

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

PARTIAL DISCHARGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

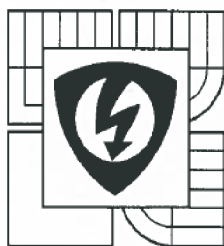
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VRATISLAV MACEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektroenergetika**

**Student:** Bc. Vratislav Macek

**Ročník:** 2

**ID:** 126768

**Akademický rok:** 2013/14

**NÁZEV TÉMATU:**

**Částečné výboje**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Částečné výboje
2. Metody měření částečných výbojů
3. Návrh a realizace laboratorní úlohy pro měření částečných výbojů

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**



  
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

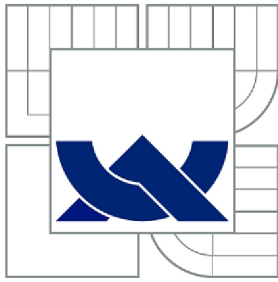
Bibliografická citace práce:

MACEK, V. *Částečné výboje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

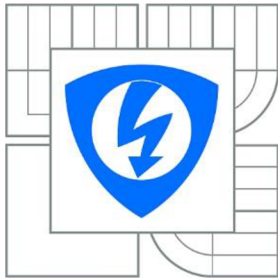
Zde bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## **ČÁSTEČNÉ VÝBOJE**

PARTIAL DISCHARGE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. VRATISLAV MACEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.**

BRNO 2014

---

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je vytvoření laboratorní úlohy na problematiku částečných výbojů. Práce je rozdělena dvě části: teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou informace týkající se částečných výbojů. Mezi ně patří rozdělení výbojů podle druhu, vlivy které mají na izolační systém, parametry podle kterých se výboje hodnotí a způsoby měření. Dále manuál k měřicímu přístroji.

V praktické části je navržena laboratorní úloha na problematiku měření částečných výbojů. Jedná se o demonstrativní měření částečných výbojů s cílem přiblížení problematiky výbojů, nutnosti kalibrace systému a potlačení rušení.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

částečné výboje, DDX-7000, vysokonapěťové testování, kalibrace, rušení, analýza

---

**ABSTRACT**

The main subject of this diploma's thesis is the creation of laboratory task on the partial discharge. The thesis is made up of two parts: theoretical and practical. In the theoretical part there are information about partial discharge. One of them is classification partial discharge by type, effects of partial discharge in insulation systems, parameters to assess the quality of electrical insulation of power systems and measurement techniques. Further part is user's manual for measurement instrument.

In practical part is created laboratory task on problematic of the partial discharge measurement. It is demonstrative measure of partial discharge with the aim of understanding problematic of partial discharge, calibration and noise.

**KEY WORDS:**

partial discharge, DDX-7000, high voltage testing, calibration, noise, analysis

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>13</b>
<b>2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....</b>	<b>14</b>
2.1.1 GEMANT-PHILIPPOVŮV MODEL .....	15
2.1.2 BÖNINGŮV MODEL .....	16
<b>2.2 VLIV VNITŘNÍCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLACI .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 VNĚJŠÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....</b>	<b>20</b>
<b>3 PARAMETRY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....</b>	<b>22</b>
3.1.1 VELIČINY VZTAHUJÍCÍ SE K IMPULZŮM ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	22
3.1.2 PŘILOŽENÁ ZKUŠEBNÍ NAPĚTÍ VZTAŽENÁ K VELIČINÁM IMPULZŮ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	23
<b>3.2 OBRAZCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....</b>	<b>24</b>
<b>4 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 ELEKTRICKÉ METODY .....</b>	<b>28</b>
4.1.1 GALVANICKÁ METODA .....	29
4.1.2 METODA INDUKTIVNĚ VÁZANÉ SONDY .....	30
4.1.3 METODA DIFERENCIÁLNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ SONDY .....	31
4.1.4 KAPACITNÍ DRÁŽKOVÁ SONDA .....	31
4.1.5 KAPACITNÍ SONDY .....	32
4.1.6 INDUKTIVNÍ SONDY .....	33
<b>4.2 NEELEKTRICKÉ METODY .....</b>	<b>34</b>
4.2.1 AKUSTICKÁ DETEKCE .....	34
4.2.2 OPTICKÁ DETEKCE .....	34
4.2.3 CHEMICKÁ DETEKCE.....	34
<b>5 HIPOTRONICS DDX-7000 .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1 POUŽITÍ.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2 PARAMETRY .....</b>	<b>36</b>
<b>5.3 POPIS ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>37</b>
5.3.1 POTLAČENÍ NEŽÁDOUCÍCH SIGNÁLŮ – HRADLOVÁNÍ.....	37
5.3.2 KALIBROVÁNÍ SYSTÉMU .....	37
<b>5.4 POPIS PROGRAMU DDX-7000.....</b>	<b>38</b>
5.4.1 NASTAVENÍ ZESILOVAČE .....	40
5.4.2 NASTAVENÍ MĚŘENÍ.....	41

---

5.4.3 NASTAVENÍ ZOBRAZENÍ MĚŘENÉHO PRŮBĚHU A HRADEL.....	42
5.4.4 ANALYZAČNÍ MODUL .....	45
<b>6 NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY .....</b>	<b>47</b>
<b>6.1 ZADÁNÍ.....</b>	<b>47</b>
<b>6.2 TEORETICKÝ ROZBOR .....</b>	<b>47</b>
6.2.1 KALIBRACE .....	47
6.2.2 RUŠENÍ.....	48
6.2.3 VYHODNOCOVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	49
6.2.4 MĚŘICÍ OBVOD.....	50
<b>6.3 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ .....</b>	<b>51</b>
6.3.1 ZAPOJENÍ MĚŘICÍHO OBVODU .....	51
6.3.2 NASTAVENÍ MĚŘENÍ.....	52
6.3.3 KALIBRACE.....	52
6.3.4 NASTAVENÍ ANALYZAČNÍHO MODULU .....	53
<b>6.4 SPUŠTĚNÍ OVLÁDACÍHO TERMINÁLU .....</b>	<b>55</b>
<b>6.5 POSTUP MĚŘENÍ .....</b>	<b>56</b>
<b>6.6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>56</b>
<b>6.7 SEZNAM PŘÍSTROJŮ .....</b>	<b>57</b>
<b>6.8 SHRUTÍ.....</b>	<b>57</b>
<b>7 VYPRACOVÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY .....</b>	<b>58</b>
7.1 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI.....	58
7.2 ZÁVĚR.....	60
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>61</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>63</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 2.1: MOŽNOSTI VZNIKU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ [3].....	14
OBR. 2.2: GEMANT-PHILIPPOVŮV MODEL [3] .....	16
OBR. 2.3: ČASOVÝ PRŮBĚH NAPĚTÍ A PROUDŮ GEMANT-PHILIPPOVOVA MODELU [6].....	16
OBR. 2.4: BÖNINGŮV MODEL [5] .....	17
OBR. 2.5: PRŮBĚH NAPĚTÍ PŘI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJÍCH NA BÖNINGOVĚ MODELU [4].....	18
OBR. 2.6: ELEKTRICKÝ STROMEČEK PO PRŮRAZU IZOLACE [7].....	20
OBR. 2.7: ELEKTRODOVÉ USPOŘÁDÁNÍ VNĚJŠÍHO ČÁSTEČNÉHO VÝBOJE [5] .....	20
OBR. 2.8: NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO VNĚJŠÍ ČÁSTEČNÝ VÝBOJ [5] .....	21
OBR. 2.9: ČASOVÝ PRŮBĚH NAPĚTÍ PŘI VNĚJŠÍM VÝBOJI [5] .....	21
OBR. 3.1: USPOŘÁDÁNÍ ZPŮSOBUJÍCÍ VÝBOJ TYPU A [2] .....	24
OBR. 3.2: MODELOVÝ OSCIOGRAM VÝBOJŮ TYPU A [2] .....	24
OBR. 3.3: USPOŘÁDÁNÍ ZPŮSOBUJÍCÍ VÝBOJ TYPU B [2].....	25
OBR. 3.4: MODELOVÝ OSCIOGRAM VÝBOJŮ TYPU B [2] .....	25
OBR. 3.5: USPOŘÁDÁNÍ ZPŮSOBUJÍCÍ VÝBOJE TYPU C [2].....	26
OBR. 3.6: MODELOVÝ OSCIOGRAM VÝBOJŮ TYPU C [2] .....	26
OBR. 3.7: USPOŘÁDÁNÍ ZPŮSOBUJÍCÍ VÝBOJE TYPU D [2] .....	26
OBR. 3.8: MODELOVÝ OSCIOGRAM VÝBOJE TYPU D [2] .....	26
OBR. 3.9: MODELOVÝ OSCIOGRAM VÝBOJE TYPU E [2].....	27
OBR. 4.1: PRŮBĚH PROUDOVÉHO PULZU ČÁSTEČNÉHO VÝBOJE [5].....	28
OBR. 4.2: ZAPOJENÍ PRO GALVANICKOU METODU S PARALELNÍ SNÍMACÍ IMPEDANCÍ [5] .....	29
OBR. 4.3: ZAPOJENÍ PRO GALVANICKOU METODU SE SÉRIOVOU SNÍMACÍ IMPEDANCÍ [5] .....	29
OBR. 4.4: ZAPOJENÍ PRO GALVANICKOU METODU V MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ [5].....	30
OBR. 4.5: PŘILOŽENÍ SONDY NA DRÁŽKU [2].....	30
OBR. 4.6: SCHÉMA MĚŘENÍ S DIFERENCIÁLNÍ ELEKTROMAGNETICKOU SONDOU [5].....	31
OBR. 4.7: DRÁŽKOVÁ SONDA [2] .....	32
OBR. 4.8: KAPACITNÍ SONDA, KOAXIÁLNÍHO TVARU [5].....	32
OBR. 4.9: SCHÉMA TOROIDNÍ INDUKTIVNÍ SONDY [5].....	33
OBR. 4.10: SCHÉMA LINEÁRNÍ INDUKTIVNÍ SONDY [2] .....	33
OBR. 5.1: ÚVODNÍ OBRAZOVKA PROGRAMU DDX-7000 .....	38
OBR. 5.2: NASTAVENÍ ZESILOVAČE .....	40
OBR. 5.3: NASTAVENÍ MĚŘENÍ.....	41
OBR. 5.4: NASTAVENÍ ZOBRAZENÍ PRŮBĚHU A HRADEL .....	42
OBR. 5.5: ZPŮSOB ZOBRAZENÍ PRŮBĚHU .....	43
OBR. 5.6: ZOBRAZENÍ JEDNOTLIVÝCH ZÁDRŽÍ [9] .....	43
OBR. 5.7: HORIZONTÁLNÍ ZÁDRŽE.....	44
OBR. 5.8: ZOBRAZENÍ ŠUMU DO PRŮBĚHU .....	44
OBR. 5.9: VÝBĚR ANALYZAČNÍHO MODULU .....	45
OBR. 5.10: ANALYZAČNÍ MODUL .....	46
OBR. 5.11: ANALYZAČNÍ MODUL - ZÁVISLOST VELIKOSTI VÝBOJŮ NA NAPĚTÍ .....	46
OBR. 6.1: ZÁKLADNÍ ZDROJE ŠUMU [5] .....	49
OBR. 6.2: VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V PRAXI [5] .....	50

---

OBR. 6.3: PRINCIPIÁLNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ ÚLOHY [12] .....	50
OBR. 6.4: SCHÉMA ZAPOJENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY .....	51
OBR. 6.5: KALIBRACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU .....	52
OBR. 6.6: SEKCE MĚŘENÍ PO KALIBRACI .....	52
OBR. 6.7: OKNO ANALÝZY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	53
OBR. 6.8: TLAČÍTKA PRO NASTAVENÍ ANALÝZY .....	53
OBR. 6.9: NASTAVENÍ ANALÝZY .....	54
OBR. 6.10: BEZPEČNOSTNÍ HLÁŠENÍ .....	55
OBR. 6.11: OVLÁDÁNÍ TERMINÁLU AC CONTROL OT 248 .....	55
OBR. 6.12: ANALÝZA VÝSLEDKŮ .....	56
OBR. 7.1: NAMĚŘENÉ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE V ELIPTICKÉM ZOBRAZENÍ .....	58
OBR. 7.2: NAMĚŘENÉ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE V SINUSOVÉM ZOBRAZENÍ .....	58
OBR. 7.3: ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V ZÁVISLOSTI NA FÁZI NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ .....	59
OBR. 7.4: ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V ZÁVISLOSTI NA FÁZI NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ .....	59
OBR. 7.5: ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V ZÁVISLOSTI NA FÁZI NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ .....	59
OBR. 7.6: MAXIMÁLNÍ A PRŮMĚRNÁ VELIKOST ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	60

## **SEZNAM TABULEK**

TAB. 1: VYHODNOCENÍ PLYNOVÉ CHROMATOGRAFIE VZHLEDEM K ČÁSTEČNÝM VÝBOJŮM [2] .....	35
TAB. 2: VYHODNOCOVÁNÍ PORUCH Z CHROMATOGRAFICKÝCH MĚŘENÍ [2] .....	35
TAB. 3: POPIS PROGRAMU DDX-7000 .....	39

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Symbol	Význam	Jednotka
$C$	kondenzátor	-
$\check{C}V$	částečný výboj	
$D$	střední kvadratický součet	$C^2 \cdot s^{-1}$
$I$	střední proud částečných výbojů	$C \cdot s^{-1}$
$n$	četnost impulzů	-
$P$	výkon částečných výbojů	W
$q$	zdánlivý výkon	C
$R$	rezistor	-
$U_e$	zhášecí napětí	V
$U_i$	zapalovací napětí	V
$U_v$	zůstatkové napětí	V
$U_z$	zotavené napětí	V
$Z$	impedance	$\Omega$
$\varepsilon_r$	poměrná permitivita	-
$\varphi_i$	fázový úhel	°

# 1 ÚVOD

Při provozu zařízení je z důvodu provozní bezpečnosti od sebe nutno izolovat určité části zařízení. K tomuto odizolování se používá pevných, plyných i kapalných izolantů. Během provozu je tato izolace namáhána různými vlivy, které zhoršují její izolační vlastnosti a mohou způsobit, že izolace již nesplňuje svoje požadavky na provoz. Tyto vlivy tak mají negativní vliv na spolehlivost a životnost zařízení. Mezi vlivy působící na izolaci patří i částečné výboje.

Ani v současné době není možné vyrobit izolační materiál, který nebude obsahovat plynné dutinky. Právě v těchto dutinkách dochází při provozu k elektrickým výbojům. Nedochází k úplnému proražení izolačního systému, ale pouze k částečnému přemostění. Tyto výboje jsou nazývány jako částečné výboje. Částečné výboje nejsou příliš energeticky významné, ovšem svoji dlouhodobou opakující se činností vedou ke stárnutí izolace a mohou vést k jejímu proražení.

Z tohoto důvodu se v současnosti kladou velké finanční prostředky na vývoj a výzkum detekce částečných výbojů, protože u velkých zařízení typu generátory nebo transformátory v případě poruchy dochází k velkým finančním nákladům. Proto je snaha o co nejlepší detekci z důvodu včasné opravy nebo výměny části zařízení a ochrany před poruchou zařízení.

## 1.1 Cíle práce

Cílem diplomové práce je seznámení se s problematikou částečných výbojů. Ze získaných informací následně vytvořit návod na laboratorní úlohu. V úloze se zaměřit na činnosti a aspekty spojené se samotným měřením. Především se zaměřit na problematiku kalibrace a rušení během měření.

## 2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Částečný výboj je v normě ČSN EN 60270 [1] definován jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostí izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Obvykle jsou částečné výboje důsledkem lokálního elektrického namáhání v izolaci, na povrchu izolace a objevují se jako impulzy s dobou trvání menší než 1  $\mu$ s.

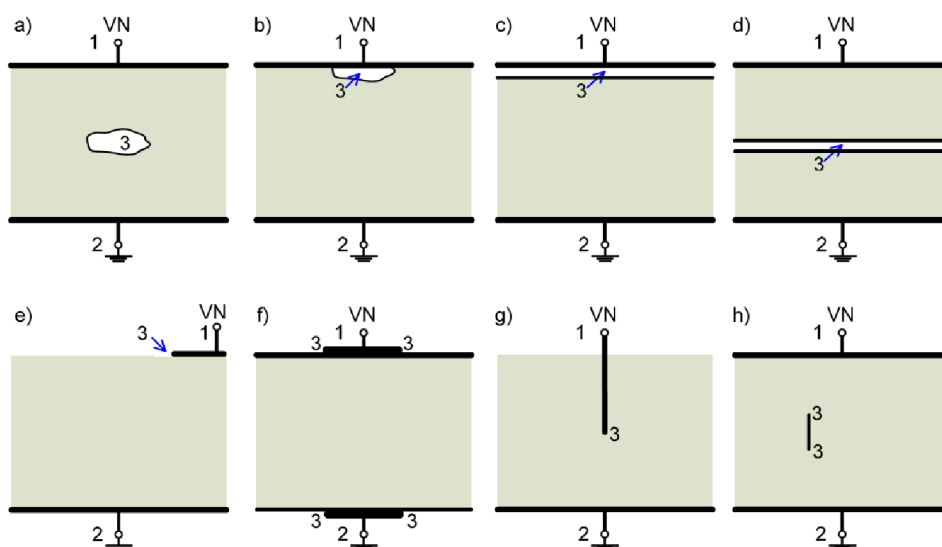
Jedná se o částečný průraz v plynném izolantu, kdy je výbojem proražena pouze část napěťově namáhané izolace a zbývající část má ještě dostatečně velkou elektrickou pevnost, že namáhání vydrží.

Částečné výboje lze rozdělit podle místa výskytu: [2]

- Vnitřní částečné výboje jsou částečné výboje v plynech, jenž jsou obklopeny pevným nebo kapalným dielektrikem, jako například výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku. (kapitola 2.1)
- Povrchové částečné výboje jsou částečné výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, např. klouzavé, nebo drážkové výboje. (kapitola 2.1)
- Vnější částečné výboje jsou částečnými výboji v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení, mezi tyto výboje patří např. doutnavé a korónové výboje. (kapitola 2.3)

### 2.1 Vnitřní a povrchové částečné výboje

Vnitřní částečné výboje vznikají v plynech vyplněných dutinách uvnitř pevného nebo kapalného izolantu. Vznik těchto dutin je již při výrobě materiálu, ale i působením provozních podmínek. Dalšími možnostmi vzniku výbojů je nehomogenita mezi izolantem a elektrodou.



Obr. 2.1: Možnosti vzniku částečných výbojů [3]

a) plynná dutina v pevném izolantu; b) povrchová dutina pod elektrodou; c) štěrba mezi elektrodou a pevným izolantem; d) štěrba uvnitř izolantu; e), f) povrchové resp. klouzavé výboje; g), h) rozhraní jehlová elektroda-izolant

Typická elektrodová uspořádání na kterých lze modelovat jednotlivé druhy vnitřních a povrchových částečných výbojů, jsou znázorněna na Obr. 2.1. Elektrody jsou označeny čísly 1 a 2, oblast výbojové činnosti částečných výbojů číslem 3.

Vznik výbojové činnosti je podmíněn rozdílností elektrického namáhání plynu uvnitř dutinky a okolního materiálu. Plyn v dutince (nejčastěji vzduch) je  $\epsilon_r$ -krát více namáhán než okolní pevný (případně kapalný) izolant. Elektrická pevnost prostředí v dutince je vždy menší než pevnost okolního izolantu, dojde k průrazu prostředí v dutince při napětí nižším než je průrazné napětí izolace okolního izolantu. K průrazu plynu dochází v okamžiku, když napětí dosáhne hodnoty průrazného napětí. Toto napětí se nazývá počáteční (zapalovací) napětí  $U_i$  (kap. 3.1.2.1).

