

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Lokalizace částečných výbojů v izolaci MKP kondenzátorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr HOCH**  
Osobní číslo: **E15N0013P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Lokalizace částečných výbojů v izolaci MKP kondenzátorů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište princip MKP kondenzátorů, technologii výroby a cílové aplikace .
2. Popište typy částečných výbojů, jejich vznik a vliv na životnost pevné izolace elektrických zařízení .
3. Popište jednotlivé metody měření částečných výbojů vhodných k detekci a lokalizaci s primárním zaměřením na MKP kondenzátory .
4. Analyzujte data naměřená na reálných výrobcích a zvolte metodu lokalizace částečných výbojů .
5. Ověřte zvolenou metodu lokalizace částečných výbojů .

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
2. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006
3. Elektronické informační zdroje, Databáze Sciecedirect, Wiley Interscience, Ieeexplore
4. Bouda, V.: Materiály pro elektrotechniku, ČVUT 2000
5. High Voltage Engineering and Testing, Hugh M. Ryan, 2013

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Pihera, Ph.D.


Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá analýzou částečných výbojů v průchodkových sestavách MKP kondenzátorů a ověřením metody lokalizace částečných výbojů v nádobě MKP kondenzátoru. Teoretická část obsahuje popis základních druhů kondenzátorů se zaměřením na metalizované polypropylenové kondenzátory a technologii jejich výroby. Dále obsahuje popis typů částečných výbojů, jejich vlivů na izolaci, metody detekce a lokalizace částečných výbojů. Praktická část se zabývá analýzou průchodkových sestav z pohledu vzniku částečných výbojů a ověřením metody lokalizace částečných výbojů pomocí metody časových diferencí.

## **Klíčová slova**

Metalizovaný polypropylenový kondenzátor, průchodková sestava, částečné výboje, galvanická metoda, akustická lokalizace částečných výbojů, metoda časových diferencí.

## **Abstract**

Master thesis deals with the analysis of partial discharges in bushing assemblies of the MKP capacitors and verification an acoustic partial discharges localization method in the case of MKP capacitor. The theoretical part describes the basic types of capacitors with a focus on metallized polypropylene capacitors and technology of their production. It also contains description of the types of partial discharges, their influence on the insulation, the method of detection and localization of partial discharges. The practical part deals with analyzis the bushing assemblies from the perspective of partial discharges and verification method for localization of partial discharges using the time difference method.

## **Key words**

Metallized polypropylene capacitor, bushing assembly, partial discharges, galvanic method, acoustic localization of partial discharge, time difference method.

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 14.5.2017

Bc. Petr Hoch

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Další poděkování patří Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady a připomínky při ověřování metody lokalizace částečných výbojů.

Dále bych rád poděkoval firmě VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o. závod Blatná za poskytnutí dokumentace, vzorků a odborných exkurzí.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 KONDENZÁTORY</b> .....	<b>11</b>
1.1 VLASTNOSTI METALIZOVANÝCH POLYPROPYLENOVÝCH KONDENZÁTORŮ .....	13
1.2 TECHNOLOGIE VÝROBY .....	15
1.2.1 Navíjecí proces .....	15
1.2.2 Vytvoření kontaktních ploch .....	16
1.2.3 Temperace .....	17
1.2.4 Sestavení kondenzátoru .....	17
1.2.5 Diagnostika svítek .....	18
1.3 OBLASTI POUŽITÍ .....	19
<b>2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE</b> .....	<b>20</b>
2.1 TYPY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	20
2.2 VELIČINY VZTAŽENÉ K ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	23
2.3 Vlivy částečných výbojů na izolaci .....	25
2.4 METODY DETEKCE A LOKALIZACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	27
2.4.1 Elektrické metody .....	27
2.4.2 Neelektrické metody .....	29
2.5 AKUSTICKÁ DETEKCE A LOKALIZACE .....	30
2.5.1 Akustické vlny .....	30
2.5.2 Lokalizace zdroje akustických vln .....	32
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>34</b>
3.1 MĚŘENÉ VZORKY .....	34
3.2 POSTUP MĚŘENÍ .....	36
3.3 ANALÝZA DAT .....	39
3.3.1 Naměřená a vypočtená data pro Typ 1 .....	39
3.3.2 Naměřená a vypočtená data pro Typ 2 .....	41
3.3.3 Grafy naměřených veličin .....	43
3.3.4 Typické grafické závislosti částečných výbojů na měřených sestavách .....	45
3.4 ZJIŠŤOVÁNÍ ZDROJOVÉHO LOKALITY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PRŮCHODKOVÝCH SESTAV .....	53
3.5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ .....	58
<b>4 OVĚŘENÍ METODY LOKALIZACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ</b> .....	<b>59</b>
4.1 POSTUP MĚŘENÍ .....	60
4.2 POSTUP VÝPOČTU ZDROJOVÉ LOKALITY .....	62
4.3 VYHODNOCENÍ OVĚŘENÍ METODY LOKALIZACE .....	67
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>68</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>69</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$C$ .....	Kapacita kondenzátoru [ $F$ ]
$MKP$ .....	Metalizovaný polypropylenový kondenzátor
$U_i$ .....	Zapalovací napětí částečných výbojů [ $kV$ ]
$U_e$ .....	Zhášecí napětí částečných výbojů [ $kV$ ]
$Q_{iec}$ .....	Kvantitativně největší opakující se úroveň náboje částečných výbojů [ $pC$ ]
$Q_{iec_5}$ .....	Náboj $Q_{iec}$ po 5 minutách měření [ $pC$ ]
$Typ1$ .....	Označení průchodkové sestavy se šroubem o průměru 16 mm
$Typ2$ .....	Označení průchodkové sestavy se šroubem o průměru 12 mm
$\varepsilon_0$ .....	Permitivita vakua - $8,854 \cdot 10^{-12} [F / m]$
$\varepsilon_r$ .....	Relativní permitivita [-]

## Úvod

Hlavními cíly této diplomové práce jsou analýzy částečných výbojů v průchodkových sestavách MKP kondenzátorů a ověření metody lokalizace částečných výbojů v nádobě MKP kondenzátoru. Částečné výboje vznikají zejména v nehomogenních částech izolačních soustav vysokonapěťových zařízení, kde svými účinky mohou způsobit plný dielektrický průraz a tím poškodit celé zařízení. Je tedy důležité zabývat se diagnostikou jednotlivých částí izolačních systémů, zejména detekcí a lokalizací míst vzniku nežádoucích částečných výbojů.

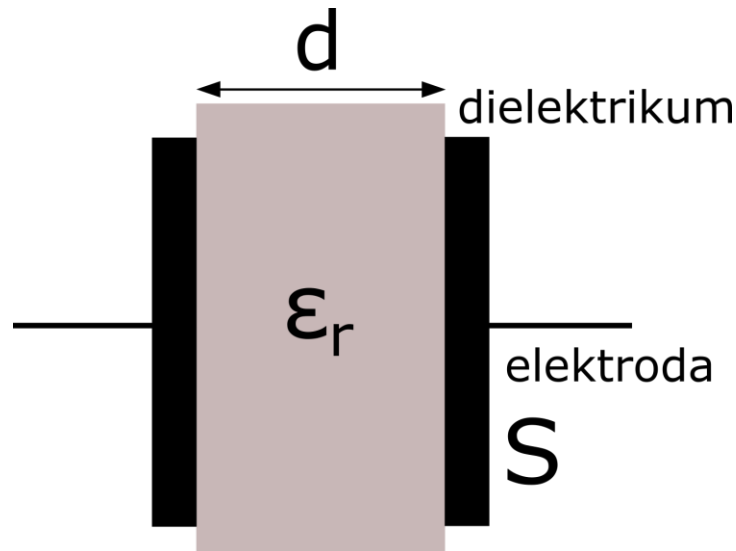
Teoretická část práce se zaměřuje na popis základních druhů kondenzátorů se zaměřením na metalizované polypropylenové kondenzátory a technologii jejich výroby. Dále na popis jednotlivých typů částečných výbojů, jejich účinků na izolaci elektrických zařízení, veličin vztahovaných k částečným výbojům, metod detekce a lokalizace částečných výbojů, které jsou vhodné pro MKP kondenzátory.

Experimentální část je rozdělena na dvě části. První se zabývá analýzou dat naměřených pomocí galvanické metody na průchodkových sestav z pohledu vzniku částečných výbojů a vlivu momentu utažení na částečné výboje. Dále je v této části popsáno zjišťování zdrojové lokality částečných výbojů vznikajících v izolační soustavě průchodkové sestavy.

Druhá část je věnována ověření metody lokalizace částečných výbojů uvnitř ocelové nádoby MKP kondenzátoru. Ověřovaným způsobem lokalizace je akustická metoda časových diferencí s využitím dvou iteračních metod pro výpočet souřadnic zdrojové lokality.

# 1 Kondenzátory

Kondenzátory jsou elektronické pasivní součástky, které se využívají ve všech odvětvích elektrotechniky. Kondenzátor je složen ze dvou vodivých elektrod od sebe navzájem oddělených pomocí dielektrika, uspořádání je patrné z *Obr. 1.1*. Kondenzátor umožňuje dočasné uchování elektrické energie ve formě elektrického náboje uloženého na elektrodách. Velikost uchovaného náboje závisí na přivedeném napětí a na kapacitě kondenzátoru.



*Obr. 1.1 Principiální uspořádání kondenzátoru*

Kapacita kondenzátoru je závislá na ploše elektrod  $S$ , tloušťce dielektrika  $d$ , permitivitě vakua  $\varepsilon_0$  a druhu dielektrika, který je definován relativní permitivitou  $\varepsilon_r$  (1-1).

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (1-1)$$

Kondenzátory [1] [2] [3] lze rozdělit na několik základních typů, dle druhu použitého dielektrika na:

**Keramické** - dielektrikum je tvořeno speciálními keramikami, které umožňují dosáhnout vysokých hodnot permitivity (až 10 000). Kapacity těchto kondenzátorů se pohybují od jednotek pF do několika  $\mu$ F. Keramické kondenzátory jsou jedny z nejpoužívanějších díky své nízké ceně, spolehlivosti a jednoduchosti konstrukce. Jsou vhodné i pro povrchovou montáž. Jejich nevýhodou je vysoká teplotní závislost kapacity, křehkost a neobrobitelnost keramiky.

**Slídové** - mají velmi dobré vlastnosti a jsou vhodné pro vysokofrekvenční techniku. Vydrží vysoké teploty, mají nízký teplotní koeficient a velký izolační odpor. Kapacity těchto kondenzátorů dosahují hodnot nad 1nF. Momentálně však nejsou příliš využívány kvůli svým rozměrům a nízké permitivitě, a proto jsou nahrazovány kvalitními keramickými kondenzátory.

**Elektrolytické** - jsou odlišnými typy kondenzátorů, jelikož se vyrábí jako polarizované. Katoda je tvořena vodivým elektrolytem a anoda Al nebo Ta fólií. Anoda je pokryta tenkou vrstvou oxidu hlinitého či oxidu tantaličného, která má dobré dielektrické vlastnosti i při své malé tloušťce. Elektrody se vyznačují velkým povrchem díky nepravidelně naleptané struktuře, proto kondenzátory nabízí vysoké hodnoty kapacity běžně nad 1 $\mu$ F. Nevýhodami jsou nemožnost přepólování kondenzátoru a vyšší parazitní indukčnosti.

**Svitkové (fóliové)** - jsou navinuty z dlouhých pásů dielektrika a kovových fólií do tvaru válce. Výsledná kapacita je dána celkovou aktivní plochou elektrod a druhem dielektrika. Tento typ dosahuje kapacit až stovek nF, vyznačuje se však zvýšenou vlastní indukčností. Svitkové kondenzátory lze dále rozdělit na kondenzátory s dielektrikem z papíru nebo z umělých hmot.

Svitkové papírové kondenzátory jsou složeny z kvalitních impregnovaných papírů a kovové fólie nebo z metalizovaného papíru, na kterém je napařena vrstva kovu. Tímto uspořádáním dosahují kondenzátory menších rozměrů, ceny a regeneračních schopností v případě náhodného průrazu. Regenerační proces je popsán v další části práce.

Svitkové kondenzátory s dielektrikem z umělých hmot mají vlastnosti závislé na druhu použitého dielektrika. Jako dielektrikum lze použít polypropylén, polyester, styroflex nebo teflon. Tyto kondenzátory mají obecně malé ztráty a malý teplotní koeficient, proto je lze s výhodou využít například v oscilačních obvodech. Obdobně jako u papírových kondenzátorů je možné vyrobit kondenzátory z kovové fólie či metalizovaného dielektrika.

## 1.1 Vlastnosti metalizovaných polypropylenových kondenzátorů

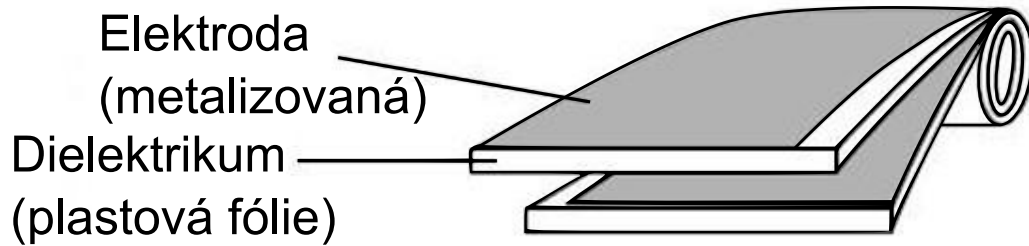
Metalizované polypropylenové kondenzátory jsou problematikou této diplomové práce, proto jim jsou věnovány následující kapitoly. Takto vyráběné kondenzátory lze označit jako MKP kondenzátory neboli „Metallisiertet Kunststoff Polypropylen“. MKP kondenzátory jsou využívány zejména ve vysokonapěťových aplikacích, energetice, rezonančních a vysokofrekvenčních obvodech. Jejich široké uplatnění je dáno zejména výbornými vlastnostmi polypropylenového dielektrika [4] [5] [6] [7].

Polypropylen je velice robustní a neobvykle odolný materiál zejména vůči řadě chemických rozpouštědel, ale též vůči některým kyselinám a bázím. Teplotní a frekvenční koeficient elektrických parametrů je nízký. Je to dielektrikum s velmi nízkým ztrátovým činitelem, který umožňuje průchod velkého střídavého proudu, při kterém dochází pouze k malému zahřívání. Dále se vyznačuje velice vysokým izolačním odporem, nízkou dielektrickou absorpcí a vysokou dielektrickou pevností. V *Tab. 1.1* jsou některé typické parametry polypropylenového dielektrika.

*Tab. 1.1 Typické parametry polypropylenového dielektrika [4] [6] [7]*

Parametr	Hodnoty
Relativní permitivita	2,2
Ztrátový činitel při 1 kHz ( $\tan \delta$ v %)	0,02
Izolační odpor [ $M\Omega \times \mu F$ ]	100 000
Dielektrická absorpce [%]	0,05
Dielektrická pevnost [ $V/\mu m$ ]	650
Kapacitní drift - $\Delta C/C$ [%]	0,5
Absorpce vlhkosti [%]	0,01
Maximální teplota [ $^{\circ}C$ ]	100
Teplotní koeficient [ppm/ $^{\circ}C$ ]	-200, $\pm 100$

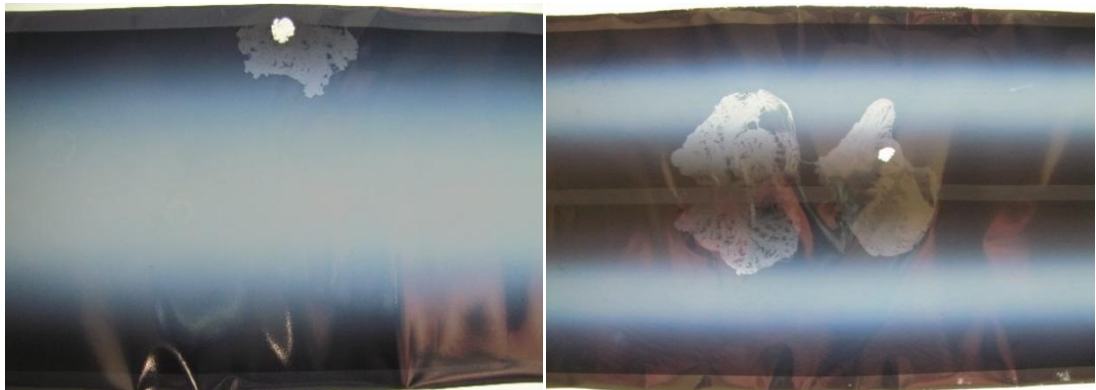
U MKP kondenzátorů jsou elektrody vytvořeny vakuovým nanesením tenké kovové vrstvy Al, Zn nebo slitiny Zn/Al na polypropylenové dielektrikum. Tloušťka kovové vrstvy je typicky 0,02  $\mu m$  až 0,1  $\mu m$  [7] a tloušťka dielektrika je řádově jednotky  $\mu m$  [8] [9]. Metalizované fólie jsou následně navinuty do tvaru svitku a na podstavy válcového svitku je naprášena vrstva kovu, který propojuje jednotlivé závity mezi sebou. Vytvořená plocha slouží i pro následné připájení kontaktů či propojení s dalšími svitky. Na *Obr. 1.2* je naznačena konstrukce svitkového metalizovaného kondenzátoru. Svitek je složen ze dvou metalizovaných fólií, jedna fólie pro kladnou a druhá pro zápornou elektrodu kondenzátoru.



Obr. 1.2 Konstrukce svítkového metalizovaného kondenzátoru [10]

### Samoregenerace (self-healing)

Kondenzátory vytvořené touto technologií nabízí vysokou energetickou hustotu a díky této konstrukci se dokážou samy zregenerovat z průrazu některých částí dielektrika do provozuschopného stavu. K tomuto procesu [5] [7] [9] [11], který se nazývá samoregenerace (self-healing), dochází při zvýšeném vnějším napětí v místech, kde dielektrická vrstva obsahuje bublinky, nečistoty z výroby nebo je mechanicky poškozená. V takovýchto místech se po přivedení napětí objeví elektrický oblouk, který generuje tepelnou energii a díky němuž dojde k odpaření tenké kovové vrstvy a vytlačení roztavené dielektrické vrstvy z místa defektu. Tím vznikne opět odizolované místo a obnoví se provozuschopný stav Obr. 1.3. Celý proces trvá řádově jednotky  $\mu\text{s}$  [7]. Po samoregeneraci dojde pouze k nepatrnému poklesu kapacity v řádech pF [8]. Nebezpečí při tomto procesu spočívá v poškození dalších vrstev kondenzátoru, proto je potřeba zajistit, aby nebyly vrstvy příliš utaženy, aby se tudíž mohla roztavená hmota dostat z místa defektu co nejrychleji a neohrozila tak přilehlé vrstvy.



Obr. 1.3 Praktická ukázka "vyléčených" míst na metalizovaných fóliích [12]

## 1.2 Technologie výroby

Proces výroby kondenzátorových svitků technologií MKP je možné rozdělit na několik hlavních kroků. Při popisu technologie výroby bylo čerpáno z dokumentací a odborných exkurzí ve společnosti VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o. závod Blatná. [12]

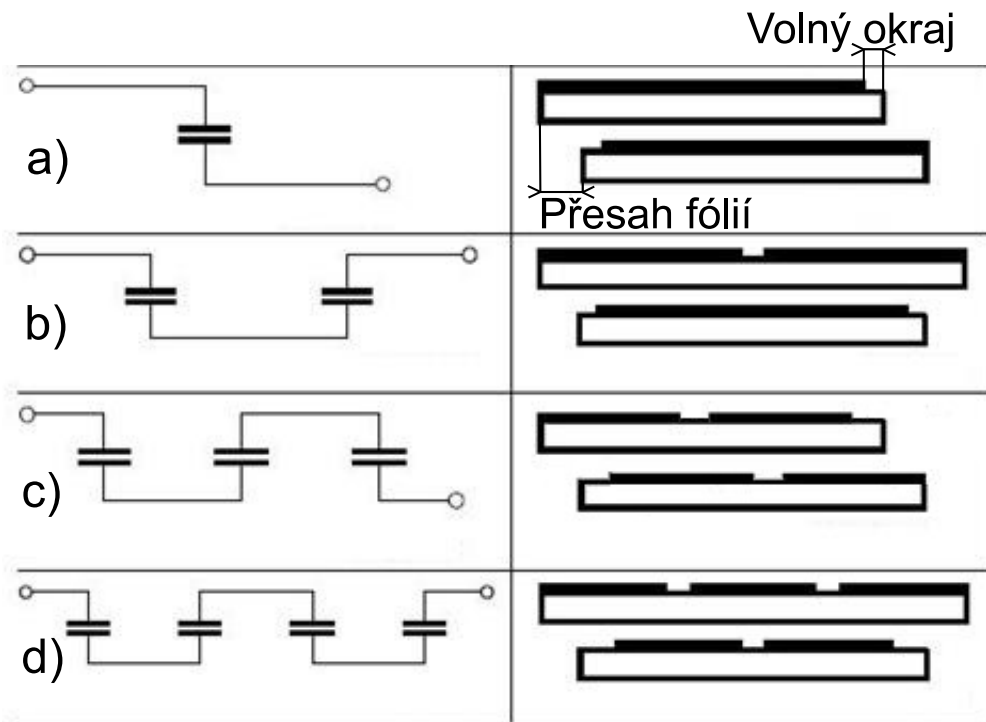
### 1.2.1 Navíjecí proces

Navíjecí proces je nejdůležitější částí výrobního procesu, jelikož správné navinutí určuje výsledné vlastnosti svitku. Jakékoliv nečistoty, které jsou zaneseny do výrobního procesu, mohou poškodit či zničit výsledný svitek. Je proto nutné dodržovat vhodné provozní podmínky a to zejména bezprašné prostředí, stálou teplotu a vlhkost ve výrobních prostorách. Dále je potřeba udržovat čistotu a pořádek u navíjecích strojů.

Pro navíjení se používají polypropylenové fólie metalizované slitinou Zn/Al, vrstva kovu je vytvořena technologií vakuového naprašování. Tloušťku metalizované vrstvy lze měnit v závislosti na požadovaném odporu metalizace a lze vytvořit různé profily této metalizace tak, jak je potřebné pro daný typ kondenzátoru.

Při procesu navíjení jsou namotávány metalizované polypropylenové fólie na pevné jádro z materiálu se stejnou tepelnou roztažností jako má fólie. V případě rozdílných tepelných roztažností by mohlo jádro při zvýšené teplotě reagovat jinak a následně poškodit funkčnost celého svitku. Důležitým parametrem pro navíjecí proces je rovinnost navinuté fólie, té je dosaženo díky soustavě válců, které vyhlazují metalizovanou fólii. Soustava válců také napíná fólii tak, aby při navíjení byly výsledné vrstvy co nejvíce na sobě a minimalizovalo se množství vzduchu mezi fóliemi. Před ukončení svitku je nutné provést odmetalizaci fólie, neboť na případném ostrém přechodu mezi kovem a izolací by mohly vznikat nežádoucí výboje. Tento krok se provádí pomocí dvou Al fólií připojených na napětí. Při dotyku s metalizovanou fólií se metalizace z povrchu odpařuje tak, že její tloušťka lineárně klesá k nule během několika závitů. Následně se za takto upravenou fólii navine několik závitů čisté polypropylenové fólie, která slouží jako ochrana před poškozením.

Pro navinuté svitky je typické uspořádání vrstev na *Obr. 1.4 a)*, v závislosti na požadovaných parametrech lze vytvořit i více-sériové svitky. Výroba těchto svitků se provádí podélným přerušením metalizovaných vrstev jak je naznačeno na *Obr. 1.4 b) c) d)*. Vrstvy fólií jsou navinuty vždy s určitým přesahem a vrstva metalizace má na jedné straně volný okraj. Tento okraj slouží k ochraně před přeskoky napětí mezi jednotlivými elektrodami. Přesah fólií je určen ke stabilizaci kapacity a zejména vytváří místo pro uchycení kontaktních ploch k metalizované vrstvě.



*Obr. 1.4 Vrstvení více-sériových svitků [10]*

### 1.2.2 Vytvoření kontaktních ploch

Na každý svitek je nutné nanést vrstvu kovu, která bude tvořit jednu z elektrod kondenzátoru. Proces vytváření kontaktních ploch se nazývá šopování. Jedná se o žárové nanesení zinku na svitky. Princip šopování spočívá v tavení dvou drátků z 99,5% zinku pomocí elektrického oblouku a následného rozprášení roztaveného zinku tlakem vzduchu na svitky. Nejdůležitějším parametrem je teplota roztaveného zinku při dopadu na svitek, pokud by teplota překročila 100°C - 120°C, mohlo by dojít k přílišnému roztavení polypropylenu a tím zničení celého svitku. Tuto teplotu je velice obtížné a nákladné zjistit, proto se sledují jiné pouze orientační teploty. Při dopadu zinku na svitek dojde částečnému natavení fólie a tím k lepšímu propojení zinku s aktivní vrstvou. Na *Obr. 1.5* je fotografie svitku před a po procesu šopování, je zde též patrné pevné jádro na které se fólie navíjí.





