

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody odhalování částečných výbojů v kondenzátorech

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek SLÁMA**
Osobní číslo: **E13B0145P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Metody odhalování částečných výbojů v kondenzátorech**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište typy částečných výbojů, jejich vznik a vliv na životnost izolace elektrických zařízení.
2. Popište jednotlivé metody měření částečných výbojů vhodných k detekci a lokalizaci v zařízeních s pevnou a s kombinovanou pevnou a kapalnou izolační složkou.
3. Proveďte rešerši technických požadavků uvedených v normách týkajících se částečných výbojů, jejich měření a lokalizace.
4. Proveďte průzkum v současnosti komerčně/dostupných analyzátorů částečných výbojů. Pro tato zařízení proveďte jejich technický popis a proveďte srovnání technických parametrů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. Mentlík, V. et al. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. Veverka, A. Technika vysokých napětí: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966. 277, Řada elektrotechn. literatury.
4. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore apod.).
5. Technické normy a standardy (ČSN, IEC, apod.).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Hornak**


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato práce je věnována problematice částečných výbojů se zaměřením na kondenzátory. Definuje základní veličiny charakterizující chování částečných výbojů, komplexně srovnává jednotlivé metody detekce a přináší ucelený přehled o komerčně dostupných měřicích systémech. Tento přehled je doplněn o praktické srovnávací měření na dvou vybraných měřicích systémech. Nemalá pozornost je věnována také normám pro měření částečných výbojů.

Klíčová slova

Částečné výboje, kondenzátor, analyzátor částečných výbojů, měřicí systémy, Doble Lemke, lokalizace částečných výbojů, dielektrikum.

Abstract

The bachelor thesis is devoted to problematics of partial discharge focusing on condensers. The main quantifiers characterising the partial discharge actions are defined, the individual methods of detection are compared complexly and the commercially available measuring devices are summarized entirely. This summary is complemented with an actual compared measuring of two selected measuring devices. The norms for measurement of the partial discharge are referred as well.

Key words

Partial discharges, partial discharge analyzer, capacitor, measuring systems, Doble Lemke, localization of partial discharges, dielectric breakdown, degradation of insulation.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2017

Marek Sláma

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Hornakovi a panu Ing. Josefovi Piherovi Ph.D. za čas strávený konzultacemi, ale i za dobu strávenou výjezdem za účelem vypracování mé práce, dále pak za připomínky, doporučení a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 PROBLEMATIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	11
1.1 DĚLENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ DLE MÍSTA VZNIKU	11
1.2 TYPY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	13
1.3 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE A JEJICH PARAMETRY	15
1.3.1 Parametry vztahující se k pulzům částečných výbojů	15
1.3.2 Napětí v souvislosti s částečnými výboji	16
2 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	17
2.1 NEELEKTRICKÉ METODY	17
2.2 ELEKTRICKÉ METODY	17
2.2.1 Galvanická metoda	18
2.2.2 Kapacitní a induktivní snímače	20
2.2.3 Měření Lemke sondou	23
3 KOMERČNĚ DOSTUPNÉ ANALYZÁTORY	23
3.1 BATERIOVÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	23
3.2 LABORATORNÍ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	25
4 TECHNICKÉ POŽADAVKY NOREM	32
4.1 ČSN EN 60270	32
4.2 ČSN 60060-1	32
4.2.1 Zkoušky se střídavým průběhem napětí	32
4.3 ČSN EN 60060-2	33
4.4 ČSN EN 60060-3	33
4.5 ČSN CLC/TS 60034-27	33
4.6 ČSN EN 60664-4	33
4.7 ČSN EN 2591-227	34
4.8 ČSN EN 60512-4-2	34
4.9 ČSN EN 60885-2	34
5 VLASTNÍ TESTOVACÍ MĚŘENÍ	35
5.1 DOBLE LEMKE PD SMART	35
5.2 POWER DIAGNOSTIX ICM SYSTEM	40
ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na princip vzniku částečného výboje. Pozornost je věnována částečným výbojům v kondenzátorech. Kondenzátor je jednou ze součástí, které jsou využívány v elektrotechnice. Podnětem pro vznik práce jsou vysoké požadavky trhu na životnost součástí v systémech vysokého napětí. Z tohoto důvodu potřebujeme znát všechny děje, které by mohly zapříčinit zkrácenou životnost těchto součástí – v tomto případě kondenzátorů a jedním takovým důvodem může být právě jev částečných výbojů. Jev částečných výbojů byl i prakticky změřen na více modelech. Při měření byly otestovány dva měřicí systémy a to - Doble Lemke PD smart a Power diagnostix ICMsystem. V kondenzátorech jsou částečné výboje parazitními jevy. Z tohoto důvodu se je snažíme detekovat, lokalizovat a předcházet jejich vzniku.

Práce se v první části zabývá teorií částečných výbojů, příčinou jejich vzniku v izolačních systémech a jejich dělením dle místa vzniku. Částečné výboje jsou zde rozděleny také dle jejich projevu na několik základních typů a tyto typy jsou zde popsány. Dále nás kapitola seznamuje s pojmy, které se vztahují k tématice částečných výbojů. Jsou zde vypsány veličiny a jejich jednotky dle normy ČSN EN 60270. Ve druhé části práce jsou popsány jednotlivé měřicí metody a principy, se kterými tyto metody pracují. Měřicí metody jsou také rozděleny dle toho, jaké veličiny využívají při měření výbojové aktivity. Dále je rozděleno měření dle průběhu zkoušek na on-line měření a na měření off-line. Třetí část seznamuje čtenáře s používanými a na trhu dostupnými měřicími systémy. Jsou zde, jak menší přenosné systémy, tak i větší a dražší systémy pro detekci částečných výbojů v laboratorních podmínkách. Čtvrtá kapitola je věnována normám vztahujícím se k problematice měření částečných výbojů. Kapitola pátá obsahuje vlastní testovací měření na školních modelech pro měření částečných výbojů. Bylo k dispozici několik uspořádání a měřeno bylo na dvou odlišných měřicích systémech. Závěr práce je věnován pohledu autora na současný trh a na práci s těmito měřicími systémy.

Seznam symbolů a zkratek

$\check{C}V$	Částečný výboj
VN	Vysoké napětí
q	Zdánlivý náboj
q_{ev}	Skutečný náboj částečného výboje
φ_i	Fázový úhel částečného výboje
t_i	Čas výskytu částečného výboje
N	Četnost impulzů
I	Střední proud částečných výbojů
T	Časový interval
D	Střední kvadratický součet
Q	Součtový výboj
P	Výkon částečných výbojů
U_i	Zapalovací napětí
U_e	Zhášecí napětí
T_1	Doba trvání čela pulzu
T_2	Doba trvání pultýlu pulzu
Z_m	Měřicí impedance
Z_m^*	Měřicí impedance
Δf	Šířka pásma
f_1	Dolní mezní frekvence
f_2	Horní mezní frekvence
E	Intenzita elektrického pole
ϵ	Permitivita prostředí
H	Intenzita magnetického pole
M	Permeabilita prostředí
U_{pd}	Signál částečného výboje
RC	Vstupní část zesilovače náboje
C_1	Kapacitní snímač
C_0	Kapacita mezi snímačem a zkoušeným objektem
C_2	Vstupní kapacita zesilovače
R_m	R_m vstupní odpor zesilovače
u_2	Výstupní napětí
i_1	Primární proud
i_2	Sekundární proud
L_2	Vlastní indukčnost cívky
M_{21}	Vzájemná indukčnost cívky
B	Magnetická indukce
dB	Decibel

1 Problematika částečných výbojů

Současný trh vyžaduje od vysokonapěťových systémů vysokou spolehlivost a dlouhou životnost. Z tohoto důvodu je nutné, aby výrobci těchto součástek dobře znali všechny děje, které mohou zapříčinit poruchu VN systémů a mít tak vliv na dobu jejich životnosti. Jednou z možných příčin zkrácené životnosti elektrických zařízení je jev částečných výbojů. Částečné výboje jsou parazitní jevy vznikající v izolačních systémech. Izolace, ve které dochází k částečným výbojům, může mít s postupem času narušenou elektrickou pevnost. ČV obvykle vedou k erozi či „růstu elektrického stroměčku“ (electrical treeing [1]) v materiálu, což může mít za následek naprosté selhání objektu [2]. Měření částečných výbojů (ČV) se používá jako citlivý prostředek hodnocení kvality. Měření ČV umožňuje určit slabá místa izolačního systému [3]. ČSN definuje částečný výboj jako „*Lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostí izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče*“ [4].

Výskyt částečných výbojů je častý v místech, kde jsou dielektrické vlastnosti materiálů nehomogenní (většinou plynové dutinky v pevném dielektriku nebo bubliny v kapalném dielektriku). ČV se projevují jako impulzy s dobou trvání výrazně kratší než 1 μs [5]. Zvýšená intenzita lokálního elektrického pole způsobuje nadměrné elektrické namáhání a může dojít k lokálnímu částečnému průrazu. Tento průraz je pouze částečný, nemá za následek úplný průraz. V izolačním systému zabraňuje vzniku úplného průrazu mimo jiné i slída. Částečné výboje mohou nastat tehdy, když intenzita lokálního elektrického pole každé nehomogenity překročí průraznou intenzitu pole. Tento proces může mít za následek četné impulzy ČV během jednoho cyklu přiloženého napětí [3]. V případě, že jsou vnitřní dutinky malé a výrazně se nezvětšují, není provozní spolehlivost omezena. Vlivy ČV na dielektrikum mají elektrický, erozivní, chemický a tepelný charakter [5].

1.1 Dělení částečných výbojů dle místa vzniku

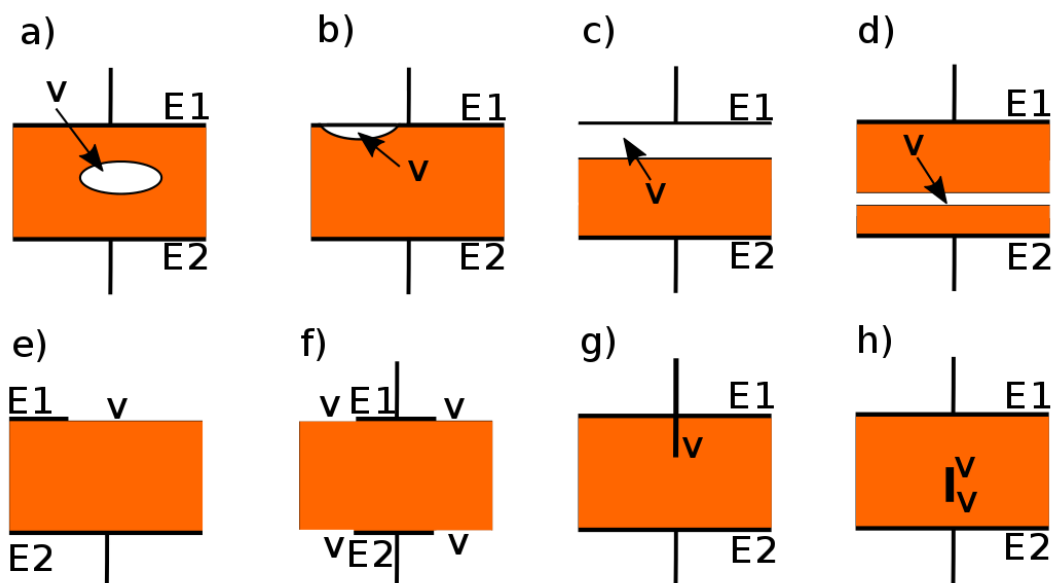
Částečné výboje dle místa výskytu rozdělujeme na [3, 5]:

- **Vnější částečné výboje** - vznikají v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení, jako např. doutnavé a korónové výboje.
- **Vnitřní částečné výboje** - jsou výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, jako např. výboje v plyných dutinkách v pevném dielektriku. I když jsou výrobní procesy navrhovány tak, aby se minimalizoval výskyt vnitřních dutinek, určitý počet dutinek nevyhnutelně existuje.
- **Povrchové částečné výboje** - nacházejí se v okolí elektrod na rozhraní pevného a plyného dielektrika, jsou jimi např. klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky

v točivých strojích, průchodkách apod.