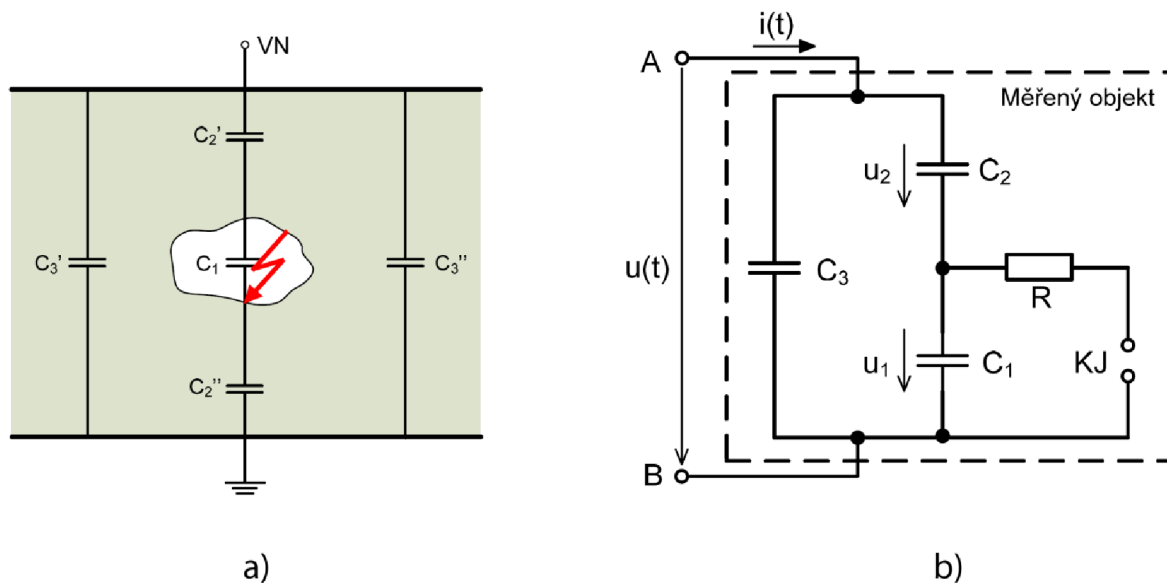
Ve všech dutinkách nedochází k přeskočení při stejné hodnotě napětí, ale podle Paschenova zákona postupně při různých napětích v závislosti na velikosti dutin. Neutrální molekuly plynu se při přeskočení rozkládají na kladné a záporné ionty, které se v elektrickém poli pohybují opačným směrem, hromadí se na stěnách dutinky a vytváří tak elektrické pole opačné orientace, než má působící vnější pole. Tímto je tedy vnější elektrické pole v dutince částečně kompenzováno. Výboj hoří v dutince tak dlouho, dokud se na stěnách nenahromadí tak velký elektrický náboj, že napětí na dutince klesne pod hodnotu zhasacího napětí  $U_e$  (kap. 3.1.2.2), při němž výboj zhasíná. Pokud se přiložené napětí i nadále zvyšuje, zvyšuje se i napětí na dutince a až dosáhne hodnoty počátečního napětí  $U_i$ , děj se opakuje. V případě, že by se přiložené napětí nezvyšovalo, odchází nahromaděný náboj ze stěn dutinky a na dutince roste napětí až na hodnotu zápalného napětí a dojde znovu ke vzniku výboje. Rychlost jakou nahromaděný náboj odtéká ze stěn dutinky, závisí na jejím povrchovém odporu a vnitřním odporu izolantu. Tato rychlost je rozhodující pro velikost intervalu mezi dvěma po sobě následujícími výboji na jedné dutince. [4]

### 2.1.1 Gemant-Philippovův model

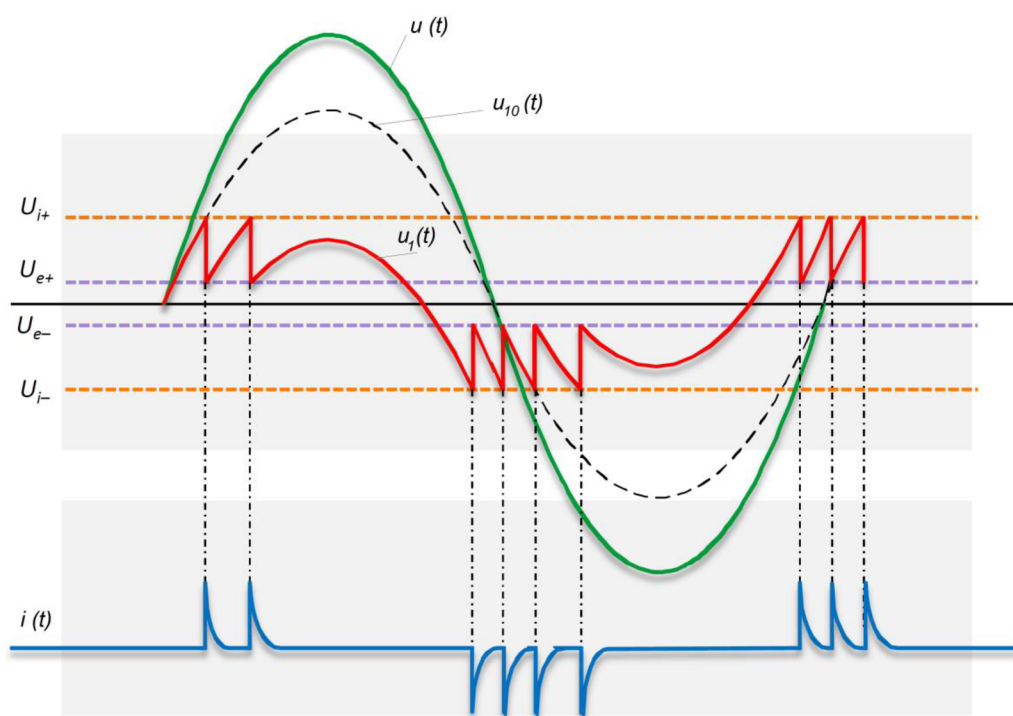
Pro analýzu napěťových a energetických poměrů na dutince a na svorkách při výbojové činnosti se používá modelů a náhradních schémat vnitřních částečných výbojů. Analýzou náhradních obvodů může být popsán vznik částečných výbojů a jejich základní vztahy. Výchozí podmínkou pro modelování je přítomnost pevného nebo kapalného izolantu s jednou dutinou představující vnitřní nehomogenitu izolantu. Tyto modely vycházejí ze základního Gemant-Philippova modelu (trojkapacitní model) na Obr. 2.2. [2]

Na Obr. 2.2a je schematicky znázorněn pevný izolant s vnitřní plynovou dutinou a na Obr. 2.2b jeho zjednodušené náhradní schéma. Kapacita  $C_1$  představuje kapacitu samostatné dutinky,  $C_2$  kapacitu zbytkové části zdravé izolace v sérii s kapacitou dutinky,  $C_3$  je kapacita nepoškozené části dielektrika, odpor  $R$  představuje odpor výbojového kanálu a  $KJ$  je kulové jiskřiště, jehož zapálení představuje částečný výboj. [3]. [5]

Obr. 2.3 [3] znázorňuje časový průběh napětí a proudu při částečném výboji. V okamžiku, kdy přiložené napětí  $u(t)$  dosáhne hodnoty zapalovacího napětí  $U_i$ , dojde na dutince k výboji. Při poklesu na hodnotu napětí zhasacího  $U_e$  výboj zaniká. V případě, že velikost napětí na dutince  $u_1(t)$  dosáhne hodnoty zápalného napětí, výboj v dutince se opakuje. Napětí  $u_{10}(t)$  je napětí na dutince v případě že nedojde k výboji. Vzniklé proudové impulzy částečných výbojů jsou znázorněny průběhem  $i(t)$ .



Obr. 2.2: Gemant-Philippovův model [3]



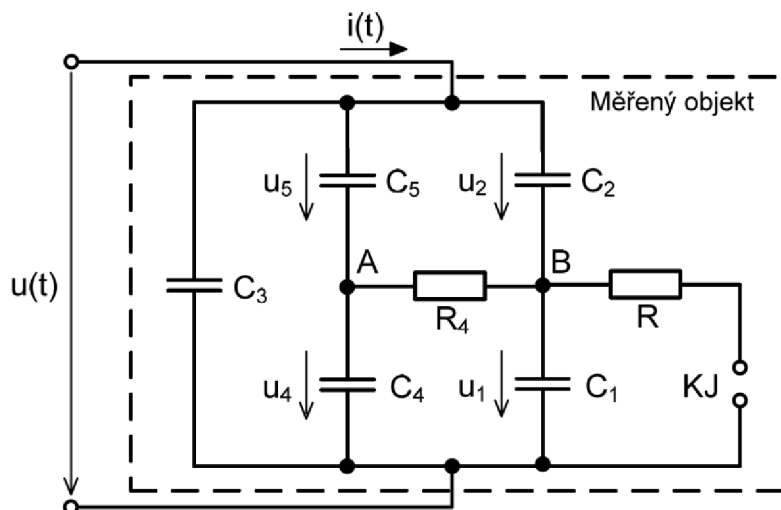
Obr. 2.3: Časový průběh napětí a proudů Gemant-Philippovova modelu [6]

### 2.1.2 Böningův model

Pro přesnější popis vývojové činnosti slouží Böningův model (pětikapacitní model) (Obr. 2.4). U tohoto modelu se uvažuje, že se na procesu vybíjení nepodílejí pouze plochy dutinky, ale i určitá část okolního materiálu obklopujícího tuto dutinku. Při průrazu dochází k odsávání nábojů nejen ze stěn dutinky, ale i z materiálu v okolí dutinky. Nedochozí tedy k poklesu napětí



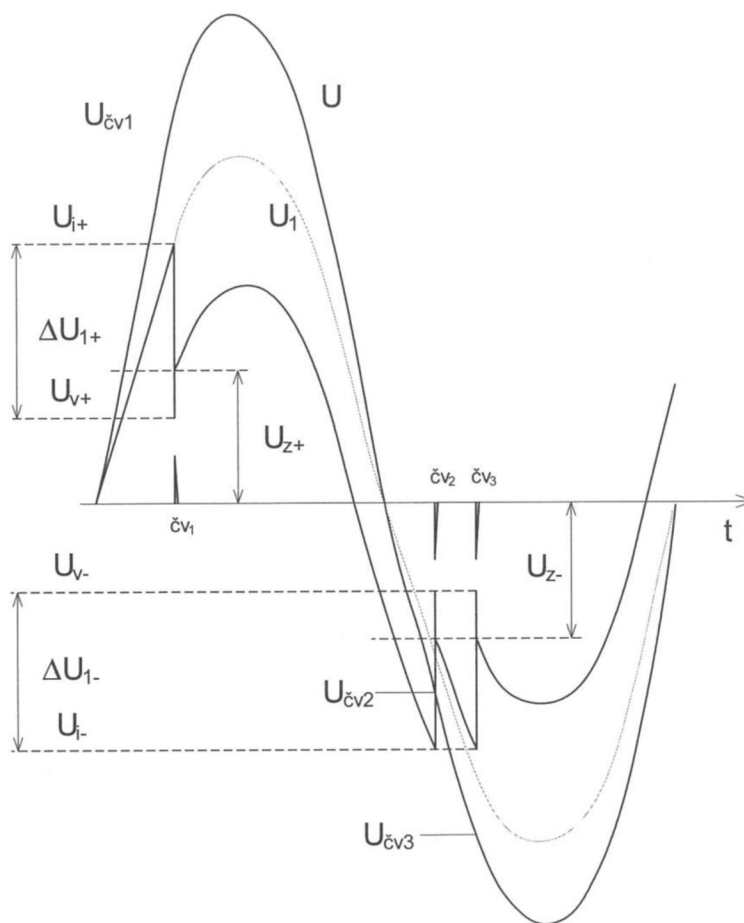
jen na dutince ale i v jejím okolí. Původní Gemant-Philippovův model je dle Obr. 2.4 rozšířen o kapacity  $C_4$  a  $C_5$  a rezistor  $R_4$ . Právě kapacita  $C_4$  představuje vliv okolí dutinky. Kapacita  $C_5$  reprezentuje kapacitu zbytku izolantu. Odpor  $R_4$  reprezentuje odpor stěn dutinky a jejího blízkého okolí. [2], [5]



Obr. 2.4: Bönigovův model [5]

Na Obr. 2.5 je znázorněn časový průběh napětí při částečných výbojích na Bönigově modelu. Průběh napětí je podobný jako v případě trojkapacitního modelu. Při dosažení zapalovací hodnoty napětí na dutince dojde k výboji a napětí na dutince klesne na hodnotu zůstatkového napětí  $U_v$ . Napětí na dutince poté kopíruje přiložené napětí, a v okamžiku překročení zapalovacího napětí dochází opět k výboji. Rozdíl mezi trojkapacitním a pětikapacitním modelem je v tom, že u pětikapacitního nedochází k nárůstu napětí po výboji z hodnoty zůstatkového napětí, ale z hodnoty zotaveného napětí  $U_z$ .

Vznik zotaveného napětí vychází z řešení napěťových rovnic náhradního obvodu modelu bezprostředně po ukončení výboje. V tomto okamžiku dochází k opětovnému nabíjení kondenzátoru  $C_1$  prostřednictvím kondenzátoru  $C_4$  a odporu  $R_4$ .



Obr. 2.5: Průběh napětí při částečných výbojích na Böningově modelu [4]

## 2.2 Vliv vnitřních částečných výbojů na izolaci

Vnitřní výboje mají destruktivní vliv na izolační systém, což způsobuje zkrácování životnosti izolantu a snižuje elektrickou pevnost materiálu. To je způsobeno tím, že výboje v dutinkách způsobují přímými i nepřímými účinky fyzikální a chemické změny v izolantu a jeho blízkosti.

Na zhoršení vlastností izolantu se obecně podílejí tyto procesy: [4], [5]

- Elektro-erozivní účinky
- Účinky záření vznikajícího při výbojích
- Chemické účinky
- Tepelné účinky
- Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu

### Elektro-erozivní účinky

Dojde-li v dutince k vývinu oblouku, je jeho následkem vytvoření vodivé dráhy. Je-li hodnota intenzity elektrického pole dostatečně vysoká, může koncentrace elektrického pole vyvolat čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může šířit dále izolantem. Další vliv na degradaci pevného

izolantu mají elektrony a ionty bombardující stěny dutinky, čímž způsobují erozi materiálu a dochází tak ke ztenčování izolační vrstvy. Tato eroze může být rovnoměrná, nebo se soustředí do několika míst, v nichž se tvoří jamky. Úbytek materiálu je způsoben chemickou přeměnou původního izolantu. Dochází tedy ke zvětšování původní dutinky a při pokračující erozi může dojít k průrazu celého izolantu. [4], [5]

### **Účinky záření vznikajícího při výbojích**

Při výbojích vzniká kromě viditelného světelného záření také ultrafialové záření, které má větší energii na vyvolání chemických reakcí. [4]

### **Chemické účinky**

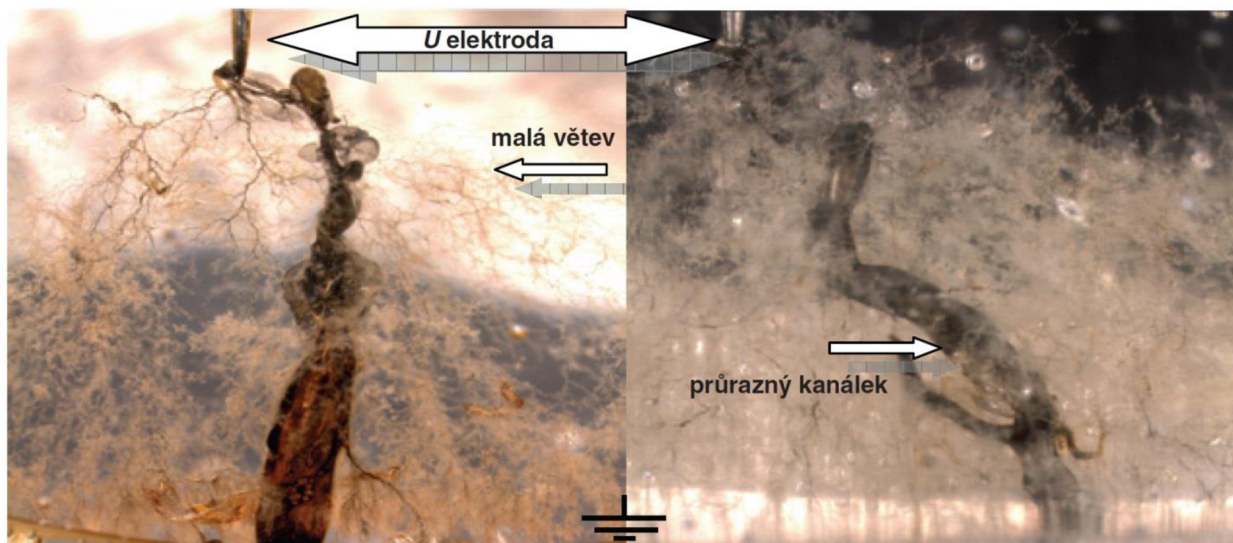
Částečné výboje mění chemické vlastnosti plynů obsažených uvnitř dutinek, ve vzduchu jde především o kyslík a dusík. Obsahuje-li dutinka kyslík, vzniká výbojovou činností ozon, který má intenzivní oxidační účinky. U dusíku vzniká aktivní dusík, který je mnohem reaktivnější než normální dusík. Ozon a oxidy dusíku mohou při vysokých teplotách vytvářet kyselinu dusičitou, který je velmi agresivní. Výsledkem chemických reakcí jsou pevné, plynné a kapalné vedlejší produkty. Tyto produkty rozkladu mohou dále postupovat do pevného izolantu a vytváří tak vodivé oblasti. [2], [4], [5]

### **Tepelné účinky**

Částečné výboje mohou svoji aktivitou způsobit tepelnou nestabilitu. Při velmi intenzivní výbojové činnosti je oteplení způsobené výbojovou činností srovnatelné s oteplením způsobeným dielektrickými ztrátami a může tak klesnout hodnota napětí tepelného průrazu. Vysoká teplota výbojového kanálu může způsobit zuhelnatění izolantu. [4]

### **Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu**

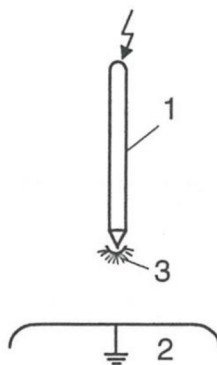
V blízkosti konce výbojového kanálu má elektrické pole podobné vlastnosti jako elektrické pole v okolí hrotu jehly, tzn., že jeho intenzita dosahuje lokálně vysokých hodnot. V místě, kde dojde k překročení elektrické pevnosti, nastane průraz, omezený pouze na mikroskopickou oblast. Tímto se posune potenciál na konci výbojového kanálu o nepatrnou vzdálenost a s ním i místo maximálního namáhání. Zde dochází opět k průrazu a děj se opakuje. Jedná se tedy o šíření vodivé, která ovšem neprobíhá pravidelně, ale výbojové kanály se postupně rozvětvují a vzniká tak stromečkový útvar. Kanály postupně pronikají materiálem tak, až překlenou celou vzdálenost mezi elektrodami a dojde tak k průrazu izolantu. Elektrický stromeček se vyskytuje především v silně namáhaných jednovrstvých izolantech, např. kabelech. Příklad elektrického stromečku je na Obr. 2.6. [2]



Obr. 2.6: Elektrický stromeček po průrazu izolace [7]

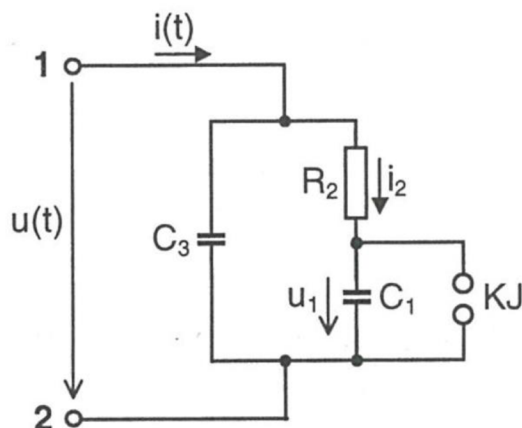
### 2.3 Vnější částečné výboje

Tento typ výbojů se nejčastěji vyskytuje na hranách nebo malých poloměrech elektrod, které se nacházejí v plynném prostředí. Pro tento typ výbojů je typické uspořádání hrot-deska. Při tomto uspořádání se částečné výboje objevují na ostrém zakončení hrotové elektrody. Tento typ výboje je znázorněn na Obr. 2.7, kde elektrody jsou označeny čísly 1 a 2 a oblast částečných výbojů číslem 3.



Obr. 2.7: Elektrodové uspořádání vnějšího částečného výboje [5]

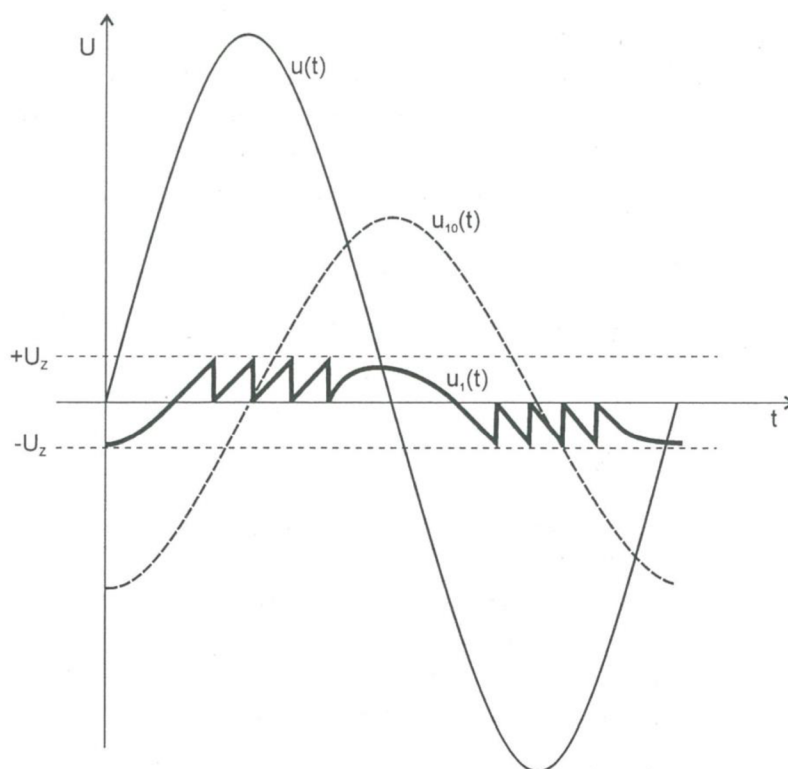
Obr. 2.8 znázorňuje zjednodušené náhradní schéma vnějšího částečného výboje v uspořádání hrot-deska. Kondenzátor  $C_1$  představuje kapacitu vzduchového prostoru, který je vždy zcela zkratován, když dojde k částečným výbojům, tedy v případě kdy rovné zapalovacímu (průraznému) napětí  $U_i$ . Odpor  $R_2$  reprezentuje vodivost náboje vytvořeného na hrotu výboje a putujícího vlivem elektrického pole k elektrodě opačné polarity. Kondenzátor  $C_3$  reprezentuje paralelní kapacitu elektrodového uspořádání.



