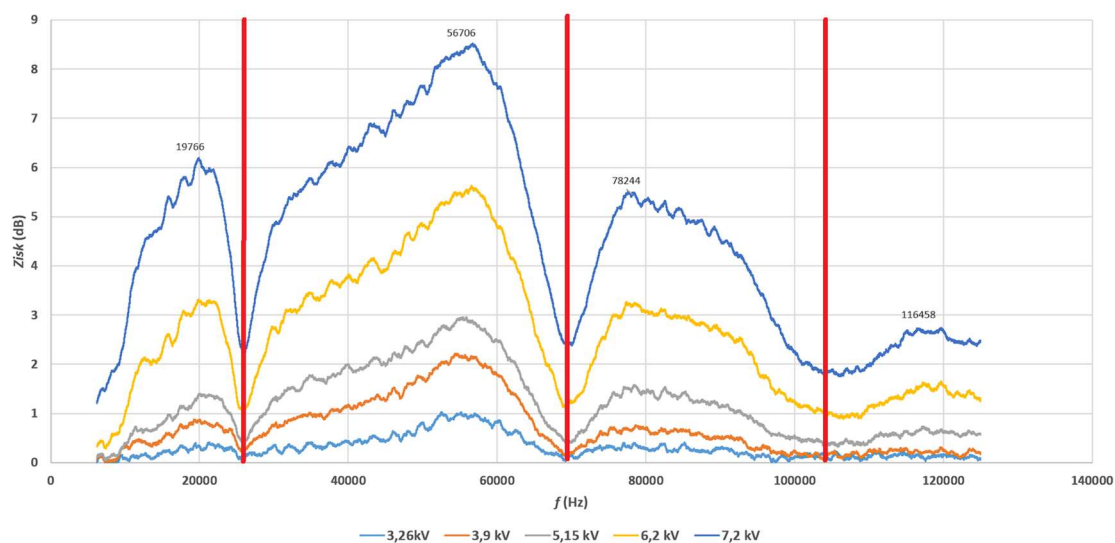
$$f_{horní} = f_s \cdot 2^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

**Tab. 5. Dupočítané frekvence pro 1/3 oktávovou analýzu**

Střední frekvence (kHz)	Dolní frekvence (kHz)	Horní frekvence (kHz)
20,00	17,82	22,45
25,20	22,45	28,28
31,70	28,28	35,64
40,00	35,64	44,90
50,40	44,90	56,57
63,50	56,57	71,27
80,00	71,27	89,80
100,80	89,80	113,14

#### 4.1.1 Povrchové výboje

První měřený materiál je Polymethylmetakrylát (PMMA) neboli plexisklo. Jedná se o tvrdý, hladký a akusticky odrazivý materiál. Na Obr. 12 jsou zobrazena naměřená data plazivého výboje pro jednotlivé napětí. V tomto grafu lze pozorovat, že při zvýšení hodnoty napětí dochází pouze ke zvýšení zisku, přičemž frekvenční spektra pro jednotlivé průběhy zůstávají přibližně stejná.



**Obr. 12. Spektrogram plazivých výbojů pro PMMA**

Vyhodnocení jednotlivých oblastí pro všechna napětí je zobrazeno v Tab. 6. První oblast se vyznačuje hladkým a prudkým nárůstem zisku, který postupně dosahuje vrcholu a poté se zplošťuje, což naznačuje, že většina hodnot s velkým ziskem je soustředěna v blízkosti tohoto maxima.

Druhá oblast grafu ukazuje pozvolný a téměř lineární nárůst zisku, který začíná kolem 30 kHz a roste až do maxima, od kterého začne zisk prudce klesat. Celý průběh druhé oblasti je hladký se ziskem rozptýleným po celém frekvenčním rozsahu této oblasti.

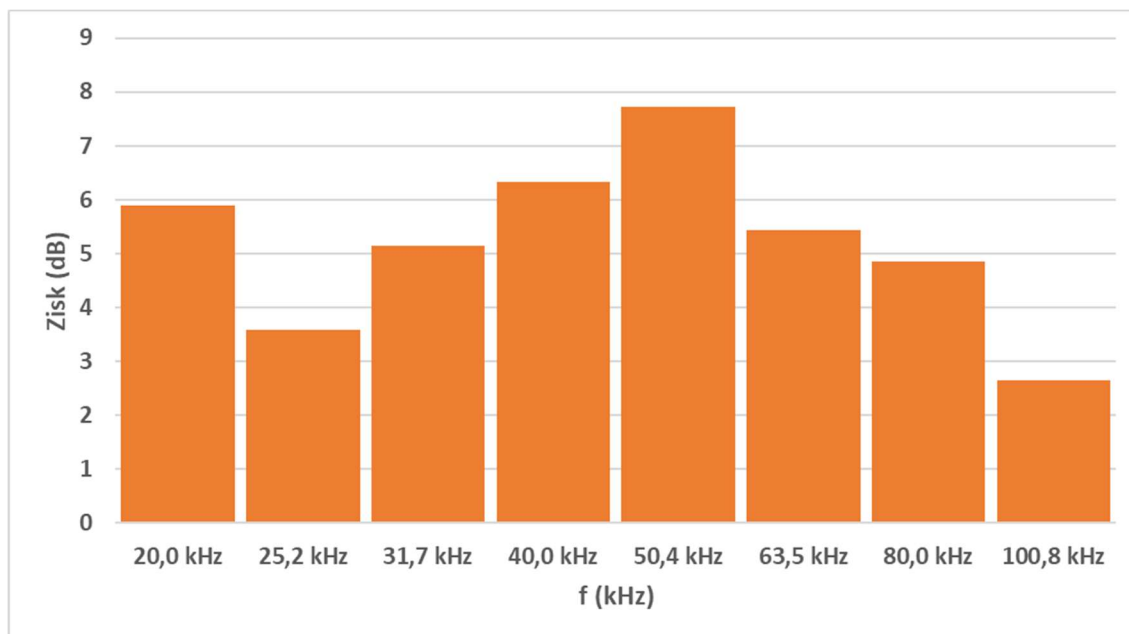
Třetí oblast je tvořena prudkým nárůstem zisku do maximální hodnoty, od které pozvolně klesá. Tato oblast je podobného charakteru jako druhá oblast, jen s kratším frekvenčním rozsahem.

Ve všech na analyzovaných oblastech se nenacházelo žádné významné lokální maximum.

**Tab. 6. Vyhodnocené oblasti pro PMMA**

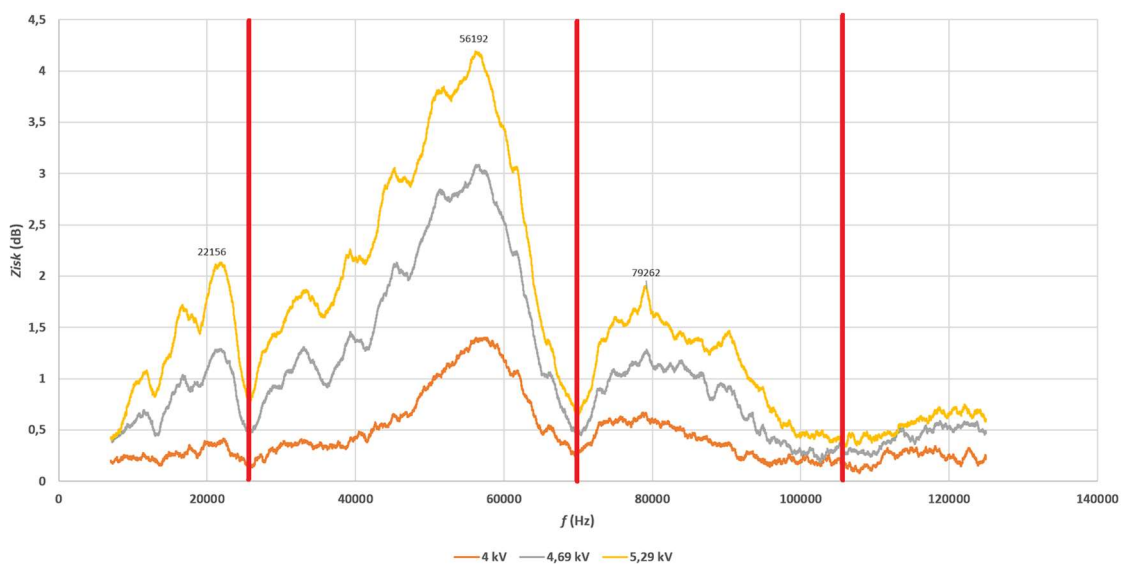
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
Šířka pláště (Hz)	6238 - 26092	26092 - 68950	68950 - 106240
Maximum (dB)	6,19	8,52	5,50
Frekvence maxima (Hz)	19910	56726	77640
Průměr (dB)	4,24	6,24	3,85
Průměr pláště (Hz)	12130 - 24136	39552 - 62872	73008 - 94119
Lokální max. 1. (Hz)	-	-	-

Na Obr. 13 je zobrazena 1/3 oktávová analýza s pásmem 50,4 kHz, které dosahuje nejvyššího zisku. Hodnoty na grafu jsou rovnoměrně rozděleny až na frekvenci oblast s 20 kHz.



**Obr. 13. 1/3 oktávová analýza PMMA**

Další měřený materiál je Polyuretan (PU), materiál hladký a akusticky absorpční. Na Obr. 14 jsou zobrazena naměřená data plazivého výboje pro jednotlivé napětí. V tomto grafu lze pozorovat, že při zvýšení hodnoty napětí dochází k navýšení zisku, přičemž frekvenční spektra zůstávají na stejné pozici. Při zvýšení napětí dochází ke vzniku lokálních maxim napříč celým spektrem.



**Obr. 14. Spektrogram plazivých výbojů pro PU**

V první oblasti je pozorován nárůst zisku až do maxima 2,14 dB. Během tohoto nárůstu jsou identifikována dvě lokální maxima, která jsou zaznamenána v

Tab. 7. Rozdělení zisku v této oblasti není rovnoměrné a většina hodnot s vysokým ziskem je lokalizována v blízkosti maxima.

Druhá oblast vykazuje růst do maximálního zisku s podobnou strmostí jako první oblast, přičemž během nárůstu se objevují čtyři lokální maxima. V porovnání s materiálem PMMA je průběh v této oblasti koncentrovanější kolem maximálního zisku a dosahuje nižší hodnoty maximálního zisku.