Poznámka: „Koróna“ = forma ČV, který se tvoří v plynném prostředí kolem vodičů vzdálených od pevné nebo kapalně izolace [4].

Na obrázku *Obr. 1* jsou zobrazeny částečné výboje na různých místech v elektrodovém uspořádání. Elektrody jsou označeny písmeny **E1**, **E2** a místo výboje písmenem **v**. Příklad **a**) znázorňuje pevný izolant s plynnou dutinkou v objemu dielektrika. Bod **b**) zobrazuje výboj v oblasti pod elektrodou. Mezery vzniklé při delaminaci vrstev pevného izolačního materiálu jsou znázorněny body **c**) a **d**) [6]. Delaminace může být způsobena nedokonalým vytvrzováním izolačního systému během výroby nebo nadměrným mechanickým či tepelným namáháním během provozu. Velké dutinky se mohou vyvinout na velké ploše a mají za následek výboje o relativně vysoké energii, které mohou významně napadat izolaci. Delaminace snižuje tepelnou vodivost izolace, což může způsobit urychlené stárnutí nebo dokonce tepelný lavinový jev [3, 7]. Klouzavé elektrické výboje znázorňují body **e**) a **f**). Vlivem vnitřní výbojové činnosti může dojít až k růstu takzvaného „elektrického stroměčku“ (electrical treeing [1]), příčinou může být použití jehlové elektrody – případ **g**) nebo např. příměs nečistot ve vnitřní struktuře materiálu – případ **h**) [8].



Obr. 1 Případy vnitřních a povrchových částečných výbojů (překresleno z: [8])

1.2 Typy částečných výbojů

Druh výbojové činnosti a zdroje ČV určíme dle jejich umístění na eliptické křivce napájecího napětí, tj. podle fázového úhlu ČV. Lze rozlišit několik základních typů ČV. Na analogových měřicích systémech je pozice fázového úhlu výskytu ČV zobrazována jako superpozice proudových impulzů na sinusovce napájecího napětí ve formě Lissajousových obrazců. Příchod digitální techniky upřednostňuje zobrazení výbojové činnosti na rozvinuté periodě zkušebního napětí. Pět základních typů ČV rozlišují obrazce zobrazené jako Lissajouseovy obrazce uvedené v tab. 1 [5, 9].

Tab. 1: Typy částečných výbojů [5, 9]

typ	osciloskopický obraz	popis výboje	typ výboje
A		Shodné pulzy symetrické okolo amplitudy jedné půlvlny napájecího napětí. Vyšší napětí znamená také vyšší počet pulsů. Při vyšším napětí pulzy ve druhé půlvlně.	Vzniká v okolí ostrého hrotu nebo hrany. Uspořádání hrot-deska v plynech. Je-li hrot na vysokém potenciálu, pulzy se objevují v záporné půlvlně. Hrot na zemním potenciálu znamená pulzy v kladné půlvlně.
B		Pulzy symetrické okolo napěťových maxim, v obou půlvlnách. V jedné půlperiodě pulzy větší, ve druhé menší. Počet pulsů roste s napětím.	Uspořádání hrot-deska v kapalném dielektriku. Je-li hrot na vysokém potenciálu, pulzy jsou v kladné půlvlně, je-li hrot uzemněn, pulzy jsou v záporné půlvlně.
C		Pulzy v kladné i záporné půlvlně, na fázi mezi nulou a maximem zkušebního napětí. V obou půlvlnách mají pulzy přibližně stejnou velikost.	Vzduchové dutinky v pevném i kapalném dielektriku. Objevuje se při dotyku dvou izolovaných vodičů. Výboje na povrchu bez galvanického spojení jako klouzavý výboj nebo na neuzemněné kovové části měřícího obvodu.
D		Pulzy v kladné i záporné půlvlně na fázi mezi nulou a maximem zkušebního napětí. V jedné z půlvln jsou pulzy vyšší a ve druhé nižší.	Tvoří se uvnitř dutin mezi dielektrikem (pevným nebo kapalným) a elektrodou nebo se projevují jako vnější výboje mezi povrchem dielektrika a vodičem. Objevují-li se větší pulzy v kladné půlvlně, jsou výboje na vysokém potenciálu. Objevují-li se naopak větší výboje v záporné půlvlně, jsou výboje na potenciálu země.
E		Projevují se jako šum symetricky rozmístěn v okolí bodu, kdy zkušební napětí prochází nulou.	Objevují se ve spojení kovových částí nebo mezi polovodivými vrstvami.

1.3 Veličiny charakterizující částečné výboje a jejich parametry

Aby bylo možné jednoduše kvantifikovat projevy částečných výbojů, byly zavedeny charakteristické veličiny. Tyto veličiny užívané pro vyhodnocování základních parametrů výbojové činnosti definuje norma ČSN EN 60270 [5].

Impulz částečného výboje

Je výsledkem přítomnosti ČV ve zkoumaném objektu, projevuje se jako proudový nebo napěťový impulz. Je měřen za pomoci vhodných detekčních obvodů [4].

1.3.1 Parametry vztahující se k pulzům částečných výbojů

Zdánlivý náboj q (apparent charge)

Je základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování částečných výbojů. Takový unipolární náboj, který, je-li injektován ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu v předepsaném zkušebním obvodu, by měl na měřicím přístroji způsobit stejnou výchylku jako vlastní proudový impulz ČV. Tento náboj není roven skutečnému náboji q_{cv} , který je přenesen skutečným částečným výbojem a nemůže být měřen přímo. Zdánlivý náboj je obvykle vyjádřen v pikocoulombech [pC] [4, 5].

Četnost impulzů n (pulse repetition rate)

Poměr mezi celkovým počtem impulzů ČV, zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu. V praxi se uvažují pouze pulzy větší než je minimální předepsaná velikost nebo pulzy, které se nacházejí v intervalu předepsaných velikostí [4, 5].

Fázový úhel φ_i a čas výskytu impulzu částečného výboje t_i (phase angle Φ_i and time t_i occurrence of a Partial discharge pulse)

Fázový úhel Φ_i impulzu je popsán vztahem (1).

$$\varphi_i = 360 \cdot \frac{t_i}{T} [^\circ], \quad (1)$$

Čas t_i zde reprezentuje čas měřený mezi předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem částečného výboje. T je perioda zkušebního napětí [5, 9].

Střední proud částečných výbojů I (average discharge current)

Jde o integrální veličinu. Patří mezi odvozené veličiny a vyjadřuje součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T , děleno tímto intervalem. Udává se v jednotkách $C \cdot s^{-1}$ popř. A. Popisuje jej vztah (2) [5, 9].

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

Střední kvadratický součet D (quadratic rate)

Jde o odvozenou veličinu. Je součet kvadrátů ploch jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T dělený tímto intervalem [4].

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

Výkon částečných výbojů P (discharge power)

Patří mezi odvozené veličiny, reprezentuje střední výkon impulsu dodávaný na svorky zkoušeného objektu způsobený hodnotami zdánlivého náboje q_i během zvoleného časového intervalu T [4].

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

1.3.2 Napětí v souvislosti s částečnými výboji**Zapalovací napětí částečných výbojů U_i (partial discharge inception voltage U_i)**

Představuje přiložené napětí, při kterém jsou ve zkoušeném objektu poprvé zaznamenány opakující se ČV a to v případě, že je napětí připojené na zkoušený objekt postupně zvyšováno z hodnoty, při které nevznikají žádné ČV [4, 9].

Zhášecí napětí částečných výbojů U_e (partial discharge extinction voltage)

Představuje přiložené napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají nacházet opakující se ČV a to v případě, že je napětí připojené na zkoušený objekt postupně snižováno z hodnoty vyšší, při které je možné ČV pozorovat [4, 9].

Zkušební napětí částečných výbojů (partial discharge test voltage)

Předepsaná hodnota zkušební napětí, při které na zkoušeném objektu nebudou vznikat částečné výboje vyšší úrovně, než je jejich předepsaná [4].

2 Metody měření částečných výbojů

Metody pro měření ČV jsou různé, a to jak elektrické tak i neelektrické. Tyto metody mají samozřejmě své výhody i nevýhody. On-line měření – tzn. měření, při kterém není nutné odstavit měřené elektrické zařízení a off-line měření – při kterém je nutné měřený objekt odpojit [5].

2.1 Neelektrické metody

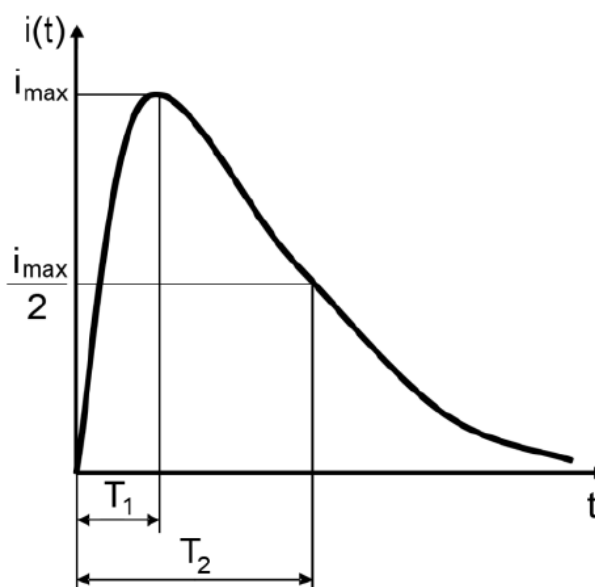
Částečné výboje se projevují vyzařováním spektra světla jak viditelného, tak i ultrafialového, zvukových vln a také chemických zplodin, tohoto je využito v některých měřících metodách [5].

Příklady neelektrických metod [5]:

- akustické,
- optické,
- chemické,
- termoelektrické.

2.2 Elektrické metody

Měří proudové impulzy, které vznikají vlivem zapalování impulzů ČV a jsou úměrné velikosti ČV. Vyhodnocování těchto impulzů je základem všech elektrických metod. Na obrázku *Obr. 2* je vyobrazen tvar ideálního proudového impulzu ČV.



Obr. 2 Proudový impulz částečného výboje (převzato z: [8])

Plocha pod křivkou $i(t)$ zde odpovídá náboji q a platí vztah (5).

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

V pevných izolačních systémech mají impulzy dobu čela T_1 několik ns a dobu půltýlu T_2 desítky ns. U kapalných izolačních systému bývá T_1 okolo 1 μ s a T_2 více μ s [8].

Příklady elektrických metod [9]:

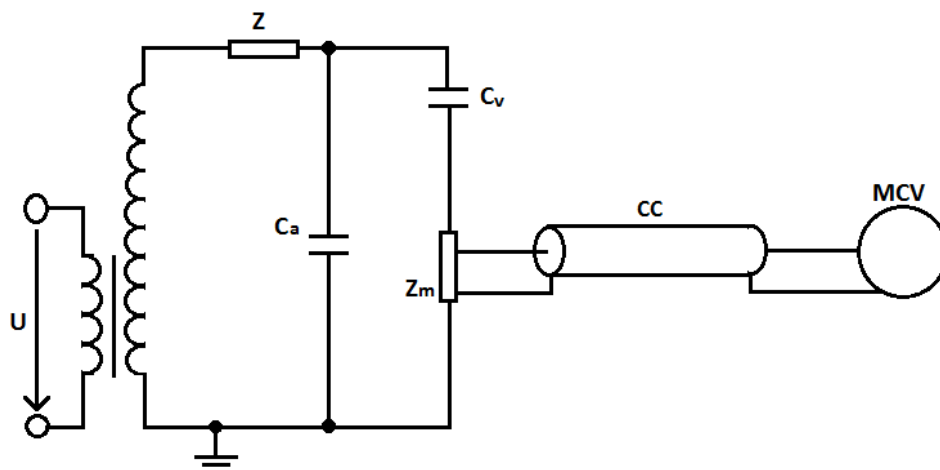
- galvanické metody,
- akustická analýza,
- amplitudová analýza.