Obr. 2.8: Náhradní schéma pro vnější částečný výboj [5]

Časový průběh napětí pro vnější částečné výboje je na Obr. 2.9 kde jsou znázorněny průběhy napájecího napětí  $u(t)$ , fiktivního napětí  $u_{i0}(t)$ , tj. napětí na kapacitě  $C_1$  v případě že by nedošlo k částečnému výboji a skutečné napětí  $u_1(t)$  při existenci částečných výbojů. Částečné výboje vznikají v okamžiku, kdy okamžitá hodnota na kapacitě dosáhne hodnoty  $U_i$ .

Vnější částečné výboje nemají trvalý destruktivní vliv na izolant. [5]



Obr. 2.9: Časový průběh napětí při vnějším výboji [5]

### 3 PARAMETRY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Pro hodnocení částečných výbojů je nutné určit měřitelné charakteristické veličiny výbojů (kap 3.1). K určení druhu a zdroje výbojové činnosti se využívají obrazce částečných výbojů (kap. 3.2).

#### 3.1 Veličiny charakterizující částečné výboje

##### 3.1.1 Veličiny vztahující se k impulzům částečných výbojů

###### Zdánlivý náboj

Zdánlivý náboj  $q$ , je takový náboj, který je mžikově přiveden na svorky zkoušeného objektu a způsobí takovou změnu výchylky, kterou by způsobil vlastní proudový impulz částečného výboje. Zdánlivý náboj se nerovná náboji působícího v místě výboje, který nemůže být přímo měřen. Jedná se o základní diagnostický parametr pro měření a vyhodnocování částečných výbojů. Udává se v jednotkách C, respektive pC. [1], [5]

###### Četnost impulzů

Četnost impulzů  $n$ , je poměr mezi celkovým počtem proudových impulzů vyvolaných výbojovou činností za určitý časový interval a dobou trvání tohoto časového intervalu. V praxi se uvažují pouze impulzy nad určitou úrovní nebo v rámci úrovní předepsaného rozsahu. Vyjadřuje se v impulzech za sekundu ( $s^{-1}$ ). [1]

###### Fázový úhel a čas výskytu impulzu

Fázový úhel  $\varphi_i$  se vypočítá ze vztahu (1), kde  $t_i$  je čas mezi předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem částečného výboje,  $T$  je perioda zkušebního napětí. Udává se ve stupních ( $^\circ$ ). [1]

$$\varphi_i = 360 \frac{t_i}{T} \quad (1)$$

###### Střední proud částečných výbojů

Střední proud částečných výbojů  $I$  je odvozená veličina představující součet hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$  během zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{ref}$  dělený tímto intervalem. Střední proud částečných výbojů se vypočítá dle vztahu (2). Udává v jednotkách  $C \cdot s^{-1}$  nebo A. [1]

$$I = \frac{1}{T_{ref}} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i| + \dots + |q_m|] \quad (2)$$

### Výkon částečných výbojů

Výkon částečných výbojů  $P$  udává výkon impulzů částečných výbojů přivedených na svorky zkoušeného objektu během referenčního časového intervalu  $T_{\text{ref}}$ . Výkon částečných výbojů lze měřit přímo měřením nebo je možné ho vypočítat dle vztahu (3) z naměřených hodnot náboje  $q_i$  a okamžitých hodnot zkušební napětí  $u_i$ . Udává se v jednotkách W. [1], [5]

$$P = \frac{1}{T_{\text{ref}}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i) \quad (3)$$

### Střední kvadratický součet

Střední kvadratický součet  $D$  je součtem ploch jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$  za určitou délku zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{\text{ref}}$  děleným tímto intervalem. Střední kvadratický součet je možno určit přímo měřením nebo výpočtem podle vztahu (4). Udává se v jednotkách  $C^2 \cdot s^{-1}$ . [1], [5]

$$D = \frac{1}{T_{\text{ref}}} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2) \quad (4)$$

## 3.1.2 Přiložená zkušební napětí vztažená k veličinám impulzů částečných výbojů

### 3.1.2.1 Počáteční napětí částečných výbojů

Označuje se  $U_i$ , udává se v jednotkách V, resp. kV a jedná se o přiložené napětí při kterém jsou ve zkoušeném objektu poprvé pozorovány opakující se částečné výboje, je-li toto napětí zvyšováno z nižší hodnoty, při které nejsou pozorovány žádné částečné výboje. Je to nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň veličiny impulzu částečného výboje rovná nebo převyšuje předepsanou hodnotu. Toto napětí je též označováno jako zapalovací napětí. [1]

### 3.1.2.2 Zhášecí napětí částečných výbojů

Označuje se  $U_e$ , udává se v jednotkách V, resp. kV. Zhášecí napětí částečného výboje je takové přiložené napětí při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje, je-li napětí snižováno z hodnoty vyšší při které jsou částečné výboje pozorovány. V praxi představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém se zvolená veličina impulzu částečného výboje rovná nebo je menší než předepsaná hodnota. [1]

### 3.1.2.3 Zkušební napětí částečných výbojů

Přiložené napětí předepsané zkušebním postupem pro měření částečného výboje, během kterého zkoušený objekt nevykazuje částečné výboje překračující předepsanou hodnotu. [1]

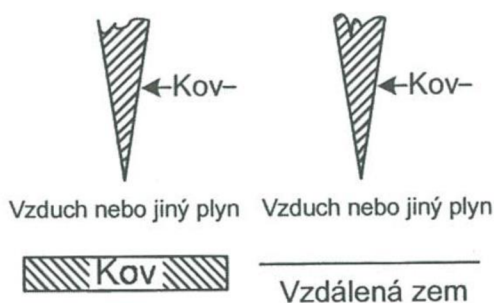
### 3.2 Obrazce částečných výbojů

Při měření výbojové činnosti lze rozlišit několik typů částečných výbojů. Podle fázového úhlu umístění částečných výbojů na napájecím napětí lze určit druh a tím místo vzniku a jeho povahu. Obrazce částečných výbojů se nejčastěji zobrazují ve formě Lissajousových obrazců, kde jsou proudové impulzy částečných výbojů superponovány na průběh napájecího napětí.

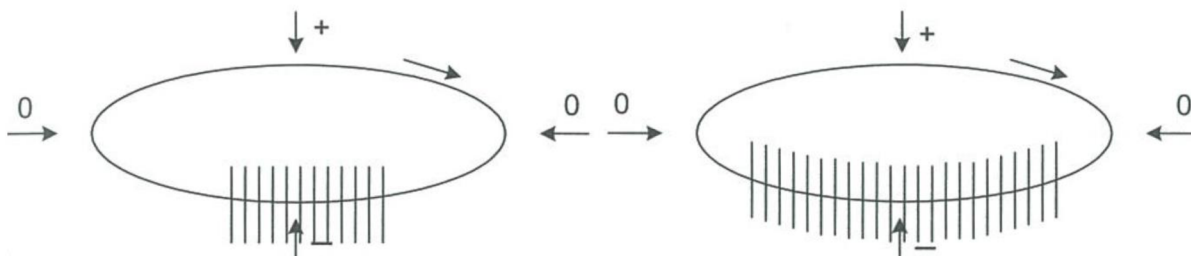
#### Typ A

Výboje typu A jsou typické pro předvýboje v plynech, např. v okolí ostrých kovových hrotů nebo hran (např. uspořádání hrot-deska nebo tyč-uzemněná rovina), uspořádání tohoto výboje je zobrazeno na Obr. 3.1.

Tento typ výbojů se projevuje jako řada stejných pulzů umístěných v jedné půlperiodě napájecího napětí, symetricky umístěných kolem vrcholu půlperiody. Všechny pulzy mají stejnou velikost a jsou vzájemně vzdáleny přibližně o stejný fázový úhel. Se vzrůstajícím napětím roste množství pulzů, jejich velikost zůstává přibližně stejná, a jsou stále symetricky rozmístěny kolem vrcholu půlperiody. Je-li napětí přivedeno na hrot, vyskytují se obrazce pulzů v záporné půlperiodě napětí. V případě, že je hrot uzemněn a na deskovou elektrodu je přivedeno napětí, vyskytují se pulzy v kladné půlperiodě napětí. Na Obr. 3.2 je znázorněn případ, kdy je napětí přivedeno na hrot. [2], [5]



Obr. 3.1: Uspořádání způsobující výboj typu A [2]

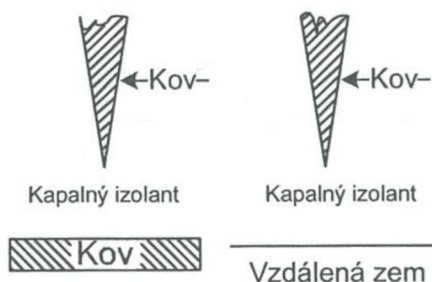


Obr. 3.2: Modelový oscilogram výbojů typu A [2]

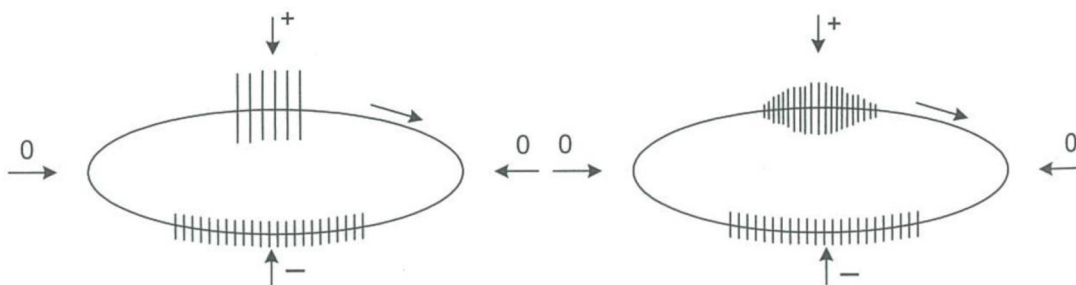


### Typ B

Obrazce výbojů typu B se objevují stejně jako u typu A na ostrých kovových hrotech nebo hranách, ovšem ponořených v kapalných izolantech, uspořádání pro tento typ je na Obr. 3.3. Na rozdíl od typu A se pulzy částečných výbojů objevují i v kladné půlperiodě napětí. Pulzy jsou symetricky rozloženy v okolí obou maxim napětí. V kladné půlplně mají pulzy větší velikost. Pulzy částečných výbojů jsou v každé půlperiodě vzdáleny přibližně o stejný fázový úhel, ten je ale pro každou půlperiodu jiný. Obraz těchto pulzů je na Obr. 3.4. Jestliže se velké pulzy objevují v kladné půlperiodě je hrot na vysokém potenciálu a v případě, že se objevují v záporné je hrot na zemním potenciálu. [2], [5]



Obr. 3.3: Uspořádání způsobující výboj typu B [2]



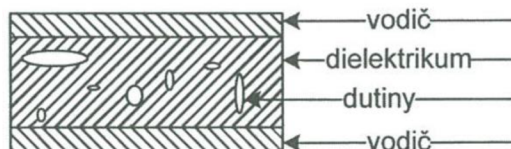
Obr. 3.4: Modelový oscilogram výbojů typu B [2]

### Typ C

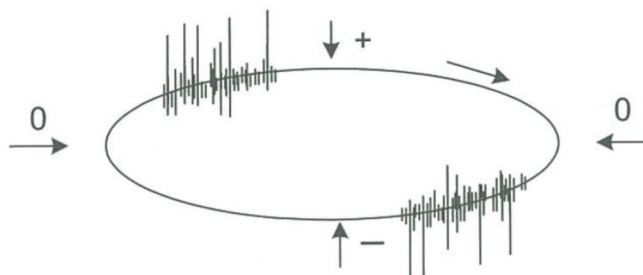
Výboje typu C vznikají v případech, jimiž jsou: [5]

- Dutinka (defekt) v pevném izolantu (Obr. 3.5)
- Plynová bublinka v kapalném izolantu
- Klouzavé výboje na povrchu pevných izolantů
- Částečné výboje mezi dvěma neuzemněnými kovovými částmi
- Izolované vodiče různých potenciálů dotýkající se jeden druhého

Pulzy částečných výbojů se u tohoto typu vyskytují v obou půlperiodách napájecího napětí a průměrná velikost pulzů je v obou polaritách přibližně stejná. Pulzy se objevují od průchodu napětí nulou po jeho maximum, viz Obr. 3.6. Pro izolant je tento typ výboje velmi nebezpečný a to například oddělením spojených vrstev izolantu nebo poklesu izolačních vlastností. [2], [5]



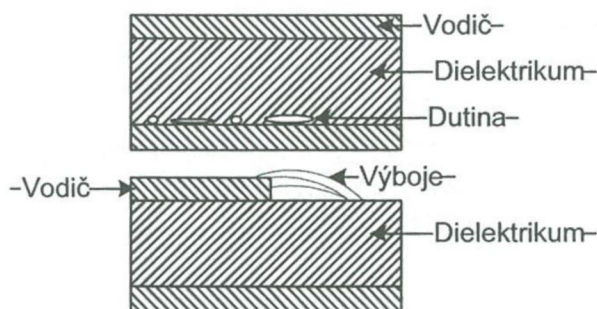
Obr. 3.5: Uspořádání způsobující výboje typu C [2]



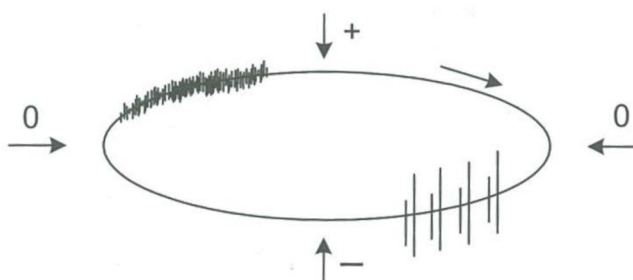
Obr. 3.6: Modelový oscilogram výbojů typu C [2]

### Typ D

Typ D představuje částečné výboje, kdy je dutinka u povrchu elektrody pevného izolantu, nebo v případě klouzavých výbojů mezi vodičem a povrchem izolantu (Obr. 3.7). Obrazec částečných výbojů je podobný jako v případě u typu C, u tohoto typu je velikost pulzů v jedné půlperiodě větší než ve druhé, což je způsobeno odsátím nábojů z jedné strany dutinky. Dutinka je na vysokonapěťové elektrodě, jestliže jsou větší impulzy v kladné půlperiodě, a v případě, že na uzemněné elektrodě jsou větší pulzy v záporné půlperiodě. Obrazec částečných výbojů typu D je na Obr. 3.8. [2], [5]



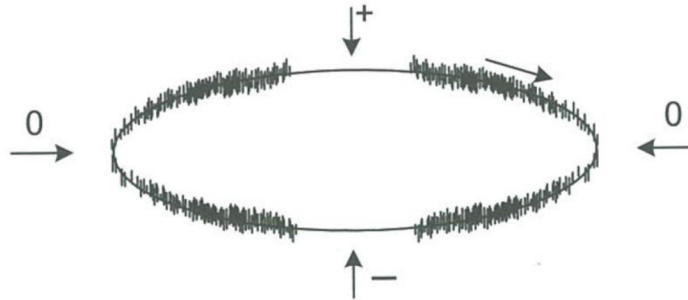
Obr. 3.7: Uspořádání způsobující výboje typu D [2]



Obr. 3.8: Modelový oscilogram výboje typu D [2]

**Typ E**

Tento typ výbojů je způsoben nedokonalým spojením mezi kovovými částmi nebo odporovými vrstvami. Tyto nedokonalé spoje se mohou nacházet uvnitř testovaného objektu nebo i vně izolačního materiálu. Pulzy částečných výbojů jsou symetricky rozloženy kolem průchodů napájecího napětí nulou. Velikost pulzů je přibližně stejná, do oblastí maxim napětí kde klesá k nule. [2], [5]



Obr. 3.9: Modelový oscilogram výboje typu E [2]

## 4 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Částečné výboje jsou doprovázeny řadou fyzikálních jevů elektrického (vznik proudových impulzů a generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole) i neelektrického charakteru (světelné záření, vznik chemických zplodin, zvukové jevy, tepelný ohřev).

Měření částečných výbojů se dá rozdělit na metody globální a lokalizační. Globální metoda dává celkový přehled o stavu izolace zkoumaného objektu, lokalizační metoda slouží k přesnému určení místa působení částečných výbojů.

Další možné dělení měřících metod je podle požadavků na odstavení zařízení z provozu, tedy na off-line metody, kdy je zařízení mimo provoz a na on-line metody, které umožňují měření částečných výbojů za provozu zařízení bez nutnosti jeho odstavení. [2], [5]

### 4.1 Elektrické metody

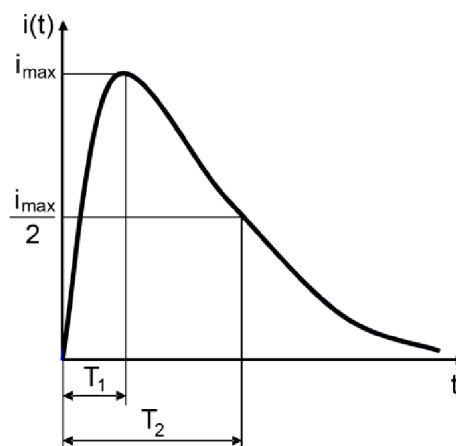
Principem elektrických metod měření částečných výbojů je měření proudových impulzů, které vznikají působením částečných výbojů.

Napájecí obvod, na který je zkoušený objekt připojen nedovolí, aby byl ze zdroje hrazen úbytek energie vyvolaný výbojem v dutince izolantu, a napětí na svorkách zdroje tedy poklesne napětí. Tento pokles napětí vyvolaný výbojem je úměrný náboji proudového impulzu.

Proudové impulzy částečných výbojů mají různou dobu čela  $T_1$  a půltýlu  $T_2$  podle druhu izolantu, ve kterém k částečným výbojům došlo. Pro pevné izolanty jsou tyto doby několik ns pro čelo impulzu a desítky ns pro dobu půltýlu. U kapalného izolantu se tyto doby prodlužují přibližně na 1  $\mu$ s pro čelo impulzu a několik  $\mu$ s pro dobu půltýlu. [2], [5]

Ideální tvar proudového impulzu je na Obr. 4.1. Velikost náboje tohoto impulzu je dána plochou pod křivkou  $i(t)$  podle vztahu (5). [5]

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (5)$$



Obr. 4.1: Průběh proudového pulzu částečného výboje [5]

Pro snímání těchto pulzů se používá kapacitních děličů nebo Rogowského cívka. [3] V porovnání s neelektrickými metodami jsou elektrické metody citlivější a lépe kvantifikovatelné. [5]

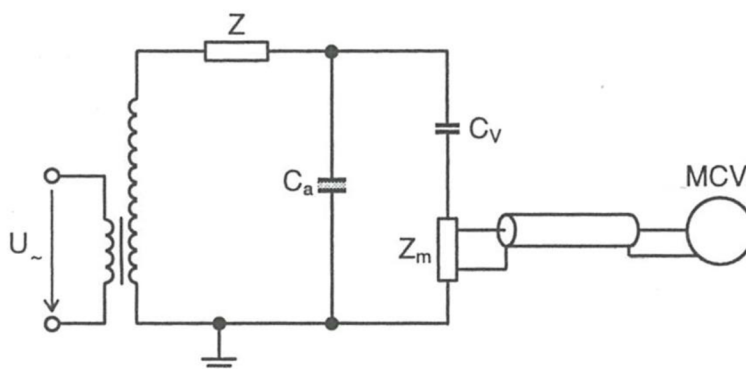
#### 4.1.1 Galvanická metoda

Galvanická metoda patří mezi přímé, globální metody. Je založena na přímém snímání proudových impulzů částečných výbojů s pomocí měřicí impedance. Tato impedance je obvykle řešena pomocí RLC členu s ochrannými prvky, sloužící také k odfiltrování superponovaných impulzů od napájecí frekvence.

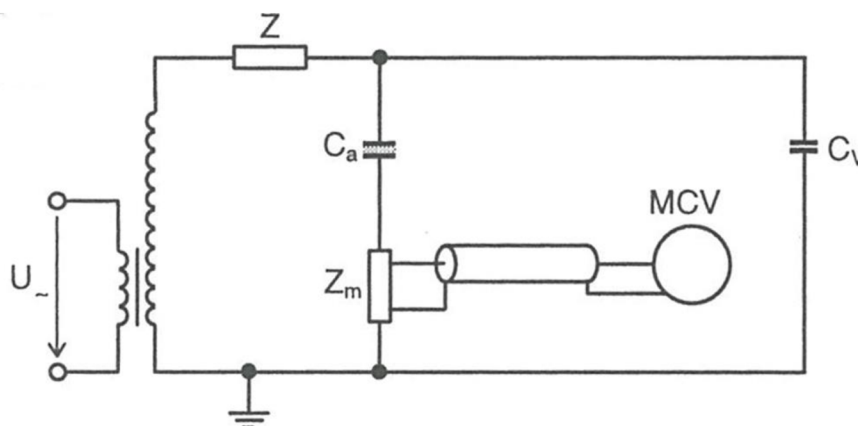
Impedance slouží k převádění proudových impulzů, které na ni vytvoří úbytky napětí odpovídající zdánlivému náboji jednotlivých částečných výbojů, na výstupní napětí pro měřicí zařízení. [2]

Dle normy ČSN EN 60270 [1] existují tři základní zapojení pro přímé měření částečných výbojů zobrazené na Obr. 4.2, Obr. 4.3, Obr. 4.4. Kde  $U_{\sim}$  je napájecí napětí,  $Z$  filtr rušení,  $C_a$  zkoušený objekt,  $C_v$  vazební kondenzátor,  $Z_m$  snímací impedanci a MCV měřicí přístroj.