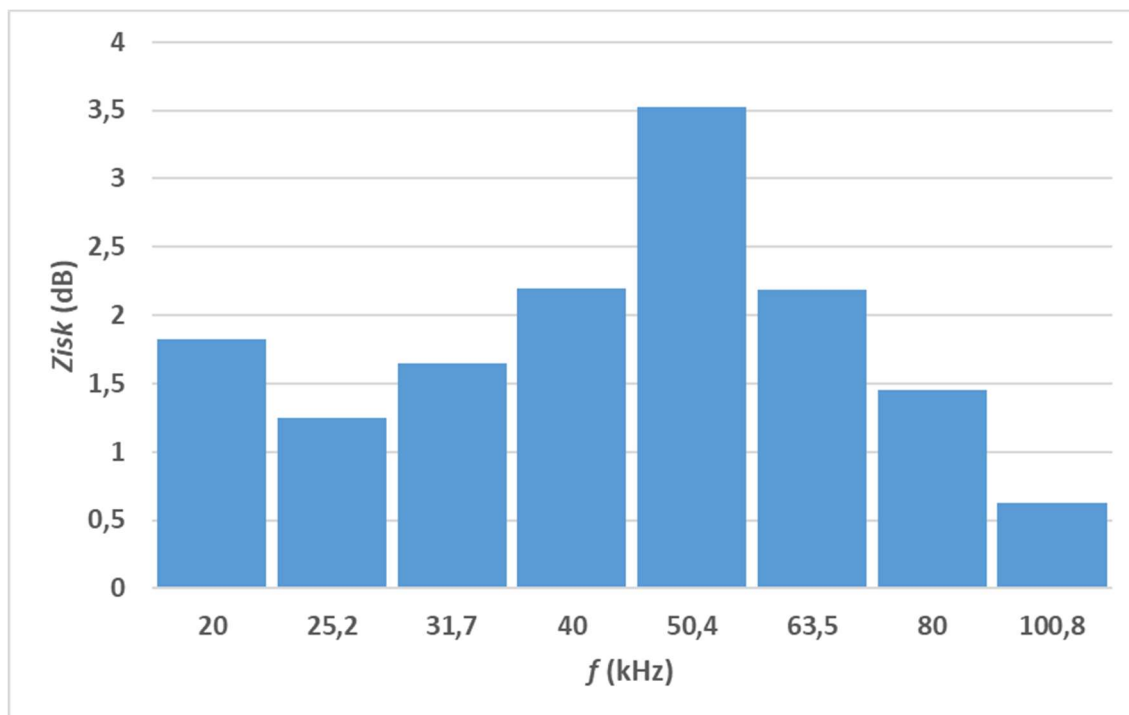
V první oblasti je pozorován nárůst zisku až do maxima 2,14 dB. Během tohoto nárůstu jsou identifikována dvě lokální maxima, která jsou zaznamenána v Tab. 7. Většina hodnot s vysokým ziskem se nachází v blízkosti těchto maxim.

Třetí oblast je charakterizována prudkým nárůstem zisku do maximální hodnoty, po které následuje pozvolný pokles, podobně jako u materiálu PMMA. V této oblasti jsou rovněž identifikována dvě lokální maxima.

**Tab. 7. Vyhodnocené oblasti pro PU**

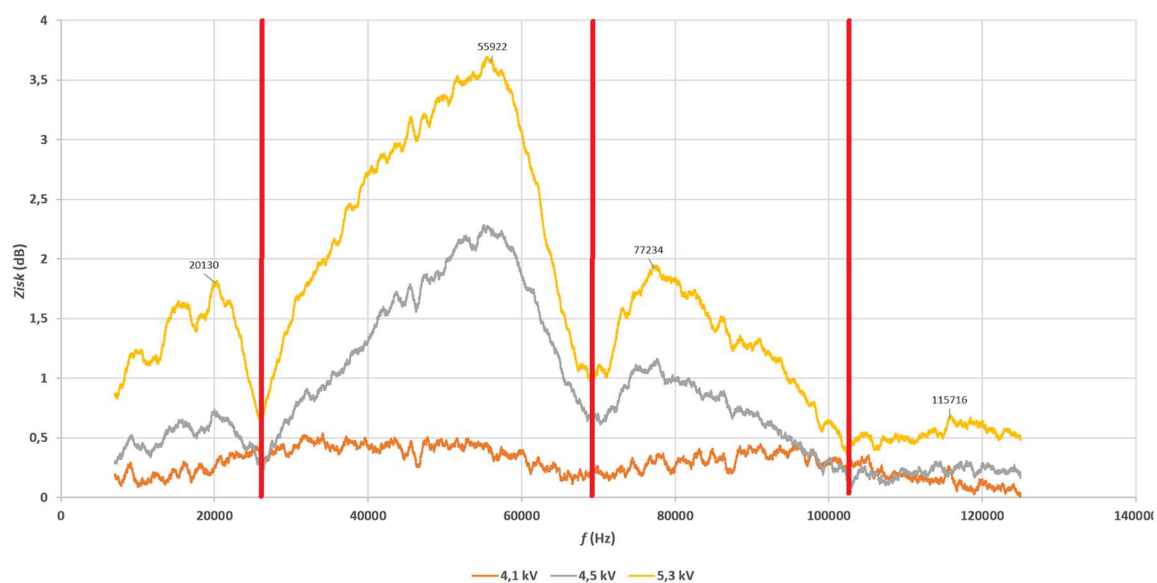
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
Šířka pláště (Hz)	5000 - 25888	25888 - 69910	69910 - 105848
Maximum (dB)	2,14	4,19	1,90
Frekvence maxima (Hz)	21992	56192	79036
Průměr (dB)	1,20	2,44	1,10
Průměr pláště (Hz)	14738 - 24294	42936 - 63050	72296 - 92424
Lokální max. 1. (Hz)	11838	33308	75018
Lokální max. 2. (Hz)	16690	39350	90320
Lokální max. 3. (Hz)	-	45126	-
Lokální max. 4. (Hz)	-	51928	-

Na Obr. 13 je zobrazena 1/3 oktávová analýza s pásmem 50,4 kHz které dosahuje nejvyššího zisku. Rozdělení zisku ve frekvenčních oblastech je rovnoměrné s větším poklesem zisku na vyšších frekvencích jak 63,5 kHz.



**Obr. 15. 1/3 oktávová analýza PU**

Poslední měřený materiál je EPDM. Jedná se o měkký a texturovaný materiál, který se používá jako podložka pro točivé stroje, a to kvůli svým akusticky pohltivým vlastnostem. Na Obr. 16 lze pozorovat, že při zvýšení hodnoty napětí dochází k navýšení zisku se vznikem lokálních maxim pouze v první oblasti. Tvar obálky zůstává zachován stejný pro všechny úrovně napětí.



**Obr. 16. Spektrogram plazivých výbojů pro EPDM**



V první oblasti dochází k nárůstu zisku do maxima, během kterého jsou zaznamenána dvě lokální maxima.

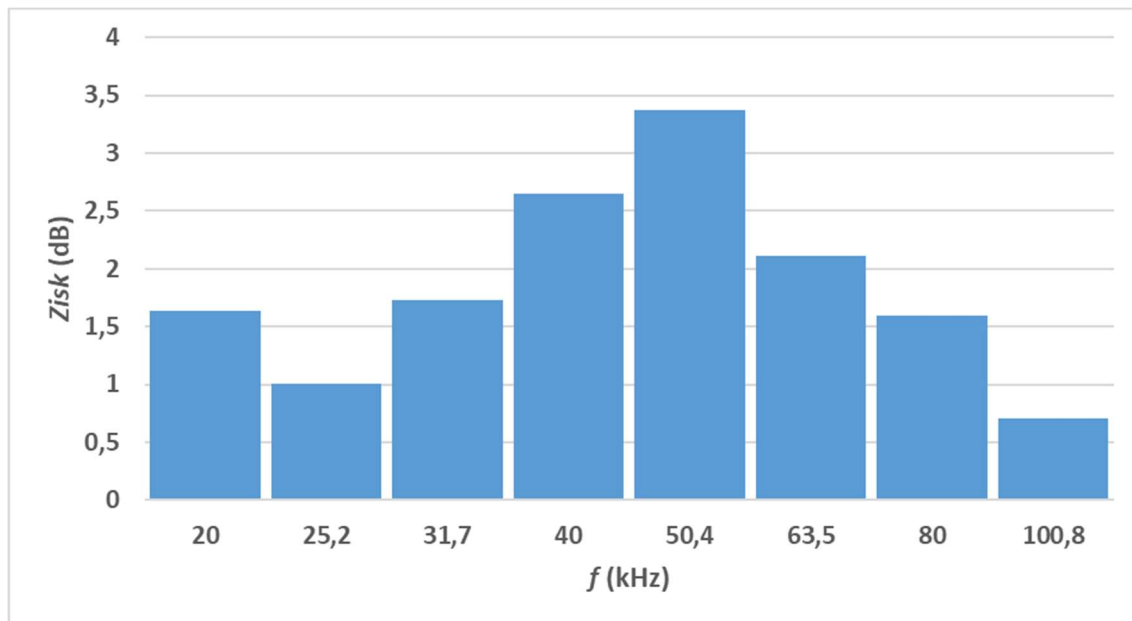
Druhá oblast vykazuje téměř lineární nárůst až do maximální hodnoty zisku, a ten následně prudce klesá. V porovnání s materiálem PMMA je rozložení zisku podobné. Hlavním rozdílem je však, že u materiálu EPDM je rozložení zisku koncentrovanější v užším frekvenčním pásmu a maximální hodnoty zisku jsou nižší než u materiálů PMMA a PU.

Třetí oblast se vyznačuje prudkým nárůstem zisku do maximální hodnoty, po kterém následuje pozvolný pokles. Ve srovnání s materiálem PMMA je tento pokles strmější a zisk je soustředěnější v blízkosti maxima.

**Tab. 8. Vyhodnocené oblasti pro EPDM**

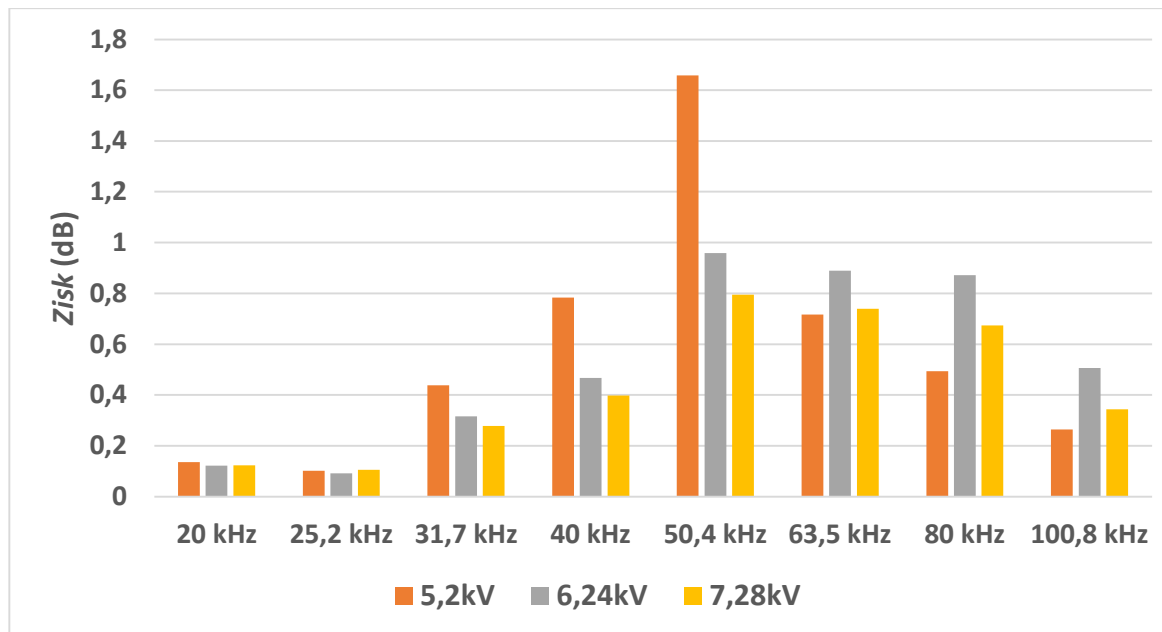
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
Šířka pláště (Hz)	7332 - 25886	25886 - 69004	69004 - 102376
Maximum (dB)	1,82	3,70	1,95
Frekvence maxima (Hz)	20260	55494	77288
Průměr (dB)	1,35	2,49	1,29
Průměr pláště (Hz)	4522 - 23382	38788 - 62422	88088 - 91204
Lokální max. 1. (Hz)	9770	-	-
Lokální max. 2. (Hz)	15332	-	-

Na Obr. 17 je zobrazena 1/3 oktávová analýza s frekvencí 50,4 kHz, kde byl zaznamenán nejvyšší zisk. Při porovnání s předchozími materiály vykazuje EPDM nejnižší zisk na všech frekvencích. Detailnější analýza grafu ukazuje, že oblast 25,2 kHz dosahuje výrazně nižšího zisku než předchozí materiály. Tento rozdíl je dán specifickými vlastnostmi EPDM, který je optimalizován pro absorpci zvuku a vibrací.