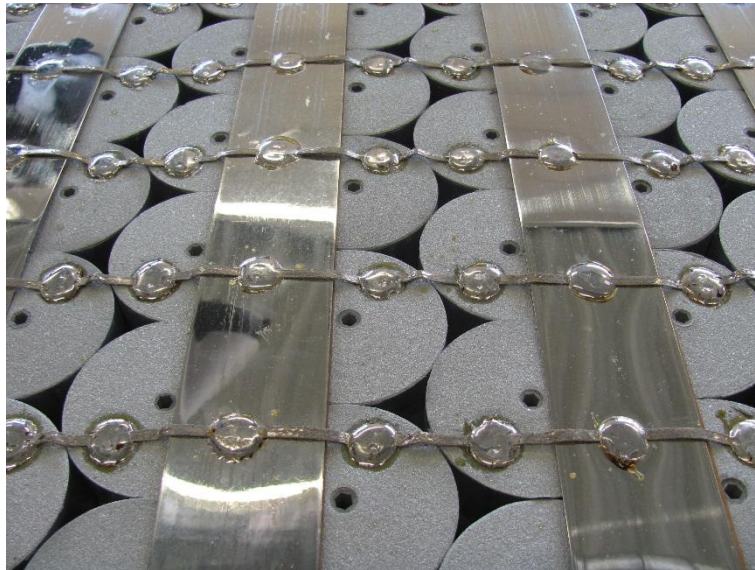
Obr. 1.5 Svitky před a po šopování [12]

### 1.2.3 Temperace

Před temperací v peci je potřeba očistit svitky od přebytků zinku po šopování. Po vložení svitků do pece dochází ke smršťování polypropylenové fólie, tím dojde ke stažení vrstev a případně k vytlačení nežádoucího vzduchu, který zůstal mezi vrstvami. Při temperaci je důležité vhodně nastavit teplotu v peci, jelikož by při vyšší teplotě mohlo dojít k roztavení fólie. Tímto procesem se definuje kapacita daného svitku, dostanou-li se vrstvy k sobě blíže než je požadováno dojde k nežádoucímu nárůstu kapacity.

### 1.2.4 Sestavení kondenzátoru

Výsledný kondenzátor se skládá z jednotek až stovek svitků a to v závislosti na požadavcích zákazníka na celkovou kapacitu, napětí, rozměry apod. Svitky se propojují pájením měděných svazkových vodičů na kontaktní plechy a plochy vytvořené šopováním. Propojení kondenzátorů je vytvořeno sériově, paralelně nebo sérioparalelně, příklad vzájemně propojených svitků je na Obr. 1.6. Svazky svitků se následně vkládají do krytů různých tvarů a velikostí. Kryt je vytvořen z hliníku nebo nerezové oceli převážně tvaru kvádra nebo válce. Uvnitř krytu je několik vrstev izolace, do kterých se umístí svazky svitků. Svazky se navzájem propojí a vývody se vyvedou skrz průchodkové sestavy mimo kryt. Kondenzátory se převážně plní epoxidovou pryskyřicí, avšak je možné je plnit i inertními plyny jako je dusík či SF<sub>6</sub>.



Obr. 1.6 Fotografie svitků vzájemně propojených do svazků [12]

### 1.2.5 Diagnostika svitků

Diagnostika je nedílnou součástí výrobního procesu kondenzátorů a prolíná celý výrobní proces. První měření parametrů se provádí na prvních svitcích, které jsou ten den navinuty. Podle výsledků se upraví nastavení navíječek a jsou dokončeny další svitky. Každý svitek je označen unikátním čárovým kódem, který zaznamenává informace o dnu navinutí, číslu navíječky apod., díky tomu je v případě poruchy možno vysledovat jeho cestu výrobním procesem. Během přepravy svitků po závodě se sledují i jejich přepravní podmínky.

Druhé měření následuje po vytvrzení v peci a je více komplexní než předchozí, jelikož se měří všechny důležité parametry. Při měření se provádí umělé vyvolání samoregenerace, aby se všechna poškozená místa "vyléčila" a následně jsou vyřazeny nevyhovující svitky. Dále probíhá test napěťového a proudového zatížení, kde se zjišťuje zda-li je schopen svitek vydržet proudy a napětí, na které byl navrhnut. Poslední částí měření je vyhodnocení ztrátového činitele  $tg \delta$  a kapacity svitku. Zakódované výsledky měření jsou opět natisknuty na svitek.

Závěrečné měření probíhá po kompletaci kondenzátoru při které se měří výsledná kapacita kondenzátoru, napěťové a proudové zatížení a částečné výboje, které jsou popsány v kapitole 2. Pokud je vše v pořádku, je kondenzátor společně s identifikační kartou odeslán na expedici.

### 1.3 Oblasti použití

MKP kondenzátory se používají ve výkonových aplikacích a v aplikacích, kde je kladen důraz na kvalitu a stabilitu součástek. V závislosti na konstrukci je možné vyrobit kondenzátory ve třífázové nebo jednofázové variantě a pro vysokonapěťové nebo nízkonapěťové aplikace. V současnosti jsou metalizované polypropylenové kondenzátory stále více žádanějším produktem především v oblasti DC link. Nárůst využití těchto kondenzátorů v praxi je způsoben výbornými vlastnostmi, kterých dosahují. Jejich výhodami jsou zejména stálé parametry při kolísajícím napětí a teplotě, schopnost samoregenerace a poměrně malé nároky na velikost. [13] – [18]

Kondenzátory se nejvíce používají jako [13] – [18]:

- Kompenzační kondenzátory NN a VN - individuální, skupinová nebo centrální kompenzace jalové energie.
- DC link kondenzátory - k vyhlazení zvlněného stejnosměrného napětí, k podpoře sítí při periodických proudových špičkách a do DC přenosových soustav.
- AC filtrační kondenzátory - v AC/DC měničích a střídačích (trakční měniče, měniče větrných elektráren nebo střídače fotovoltaických elektráren).
- Tlumící kondenzátory do jednotek s IGBT tranzistory.
- VN kondenzátory pro všeobecné použití v různých elektrotechnických zařízeních.



Obr. 1.2 Příklady provedení MKP kondenzátorů pro různé aplikace [13] [15]  
zleva - vysokonapěťové kondenzátory, kompenzační kondenzátory, DC link kondenzátory

## 2 Částečné výboje

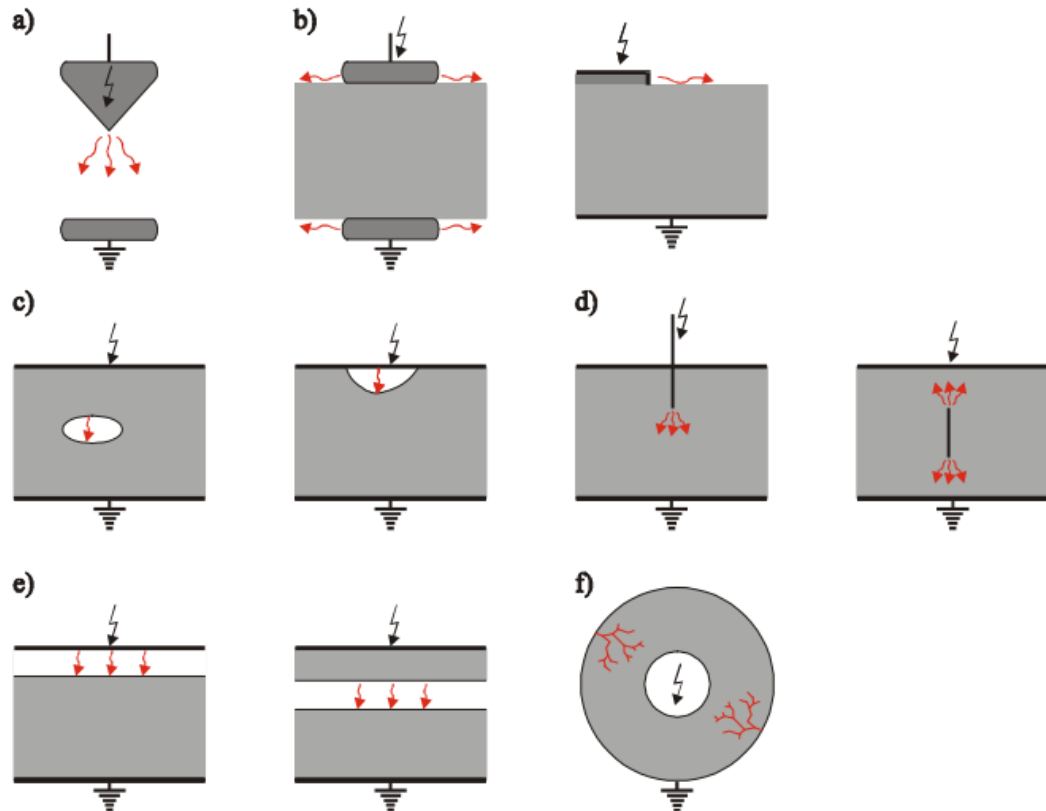
Částečné výboje jsou jedny z druhů elektrických výbojů vyskytujících se při provozu elektrických zařízení. Částečný výboj je v normě ČSN EN 60270 definován jako „*lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče.*“ [19] Při částečných výbojích nedochází k průrazu dielektrika v celé šířce, ale pouze v části, kde jsou dielektrické vlastnosti izolačního materiálu nehomogenní. V těchto místech dochází k lokálnímu nárůstu elektrického pole, což má za následek vznik lokálního částečného výboje, který se objevuje jako pulz s dobou trvání menší než 1  $\mu\text{s}$  [19] [20]. Částečné výboje výrazným způsobem ovlivňují vlastnosti izolačních systémů, tím dochází ke snižování životnosti a spolehlivosti systémů. Tyto výboje jsou doprovázeny světlem, zvukem, tepelnými účinky a chemickými reakcemi. [19] [20] [21] [22]

### 2.1 Typy částečných výbojů

Částečné výboje jsou obecně děleny dle místa vzniku na [20] [22]:

- Vnější částečné výboje, jež se objevují v plynech kolem elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení. Jedná se zejména o doutnavé a korónové výboje. Na *Obr. 2.1 a)* je uspořádání hrot-deska, odpovídající vnějším částečným výbojům, které se převážně vyskytují na straně vysokého napětí, ale i na ostrých prvcích se zemním potenciálem.
- Vnitřní částečné výboje, které vznikají v plynech a jsou obklopeny kapalnými či pevnými dielektriky např. v dutinách se vzduchem v pevném dielektriku, v místech s izolací oddělenou od elektrody nebo na ostrých hrotech uvnitř dielektrika, jak je uvedeno na *Obr. 2.1 c), d), e)*.
- Povrchové částečné výboje, nacházející se na rozhraních mezi pevnými a plynnými dielektriky v okolí elektrod. Tyto výboje vznikají na výstupu vinutí z drážky v točivých strojích, koncovkách kabelů či u průchodek apod. Příklad uspořádání elektrod pro povrchové částečné výboje je na *Obr. 2.1 b)*

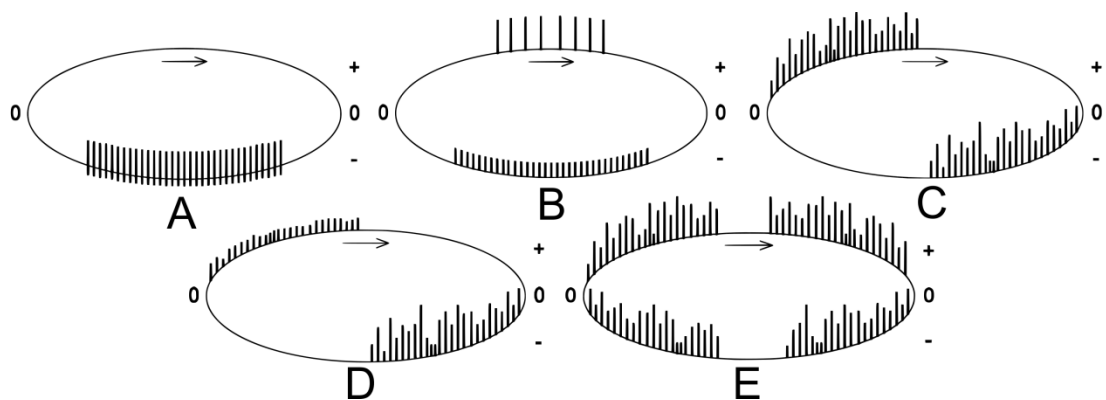
Na *Obr. 2.1 f)* je speciální typ částečného výboje tzv. elektrický stromeček vznikající v nedokonalostech izolačních materiálů. Jeho růst je způsoben vnitřními částečnými výboji a postupem času může dojít až k průrazu izolace.



Obr. 2.1 Typická místa vzniku částečných výbojů, převzato z [22]

V závislosti na umístění částečného výboje na křivce napájecího napětí podle fázového posuvu částečného výboje, lze určit druh a povahu výbojové činnosti. Pozice částečných výbojů jsou zobrazovány pomocí osciloskopu jako Lissajousovy obrazce napájecího napětí se superponovanými impulsy částečných výbojů. S rozvojem digitální techniky se obrazce začaly zobrazovat na rozvinuté periodě napájecího napětí, avšak Lissajousovy obrazce se stále používají a to jako slovník modelových typů. [20] [23]

Na Obr. 2.2 je pět základních typů částečných výbojů [20] [23], značka 0 označuje průchod napájecího napětí nulou.



Obr. 2.2 Obrazce základních typů částečných výbojů [23]

Typ A je charakteristický pro předvýboje v plynech např. na uspořádání hrot (tyč)-deska. Jsou-li pulzy v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu. Jestliže jsou pulzy v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu. Pulzy mají stejnou velikost a jsou v jedné půlperiodě symetricky okolo napětového maxima. Se zvyšujícím se napětím roste počet pulzů, ale velikost zůstává zachována. Tento typ se vyskytuje především u mnoha druhů málo nebezpečných výbojů (koróna).

Typ B se též objevuje u uspořádání hrot (tyč)-deska, avšak v kapalných izolantech. Jestliže se velké pulzy objevují v kladné půlperiodě, je deska na zemním potenciálu. Jsou-li velké pulzy v záporné půlperiodě je deska na kladném potenciálu. Pulzy jsou v obou půlperiodách symetricky okolo napětových maxim, v jedné půlperiodě větší velikost a menší frekvence a v druhé půlperiodě naopak.

Typ C má pulzy v obou půlperiodách a průměrná velikost těchto pulzů je přibližně stejná. Pulzy se nacházejí mezi průchodem napětí nulou a napětovým maximem v obou půlperiodách. Toto nastává u dutinek (defektů) v pevném izolantu, plynových bublinek v kapalném izolantu, klouzavých výbojů na povrchu pevných izolantů, dotýkajících se izolovaných vodičů na různých potenciálech nebo mezi dvěma neuzemněnými částmi. Tento typ je velice nebezpečný pro izolační systém.

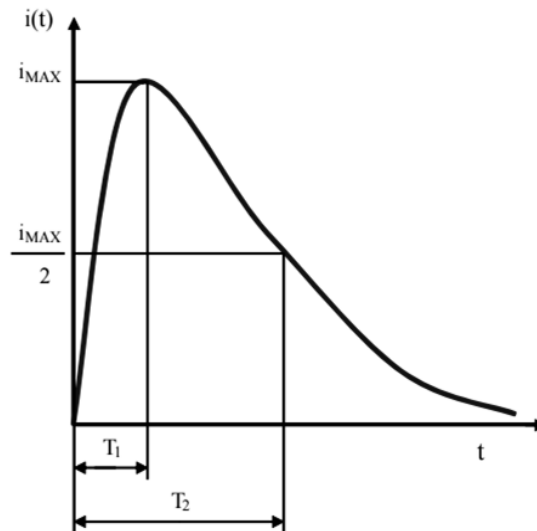
Typ D je speciálním typem C, kde je velikost pulzů v půlperiodách různá. Výboje jsou způsobeny úbytkem nábojů z jedné strany dutinky např. pokud je dutinka přímo na povrchu pevného izolantu u elektrody. Jsou-li pulzy větší v kladné půlperiodě, je dutinka u vysokonapětové elektrody. Je-li tomu naopak, je dutinka u zemní elektrody. Tento typ je též velmi nebezpečný pro izolační systém a může svědčit o delaminaci či degradaci izolace.

Pro typ E je charakteristické symetrické seskupení různě velkých pulzů okolo obou průchodů nulovým napětím. Tyto obrazce jsou způsobeny nedokonalým či odporovým kontaktem mezi kovovými částmi nebo mezi dvěma vrstvami stínění. Kontakt může být i mimo izolační materiál.

## 2.2 Veličiny vztažené k částečných výbojů

### Impulzy částečných výbojů

Proudový nebo napěťový impulz částečného výboje vzniká jako výsledek přítomnosti částečného výboje v testovaném objektu a měření se provádí vhodným detekčním obvodem.



Obr. 2.3 Typický tvar proudového impulzu částečného výboje, převzato z [23]

Na Obr. 2.3 je vyobrazen tvar proudového impulzu, kde  $i_{\max}$  je maximální hodnotou amplitudy pulzu. Proudový impulz za čas  $T_1$  dosáhne svého maxima a za dobu  $T_2$  klesne jeho amplituda na polovinu. Náboj impulzu lze spočítat jako plochu pod křivkou (2-1). [19]

$$q(t) = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (2-1)$$

Následující měřené a odvozené veličiny popisující aktivitu částečných výbojů definuje norma ČSN EN 60270. [19]

### Zdánlivý náboj $q$ impulzu částečného výboje

Zdánlivý náboj  $q$  impulzu částečného výboje je náboj, který je přiveden v krátkém časovém úseku na svorky zkoušeného objektu. Dojde k poklesu napětí mezi jeho elektrodami o stejnou hodnotu, kterou by způsobil proudový impulz částečného výboje. Zdánlivý náboj se nerovná velikosti náboje působícího v místě vzniku výboje a nemůže být přímo měřen. Velikost je obvykle vyjadřována v pikocoulombech [pC].

### Četnost impulzů $n$

Četnost impulzů  $n$  částečných výbojů je poměr celkového počtu proudových impulzů vyvolaných výbojovou činností ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání jednoho pulzu. V praxi se mohou uvažovat pouze pulzy větší než je minimální předepsaná úroveň nebo nacházející se v předepsaném rozsahu. Četnost se udává v impulzech za sekundu.

### Fázový úhel $\phi_i$ a čas $t_i$ výskytu impulzu částečného výboje

Fázový úhel  $\phi_i$  impulzu částečného výboje je

$$\phi_i = 360 \cdot \left(\frac{t_i}{T}\right) [^\circ] \quad (2-2)$$

kde  $t_i$  je doba výskytu částečného výboje měřená od předchozího průchodu zkušebnímu napětí nulou a  $T$  je perioda zkušebnímu napětí. Fázový úhel je vyjádřen ve stupních.

### Střední proud částečných výbojů $I$

Střední proud částečných výbojů je hodnota odvozená jako součet absolutních hodnot zdánlivých nábojů  $q$ , během zvoleného časového intervalu  $T$  děleno tímto intervalem.

$$I = \frac{1}{T} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) [C \cdot s^{-1} \text{nebo } A] \quad (2-3)$$

### Součtový náboj $Q$

Součtový náboj je dán součtem zdánlivých nábojů  $q$  za určitý časový okamžik, obvykle za polovinu periody napájecího napětí. Udává se v coulombech [C]. [20]

### Výkon částečných výbojů $P$

Výkon částečných výbojů je odvozená veličina, která je rovna střední hodnotě výkonu impulzů přivedených na svorky testovaného objektu za zvolenou dobu  $T$ .

$$P = \frac{1}{T} (q_1 \cdot u_1 + q_2 \cdot u_2 + \dots + q_i \cdot u_i) [W] \quad (2-4)$$

kde  $u_1, u_2, \dots, u_i$  jsou okamžitými hodnotami zkušebnímu napětí, při kterém došlo k výskytu výbojové činnosti o velikosti zdánlivého náboje  $q_1, q_2, \dots, q_i$ . Výkon částečných výbojů je vyjádřen ve wattech a musí být dodržena znaménka jednotlivých hodnot.



### **Střední kvadratický součet $D$**

Střední kvadratický součet je odvozenou veličinou, která je rovna součtu druhých mocnin zdánlivých nábojů  $q$  dělených časovým intervalem  $T$ .

$$D = \frac{1}{T} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2) [C^2 \cdot s^{-1}] \quad (2-5)$$

### **Zkušební napětí částečných výbojů**

Zkušební napětí částečných výbojů je zkušebním postupem předepsané napětí, při kterém by neměl zkoušený objekt překračovat předepsanou úroveň částečných výbojů.

### **Počáteční napětí částečných výbojů $U_i$**

Počáteční napětí částečných impulzů je napětí přiložené na testovaný objekt, při kterém jsou poprvé pozorovány opakující se částečné výboje za předpokladu, že došlo k plynulému zvyšování zkušebního napětí z nižší hodnoty do okamžiku zaznamenání částečných výbojů. Počáteční napětí částečných výbojů je udáváno ve voltech či kilovoltech.

### **Zhášecí napětí částečných výbojů $U_e$**

Zhášecí napětí částečných výbojů je napětím, při kterém se v testovaném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje za předpokladu, že je napětí postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které byly pozorovány opakující se částečné výboje. Zhášecí napětí se udává ve voltech nebo kilovoltech.

## **2.3 Vlivy částečných výbojů na izolaci**

Všechny druhy vnitřních částečných výbojů mají destruktivní vliv na izolační systém zařízení a to zejména svými přímými a nepřímými chemickými a fyzikálními účinky. Tím pádem dochází k nevratným změnám materiálů (pevných nebo kapalných izolantů), ke zkracování životnosti izolantu a ke snížení jeho elektrické pevnosti až k hranici průrazu. U vnějších částečných výbojů k těmto trvalým destruktivním vlivům nedochází. [20] [23]

Částečné výboje vznikající v nehomogenitách izolačních systémů elektrických zařízení mají tyto nežádoucí účinky [20] [23]:

## **Elektro-erozivní účinky**

Dojde-li k vytvoření oblouku v dutince dielektrika, pravděpodobně vznikne vodivá dráha. Důsledkem vysokých intenzit elektrického pole může docházet v těchto místech k čistě elektrickému průrazu a následně i k rozšíření vodivé dráhy do izolantu. V dutince může docházet k erozivní činnosti, kterou způsobují ionty a elektrony, které bombardují stěny dutinky. Dutinka se následkem eroze zvětšuje a může nastat průraz celého izolantu.

## **Chemické účinky**

Chemické účinky výbojů se tvoří při déle trvajícím elektrickém namáhání. Nejprve dochází k chemickým reakcím ve vlhkosti a produktech odloučených ze vzduchu vlivem částečných výbojů. V dutinkách obsahujících kyslík vzniká důsledkem výbojů ozón, který má velmi intenzivní oxidační účinky. Při spojení ozónu s oxidy dusíku může při vysokých teplotách dojít k tvorbě kyseliny dusičné, která je velice agresivní. K chemické destrukci přispívají i produkty rozkladu některých izolantů. Tyto produkty mohou být plynné, kapalné nebo pevné a dále difundují do okolního pevného izolantu a tím vytváří vodivé oblasti ohrožující izolační vlastnosti.

## **Tepelné účinky**

Přímým projevem částečných výbojů může být tepelná nestabilita, způsobená opakovaným vlivem částečných výbojů, které oteplují izolant. Následkem může být i tepelný průraz a může dojít k ovlivnění izolačních vlastností izolantu.

Ačkoliv dochází k neustálému vylepšování výrobních metod a technologie výroby izolantů, nelze zabránit tvorbě nehomogenit na povrchu či v objemu izolantu, které jsou zdrojem částečných výbojů. Zdrojem lokálních nehomogenit může být i nevhodný návrh nebo přítomnost cizích vodivých částic. Obecně lze považovat všechny částečné výboje v pevných nebo kapalných izolantech za nebezpečné a stupeň je dán druhem materiálu a místem vzniku výbojové činnosti. Výboje nemají stejný vliv na všechny skupiny izolačních materiálů. Anorganické látky jako je např. slída, porcelán a některá skla, jsou proti částečným výbojům velmi odolné i při dlouhodobém působení, nedochází ke zhoršování jejich izolačních vlastností. Organické látky např. polyetylen (PE), zesíťovaný polyetylen (XLPE), polytetrafluoretylen (PTFE) a kompozitní materiály obsahující epoxidová nebo silikonová pojiva jsou na degradační účinky částečných výbojů velmi náchylné i při krátkodobém působení. Při dlouhodobém působení částečných výbojů může dojít až k průrazu izolace.

## 2.4 Metody detekce a lokalizace částečných výbojů

Výbojová činnost v izolantech je doprovázena řadou fyzikálních projevů elektrického (proudové impulzy, vysokofrekvenční elektromagnetická pole) i neelektrického charakteru (chemické zplodiny, světelné záření ve viditelném a ultrafialovém pásmu, tepelný ohřev okolí a zvukové vlny ve slyšitelném i ultrazvukovém pásmu). Tyto projevy jsou využívány k detekci a lokalizaci částečných výbojů.