Tyto metody se dále dělí na globální a lokalizační měření. Globální měření ověřuje celý zkoumaný objekt. Toto měření vypovídá o celkovém stavu izolace. Úkolem lokalizačního měření je najít místo výskytu ČV ve zkoumaném objektu [5]. Jediná metoda měření nestačí k tomu, abychom získali všechny informace potřebné k posouzení stavu izolačního systému. To je důvodem, proč musíme používat více měřících metod [5, 8].

2.2.1 Galvanická metoda

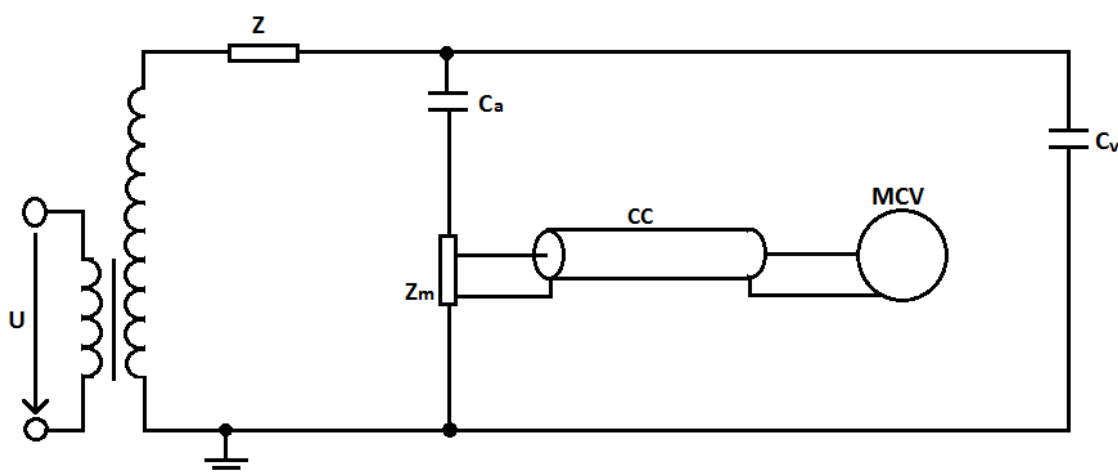
Jde o přímou metodu měření globálního typu. Založena je na měření proudových impulzů ČV na snímací indukčnosti. Galvanická metoda vyhodnocuje tzv. zdánlivý náboj, tento náboj není možné změřit přímo. Ve většině případů představuje měřící impedanci RLC člen s ochrannými prvky jako jsou například bleskojistky. Jeho účelem je oddělení výbojů superponovaných na napájecím napětí od napájecí frekvence. Norma ČSN 60270 definuje tři základní zapojení pro přímé měření částečných výbojů. Obrázky *Obr. 3, 4, 5* vyobrazují tři základní zapojení pro měření částečných výbojů. Napájecí obvod je zde vyznačen písmenem U, C_a představuje objekt měření, C_v je vazební kapacita (VN kondenzátor), Z_m značí měřící impedanci a MCV měřič částečných výbojů. Impedance Z bývá být v měřících obvodech použita k zamezení vlivu zdroje a k omezení průchodu impulzů, jejichž příčinou jsou výboje ve VN zdroji. Dimenzování vazebního kondenzátoru podléhá velikosti testovacího napětí. V tomto kondenzátoru nesmějí být jeho vlastní částečné výboje, jeho kapacita by měla být co největší v porovnání s rozptylovou kapacitou měřícího obvodu. [5, 9].

Na obrázku *Obr. 3* je zapojena impedance na větvi vazebního kondenzátoru. Tento typ zapojení je využíván velmi často. Toto zapojení umožňuje měření uzemněných objektů a objektů s velkou kapacitou. Zapojení měří impulzy ČV, aniž by vznikalo nebezpečí průrazu měřeného objektu [5, 8].



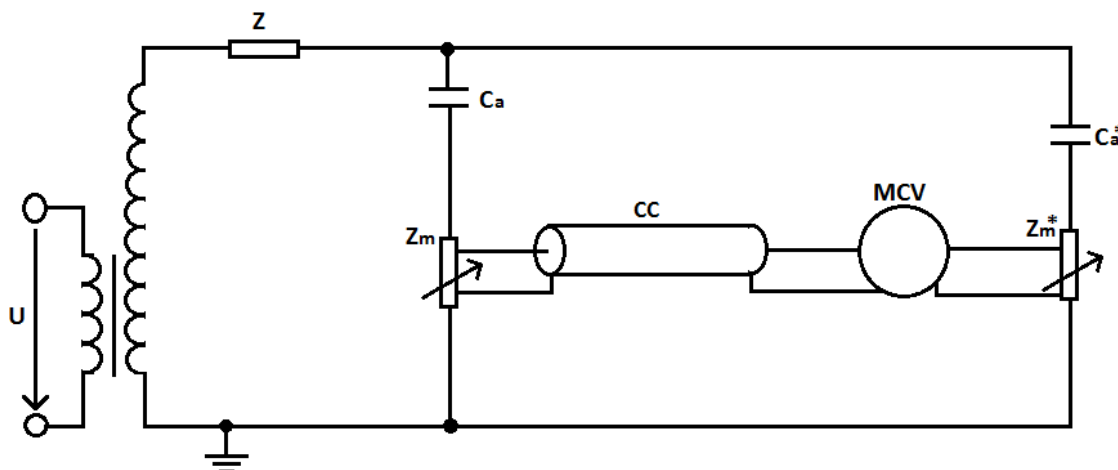
Obr. 3 Zapojení zkušební obvodu s paralelní snímací impedancí (překresleno z: [5])

Obrázek *Obr. 4* představuje druhý typ zapojení a to se sériovou snímací impedancí. Používá se tam, kde je možné testovaný objekt odpojit od země. Citlivost tohoto obvodu je větší než v paralelním zapojení. Rozptylové kapacity jsou paralelně připojené k vazebnímu kondenzátoru C_v a tím zvyšují citlivost zapojení [5, 8].



Obr. 4 Zapojení zkušební obvodu se sériovou snímací impedancí (překresleno z: [5])

Můstkové zapojení (*Obr. 5*) se používá tam, kde očekáváme výskyt rušivého pole. Ve srovnání se zapojením na obrázku (*Obr. 4*) je zde potřeba použít dvě nastavitelné impedance. Tyto impedance snímají rozdílové proudové impulzy. Vazební kondenzátor může být nahrazen měřeným objektem se známou hladinou ČV [5, 8].



Obr. 5 Můstkové zapojení zkušebního obvodu (překresleno z: [5])

Norma ČSN EN 60270 rozděluje měřicí impedance podle šířky pásma na úzkopásmové, širokopásmové a ultra širokopásmové. Hodnoty $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$, $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$ pro úzkopásmové měřicí systémy a $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$, $30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$, širokopásmové $f_2 \leq 500 \text{ kHz}$.

Galvanická metoda disponuje vysokou citlivostí, možností on-line měření a malým ohrožením izolačního systému. Mezi nevýhody této metody patří vysoké pořizovací i provozní náklady (impedance, vazební kondenzátor), citlivost na rušení (mimo vnější rušení i rušení způsobené prvky měřicího obvodu) a nutnost cejchování přístrojů (součástky pro zpracování analogového signálu mění s postupem času parametry) [8].

2.2.2 Kapacitní a induktivní snímače

Na vznik ČV nás může upozornit vysokofrekvenční energie, kterou výboje vyzařují do okolí. Vyzářený výkon tvoří dvě složky, elektrická a magnetická. Velikost vyzářeného výkonu se vypočte ze vztahu (6).

$$w = -E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\delta E}{\delta t} - H \cdot \mu \cdot \frac{\delta H}{\delta t}, \quad (6)$$

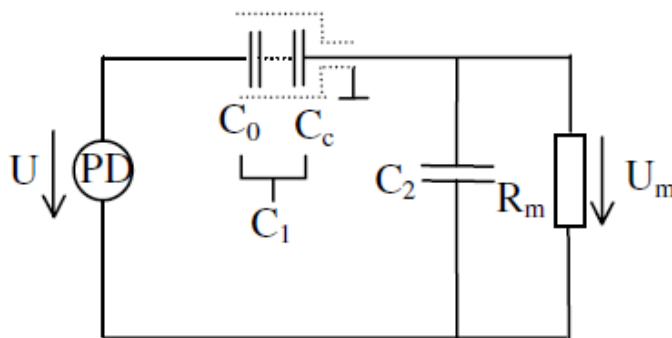
Ve vztahu počítáme s intenzitou elektrického pole E , permitivitou prostředí ε , intenzitou magnetického pole H a permeabilitou μ .

Za pomoci kapacitních snímačů dokážeme zachytit elektrickou složku výbojem vyzářované energie nebo za pomoci induktivního snímače složku magnetickou. Jde tedy o nepřímou metodu. Tato metoda je vhodná na orientační zjištění výbojové činnosti, při měření on-line. Výhodou snímačů je jejich bezpečnost pro měřicí systém, ten je chráněn před přepětím při průrazu dielektrika a nebezpečné napětí se na jeho vstup nedostane. Použití nepřímé metody přináší problém s kvantifikací hodnot, důvodem jsou nelineární průběhy

kalibračních křivek snímačů. Nevýhodou je také složitá filtrace rušivých elektromagnetických signálů [8].

Kapacitní sondy

Zaznamenají velice krátké přechodné jevy (v řádu nanosekund), z toho vyplývají požadavky na obvody zpracovávající signál a na parametry sond. Kapacitní sonda je připojena na stupu rychlého diferenciálního zesilovače, jehož signál zesiluje zesilovač s proměnným zesílením. Diferenční zesilovač by měl na svém vstupu co nejvíce potlačit vnější rušivá pole. U kapacitního senzoru je důležitá jeho frekvenční odezva. Často používaným typem kapacitního snímače je snímač s koaxiálním tvarem. Snímač je složen z úzkého kovového pásku, který je ovinut na vyšetřované místo. Princip kapacitní detekce schematicky znázorňuje obrázek *Obr. 6*.



Obr. 6 Náhradní schéma kapacitní sondy (převzato z [10])

Místo vzniku ČV vytváří elektrické pole E a magnetické pole H . Velikost těchto polí je úměrná velikosti amplitudy proudového impulzu, který odpovídá velikosti částečného výboje. Náhradní schéma je složeno ze signálu částečného výboje U_{pd} , vstupní RC části zesilovače náboje a kapacitního snímače C_1 . C_0 je kapacita mezi snímačem a zkoušeným objektem, C_k je kapacita snímače. C_2 je vstupní kapacita zesilovače a R_m vstupní odpor zesilovače [10].

Nevýhodou kapacitní sondy je, že zdroje částečných výbojů jsou odstíněné a proto nás neinformuje o přesném místě vzniku ČV. Pro měření kondenzátorů tato metoda nemusí být příliš vhodná, důvodem je, že Faradayova klec blokuje elektromagnetické záření [5, 8].

Induktivní sonda

Snímají magnetické pole vyzařované zdrojem částečných výbojů. Induktivní sondy dělíme na toroidní a lineární.