***Obr. 17. 1/3 oktávová analýza EPDM***

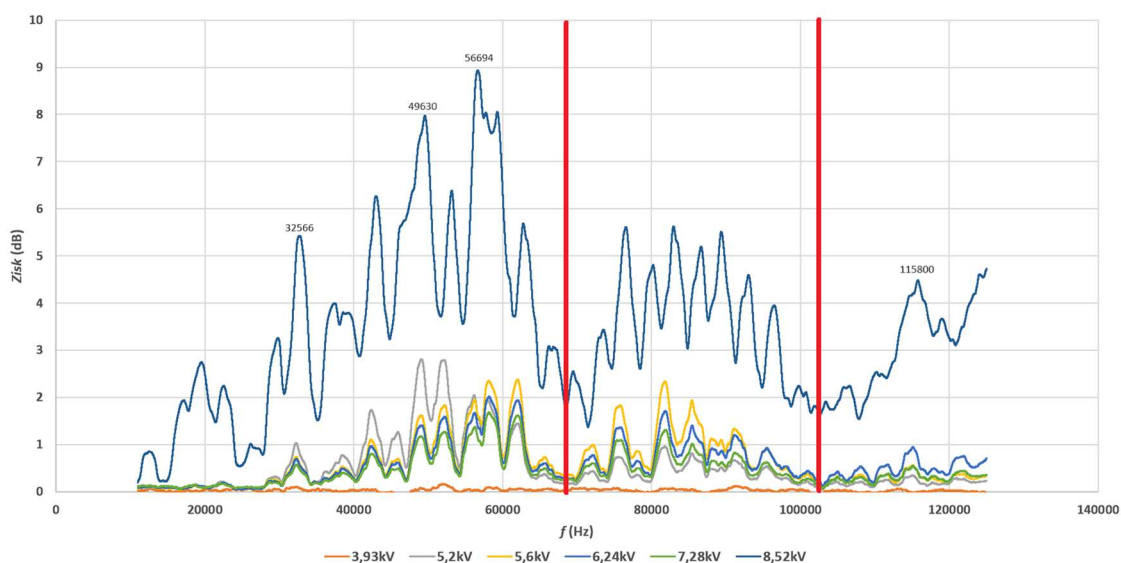
Na Obr. 18 je vytvořené porovnání jednotlivých 1/3 oktávových analýz pro všechny druhy materiálů. Na tomto obrázku lze pozorovat akustické vlastnosti materiálů. Materiál PMMA dosahuje největšího zisku ve střední frekvenci 50,4 kHz. Rozdělení zisku je téměř symetrické ve všech frekvenčních pásmech se středem v 50,4 KHz. Materiály PU a EPDM dosahují maxima v 50,4 kHz, ale na rozdíl od materiálu PMMA zde nedochází k symetrickému rozdělení. Frekvenční pásma do 40 kHz mají podobné rozdělení jako PMMA, hlavní rozdíl se nachází od 50,4 kHz do 80 kHz, kde dochází k pozvolnému poklesu, což způsobuje, že rozdělení vyšších hodnot zisku je lokalizováno mezi 50,4 kHz až 80 kHz.



**Obr. 18. Porovnání 1/3 oktáv pro povrchové výboje**

## 4.2 Kóronového výboje

Experimentální měření korónového výboje bylo provedeno za stejných podmínek a stejné geometrie mikrofónu vůči měřenému vzorku. Výsledek měření je zobrazený na Obr. 19. Zde je možné pozorovat křivky v závislosti na zvyšujícím se napětí. Na rozdíl od povrchových výbojů se mění tvar křivek, což je způsobeno změnou fyzikálních projevů výbojů na povrchu elektrody. Tyto procesy jsou popsány v teoretické části.



**Obr. 19. Spektrogram korónových výbojů**

V Tab. 9 jsou vyhodnoceny oblasti korónového průběhu. V první skupině byla realizována měření při napětí 3,91 kV, která odpovídají začátku výbojové aktivity, tedy zapalovacímu napětí. Zde nebyly zaznamenány žádné významné akustické projevy, což svědčí o nízké výbojové činnosti s omezeným počtem výbojů za sekundu.

Druhá skupina, naměřená při napětí 5,2 kV, prokázala zřetelnou změnu ve výbojové aktivitě ve srovnání s nižším napětím. Z akustického pohledu byly identifikovány významné frekvence v oblasti přibližně kolem 49 kHz a 52 kHz, což představuje výrazný rozdíl oproti první skupině.

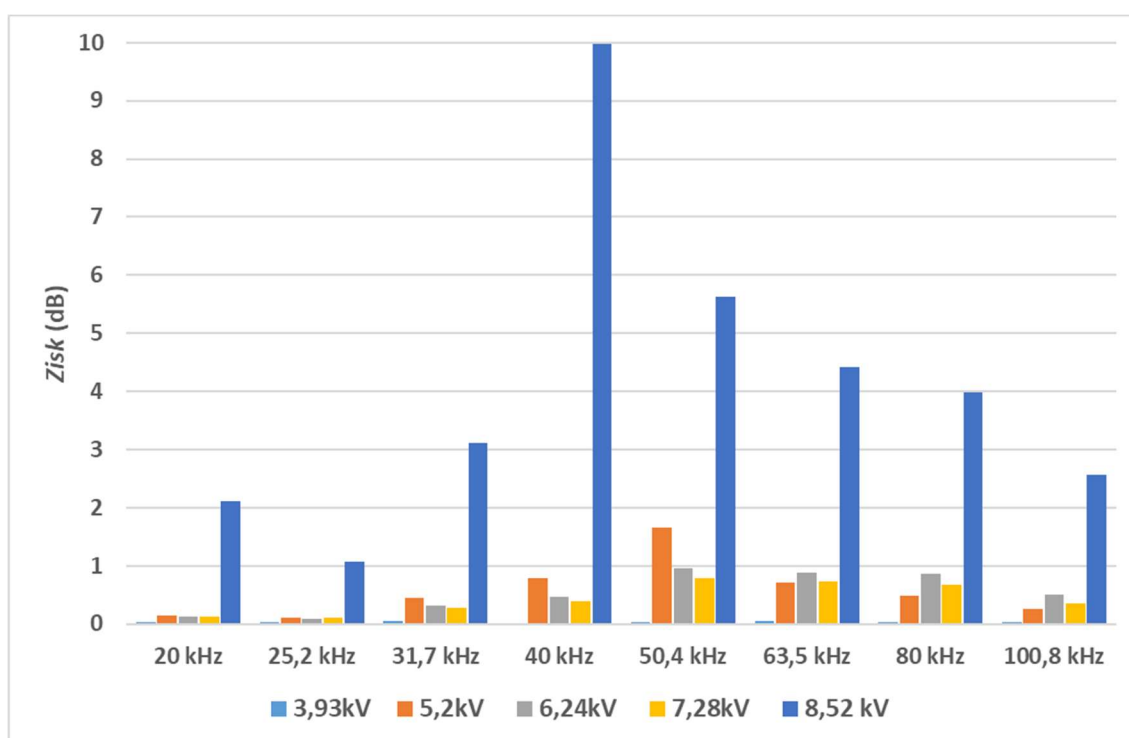
Třetí skupina zahrnuje měření provedená při napětích 5,6 kV, 6,24 kV a 7,28 kV, kde došlo ke změně ve vývoji výbojové činnosti. Akustická analýza těchto měření ukázala vznik nových významných frekvenčních v oblasti okolo 60 kHz, 75,8 kHz a 81,7 kHz. Při dalším zvyšování napětí na 7,28 kV byl detekován výskyt nové oblasti na 115 kHz, což signalizuje přechod do čtvrté skupiny výbojové činnosti.

Čtvrtá skupina, identifikovaná při napětí 8,52 kV, představuje zásadní změnu ve výbojové a akustické činnosti. V této fázi došlo k formování výbojů, které jsou zřetelně slyšitelné a zaznamenávají se v širokém spektru významných frekvenčních oblastí. Mezi zaznamenanými hodnotami v akustické analýze převažují frekvenční oblasti se středem ve 32 kHz, 42 kHz, 50 kHz, 56 kHz a 114 kHz. Zvláště významná je frekvenční oblast od 76 kHz do 90 kHz, která obsahuje několik významných frekvencí, zdůrazňujících složitost výbojové aktivity v této skupině. Ve čtvrté skupině je klíčová oblast kolem frekvence 56 kHz, kde vzniká maximální zisk. Další důležitá oblast je kolem frekvence 115 kHz, která působí jako spojnice mezi třetí a čtvrtou skupinou. Tato spojitost naznačuje kontinuitu výbojové činnosti s nárůstem napětí. Na horním limitu měřeného frekvenčního rozsahu, který činí 125 kHz, byl zaznamenán nárůst akustické intenzity naznačující možný vznik dalších významných frekvenčních oblastí mimo aktuálně měřené spektrum.