Metody měření lze obecně rozdělit na metody globální a lokalizační. Globální metoda měření částečných výbojů zjišťuje celkový přehled o vlastnostech a stavu izolace, zatímco lokalizační metody se zabývají stanovením místa vzniku částečného výboje. Další možné dělení je na metody, při kterých je nutné provést odstávku zařízení (off-line) a na metody, které je možné používat při provozu zařízení (on-line). [20] [23] [25]

### 2.4.1 Elektrické metody

Částečné výboje svým vznikem způsobují v napájecí síti malé proudové impulzy *Obr.2.3*. Tyto impulzy trvají v závislosti na materiálu řádově nanosekundy a měřitelná frekvence je v řádech MHz [25]. Vhodným snímáním těchto impulzů lze vyjádřit velikost částečných výbojů v zařízení. Elektrické metody se rozdělují podle způsobu měření proudových impulzů na nepřímé, kde je měření prováděno snímáním elektromagnetických projevů elektrického proudu v okolí místa vzniku částečného výboje (induktivně vázané sondy, kapacitní sondy, kapacitní a induktivní snímače, atd.). A druhým způsobem je měření přímé, kde jsou měřeny proudové impulzy vhodnými obvody (galvanická metoda). Nevýhodou elektrických metod je velká náchylnost na elektromagnetické rušení a závislost některých metod na konstrukci zařízení. [20] [23] [25]

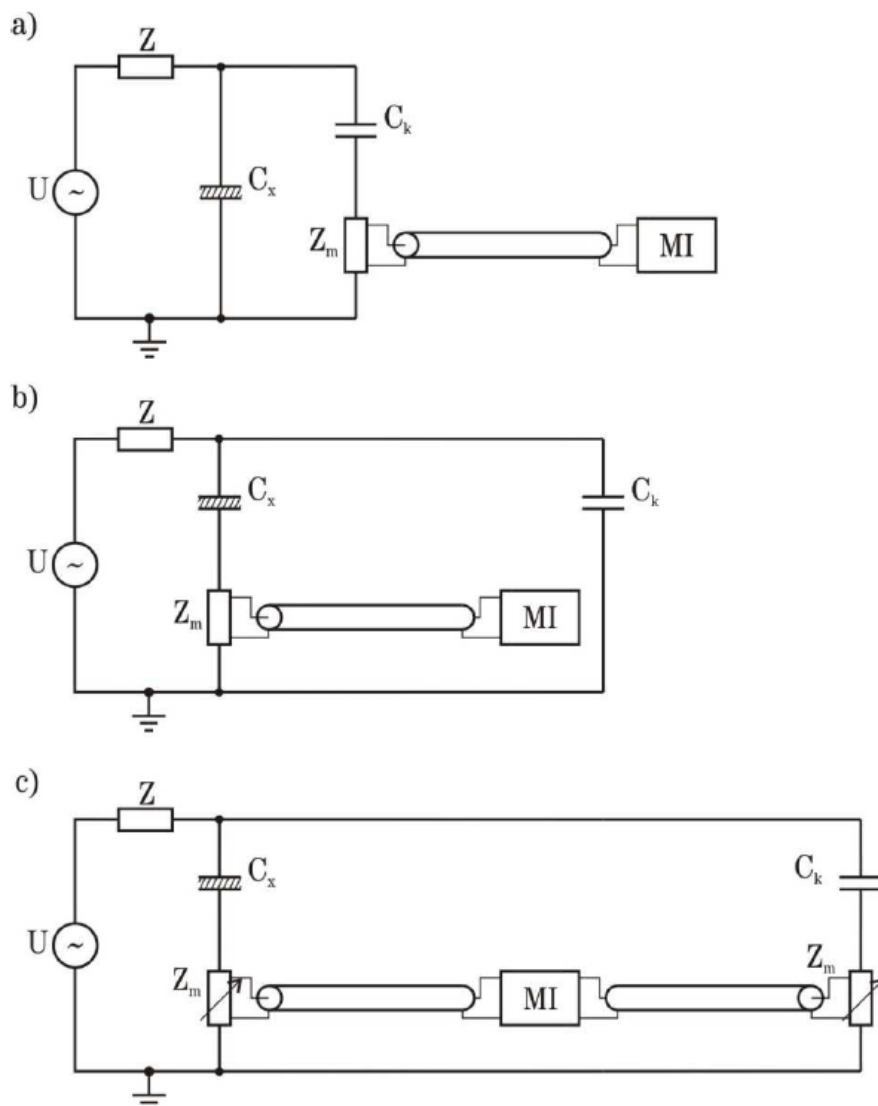
Pro detekci částečných výbojů u MKP kondenzátorů jsou vhodnější metody přímé, proto se jimi bude zabývat následující část.

### Galvanická metoda

Galvanická metoda je jedna z nejrozšířenějších metod určených pro detekci částečných výbojů v izolačním systému vysokonapěťových zařízení. Jedná se o metodu globální, využívající k detekci částečných výbojů přímého snímání proudových impulzů částečných výbojů. Tuto měřicí metodu specifikuje norma ČSN EN 60270. [19]

Norma specifikuje tři základní zapojení *Obr. 2.4*, kde  $U$  je zdrojem střídavého napájecího napětí bez částečných výbojů,  $Z$  představuje odrušovací impedanci, která zamezuje rušení od zdroje napájecího napětí,  $C_x$  značí měřený objekt,  $C_k$  je vysokonapěťový vazební kondenzátor, který musí mít nízkou indukčnost, vysokou kapacitu a nesmí vykazovat jakékoliv částečné výboje v rozsahu měření,  $Z_m$  je měřicí impedance připojená koaxiálním kabel k bloku *MI*, který představuje měřicí přístroj částečných výbojů.

Měřicí impedance obvodu je v ideálním případě čistě ohmického charakteru. Ve většině praktických případů je, ale tvořena RLC členem, který bývá naladěn na měřicí frekvenci přístroje. Snímací impedance slouží k převádění proudových impulzů vyvolaných částečnými výboji na výstupní napěťové pulzy vedené do měřicího zařízení.



*Obr. 2.4* Základní zapojení pro měření částečných výbojů galvanickou metodou, převzato z [22]

Nejčastěji využívané zapojení je na *Obr. 2.4 a)*, kde je měřicí obvod se zapojením impedance do větve vazebního kondenzátoru. Toto zapojení slouží pro měření uzemněných objektů, které nelze odzemnit nebo zařízeních o velkých kapacitách. Výhodou tohoto zapojení je ochrana měřicího obvodu v případě průrazu testovaného objektu.

Na *Obr. 2.4 b)* je obvod se zapojením měřicí impedance do větve měřeného objektu. Tento obvod lze použít u zařízení, kde je možnost odpojit zemní přívod. Výhodou zapojení je větší citlivost obvodu daná řazením rozptylových kapacit k vazebnímu kondenzátoru  $C_k$ .

Pro měření výbojů v místě umístění zařízení se využívá můstkové zapojení *Obr. 2.4 c)*. Zapojení potlačuje vnější rušení, proto jej lze využít při měření za provozních podmínek.

Součástí této metody je též kalibrace, kterou je nutno provádět téměř před každým měřením, výjimky a další specifikace jsou definovány v normě ČSN EN 60270 [19]. Vlivem kapacit v měřeném objektu a parazitních kapacit vzniká mezi měřeným objektem a měřicím zařízením zkreslení pulsů částečných výbojů a dochází ke zmenšení přeneseného náboje. Toto zkreslení je odstraněno po provedení kalibrace měřicího obvodu. Kalibrace se provádí kalibrátory neboli generátory kalibračních pulzů. Samotná kalibrace je provedena injektováním krátkých proudových impulzů o známé úrovni zdánlivého náboje  $q$  do svorek zkoušeného objektu.

Mezi výhody galvanické metody patří vysoká citlivost měření regulovaná pomocí velikosti vazební kapacity. Dále dostatečná výpovědischopnost metody pro všechny druhy izolačních systémů, u kterých se vyskytují částečné výboje. Také možnost využití metody v off-line i on-line režimu, při kterém nedochází k nadměrnému přetěžování objektu. Nevýhodami galvanické metody jsou zvýšené pořizovací a provozní náklady, velká citlivost na vnější i vnitřní rušení např. elektromagnetické rádiové vlny, rušivé proudy v uzemňovací soustavě, rušení od transformátorů a vysokonapěťových zdrojů. [20] [22] [23]

## 2.4.2 Neelektrické metody

Tyto metody využívají neelektrických projevů částečných výbojů, zejména optických, zvukových a chemických k detekci, lokalizaci a určení míry rozvinutí výbojové činnosti. Pro měření jsou využívána speciální měřicí zařízení, jako jsou směrové mikrofony pro slyšitelné i ultrazvukové vlny, piezoelektrické senzory, fotonásobiče, termokamery, plynové chromatografy atd. Jelikož mají částečné výboje poměrně malou energii, je možné použít chemickou detekci pouze tam, kde je zařízení vystaveno částečným výbojům neustále, jako

např. v olejových transformátorech nebo zařízeních s plynem SF<sub>6</sub>. Podobně je tomu u optické a tepelné detekce, které mají svou využitelnost zejména u rozvodů a venkovních vedení. Nejvhodnější neelektrická metoda pro snímání částečných výbojů v MKP kondenzátorech je tedy metoda akustické detekce a lokalizace. [20] [22] [23]

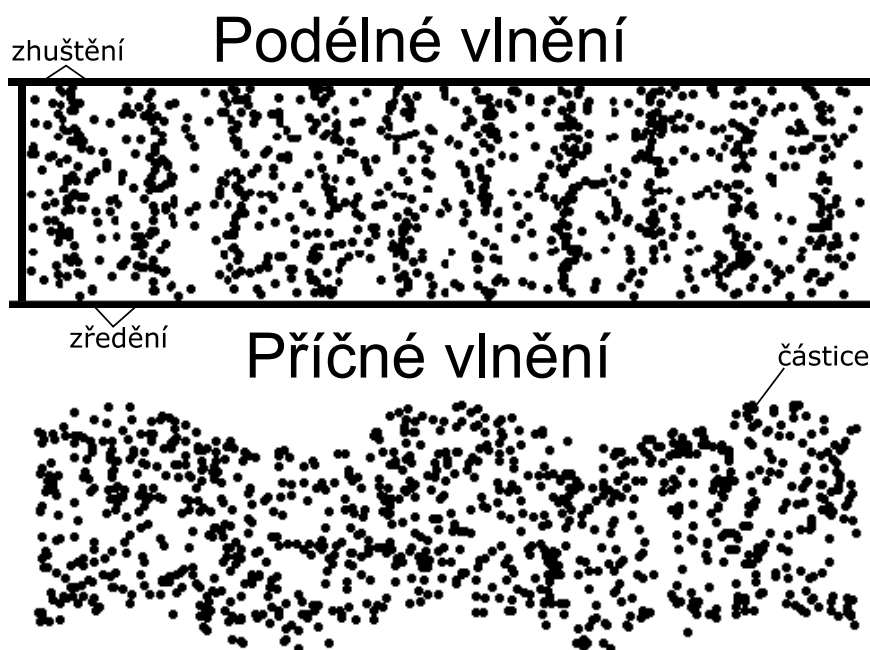
## 2.5 Akustická detekce a lokalizace

Akustická metoda [20] [22] [23] [25] - [30] je založena na detekci akustických signálů (vln) vyvolaných mechanickými kmity. Akustické vlny jsou v tomto případě vyvolány částečnými výboji a mohou být detekovány za pomoci směrových mikrofonů, piezoelektrických snímačů nebo kondenzátorových mikrofonů, které převádějí akustické vlnění na elektrické impulzy spojitého nebo nespojitého charakteru.

Akustické vlny způsobené částečnými výboji jsou ve slyšitelném i ultrazvukovém pásmu s frekvencemi od desítek Hz do stovek kHz [30]. Snímání nižších frekvencí je vhodné pro měření vzdálenějších objektů. Monitorování frekvencí v ultrazvukovém pásmu zvyšuje odstup užitečného signálu od šumu okolí.

### 2.5.1 Akustické vlny

Akustické vlny se pohybují od zdroje v kulových nebo rovinných vlnoplochách. Prostředím se akustické vlny šíří s různou rychlostí vzhledem k druhu okolního prostředí *Tab. 2.1*. Akustické vlny *Obr. 2.5* lze rozdělit na dva základní druhy, kterými jsou příčné a podélné. U příčných částice kmitají kolmo ke směru šíření vlnění. V případě podélných částice kmitají ve směru šíření vlnění a dochází ke střídavému zhušťování a zředování částic prostředí. Příčné vlny se dokážou šířit pouze prostředím, které je odolné vůči namáhání ve smyku, tedy prostředím tuhým. V pevných látkách se šíří akustické vlny příčné i podélné. V plynném a kapalném prostředí se šíří pouze podélné vlny, podmínkou pro šíření vln prostředím je dostatečná velikost vzhledem k vlnové délce akustického vlnění. [31] [32]



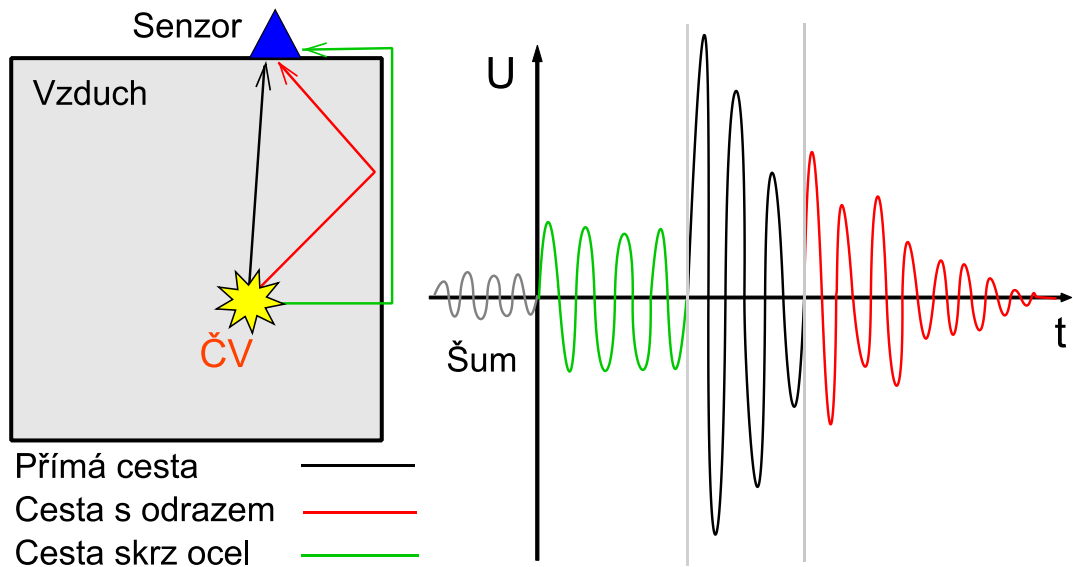
Obr. 2.5 Podélné a příčné akustické vlnění [31]

Během cesty akustických vln dochází k různým odrazům, rozptylu, interferencím a absorpci vln. Při dopadu akustické vlny na stěnu dochází k pohlcení, odražení nebo k propuštění části vlny do prostoru za stěnu.

Tab. 2.1 Rychlosti zvuku v různých látkách při teplotě 20°C [33]

Látka	Rychlost [m/s]
Hliník	6380
Měď	3500
Ocel	5000
Papír	3200
Polypropylen	2740
PVC	2380
Vzduch (20°C)	343,7
Vzduch (25°C)	346,3

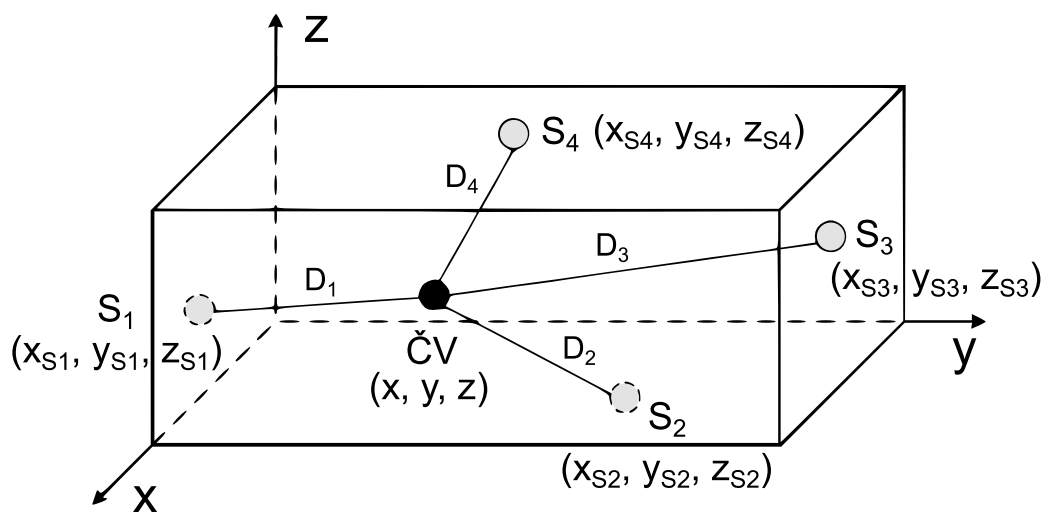
Na Obr. 2.6 je naznačena emise akustických vln pro případ částečného výboje (ČV) v ocelové nádobě vyplněné vzduchem společně s posloupností příchoďů signálů k senzoru. K senzoru se dostane několik vln v závislosti na délce cesty a druhu prostředí, kterým prochází. Z grafu na obrázku je patrné, že cestou ocelí dorazí akustická vlna k senzoru nejdříve, jelikož má akustická vlna v kovu několikanásobně větší rychlost oproti vzduchu, jak je uvedeno v Tab. 2.1. Následně dorazí vlna přímou cestou vzduchem a jako poslední vlny s odrazem od ocelové nádoby. [30]



Obr. 2.6 Cesty akustických vln od zdroje částečných výbojů v kovové nádobě vyplněné vzduchem a posloupnost příchodů signálů k senzoru [30]

## 2.5.2 Lokalizace zdroje akustických vln

Akustické (ultrazvukové) [20] [23] [34] metody jsou vhodné zejména pro lokalizaci místa vzniku částečných výbojů. První nejjednodušší způsob lokalizace zdroje akustických vln se provádí za pomoci jedné sondy a to hledáním místa s nejmenší časovou odezvou nebo místa s nejsilnějším signálem. Druhý způsob spočívá v umístění tří a více snímačů ke konstrukci zařízení a následnému softwarovému vyhodnocení časově zpožděných příchodů signálů k jednotlivým snímačům. Toho se s výhodou využívá u on-line diagnostik, kde je možné v reálném čase určit místo vzniku částečných výbojů. Další výhodou akustické lokalizace je odolnost vůči elektromagnetickému rušení a poměrně nízké pořizovací náklady.



Obr. 2.7 Externí snímače rozmístěné na nádobě s částečným výbojem v kartézských souřadnicích [35]



Druhý způsob lokalizace lze rozdělit na několik dalších typů [25] [27] [30] [34] a to podle algoritmu výpočtu zdroje akustických vln z časově zpožděných signálů. Úlohou lokalizace je výpočet kartézských souřadnic zdroje částečných výbojů  $(x, y, z)$  za pomoci tří a více snímačů se známou polohou v souřadném systému. Rozložení snímačů je naznačeno na *Obr. 2.7*. K určení přesného místa se využívá rovnic (2-6), (2-7), (2-8) a následného softwarového iteračního výpočtu neznámých proměnných.

První typ využívá metodu absolutního příchodu signálu, kdy známe časový okamžik vzniku částečného výboje zjištěného pomocí galvanické nebo elektromagnetické metody. Této metodě odpovídá rovnice (2-6),

$$(x - x_{Si})^2 + (y - y_{Si})^2 + (z - z_{Si})^2 = D_i^2 = (v_s \cdot T_{Si})^2 \quad (2-6)$$

kde  $(x, y, z)$  jsou neznámé souřadnice zdroje částečných výbojů,  $(x_{Si}, y_{Si}, z_{Si})$  jsou souřadnice jednotlivých snímačů,  $D_i$  je vzdálenost snímače od zdroje akustického signálu,  $v_s$  je rychlost zvuku v daném prostředí.  $T_{Si}$  je doba za kterou dorazí signál od zdroje ke snímači.

Dalším typem je metoda časových diferencí, která je vhodná pro plně akustická měření. Snímač, který jako první zaznamená akustický signál spouští proces zaznamenání času pro ostatní snímače. Rovnice pro první snímač je obdobná jako u předchozí metody (2-6), pouze doba  $T_{Si}$  je nahrazena novou neznámou  $T$ , která vyjadřuje dobu, za kterou dorazí signál k prvnímu snímači. Pro popis dalších snímačů slouží rovnice (2-7), kde  $\tau_{1i}$  je doba mezi zaznamenáním prvním snímačem a  $i$ -tým snímačem.

$$(x - x_{Si})^2 + (y - y_{Si})^2 + (z - z_{Si})^2 = D_i^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{1i}))^2 \quad (2-7)$$

Další používaným typem je metoda využívající pseudonáhodných časových intervalů stejně jako systém GPS (Globální Polohový Systém). Tento typ je též vhodný pro plně akustická měření. Při této metodě přibývá další neznámá  $\Delta t$ , tzv. časový offset částečného výboje. Pro výpočet slouží rovnice (2-8).

$$(x - x_{Si})^2 + (y - y_{Si})^2 + (z - z_{Si})^2 = D_i^2 = (v_s \cdot (T_{Si} - \Delta t))^2 \quad (2-8)$$

### 3 Experimentální část

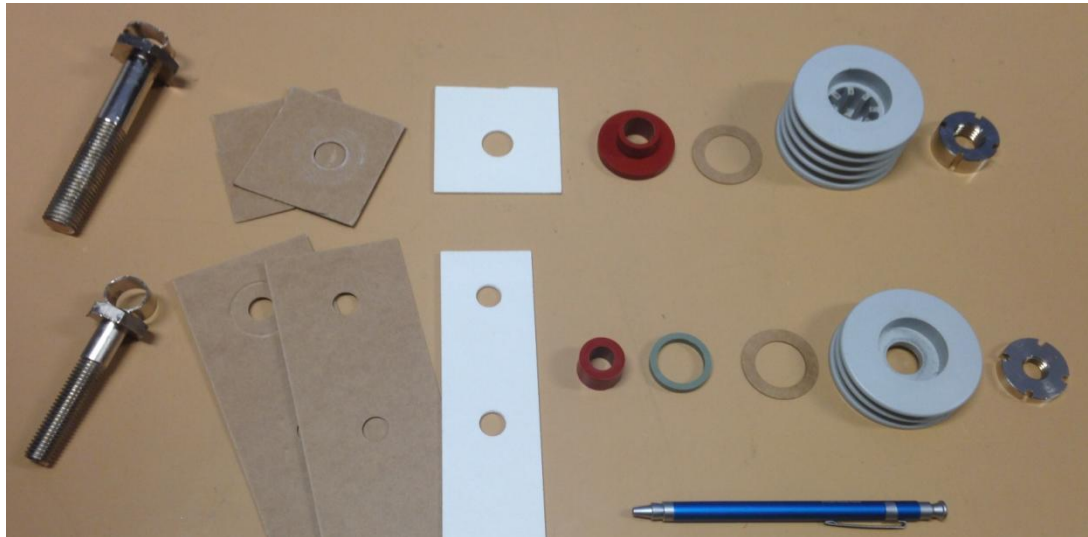
Experimentální část se zabývala měřením a analýzou částečných výbojů dvou typů průchodkových sestav vysokonapěťových MKP kondenzátorů. Sestavy se od sebe lišily nejen ve velikostech šroubů a průchodků, ale zejména v typu těsnící gumy. Izolace vnitřní strany, složená z několika částí, byla společně s těsnící gumou označena jako potenciální zdroj částečných výbojů. Následující experiment se zabýval ověřením těchto skutečností, závislosti částečných výbojů na momentu utažení a možným vylepšením průchodkové sestavy. Teoretickým předpokladem bylo, že čím vyšší moment utažení, tím lepší hodnoty vztažené k částečným výbojům. Při utažení by mělo dojít k vytlačení přebytečného vzduchu z mezer v izolaci a zaplnění případných dutinek kolem těsnící gumy.

#### 3.1 Měřené vzorky

Analýza částečných výbojů byla provedena na vzorcích poskytnutých firmou VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o. Jednalo se o dva typy průchodkových sestav o různých velikostech. Oba druhy průchodkových sestav byly umístěny na jedno víko MKP kondenzátoru *Obr. 3.1* o velikosti 512x216x2 mm. Do otvorů o průměrech 21 mm bylo umístěno osm průchodkových sestav, vždy čtyři pro jeden typ. Otvory byly označeny čísly od jedné do osmi, z těchto čísel vycházelo následné značení pozic vzorků.



*Obr. 3.1 Víko kondenzátoru s otvory pro průchodkové sestavy*



Obr. 3.2 Jednotlivé prvky průchodkových sestav - nahore Typ 1, dole Typ 2

Na Obr. 3.2 jsou jednotlivé prvky průchodkových sestav. První typ průchodkové sestavy byl složen ze šroubu o průměru 16 mm, dvou kusů bezdřevé lepenky, teplotně stálého izolantu durapol, těsnící gumy s opěrnou hranou, papírové podložky, průchodky a drážkové matky. Pro zjednodušení byl tento typ nazván Typ 1. Druhý typ průchodkové sestavy byl složen ze šroubu o průměru 12 mm, dvou kusů bezdřevé lepenky, teplotně stálého izolantu durapol, těsnící gumy bez opěrné hrany, opěrný kroužek, papírové podložky, průchodky a drážkové matky. Pro zjednodušení byl tento typ nazván Typ 2. Tyto průchodkové sestavy se používají ve firmě VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o. pro MKP kondenzátory o jmenovitých napětích do 5 kV.

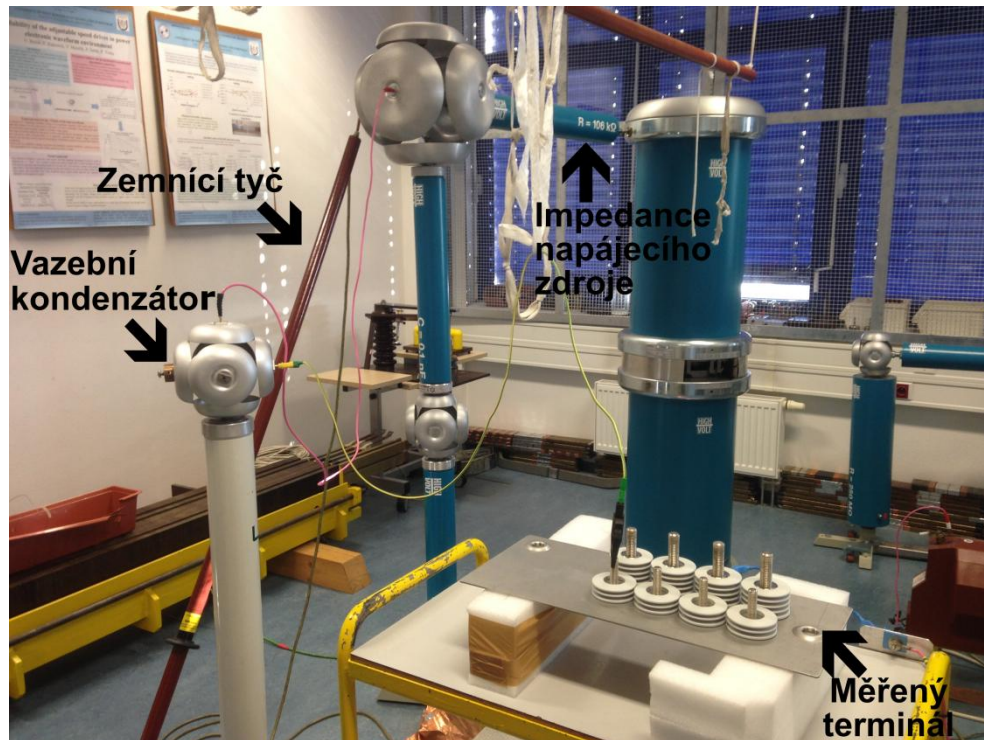


Obr. 3.3 Víko kondenzátoru s oběma typy průchodkových sestav

Na Obr. 3.3 je víko, na kterém jsou již sestaveny všechny průchodkové sestavy připravené pro následnou analýzu částečných výbojů. Vpředu je Typ 2, zleva pozice: 8, 7, 6, 5 a vzadu je Typ 1, zleva pozice: 4, 3, 2, 1.