U uzemněných objektů, nebo objektů velkých kapacit se používá zapojení se snímací impedancí, která je zapojena do větve vazebního kondenzátoru (Obr. 4.2). [2]



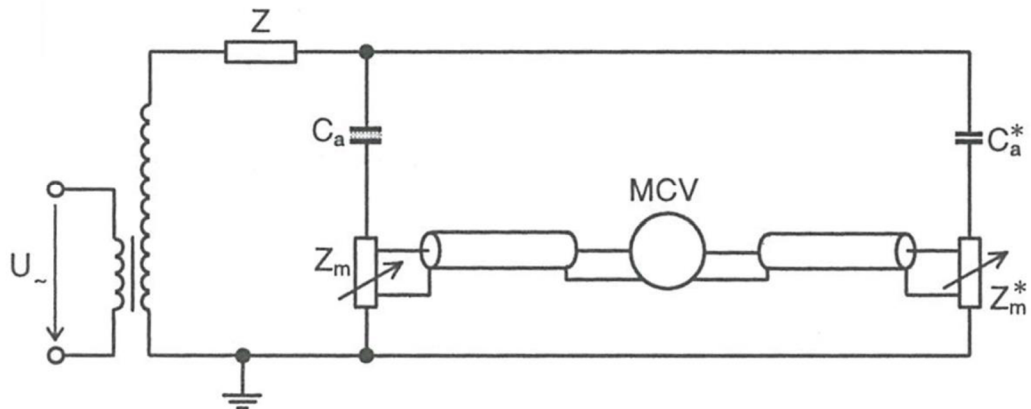
Obr. 4.2: Zapojení pro galvanickou metodu s paralelní snímací impedancí [5]



Obr. 4.3: Zapojení pro galvanickou metodu se sériovou snímací impedancí [5]

Zapojení se sériovou snímací impedancí (Obr. 4.3) se používá při měření objektů, u kterých je možnost rozpojení zemního přívodu. Vlivem rozptylových kapacit, které jsou k vazebnímu kondenzátoru řazeny paralelně, se docílí vyšší citlivosti. V případě, že je rozptylová kapacita obvodu k zemi větší než kapacita měřeného objektu, lze vazební kapacitu  $C_v$  vynechat. [2], [5]

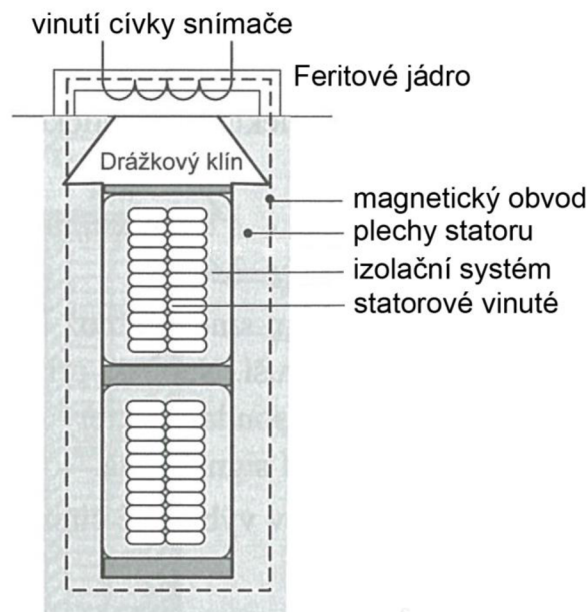
Můstkové zapojení (Obr. 4.4) se používá především při měření za provozu, protože rozdílové zapojení pro měření proudových impulzů umožňuje potlačení vlivu vnějšího rušení. Jako vazební kondenzátor  $C_a^*$  lze použít kondenzátor o kapacitě blízké měřenému objektu nebo jiný měřený objekt se známou hladinou částečných výbojů. Snímací impedance  $Z_m$  a  $Z_m^*$  jsou laditelné a jejich pomocí lze vyrovnat můstek tak, aby měření probíhalo bez vlivu vnějšího rušení. [2], [5]



Obr. 4.4: Zapojení pro galvanickou metodu v můstkovém zapojení [5]

#### 4.1.2 Metoda induktivně vázané sondy

Metoda induktivně vázané sondy patří mezi lokalizační metody, tedy pro určení místa kde dochází ke zvýšené výbojové činnosti. Tato metoda se používá pro diagnostiku výbojové činnosti ve statorovém vinutí točivých elektrických strojů. Měření se provádí na stroji, který má vyjmutý rotor.



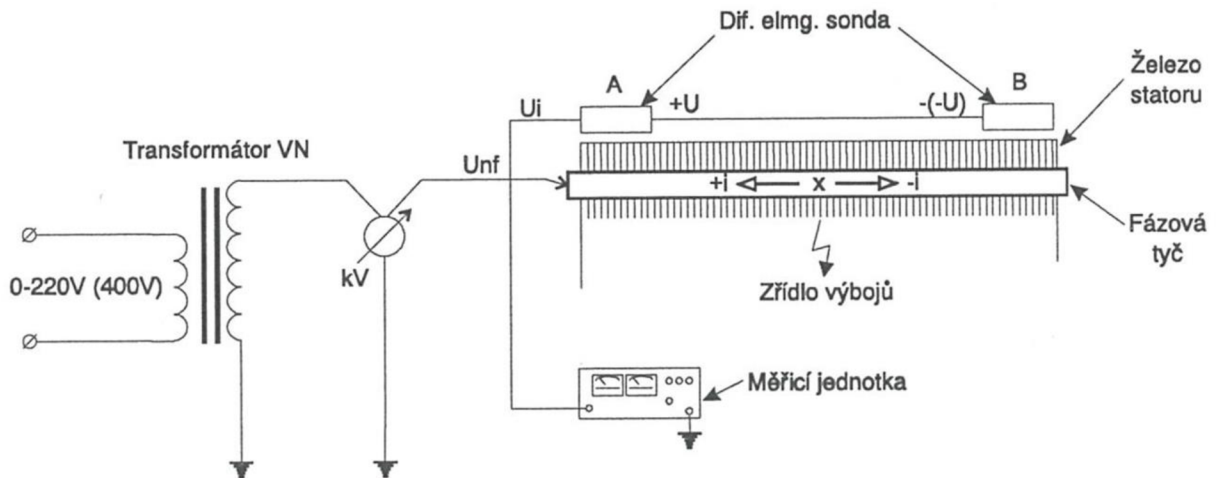
Obr. 4.5: Přiložení sondy na drážku [2]

Sonda je tvořena feritovým jádrem s navinutou cívkou. Příkladá se nad drážku vinutí a společně s magnetickým obvodem statoru vznikne proudový transformátor, v jehož vinutí se indukují pulzy vyvolané částečnými výboji ve vinutí stroje. Principiální schéma měření je zobrazeno na Obr. 4.5. [2], [5]

### 4.1.3 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

Diferenciální elektromagnetická sonda se používá pro měření částečných výbojů v jednotlivých drážkách zkoumané fáze statorového vinutí elektrického točivého stroje. Jedná se o lokalizační metodu, k přesnějšímu určení zdroje částečných výbojů. Diferenciální sonda se skládá ze dvou induktivních sond zapojených elektricky proti sobě, z nichž každá je umístěna na jednom konci statorové drážky. Schéma pro měření je na Obr. 4.6.

Vlivem elektromagnetického pole, které je vyvoláno proudy částečných výbojů, se šíří impulzy z místa zdroje výbojů vinutím zkoušené fáze oběma směry. Prochází-li proudový impuls oběma sondami stejným směrem, výstupní signály sond mají opačnou polaritu a odečtou se, zdroj částečných výbojů tedy leží vně části, která je ohraničena sondami. Nachází-li se zdroj uvnitř této vymezené oblasti, signály sond jsou stejné polarity a sčítají se. Tímto zapojením se eliminuje vliv vnějšího rušení a vliv výbojové činnosti sousedních drážek. [2], [5]

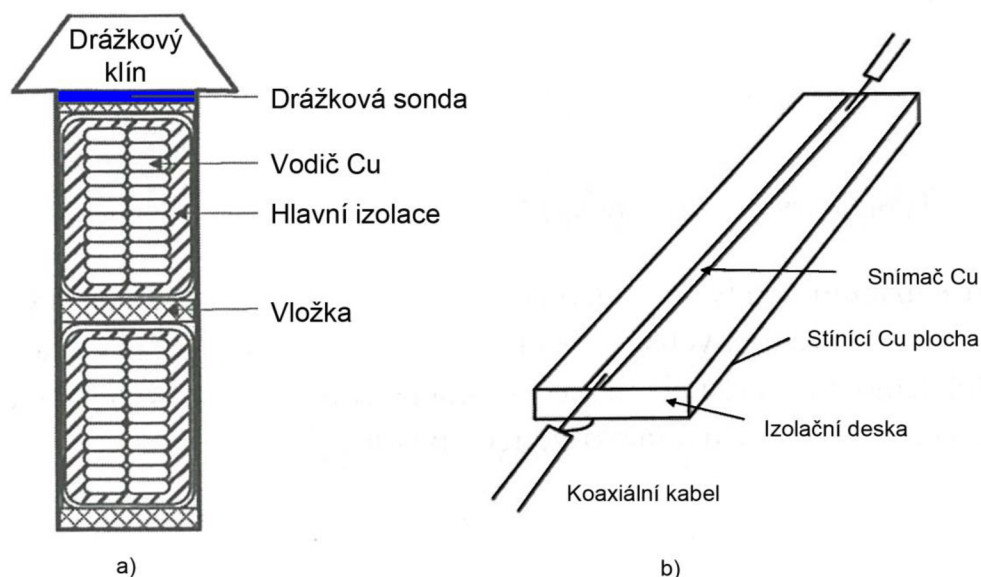


Obr. 4.6: Schéma měření s diferenciální elektromagnetickou sondou [5]

### 4.1.4 Kapacitní drážková sonda

Drážková sonda je kapacitní vysokofrekvenční snímač elektromagnetických pulzů, generovaných částečnými výboji. Drážková sonda se vkládá přímo do statorových drážek stroje, pod drážkové klíny, umístění sondy je znázorněno na Obr. 4.7a). Sonda je tvořena izolační deskou opatřenou stínící měděnou vrstvou na jedné straně a na druhé straně je umístěn úzký měděný pásek, sloužící jako snímač. Pro vyvedení signálu ze sondy do vyhodnocovacího zařízení se používá koaxiálních kabelů, které jsou přivedeny na oba konce sondy, schématické znázornění sondy je na Obr. 4.7b). Drážková sonda má řadu výhod, patří mezi ně například necitlivost vůči

okolnímu rušení, schopnost měření při provozu stroje, lze do stroje instalovat při výrobě, ale i při opravě. [2], [5]

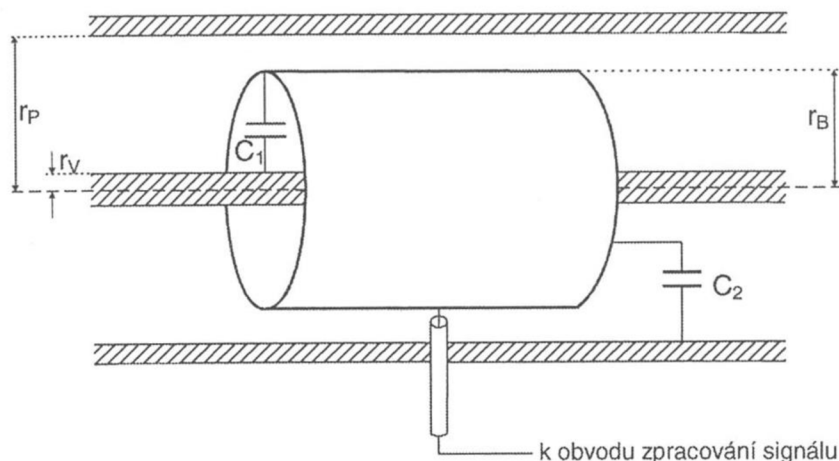


Obr. 4.7: Drážková sonda [2]

#### 4.1.5 Kapacitní sondy

Kapacitní sondy se používají k měření výbojové činnosti v kabelech, kabelových koncovkách nebo v zařízení zapouzdřených rozvodů. Nejčastěji používaným typem kapacitní sondy je sonda koaxiálního tvaru, jež je zobrazena na Obr. 4.8. Dalším typem je kapacitní sonda terčického typu, pro měření v točivých i netočivých strojích. Snímače zachycují elektrické signály, které jsou vyvolány výbojovou činností.

Kapacitní sondy umožňují relativně přesnou lokalizaci zdroje částečných výbojů především u izolačních systémů s epoxidovou izolací [5]. Nevýhodou je nemožnost určit zdroj částečných výbojů, které jsou elektricky odstíněny, protože nelze změřit elektrické pole vyzařené do okolí. [2], [5]



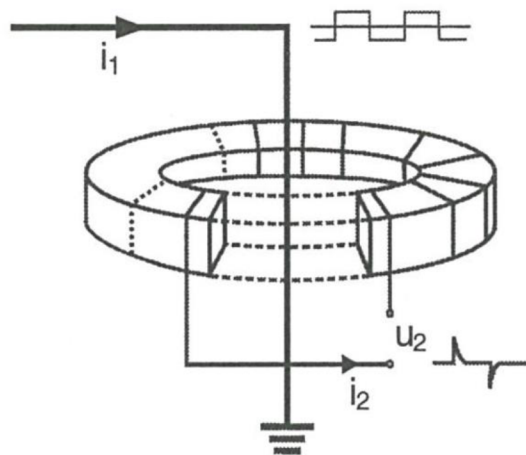
Obr. 4.8: Kapacitní sonda, koaxiálního tvaru [5]



### 4.1.6 Induktivní sondy

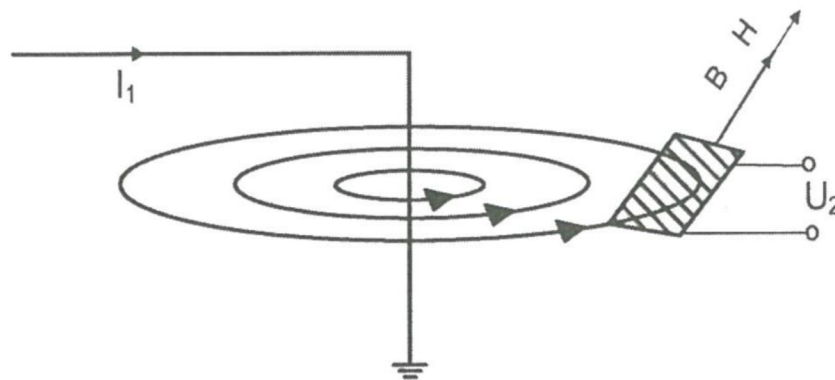
Induktivní sondy pracují na principu snímání elektromagnetického pole vyzařovaného částečnými výboji. Tento způsob se používá pro měření impulzů dobíjecích proudů částečných výbojů procházejících vodičem pracovního uzemnění.

Podle typu magnetického obvodu lze sondy rozdělit na toroidní a lineární. U toroidních sond (Obr. 4.9) prochází vodič středem toroidu a tvoří primární vinutí magnetického obvodu, vinutí navinuté na toroidu tvoří sekundární vinutí.



Obr. 4.9: Schéma toroidní indukční sondy [5]

Lineární sondy se umísťují do elektromagnetického pole tak, aby podélná osa snímače byla orientována souhlasně s vektory magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Výhodou lineárních sond oproti toroidním je ten, že při instalaci sondy nedochází k přerušení měřícího obvodu. Používají se především pro orientační měření a lokalizaci zdrojů částečných výbojů. [2], [5]



Obr. 4.10: Schéma lineární indukční sondy [2]

## 4.2 Neelektrické metody

Při výbojové činnosti jsou vykazovány i jiné než elektrické projevy výbojů. Mezi neelektrické projevy patří světelné záření ve viditelném i ultrafialovém spektru, zvukové efekty ve slyšitelném i ultrazvukovém pásmu, vznik chemických zplodin. Tyto projevy lze za použití vhodné metody detekovat i kvantifikovat.

Pro měření těchto veličin je zapotřebí speciální měřicí zařízení, jako směrové mikrofony pracující v různých frekvenčních oblastech, přístroje pro noční vidění, plynová chromatografie apod.

### 4.2.1 Akustická detekce

Částečné výboje jsou doprovázeny vznikem akustických signálů, šířících se od místa vzniku do okolí. Při akustické detekci jsou detekována mechanická vlnění vyvolaná těmito částečnými výboji pomocí mikrofونů a dalších akustických snímačů.

Pro detekci lze použít snímačů pracujících ve slyšitelném i ultrazvukovém pásmu. V provozu se používají spíše ultrazvukové snímače, protože v ultrazvukovém pásmu jsou zvukové vlny krátké a mají větší směrovost a jsou více charakteristické pro částečné výboje než pro okolní prostředí.

Lokalizaci výbojové činnosti lze provádět pomocí jednoho snímače a postupného hledání místa s nejsilnějším signálem, nebo s použitím více snímačů pevně připevněných na zkoumaném objektu. Tato druhá metoda lze použít pro dlouhodobější sledování objektu. [2], [5]

### 4.2.2 Optická detekce

Výbojová činnost se také projevuje v optické oblasti. Lze ji pozorovat ve viditelném, infračerveném i ultrafialovém spektru. Ve viditelném spektru lze výbojovou činnost pozorovat pouhým okem, případně s použitím optických přístrojů např. kamer či fotoaparátů.

Částečné výboje svou aktivitou zanechávají viditelné poškození, a tím lze lokalizovat místo výbojové činnosti. Toto poškození lze pozorovat přímo, nebo osvitěním ultrafialovým světlem. Pro detekci v tomto spektru se používají speciální ultrafialové kamery s filtry.

Při výboji dochází také k lokálnímu ohřevu okolí zdroje částečných výbojů. Tuto změnu teploty lze na povrchu zkoumaného materiálu pozorovat s použitím termokamer s vysokou citlivostí. [2]

### 4.2.3 Chemická detekce

Přítomnost výbojové činnosti v olejem nebo plynem izolovaných zařízeních zjištěna pomocí chemické analýzy produktů vznikajících při výbojové činnosti. Tyto produkty se v izolantu hromadí za celou dobu provozu a lze podle jejich obsahu odhadnout degradaci, která byla způsobena částečnými výboji.

Do metod chemické detekce patří plynová chromatografie a detekce ozónu v chladícím médiu. Plynová chromatografie je velmi přesná a není ovlivňována elektromagnetickým rušením v provozu. Analyzuje se pět základních plynů a určuje se jejich poměr. Z tohoto poměru lze určit nejen druh výbojové činnosti ve zkoumaném zařízení (elektrický oblouk, jiskrové výboje,

částečné výboje), ale i druh poruchy izolačního systému. Mezi pět analyzovaných plynů patří: vodík  $H_2$ , metan  $CH_4$ , etylen  $C_2H_4$ , acetylen  $C_2H_2$  a propylen  $C_3H_6$ . [2], [5]

V Tab. 1 je uveden vztah plynů v izolantu vzhledem k částečným výbojům. V Tab. 2 jsou uvedeny poruchy, které lze vyhodnocením plynové chromatografie určit.

Tab. 1: Vyhodnocení plynové chromatografie vzhledem k částečným výbojům [2]

Druh plynu	Vztah plynu k částečným výbojům
vodík $H_2$	základní plyn charakterizující částečné výboje
metan $CH_4$	přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
etylen $C_2H_4$	nepřítomný
acetylen $C_2H_2$	přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
propylen $C_3H_6$	nepřítomný

Tab. 2: Vyhodnocování poruch z chromatografických měření [2]

Charakteristika poruchy	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
	Bez poruchy	0	0
Částečné výboje s malou hustotou energie	0	1	0
Částečné výboje s velkou hustotou energie	1	1	0
Nizkoenergetické výboje	1-2	0	1-2
Vysokoenergetické výboje	1	0	2
Lokální přehřátí 150 °C	0	0	1
Lokální přehřátí 150-300 °C	0	2	0
Lokální přehřátí 300-700 °C	0	2	1
Lokální přehřátí 740°C	0	2	2

## 5 HIPOTRONICS DDX-7000

V této kapitole je čerpáno z literatury [1], [8], [9], [10], [11], [12].

Hipotronics DDX-7000 Digital Partial Discharge Detector je počítačově ovládaný digitální měřicí přístroj pro měření výbojové činnosti. Snímá signály generované výbojovou činností testovaného objektu a zpracovává je tak, že mohou být měřeny a zobrazeny. Navíc je přístroj vybaven zařízeními pro měření přiloženého vysokého napětí a pro vytváření kalibračních signálů. Částečné výboje u toho přístroje jsou měřeny galvanickou metodou (viz kap. 4.1.1).