**Tab. 9. Vyhodnocené oblasti pro jednotlivé napětí korónového výboje**

<b>Napětí 3,93 kV</b>			
	Oblast 1.		
Šířka pláště (Hz)	11000 - 124998		
Maximum (dB)	0,17		
Frekvence maxima (Hz)	51898		
Průměr (dB)	0,03		
Lokální max. 1. (Hz)	32296		
Lokální max. 2. (Hz)	91286		
Lokální max. 2. (Hz)	113026		
<b>Napětí 5,2 kV</b>			
	Oblast 1.	Oblast 2.	
Šířka pláště (Hz)	27126 - 69910	69910 - 102878	
Maximum (dB)	2,80	0,96	
Frekvence maxima (Hz)	49066	81802	
Průměr (dB)	0,94	0,42	
Průměr pláště (Hz)	31992 - 62778	71762 - 96294	
<b>Napětí 5,6 kV</b>			
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
Šířka pláště (Hz)	11000 - 69824	69824 - 103002	103002 - 124998
Maximum (dB)	2,38	2,34	0,57
Frekvence maxima (Hz)	62062	81808	115120
Průměr (dB)	0,62	0,92	0,30
Průměr pláště (Hz)	31890 - 66100	71644 - 95634	105182 - 122742
<b>Napětí 6,24 kV</b>			
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
Šířka pláště (Hz)	11000 - 69766	69766 - 103052	103052 - 124998
Maximum (dB)	2,02	1,71	0,95
Frekvence maxima (Hz)	58164	81852	115120
Průměr (dB)	0,54	0,75	0,49
Průměr pláště (Hz)	31830 - 66056	80468 - 96216	113644 - 118066
<b>Napětí 7,28 kV</b>			
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
šířka pláště	11000 - 29648	29648 - 103048	103048 - 124998
Max.	0,20	1,68	0,55
Frekvence Maximam			
Prům	0,12	0,68	0,30
Prům plášť	11048 - 23410	41984 - 92214	105030 - 118332
<b>Napětí 8,52 kV</b>			
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
šířka pláště	11000 - 51670	51670 - 107726	107726 - 124998
Max.	7,97	8,93	4,73
Frekvence Maximam	49584	56660	124998
Prům	2,98	4,30	3,35
Prům plášť	30150 - 41024	61104 - 92652	119764 - 124498

Na Obr. 20 je zobrazené porovnání jednotlivých napěťových úrovní pomocí 1/3 oktávové analýzy. Analýza ukazuje, že při napětí 8,52 kV dochází ke změně výbojové činnosti z generování Trichelových výbojů na streamerové výboje. Tato změna ovlivňuje frekvenční oblast s nejvyšším ziskem. U Trichelových výbojů je maximum zisku lokalizováno ve frekvenční oblasti 50,4 kHz s postupným poklesem zisku v oblastech s vyšší frekvencí. U streamerových výbojů je maximum zisku lokalizováno ve frekvenční oblasti 40 kHz. V dalších oblastech při napětí 8,52 kV je zaznamenán výrazně vyšší zisk.



**Obr. 20. 1/3 oktávová analýza pro korónové výboje**

## 5 Porovnání akustického měření s referenční metodou

### 5.1 Povrchové výboje

Porovnání četnosti částečných výbojů bylo provedeno s hodnotami z histogramu uvedenými v Tab. 10. Zde je zobrazená veškerá výbojová činnost rozdělená podle intenzity a napětí. Tyto výboje byly klasifikovány do tří skupin.

První skupina obsahuje částečné výboje do 0,5 nC, které vykazují nejvyšší četnost s klesajícím charakterem při zvyšujícím se napětí. Většina výbojů v této skupině byla lokalizována mezi 4 pC a 8 pC, jejich intenzita není dostatečně vysoká, aby vyvolala zaznamenanou akustickou činnost.

Druhá skupina zahrnuje výboje od 1 nC do 3,5 nC. Výbojová činnost této skupiny má rostoucí charakter.

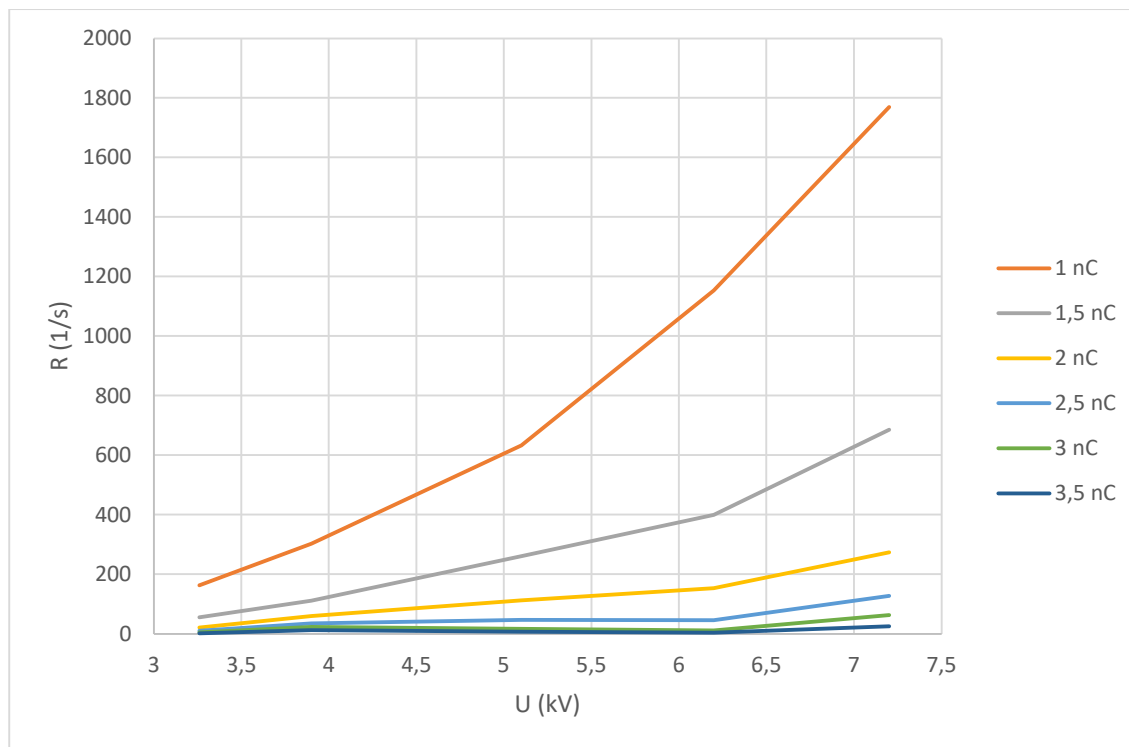
Třetí skupina obsahuje výboje od 4 nC. Výboje v této skupině vykazují nízkou četnost, maximálně desítky výbojů generovaných za sekundu. Dále se vyznačují náhodným charakterem v závislosti na napětí, protože se jejich četnost mění bez zřetelné korelace s rostoucím napětím.

**Tab. 10. Hodnoty určující množství generovaného náboje v závislosti na jeho velikosti**

	<b>3,26 kV</b>	<b>3,9 kV</b>	<b>5,1 kV</b>	<b>6,2 kV</b>	<b>7,2 kV</b>
<b>Q (nC)</b>	<b>R (I/s)</b>				
<b>0,5</b>	21761,51	21464,55	21111,01	20618,01	19325,16
<b>1</b>	163,7909	302,5316	633,1263	1153,637	1770,313
<b>2,5</b>	55,98734	110,71	260,98	398,8442	685,406
<b>3</b>	21,32571	60,02612	112,6512	152,8013	273,9499
<b>3,5</b>	10,86848	35,18622	47,15539	45,36211	128,1019
<b>4</b>	4,75863	22,65713	16,25356	11,47898	63,81183
<b>4,5</b>	1,879953	12,00522	7,023143	3,524248	25,45035
<b>5</b>	0,528737	4,933056	2,127009	0,906235	12,00789
<b>5,5</b>	0	1,527938	0,441455	0,251732	6,429002
<b>6</b>	0	0,56752	0,200661	0,050346	5,738283
<b>6,5</b>	0	0	0	0	3,612993
<b>7</b>	0	0	0	0	1,806497
<b>7,5</b>	0	0	0	0	1,009513
<b>8</b>	0	0	0	0	0,425058
<b>8,5</b>	0	0	0	0	0,265661
<b>9</b>	0	0	0	0	0,212529
<b>9,5</b>	0	0	0	0	0,053132
<b>10</b>	0	0	0	0	0
<b>10,5</b>	0	0	0	0	0,053132
<b>11</b>	0	0	0	0	0
<b>11,5</b>	0	0	0	0	0,053132

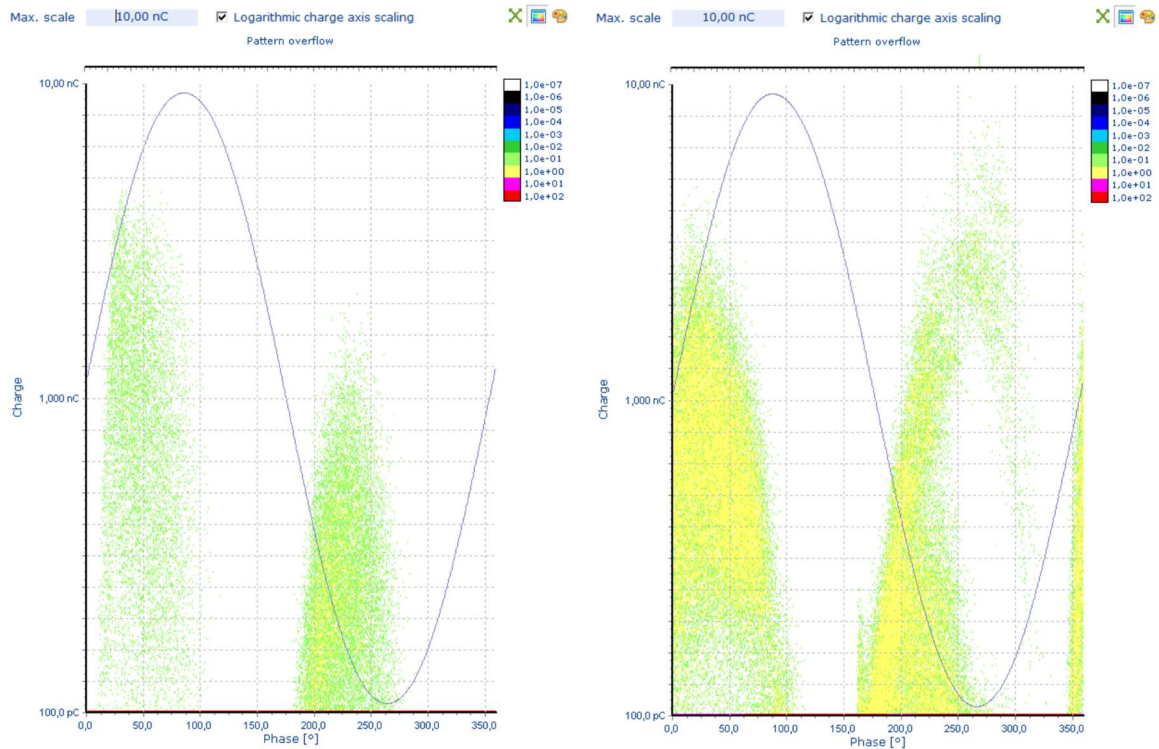


Nadále byly vyhodnoceny výboje z druhé skupiny, která zahrnuje výboje od 1 nC do 3,5 nC. Tyto výboje byly vyneseny do grafu zobrazeného v Obr. 21. Hodnoty zobrazené v tomto grafu vytvářejí korelaci s lineárním nárůstem akustického zisku neboli se výboje o těchto intenzitách podílejí na vytváření tvaru frekvenční obálky povrchových výbojů.



**Obr. 21. Nárůst četnosti výbojů podle napětí**

Hodnoty byly porovnány s fázorovým diagramem, který je zobrazen na Obr. 22. Fázorový diagram je rozdělen na dvě části z důvodu rozdílného napětí. V první části, při napětí do 3,9 kV, jsou výboje lokalizovány na začátku kladné a záporné části amplitudy, bez přítomnosti v nule. Přesněji je lokalizace stanovena mezi  $10^\circ$  až  $90^\circ$  kladné poloviny a  $180^\circ$  až  $275^\circ$  záporné poloviny. Ve druhé části, při napětí 7,2 kV, jsou výboje rozšiřovány po celém fázorovém diagramu, přes nulovou hodnotu, a v záporné amplitudě je tvořena záporná parabola, přičemž výboje jsou charakterizovány vyšší intenzitou a četností.