### 3.2 Postup měření

Měření bylo uskutečněno v laboratoři dielektrik, katedry technologií a měření na Západočeské univerzitě v Plzni. Měření bylo provedeno galvanickou metodou dle normy ČSN 60270 bylo použito zapojení z *Obr. 2.4 a*) a přístroje uvedené v *Tab. 3.1*. Na *Obr. 3.4* je reálné zapojení měřeného terminálu (víko se všemi průchodkovými sestavami) do obvodu s vysokonapěťovým zdrojem. Měřený terminál byl umístěn na uzemněném vozíku a zemnicí tyč byla v obvodu pouze při práci na zařízeních.



*Obr. 3.4* Reálné zapojení měřeného terminálu v laboratoři

*Tab. 3.1* Seznam použitých přístrojů

Zařízení	Výrobce	Typ	Specifikace
Vysokonapěťový zdroj	High Volt	/	0 - 200 kV
Vazební kondenzátor	LDIC	CD0R 0704B11	1000 pF $\pm 10\%$ ; UNom= 120 kV; Utest = 144 kV; 50/60 Hz
Měřicí impedance	LDIC	LDM-5/U	/
Analyzátor částečných výbojů	Doble Lemke	PD Smart	+ program pro analýzu dat
Kalibrátor částečných výbojů	LDIC	LDC-5/S3	/
Momentový klíč	TONA expert	E113568T	5-25 Nm

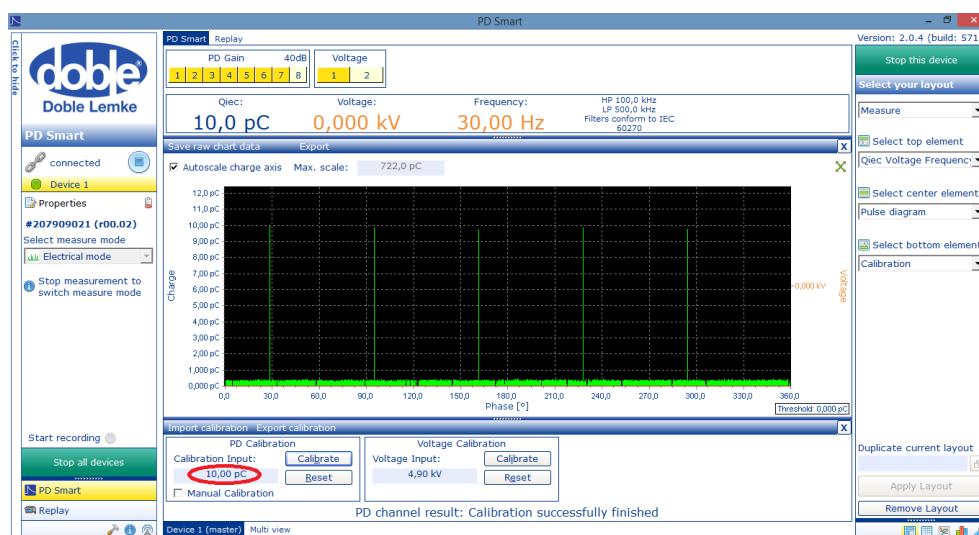
Fotografie použitých přístrojů jsou umístěny v příloze A.

Prvním krokem bylo zkompletování průchodkových sestav na víko a následné utažení všech sestav na stejný moment pomocí momentového klíče a speciálně vyrobeného nástavce na drážkové matky *Obr. 3.5*. Jednotlivé průchodkové sestavy byly utahovány na momenty od 5 do 16 Nm a následně byly pro všechny vzorky na stejném momentu změřeny hodnoty zapalovacího napětí  $U_i$ , zhášecího napětí  $U_e$ , náboje  $Q_{iec}$  při zapálení a náboje  $Q_{iec5}$  po 5 minutách působení napětí.



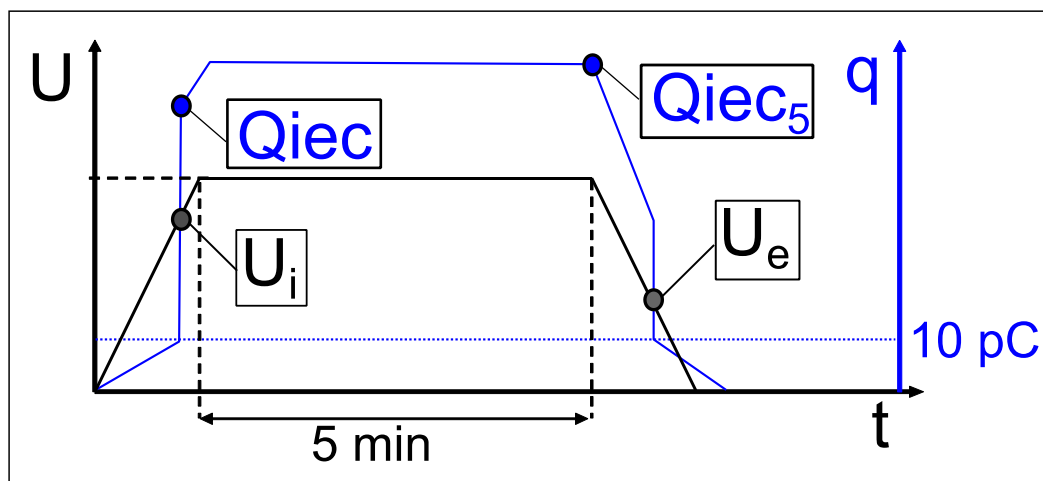
*Obr. 3.5 Momentový klíč a nástavec na drážkové matky*

Před každým měřením bylo nutné provést kalibraci měřícího zařízení kalibrátorem. Na *Obr. 3.6* je obrazovka z programu Doble Lemke PD Smart při kalibraci, která byla prováděna na hodnotu náboje o velikosti 10 pC. Tak aby odpovídala referenční rozhodovací hranice náboje  $Q_{iec}$ , kterou využívají ve společnosti VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o. pro rozhodnutí o kvalitě kondenzátoru z hlediska částečných výbojů. Na obrázku jsou též patrné kalibrační impulzy vytvářené kalibrátorem.



*Obr. 3.6 Obrazovka z programu Doble Lemke PD Smart při kalibraci*

Měření částečných výbojů probíhalo pomocí analyzátoru částečných výbojů Doble Lemke a k němu příslušného programu Doble Lemke PD Smart. Měření zapalovacího a zhašecího napětí částečných výbojů probíhalo dle doporučení normy ČSN 60270 [19]. Napájecí napětí bylo zvyšováno na hodnotu, při které došlo ke vzniku výbojové činnosti, tedy vzrostl náboj  $Q_{iec}$  částečných výbojů nad stanovenou hranici 10 pC. Toto napětí bylo zaznamenáno jako zapalovací napětí částečných výbojů  $U_i$ . Dále byla zjištěna hodnota náboje  $Q_{iec}$  vyvolaného tímto napětím. Následně bylo napájecí napětí zvýšeno o několik procent, aby nedošlo k vyhasnutí vzniklých částečných výbojů. Napětí bylo udržováno na stejné hodnotě po dobu 5 minut. U Typu 1 se napájecí napětí pohybovala v rozmezí od 6 kV do 6,7 kV a u Typu 2 v rozmezí od 6,2 kV do 7 kV. Po uplynutí 5 minut, při kterých došlo k ustálení výbojové činnosti, byla zaznamenána další hodnota náboje  $Q_{iec}$  označená jako  $Q_{iec5}$  a napájecí napětí bylo snižováno k nulové hodnotě. Jakmile došlo k poklesu náboje  $Q_{iec}$  pod hranici 10 pC, byla hodnota napětí zaznamenána jako zhašecí napětí částečných výbojů  $U_e$ . Na Obr. 3.7 jsou naznačena schémata průběhu napájecího napětí a částečných výbojů během zkoušky s vyznačenými důležitými odečítanými hodnotami. Náboj  $Q_{iec}$  je definován normou ČSN 60270 [19] jako kvantitativně určená největší opakovaně se vyskytující úroveň náboje částečných výbojů.



Obr. 3.7 Schéma průběhu měřených veličin při měření částečných výbojů

Během měření bylo programem online vykresleno několik druhů grafických závislostí, které byly následně exportovány ve formě obrázků:

**QtUt diagram** - závislost napájecího napětí a náboje  $Q_{iec}$  na čase.

**Pattern diagram** - četnost výskytů částečných výbojů o dané velikosti náboje  $Q_{iec}$  v závislosti na fázovém úhlu napájecího napětí.

**Discharge diagram** - závislost proudu částečných výbojů na čase.

Pomocí těchto závislostí byly vyhodnocovány měřené parametry a další vlastnosti. Program umožňuje ukládání záznamů měření, díky tomu bylo možné si znovu spustit průběh měření, odečíst hodnoty či znovu exportovat grafické závislosti.

### 3.3 Analýza dat

Tato část obsahuje naměřená data, grafy, ukázky typických grafických závislostí změřených analyzátozem částečných výbojů pro jednotlivé typy a popis experimentu pro zlepšení částečných výbojů na průchodkových sestavách. Označení pozice v tabulkách odpovídá pozici průchodkové sestavy vyznačené na měřeném víku *Obr. 3.1*.

#### 3.3.1 Naměřená a vypočtená data pro Typ 1

Tab. 3.2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro momenty utažení 5 až 16 Nm Typ 1

Moment utažení 5 Nm					Moment utažení 6 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
1	5	30	4,1	50	1	6,1	50	4,1	150
2	5,3	50	4	200	2	6	180	4,5	275
3	4,9	90	4,2	100	3	5,1	80	4,3	150
4	6	200	4,2	100	4	6,1	125	4,4	200
$\bar{x}$	5,3	92,5	4,1	112,5	$\bar{x}$	5,8	108,8	4,3	193,8
s	0,43	65,72	0,08	54,49	s	0,42	49,04	0,15	51,16
V[%]	8,12	71,05	2,01	48,43	V[%]	7,22	45,09	3,42	26,40
Moment utažení 7 Nm					Moment utažení 8 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
1	6,1	30	4,5	125	1	6,3	50	4,4	250
2	6,3	70	4,4	180	2	5,8	80	4,5	190
3	5,5	120	4,5	140	3	6,6	140	4,4	200
4	6,1	100	4,5	280	4	6,5	50	4,6	270
$\bar{x}$	6,0	80,0	4,5	181,3	$\bar{x}$	6,3	80,0	4,5	227,5
s	0,30	33,91	0,04	60,45	s	0,31	36,74	0,08	33,45
V[%]	5,00	42,39	0,97	33,35	V[%]	4,89	45,93	1,85	14,70

Moment utažení 9 Nm					Moment utažení 10 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
1	5,8	50	4,2	200	1	6,2	70	3,1	275
2	6	30	4,3	130	2	5	50	3	200
3	5,9	70	4,1	200	3	5,5	50	3	150
4	5,8	30	4	150	4	6	50	2,9	150
$\bar{x}$	5,9	45,0	4,2	170,0	$\bar{x}$	5,7	55,0	3,0	193,8
$s$	0,08	16,58	0,11	30,82	$s$	0,47	8,66	0,07	51,16
$V[\%]$	1,41	36,85	2,69	18,13	$V[\%]$	8,21	15,75	2,36	26,40
Moment utažení 12 Nm					Moment utažení 14 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
1	5,1	55	3,5	175	1	5,9	45	3	200
2	5,1	50	3	230	2	5,1	50	2,9	150
3	4,9	48	2,9	200	3	5,5	45	3,1	160
4	6	50	2,8	200	4	5,8	25	3	250
$\bar{x}$	5,3	50,8	3,1	201,3	$\bar{x}$	5,6	41,3	3,0	190,0
$s$	0,43	2,59	0,27	19,49	$s$	0,31	9,60	0,07	39,37
$V[\%]$	8,08	5,10	8,83	9,68	$V[\%]$	5,58	23,28	2,36	20,72
Moment utažení 16 Nm					<p><i>Kde:</i> <math>\bar{x}</math> je průměrná hodnota</p> <p><math>s</math> je směrodatná odchylka</p> <p><math>V</math> je variační koeficient</p>				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]					
1	5,9	30	2,9	150					
2	5	50	2,9	175					
3	5	25	3,1	130					
4	6	50	3	100					
$\bar{x}$	5,5	38,8	3,0	138,8					
$s$	0,48	11,39	0,08	27,47					
$V[\%]$	8,70	29,39	2,79	19,80					



### 3.3.2 Naměřená a vypočtená data pro Typ 2

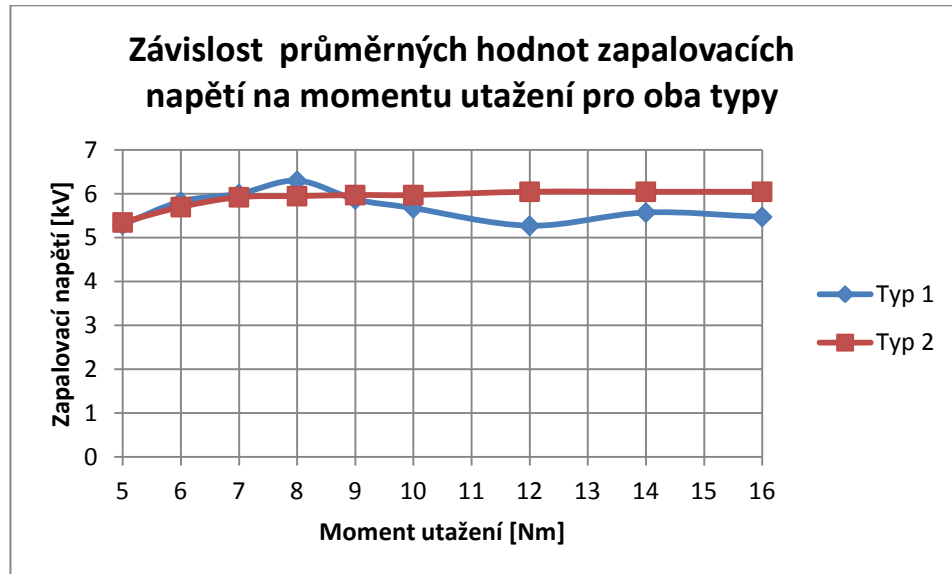
Tab. 3.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro momenty utažení 5 až 16 Nm Typ 2

Moment utažení 5 Nm					Moment utažení 6 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
5	4,9	90	4,2	100	5	5,2	40	4,4	80
6	5	40	4,1	70	6	6,1	45	4,3	75
7	6	110	4,2	100	7	6	150	4,5	75
8	5,5	212	4,7	700	8	5,5	160	4,4	100
$\bar{x}$	5,4	113,0	4,3	242,5	$\bar{x}$	5,7	98,8	4,4	82,5
$s$	0,44	62,59	0,23	264,42	$s$	0,37	56,39	0,07	10,31
$V[\%]$	8,20	55,39	5,45	109,04	$V[\%]$	6,45	57,10	1,61	12,49
Moment utažení 7 Nm					Moment utažení 8 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
5	5,9	35	4,5	90	5	6,1	40	4,5	110
6	5,6	30	4,8	100	6	5,9	40	4,5	110
7	6,1	50	4,5	175	7	6	45	4,2	90
8	6,1	120	4,2	1000	8	5,8	70	4,1	90
$\bar{x}$	5,9	58,8	4,5	341,3	$\bar{x}$	6,0	48,8	4,3	100,0
$s$	0,20	36,12	0,21	381,75	$s$	0,11	12,44	0,18	10,00
$V[\%]$	3,45	61,48	4,71	111,87	$V[\%]$	1,88	25,51	4,13	10,00
Moment utažení 9 Nm					Moment utažení 10 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec_5}$ [pC]
5	5,8	40	4,2	130	5	5,9	20	4,1	120
6	6,1	30	4,1	80	6	6	30	4	65
7	6,1	40	4,1	200	7	6	50	3,9	200
8	5,9	90	4,1	400	8	6	30	4	75
$\bar{x}$	6,0	50,0	4,1	202,5	$\bar{x}$	6,0	32,5	4,0	115,0
$s$	0,13	23,45	0,04	121,73	$s$	0,04	10,90	0,07	53,27
$V[\%]$	2,17	46,90	1,05	60,11	$V[\%]$	0,72	33,53	1,77	46,32

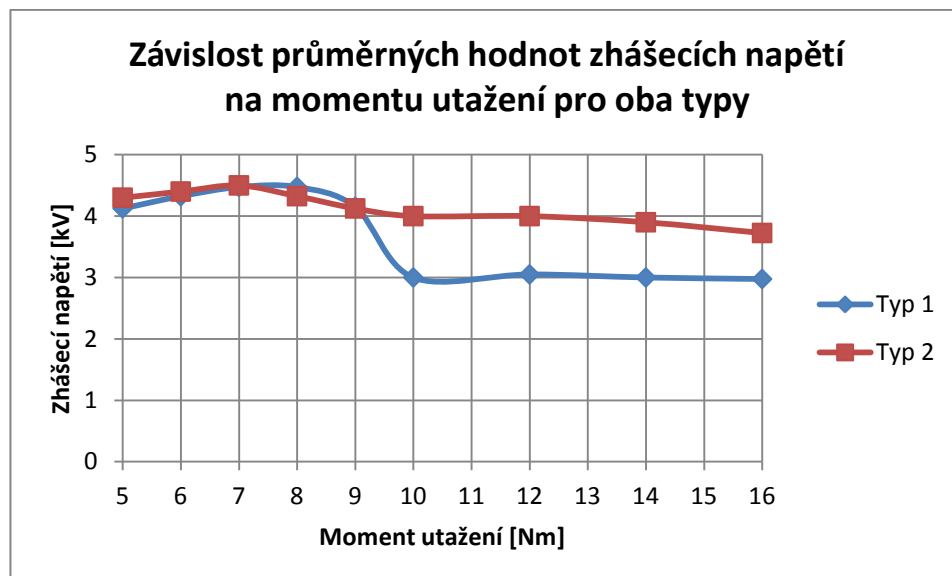
Moment utažení 12 Nm					Moment utažení 14 Nm				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec5}$ [pC]	Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec5}$ [pC]
5	6	40	4	90	5	6	40	3,5	80
6	6,1	20	4,1	50	6	6	60	4	150
7	6	50	4	90	7	6,1	40	4,1	175
8	6,1	30	3,9	100	8	6,1	40	4	100
$\bar{x}$	6,1	35,0	4,0	82,5	$\bar{x}$	6,1	45,0	3,9	126,3
$s$	0,05	11,18	0,07	19,20	$s$	0,05	8,66	0,23	37,98
$V[\%]$	0,83	31,94	1,77	23,28	$V[\%]$	0,83	19,25	6,01	30,08
Moment utažení 16 Nm					<p><i>Kde:</i> <math>\bar{x}</math> je průměrná hodnota</p> <p><math>s</math> je směrodatná odchylka</p> <p><math>V</math> je variační koeficient</p>				
Pozice	$U_i$ [kV]	$Q_{iec}$ [pC]	$U_e$ [kV]	$Q_{iec5}$ [pC]					
5	6,1	20	2,8	65					
6	6	35	4,1	175					
7	6	25	4	150					
8	6,1	30	4	150					
$\bar{x}$	6,1	27,5	3,7	135,0					
$s$	0,05	5,59	0,54	41,68					
$V[\%]$	0,83	20,33	14,38	30,88					

Z vypočtených hodnot variačních koeficientů  $V$  pro náboje  $Q_{iec}$  a  $Q_{iec5}$  je patrné, že se hodnoty nábojů jednotlivých průchodkových sestav obou typů poměrně liší. Jedná se tedy spíše o hodnoty individuální a specifické pro danou průchodkovou sestavu než o parametry určující vlastnosti celého typu. Z hodnot a variačních koeficientů zapalovacích a zhášecích napětí lze uvažovat nad podobností těchto hodnot pro daný typ průchodkové sestavy.

### 3.3.3 Grafy naměřených veličin

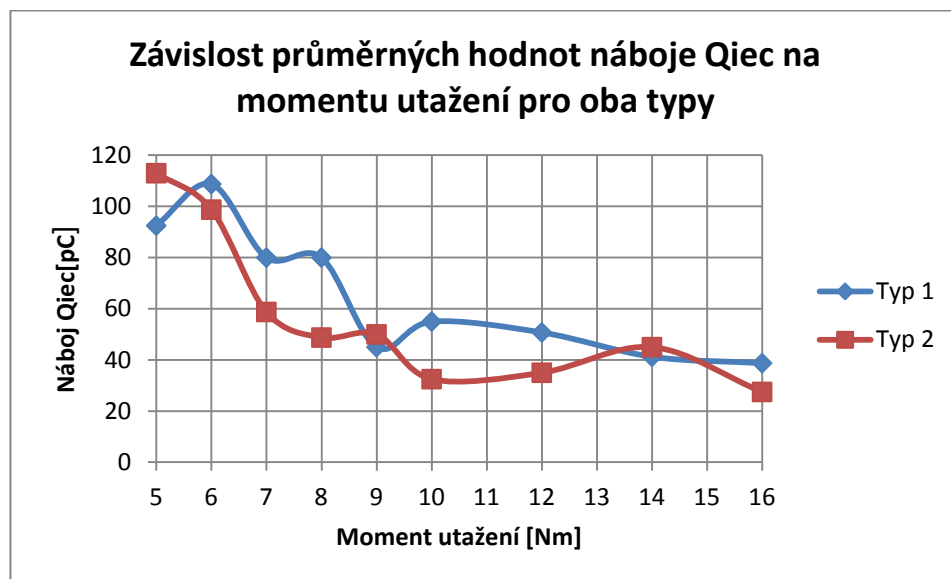
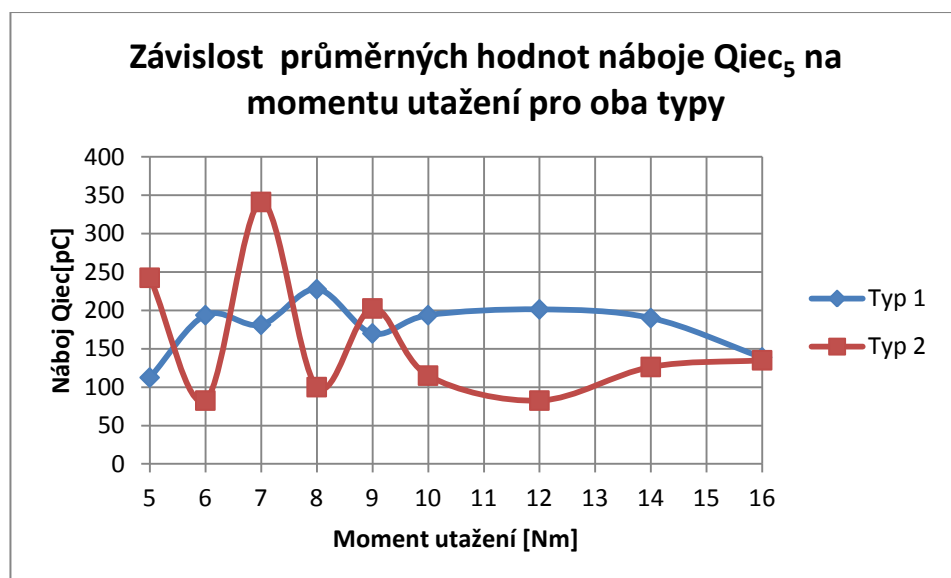


Obr. 3.8 Závislost průměrných hodnot zapalovacích napětí na momentu utažení pro oba typy



Obr. 3.9 Závislost průměrných hodnot zhášecích napětí na momentu utažení pro oba typy

Z Obr. 3.8 je patrné, že se zapalovací napětí částečných výbojů obou typů s rostoucím napětím příliš neměnilo. U Typu 1 došlo při zvyšujícím se momentu utažení k poklesu zapalovacího napětí na hodnotu 5,5 kV. Typ 2 si zapalovací napětí držel na téměř konstantní hodnotě 6 kV. Zhášecí napětí na Obr. 3.9 si u Typu 1 v počátku drželo hodnotu mezi 4,1 kV a 4,5 kV, následně došlo při momentu utažení 10 Nm k výraznějšímu poklesu zhášecího napětí na hodnotu 3 kV. Typ 2 měl v první fázi zhášecí napětí podobné jako Typ 1, při zvětšení momentu utažení na 10 Nm došlo k poklesu zhášecího napětí na hodnotu 4 kV a při dalším utahování byl trend pozvolně klesající.