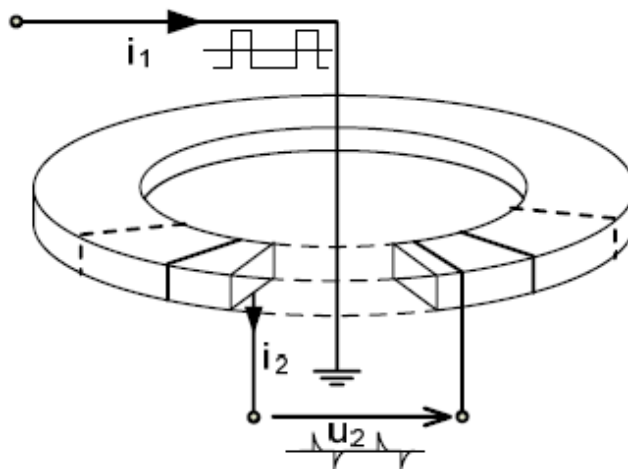
Toroidní induktivní sonda

Proudové obvody induktivních sond jsou magneticky svázané (*Obr. 7*). Vodič pracovního uzemnění tvoří primární vinutí procházející středem toroidu. Vlastní vinutí sondy je navinuto na toroid a tvoří sekundární vinutí. Jádrem toroidu tvoří magneticky měkký materiál, ten je

ideální pro práci se slabými magnetickými poli [8]. Toroid má úzkou hysterezní smyčku a snadno dojde k jeho přemagnetizování. Velikost napětí na sekundárním vinutí vypočteme vztahem (7).

$$u_2 = -i_1 \cdot R_2 - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt}, \quad (7)$$

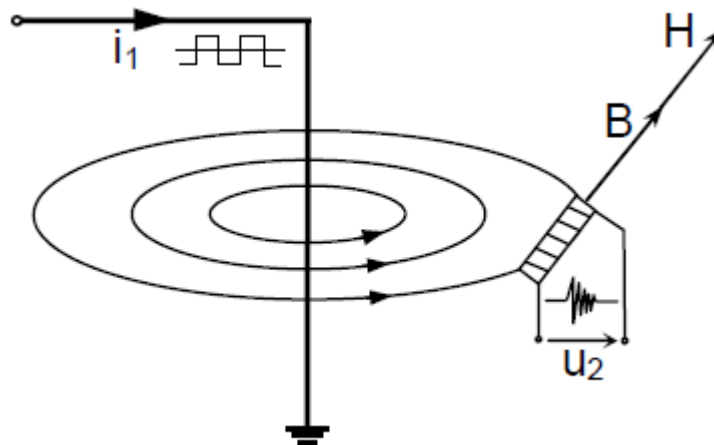
Ve vztahu je u_2 výstupní napětí, R_2 činný odpor, i_1 primární proud, i_2 sekundární proud, L_2 vlastní indukčnost cívky toroidu a M_{21} je vzájemná indukčnost mezi primárním a sekundárním obvodem. Nevýhodou toroidních sond je nutnost přerušit elektrického obvodu [8]. Pro měření kondenzátorů se tato metoda nezdá být příliš vhodná, protože kondenzátor na svých vývodech nemá zemní spojení [8].



Obr. 7 Toroidní induktivní sonda (převzato z [5])

Lineární induktivní sonda

U lineárních induktivních sond (Obr. 8) je podélná osa sondy orientovaná ve směru vektorů magnetické indukce B a vektorem intenzity magnetického pole H . Oproti toroidním sondám u sond lineárních není potřeba přerušit elektrický obvod.



Obr. 8 Lineární induktivní sonda (převzato z [5])

Induktivní snímač ochraňuje měřicí systémy před přepětím. Není zde potřeba použít měřicí impedance. Metoda induktivního snímače má nevýhodu v tom, že indukci způsobuje i vnější rušení a to může měření znehodnotit. Tato nevýhoda se částečně odstraňuje použitím toroidů o malém počtu závitů, ve kterých prochází velmi malý proud [5, 8]. Tato metoda by nás mohla informovat o možném místě vzniku ČV, z důvodu narušení elektromagnetického pole Faradayovo klecí, není ale možné spoléhat se na přesnou hodnotu číselného měření.

2.2.3 Měření Lemke sondou

Jde o kapacitní (Obr. 9) nebo induktivní sondu, která umožňuje měřit ČV bez galvanického propojení se zkoumaným objektem a proto je možné měřit i objekty v provozu. V laboratorních podmínkách je možné měřit s určitou vzdáleností od testovaného objektu. Mimo laboratorní prostředí by tato metoda mohla být vhodná spíše pro lokalizaci místa vzniku ČV, než pro určování velikosti částečných výbojů [5].



Obr. 9 Kapacitní sonda výrobce Lemke Diagnostic (převzato z [11])

3 Komerčně dostupné analyzátoři

Výrobci nabízejí měřicí systémy, které jsou přenosné, napájené z baterií a určené spíše pro orientační měření nebo měřicí systémy pevné, pro přesné měření v laboratorních podmínkách. V této kapitole jsou uvedené některé příklady nabízených měřicích systémů.

3.1 Bateriové přístroje pro měření částečných výbojů LEMKE PROBE LDP-5

Přenosná sonda ručního typu napájená z baterie [12]. Zařízení je v souladu s normou ČSN EN 60270. Jde o levný analogový měřicí systém, který může být použit pro rychlé odhalení částečných výbojů. Tento systém je vhodný spíše na měření v laboratorních podmínkách, je citlivý na rušení. Na přístroj připojujeme například kapacitní nebo induktivní sondu, UHF/VHF senzor, ultrazvukový senzor nebo měříme přímo s galvanickým spojením.

Za pomoci dvou malých kapacitních sond můžeme se sondou měřit v diferenciálním režimu (Obr. 10). Tento režim je využíván při hledání místa vzniku ČV [13].



Obr. 10 Lemke Probe LPD-5 v diferenciálním režimu (převzato z [13])

Přístroj Lemke Probe LPD-5 je navržen na měření ČV ve výkonových transformátorech a vysokonapěťových kabelech. Je navržen pro měření uzemněných objektů a z toho důvodu, není příliš vhodný pro měření kondenzátorů. Dalším problémem by mohlo být použití přístroje s kapacitními nebo induktivními snímači. Elektromagnetické pole nám může narušit jev Faradayovi klece, kterou kondenzátor vytváří.

PD-SGS

Ruční bateriový přístroj (Obr. 11) pro online monitoring částečných výbojů od společnosti Baur. Využívá kapacitního a akustického snímače. Před potenciálně postiženým místem varuje akustickou i numerickou signalizací. Na displeji můžeme přepínat mezi režimem zobrazení v reálném čase a vývojem částečného výboje po dobu 5s. Vysoce citlivý ultrazvukový snímač zaznamenaná ČV zatímco na displeji vidíme indikátor v dB [14].



Obr. 11 Baur PD-SGS (převzato z [14])

Přístroj je primárně určen pro aplikaci na středně a vysokonapěťových rozvaděcích. Jeho použití pro výkonové kondenzátory je nutné ověřit zkouškou.

3.2 Laboratorní měřící přístroje

Omicron – MPD 600

Omicron je mezinárodní společnost poskytující služby v oblasti elektroenergetiky. Od společnosti omicron je na nabízen dle výrobce vysoce propracovaný systém MPD 600. Je vhodný pro mnoho různých aplikací pro měření ČV. Analyzuje signály všech připojených měřících bodů současně. V současné době je využíván hojně mezi výrobcí kabelů, výkonových transformátorů a elektrických strojů. Je vhodný jak na detekci, tak i na lokalizaci výbojové aktivity ve vysokonapěťových komponentech. Společnost Omicron nabízí k tomuto produktu velkou řadou příslušenství např. kalibrátory, měřící impedance, vazební kapacitory nebo pulsní generátor. Disponuje vysokou vstupní impedancí pro zkušební napětí $1\text{ M}\Omega$ a $50\ \Omega$ vstupem pro signál výbojové aktivity. Pracuje se vstupní frekvencí od 0 až do 20 MHz. Dynamický rozsah zkušebního napětí je 102 dB a pro signál částečného výboje 132 dB. Měřící systém vyhovuje standardu IEC 60270. Záznam z měření může být exportován ve formě dat pro použití v softwarech jako je Matlab, Microsoft Excel nebo i jako video ve formátu .avi [15].

Doble Lemke PD-Smart

Je systémem určeným pro měření ČV na všech typech zařízení. Přístroj, dle výrobce, disponuje pokročilým nástrojem pro potlačení šumu. Za pomoci externí antény zlepšuje potlačování vnějšího šumu. Systém je podpořen počítačovým softwarem, který nabízí možnost záznamu naměřených dat a jejich následného off-line replay. Pro otevření záznamového souboru je použit formát .tdms a k jeho otevření je vyžadován software PD SMART. Systém nabízí také funkci „multiview“, kdy je možné vidět na jedné obrazovce více měřených komponent [16]. Testovací napětí může mít hodnotu frekvence od 20 Hz do 1.2 kHz. Změřit dokáže výbojovou aktivitu mezi 35 kHz a 20 MHz. Vstupní impedance pro zkušební napětí je 1 M Ω a impedance pro signál částečného výboje je 50 1 Ω . Dynamický rozsah zkušebního napětí 80 dB a pro signál částečného výboje 100 dB [17].

Power Diagnostix ICMsystem

Německý výrobce měřících systému je na trhu již přes 20 let. Specializuje se na digitální měřící přístroje pro vyhodnocování elektrických izolačních systémů. Nabízí, jak laboratorní, tak i přenosné zařízení [18]. Měřící systém ze série digitálních měřících detektorů ICMseries. Je použitelný na síťové frekvenci, ale i na velmi nízké frekvenci. Tento systém je velice univerzální a všestranný díky jeho modulární konstrukci. Dle výrobce lze systém díky řadě speciálního příslušenství přizpůsobit téměř jakémukoliv testovacímu prostředí s vysokým napětím. Široká škála externích předzesilovačů umožňuje řízení frekvenčního rozsahu od 40 kHz do 2 GHz. Systém filtruje výbojovou aktivitu od okolního šumu nezávisle na tom, jaký je použit napěťový cyklus. Z tohoto důvodu je možno využívat systém v poměrně hlučném prostředí. K dosažení vysokého poměru signál/šum pomůže vhodný výběr předzesilovače. Tento systém spolupracuje s vlastním počítačovým softwarem, ale vlastní záznam vzorků ČV je na počítači nezávislý. Rychlost počítače nebo komunikace s počítačem neomezuje rychlost záznamu ČV. Software nabízí volbu, zda bude výbojová aktivita zobrazena oproti ose času nebo fázovému úhlu. Do ICMsystem je možno přistupovat vzdáleně za pomoci modemu [19]. Součástí této práce je zkušební měření s tímto systémem (kapitola 5.2).