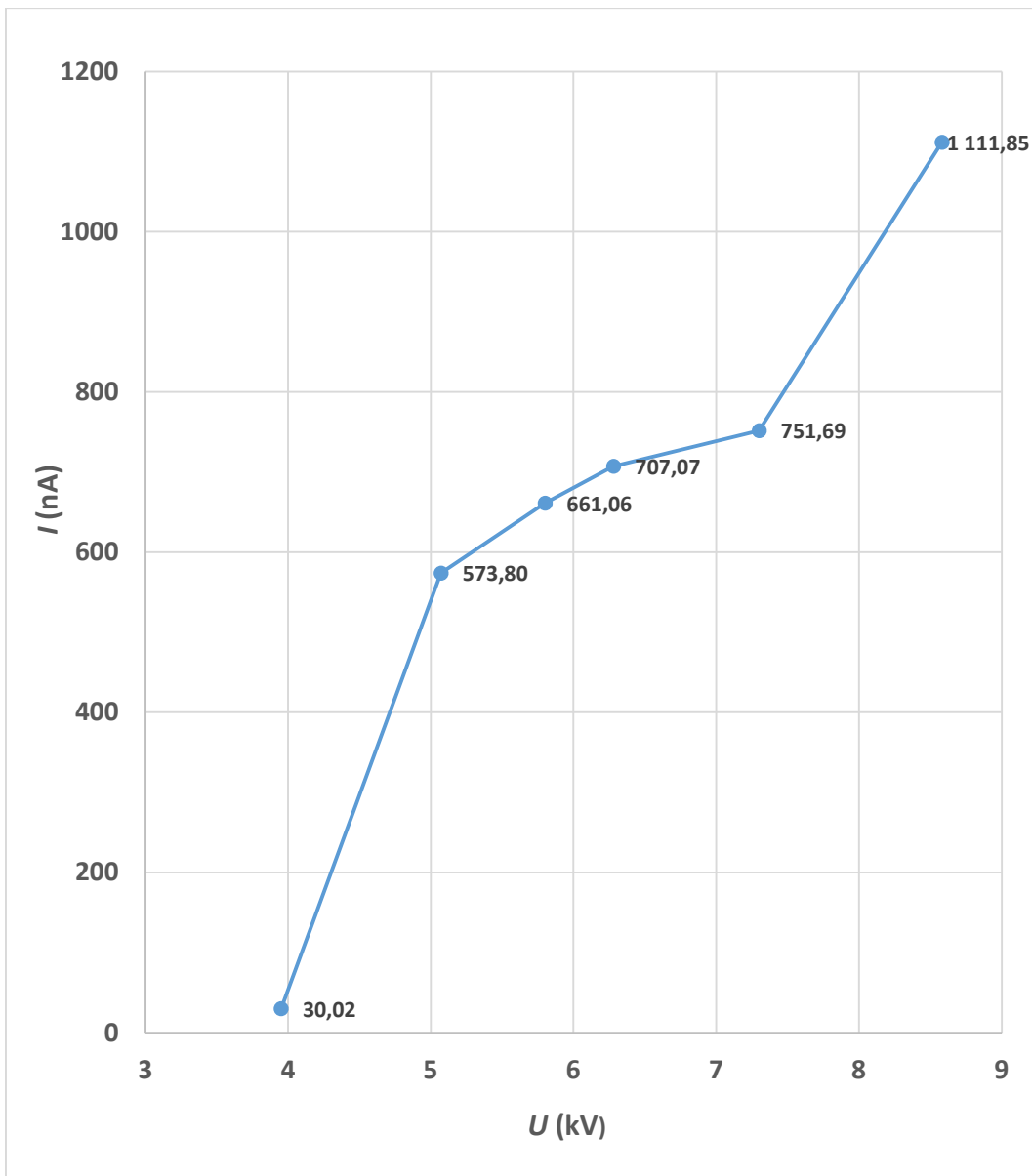
a)

b)

**Obr. 22. Fázorový diagram, a) 3,9 kV, b) 7,2 kV**

## 5.2 Korónového výboje

Korónové výboje byly analyzovány na základě naměřených akustických a elektrických údajů. V akustické části byly průběhy rozděleny do tří skupin. Každá skupina odpovídala různým fyzikálním dějům probíhajícím mezi napájecí a zemnicí elektrodou. Tyto děje, včetně jejich přechodů, byly v elektrickém měření zaznamenány jako změny v proudu zobrazené na Obr. 23 a četnosti výbojů zobrazené v Tab. 11.



*Obr. 23. Změna velikosti proudu se zvyšujícím se napětím*

**Tab. 11. Hodnoty určující množství generovaného náboje v závislosti na jeho velikosti**

	3,95 kV	5,2 kV	5,6 kV	6,24 kV	7,28 kV	8,52 kV
Q (pC)	R (1/s)					
<b>10</b>	21801,8245	17094,2500	16054,4600	15582,9300	14808,1400	13582,9700
<b>20</b>	0,0000	1,2653	0,3544	0,7336	0,4682	660,1984
<b>30</b>	0,0000	33,3983	10,3418	10,5702	8,8293	63,9215
<b>40</b>	0,0000	0,3825	0,0000	0,0333	0,8696	35,4953
<b>50</b>	0,0000	0,7945	0,2900	0,3668	9,8661	103,9426
<b>60</b>	0,0000	1,5596	27,8682	26,6755	14,3477	561,0807
<b>70</b>	0,0000	16,4785	56,2197	98,3659	14,2808	867,0363
<b>80</b>	0,0000	75,6538	220,4326	654,1166	153,1419	806,2940
<b>90</b>	0,0000	349,1961	695,6095	811,2019	2272,5800	1331,2060
<b>100</b>	1,1749	919,8508	1364,2210	1133,4750	1955,4940	1326,6060
<b>110</b>	3,8183	1707,2270	1850,2550	1611,3000	1094,3010	1027,5700
<b>120</b>	4,5232	1465,8170	1325,1080	1362,0510	1003,7000	783,7027
<b>130</b>	7,5191	550,4686	574,4392	714,8367	620,4270	567,0652
<b>140</b>	9,2814	110,7882	143,8836	272,1234	249,4952	278,1279
<b>150</b>	14,7445	15,4486	20,5226	71,4237	66,2199	87,1487
<b>160</b>	23,1447	3,5017	3,6084	13,9046	12,2407	18,6640
<b>170</b>	31,0750	0,7945	0,8054	3,6012	3,1438	5,6852
<b>180</b>	22,8510	0,1471	0,1289	0,8670	1,0368	2,3938
<b>190</b>	3,3483	0,0294	0,0322	0,1334	0,2341	1,2343
<b>200</b>	0,9399	0,0589	0,0000	0,0333	0,0334	0,6358
<b>&gt;200</b>	0,0587	12,9474	0,3544	0,3668	0,0669	81,8749

Do první skupiny spadá měření při 3,95 kV, kde naměřený proud dosahoval průměrné hodnoty 30 mA s nízkou výbojovou činností. Což se shoduje s teorií, která udává, že se jedná o prvotní Trichlerovy výboje. Průměrná velikost intenzity při tomto napětí dosahuje úrovně 15 pC. Při porovnání akustických dat s výbojovou činností zobrazenou na Obr. 24 bylo zjištěno, že výbojová činnost neměla dostatečně velkou intenzitu pro vytvoření významného akustického signálu.

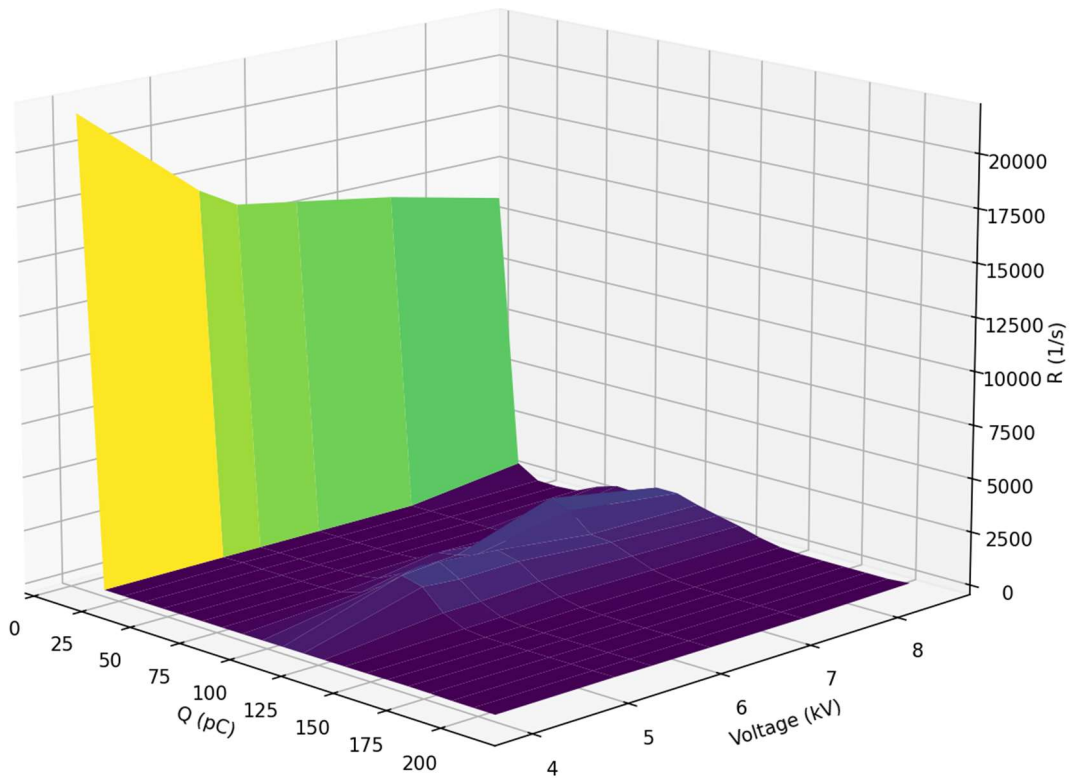
V druhé skupině byla při analýze naměřených dat zaznamenána kontinuita Trichlerových výbojů. Tato skupina byla charakteristická nárůstem proudu, který dosahoval průměrné velikosti 537 nA při přiloženém napětí 5,2 kV. V této části se vytvářely výboje o průměrné intenzitě 110 pC.

Na základě dat zobrazených v Tab. 8 a Obr. 24 byla identifikována oblast významných výbojů v rozsahu od 100 pC do 140 pC, s lokální maximem o intenzitě 110 pC. Porovnání výbojové činnosti s akustickým měřením odhalilo korelaci mezi naměřenou výbojovou aktivitou a akustickou oblastí s frekvencemi 49 kHz a 52 kHz, která zaniká s nárůstem napětí. Díky této korelaci je možné identifikovat závislost frekvenčního spektra na intenzitě výbojů.