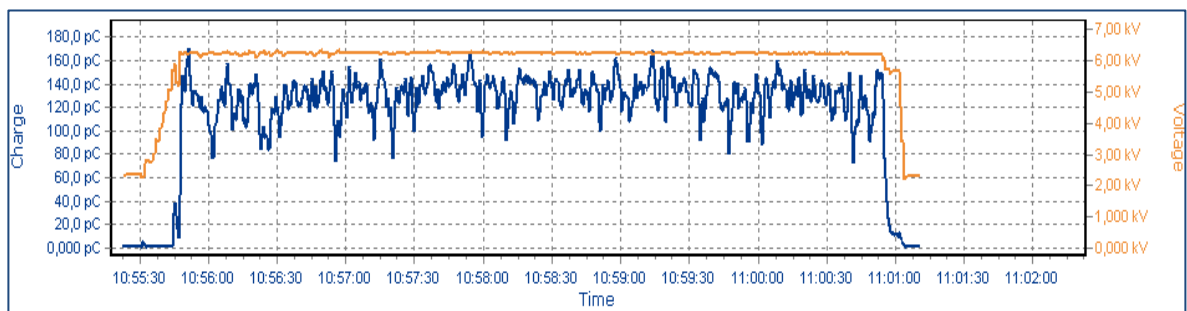
Obr. 3.10 Závislost průměrných hodnot náboje  $Q_{iec}$  na momentu utažení pro oba typyObr. 3.11 Závislost průměrných hodnot náboje  $Q_{iec_5}$  na momentu utažení pro oba typy

Z Obr. 3.10 je patrné, že průměrné hodnoty nábojů  $Q_{iec}$  pro oba typy se zvyšujícím se momentem exponenciálně klesaly z hodnoty 100 pC k hodnotě 35 pC. Hodnoty nábojů  $Q_{iec}$  po 5 minutách měření Obr. 3.11 v první fázi velice kolísaly zejména u Typu 2. K částečnému ustálení došlo při momentu utažení 10 Nm. Náboj  $Q_{iec_5}$  se při větších momentech utažení u Typu 1 pohyboval kolem hodnoty 200 pC a následně při 16 Nm klesl na hodnotu 140 pC. U Typu 2 se náboj při větších momentech utažení pohyboval mezi hodnotami 80 až 130 pC.

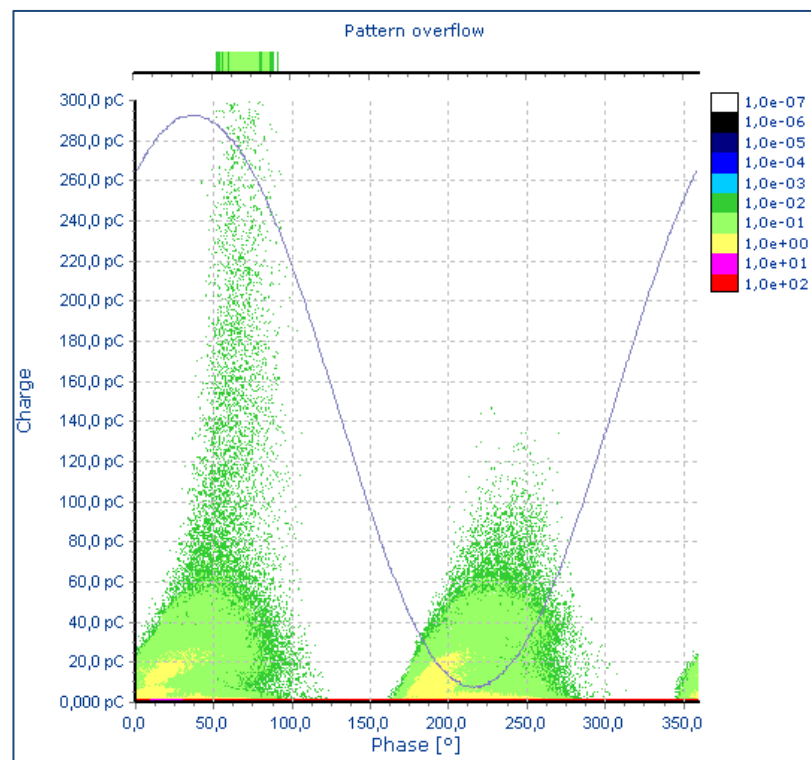
### 3.3.4 Typické grafické závislosti částečných výbojů na měřených sestavách

Vzhledem k velkému počtu grafických závislostí, získaných během analýzy částečných výbojů, jsou v následující kapitole umístěny pouze vybrané typické a netypické QtUt a pattern diagramy pro daný typ průchodkové sestavy. Ostatní grafické závislosti jsou umístěny na příloženém CD příloha D.

Typický QtUt diagram pro Typ 1 při momentech do 10 Nm je na *Obr. 3.12*. Z obrázku pro moment 8 Nm pozice 2 je patrné, že náboj  $Q_{iec}$  při konstantním napájecím napětí výrazně kmital kolem střední hodnoty. Na *Obr. 3.13* je typický pattern diagram pro Typ 1 při momentech do 10 Nm. Záznam pattern diagramu poukazuje na výskyt výbojové činnosti zejména v delaminacích izolační soustavy a klouzavých výbojů na povrchu izolantů. Výrazný vrchol v kladné půlperiodě napájecího napětí značí částečné výboje u kladné elektrody.

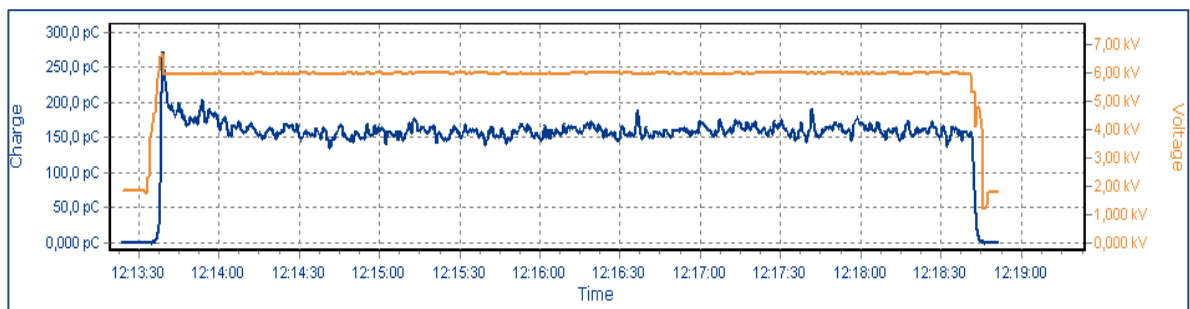


Obr. 3.12 Typický QtUt diagram pro Typ 1 průchodková sestava na pozici 2 při 8 Nm

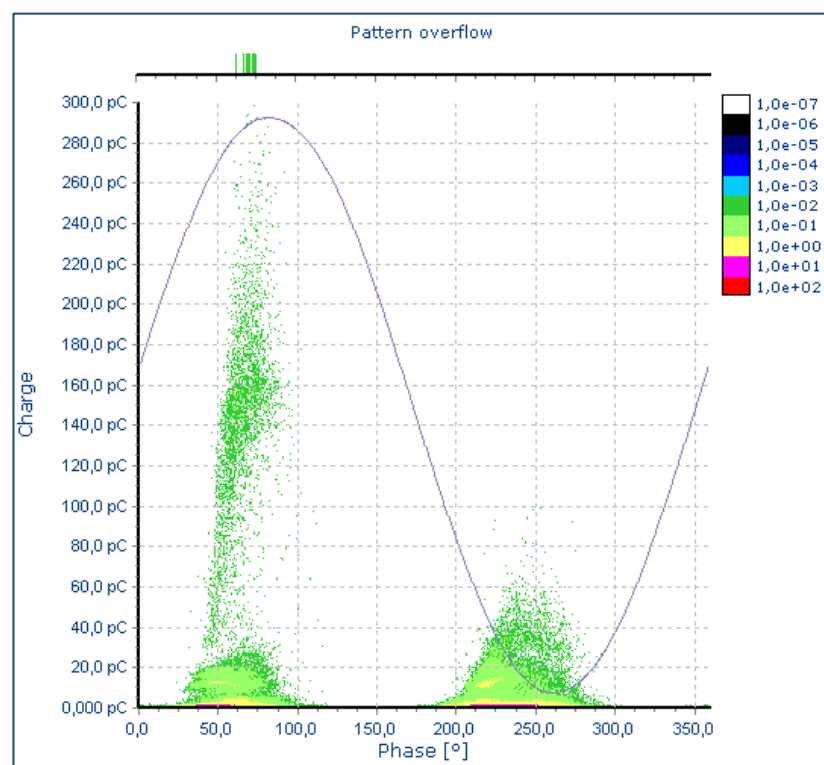


Obr. 3.13 Typický pattern diagram pro Typ 1 průchodková sestava na pozici 2 při 8 Nm

Typický QtUt diagram pro Typ 1 při momentech nad 10 Nm je na *Obr. 3.14*. Z obrázku pro moment 16 Nm je patrné, že náboj  $Q_{iec}$  si v průběhu měření držel téměř konstantní hodnotu. Pouze při zapálení částečných výbojů se objevila špička o 100 pC větší než střední hodnota náboje. Utažením na větší moment došlo ke stabilizaci částečných výbojů. Na *Obr. 3.15* je typický pattern diagram pro Typ 1 při momentech nad 10 Nm. Útvary v grafu jsou značně menší oproti předchozím a vyjadřují, že utažením na větší momenty došlo k omezení částečných výbojů vznikajících v delaminacích izolační soustavy a částečných výbojů klouzavých na povrchu izolantů převážně u kladné elektrody.

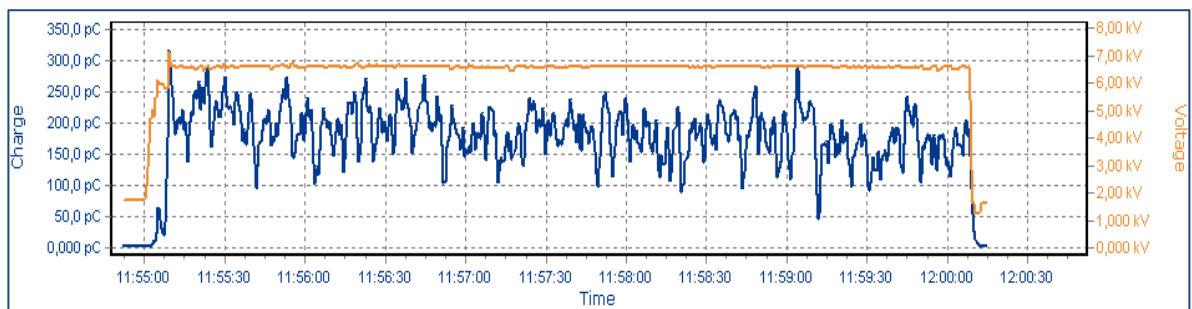


*Obr. 3.14* Typický QtUt diagram pro Typ 1 průchodková sestava na pozici 1 při 16 Nm

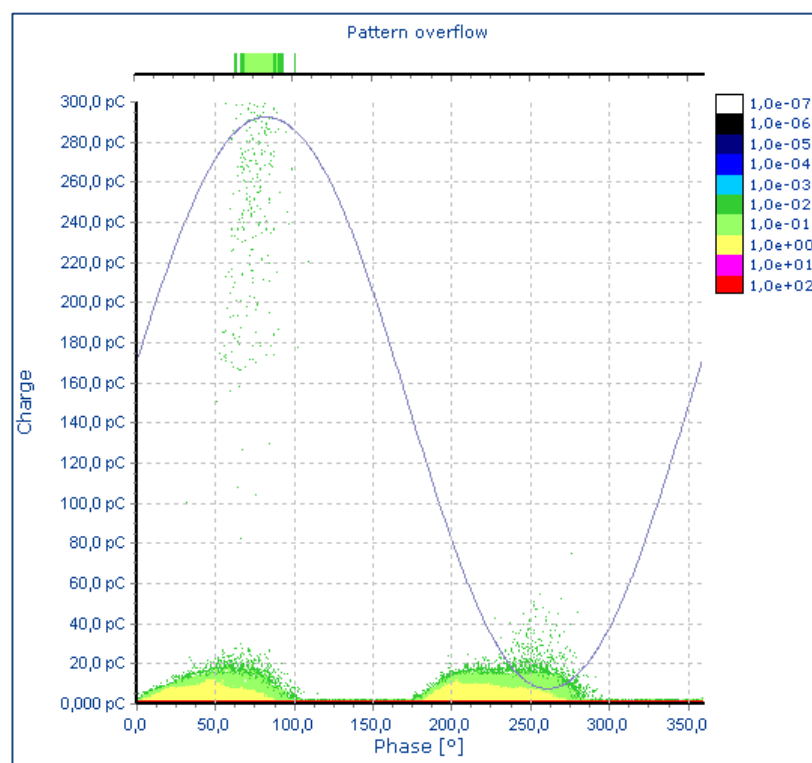


*Obr. 3.15* Typický pattern diagram pro Typ 1 průchodková sestava na pozici 1 při 16 Nm

Během analýzy naměřených dat průchodkové sestavy Typu 1 na pozici 4 bylo zjištěno, že pro zapálení a udržení částečných výbojů bylo zapotřebí v první části měření vyšší napětí než u dalších sestav stejného typu. Z typického QtUt diagramu pro pozici 4 *Obr. 3.16* je patrné, že i pro větší momenty utažení byly hodnoty náboje  $Q_{iec}$  velice nestabilní a docházelo ke kolísání hodnot od 50 do 300 pC. Pattern diagram *Obr. 3.17* byl také rozdílný oproti předchozím, jelikož se nevyznačoval tak výraznými vrcholy, to svědčí o menším množství částečných výbojů v delaminacích izolační soustavy a klouzavých částečných výbojů kolem kladné elektrody.

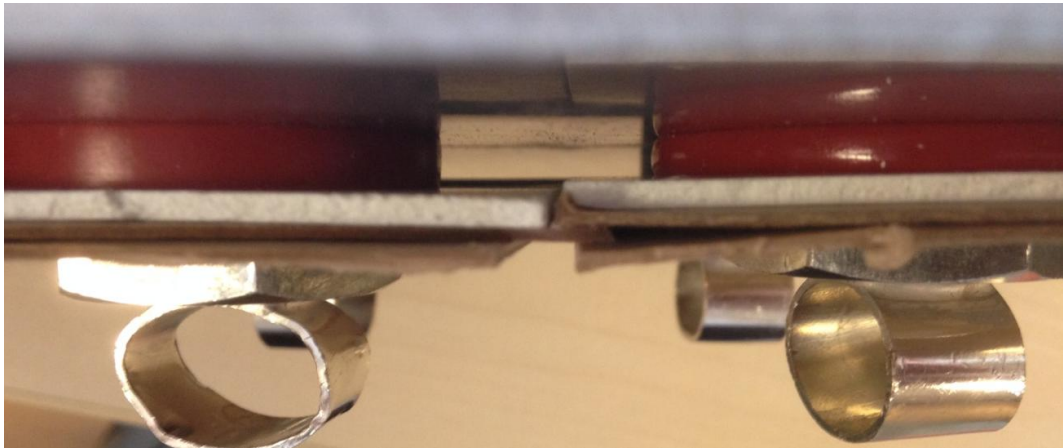


*Obr. 3.16* Typický QtUt diagram pro Typ 1 průchodková sestava na pozici 4 při 12 Nm



*Obr. 3.17* Typický pattern diagram pro Typ 1 průchodková sestava na pozici 4 při 12 Nm

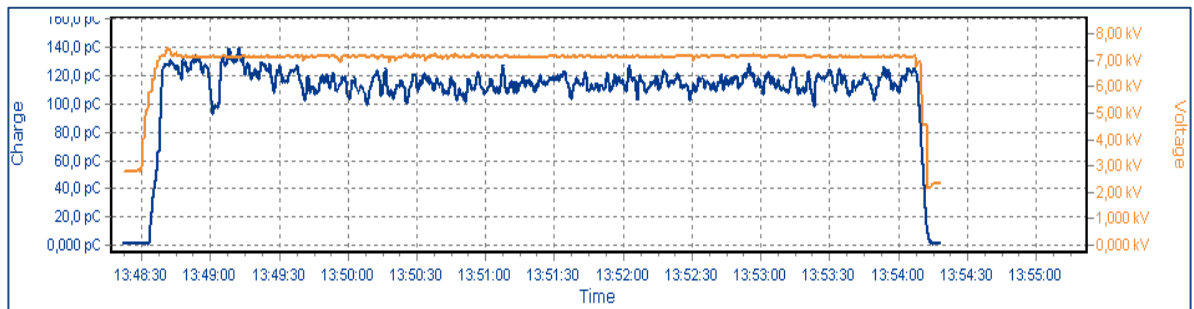
Průchodková sestava Typu 1 na pozici 4 byla od počátku měření nejlepší z hlediska četnosti částečných výbojů v pattern diagramu, avšak horší ve stabilitě náboje  $Q_{iec}$  během měření. Při bližším prozkoumání měřeného terminálu bylo zjištěno, že sestava na pozici 4 Obr. 3.18 vpravo, byla při stejných momentech utažení mnohem více stlačena než sestavy okolní. To mělo za následek vytlačení přebytečného vzduchu z mezer mezi vrstvami izolace a k vyplnění všech mezer kolem gumového těsnění. Důsledkem bylo, že již při nižších momentech utažení průchodkové sestavy bylo pozorováno snížení četnosti částečných výbojů oproti ostatním sestavám stejného typu.



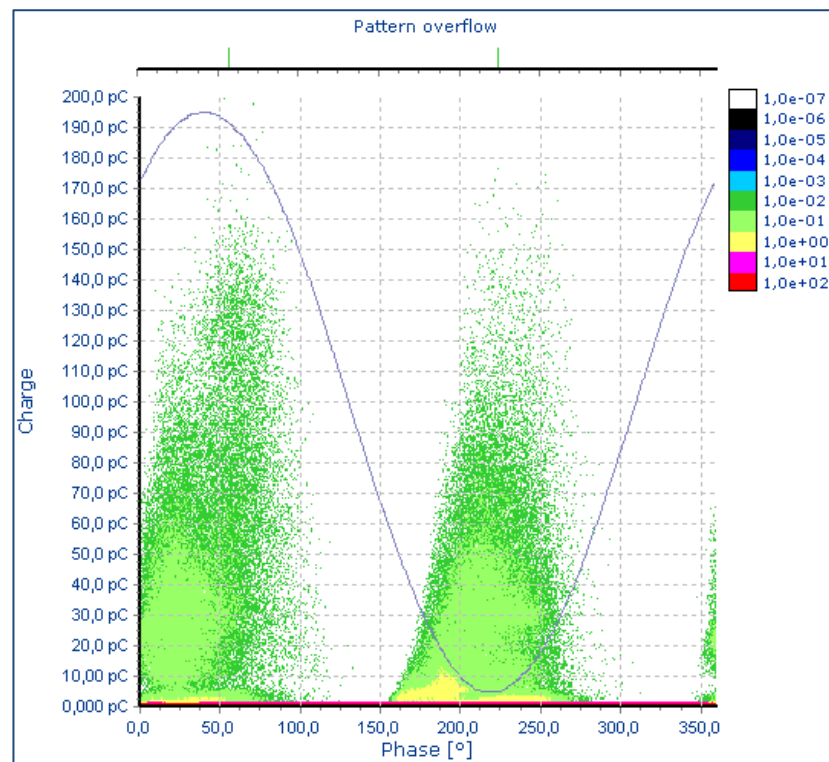
Obr 3.18 Průchodkové sestavy při stejných momentech utažení 16 Nm - zleva pozice 3, pozice 4



Typický QtUt diagram pro Typ 2 s momenty utažení do 12 Nm je na *Obr. 3.19*, při těchto momentech byl náboj  $Q_{iec}$  poměrně stabilní. Na pozici 6 při momentu utažení 8 Nm hodnoty kmitaly v rozmezí 100 až 140 pC. Na *Obr. 3.20* je typický pattern diagram pro Typ 2 pro momenty do 10 Nm, který se vyznačoval výraznějšími trojúhelníkovými útvary oproti Typu 1, které se s postupným utahováním snižovaly. Záznam naznačuje vznik částečných výbojů v delaminacích izolační soustavy a klouzavých výbojů na povrchu izolantů.

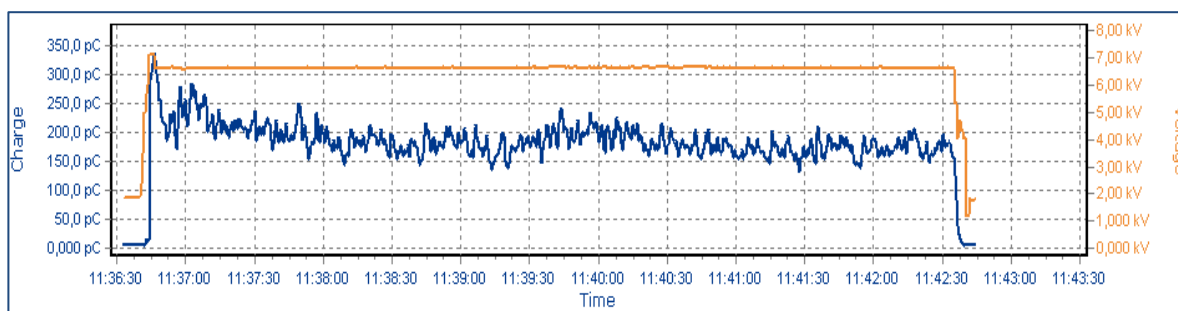


*Obr. 3.19* Typický QtUt diagram pro Typ 2 průchodková sestava na pozici 6 při 8 Nm

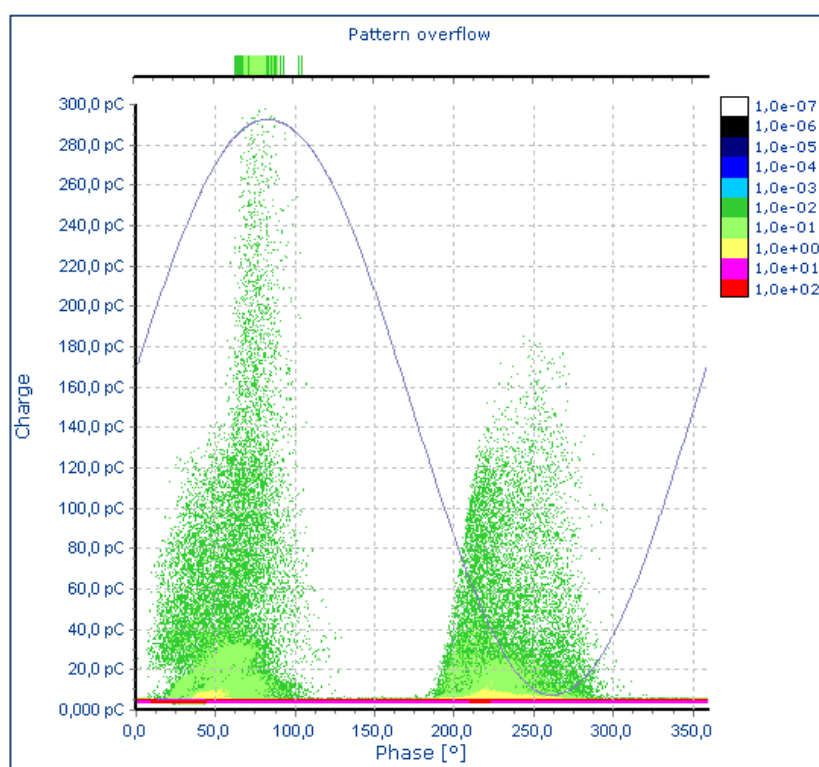


*Obr. 3.20* Typický pattern diagram pro Typ 2 průchodková sestava na pozici 6 při 8 Nm

Typický QtUt diagram pro Typ 2 s momenty utažení od 12 Nm je na *Obr. 3.21*. Při vyšších momentech utažení náboj  $Q_{iec}$  během pěti minutové intervalu měření mírně klesal a docházelo k pozvolnému odeznívání výbojové činnosti v průchodkové sestavě. Na *Obr. 3.22* je typický pattern diagram pro Typ 2 pro momenty od 12 Nm, který se vyznačoval útvary s menší velikostí náboje a četnosti výskytů částečných výbojů oproti nižším momentům. Pattern diagram opět svědčí o výbojové činnosti v delaminacích izolační soustavy a klouzavých výbojů na povrchu izolantů. Výrazný vrchol v kladné půlperiodě ukazuje na výboje zejména u kladné elektrody.