### 5.1 Použití

Přístrojem lze provádět testování izolace: [11]

- výkonových kabelů;
- transformátorů;
- průchodek;
- rozvaděčů;
- jističů;
- bleskojistek;
- kompenzačních kondenzátorů;
- točivých strojů;

### 5.2 Parametry

Měřitelný rozsah ČV: 0 – 99999 pC

Rozlišení měření ČV: 9 znaků plus znaménko

Rozlišení fáze ČV: 0,35°

Měřicí rozsah napětí: 0 – 999999 V

Rozlišení měření napětí: 11 znaků plus znaménko

Rozsah zesilovače: 7 stupňů po 20dB rozsazích

Frekvenční rozsah: 20kHz – 500kHz

Frekvenční filtry: dolní propust – 20kHz, 30kHz, 50 kHz, 60 kHz, 80kHz

horní propust - 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz

Napájení: 115V nebo 230V, 50Hz nebo 60Hz, <250VA

Rozměry: 270 x 445 x 460 mm (v x š x d), 18 kg

Provozní teplota: 10°C – 35°C

## 5.3 Popis zařízení

### 5.3.1 Potlačení nežádoucích signálů – hradlování

Při měření částečných výbojů je měření především v provozních podmínkách ovlivňováno rušením. V těchto situacích je nežádoucí měřit impulzy, které pocházejí právě od rušení.

DDX-7000 nabízí tři možnosti jak tyto impulzy nezahrnout do měření, jsou to horizontální, vertikální a šumová zádrž.

Horizontální zádrž lze zadržovat nežádoucí signály, které se vyskytují na stále stejném místě měřeného průběhu. Systém umožňuje zadržet tyto signály v jedné nebo ve dvou částech průběhu v závislosti na tom, je-li zvolena jednoduchá nebo dvojitá horizontální zádrž (viz kap. 5.4.3). V dvojitém režimu je průběh rozdělen na dvě části po 180°. Začátek i šířka zádrže jsou stanoveny uživatelem pomocí posuvníků v okně nastavení zobrazení měřeného průběhu.

Vertikální zádrž dovoluje hradlovat impulzy, které jsou větší než nastavená hodnota. Tato hodnota se opět nastavuje v okně nastavení zobrazení měřeného průběhu pomocí posuvníku a nastavená úroveň je v průběhu zobrazena modrou barvou. Funkce vertikální zádrže nesmí být používána zároveň s automatickým nastavením zesilovače.

Třetí zádrž je šumová zádrž. Hlavním účelem této zádrže je eliminovat šum měřicího systému. Na něm se podílejí dva zdroje šumu, zesilovač a měřící obvod. Oba tyto zdroje jsou ovládány samostatně, protože se chovají rozdílně v případě, že se změní nastavení zesilovače. Příspěvek od zesilovače je úměrný pouze nastavení zesilovače, zatímco příspěvek od měřicího obvodu je závislý nejen na nastavení zisku ale i tlumení. Systém automaticky přenastaví prahovou hodnotu v okamžiku, kdy se změní nastavení zesilovače.

### 5.3.2 Kalibrování systému

Po každé změně konfigurace měřicího obvodu je nutné před měřením provést kalibraci systému. Kalibrace se nemusí provádět, pokud jsou prováděny rutinní testy, kdy se kapacita nemění o více než 10%.

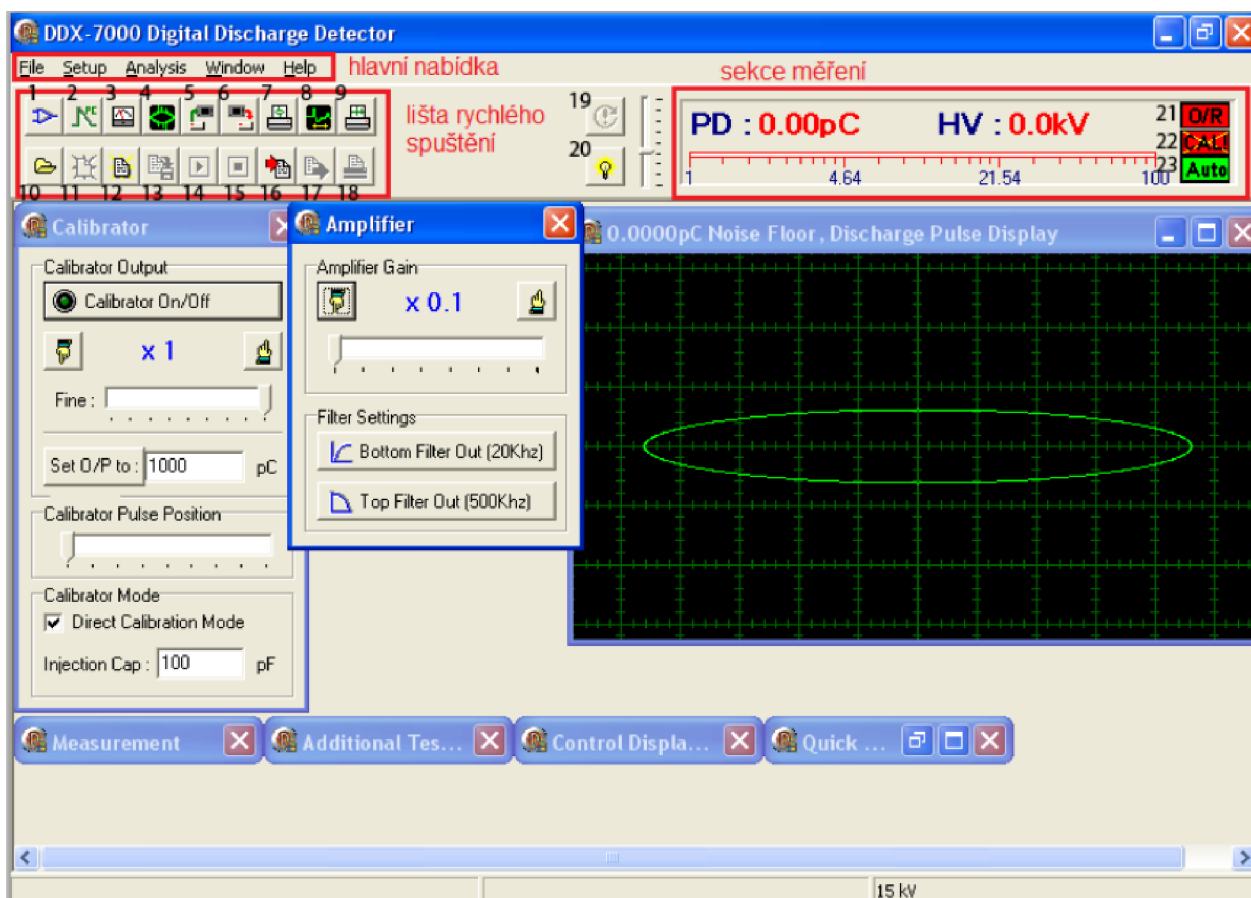
DDX-7000 umožňuje dva způsoby kalibrace, automatický a manuální. Automatický způsob vyžaduje minimální zásah uživatele a zajišťuje nejlepší kalibraci systému. V případech kdy šum pozadí je příliš velký, používá se manuální kalibrace.

Při kalibraci se nastaví tři parametry, konstanta převodu, příspěvek šumu od systému a z měřicího obvodu. Konstanta převodu se nastaví přivedením známé úrovně částečných výbojů do měřicího obvodu. K tomuto účelu se používá kalibrační kondenzátor, nebo externí zdroj. Kalibrace se nastavuje na základě porovnání velikosti změřených a přivedených nábojů. Z těchto dvou hodnot se vypočítá koeficient sloužící pro následující měření.

## 5.4 Popis programu DDX-7000

K nastavování přístroje a měření částečných výbojů slouží počítačový program DDX-7000. V následujících částech budou popsány základní a nejdůležitější možnosti nastavení programu včetně vysvětlení jednotlivých funkcí pro snadnější ovládání programu a nastavení měřicího přístroje.

Na Obr. 5.1 je zobrazena úvodní obrazovka programu po jeho spuštění. Okno programu lze rozdělit na několik funkčních částí: hlavní nabídku, lištu rychlého spuštění, sekci měření a část pro nastavení funkcí.



Obr. 5.1: Úvodní obrazovka programu DDX-7000

Všechna nastavení programu a přístroje lze zvolit výběrem z hlavní nabídky, pro rychlejší zvolení nejpoužívanějších funkcí jsou tyto funkce umístěny do lišty rychlého spuštění. V této liště se nacházejí především funkce pro nastavení přístroje (kap. 5.4.1 - 5.4.3) a pro práci s výsledky a analýzou.

V sekci měření jsou zobrazeny základní informace o měření, jako je úroveň částečných výbojů, přiložení zkušební napětí a v logaritmickém měřítku rozsah zesilovače. Dále informace o překročení měřicího rozsahu a nutné změně zesílení zesilovače (21), upozornění na nutnost zkalkulování měřicího systému (22) a automatickém nastavení zesilovače během měření (23).

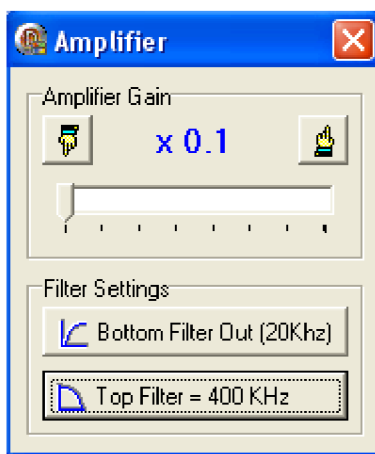
V Tab. 3 jsou popsány významy jednotlivých tlačítek s číslováním dle Obr. 5.1.

Tab. 3: Popis programu DDX-7000

Ozn.	Popis
1	Nastavení zesilovače (kap. 0)
2	Nastavení kalibrátoru
3	Nastavení měření (kap. 5.4.2)
4	Nastavení zobrazení měřeného průběhu (kap. 5.4.3)
5	Načtení uložené přístrojové konfigurace z disku
6	Uložení současné přístrojové konfigurace na disk
7	Tisk okna měřeného průběhu
8	PDSL – program pro lokalizaci poruchy
9	Tisk výsledků zobrazených v PDSL
10	Výběr druhu analýzy (kap. 5.4.4)
11	Vymazání konfigurace současně zvolené analýzy
12	Načtení konfigurace analýzy z disku
13	Uložení konfigurace analýzy pro příští použití na disk
14	Spuštění vybrané analýzy
15	Ukončení probíhající analýzy
16	Uložení výsledků analýzy na disk
17	Načtení výsledků předchozí analýzy
18	Tisk posledních výsledků analýzy
19	Vymazání největší změřené hodnoty (pokud je zvoleno držení největší změřené hodnoty)
20	Spuštění automatického nastavení systému
21	Upozornění na překročení měřicího rozsahu, změnou nastavení zesilovače se upozornění vyruší
22	Upozornění, že systém není kalibrovaný
23	Indikace automatického nastavování zesilovače

### 5.4.1 Nastavení zesilovače

Okno pro nastavení zesilovače je zobrazeno na Obr. 5.2



Obr. 5.2: Nastavení zesilovače

Měřicí přístroj má na výběr ze dvou druhů zesilovačů: standardní širokopásmový zesilovač a extrémně širokopásmový zesilovač (PDSL) pro lokalizování částečných výbojů v kabelech. Rozdíl zesilovačů je jak v jejich schopnostech, tak i v přizpůsobení programu tak, aby vyhovoval zvoleným požadavkům.

Standardní zesilovač poskytuje širokopásmovou charakteristiku vhodnou pro měření aktivity částečných výbojů. Nabízí sedm rozsahů činnosti po 20dB krocích (0dB až 120dB). Kromě toho nabízí jemné nastavení zisku, který poskytuje dodatečné úpravy v 20dB rozsazích, aby byla citlivost zesilovače optimalizována pro měření. Nastavení zesilovače je spjato s úrovní hladiny šumu, když se změní nastavení zesilovače, změní se adekvátně i hladina šumu.

V případech kdy se frekvence rušení nachází uvnitř citlivého kmitočtového pásma zesilovače, lze toto pásmo zúžit použitím frekvenčních filtrů. U tohoto přístroje lze nastavit nejnižší i maximální propustnou frekvenci.

*Bottom Filter* – minimální propuštěná frekvence (20 kHz – 80 kHz)

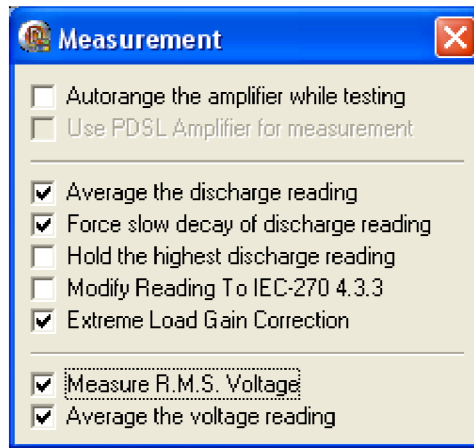
*Top Filter* – maximální propuštěná frekvence (100kHz – 500kHz)

PDSL zesilovač poskytuje oproti standardnímu zesilovači více omezení. Není možné nastavit pásmové propusti ani jemné nastavení zesílení. Rozsah zesílení je od 0dB do 55dB v krocích po 5dB.



## 5.4.2 Nastavení měření

V okně pro nastavení měření (Obr. 5.3) se nastavují možnosti, jak systém měří napětí a výboje.



Obr. 5.3: Nastavení měření

**Autorange the amplifier while testing** – zaškrtnutím se zvolí automatické nastavení zesilovače během měření pro co nejlepší měření. Nastavení zesilovače je závislé na velikosti měřených impulzů, v případě že jsou impulzy zadržené (horizontální zádrž a šum), nemají na nastavení vliv. Vertikální zádrž způsobuje nesprávné automatické nastavení a je proto doporučeno nepoužívat automatické nastavení rozsahu během aktivace vertikální zádrže.

**Use PDSL Amplifier for measurement** – zaškrtnutím použije systém pro měření extra širokopásmový zesilovač vhodný pro lokalizaci místa vzniku částečných výbojů. Měření výbojové činnosti se jeho použitím stane oproti použití standardního zesilovače méně přesné a citlivé.

**Average the discharge reading** – zaškrtnutím je úroveň výbojů průměrována z posledních 16 měřených hodnot. Tato možnost dává stabilnější výsledky, ale není vhodná u přechodných jevů, protože se do měření zavádí nepřesnost.

**Force slow decay of discharge reading** – zobrazení napodobuje tradiční analogové přístroje s rychlou dobou náběhu a pozvolnou dobou sestupnou. Pozvolný sestup usnadňuje měření vrcholových hodnot výbojové aktivity.

**Hold the highest discharge reading** – zaškrtnutím se měří maximální hodnota, kde její největší hodnota zůstává v paměti do doby, než je uživatelem vymazána (viz Obr. 5.1 - 19). Tento mód není určen pro automatické funkce, protože vyžaduje manuální zásahy pro mazání hodnot.

**Modify Reading To IEC-270 4.3.3** – měření probíhá plně dle standardu IEC-270. (tato norma IEC-270:1968 byla nahrazena novější mezinárodní normou IEC 60270:2000 se kterou je naše národní norma ČSN EN 60270:2001 identická) [1]

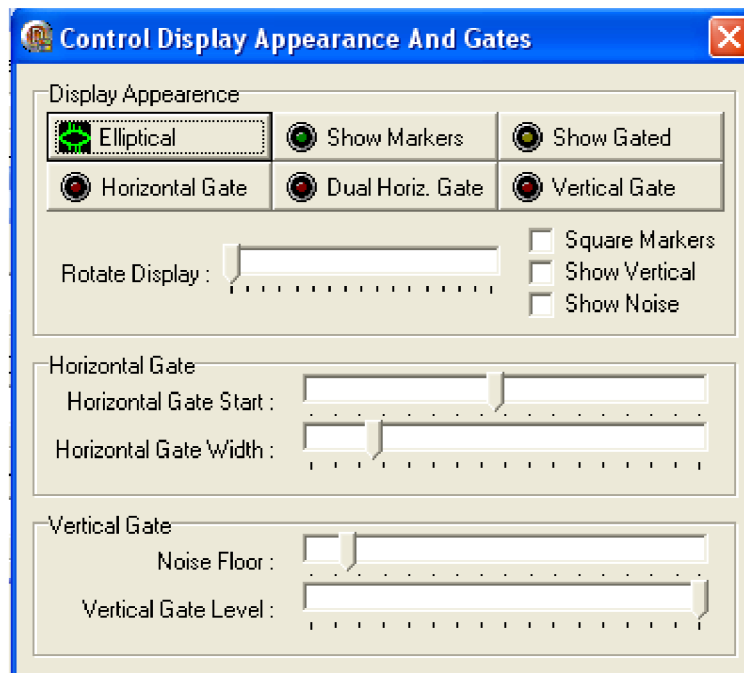
**Extreme Load Gain Correction** – maximální korekce zisku zátěže

**Measure R.M.S. Voltage** – zaškrtnutím systém měří skutečnou efektivní hodnotu napětí přicházejícího vysokonapěťového signálu z měřicího senzoru, v opačném případě je měřena vrcholová hodnota, která je následně podělena  $\sqrt{2}$ .

**Average the voltage reading** – zaškrtnutím je hodnota napětí zobrazována průměrováním změřených hodnot za poslední čtyři měření. Tato volba dává stabilnější výsledky, ale není vhodná v případech, kdy se napětí rychle mění. Jinak je použita pouze poslední změřená hodnota.

### 5.4.3 Nastavení zobrazení měřeného průběhu a hradel

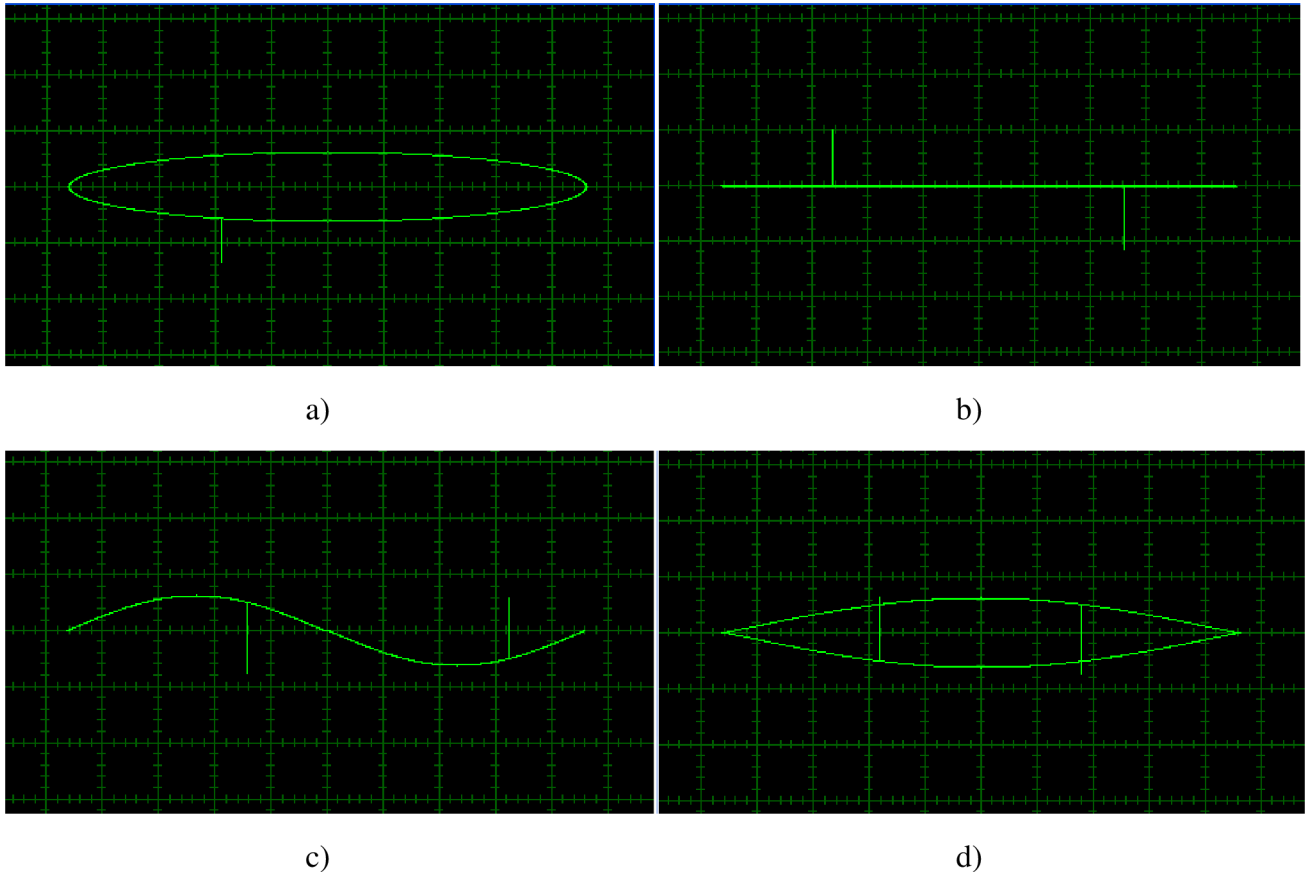
V okně Control Display Appearance And Gates (Obr. 5.4) se nastavuje způsob jakým je průběh částečných výbojů zobrazován. V dalších částech se nastavují jednotlivé zádrže (horizontální, vertikální a šumu).