Haefely Hipotronics DDX 9121b

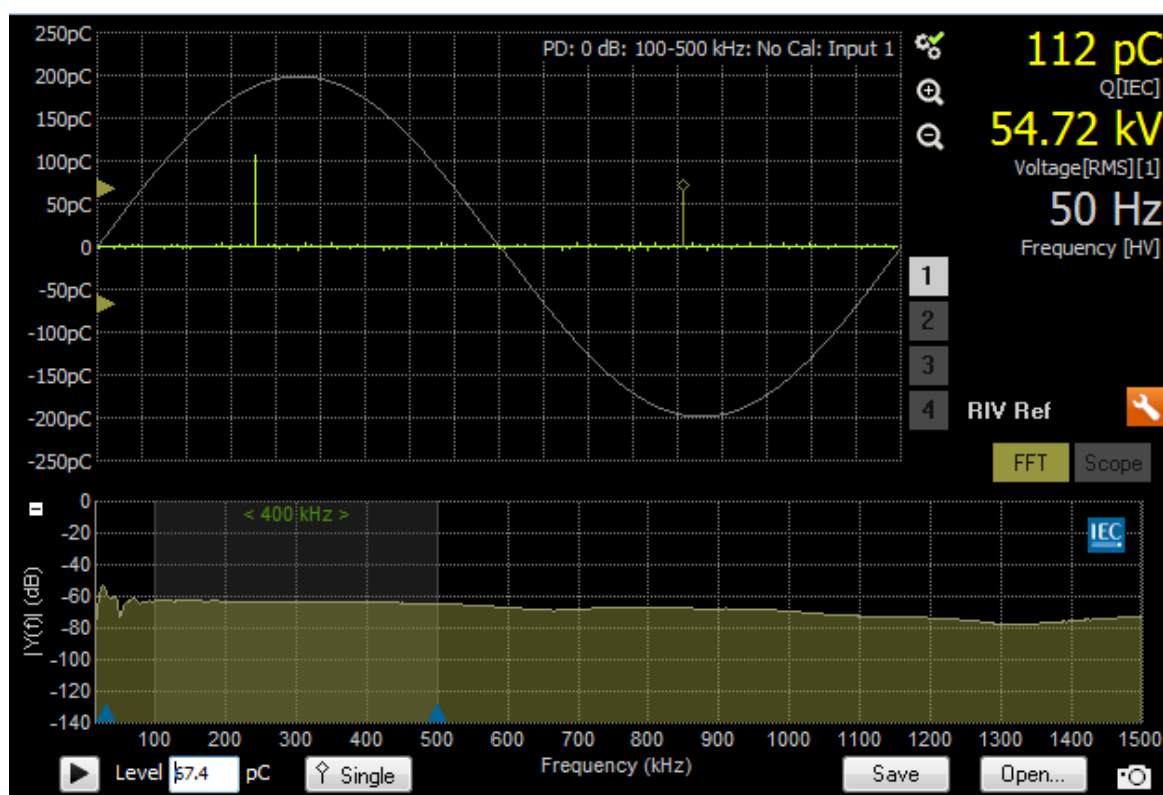
Je modulárním přístrojem od firmy HAEFELY HIPOTRONICS pro měření částečných výbojů. S DDX 9121b mohou uživatelé provádět testy a generovat reporty z jediného počítače. Měření vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 60270. DDX je vybaven digitálními filtry, které mohou potlačit rušení. Můžeme měřit až devět vstupů současně. S přístrojem je možné provádět měření elektromagnetické interference. Měří částečné výboje při stejnosměrném napětí a na základě časové analýzy dokáže automaticky vyhodnotit stav

zařízení. DDX 9121b (Obr. 12) je navržen pro měření výkonových kondenzátorů, ale i výkonových a distribučních transformátorů, kabelů, rotačních strojů, rozvaděčů apod... [20].



Obr. 12 DDX 9121b (převzato z [20])

Uživatelské rozhraní přístroje (Obr. 13) je vytvořeno tak, aby bylo čtení údajů jednoduché. Všechny volby jsou rozčleněny v kategoriích a při testu je zde okno zobrazující informace související s testem. Barvy uživatelského rozhraní byly zvoleny tak, aby neunavovaly oči při dlouhém testování.



Obr. 13 DDX 9121b uživatelské prostředí (převzato z [21])

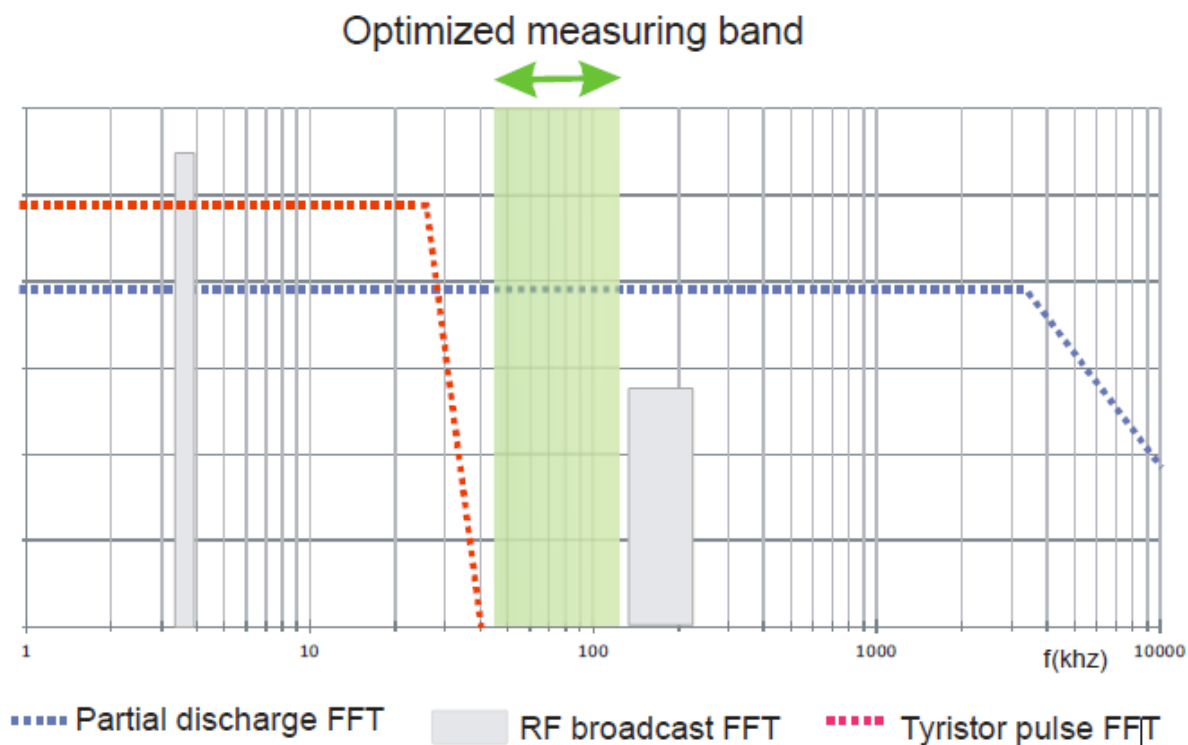
Analogové výstupy (Obr. 14) umožňují připojení libovolného externího zařízení pro další dodatečné zpracování surových dat, pro např. externí osciloskopy, datalogery apod. [21].



Obr. 14 DDX 9121b analogové výstupy (převzato z [21])

Šířka měřeného pásma je volitelná (Obr. 15). Definováním měřené šířky pásma zvýšíme citlivost měření. DDX 9121b je vybaven spektrálním analyzátozem, operátor může snadno zvolit optimalizované měřicí pásmo. ČSN EN 60270 definuje některé limity, pokud jde o měřicí pásmo následujícím způsobem [21]:

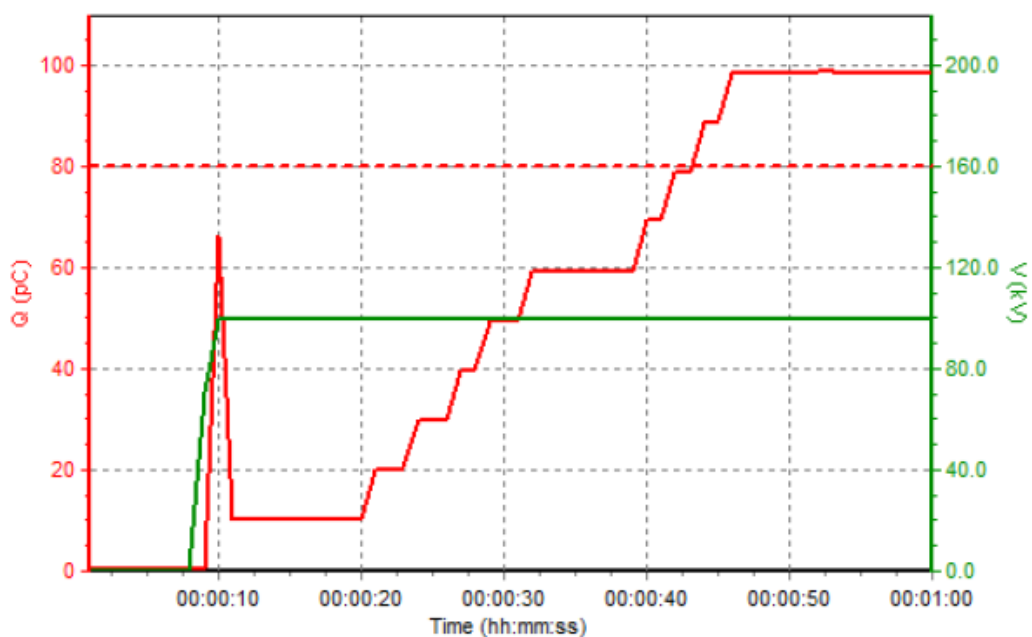
- $30 \text{ kHz} < f_1 < 100 \text{ kHz}$,
- $f_2 < 500 \text{ kHz}$,
- $100 \text{ kHz} < \Delta f < 400 \text{ kHz}$ [4].



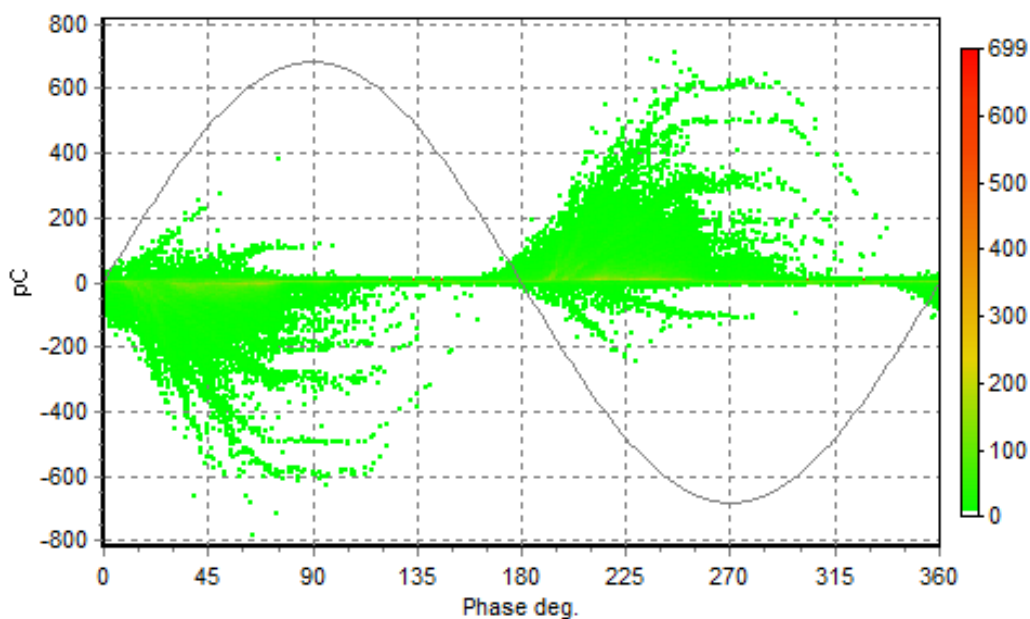
Obr. 15 Měřené pásmo (převzato z [21])

Měřicí systém je založen na pasivní vazební impedanci bez baterií. Disponuje širokým rozsahem vstupního napětí (0,14 ~140 V). Připojení je velmi snadné. Vazební impedance typ (AKV HAEFELY) se připojí na jedné straně kondenzátoru a na DDX.

Velikost částečných výbojů v závislosti na čase je zapsána pro každý kanál do grafu. $Q(t)$ a $V(t)$ diagram (Obr. 16) nabízí čtení velikosti částečných výbojů oproti napětí a času pro každý kanál v jednom grafu [21].