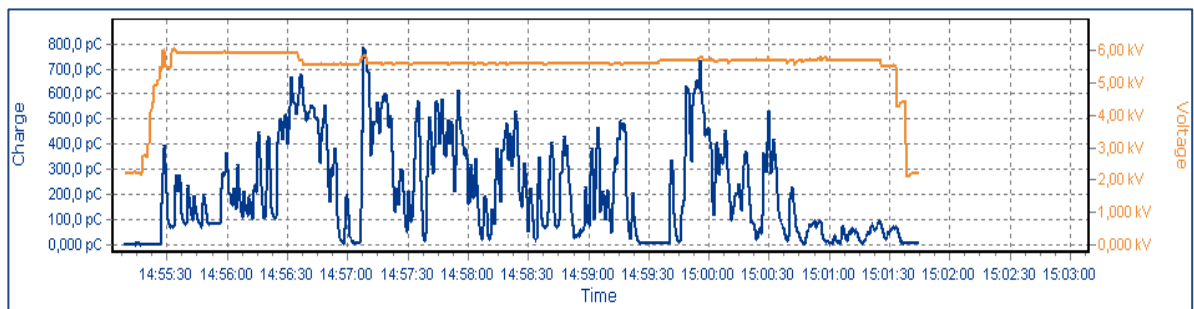


*Obr. 3.21* Typický QtUt diagram pro Typ 2 průchodková sestava na pozici 7 při 14 Nm

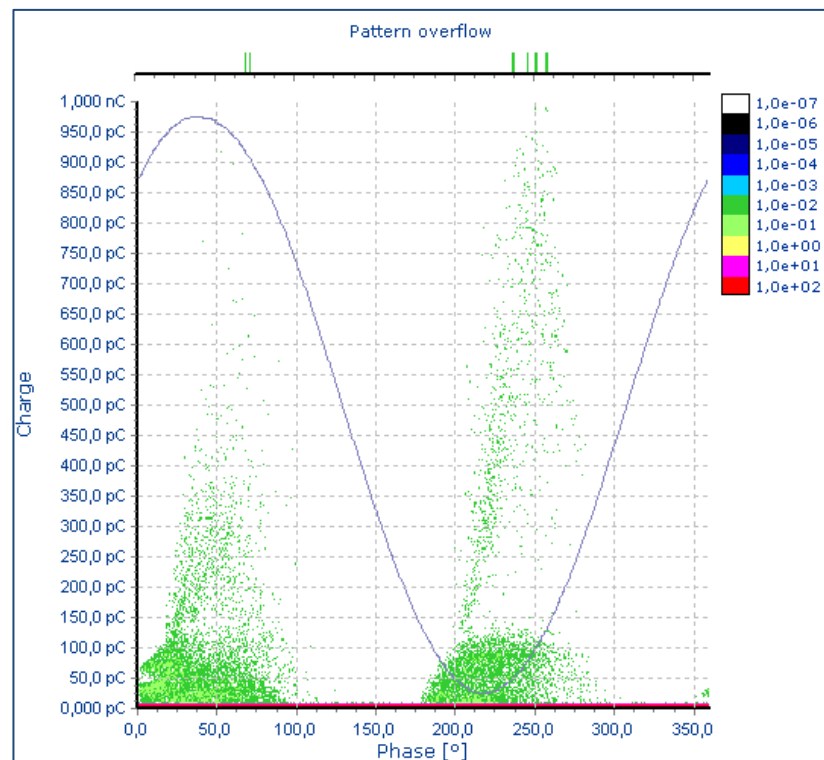


*Obr. 3.22* Typický pattern diagram pro Typ 2 průchodková sestava na pozici 7 při 14 Nm

Během měření a analýzy naměřených dat průchodkové sestavy Typu 2 na pozici 8 bylo zjištěno, že bylo obtížné udržet zapálené částečné výboje na hodnotě náboje  $Q_{iec}$  podobné předchozím sestavám stejného typu. Náboj  $Q_{iec}$  dosahoval několikanásobně vyšších hodnot a to zejména pro nižší momenty utažení. Na Obr. 3.23 je jeden z QtUt diagramů, na kterém je patrná nestálost částečných výbojů a vysoká hodnota náboje  $Q_{iec}$  dokonce i při nižších napětích, než pro ostatní průchodkové sestavy. Na Obr. 3.24 je pattern diagram typický pro tuto pozici s částečnými výboji s nižší četností, avšak s větším nábojem  $Q_{iec}$ . Záznam pattern diagramu poukazuje na částečné výboje v delaminacích izolační soustavy a klouzavé výboje. Výraznější vrchol v záporné půlperiodě svědčí o výskytu výbojů u záporné elektrody.



Obr. 3.23 Typický QtUt diagram pro Typ 2 průchodková sestava na pozici 8 při 6 Nm



Obr. 3.24 Typický pattern diagram pro Typ 2 průchodková sestava na pozici 8 při 6 Nm

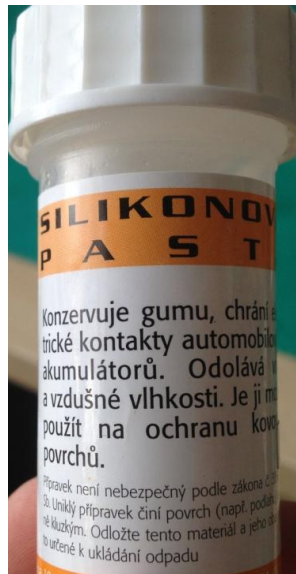
Při bližším prozkoumání rozebrané průchodkové sestavy na pozici 8 byla objevena část izolantu durapol a opěrného kroužku degradovaná výbojovou činností *Obr. 3.25*. Tento defekt měl s velkou pravděpodobností za následek výše zmíněnou nestabilitu částečných výbojů a celkově horší vlastnosti průchodkové sestavy na pozici 8 oproti ostatním stejného typu.



*Obr. 3.25* Poškozené části průchodkové sestavy na pozici 8 - zleva izolant durapol, opěrný kroužek

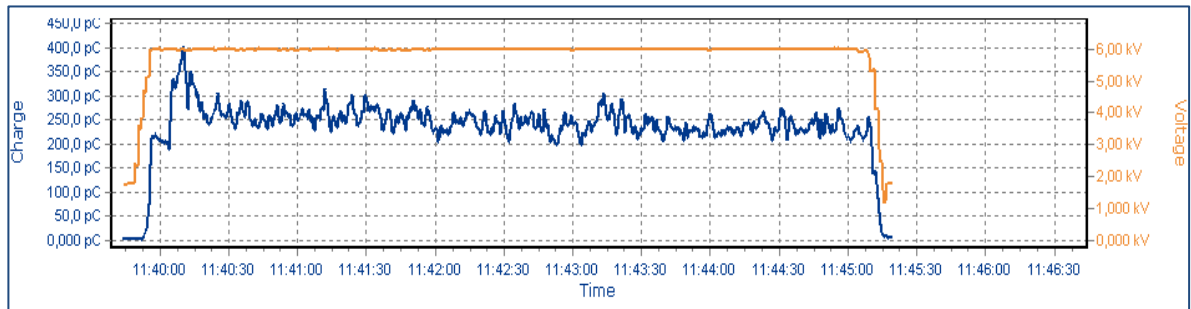
### 3.4 Zjišťování zdrojového lokality částečných výbojů průchodkových sestav

Dle prvotních informací byly za potencionální zdroje částečných výbojů označeny izolační gumičky a izolační soustava složená ze dvou kusů lepenky a izolantu durapol. Bylo aplikováno několik postupů pro zjištění zdrojové lokality výbojové činnosti, z nichž jako nejlépe vyhovující a použitelná aplikace bylo vybráno nanesení silikonové pasty na části průchodkové sestavy. Experiment byl proveden nanesením speciální silikonové pasty *Obr. 3.26* od firmy ELCHEMCo spol. s r.o. Pasta měla za účel vyplnit případné vzduchové mezery v konstrukci průchodkové sestavy a tím eliminovat vznik částečných výbojů ve vzduchových delaminacích a zabránit vzniku klouzavých výbojů po povrchu izolantu.

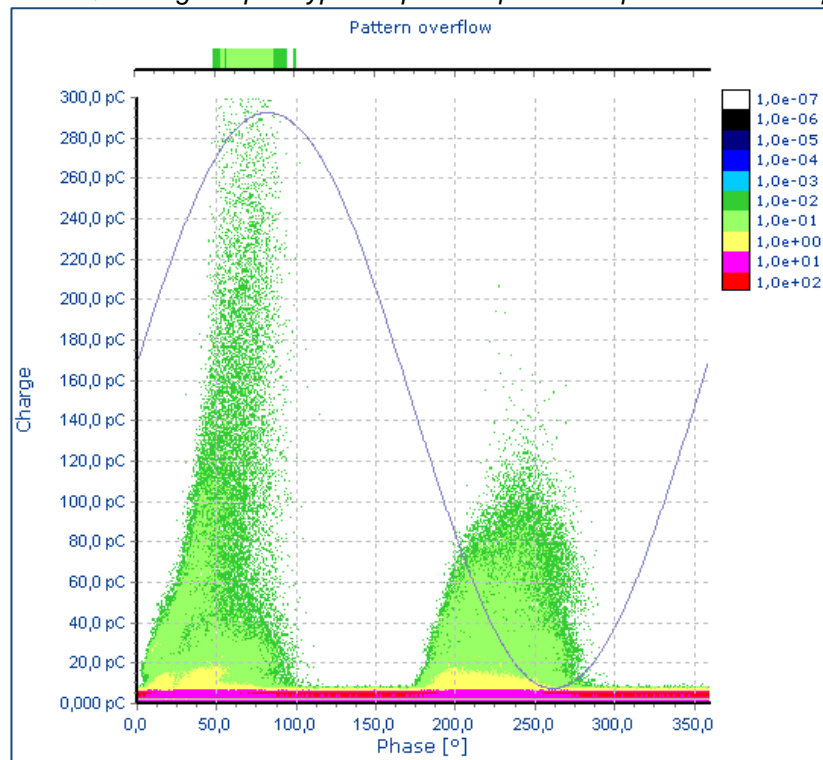


*Obr. 3.26 Silikonová pasta*

Nanášení pasty bylo prováděno postupně po jednotlivých částech průchodkové sestavy. Pro experiment byla vybrána sestava na pozici 2 Typu 1 a sestava na pozici 5 Typu 2. Průchodkové sestavy byly po nanesení pasty na danou část změřeny stejným postupem jako v kapitole 3.2, avšak pouze pro moment utažení 12 Nm. Jak vyplývá z předchozí analýzy, tak při tomto momentu byly veličiny částečných výbojů již ustálené. Na *Obr. 3.27* je QtUt diagram a na *Obr. 3.28* je pattern diagram průchodkové sestavy Typ 1 na pozici 2 při 12 Nm před nanesením silikonové pasty na jednotlivé části sestavy.



Obr. 3.27 QtUt diagram pro Typ 1 na pozici 2 při 12 Nm před nanesením pasty



Obr. 3.28 Pattern diagram průchodkové sestavy Typ 1 na pozici 2 při 12 Nm před nanesením pasty

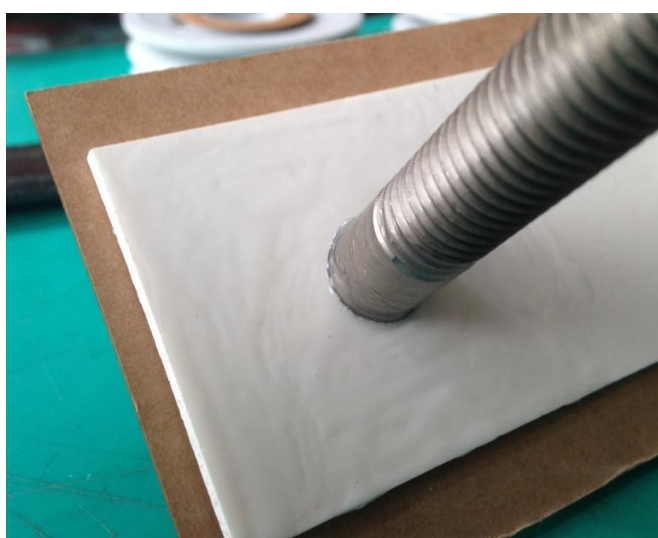
Silikonová pasta byla nejprve nanesena na gumová těsnění *Obr. 3.29*. Poté byla pasta nanesena na šrouby a papírové podložky *Obr. 3.30*, vnitřní a vnější strany durapolu *Obr. 3.31* a nakonec na lepenky ze všech stran *Obr. 3.32*.



Obr. 3.29 Gumová těsnění s vrstvou silikonové pasty - zleva Typ 1, Typ 2



Obr. 3.30 Gumové těsnění, šroub a papírová podložka Typ 2 s vrstvou silikonové pasty

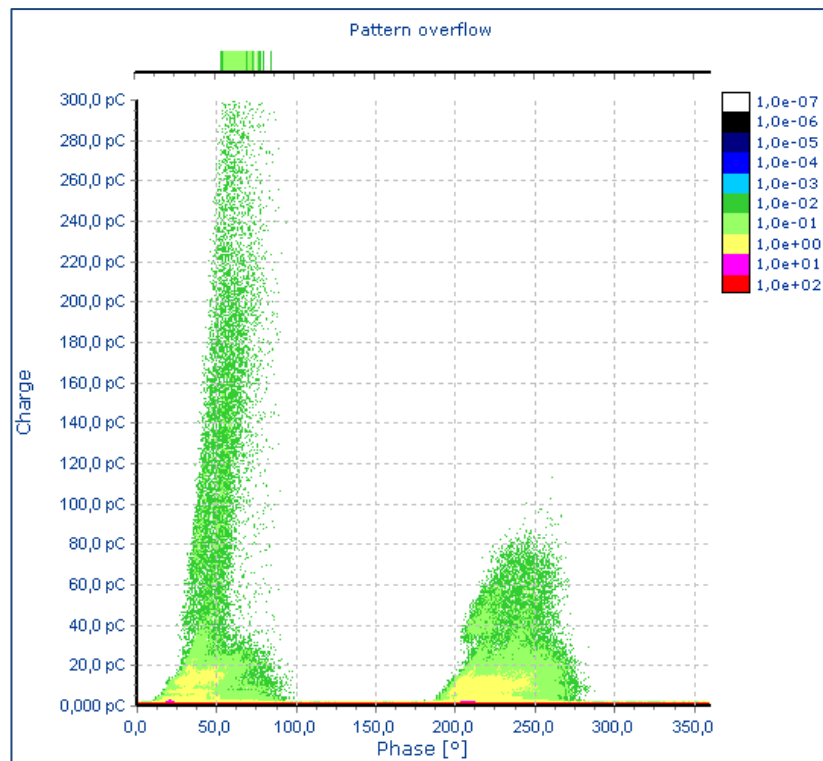


Obr. 3.31 Durapol z vnitřní strany s vrstvou silikonové pasty Typ 2



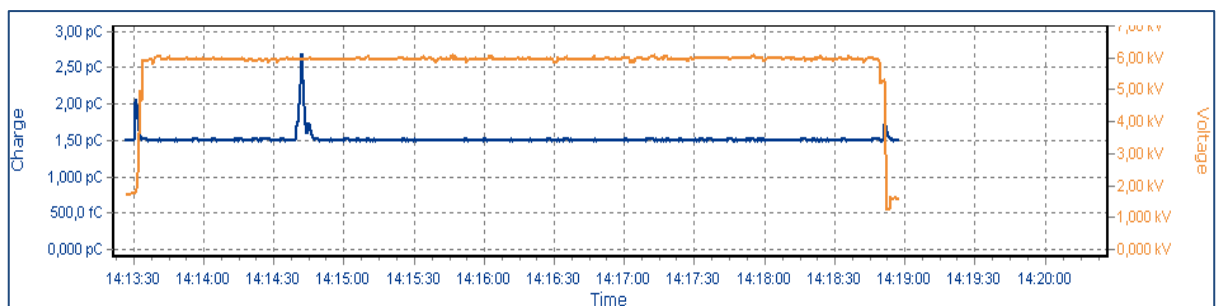
Obr. 3.32 Bezdřevé lepenky s vrstvou silikonové pasty Typ 2

Po nanesení silikonové pasty na gumová těsnění došlo ke snížení výbojové činnosti u obou typů. Zlepšení je zejména patrné z pattern diagramu pro Typ 1 pozice 2 Obr. 3.33, kde vrcholy ve spodní části grafu jsou oproti průchodkové sestavě bez potření výrazně menší.



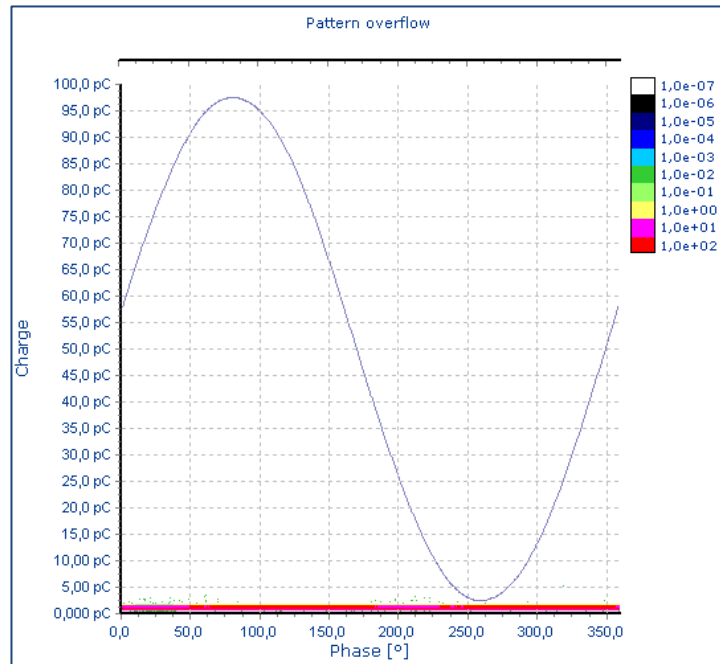
Obr. 3.33 Pattern diagram průchodkové sestavy Typ 1 na pozici 2 při 12 Nm po nanesením silikonové pasty na gumové těsnění

Při nanášení na další části sestav nedošlo k žádnému výraznějšímu vylepšení. Avšak po nanesení silikonové pasty na bezdřevé lepenky došlo k zániku výbojové činnosti u Typu 1. Zánik výbojové činnosti je patrný z QtUt diagramu Obr. 3.34, kde je pouze šum pozadí o průměrné velikosti 1,5 pC a pattern diagramu Obr. 3.35. U Typu 2 došlo k zániku výbojové činnosti až po dodatečném rozetření a nanesení silikonové pasty po celém povrchu lepenky a durapolu, to je patrné z QtUt diagramu Obr. 3.36 a pattern diagramu Obr. 3.37.

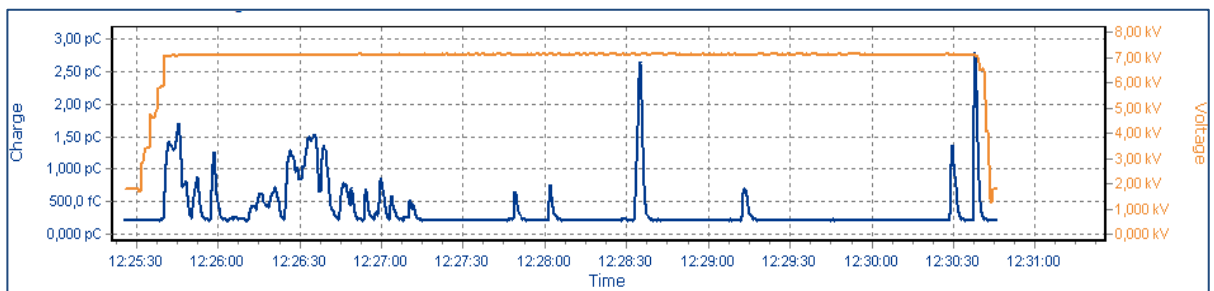


Obr. 3.34 QtUt diagram průchodkové sestavy Typ 1 na pozici 2 při 12 Nm po nanesení silikonové pasty na bezdřevé lepenky

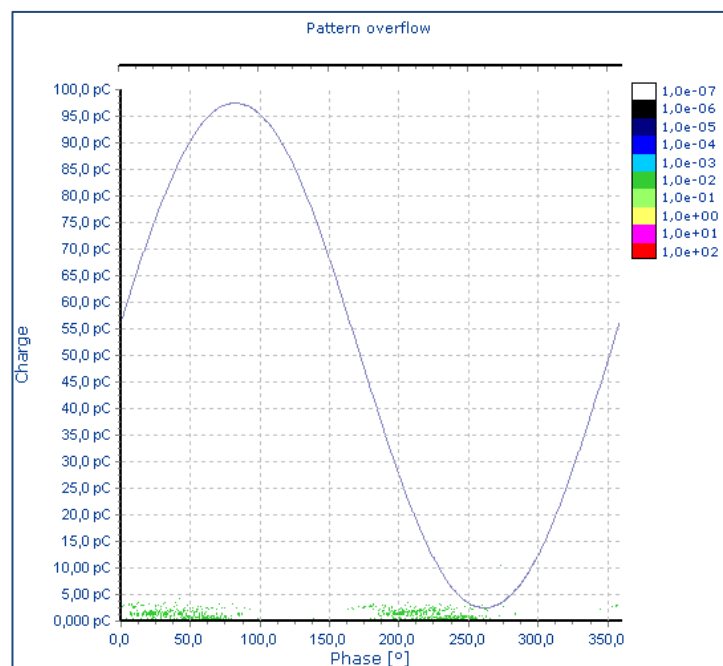




Obr. 3.35 Pattern diagram průchodkové sestavy Typ 1 na pozici 2 při 12 Nm po nanesením silikonové pasty na bezdrževé lepenky



Obr. 3.36 QtUt diagram průchodkové sestavy Typ 2 na pozici 5 při 12 Nm po nanesení silikonové pasty na bezdrževé lepenky



Obr. 3.37 Pattern diagram průchodkové sestavy Typ 2 na pozici 5 při 12 Nm po nanesením silikonové pasty na bezdrževé lepenky

### 3.5 Vyhodnocení experimentů

Analýzou naměřených dat a grafických závislostí byl ověřen předpoklad, že při zvyšujícím se momentu utažení dochází ke stabilizaci hodnot náboje  $Q_{iec}$  a k omezení velikosti a četnosti částečných výbojů v závislosti na fázovém úhlu napájecího napětí. Zlomovými body, při kterých došlo ke stabilizaci vlastností, bylo utažení na momenty 10 a 12 Nm. Tyto zlomy jsou patrné na grafech průměrných hodnot Obr. 3.8 až Obr. 3.11. Z Obr. 3.10 a Obr. 3.11 pro náboje  $Q_{iec}$  a  $Q_{iec5}$  je patrné snížení a stabilizace výbojové činnosti v průchodkových sestavách při vyšších momentech utažení.

Při porovnání průměrných hodnot měřených veličin obou typů průchodkových sestav jsou patrné rozdíly, zejména ve zhašecím napětí po utažení nad 10 Nm, kde Typ 2 dosahoval hodnot o 1 kV vyšších. Zápalné napětí se lišilo pouze o 0,5 kV ve prospěch Typu 2. Hodnoty nábojů  $Q_{iec}$  a  $Q_{iec5}$  obou typů sledovaly v průběhů měření stejné trendy, při dotažení na moment 16 Nm byly hodnoty nábojů velice podobné. Pro Typ 1 mělo utažení na vyšší momenty nežádoucí účinek v podobě snížení zhašecího napětí o 1 kV. Pokles byl nejspíše způsoben přiblížením celé izolační soustavy blíže k víku a to vedlo ke zmenšení izolační vzdálenosti mezi kladnou a zápornou elektrodou.

Z typických grafických závislostí jednotlivých typů je patrné, že částečné výboje vznikaly převážně v delaminacích izolační soustavy a na povrchu izolantů, nejvíce kolem kladné elektrody. Dále bylo potvrzeno, že utažením na vyšší momenty došlo k částečnému omezení a stabilizaci částečných výbojů v obou typech průchodkových sestav.

Při aplikaci silikonové pasty na jednotlivé díly průchodkové sestavy byly ověřeny teoretické předpoklady, kde byly označeny jako místa s výskytem částečných výbojů gumová těsnění a skládané izolace z durapolu a bezdřevé lepenky. Experiment ukázal, že k potlačení částečných výbojů na průchodkových sestavách obou typů došlo z části při nanesení silikonové pasty na gumové těsnění. Po tomto kroku průměrná hodnota nábojů  $Q_{iec}$  pro Typ 1 klesla o 40 pC v případě Typu 2 o 30 pC. Při nanášení pasty na další části sestav byly grafické závislosti částečných výbojů velice podobné výše zmíněným. K zániku výbojové činnosti došlo u Typu 1 při nanesení silikonové pasty na obě bezdřevé lepenky. U Typu 2 k úplnému zániku výbojové činnosti došlo až po dodatečném rozetření a nanesení silikonové pasty po celém povrchu lepenky a durapolu. Z experimentu plyne, že nejvíce nebezpečnou částí sestavy z hlediska částečných výbojů jsou dvě vrstvy bezdřevé lepenky, jelikož při vyplnění meziprostor silikonovou pastou došlo k úplnému zániku výbojové činnosti.

## 4 Ověření metody lokalizace částečných výbojů

Přesná metoda lokalizace částečných výbojů v MKP kondenzátorech by našla své využití zejména při opravě větších a cenově nákladnějších kondenzátorů, které nevyhověly z hlediska částečných výbojů. Pouhé vyřazení těchto kondenzátorů bez pokusu o opravu či diagnostiku příčiny vzniku nadměrných částečných výbojů by bylo velice neekonomické. Oprava a diagnostika je však poměrně náročný a zdlouhavý proces, při kterém je nutno celý kondenzátor rozebrat, odstranit veškerou izolaci, epoxidovou pryskyřici atd. Avšak nemusí to vždy vést ke kladnému výsledku. Metoda schopná lokalizovat zdroj částečných výbojů před rozebráním by poskytla informace o místě defektu a urychlila by rozhodnutí, zda se vyplatí kondenzátor opravit. Pro ověření možnosti lokalizace částečných výbojů v nádobě MKP kondenzátoru, byla vybrána metoda akustické detekce a lokalizace metodou časových diferencí využívající rozdílných časů příchodů signálu ke snímači. Metoda časových diferencí je vhodná zejména pro plně akustická měření, jelikož není nutné znát přesný okamžik vzniku výbojové činnosti.

Ověření metody lokalizace bylo provedeno na ocelové nádobě bez víka *Obr. 4.1*, poskytnuté firmou VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o., o délce 70 cm, výšce bez výstupků 68,5 cm, šířce 14 cm a tloušťce stěn 2 mm.