Obr. 5.4: Nastavení zobrazení průběhu a hradel

**Elliptical (Linear, Sinusoid, Sinusoid Loop)** – zvolení typu zobrazovaného průběhu. K zobrazení je možné vybrat ze čtyř nabízených druhů průběhu:

- Eliptický (Elliptical) – Obr. 5.5 a)
- Lineární (Linear) - Obr. 5.5 b)
- Sinusový (Sinusoid) - Obr. 5.5 c)
- Sinusová smyčka (Sinusoid Loop) – Obr. 5.5 d)

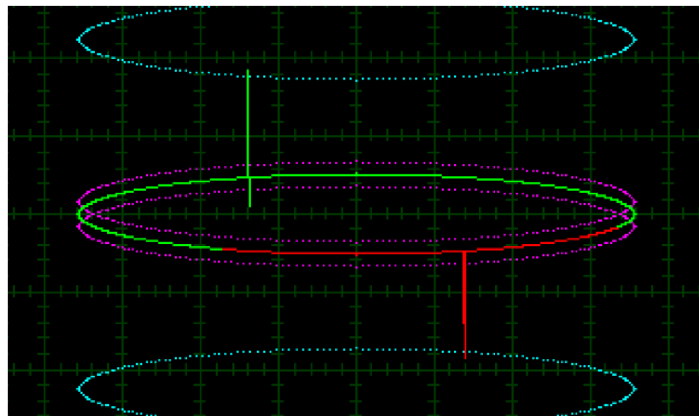


Obr. 5.5: Způsob zobrazení průběhu

a) eliptický b) lineární c) sinusový d) sinusová smyčka

V zobrazeném průběhu jsou barvami rozlišeny jednotlivé druhy impulzů a úrovní, viz Obr. 5.6.

- zelená – měřené impulzy;
- červená – zahradlované impulzy, tyto impulzy nejsou měřeny;
- modrá – vertikální zádrž, impulzy, přesahující tuto úroveň nejsou měřeny;
- fialová – úroveň šumu, impulzy pod touto úrovní jsou brány jako šum a jsou při měření vynechány;
- žlutá – nulové ukazatele, zobrazují pozici průchodu nulou na zvoleném průběhu.



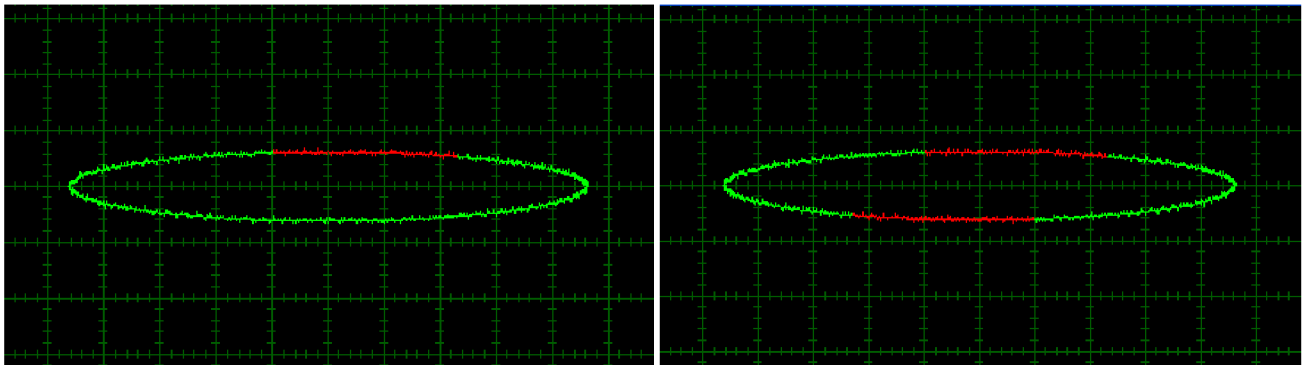
Obr. 5.6: Zobrazení jednotlivých zádrží [9]

**Show Markers** – zobrazení nulových ukazatelů

**Show Gated** – zobrazení zahradlovaných pulzů, v případě zapnutí této funkce jsou v průběhu zobrazeny i impulzy které jsou pro měření vynechány a mají červenou barvu. (Obr. 5.6, Obr. 5.8)

**Horizontal Gate** – horizontální zádrž, impulzy v zadaném fázovém pásmu budou zahradlovány, šířka pásma lze nastavit v celé šíři 360° (Obr. 5.7 a))

**Dual Horiz. Gate** – dvojitá horizontální zádrž, při zvolení této funkce je jednoduchá horizontální zádrž (viz výše Horizontal Gate) rozdělena na dva stejné úseky, jejich začátky jsou vzájemně posunuty o 180°. (Obr. 5.7 b))



a)

b)

Obr. 5.7: Horizontální zádrže

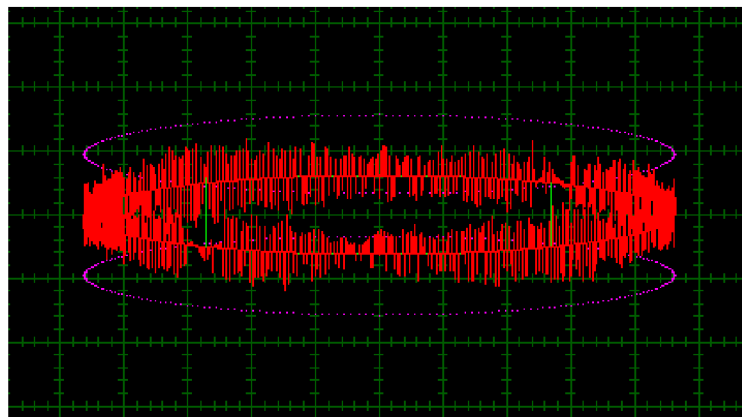
a) jednoduchá b) dvojitá

**Vertical Gate** – vertikální zádrž, impulzy přesahující zadanou hodnotu jsou zahradlovány a nejsou použity pro měření

**Rotate display** – otáčení displeje, posouváním jezdce po posuvníku lze nastavit otočení displeje od 0° do 360°

**Show Vertical** – zobrazení úrovně vertikální zádrže do průběhu (Obr. 5.6)

**Show Noise** – zobrazení šumu do průběhu (Obr. 5.8)



Obr. 5.8: Zobrazení šumu do průběhu

**Horizontal Gate Start** – nastavení počátečního úhlu pro horizontální zádrž posunutím jezdce po posuvníku

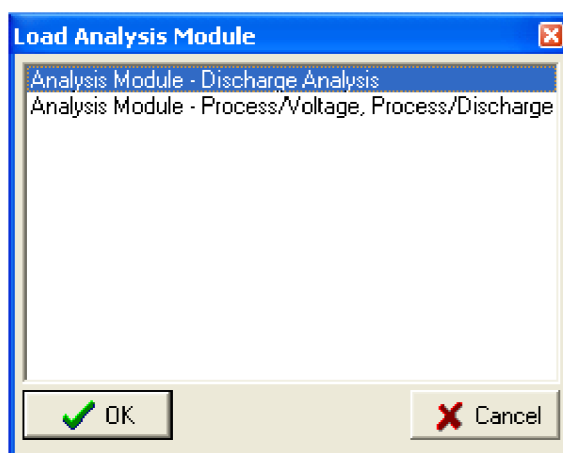
**Horizontal Gate Wight** – nastavení šířky horizontální zádrže, u jednoduché horizontální zádrže lze nastavit 0 až 360°, u dvojité zádrže lze nastavit 0 až 180°

**Noise Floor** – nastavení úrovně šumu, při automatické kalibraci je hodnota šumu automaticky nastavena, v případě potřeby ji lze posunem jezdce přenastavit

**Vertical Gate Level** – úroveň vertikální zádrže, určuje maximální míru měřených impulzů, v případě, že impulz dosahuje hodnoty větší než je hodnota nastavená, v tom případě je pro měření vynechán.

#### 5.4.4 Analyzační modul

Počítačový program dává na výběr zobrazení naměřených dat v jednom ze dvou analyzačních modulů Discharge Analysis a Process/Voltage (Obr. 5.9)

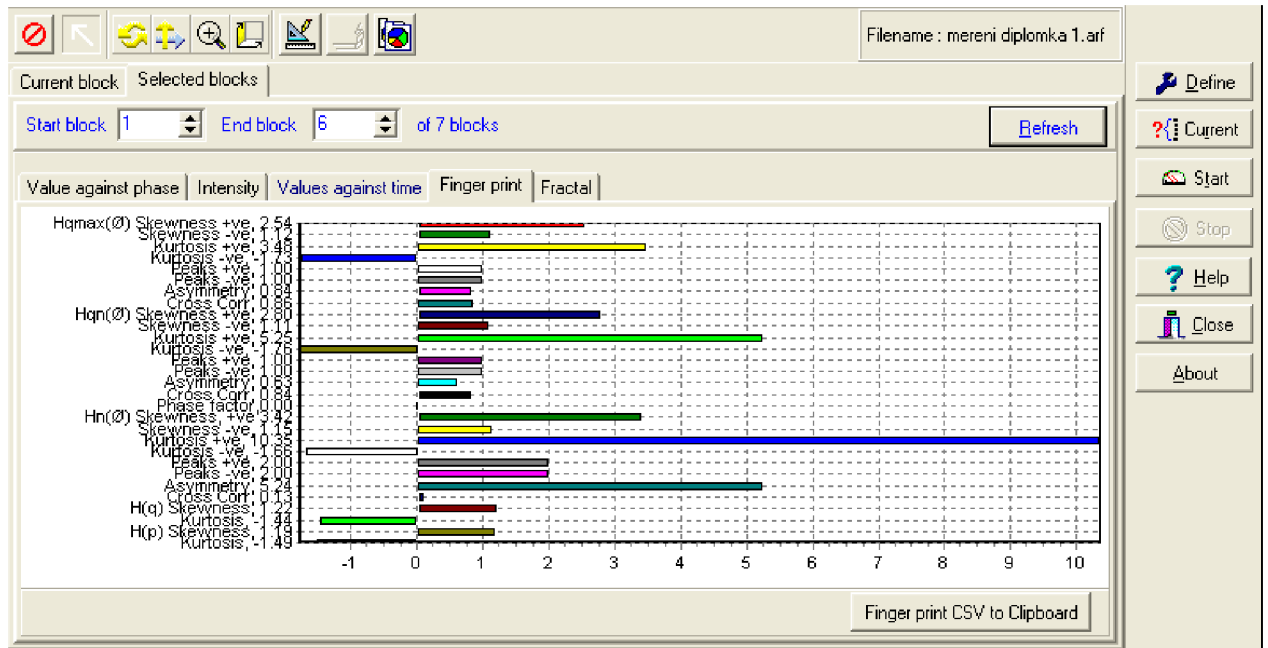


Obr. 5.9: Výběr analyzačního modulu

#### Discharge Analysis

Zobrazení naměřených hodnot v několika různých typech grafických závislostí je možné v analyzačním modulu Discharge Analysis. Na výběr je pět možných typů závislostí, z nichž u většiny je možná změna zobrazovaného parametru výboje (maximální hodnota, střední hodnota, energie, počet impulzů, atd.). Příklady těchto závislostí je na Obr. 7.3 až Obr. 7.6.

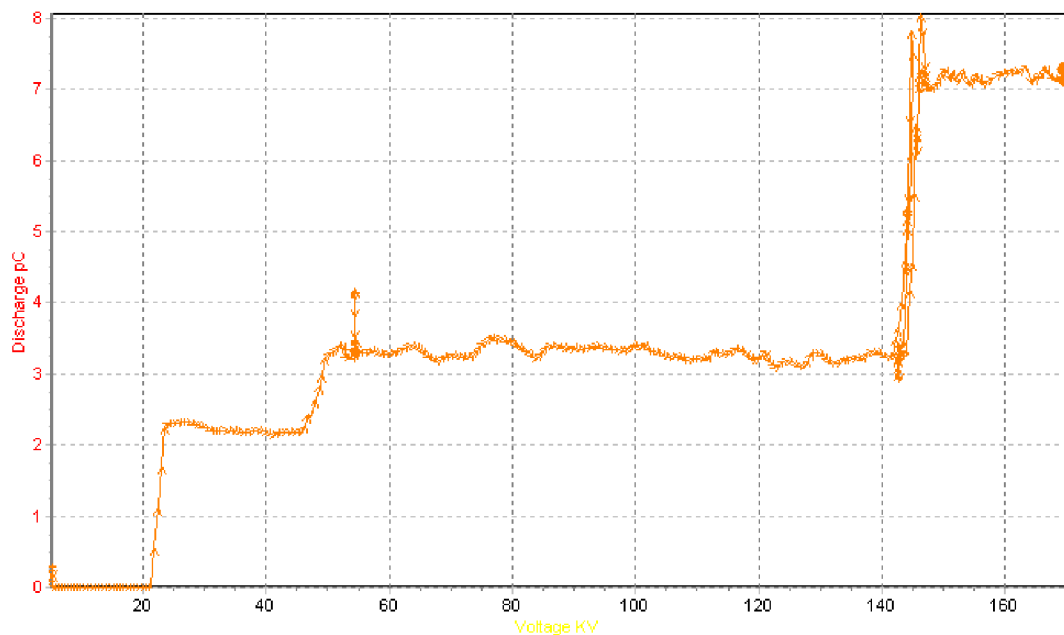
Na Obr. 5.10 je k vidění jedno možné zobrazení výsledků měření. Obsahuje statistické parametry na základě dat shromážděných přístrojem. Tyto parametry slouží k určení zdroje výbojové činnosti.



Obr. 5.10: Analyzační modul

### Process/Voltage, Process/Discharge

Tento analyzační modul umožňuje dva způsoby záznamu měření částečných výbojů. V prvním případě se jedná o závislost velikosti výbojů na přiloženém napětí (viz Obr. 5.11), nebo v druhém případě závislost velikosti výbojů v čase. Tento typ charakteristik lze nejlépe použít k vyhodnocení izolačního stavu zařízení srovnávací metodou. Ať již časovou archivací u jednotlivých zařízení a pozorováním rozvoje výbojové aktivity v čase, nebo porovnáním charakteristik se stejnými nebo podobnými zařízeními.



Obr. 5.11: Analyzační modul - závislost velikosti výbojů na napětí

## 6 NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem a realizací laboratorní úlohy na problematiku částečných výbojů.

### 6.1 Zadání

- 1) Seznamte se s problematikou měření a vyhodnocování částečných výbojů
- 2) Proveďte měření částečných výbojů na měřicím přípravku
- 3) Ze zaznamenaných charakteristik určete typ částečných výbojů

### 6.2 Teoretický rozbor

Částečný výboj je definován jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Obvykle jsou částečné výboje důsledkem lokálního elektrického namáhání v izolaci, na povrchu izolace a objevují se jako impulzy s dobou trvání menší než 1  $\mu$ s.

Jedná se o částečný průraz v plynném izolantu, kdy je výbojem proražena pouze část napětově namáhané izolace a zbývající část má ještě dostatečně velkou elektrickou pevnost, že namáhání vydrží.

#### 6.2.1 Kalibrace

Při měření částečných výbojů je důležitá kalibrace měřícího obvodu z důvodu, že vlivem kapacit měřícího obvodu dochází při cestě od svorek testovaného objektu k měřicímu přístroji ke zkreslení i zmenšení velikosti přenášeného náboje. Je tedy nutné celý měřící obvod po každé změně zapojení kalibrovat a následně změřené hodnoty vztahovat na kalibrační hodnoty. [5]

Pro kalibraci měřícího obvodu by měly být dodrženy zásady: [5]

- Velikost kalibračního náboje by měla být přibližně stejná jako očekávané hodnoty měřených výbojů
- Velikost kalibračního náboje by měla být nezávislá na kapacitě zkoušeného objektu
- Kalibrační náboj z kalibrátoru by měl odpovídat standardům

Kalibrování se měřícího obvodu se provádí při nulovém napětí přiložením kalibračního generátoru na testovaný objekt. V této úloze je kalibrační generátor reprezentován vysokonapětovým kondenzátorem, jenž je trvale zapojen do měřícího obvodu (v případech, kdy se nejedná o vysokonapětový zdroj impulzů je nutné ho před přivedením napětí z měřícího obvodu odstranit). Kalibrační koeficient [5] (konstanta převodu [1]) testovacího a měřícího obvodu je poměr náboje kalibračního impulzu o známé hodnotě a naměřené hodnoty měřicím přístrojem. [1], [5]

## 6.2.2 Rušení

Měření částečných výbojů je především v běžných provozních podmínkách ovlivňováno rušením. Pro zajištění dostatečné přesnosti při měření je třeba, aby hladina šumu pozadí byla zanedbatelná vzhledem k úrovni měřených výbojů (nižší než 50% měřené úrovně částečných výbojů). [1], [5]

Podle zdroje rušivých signálů lze rušení rozlišit na: [5]

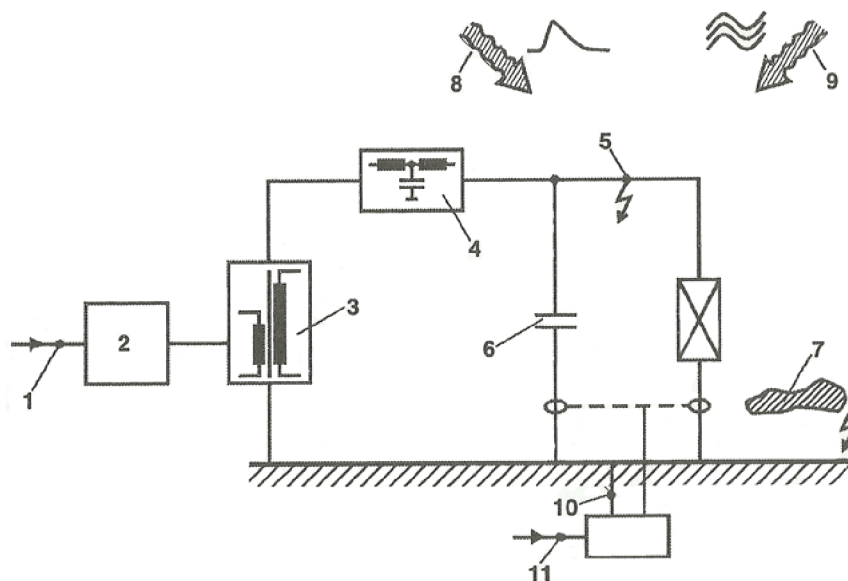
- Vnější rušení – způsobené vnějšími zdroji rušení a je nezávislé na napětí testovaného objektu. Rušení lze zjistit měřením, kdy je měřicí obvod v beznapěťovém stavu. Tento druh rušení je způsoben rozhlasovými vysíláči, okolními vysokonapěťovými zkouškami, zdroji impulzního rušení, spínacími operacemi, atd.
- Vnitřní rušení – spojené se zdrojem napětí a většinou roste s rostoucím zkušebním napětím. Mezi tato rušení patří např. částečné výboje v prvcích měřicího obvodu (filtrech, kondenzátorech, transformátoru), přívodech, rušení při regulaci napětí. [1], [5]

Prostředky pro snížení rušení: [1]

- Stínění a filtrování – snížení rušení pomocí uzemnění všech vodivých konstrukcí v blízkosti zkoušek, zbavených ostrých hran a filtrování silových zdrojů používaných pro testování a měření. V případě tohoto měření je této podmínky docíleno stíněnou laboratoří, síťovým odrušovacím filtrem a měřicím filtrem TFU (kap. 6.2.4).
- Symetrické obvody – můstkové zapojení (Obr. 4.4)
- Elektronické zpracování a obnovování signálu – vhodným použitím elektronické metody zpracování signálu nebo jejich kombinacemi lze oddělit skutečné částečné výboje od rušení.
  - Metoda časového okna – částečné výboje se často vyskytují u zkoušek střídavým napětí pouze v pravidelně se opakujících intervalech během periody napětí. Měřicí přístroj tedy může být vybaven hradlem, které otevírá pouze v těchto okamžicích, ve zbývajícím čase je uzavřené (viz horizontální zádrž kap. 5.3.1)
  - Metody založené na rozlišování polarit – pomocí vhodného zapojení např. se dvěma zesilovači, lze porovnáním polarit rozlišit, zda se jedná o výboje uvnitř testovaného zařízení nebo se jedná o vnější rušení.
  - Průměrování impulsu – v průmyslovém prostředí se mnoho rušení vyskytuje nahodile, zatímco částečné výboje mají stále přibližně stejnou hodnotu. Náhodné rušení se proto redukuje průměrováním naměřených hodnot.
  - Kmitočtová selekce – použití pásmových propustí a zádrží zesilovače

Základní zdroje rušení při měření částečných výbojů jsou znázorněny na Obr. 6.1, kde 1 – rušení z napájecího obvodu, 2 – rušení z regulačního transformátoru, 3 – vysokonapěťový zdroj, 4 – filtr, 5 – přívoody a elektrody, 6 – vazební kondenzátor, 7 – blízké vodivé předměty, 8 – rušení impulzního charakteru, 9 – elektromagnetické vlny rádiových vysíláčů, 10 – rušivé proudy v uzemňovací soustavě, 11 – rušení z napájení měřicího přístroje.