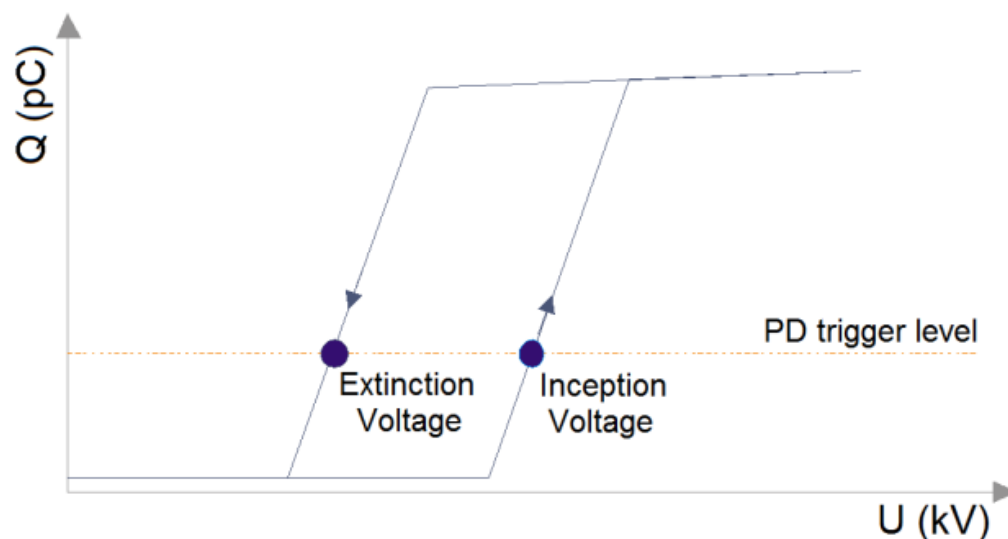


Obr. 16 $Q(t)$ & $V(t)$ diagram – Apparent charge and voltage vs. time (převzato z [21])



Obr. 17 Vnitřní částečný výboj (převzato z [21])

Dále můžeme sledovat vznik a zánik částečných výbojů v závislosti na zvyšovaném/snižovaném napětí (Obr. 18).



Obr. 18 Zapalovací a zhašecí napětí (převzato z [21])

Export dat a reporting probíhá za pomoci HTML souborů, které obsahují grafy a hodnoty. Kromě toho může být použit formát hodnot (CSV) pro další analýzy nebo pro přípravu protokolů o zkouškách v jiných programech jako je např. MS Excel [21].

Haefely Hipotronics AKV 9330

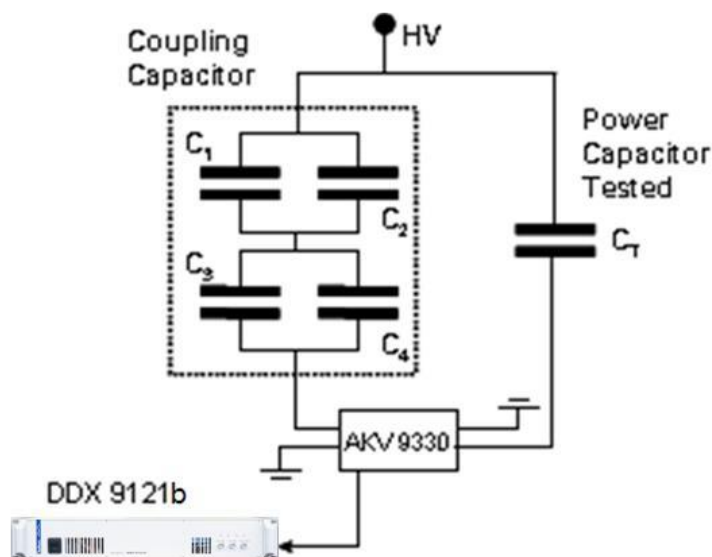
Je pasivní měřící impedance pro testování výkonových kapacitorů od výrobce HAEFELY HIPOTRONICS (Obr. 19). Disponuje frekvenčním filtrem a vysokou citlivostí. Maximálním měřícím proudem je 300 A. Vyhovuje standardu IEC 60270. Mezi jeho příslušenství patří napájecí zdroj [22].



Obr. 19 AKV 9330 (převzato z [22])

Měření na DDX 9121b spolu s AKV 9330

Měření částečných výbojů na výkonových kondenzátorech může být obtížné. Výkonové kondenzátory jsou typicky charakterizovány kapacitami v rozmezí od 1 μF až po několik stovek μF . Vysoká kapacita kondenzátorů snižuje přesnost měření ČV, dále také nejsou na současném trhu dostupné vazební kondenzátory v rozsahu μF . Doporučené uspořádání zkoušky pro výkonové kondenzátory je znázorněno na obrázku *Obr. 20* [23].



Obr. 20 Uspořádání zkoušky pro výkonové kondenzátory (převzato z: [23])

Toto uspořádání poskytuje praktické a nákladově efektivní řešení pro měření ČV na výkonových kondenzátorech. Vazební kondenzátor je tvořen za pomoci čtyř kondenzátorů (C₁ – C₄). Citlivost měření zvyšuje AKV 9330, speciálně konstruovaná impedance pro měření výkonových kondenzátorů. Jediněčná charakteristika této vazby zesiluje vysokofrekvenční pulzní proudy (typicky v nano-ampérech). Jiným pozoruhodným rysem je, že rozsah pracovní frekvence je ze 100% ve frekvenčním pásmu doporučeným standardem IEC 60270. Maximální zkušební proud vazebního kondenzátoru je 300 ampér. Dodatečná výhoda zkušebního zapojení znázorněného na obrázku *Obr. 20* je, že snižuje vliv soufázových interferenčních signálů, které mohou zanášet do měření nepřesnosti [23].

Měřicí spektrum

Měření částečných výbojů se často provádí bez předchozí kontroly kalibračního pulzního spektra. Ve většině případů správný frekvenční rozsah známe, ale měření pulsního spektra je prostředkem k ověření, zda filtr limitních frekvencí (f_1, f_2) vyhovuje požadavkům IEC 60270. Pulsní spektrum pomáhá detekovat defekty. V případě výkonových kondenzátorů je základním parametrem pro správné nastavení měření ČV rezonanční frekvence [24].

4 Technické požadavky norem

Na měření částečných výbojů v elektrických přístrojích, komponentech apod. se vztahují normy. Požadavky těchto norem by měly být zohledněny při navrhování technických podmínek souvisejících s měřením částečných výbojů [4]. Tato kapitola je věnována normám, které se zabývají měřením částečných výbojů a jejich zaměřením na dané aplikace.

4.1 ČSN EN 60270

Jde o mezinárodní normu platnou pro měření komponentů, zařízení, přístrojů a systémů. Zkušební napětí může dosahovat frekvence až do 400 Hz. Veličiny definované touto normou, které byly použity v této práci, jsou vypsány v kapitole 1.3 [4].

Tato norma definuje [4]:

- terminologii,
- související veličiny,
- zobrazuje uspořádání zkušebních a měřících obvodů, které mají být použity,
- přesně popisuje buďto analogové nebo digitální měřící metody potřebné pro běžné aplikace,
- zpřesňuje způsoby kalibrace a nároky na přístroje sloužící pro kalibraci,
- poskytuje směrnice pro zkušební postupy,
- poskytuje pomoc týkající se rozlišení částečných výbojů od vnějšího rušení.

4.2 ČSN 60060-1

Tato část normy ČSN 60060 je platná pro dielektrické zkoušky se stejnosměrným, střídavým nebo impulzním napětím. Platná je u zkoušek s napětím vyšším jak 1 kV. Pro napětí přesahující 800 kV je možné, že některé předepsané postupy nebudou dosažitelné. Součástí této normy jsou veličiny definované pro zkoušky se střídavým průběhem napětí [25].

4.2.1 Zkoušky se střídavým průběhem napětí

Dle normy ČSN EN 60060-1 musí mít zkušební střídavé napětí frekvenci v rozmezí 45 až 65 Hz. Technická komise však může stanovit pro zvláštní zkoušky jiný frekvenční rozsah. Zkoušky s napětím o frekvenci od 10 Hz do 500 Hz jsou definovány v IEC 60060-3 [25].

Vrcholová hodnota střídavého napětí

Je průměrnou hodnotou velikostí kladných a záporných vrcholových hodnot. V případě, že měříme souměrný signál, je možné měřit pouze vrcholovou hodnotu jedné polarity. Předpokladem je ale pouze malá odchylka od sinusového průběhu [25].

Hodnota zkušebního napětí

Jde o vrcholovou hodnotu dělenou $\sqrt{2}$ [25].

Efektivní hodnota

Je definována za pomoci druhé odmocniny ze střední hodnoty čtverců okamžitých hodnot napětí za celý cyklus [25].

Pokles napětí

Bezprostřední snížení zkušební napětí na čas až několika sekund [25].

4.3 ČSN EN 60060-2

Tato část normy ČSN 60060 se vztahuje na měřicí systémy a jejich součásti, které jsou používány při vysokonapěťových zkouškách v laboratorním prostředí. V této normě jsou uvedené meze nejistot použitelné pro zkušební hladiny uvedené v IEC 60071-1:2006 [27].

Tato norma definuje [27]:

- použitou terminologii,
- postupy odhadu nejistot při měření vysokým napětím,
- nároky, které musí měřicí systém splňovat,
- postupy osvědčení měřicího systému a kontrolu jeho komponent,
- metody průkaznosti, že jde o měřicí systém vyhovující tomuto standardu.

4.4 ČSN EN 60060-3

Tato část normy ČSN 60060 se zabývá napětím pro zkoušky probíhající mimo laboratorní prostředí. Jde o napětí: [29].

- stejnosměrné,
- střídavé,
- atmosférické impulzní napětí s aperiodickým nebo oscilačním tvarem,
- spínací impulzní napětí s aperiodickým nebo oscilačním tvarem.

Ve speciálních případech lze měřit i s napětím o velmi nízkém kmitočtu nebo s tlumeným střídavým napětím [29].

4.5 ČSN CLC/TS 60034-27

Tato norma se zabývá off-line měřením částečných výbojů na izolaci statorových vinutí točivých elektrických strojů (online měřením se zabývá ČSN IEC/TS 60034-27-2) [31]. Tato norma spadá do třídy točivých elektrických strojů, z tohoto důvodu nebude pro aplikaci na kondenzátorech pravděpodobně příliš vhodná. Zabývá se zejména stroji, které mají tyče nebo tvarované cívk s vodivým drážkovým povlakem [31].

4.6 ČSN EN 60664-4

Při měření s napětím o vysokém kmitočtu je třeba změnit zkušební přístroje a postupy, které jsou popsány v ČSN EN 60270. V této normě jsou popsány zkoušky s nízkým napětím o kmitočtu 30 kHz až 10 MHz. Předmětem zájmu této normy je základní, přídatná a zesílená izolace namáhaná napětím s vysokým kmitočtem. Zkoušky jsou sestaveny tak, aby se

minimalizovalo riziko degradace zkušební vzorku. Zkušební napětí je v rozsahu napětí zapalovacího. Pro odhalení poškozené izolace je použita nízká hladina výboje, zpravidla pod 10 pC. Tato norma je platná pro zařízení pracující v nadmořské výšce menší než 2000m se jmenovitým napětím do 1000 V. Kvůli napěťovému omezení nebude pro výkonové aplikace vhodná [32].

4.7 ČSN EN 2591-227

Evropský standard definuje metody měření částečných výbojů při specifických teplotách nebo pod neobvyklým tlakem. Norma je určena pro letectví a kosmonautiku. Plný text je dostupný v anglickém jazyce [33].

4.8 ČSN EN 60512-4-2

Předmětem normy jsou zkoušky elektromechanických komponent v rozsahu působnosti IEC TC 48. Tato norma může být rovněž použita pro podobné součástky. Zkouška má za cíl definovat standardní zkušební postup pro posouzení vhodnosti použitelnosti elektromechanických součástek při stanoveném napětí bez vzniku částečných výbojů [34].

4.9 ČSN EN 60885-2

Norma zabývající se měřením částečných výbojů za pomoci elektrických metod v izolačních systémech kabelů. Je českou verzí evropské normy EN 60885-2:2003. Norma zahrnuje všeobecné zkušební metody měření izolačních a plášťových materiálů pro elektrické kabely [35].

5 Vlastní testovací měření

V prostorách univerzitních laboratoří - laboratoře částečných výbojů a laboratoře dielektrik bylo vyzkoušeno testovací měření na systémech:

- 1) Doble Lemke PD smart
- 2) Power diagnostix ICMsystem

Tyto systémy byly otestovány pro několik uspořádání. Samotnému měření předchází kalibrace měřicího obvodu.