Dalším zvýšením napětí docházelo k monotónnímu nárůstu proudu až na hodnotu 751 nA při napětí 7,28 kV. V této části docházelo k zániku výboje s intenzitami od 100 pC do 140 pC a nárůstu nových výbojů v rozmezí od 70 pC do 100 pC, přičemž v tomto rozsahu intenzit bylo identifikováno nové lokální maximum o hodnotě 90 pC.

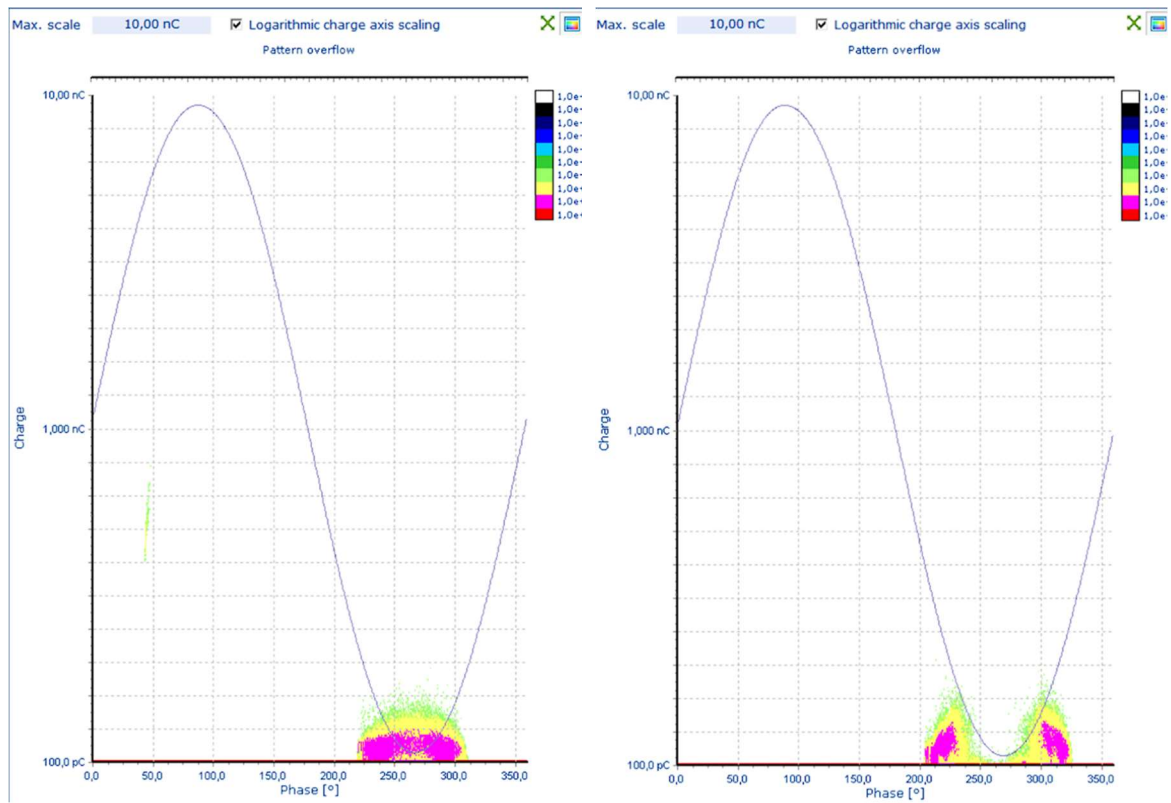
Akustické měření dále ukázalo, že s poklesem částečných výbojů o vyšší intenzitě dochází k formování významných frekvenčních oblastí kolem frekvencí 60 kHz, 75,8 kHz a 81,7 kHz, a to naznačuje, že výbojová činnost s nižší intenzitou je zodpovědná za generování akustického signálu na vyšších frekvencích. Toto pozorování podporuje předpoklad, že výboje do 10 pC generují zvuk mimo měřený rozsah. Kromě toho lze z naměřených průběhů vyvodit, že akustická intenzita celého spektra vykazuje klesající trend s rostoucím napětím, což je v souladu s teoretickým předpokladem zvýšení frekvence proudových impulsů při současném zmenšování jejich velikosti.

Poslední třetí skupina je charakterizována přechodem do streamerového výboje. V této části začínají hořet výboje mezi elektrodami a dochází k rapidnímu zvýšení proudu na hodnotu 1111 nA. Nadále dochází k přeuspořádání částečných výbojů podle intenzity. Dochází zde k navýšení výbojů na nižších a vyšších intenzitách. U výbojů mezi 90 pC až 130 pC dochází ke snížení jejich četnosti. Největší snížení četnosti je pro hodnoty 90 pC a 100 pC, kde se zmenší jejich četnost skoro o polovinu. Největší nárůst výbojové činnosti se nachází v 20 pC



***Obr. 24. 3D graf pro jednotlivé histogramy korónového výboje***

Fázorové diagramy zobrazené na Obr. 25 byly podrobně porovnány. Bylo zjištěno, že rozmístění výbojů na fázorovém diagramu se rozšiřuje od středu záporné amplitudy směrem ven. Výboje umístěné v maximu záporné části amplitudy jsou zaznamenány jako nejmenší, zatímco ty, které jsou lokalizovány nejdále v záporné amplitudě, byly identifikovány jako největší. Tento pozorovaný trend naznačuje, že charakteristika a distribuce výbojů se mění v závislosti na jejich poloze v elektrickém poli.



*a)*

*b)*

***Obr. 25. Fázorový diagram, a) 5,7 kV, b) 7,26 kV***

## Zhodnocení a závěr

Tato práce se zabývá měřením částečných výbojů pomocí akustické metody, která byla vybrána z důvodů odolnosti vůči vnějšímu rušení.

Práce se zabývá návrhem experimentální metody měření, jejímž cílem bylo identifikovat a porovnat akustické emise částečných výbojů s referenčními hodnotami, získanými pomocí globální galvanické metody.

K tomuto měření byla použita měřicí karta pro zpracování signálu a ultrazvukový mikrofón, umístěný ve vzdálenosti 10 cm od testovací aparatury. Pro generování korónového výboje bylo použito zapojení jehly na misku, zatímco pro povrchové výboje se využívalo zapojení dvou válcových elektrod, mezi které byl umístěn izolační materiál.

Analýza získaných dat odhalila typické akustické křivky pro korónové a povrchové výboje. Tyto křivky byly podrobně vyhodnoceny a srovnány s daty získanými referenční galvanickou metodou. Výsledky ukázaly, že akustické spektrum poskytuje dostatečné informace pro efektivní identifikaci a rozlišení mezi různými typy částečných výbojů.

Závěr této práce potvrzuje možnost použití akustického spektra pro identifikaci druhu částečného výboje.



## Literatura

- [1] T. P. Mentlík Václav, Pihera Josef , Polanský Radek, Prosr Pavel, *Diagnostika elektrických zařízení*. 2008.
- [2] A. D. Pierce, *Acoustics*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-11214-1.
- [3] G. Callender and P. L. Lewin, “Modeling partial discharge phenomena,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 36, no. 2, pp. 29–36, Mar. 2020, doi: 10.1109/MEI.2020.9070114.
- [4] Y. Zhou, Y. Liu, N. Wang, X. Han, and J. Li, “Partial discharge ultrasonic signals pattern recognition in transformer using BSO-SVM based on microfiber coupler sensor,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 201, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111737.
- [5] H. D. Ilkhechi and M. H. Samimi, “Applications of the Acoustic Method in Partial Discharge Measurement: A Review,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 1, pp. 42–51, Feb. 2021, doi: 10.1109/TDEI.2020.008985.
- [6] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, and K. Feser, “Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660.
- [7] S. Suwanasri *et al.*, “Partial Discharge Investigation and Failure Analysis on Distribution Network Using Acoustic Camera,” in *Proceeding of the 2021 9th International Electrical Engineering Congress, iEECON 2021*, 2021. doi: 10.1109/iEECON51072.2021.9440301.
- [8] J. Pan, C. Bai, Q. Zheng, and H. Xie, “Review of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers for Rangefinders,” *Micromachines*, vol. 14, no. 2. 2023. doi: 10.3390/mi14020374.
- [9] H. Besharatifard, S. Hasanzadeh, E. Heydarian-Forushani, H. H. Alhelou, and P. Siano, “Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/app12063010.
- [10] L. E. Lundgaard, “Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 34–43, Sep. 1992, doi: 10.1109/57.156943.
- [11] J. Jung, W. Lee, W. Kang, E. Shin, J. Ryu, and H. Choi, “Review of piezoelectric

- micromachined ultrasonic transducers and their applications,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 27, no. 11. 2017. doi: 10.1088/1361-6439/aa851b.
- [12] P. Kubeš and F. E. L. ČVUT, “Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika,” 2004.
- [13] V. Y. Kozhevnikov, A. V. Kozyrev, V. F. Tarasenko, A. O. Kokovin, E. K. Baksht, and N. P. Vinogradov, “Key Modes of Ignition and Maintenance of Corona Discharge in Air,” *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023, doi: 10.3390/en16134861.
- [14] Brüel & Kjær an HBK company, “1/4" SOUND INTENSITY MICROPHONE PAIR, EXT. POLARIZED.” [Online]. Available: <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/special-microphones/4178>
- [15] R. Instruments, “Ultrasound Microphone.” [Online]. Available: <https://roga-instruments.com/ultrasound-mic/>
- [16] National Instruments, “How to Choose the Right DAQ Hardware for Your Measurement System.” [Online]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/how-to-choose-the-right-daq-hardware-for-your-measurement-system.html>
- [17] DEWESoft, “SIRIUS® Modular.” [Online]. Available: <https://dewesoft.com/products/sirius>
- [18] DEWESoft, “How To Choose the Right Data Acquisition System [UPDATE 2024]?” [Online]. Available: <https://dewesoft.com/blog/how-to-choose-the-right-data-acquisition-system>
- [19] National Instruments, “PCI/PXI/USB-6221 68 Pin Specifications.” Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pci-pxi-usb-6221-specs/page/specs.html>
- [20] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, Third Edition*. 2019. doi: 10.1007/978-3-030-11214-1.
- [21] National Instruments, “Ni USB-6221.” Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: [https://tsgdoc.socsci.ru.nl/images/a/a6/NI\\_USB-6221.pdf](https://tsgdoc.socsci.ru.nl/images/a/a6/NI_USB-6221.pdf)