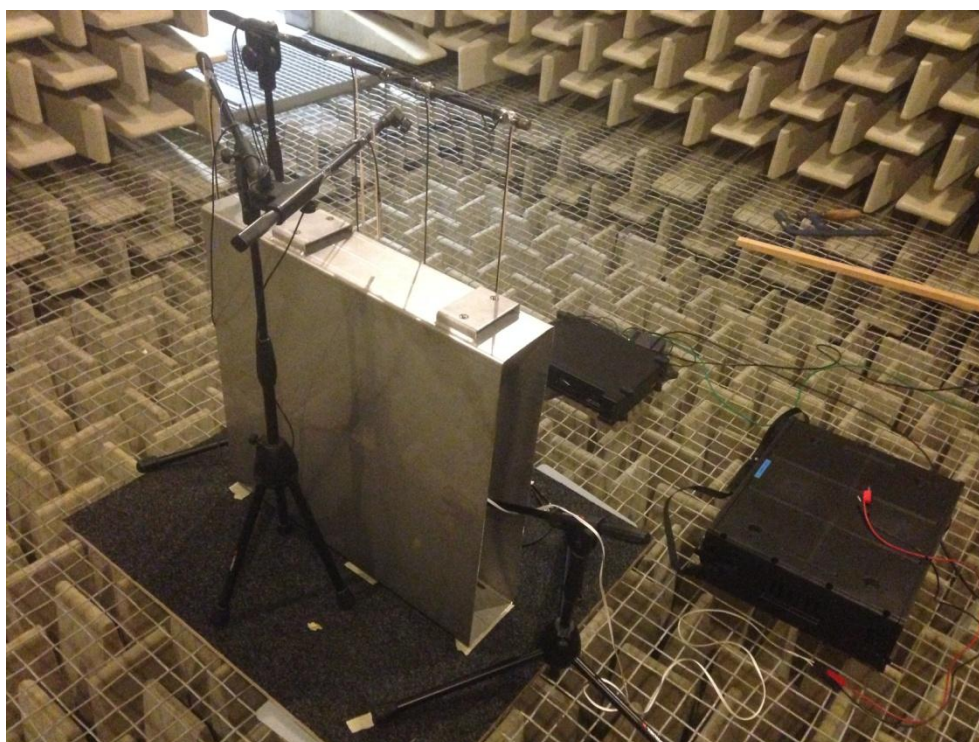
*Obr. 4.1 Nádoba MKP kondenzátoru bez víka*

## 4.1 Postup měření

Přes počáteční nevydařené pokusy o vyvolání částečných výbojů pomocí hrotů v nádobě kondenzátoru, bylo přistoupeno ke zjednodušení experimentu. Zjednodušení spočívalo v nahrazení zdroje částečných výbojů reproduktorem, který simuloval akustický signál vznikající při částečném výboji. Proto bylo možné přesunout experiment do bezodrazové akustické komory Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Zjednodušením odpadla potřeba připojení na vysoké napětí a přemístění měřících zařízení do laboratoře, ve které bylo prováděno předchozí měření. Na *Obr. 4.2* je reálné zapojení použitých měřících přístrojů z *Tab. 4.1* v akustické komoře. Fotografie použitých měřících přístrojů jsou umístěny v příloze B.

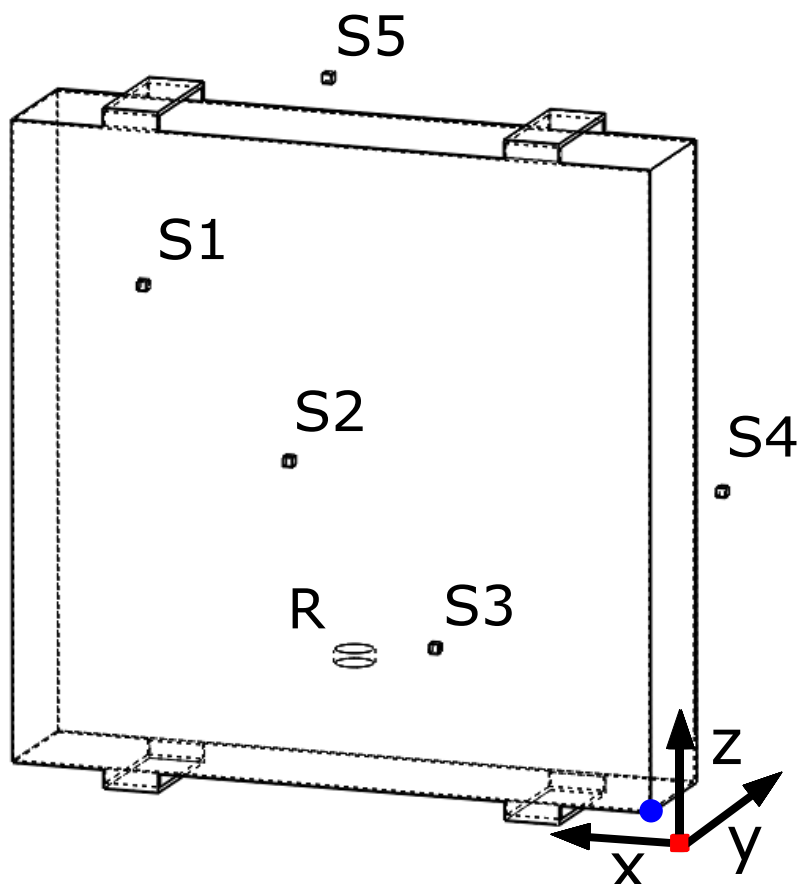
*Tab. 4.1 Tabulka použitých měřících přístrojů*

Zařízení	Výrobce	Typ	Specifikace
Mikrofony pro volné pole	G.R.A.S	40PH	10 Hz - 20 kHz
Reproduktor	SONAVOX	5JA	4 $\Omega$ , velikost: průměr 4 cm, výška 1,5 cm
Koncový zesilovač	YAMAHA	P7000S	výkon 2x 950 W / 4 $\Omega$
Zvukový analyzátor	Brüel & Kjær	2827-002	5 kanálů
Software pro analýzu signálů	Brüel & Kjær	Pulse LabShop	-



*Obr. 4.2 Zapojení měřících přístrojů v akustické komoře*

Kolem nádoby bylo rozmístěno pět mikrofonních snímačů, pro které bylo nutné změřit přesnou polohu v prostoru. Pozice byly následně přečítány do kartézských souřadnic ke zvolenému počátku soustavy souřadnic, jak je naznačeno na *Obr. 4.3*. Kde  $S_i$  je  $i$ -tý mikrofon,  $R$  je reproduktor umístěný uvnitř nádoby, modrý kruh značí roh nádoby a má souřadnice vůči počátku (4,8; 6; 2) [cm]. Z obrázku je patrné, že nejbližše reproduktoru byl třetí mikrofon.



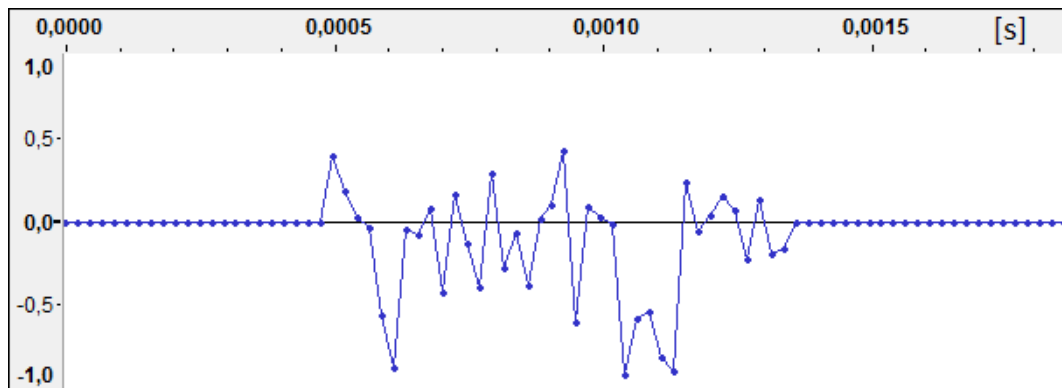
*Obr. 4.3* Poloha snímačů a reproduktoru vůči počátku souřadnic

V *Tab. 4.2* jsou uvedeny souřadnice jednotlivých mikrofonů vůči počátku souřadnic a poloha reproduktoru potřebná pro ověření správnosti metody lokalizace. Tabulka obsahuje souřadnice pozic snímačů pro měření bez nádoby a s nádobou. Měření bez nádoby sloužilo zejména pro ověření funkčnosti a přesnosti použitých výpočetních metod.

*Tab. 4.2* Souřadnice mikrofonů a reproduktoru vůči počátku souřadnic

Bez nádoby				S nádobou			
$S_i$	$x_{s_i}$ [cm]	$y_{s_i}$ [cm]	$z_{s_i}$ [cm]	$S_i$	$x_{s_i}$ [cm]	$y_{s_i}$ [cm]	$z_{s_i}$ [cm]
1	58,8	1	56	1	59,3	1	53
2	42,8	0,5	38,5	2	42,3	0,5	36
3	26,8	0	19,8	3	25,8	0	18,5
4	0	13	35,5	4	0	14	33,5
5	41,8	12	75,5	5	41,8	12	74,5
Reproduktor	39,8	13	13,5				

Měření bylo provedeno pomocí programu Pulse LabShop. Do reproduktoru byl z programu vyslán připravený širokospektrý bílý šum *Obr. 4.4*, klíčovaný do okna 0,5 ms, který simuloval akustický signál vznikající při částečném výboji.



*Obr. 4.4 Širokospektrý bílý šum odeslaný do reproduktoru*

Průběhy z pěti mikrofonních snímačů byly zaznamenány pomocí programu Pulse LabShop a následně byla data exportována pro další zpracování. V programu Audacity byly signály oříznuty, rozděleny a byly aplikovány frekvenční filtry pro případ měření s nádobou.

## 4.2 Postup výpočtu zdrojové lokality

Pro výpočet neznámé polohy zdroje akustického signálu sloužila následující soustava nelineárních rovnic (4-1) - (4-5) vycházejících z metody časových diferencí pro pět snímačů,

$$(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2 = D_3^2 = (v_s \cdot T)^2 \quad (4-1)$$

$$(x - x_{S1})^2 + (y - y_{S1})^2 + (z - z_{S1})^2 = D_1^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{31}))^2 \quad (4-2)$$

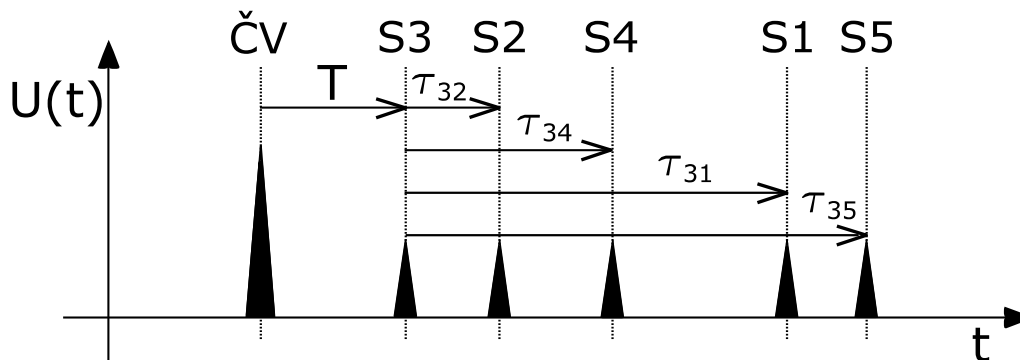
$$(x - x_{S2})^2 + (y - y_{S2})^2 + (z - z_{S2})^2 = D_2^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{32}))^2 \quad (4-3)$$

$$(x - x_{S4})^2 + (y - y_{S4})^2 + (z - z_{S4})^2 = D_4^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{34}))^2 \quad (4-4)$$

$$(x - x_{S5})^2 + (y - y_{S5})^2 + (z - z_{S5})^2 = D_5^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{35}))^2 \quad (4-5)$$

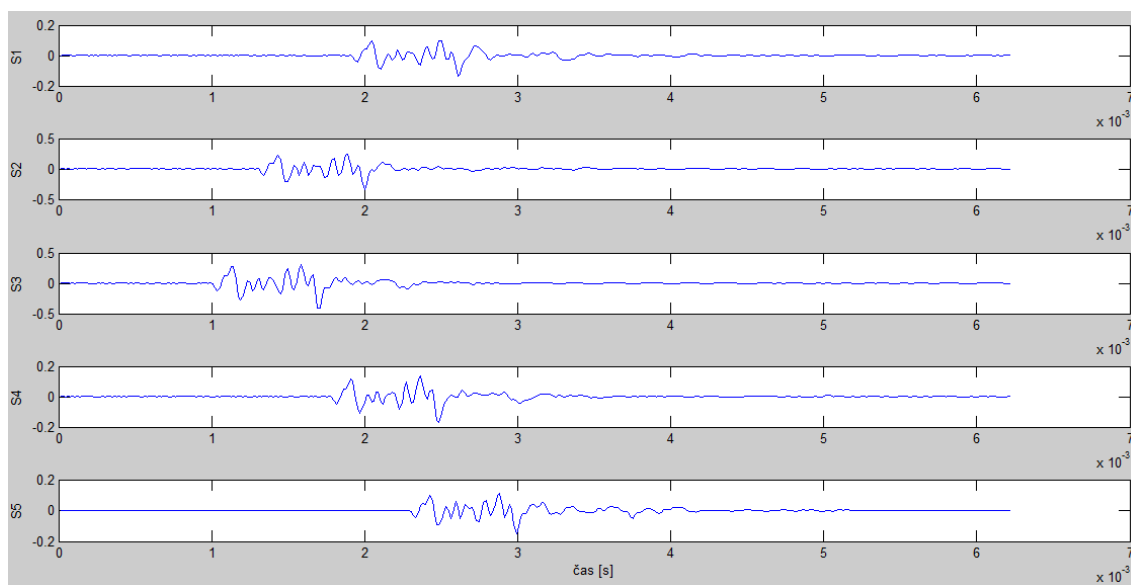
kde  $(x, y, z)$  jsou neznámé souřadnice zdroje akustického signálu,  $(x_{Si}, y_{Si}, z_{Si})$  jsou souřadnice  $i$ -tého snímače,  $D_i$  je vzdálenost  $i$ -tého snímače od zdroje akustického signálu,  $v_s$  je rychlost zvuku v daném prostředí,  $T$  je doba za kterou dorazí signál od zdroje k třetímu snímači,  $\tau_{3i}$  je doba za kterou dorazí signál od třetího k  $i$ -tému snímači.

Metoda časových diferencí využívá k lokalizaci časové intervaly mezi snímačem, který jako první zaznamenal signál a ostatními snímači. Při uspořádání dle *Obr. 4.3* se jednalo o třetí snímač, kterému odpovídají časové intervaly dle *Obr. 4.5*. Časy  $\tau_{3i}$  je možné zjistit pomocí metody vzájemné korelace signálů. K výpočtu byl použit program MATLAB, který má implementovanou korelační funkci *xcorr*. Pro načtení, zobrazení a výpočet korelace signálů byl napsán skript s názvem *zobrazcasys*, který je v příloze C.



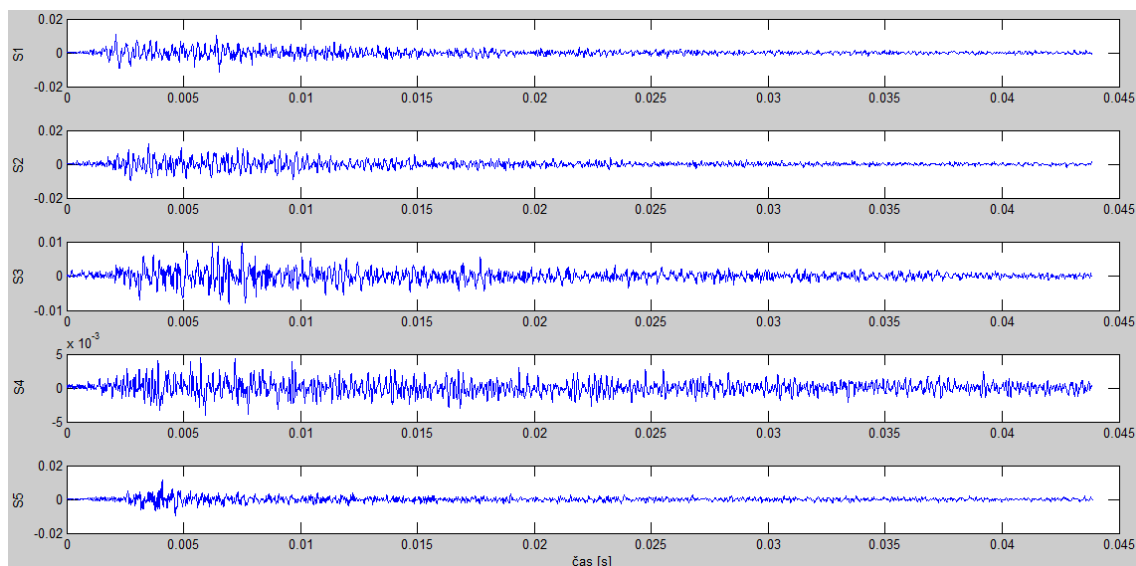
*Obr. 4.5* Schematické zobrazení časových intervalů  $\tau_{3i}$  [34]

Na *Obr. 4.6* jsou průběhy zaznamenané jednotlivými mikrofony zobrazené skriptem *zobrazcasys* pro měření bez nádoby. Z obrázku jsou patrné rozdíly mezi příchody signálů k mikrofonom. Z grafů lze vyčíst, že signál dorazil nejdříve ke třetímu mikrofonu.



*Obr. 4.6* Průběhy naměřené jednotlivými mikrofony při měření bez nádoby

Na Obr. 4.7 jsou průběhy zaznamenané jednotlivými mikrofony při měření s nádobou. Z obrázku již nejsou patrné tak velké rozdíly mezi jednotlivými příchody signálů. A proto bylo na průběhy aplikováno několik frekvenčních filtrů za účelem vyhlazení signálů a přizpůsobení pro následnou korelaci. Signály se vyznačují delší dobou dozvuku způsobenou nejspíše kmitajícími stěnami ocelové nádoby a odrazy od stěn. Amplituda kmitů je více než desetkrát menší než při měření bez nádoby.



Obr. 4.7 Průběhy naměřené jednotlivými mikrofony při měření s nádobou

Časové intervaly mezi snímači, potřebné pro výpočet souřadnic reproduktoru, byly vypočteny pomocí skriptu *zobrazcasy*. Do skriptu bylo nutné nejprve zadat číslo mikrofону, ke kterému dorazil signál nejdříve. Při tomto uspořádání mikrofónů se jednalo o třetí snímač, to potvrzují záznamy průběhů bez nádoby i reálná poloha snímače vůči reproduktoru. Vypočtené hodnoty časových intervalů jsou v Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Časové intervaly mezi třetím a ostatními snímači vypočtené pomocí korelace

Uspořádání / filtr	$\tau_{31}$ [s]	$\tau_{32}$ [s]	$\tau_{34}$ [s]	$\tau_{35}$ [s]
Bez nádoby	9,1553E-04	3,0518E-04	7,7820E-04	1,2970E-03
S nádobou bez filtru	3,6662E-04	-6,1040E-05	2,0905E-03	-2,4414E-04
Horní propust od 5kHz	-1,2359E-03	-4,5780E-05	3,6010E-03	-2,6398E-03
Pásmová propust 5 kHz	0	1,5260E-05	1,3889E-03	-3,7079E-03
Pásmová propust 6,3 kHz	1,6785E-04	7,7820E-04	1,6785E-04	-1,3580E-03
Pásmová propust 8 kHz	4,8218E-03	-2,8992E-04	8,0414E-03	-2,3956E-03
Pásmová propust 10 kHz	6,4087E-04	-3,1738E-03	-4,7607E-03	9,1550E-05

Jelikož časové intervaly pro měření s nádobou nevyšly podobně jako měření bez nádoby, které můžeme považovat za referenční, byly následující ověření výpočetních metod aplikovány výhradně na měření bez nádoby.



Pro řešení soustavy rovnic (4-1) - (4-5) byla vybrána iterační MATLAB funkce *lsqnonlin* využívající metodu nejmenších čtverců s názvem skriptu *solv\_lsq*. Dále iterační Newtonova metoda s názvem skriptu *newton\_soustava*, skripty funkcí jsou součástí přílohy C. Aby bylo možné soustavu nelineárních rovnic vyřešit pomocí těchto metod, bylo nutné upravit rovnice na tvar  $f(x)=0$ . To bylo dosaženo vyjádřením z rovnice (4-1) neznámé  $T$  (4-6), dosazením do ostatních rovnic a upravením rovnic na požadovaný tvar. Vzniklá soustava (4-7) - (4-10) se tímto postupem zredukovala na čtyři rovnice o třech neznámých  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Jednalo se tedy o přeурčenou soustavu nelineárních rovnic. Pro výpočty byla zvolena rychlost zvuku  $v_s$  rovna 345 m/s, která odpovídá rychlosti zvuku ve vzduchu přibližně při 22°C.

$$\frac{\sqrt{(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2}}{v_s} = T \quad (4-6)$$

$$0 = \sqrt{(x - x_{S1})^2 + (y - y_{S1})^2 + (z - z_{S1})^2} - \sqrt{(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2} - v_s \cdot \tau_{31} \quad (4-7)$$

$$0 = \sqrt{(x - x_{S2})^2 + (y - y_{S2})^2 + (z - z_{S2})^2} - \sqrt{(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2} - v_s \cdot \tau_{32} \quad (4-8)$$

$$0 = \sqrt{(x - x_{S4})^2 + (y - y_{S4})^2 + (z - z_{S4})^2} - \sqrt{(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2} - v_s \cdot \tau_{34} \quad (4-9)$$

$$0 = \sqrt{(x - x_{S5})^2 + (y - y_{S5})^2 + (z - z_{S5})^2} - \sqrt{(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2} - v_s \cdot \tau_{35} \quad (4-10)$$

Tab. 4.4 Porovnání metod v závislosti na počáteční aproximaci souřadnic pro měření bez nádoby

Počáteční aproximace souřadnic	Funkce <i>lsqnonlin</i> - bez nádoby				Newtonova metoda - bez nádoby			
	x [cm]	y [cm]	z [cm]	Počet iterací	x [cm]	y [cm]	z [cm]	Počet iterací
[0; 0; 0]	37,091	10,672	15,382	29	-3E+18	3E+18	-9E+17	7
[10; 10; 10]	37,091	10,672	15,382	17	-5E+17	-9E+17	6E+15	8
[35; 10; 35]	37,091	10,672	15,382	12	<b>37,045</b>	<b>11,249</b>	<b>14,985</b>	<b>7</b>
[50; 15; 50]	37,091	10,672	15,382	12	5E+17	3E+17	2E+17	8
[70; 20; 70]	37,091	10,672	15,382	11	∞	3E+17	-2E+17	7

V Tab. 4.4 jsou hodnoty souřadnic vypočtené pomocí obou metod v závislosti na počáteční aproximaci souřadnic pro měření bez nádoby. Z tabulky je patrné, že funkce *lsqnonlin* je nezávislá na počáteční aproximaci a konverguje stále ke stejnému výsledku, pouze se liší počet iterací. Newtonova metoda je velice závislá na zvolené počáteční aproximaci souřadnic zdroje, které musí být zvoleny poměrně přesně vůči reálné poloze,

aby metoda poskytla reálné výsledky. Při zadání vhodných počátečních souřadnic poskytuje Newtonova metoda přesnější výsledky, při porovnání s reálnou polohou středu reproduktoru (39,8; 13; 13,5) [cm]. Pro vyřešení soustavy nelineárních rovnic Newtonovou metodou je nutné, aby byla plně určená soustava rovnic, proto byla ve skriptu *newton\_soustava* jedna z rovnic vynechána.

Tab. 4.5 Zdánlivé souřadnice reproduktoru vypočtené funkcí *lsqnonlin* pro měření s nádobou

	Funkce <i>lsqnonlin</i> - s nádobou			
	x [cm]	y [cm]	z [cm]	Počet iterací
Bez filtru	80	0	8,3519	28
Horní propust 5 kHz	80	0	80	31
Pásmová propust 5 kHz	80	0	80	23
Pásmová propust 6,3 kHz	10,0854	0	80	23
Pásmová propust 8 kHz	25,9009	0	18,477	125
Pásmová propust 10 kHz	0	25	55,4254	12

V Tab. 4.5 jsou vypočteny zdánlivé souřadnice reproduktoru pro časové intervaly při měření s nádobou a s použitím několika filtrů na záznamy z mikrofonů. Hodnoty jsou velice nepřesné, ale pohybují se alespoň ve stejných řádech jednotek jako má reálná poloha reproduktoru. Přesnějších výsledků nebylo možné pomocí této metody výpočtu dosáhnout kvůli nepřesným výsledkům časových intervalů řešených korelační funkcí *xcorr*. Výsledné souřadnice, vypočtené Newtonovou metodou, poukazyvaly na zdroj akustického signálu mimo nádobu.

### 4.3 Vyhodnocení ověření metody lokalizace

Časové intervaly vypočtené korelační funkcí *Tab. 4.3* pro uspořádání s nádobou a různými filtry vyšly velice odlišně od časů bez nádoby, které lze považovat za referenční hodnoty. K těmto referencím by se měly hodnoty alespoň blížit, aby bylo možné zjistit přesné souřadnice zdroje akustického signálu výpočtem soustavy nelineárních rovnic. Největším problémem jsou hodnoty záporné, které svědčí o tom, že akustický signál dorazil nejprve k jinému snímači než byl třetí snímač, to však neodpovídá reálné poloze reproduktoru a snímačů. Tím se zanáší do výpočetních metod značné zkreslení.

Použité iterační metody dosáhly velice přesných výpočtů souřadnic reproduktoru pro hodnoty časových intervalů měřených bez nádoby. Souřadnice se lišily od reálné pozice pouze o 1,5 až 3 cm, nepřesnosti jsou vzhledem k velikosti reproduktoru zanedbatelné. Z Newtonovy metody vycházely přesnější výsledky, ale bylo nutné zadat počáteční aproximaci blízkou hledanému řešení. Funkce *lsqnonlin* poskytovala výsledky při jakékoliv aproximaci. Jako nejvhodnější se jeví výpočet počáteční aproximace souřadnic pomocí funkce *lsqnonlin* a následné dosazení do Newtonovy metody pro nejpřesnější řešení.