5.1 Doble Lemke PD smart

Kalibrace obvodu

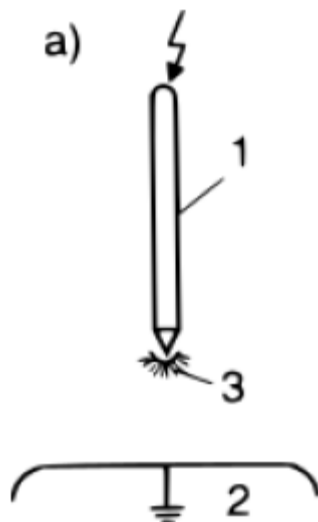
Jedním z mnoha faktorů snižující přesnost měření jsou i parazitní kapacity měřicího obvodu. Provedením kalibrace měřicího obvodu zvýšíme přesnost měření. Kalibrace je prováděna před každým měřením. Kalibrace vypovídá o závislosti mezi zdánlivým nábojem částečných výbojů a velikostí amplitudy jednotlivých snímaných napětí. Velikost tohoto napětí je závislá na velikosti naměřených výbojů. Do obvodu jsou generovány kalibrační pulzy o námi vybrané hodnotě. Velikost této hodnoty je zvolena dle předpokládané velikosti zdánlivého náboje pulzů při měření [5, 8]. V našem případě byla vybrána velikost hodnoty kalibračních pulzů 50 pC. Pro kalibraci byl použit kalibrátor LDC-5/S3 (Obr. 21).



Obr. 21 Kalibrátor LDC-5/S3

Uspořádání hrot-deska

Na uspořádání zobrazeném na obrázku *Obr. 22* vznikají vnější částečné výboje korónového typu. Jejich výskyt je pro takto ostré hrany typický. Příkladem takových výbojů jsou korónové nebo doutnavé výboje [8, 26].



Obr. 22 Modelové uspořádání typu hrot deska (převzato z [8])

Model takového uspořádání je dostupný i ve školní laboratoři (*Obr. 23*).



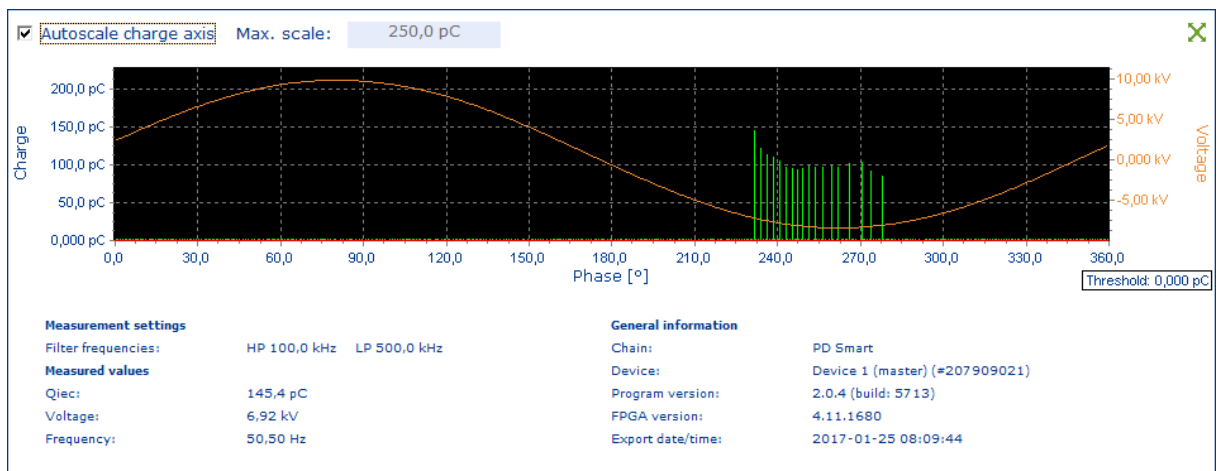
Obr. 23 Model uspořádání hrot-deska

Hrot byl 5 cm nad deskou. Byl pozorován vznik a zánik částečných výbojů v závislosti na zvyšovaném/ snižovaném napětí. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky č.2.

Tab. 2 Naměřené hodnoty uspořádání hrot - deska

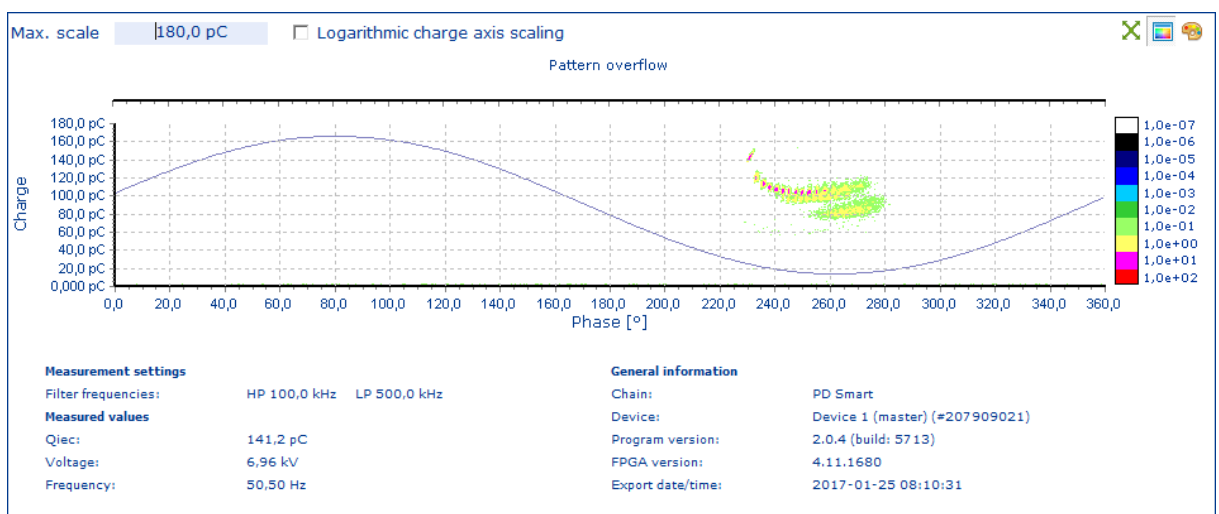
Naměřené hodnoty	Zapalovací napětí	Velikost výboje
V záporné půlperiodě	6,92 kV	150 pC
V kladné půlperiodě	11 kV	500 pC

Snímek obrazovky ze softwaru PD Smart při měření zapalovacího napětí je na obrázku Obr. 24, ukázka z měření četnosti výbojů v záporné půlperiodě je vyobrazena na obrázku Obr. 25.



Obr. 24 Pulzní diagram – zapalovací napětí záporné půlperiody (koróna)

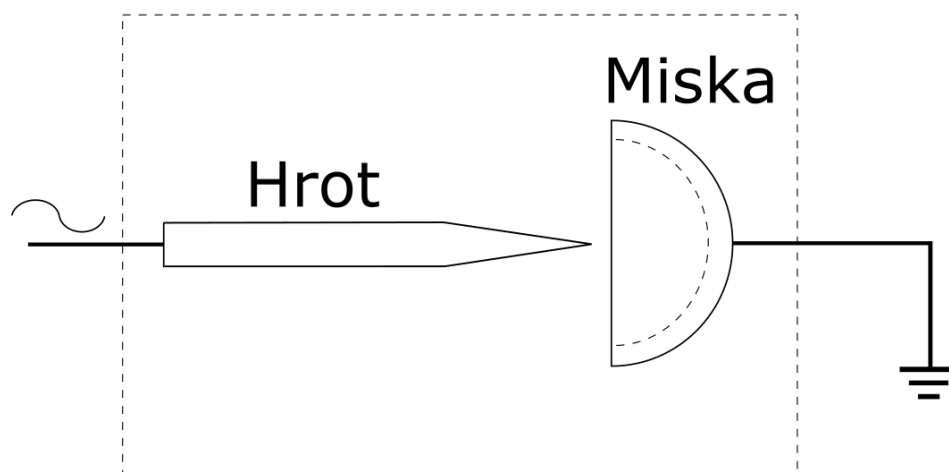
Pro informaci o četnosti výbojů využívá software spektra barev. O hodnotách, které barvy reprezentují, jsme informováni za pomoci legendy na pravé straně od grafu. Například barvy blízko červené představují vysokou četnost výbojů.



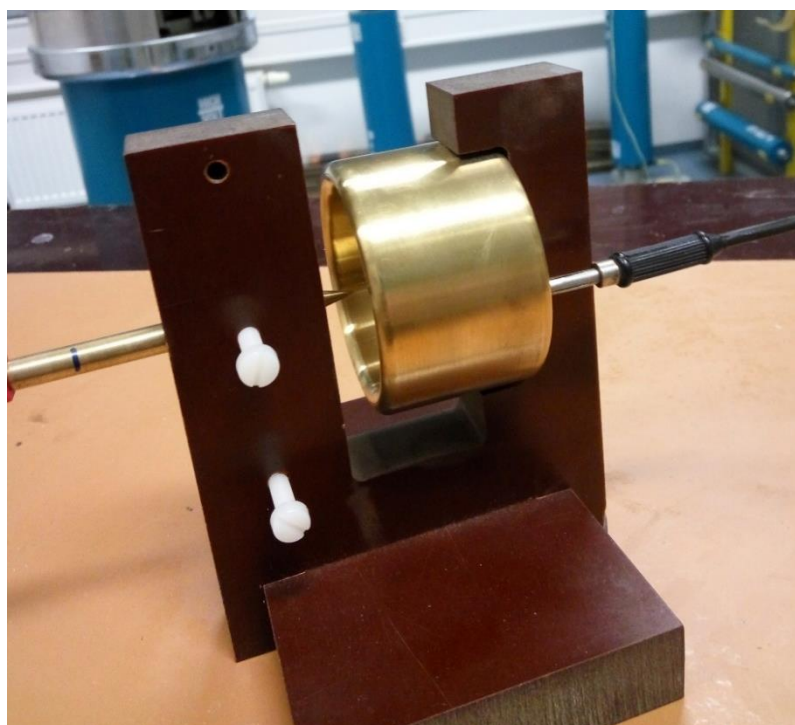
Obr. 25 Digram četnosti výbojů hrot-deska

Uspořádání miska-hrot

Na tomto uspořádání vznikají výboje korónového typu [26]. Zjednodušené schéma je vyobrazeno na obrázku *Obr. 26* a skutečný školní model na obrázku *Obr. 27*. Napětí bylo přivedeno na hrot a miska byla uzemněna.



Obr. 26 Zjednodušené schéma uspořádání miska-hrot



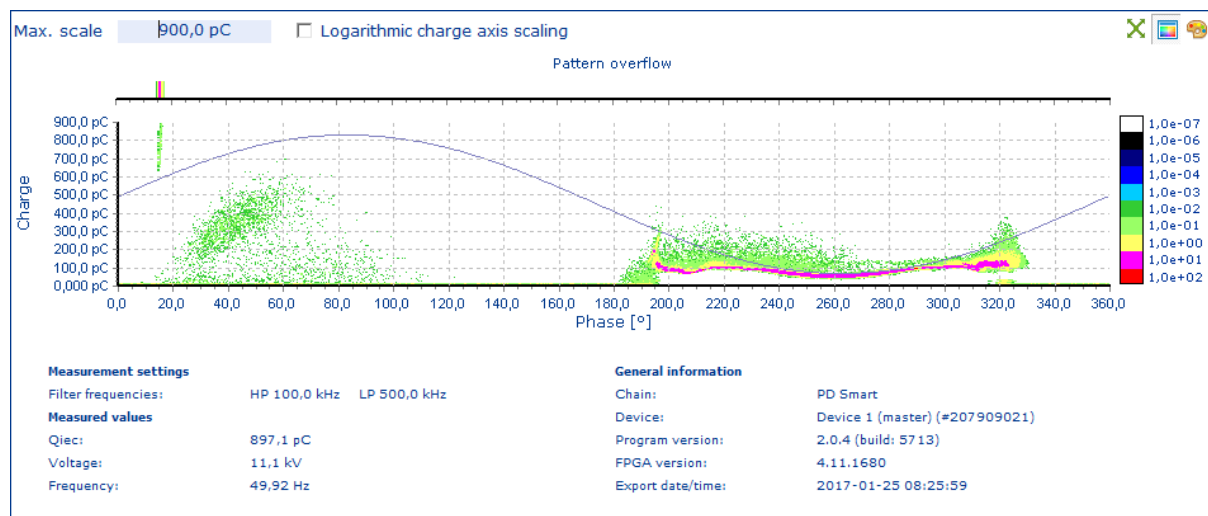
Obr. 27 Model uspořádání hrot-miska

Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky č.3.