## Přílohy

### 5.3 Vytvoření programu

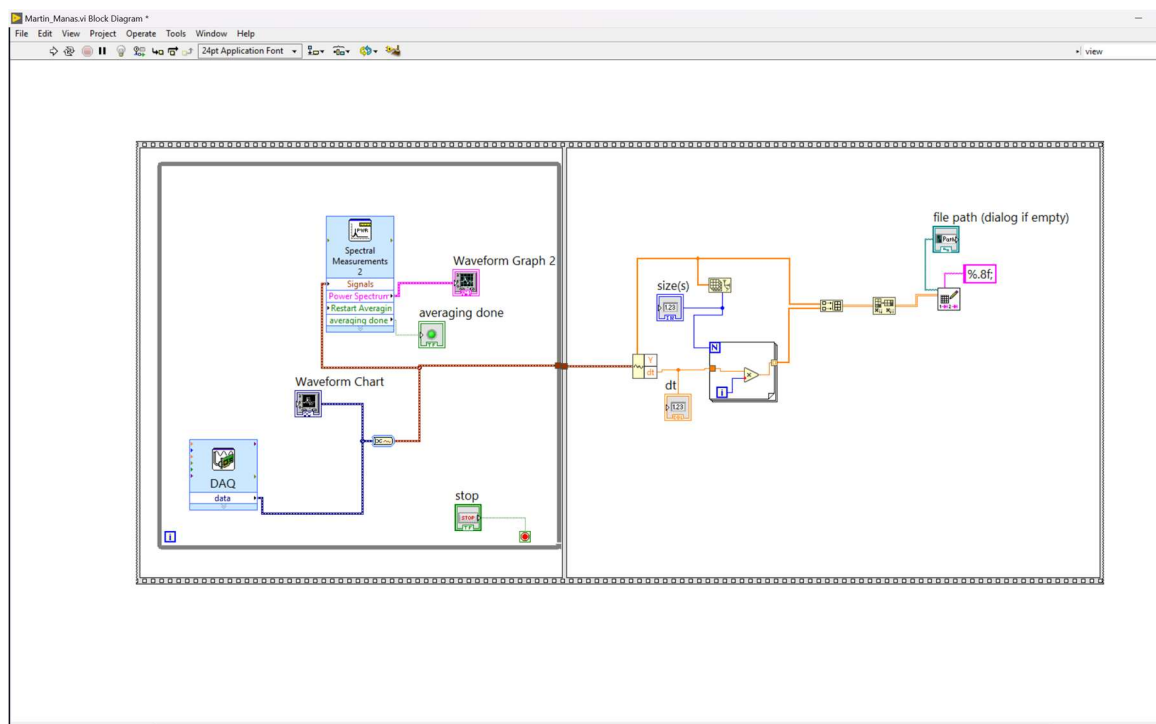
Program pro zpracování a ukládání naměřených dat byl vyvinut v softwarovém prostředí LabVIEW 2020 a je vizualizován na Obr. 26. Struktura programu je uspořádána do tzv. Flat Sequence, která umožňuje oddělit části programu zodpovědné za akvizici dat a jejich následné ukládání.

V aktivní části programu je začleněná smyčka Loop While, která obsahuje komponenty jako DAQ Assistant, Spectral Measurements, indikátory, grafické zobrazovače a převodník dat. Na počátku této sekvence je umístěn DAQ Assistant, sloužící jako rozhraní mezi počítačem a měřicí kartou. Zde je možné nastavit parametry akvizice, jako počet vzorků, vzorkovací frekvenci, rozsah napětí a metodu uzemnění.

Po aktivní data jsou signály vizualizovány v grafu a převáděny konvertorem do typu Single Waveform. Tyto signály jsou následně zpracovány v bloku Spectral Measurements, kde je konfigurována FFT analýza s průměrováním pomocí Hanningova okna a s tisíci iteracemi pro lineární vážení. Každá iterace generuje spektrální data, která jsou ihned zobrazena v grafu a poslána do další části programu pro ukládání.

V ukládací části programu dochází k separaci naměřených dat na frekvenční a informační složku. Data jsou uspořádána do dvou sloupců a uložena do formátu CSV. Toto rozdělení a uspořádání dat umožňuje jejich snadnou následnou analýzu a zpracování.

V rámci optimalizace programu v LabVIEW 2020 došlo k modifikaci struktury kódu. Původně byla FFT analýza součástí pravé části Flat Sequence, avšak pro zvýšení efektivity zpracování a snížení možnosti hromadění dat na rozhraní sekvencí byla přemístěna do levé části. Tímto přesunem došlo ke zlepšení toku dat v programu, a zároveň je nyní zajištěn plynulý přístup k výsledkům spektrální analýzy bez zbytečných prodlev, které vznikají na rozhraní Flat Sequence, což výrazně přispívá k celkové rychlosti a plynulosti měřicího procesu.



*Obr. 26. Program pro zpracování dat*

#### 5.4 Uzemnění karty a nastavení profilu měření

Uzemnění představuje zásadní část konfigurace měřicího systému, přičemž jeho správné provedení je nezbytné pro získání relevantních a spolehlivých dat. Pro účely přesného měření je klíčové se vyhnout vytváření zemních smyček, které by mohly indukovat rušení, typicky v podobě 50 Hz signálů ze sítě, a tím negativně ovlivnit chod zařízení.

Na Obr. 27 je zobrazena pozice uzemňovacího kontaktu měřicí karty NI 6221 USB, který je umístěn vedle USB portu. Pro připojení je vyžadován kabel s parametry AWG 16, skládající se z jednoho jádra měděného vodiče, jehož délka by neměla přesáhnout 1,5 metru.

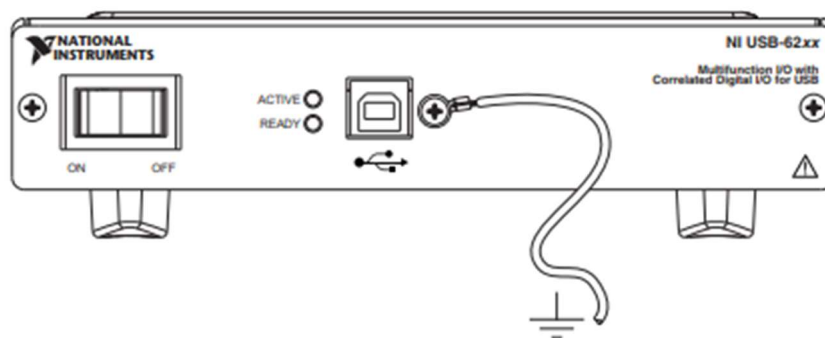
Na Obr. 28 jsou ilustrovány různé metody zapojení měřicí karty a senzoru. Rozlišují se zde zapojení s plovoucím zdrojem signálu a zapojení s referenční zemí. Pouze zapojení s diferenciálním vstupem, ať už s plovoucím zdrojem nebo referenční zemí, jsou vhodná pro měření signálů s nižší úrovní než jeden volt, což je typické pro detekci malých zvukových změn ve vysokofrekvenčním spektru generovaných částečnými výboji.

Zapojení s diferenciálním vstupem a referenční zemí může být jednoduché, avšak s sebou přináší riziko rušení přenášeného po zemním spojení. Toto rušení může být způsobeno měniči, střídači, vysokofrekvenčními technologiemi či komunikačními přístroji. Dalším

potenciálním problémem je vytvoření zemní smyčky mezi mikrofonem a zvukovou kartou a napájením mikrofonu, což může vést k indukci nežádoucích signálů z okolního prostředí. V tomto konkrétním případě bylo zvoleno diferenciální zapojení s plovoucím zdrojem signálu, jehož hlavní výhodou je snížení počtu zemních smyček a tím omezení vnášeného rušení do měřicího systému. Toto rušení může zahrnovat jak síťové rušení na frekvenci 50 Hz, které by mohlo přesytit předzesilovač zvukové karty, tak i vysokofrekvenční rušení přítomné v prostředí.

Pro zajištění funkčnosti je doporučeno připojit mezi mikrofon a zvukovou kartu vysokoimpedanční zakončení, které vytváří umělé zemní zakončení a izoluje zvukovou kartu od zemní konstrukce budovy, čímž zamezuje vlivu externího rušení.

Uzemnění stejnosměrného zdroje pro ultrazvukový mikrofon není třeba speciálně řešit, jelikož je již optimálně konfigurováno výrobcem. Tím je zaručena správná funkčnost zdroje a eliminováno potenciální rušení, které by mohlo pocházet ze zdroje napájení.



**Obr. 27. Přizemnění karty NI 6221 USB[21]**

AI Ground-Reference Setting*	Floating Signal Sources (Not Connected to Building Ground)	Ground-Referenced Signal Sources†
		Examples: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ungrounded thermocouples</li> <li>• Signal conditioning with isolated outputs</li> <li>• Battery devices</li> </ul>
Differential (DIFF)		
Non-Referenced Single-Ended (NRSE)		
Referenced Single-Ended (RSE)		
<p>* Refer to the <a href="#">Analog Input Ground-Reference Settings</a> section for descriptions of the RSE, NRSE, and DIFF modes and software considerations.</p> <p>† Refer to the <a href="#">Connecting Ground-Referenced Signal Sources</a> section for more information.</p>		

Obr. 28. Možnosti připojení zařízení[21]

## 5.5 Testování karty pomocí frekvenčního generátoru

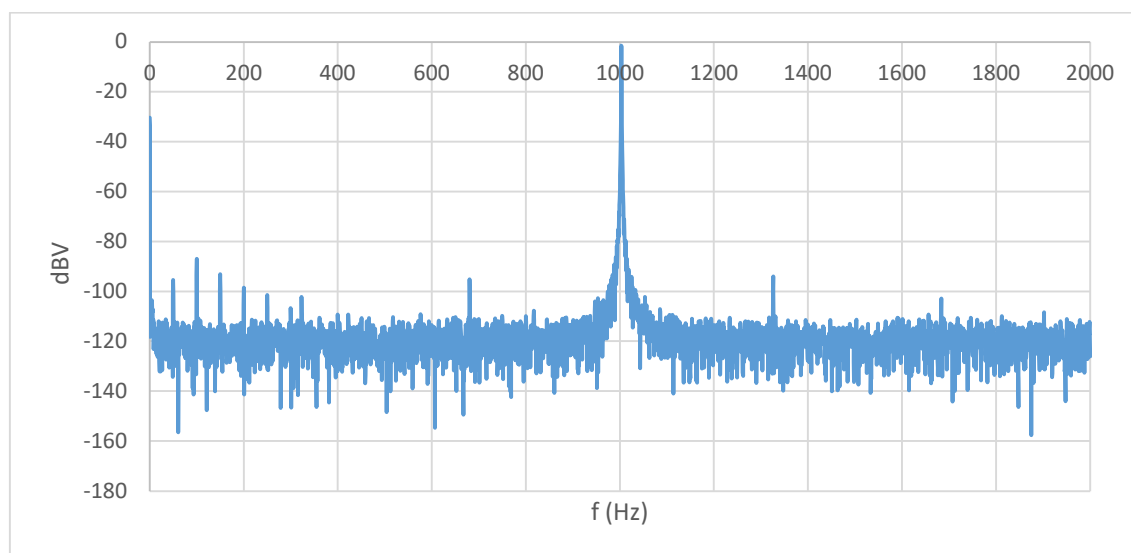
Testování měřicí karty typu NI 6221 USB od firmy National Instruments má zásadní význam pro ověření jejích výrobních parametrů a šumových charakteristik. Cílem měření je určení vlastního šumu karty, který se kvantifikuje pomocí specifických testů, jako jsou

měření nakrátko a naprázdno. Tyto testy jsou klíčové pro posouzení úrovně rušení generovaného samotným zařízením, včetně jeho zdroje, zesilovačů a dalších komponent.