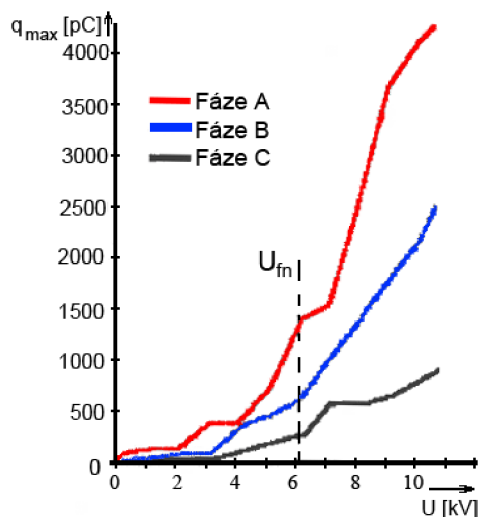
Obr. 6.1: Základní zdroje šumu [5]

### 6.2.3 Vyhodnocování částečných výbojů

V praxi se vyhodnocování rozvoje výbojové činnosti a rizika dalšího provozu zařízení sleduje především vývojem výbojové činnosti daného zařízení v čase, nebo porovnáváním naměřených hodnot s hodnotami stejných či podobných zařízení. Naměřené parametry částečných výbojů (kap. 3.1.1) jsou vyhodnocovány vzhledem k přiloženému napětí, v případě, že v průběhu času dojde při stejných podmínkách k výrazné změně hodnot lze konstatovat, že dochází ke změně izolačního systému. Stejně pravidlo platí v případě, že testované zařízení porovnáváme s jiným zařízením, buď totožným, nebo podobným. Pokud jsou změřené hodnoty testovaného vzorku výrazně odlišné od hodnot ostatních zařízení, lze konstatovat, jako v předchozím případě změnu izolačního systému. Případ takového vyhodnocení je znázorněn na Obr. 6.2, kdy jsou porovnávány částečné výboje statorové izolace hydroalternátoru. Z naměřených hodnot lze konstatovat, že ve fázi A dochází v porovnání s ostatními k výrazné výbojové činnosti. [5]

V závislosti na použití, požadované spolehlivosti a dalších aspektech se liší hladiny částečných výbojů, podle kterých je hodnocen stav izolace. Typické hodnoty běžně testovaných zařízení, s úrovní hodnot částečných výbojů, které jsou ještě považovány za akceptovatelné: [8]

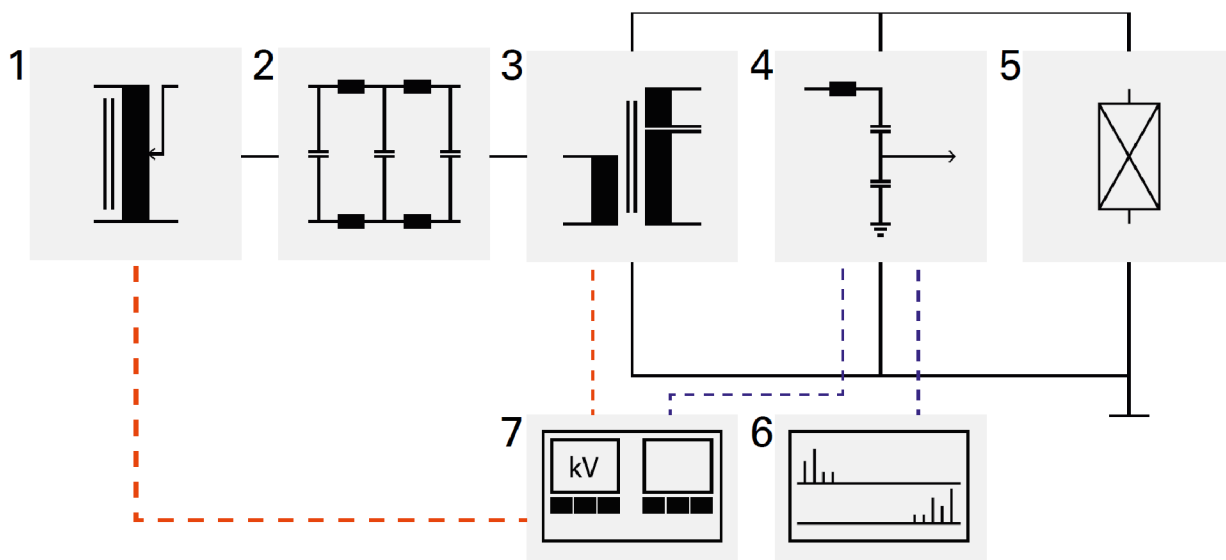
- Výkonové kabely < 5 pC
- Vypínače < 100 pC
- Výkonové transformátory < 500 pC
- Průchodky < 5 pC



Obr. 6.2: Vyhodnocení měření částečných výbojů v praxi [5]

### 6.2.4 Měřicí obvod

Měření této laboratorní úlohy probíhá ve vysokonapěťové zkušebně ve Vědecko-technickém parku Profesora Lista. Tato zkušebna je rozdělena na část zkušební (probíhá zde samotné měření, jsou zde umístěny vysokonapěťové část měřicího obvodu) a velín, odkud je měření prováděno (zde jsou umístěny ovládací zařízení a měřicí přístroje). Obě tyto místnosti jsou stíněny, pro co nejpřesnější měření, a aby vnější rušení bylo co nejvíce potlačeno.



Obr. 6.3: Principiální schéma zapojení úlohy [12]

1 – regulační transformátor, 2 – síťový odrušovací filtr, 3 – zkušební transformátor,  
4- vazební kondenzátor, 5 – testovaný objekt, 6 – Detektor částečných výbojů, 7 - ovládací terminál

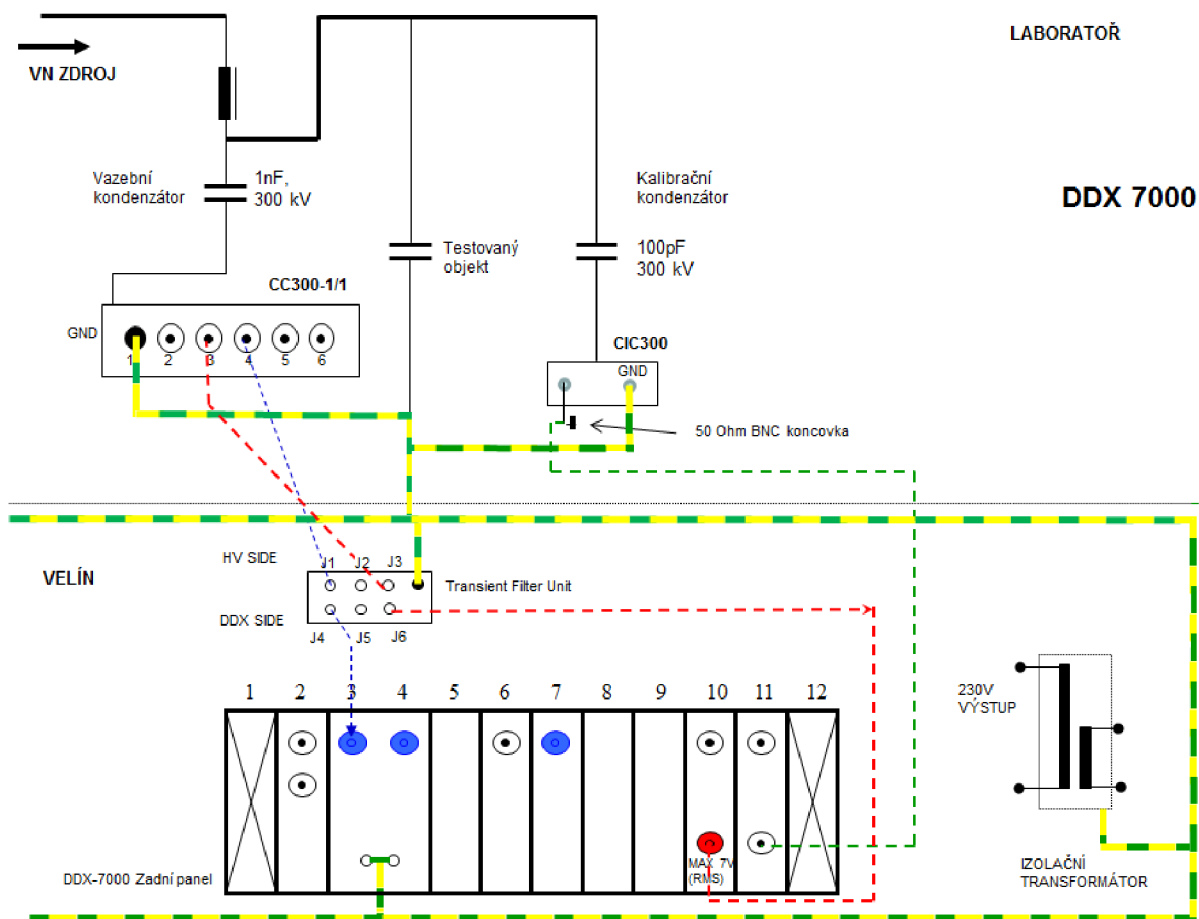
Principiální schéma měřicího obvodu je znázorněno na Obr. 6.3. Regulační transformátor (1) a síťový odrušovací filtr (2) jsou umístěny v rozvodně VN. V laboratoři se nachází zkušební transformátor (3), vazební a kalibrační kondenzátor (4) a testovaný objekt (5). Měřicí přístroj (Detektor částečných výbojů) (6) a ovládací zařízení (7) jsou umístěny ve velíně.

## 6.3 Příprava měření

Před zahájením měření je třeba zapojit měřicí obvod, provést kalibraci systému a nastavení programu.

### 6.3.1 Zapojení měřicího obvodu

Zapojte obvod podle schéma na Obr. 6.4 [13].



Obr. 6.4: Schéma zapojení laboratorní úlohy

Měřicí přípravek zapojte do měřicího obvodu na jedné straně pomocí propojovacího kabelu ke kalibračnímu kondenzátoru a druhou stranu přípravku připojte zemním páskem.

Pro připojení vazebního kondenzátoru (CC300-1/1) propojte:

- svorku KVM se svorkou J3 na TFU (svodič přepětí - Transient Filter Unit);

- svorku SCOPE se svorkou J1 na TFU;
- svorku J4 (TFU) se svorkou AMP IN v modulu zesilovače (Amplifier) na DDX-7000;
- svorku J6 (TFU) se svorkou V/M IM v modulu měření (Measurement) na DDX-7000;
- zemní svorku se zemí.

Pro připojení kalibračního kondenzátoru (CIC 300):

- propojte přes T spojku svorku INPUT se svorkou CAL O/P v kalibračním modulu (Calibrator) na DDX-7000;
- na druhý konec T spojky připojte 50Ω zakončení;
- propojte zemní svorku se zemí.

Zkontrolujte důkladné vzájemné pospojování všech uzemnění!

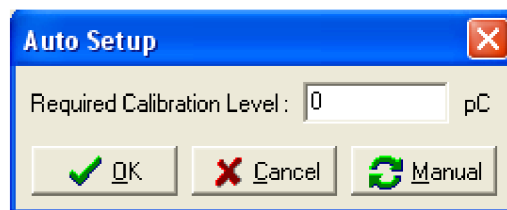
### 6.3.2 Nastavení měření

Na pracovní ploše spusťte program DDX-7000. Zvolte nastavení měření (kap. 0). V možnostech nastavení zaškrtněte položky: *Autorange the amplifier while testing*, *Average the discharge reading*, *Force slow decay of discharge reading*, *Extreme Load Gain Correction*, *Measure R.M.S. Voltage*, *Average the voltage reading*.

### 6.3.3 Kalibrace

Proveďte kalibraci systému. Kalibraci provedete stisknutím tlačítka pro automatickou kalibraci (Obr. 5.1 - 20). V okně pro kalibraci (Obr. 6.5) zadejte požadovanou hodnotu. V přímém režimu kalibrátoru (tzn. kalibrační kondenzátor je připojen trvale do měřícího obvodu) zadejte hodnotu, kterou bude produkovat kalibrační kondenzátor, tato hodnota by měla odpovídat předpokládaným měřeným částečným výbojům. Zadejte hodnotu 2 pC. Stisknutím OK se spustí kalibrační proces.

Pozn. při použití nepřímé metody (na místo kalibračního kondenzátoru je použito externího kalibrátoru) zadejte hodnotu nastavenou na externím kalibrátoru.



Obr. 6.5: Kalibrace měřícího systému

Po provedení kalibrace zkontrolujte, že v sekci měření není zobrazena indikace na nekalibrovaný systém (Obr. 5.1 – 22). Sekce musí vypadat stejně jako na Obr. 6.6. Je-li tomu tak, systém je připraven na měření. V opačném případě je třeba opakovat kalibraci!

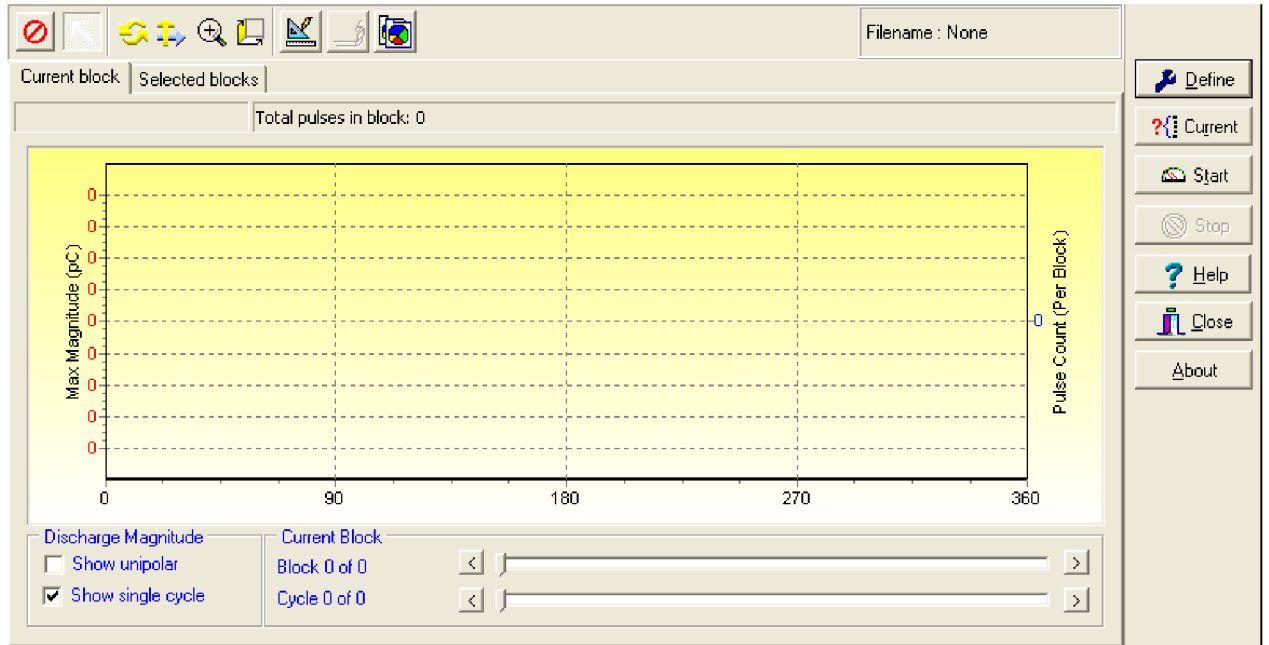


Obr. 6.6: Sekce měření po kalibraci

### 6.3.4 Nastavení analyzačního modulu

Vyberte analýzu částečných výbojů. Výběr provedete stisknutím tlačítka pro výběr druhu analýzy (Obr. 5.1 - 10) a zvolením *Analysis Module – Discharge Analysis*.

Otevře se okno zvolené analýzy (Obr. 6.7).



Obr. 6.7: Okno analýzy částečných výbojů

Tlačítka v pravé části okna slouží k nastavení a ovládání analýzy (Obr. 6.8)

*Define* – nastavení záznamu měření (Obr. 6.9)

*Current* – nastavení informací o měření (Testující, testované zařízení, komentář k měření, atd.)

*Start* – zahájení analýzy (lze zahájit též tlačítkem v liště rychlého spuštění Obr. 5.1 – 14)

*Stop* – ukončení analýzy (lze ukončit též tlačítkem v liště rychlého spuštění Obr. 5.1 – 15)



Obr. 6.8: Tlačítka pro nastavení analýzy

Okno Setup (Obr. 6.9) slouží k nastavení záznamu měření.

*Sample period measurement* – nastavení doby zaznamenávání impulzů

*Time* – doba, po kterou probíhá jeden blok měření – nastavte 10s

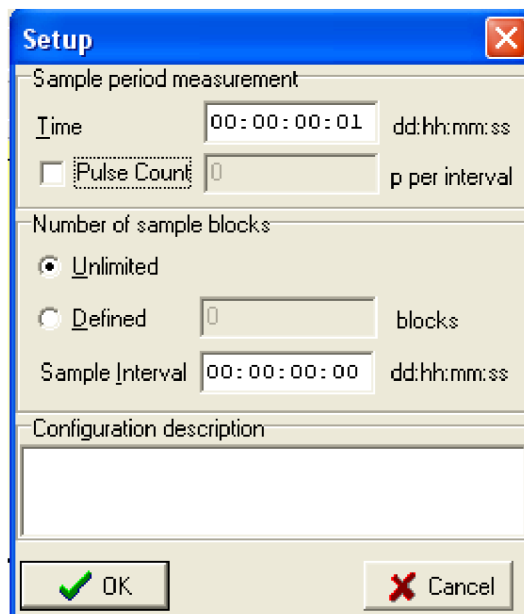
*Pulse count* – počet pulzů zaznamenaných během jednoho bloku, po překročení zaznamenaných pulzů jsou již další ignorovány. - nevyplňujte

*Number of sample blocks* – způsob ukončení zaznamenávání hodnot (konec měření)

*Unlimited* – zaznamenávání hodnot až do okamžiku zmačknutí tlačítka Stop

*Defined* – ukončení je definováno počtem bloků měření – nastavte 6

*Sample Interval* – časová prodleva mezi jednotlivými bloky měření – nenastavujte



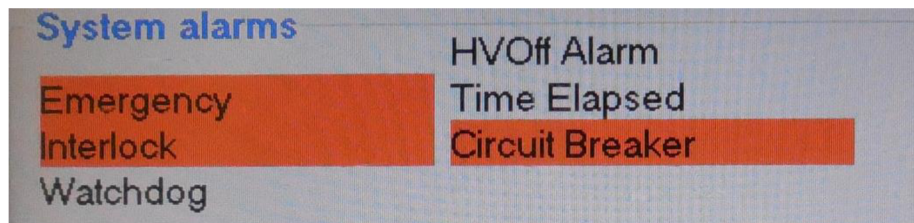
Obr. 6.9: Nastavení analýzy

Tímto krokem je nakonfigurováno měření analýzy. Je nastaveno tak, že celé měření bude probíhat 1min. Tento čas je rozdělen do 6 bloků vždy po 10s. V jednotlivých blocích není nastaven počet zaznamenaných impulzů ani časová prodleva mezi jednotlivými bloky.

Po zahájení měření bude nutné zadat ještě informace o měření, zde musí být vyplněna všechna políčka, jinak nelze pokračovat v měření. A následně zvolit místo uložení analyzačního souboru, kam se ukládají naměřená data pro pozdější analýzu dat. Po tomto kroku již začne samotné měření (zaznamenávání hodnot).

## 6.4 Spuštění ovládacího terminálu

Před zahájením samotného měření, je nutné vyrušit všechna bezpečnostní varování (Obr. 6.10) uzavřením bezpečnostních okruhů. Je tedy nutné uzavřít bezpečnostní okruh v laboratoři spojením nainstalovaných zábranných plotů kabely, uzavřít dveře do laboratoře a vyrušit STOP tlačítko měřicího přístroje! Bez těchto operací není umožněno provádět měření. V případě, že dojde k přerušení jakéhokoliv z bezpečnostních okruhů během měření, měření se automaticky ukončí.



Obr. 6.10: Bezpečnostní hlášení

Po vyrušení všech alarmů, lze provést aktivaci přístroje, což umožní následnou regulaci napětí transformátoru. Na Obr. 6.11 je vidět část ovládacího terminálu, přes kterou dochází k připojení zdroje napětí i k následné regulaci. Připojení se provede stisknutím tlačítka *Ready* na cca. 5 s., následně se zmáčkne tlačítko *HV On* a poté znovu *Ready*. Nyní je přístroj připraven pro měření.



Obr. 6.11: Ovládání terminálu AC Control OT 248

Při samotném měření se napětí reguluje šipkami v oblasti *Voltage Regulation*, při požadavku na rychlejší změnu se použije současného držení tlačítka *Fast* a příslušné šipky. Odpojení zdroje napětí se provede stisknutím tlačítka *HV Off*.

## 6.5 Postup měření

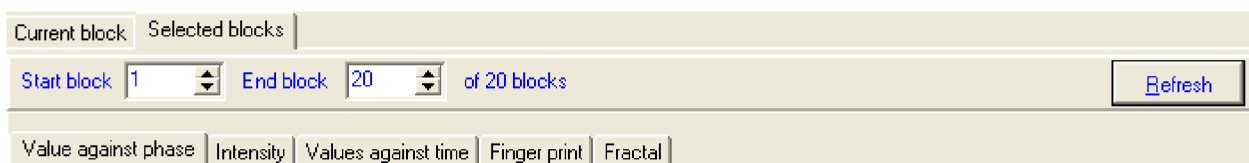
- 1) Zapojte obvod dle schématu zapojení (Obr. 6.4)
- 2) Proved'te jednotlivé kroky nastavení a příprav dle kap. 6.3
- 3) Zahajte měření částečných výbojů
- 4) Nastavte zkušební napětí na hodnotu 30kV
- 5) Spusťte analýzu stisknutím tlačítka Start
- 6) Po ukončení analýzy ukončete měření, sjeďte s napětím na nulu a následně odpojte zdroj napětí stisknutím *HV Off*
- 7) Vyhodnoťte měření

## 6.6 Vyhodnocení měření

Vyhodnocení měření se provádí z naměřených průběhů. Analyzační modul zobrazuje naměřené hodnoty v pěti různých závislostech a zobrazeních. Umožňuje také procházet naměřené hodnoty, ať již po celých blocích hodnot (např. celé měření) nebo po jednotlivých částech. Při procházení celých bloků (zvoleno *Selected blocks*) lze zobrazit všechny níže popsané průběhy. U jednotlivých částí (*Current block*) je zobrazen pouze průběh velikosti impulzů na fázi napájecího napětí (průběh *Value against phase*). Výběr jednotlivých závislostí se provede výběrem z panelu záložek viz Obr. 6.12.