Pro zjednodušený experiment lokalizace částečných výbojů v nádobě kondenzátoru nebylo možné výpočetními metodami určit přesnou polohu zdroje. Problém spočíval ve výpočtu korelací časových záznamů měření, které neposkytovaly správné výsledky a důsledkem toho nebylo možné soustavu vyřešit či bylo nalezeno řešení mimo měřenou nádobu. Problémy s výpočtem korelace byly způsobeny poměrně dlouhou dobou dozvuku ocelové nádoby, různou rychlostí zvuku v ocelové nádobě a okolním vzduchu a poměrně velkým zkreslením původního tvaru a amplitudy vyslaného signálu.

Jelikož se jednalo o zjednodušený experiment, jsou výsledky poměrně uspokojivé, avšak nepřesné. Lepších výsledků by se mohlo dosáhnout při dalším podrobnějším zkoumání zvukových záznamů případně použitím jiných snímačů, jiného rozmístění nebo použitím jiného výchozího signálu. Nejlepších výsledků by mohlo být dosaženo, pokud by byla nádoba vyplněna materiálem, který by omezil kmitání ocelových stěn nádoby. Tím by bylo dosaženo menšího zkreslení mikrofonních záznamů a vyřešil by se problém s výpočtem korelací mezi jednotlivými záznamy. Další možné vylepšení spočívá v použití jiné metody zjištění časových intervalů mezi jednotlivými mikrofony.

## Závěr

V teoretické části práce byly popsány základní druhy kondenzátorů se zaměřením na metalizované polypropylenové kondenzátory a technologii jejich výroby. Dále na popis problematiky částečných výbojů, jejich typů, účinků na izolační soustavy elektrických zařízení, základních veličin k nim vztažených a metod detekce a lokalizace vhodných pro MKP kondenzátory.

Jedním z hlavních cílů práce byla analýza částečných výbojů vznikajících na průchodkových sestavách MKP kondenzátorů. Měření bylo provedeno galvanickou metodou dle normy ČSN EN 60270. Metodou byla zjišťována závislost částečných výbojů na momentu utažení a typ výbojové činnosti v průchodkových sestavách. Analýze byly podrobeny dvě podobné průchodkové sestavy MKP kondenzátorů o různých rozměrech a odlišných gumových těsněních. Naměřená data potvrdila, že se zvyšujícími se momenty došlo ke stabilizaci a snížení četnosti částečných výbojů, avšak nastaly i poklesy zapalovacích a zhášecích napětích. Z pattern diagramů vyplynulo, že na těchto sestavách vznikají nejvíce částečné výboje v delaminacích izolační soustavy a výboje klouzavé na povrchu izolantů, především u napěťových elektrod sestav. Jeden z experimentů potvrdil, že pro omezení částečných výbojů na sestavách by bylo vhodné nanést izolační pastu, olej nebo lak na gumová těsnění, durapol a bezdřevé lepenky. Jako nejideálnější řešení se jeví nahrazení durapolu a bezdřevých lepenek jedním kusem materiálu, aby se omezil vznik vzduchových mezer mezi vrstvami izolace.

Druhým hlavním cílem práce bylo ověření vybrané metody lokalizace částečných výbojů v ocelové nádobě MKP kondenzátoru. Pro lokalizaci byla zvolena akustická metoda detekce a lokalizace metodou časových diferencí. Postup byl přizpůsoben měření v akustické laboratoři nahrazením zdroje částečných výbojů reproduktorem, který simuloval akustické projevy částečných výbojů. Funkčnost skriptů, které řešily soustavu nelineárních rovnic popisujících polohu zdroje signálu, byla ověřena měřením bez nádoby. Při měření s nádobou kondenzátoru došlo k velkému zkreslení záznamů signálů vlivem dozvuku ocelových stěn nádoby, odrazů od stěn nádoby atd. Důsledkem bylo vypočtení nereálných souřadnice zdroje signálu, avšak ne vždy tak vzdálených realitě. Pro možné rozhodnutí o další aplikaci této metody bude nutné provést další experimenty, které však byly nad rámec této diplomové práce.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] POOLE, Ian. Capacitor Types. *Radio-electronics.com* [online]. [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: [http://www.radio-electronics.com/info/data/capacitor/capacitor\\_types](http://www.radio-electronics.com/info/data/capacitor/capacitor_types).
- [2] MYNÁŘOVÁ, Věra a ČENGERY, Jiří. Elektronické součástky: cvičení. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 63 s. ISBN 80-7082-778-5
- [3] MATĚJKA, Roman. Kondenzátory. *Popular* [online]. 2014 [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: <http://popular.fbmi.cvut.cz/elektrotechnika/Stranky/Kondenz%C3%A1tory.aspx>
- [4] SITARAMARAJU, G., B. SRINIVAS, C. MANOJ REDDY a R. SUDHA. *Electical Characteristics Of Metallized Polypropylene Film Capacitor With General Technical Data - Comparative Study. International Journal of Engineering Research & Technology* [online]. 2013, 2(4), pp. 2709-2715 [cit. 2016-10-12]. ISSN: 2278-0181. Dostupné z: <https://www.ijert.org/view-pdf/3323/electical-characteristics-of-metallized-polypropylene-film-capacitor-with-general-technical-data-comparative-study>
- [5] Power Film Capacitor Application Guide. *Cornell Dubilier* [online]. 2016 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.cde.com/resources/catalogs/filmAPPguide.pdf>
- [6] POOLE, Ian. Polypropylene Capacitor: PP Metallized Film. *Radio-electronics.com* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/data/capacitor/polypropylene-film-capacitor.php>.
- [7] General Technical Information: Film Capacitors. *Vishay.com* [online]. 2012 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>
- [8] Metallized Construction. *WIMA* [online]. 2012 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.wima.de/EN/metallized.htm>
- [9] KŘIVANEC, Václav. *Detekce samoregenerace foliového kondenzátoru*. Plzeň, 2013. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Laurenc.
- [10] Classification of Film Capacitors. *PowerGuru – Power Electronics Information Portal* [online]. 2013 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.powerguru.org/classification-of-film-capacitors/>
- [11] Self-healing Process in Metallized Capacitors. *WIMA* [online]. 2012 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.wima.de/EN/selfhealing.htm>
- [12] Dokumentace a exkurze ve VISHAY ELECTRONIC spol. s r.o.
- [13] Fortis MKP G. *KBH ENERGY* [online]. 2016 [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: <http://www.kbh.cz/produkty/fortis>
- [14] ZEZ SILKO. *Power Capacitors* [online]. [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/>
- [15] Vishay: Capacitors. *Vishay* [online]. [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/capacitors/>
- [16] Power Capacitors (EPCOS). *TDK EPCOS* [online]. 2016 [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: <https://en.tdk.eu/tdk-en/530190/products/product-catalog/power-capacitors>

- [17] Metallized Polypropylene Capacitors (MKP/MFP). *TDK EPCOS* [online]. 2016 [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: <https://en.tdk.eu/tdk-en/529464/products/product-catalog/film-capacitors/metallized-polypropylene-capacitors--mkp-mfp->
- [18] Film Capacitors. *TDK EPCOS* [online]. 2012 [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: <https://en.tdk.eu/download/173546/fc030f0de8e3c68b1d9fe2719d353130/film-capacitors-for-industrial-applications-pp.pdf>
- [19] *Technika zkoušek vysokým napětím - měření částečných výbojů: ČSN EN 60270*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 46 s.
- [20] MENTLÍK, Václav et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [21] Měření a charakter částečných výbojů (ČV) v točivých strojích. *ElektroPrůmysl.cz* [online]. 2012 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/mereni-a-charakter-castecnych-vyboju-cv-v-tocivych-strojich-3>
- [22] HUBÁČEK, Jaroslav. *Nekonvenční metody sledování částečných výbojů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Eva Müllerová.
- [23] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.
- [24] MORSHUIS, P.H.F. *Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2005, 12(5), 905-913 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522185. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1522185/>
- [25] MOHAMMADI, Ezatollah, Mehdi NIROOMAND, Mahdie REZAEIAN a Zahra AMINI. *Partial discharge localization and classification using acoustic emission analysis in power transformer*. In: INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference [online]. IEEE, 2009, s. 1-6 [cit. 2017-02-09]. DOI: 10.1109/INTLEC.2009.5351926. ISBN 978-1-4244-2490-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5351926/>
- [26] CARVALHO, Andre T., Helio P. AMORIM, Caio F. C. CUNHA, Lilian S. FERREIRA, Mayara C. CAGIDO a Joao B. BORGES. *Virtual instrumentation for high voltage power capacitors assessment through capacitance monitoring and acoustic partial discharge detection*. In: 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) [online]. IEEE, 2016, s. 511-514 [cit. 2017-03-10]. DOI: 10.1109/EIC.2016.7548649. ISBN 978-1-4673-8706-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7548649/>
- [27] SPONSOR a TRANSFORMERS COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. *IEEE guide for the detection and location of acoustic emissions from partial discharges in oil-immersed power transformers and reactors*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. ISBN 9780738156125.
- [28] *Nedestruktivní zkoušení - Akustická emise - Všeobecné zásady: ČSN EN 13554*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 16 s.

- [29] *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení akustickou emisí – Zkoušení kovových tlakových zařízení během přejímací zkoušky – Planární lokalizace zdrojů akustické emise: ČSN EN 13584*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 16 s.
- [30] HOEK, S.M., A. KRAETGE, R. HUMMEL, O. KESSLER, P. WINTER, U. BRONIECKI a B. KASTNER. *Localizing partial discharge in power transformers by combining acoustic and different electrical methods*. In: 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation [online]. IEEE, 2012, s. 237-241 [cit. 2017-03-10]. DOI: 10.1109/ELINSL.2012.6251465. ISBN 978-1-4673-0487-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6251465/>
- [31] Acoustics and Vibration Animations: Longitudinal and Transverse Wave Motion. *Penn State Graduate Program in Acoustics* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>
- [32] Radiologická fyzika a radiobiologie 10. přednáška. *Masarykova univerzita, Lékařská fakulta* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [www.med.muni.cz/biofyz/files/radiologieBC/Vlneni\\_fy\\_zaklad\\_UZ.pptx](http://www.med.muni.cz/biofyz/files/radiologieBC/Vlneni_fy_zaklad_UZ.pptx)
- [33] Tables of Acoustic Properties of Materials. *ONDA* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: [http://www.ondacorp.com/tecref\\_acoustictable.shtml](http://www.ondacorp.com/tecref_acoustictable.shtml)
- [34] MARKALOUS, Sacha, Stefan TENBOHLEN a Kurt FESER. *Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2008, 15(6), 1576-1583 [cit. 2017-03-11]. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712660. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4712660/>
- [35] WU, Min, Hong CAO, Jianneng CAO, Hai-Long NGUYEN, Joao Bartolo GOMES a Shonali Priyadarsini KRISHNASWAMY. An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2015, 31(6), 22-35 [cit. 2017-04-17]. DOI: 10.1109/MEI.2015.7303259. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7303259/>

## Seznam příloh

**Příloha A - Fotografie přístrojů použitých pro měření částečných výbojů**

**Příloha B - Fotografie přístrojů použitých pro ověření metody lokalizace částečných výbojů v nádobě MKP kondenzátoru**

**Příloha C - MATLAB skript *zobrazcasy* pro načtení, zobrazení a výpočet korelace záznamů z mikrofonních snímačů**

**MATLAB skript *solv\_lsq* pro výpočet souřadnic zdroje akustického signálu a funkce *rovnice* obsahující soustavu nelineárních rovnic ve tvaru  $f(x)=0$**

**MATLAB skript *newton\_soustava* pro výpočet souřadnic zdroje akustického signálu z plně určené soustavy rovnic ve tvaru  $f(x)=0$**

**Příloha D - Naměřené grafické závislosti částečných výbojů - příloha je umístěna na CD**



**Příloha A - Fotografie přístrojů použitých pro měření částečných výbojů**

Obr. A.1 Ovládací panel vysokonapěťového zdroje High Volt



Obr. A.2 Analyzátor částečných výbojů Doble Lemke s koaxiálními přívodními kabely



Obr. A.3 Kalibrátor částečných výbojů LDIC

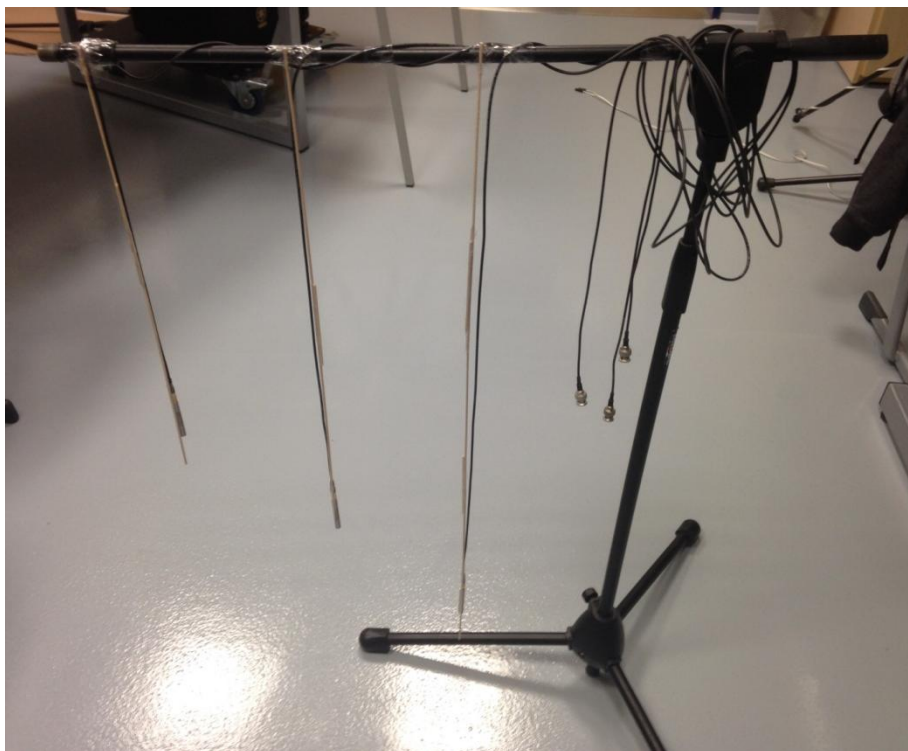


Obr. A.4 Vazební kondenzátor LDIC



Obr. A.5 Měřící impedance LDIC s koaxiálními kabely vedoucími do analyzátor

**Příloha B - Fotografie přístrojů použitých pro ověření metody lokalizace částečných výbojů v nádobě MKP kondenzátoru**



*Obr. B.1 Mikrofony připevněné na mikrofonních stojanech - zleva S1,S2,S3*



*Obr. B.2 Mikrofony připevněné na mikrofonních stojanech - zleva S4,S5*



Obr. B.3 Detail mikrofону pro volné pole značky G.R.A.S.



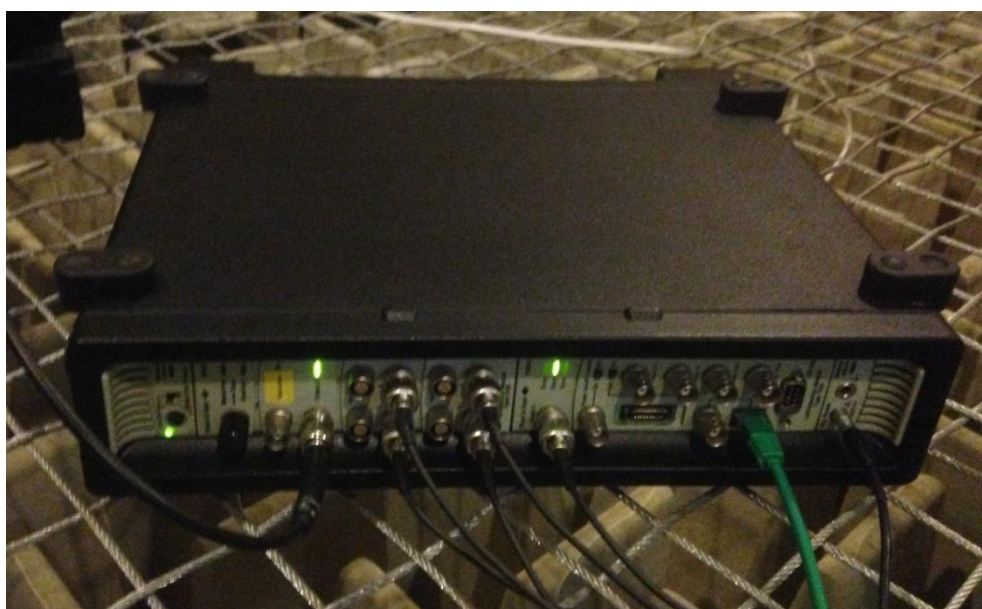
Obr. B.4 Reprodukter SONAVOX připevněný na mikrofonním stojanu a detail reproduktoru



Obr. B.5 Koncový zesilovač značky YAMAHA



Obr. B.6 Zvukový analyzátor Brüel & Kjær - přední strana



Obr. B.7 Zvukový analyzátor Brüel & Kjær - zadní strana

### Příloha C - MATLAB skript *zobrazcasy* pro načtení, zobrazení a výpočet korelace záznamů z mikrofonních snímačů

```

function zobrazcasy()
    % název souboru
    [S1,Fs1,NBITS] = wavread('m1_0.5ms_bez.wav'); %Načtení záznamu od mikrofonu 1
    t1=1:length(S1);t1=t1/Fs1;

    [S2,Fs2,NBITS] = wavread('m2_0.5ms_bez.wav'); %Načtení záznamu od mikrofonu 2
    t2=1:length(S2);t2=t2/Fs2;

    [S3,Fs3,NBITS] = wavread('m3_0.5ms_bez.wav'); %Načtení záznamu od mikrofonu 3
    t3=1:length(S3);t3=t3/Fs3;

    [S4,Fs4,NBITS] = wavread('m4_0.5ms_bez.wav'); %Načtení záznamu od mikrofonu 4
    t4=1:length(S4);t4=t4/Fs4;

    [S5,Fs5,NBITS] = wavread('m5_0.5ms_bez.wav'); %Načtení záznamu od mikrofonu 5
    t5=1:length(S5);t5=t5/Fs5;

    %Zobrazení všech záznamů do jednoho společného grafu
    subplot(5,1,1);plot(t1,S1);ylabel('S1');
    subplot(5,1,2);plot(t2,S2);ylabel('S2');
    subplot(5,1,3);plot(t3,S3);ylabel('S3');
    subplot(5,1,4);plot(t4,S4);ylabel('S4');
    subplot(5,1,5);plot(t5,S5);ylabel('S5');
    xlabel('čas [s]');

    first=S3; % volba snímače který jako první zaznamenal signál!!!!!!

    [acor,lag] = xcorr(S1,first,'coeff'); % korelace signálu first vůči S1
    [~,I] = max(abs(acor));
    lagDiff = lag(I);
    t1 = lagDiff/Fs1;

    [acor,lag] = xcorr(S2,first,'coeff'); % korelace signálu first vůči S2
    [~,I] = max(abs(acor));
    lagDiff = lag(I);
    t2 = lagDiff/Fs2;

    [acor,lag] = xcorr(S3,first,'coeff'); % korelace signálu first vůči S3
    [~,I] = max(abs(acor)); % v případě first=S3 bude čas korelace = 0s
    lagDiff = lag(I);
    t3 = lagDiff/Fs3;

    [acor,lag] = xcorr(S4,first,'coeff'); % korelace signálu first vůči S4
    [~,I] = max(abs(acor));
    lagDiff = lag(I);
    t4 = lagDiff/Fs5;

    [acor,lag] = xcorr(S5,first,'coeff'); % korelace signálu first vůči S5
    [~,I] = max(abs(acor));
    lagDiff = lag(I);
    t5 = lagDiff/Fs5;

    T=[t1,t2,t3,t4,t5];
    % tisk výsledků na obrazovku
    fprintf('ty_S1 = % 1.8f s\n',T(1));fprintf('ty_S2 = % 1.8f s\n',T(2));fprintf('ty_S3 = % 1.8f s\n',T(3))
    fprintf('ty_S4 = % 1.8f s\n',T(4));fprintf('ty_S5 = % 1.8f s\n',T(5))
end

```

## MATLAB skript *solv\_lsq* pro výpočet souřadnic zdroje akustického signálu a funkce rovnice obsahující soustavu nelineárních rovnic ve tvaru $f(x)=0$

```
function solv_lsq( )

xstart = [0;0;0];
disp('Zadej počáteční aproximaci polohy');
xstart(1)=input('x0 = ');
xstart(2)=input('y0 = ');
xstart(3)=input('z0 = ');

fun = @rovnice; % načtení soustavy nelineárních rovnic z funkce rovnice

disp('*****LSQNONLIN*****')
% nastavení parametrů výpočtu
options2= optimoptions(@lsqnonlin,'Display','iter-detailed',...
    'TolFun', 1e-15,'TolX',1e-15, 'MaxFunEvals',500);

[x]=lsqnonlin(fun,xstart,[0;0;0],[80;25;80],options2)

end
-----
function [f] = rovnice(x)

%% ***** bez nádoby *****
xs1=58.8; ys1=1; zs1=56;
xs2=42.8; ys2=0.5; zs2=38.5;
xs3=26.8; ys3=0; zs3=19.8;
xs4=0; ys4=13; zs4=35.5;
xs5=41.8; ys5=12; zs5=75.5;
vs=34500;
t31=0.00091553;
t32=0.00030518;
t34=0.0007782;
t35=0.001297;
%% ***** s nádobou *****
% xs1=59.3; ys1=1; zs1=53;
% xs2=42.3; ys2=0.5; zs2=36;
% xs3=25.8; ys3=0; zs3=18.5;
% xs4=0; ys4=14; zs4=33.5;
% xs5=41.8; ys5=12; zs5=74.5;
% vs=34500;
% t31=;
% t32=;
% t34=;
% t35=;
%% *****soustava rovnic ve tvaru f(x) = 0 *****
f1= sqrt((x(1)-xs1).^2+(x(2)-ys1).^2+(x(3)-zs1).^2)-sqrt((x(1)-xs3).^2+(x(2)-ys3).^2+(x(3)-zs3).^2)-vs*t31;
f2= sqrt((x(1)-xs2).^2+(x(2)-ys2).^2+(x(3)-zs2).^2)-sqrt((x(1)-xs3).^2+(x(2)-ys3).^2+(x(3)-zs3).^2)-vs*t32;
f3= sqrt((x(1)-xs4).^2+(x(2)-ys4).^2+(x(3)-zs4).^2)-sqrt((x(1)-xs3).^2+(x(2)-ys3).^2+(x(3)-zs3).^2)-vs*t34;
f4= sqrt((x(1)-xs5).^2+(x(2)-ys5).^2+(x(3)-zs5).^2)-sqrt((x(1)-xs3).^2+(x(2)-ys3).^2+(x(3)-zs3).^2)-vs*t35;

f=[f1,f2,f3,f4];
end
```



## MATLAB skript *newton\_soustava* pro výpočet souřadnic zdroje akustického signálu z plně určené soustavy rovnic ve tvaru $f(x)=0$

```
function newton_soustava( )

syms x y z % definujeme proměnné

% Dosazena soustava nelineárních rovnic ve tvaru f(x) = 0
f1=sqrt((x-58.8).^2+(y-1).^2+(z-56).^2)-sqrt((x-26.8).^2+(y-0).^2+(z-19.8).^2)-34500*0.00091553;
f2=sqrt((x-42.8).^2+(y-0.5).^2+(z-38.5).^2)-sqrt((x-26.8).^2+(y-0).^2+(z-19.8).^2)-34500*0.00030518;
% f3=sqrt((x-0).^2+(y-13).^2+(z-35.5).^2)-sqrt((x-26.8).^2+(y-0).^2+(z-19.8).^2)-34500*0.0007782;
f4=sqrt((x-41.8).^2+(y-12).^2+(z-75.5).^2)-sqrt((x-26.8).^2+(y-0).^2+(z-19.8).^2)-34500*0.001297;
%Newtonova metoda funguje pouze pro symetrické soustavy
%např. 3 rovnice a 3 neznámé, proto je jedna z rovnic vynechána

F = [ f1; f2; f4 ] ;

J=jacobian(F, [x, y, z]);

X0 = [0; 0; 0];
disp('Zadej počáteční aproximaci polohy');
X0(1)=input('x0 = ');
X0(2)=input('y0 = ');
X0(3)=input('z0 = ');

maxiter=50; %maximální počet kroků
rozdilF=1e-8; %zastavovací podmínka pro rozdíl dvou F(x)
rozdilX=1e-8; %zastavovací podmínka pro rozdíl dvou x
iter=1;

while (iter<=maxiter)

J0 = subs( J, {x, y, z}, {X0(1), X0(2), X0(3)}); % do J dosadíme za X hodnotu X0
F0 = subs( F, {x, y, z}, {X0(1), X0(2), X0(3)}); % do F dosadíme za X hodnotu X0

F0ev = eval(F0);

if abs(F0ev)>5000
disp('\nf(x) s další iterací jde k nekonečnu')
break;
end

pred=X0;
J0ev=eval(J0);
D0 = (-J0ev)\(F0ev); % řešíme soustavu J0 * D0 = - F0
X0 = X0 + D0 ; % opravíme aproximaci X0

if isnan((X0(1)))==1|| isnan((X0(2)))==1|| isnan((X0(3)))==1
fprintf('\n%d.iterace poslední s numericky vyjádřeným x\n',iter-1)
break;
end

fprintf('\n%d.iterace \n',iter)
fprintf('x = %f \ty = %f \tz = %f\n',(X0))

if abs((F0ev))<rozdilF
fprintf('\nOptimální řešení při %d.iteraci\nf(x) je menší než stanovená hranice %e\n',iter,rozdilF)
fprintf('f(x)=%e %e %e\n',(F0ev))
break;
end
```

```
elseif abs(pred-X0)<rozdilX
    fprintf('\nOptimální řešení při %d.iteraci\n',iter)
    fprintf('rozdíl x je menší než stanovená hranice %e\n',rozdilX)
    break;
end

iter=iter+1;

if iter>=maxiter
    fprintf('\nByl překročen maximální počet iterací=%d\n',maxiter);
end
end
end
```