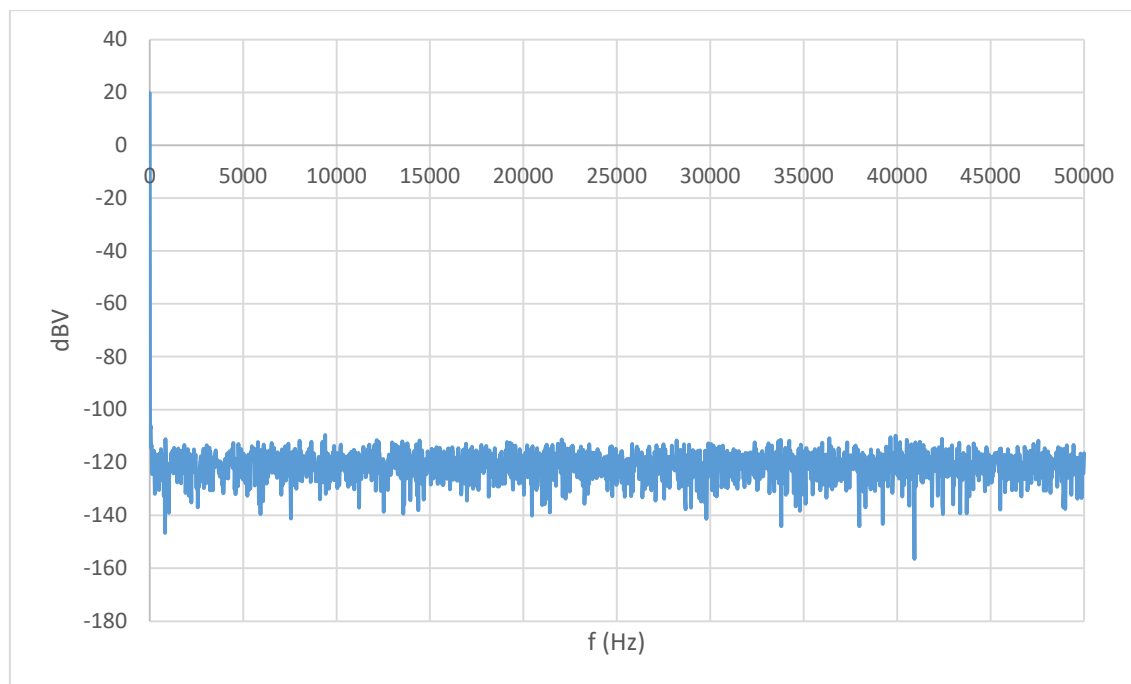
Měření nakrátko slouží k identifikaci šumového podkladu karty, když jsou všechny vstupy uzemněné a není přítomen žádný externí signál. Toto měření odhaluje minimální úroveň šumu, kterou měřicí systém produkuje, a je důležitým ukazatelem pro hodnocení vnitřního rušení a integrity měření. Naopak, měření naprázdno prověřuje šum karty, když jsou vstupy volné a otevřené do prostředí, což simuluje reálné podmínky, při nichž mohou být šumové složky způsobené vnějšími rušivými signály a elektromagnetickým rušením.

První graf na Obr. 29 ukazuje výsledky měření na 1 kHz, kde byl testovací signál z generátoru signálů přiveden do měřicí karty přes oddělovací transformátor, což demonstruje frekvenční odezvu a úroveň šumu při konkrétní testované frekvenci. Druhý graf na Obr. 30 představuje měření naprázdno, kde můžeme vidět základní šumový podklad karty bez přítomnosti vstupního signálu. Třetí graf na Obr. 31 ukazuje měření nakrátko a je důležitý pro odhalení šumových vlastností karty v uzavřeném obvodu, což poskytuje důležité informace o vlastním rušení karty.

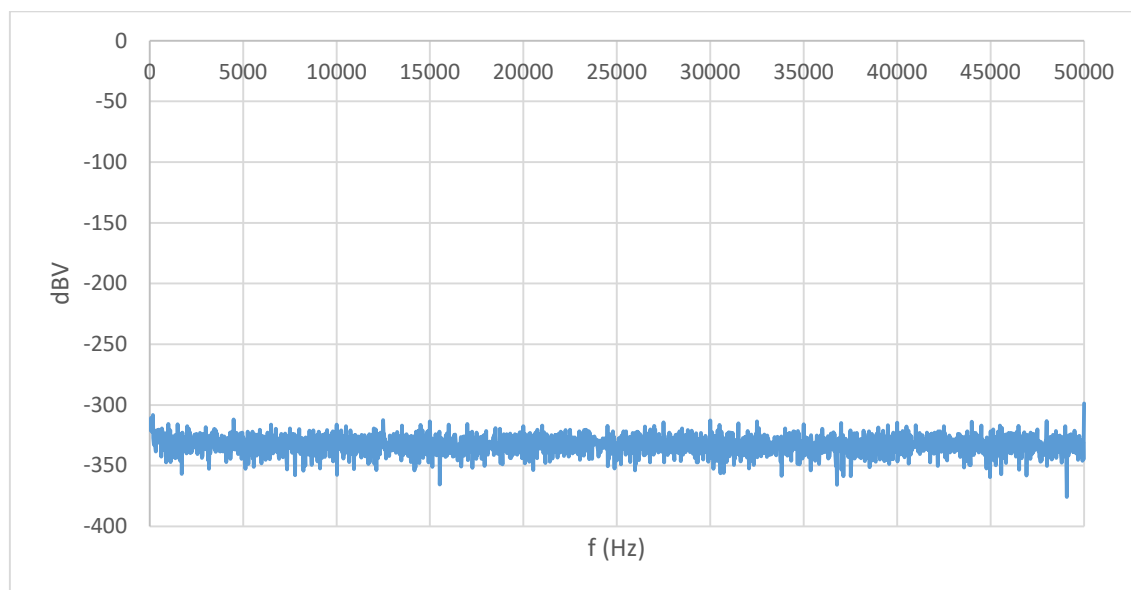
Tyto testy dohromady poskytují komplexní obraz o kvalitě a výkonnosti měřicí karty NI 6221 USB. Srovnání těchto výsledků s výrobními specifikacemi a očekávanými šumovými úrovněmi umožňuje posoudit, zda je karta vhodná pro požadované měřicí aplikace, zejména pro tak citlivé měření, jako je detekce částečných výbojů.



**Obr. 29. Testování zvukové karty na 1 kHz**



*Obr. 30. Testování zvukové karty naprázdno*



*Obr. 31. Testování zvukové karty nakrátko*

## 5.6 Testování kalibrace mikrofону

Kalibrace ultrazvukového mikrofónu byla důkladně provedena a ověřena v porovnání s referenčním studiovým kapacitním mikrofónem v podmínkách bezodrazové komory. Byly použity dva mikrofóny: referenční mikrofón Grass40pH a měřicí mikrofón RFT MV 201



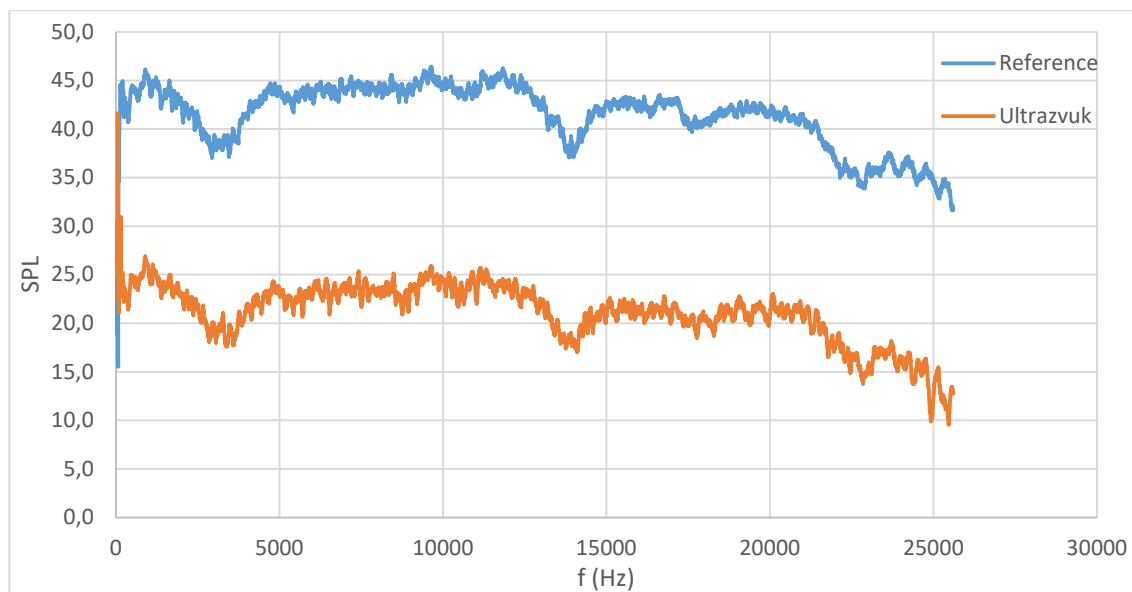
Nr:6595, oba byly umístěny a nasměrovány na střed reproduktoru, který byl umístěn ve vzdálenosti pěti metrů. Během testu byl do reproduktoru přiveden signál bílého šumu a následně byly oba signály z mikrofonů zaznamenány a analyzovány.

Z naměřených dat byla vytvořena spektrální analýza, zobrazená na Obr. 32, která ukazuje srovnání mezi referenčním a ultrazvukovým mikrofonom. Z této analýzy je zřejmé, že měřený signál ultrazvukového mikrofону vykazuje tvarovou podobnost s referenčním signálem, přičemž hlavním rozdílem je úroveň zesílení. Ultrazvukový mikrofón měří o 20 dB méně než referenční mikrofón, což je v souladu s očekáváním; menší průměr membrány ultrazvukového mikrofónu totiž implikuje nižší schopnost zachycení signálu. Tento fenomén je dobře znám a je zohledněn při interpretaci dat z měření ultrazvukem.

Testování kalibrace ultrazvukového mikrofónu potvrdilo jeho vhodnost pro účely měření částečných výbojů. Během kalibračního procesu byl však zjištěn specifický útlum mikrofónu při frekvenci 25 kHz. Tento jev nebyl zcela zřejmý z přímých naměřených hodnot, neboť se jedná o frekvenci, na které jsou limity reprodukční schopnosti použitého reproduktoru již těsně dosaženy.

Význam této zjištěné 'díry' v odezvě mikrofónu je třeba brát v úvahu při analýze zaznamenaných dat, protože může ovlivnit přesnost měření v této frekvenční oblasti. Je možné, že tato charakteristika je důsledkem konstrukčních specifik nebo vybraného pracovního rozsahu ultrazvukového mikrofónu. Při měření částečných výbojů, které se mohou objevovat v širokém spektru frekvencí, je tedy důležité znát veškeré možné limity měřicích zařízení.

V rámci dalšího zkoumání je doporučeno zaměřit se na možnosti kompenzace této zjištěné slabiny, aby bylo zajištěno co nejpřesnější zachycení všech relevantních frekvencí. To může zahrnovat upravení měřicí metody, použití dalších mikrofonů pro pokrytí kritické frekvence nebo aplikaci softwarových filtrů a korekčních algoritmů v post-processingové fázi analýzy dat. Je důležité si uvědomit, že i když jsou takovéto limity přístrojů obvyklé, jejich řádné pochopení a zahrnutí do celkového hodnocení měření je klíčové pro získání validních výsledků.



**Obr. 32. Ověření kalibrace mikrofonu**