Jednotlivé průběhy lze exportovat do podoby obrázků stisknutím pravého tlačítka na zvoleném průběhu a zvolením *CSV to Clipboard* → požadovaného rozsahu hodnot (aktuální blok, rozsah bloků, nebo celé měření) se provede uložení do schránky systému Windows. Tyto závislosti vložte do grafického editoru a uložte pro následné vyhodnocení.

Naměřené průběhy porovnejte s teoretickými podklady v kap. 3.2 a určete, o jaký druhy výboje se jedná.



Obr. 6.12: Analýza výsledků

*Current block* – zobrazení výsledků po jednotlivých částech, možnost zobrazení dat celého bloku hodnot, nebo jednotlivých částí

*Selected blocks* – zobrazení výsledků celých bloků hodnot, lze nastavit zobrazení hodnot z více bloků zadáním počátečního a koncového bloku

*Value against phase* – závislost parametrů výboje na fázi napájecího napětí (Obr. 7.3)

*Intensity* – barevné znázornění závislosti velikosti výbojů na fázi napětí (Obr. 7.4)

*Values against time* – zobrazení parametrů výboje v čase (Obr. 7.6)

*Finger print* – statistické parametry výboje (Obr. 5.10)

*Fractal* – prostorové znázornění parametrů výboje na fázi napájecího napětí (Obr. 7.5)



## 6.7 Seznam přístrojů

- Měřicí přístroj Hipotronics DDX-7000
- Počítačový program DDX-7000
- Vazební kondenzátor CC300-1/1
- Kalibrační kondenzátor CIC300
- Svodič přepětí – Transient Filter Unit
- Ovládací terminál AC Control OT 248

## 6.8 Shrnutí

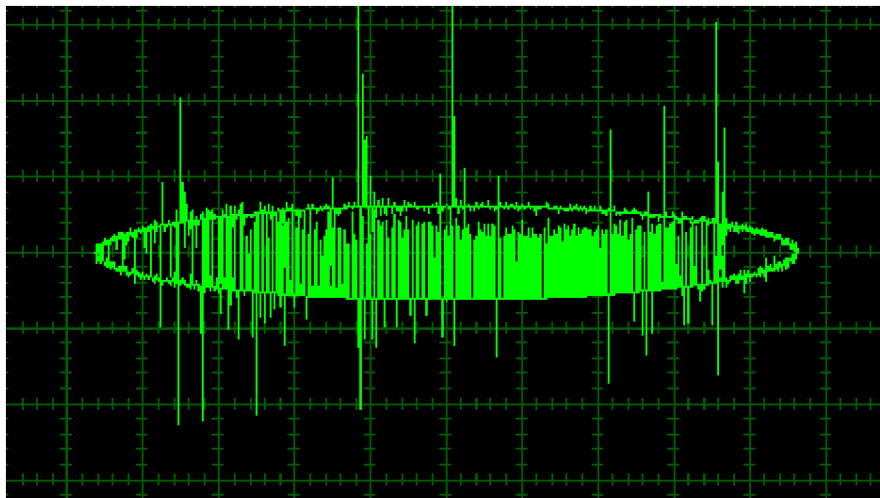
Při měření částečných výbojů je nutné před samotným měřením provést kroky, které zaručí, že změřené výsledky budou odpovídat skutečným hodnotám. Jedná se především o co největší možné snížení hladiny šumu a správnou kalibraci systému. Pokud se tyto kroky nepodaří správně zrealizovat, hrozí, že do měření bude zanesena chyba a změřené výsledky nebudou mít správnou vypovídací hodnotu.

## 7 VYPRACOVÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

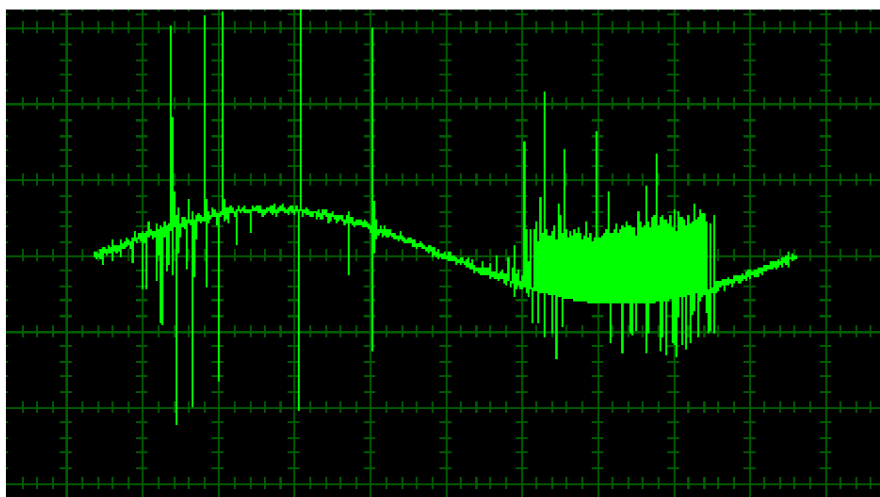
Měření laboratorní úlohy probíhalo na měřicím přípravku s namontovanými ostrými hroty vůči sobě. Přiložené zkušební napětí bylo 30kV.

### 7.1 Grafické závislosti

Programem DDX-7000 bez využití analyzačního modulu byly zaznamenány průběhy částečných výbojů v eliptickém (Obr. 7.1) a sinusovém (Obr. 7.2) zobrazení. Z těchto průběhů lze snadněji určit typ výboje, protože se jedná o stejné druhy průběhů, kterými jsou jednotlivé typy reprezentovány (viz kap. 3.2)

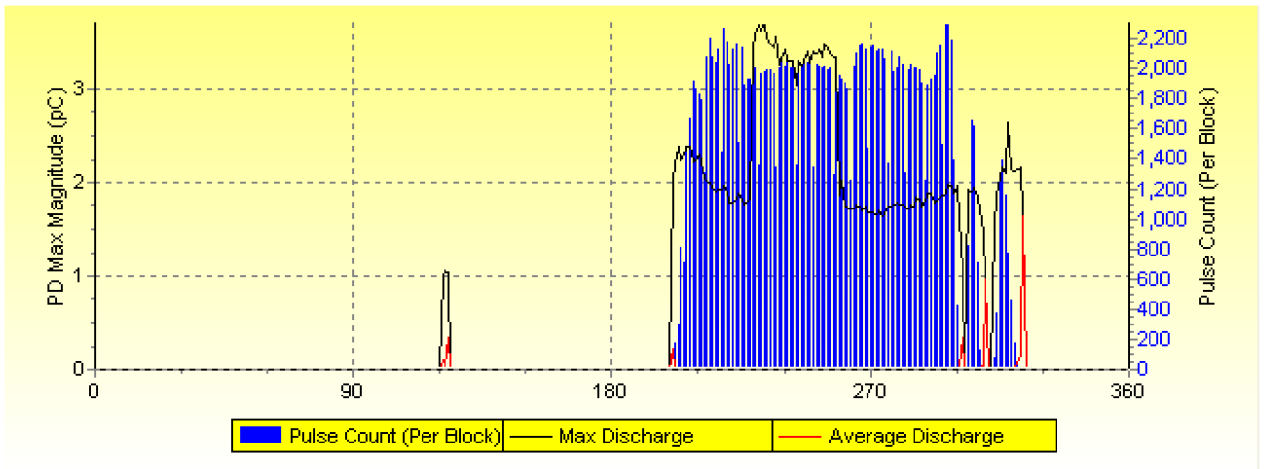


Obr. 7.1: Naměřené částečné výboje v eliptickém zobrazení

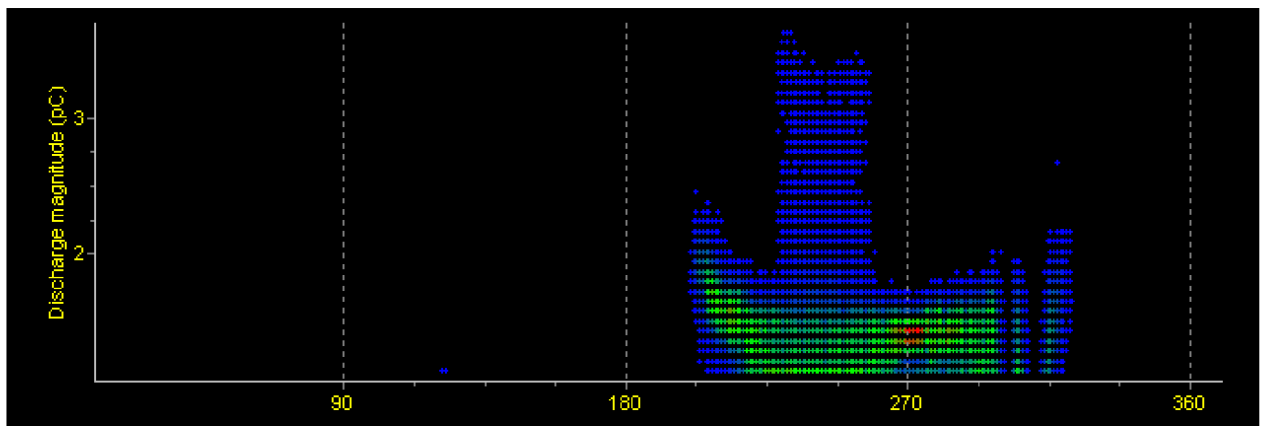


Obr. 7.2: Naměřené částečné výboje v sinusovém zobrazení

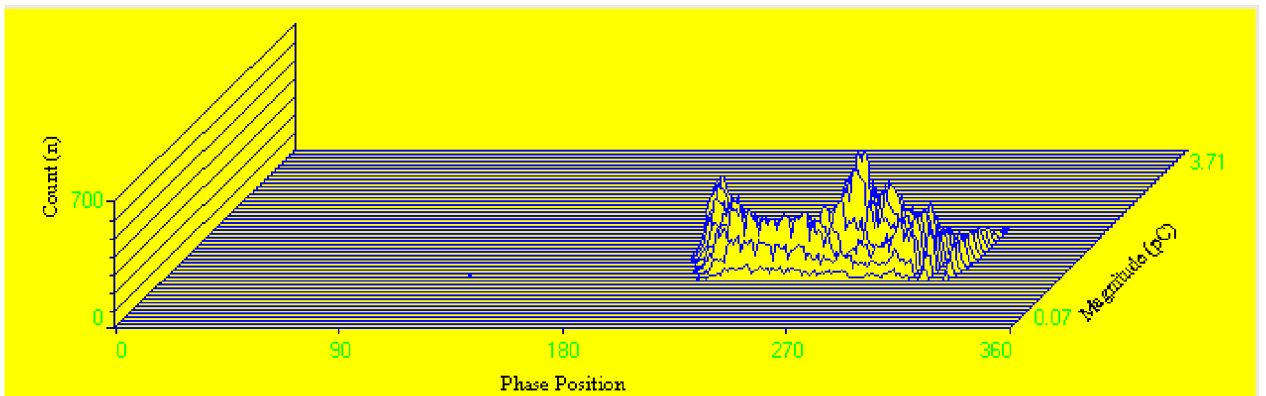
Z analyzačního modulu byly zaznamenány průběhy na Obr. 7.3 - Obr. 7.6. Průběhy na Obr. 7.3, Obr. 7.4 a Obr. 7.5 vyjadřují velikosti a počty impulzů částečných výbojů v závislosti na fázi napájecího napětí. Na Obr. 7.6 je zaznamenán časový průběh velikosti částečných výbojů.



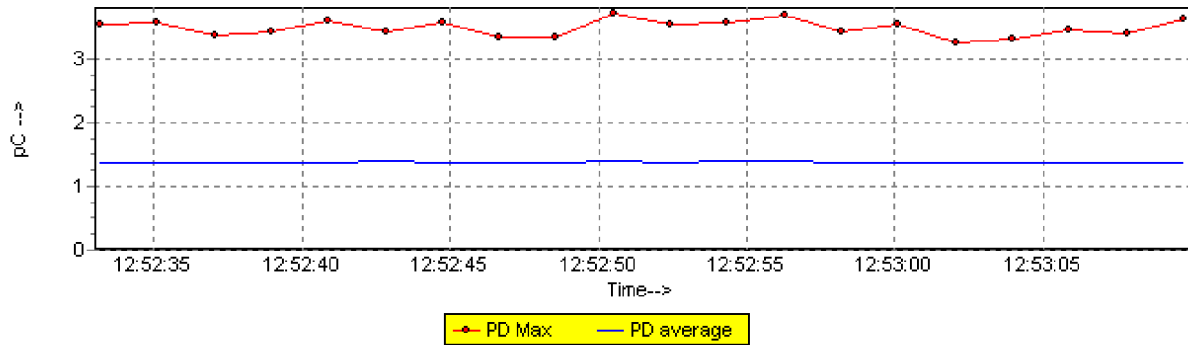
Obr. 7.3: Zobrazení naměřených částečných výbojů v závislosti na fázi napájecího napětí



Obr. 7.4: Zobrazení naměřených částečných výbojů v závislosti na fázi napájecího napětí



Obr. 7.5: Zobrazení naměřených částečných výbojů v závislosti na fázi napájecího napětí



Obr. 7.6: Maximální a průměrná velikost částečných výbojů

## 7.2 Závěr

Naměřené průběhy při porovnání s teoretickými průběhy jednotlivých druhů částečných výbojů potvrzují, že se jedná o částečný výboj typu A. Tedy vnější částečný výboj mezi ostrými hranami v plynném izolantu. U tohoto typu výboje se jsou pulzy umístěny rovnoměrně kolem vrcholu půlperrody, v závislosti na přiloženém napětí, tedy kolem  $90^\circ$  nebo  $270^\circ$ . V případě našeho zapojení se mají pulzy vyskytovat v okolí  $270^\circ$ . Skutečná poloha naměřených impulzů je od  $200^\circ$  do  $320^\circ$ . Impulzy tedy nejsou rozmístěny rovnoměrně přesně podle vrcholu půlperrody, ale střed mají přibližně v  $260^\circ$ , což tedy přibližně odpovídá teoretickým předpokladům. Průměrná velikost impulzů byla  $1,4 \text{ pC}$  a maximální hodnota  $3,5 \text{ pC}$ . Velikost všech impulzů nebyla tedy stejná jak je u tohoto typu předpokladem, tento jev ale pravděpodobně vznikl vnějším rušením, které se při kalibraci neprojevalo.

## 8 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byla v první části shrnuta teorie týkající se částečných výbojů. V kapitole 2 jsou popsány jednotlivé typy částečných výbojů. U vnitřních a povrchových výbojů (kapitola 2.1) jsou uvedeny dva základní modely sloužící pro modelování částečných výbojů. Jedná se o Gemant-Philippovův model označovaný též jako trojkapacitní a Böningův model (pětikapacitní). Böningův model je přesnější pro modelování výbojové činnosti, protože uvažuje, že na výbojové činnosti se nepodílí pouze plocha dutinky, ale i okolí dutinky. V kapitole 2.2 jsou popsány vlivy, kterými působí částečné výboje na izolant. Mezi tyto vlivy patří elektro-erozivní, chemické, tepelné účinky a účinky záření a lokálního zvýšení elektrického pole na konci výbojového kanálu neboli treeing.

V kapitole 3 jsou popsány veličiny vztahující se k částečným výbojům a obrazce částečných výbojů. Veličiny jsou používány pro hodnocení výbojové činnosti. Obrazce jsou používány pro určení druhu a zdroje výbojové činnosti. Obrazce (kapitola 3.2) jsou zobrazovány ve formě Lissajousových obrazců, kde proudové impulzy jsou superponovány na napájecí napětí. Podle fázového úhlu umístění částečných výbojů na napájecím napětí lze určit druh a místo vzniku částečných výbojů.

Detekce výbojové činnosti je možná elektrickými i neelektrickými metodami. Elektrické metody uvedené v kapitole 4.1, pracují na principu snímání proudového impulsu vyvolaného částečnými výboji. Tyto impulzy lze detekovat přímo zapojením měřeného objektu do měřicího obvodu, nebo nepřímo měřením elektromagnetického pole vyvolaného těmito impulzy. Neelektrické metody (kapitola 4.2) jsou založeny na sledování neelektrických projevů částečných výbojů. Mezi tyto projevy patří světelné a zvukové efekty, vznik chemických zplodin a vývin tepla.

Kapitola 5, se zabývá měřicím přístrojem Hipotronics DDX-7000, na kterém probíhá měření navržené laboratorní úlohy. Kromě popisu zařízení, je zde vytvořen návod na obsluhu počítačového programu (kapitola 5.4), dodávaného k měřicímu přístroji, program nese stejný název jako přístroj DDX-7000. Tento program slouží k nastavení přístroje, k záznamu dat a jejich zpracování a vyhodnocení. V návodu jsou popsány nejdůležitější části programu včetně vysvětlení jejich funkce.

V praktické části diplomové práce (kapitola 6) byla navržena, realizována a odměřena laboratorní úloha. Jedná se o demonstrativní měření částečných výbojů. Cílem navržené úlohy je přiblížení problematiky částečných výbojů, nutných opatření a postupů doprovázející samotné měření v oblasti hodnocení kvality izolačních systémů.

Úkolem úlohy je z naměřených dat určit, o jaký druh částečného výboje se jedná a zda naměřené charakteristiky odpovídají teoretickým průběhům. V úloze byl zvolen typ částečného výboje typu A, jedná se o vnější částečný výboj v plynech mezi ostrými kovovými hroty nebo hranami. Tento typ výboje je typický pro málo nebezpečné výbojové činnosti, zvláště pro částečné výboje ve vzduchu.

Tento druh měření a vyhodnocení dat byl zvolen z důvodu své jednoznačnosti a názornosti. Způsob měření částečných výbojů v závislosti na napětí nebyl zvolen, protože tento způsob

vyžaduje dlouhodobé i několikaleté měření na daném zařízení pro konstatování změn vlastností izolačního systému. V případě, že by vyhodnocování dat probíhalo porovnáváním hodnot se stejným nebo podobným typem zařízení, bylo by pak z většího počtu vzorků možné hodnotit kvalitu izolačního systému.

Při návrhu laboratorní úlohy bylo nejprve nutné správně zprovoznit měřicí systém, jehož hlavním krokem je kalibrace. Zprovoznění měřicího systému bylo znemožňováno rušením v podobě signálu HDO z blízké rozvodny Medlánky v průběhu kalibrace systému. Při kalibraci, která se skládá z několika kroků měření šumu pro výpočet správného kalibračního koeficientu, byly často vysílány právě signály HDO, které neumožnily správné dokončení kalibračního postupu. Tento problém se zavlečením rušivých signálu z napájecí sítě byl vyřešen namontováním filtru na odrušení frekvence HDO na vstup do trafostanice laboratoře.

Dalším problémem, který komplikoval provádění kalibrace, bylo nedokonalé vzájemné zemní pospojování měřicího přístroje ve velině a měřicího obvodu v laboratoři. Ke zlepšení stavu došlo až po použití vodiče pospojování o větším průřezu.

Po odstranění těchto dvou problémů již bylo možné provádět kalibraci. Přesto nahodile docházelo ke stavům, kdy nebylo možné kalibraci dokončit. Tento stav nastával přibližně v 10 % případů kalibrace měřicího systému, zdroj těchto příčin se nepodařilo objevit. V případě neúspěšného provedení kalibrace byla opakovaná kalibrace úspěšná obvykle až po uplynutí přibližně 30 minut. V běžném provozu je pak nutné věnovat patřičnou pozornost kvalitě pospojování částí systému ve velínu a zkušebně.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 60270:2001. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů.*
- [2] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení.* Praha: BEN - Technická literatura, 2008, 439 s.. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] HAVLÍČEK, Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech.* Brno: 2009. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy.* Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s.. ISBN 80-7300-189-6.
- [5] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů.* Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [6] KLÜSS, Joni. *Gas insulation.* 2013 [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-18.3150/luennot/S-18\\_3150\\_lecture\\_3.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-18.3150/luennot/S-18_3150_lecture_3.pdf)
- [7] TRNKA, Pavel, Josef PIHERA a Martin ŠIRŮČEK. Elektrické stromečky - fenomén v elektroizolačních materiálech. *Elektro.* č. 1/2010 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/vyhledavani-vysledek/elektricke-stromecky-%E2%80%93-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech-40272.html>
- [8] HIPOTRONICS. *DDX-7000 User's guide.*
- [9] HIPOTRONICS. *DDX-8003 User's guide.*
- [10] HIPOTRONICS. *DDX Analysis module: Advance analysis module.*
- [11] HIPOTRONICS. *DDX 7000 & 8003 Digital Partial Discharge Detectors.*
- [12] HIPOTRONICS. *Partial Discharge.*
- [13] HEAFELY TEST AG. *Wiring diagram TU Brno.*