Tab. 3 Naměřené hodnoty uspořádání hrot-miska

Naměřené hodnoty	Zapalovací napětí	Velikost výboje
V záporné půlperiodě	5,8 kV	385 pC
V kladné půlperiodě	11,2 kV	700 pC

Ukázka ze snímání četnosti výbojů je na obrázku *Obr. 28*. Na obrázku je vidět vysoká intenzita malých výbojů (kolem 100 pC) v záporné půlperiodě a výboje vyšších hodnot v kladné půlperiodě.



Obr. 28 Digram četnosti výbojů miska-hrot

Měření klouzavých výbojů

Klouzavé výboje jsou typem výbojů, které vznikají na rozhraní materiálů [28]. Klouzavý výboj vzniká i například mezi elektrodami odlišných tvarů nebo poloměrů [30]. Při testovacím měření byla vložena mezi elektrody rozdílných poloměrů destička z plastového materiálu (*Obr. 29*).



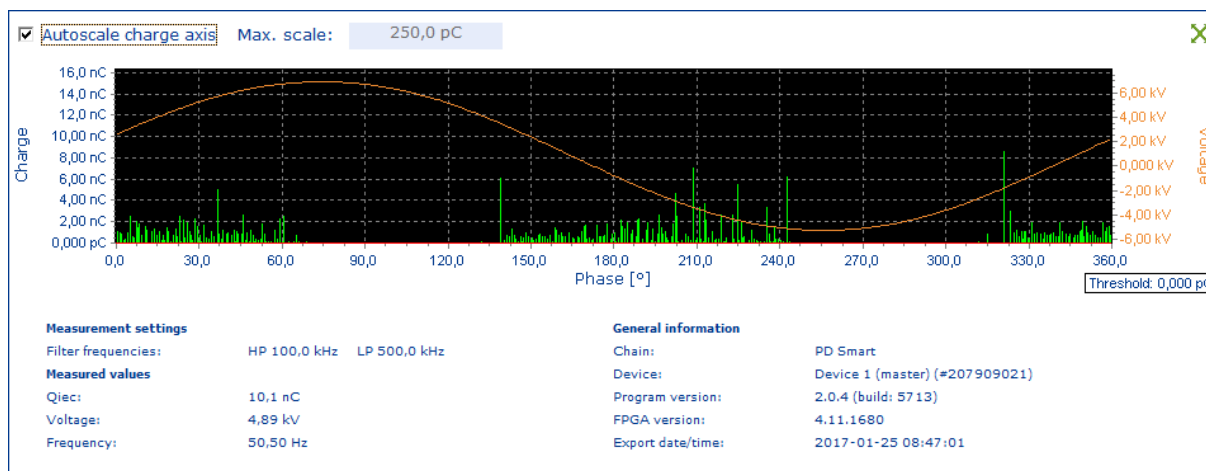
Obr. 29 Měření klouzavých výbojů

Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 4.

Tab. 4 Naměřené hodnoty klouzavých výbojů

Velikost testovacího napětí	Velikost výboje
2,15 kV	3,01 nC
4,89 kV	10,1 nC

Ukázka ze software při měření s napětím 4,89 kV je na obrázku Obr. 30.



Obr. 30 Pulzní diagram – zapalovací napětí při měření klouzavých výbojů

5.2 Power Diagnostix ICMsystem

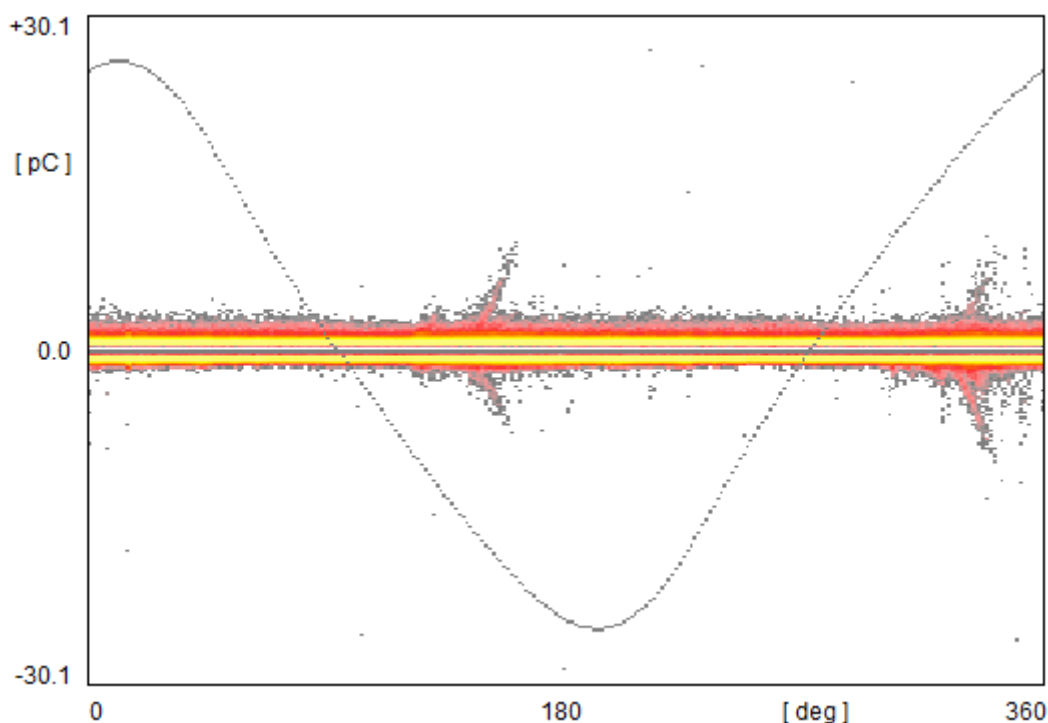
Testováno bylo laboratorní zařízení ICMsystem společnosti Power Diagnostix. Před samotným měřením proběhla kalibrace obvodu za pomoci kalibrátoru od Power Diagnostix – model CAL1A (Obr. 31).



Obr. 31 Kalibrátor CAL1A

Vnitřní výboje

Měření byl starší transformátor, o kterém víme, že jeho účinnost již není příliš vysoká. Obvod byl zkalibrován na 100 pC. Při napětí 30kV o frekvenci 50 Hz byl vytvořen 30 sekundový záznam měření. Záznam z měření je uložen ve formátu .dat, v tomto formátu máme možnost provádět post-analýzu naměřených dat. Data je možné exportovat také do formátu textového dokumentu .txt. a grafy lze jednoduše uložit jako bitmapové soubory .bmp. Výbojová činnost ale nedosahovala ani při napětí 30kV příliš vysokých hodnot (*Obr. 32*) a nelze jednoznačně říci, že transformátor má problém v oblasti částečných výbojů. Pro měření byla zvolena délka záznamu 30 sekund.



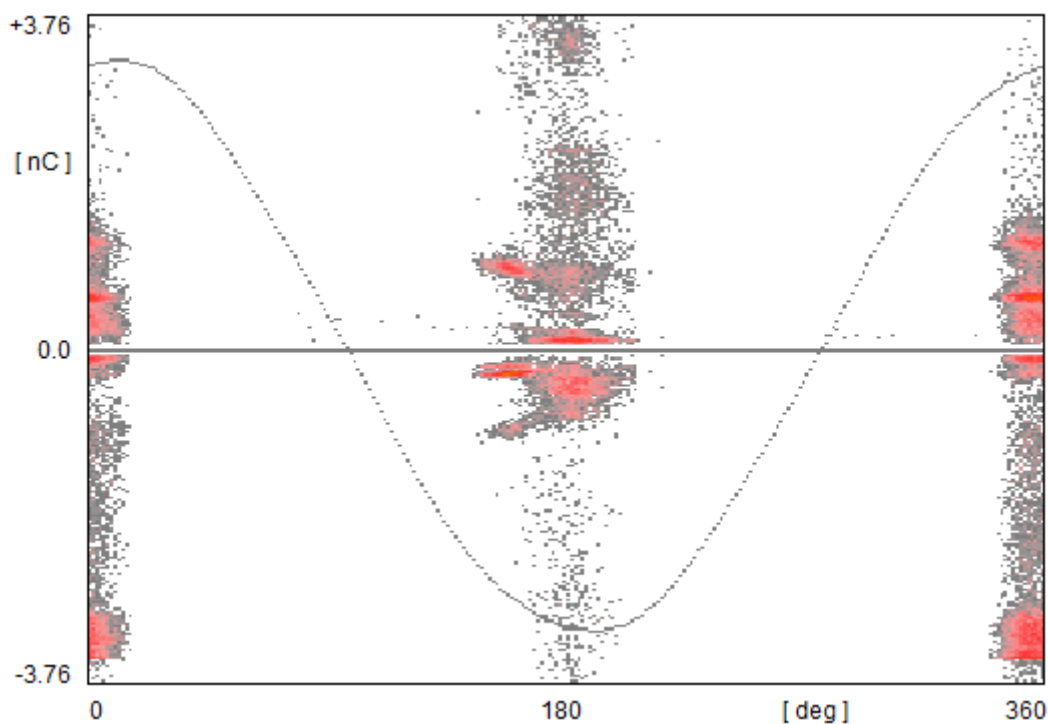
Obr. 32 Vnitřní výboje transformátoru

Měření klouzavých výbojů

Měření klouzavých výbojů proběhlo na modelu průchodky (*Obr. 33*). Projev výbojů na průchodce při napětí o hodnotě 32 kV, tak jak ho zaznamenal měřící software je na *Obr. 34*. Částečné výboje se zde již projevily v řádech nC. Software si pamatuje údaje zaznamenané při měření – v našem případě záznam nastavený na 30s.



Obr. 33 Model průchodky

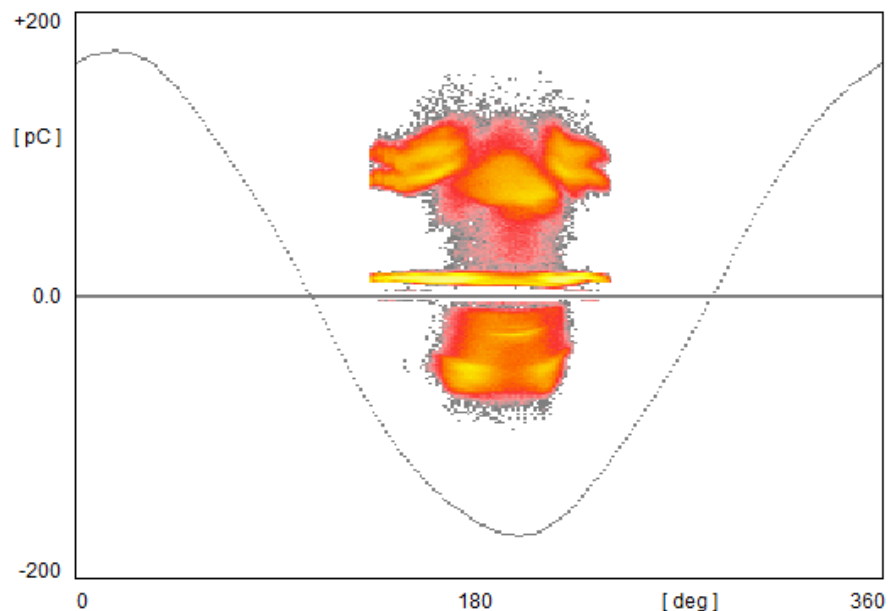


Obr. 34 Měření na modelu průchodky

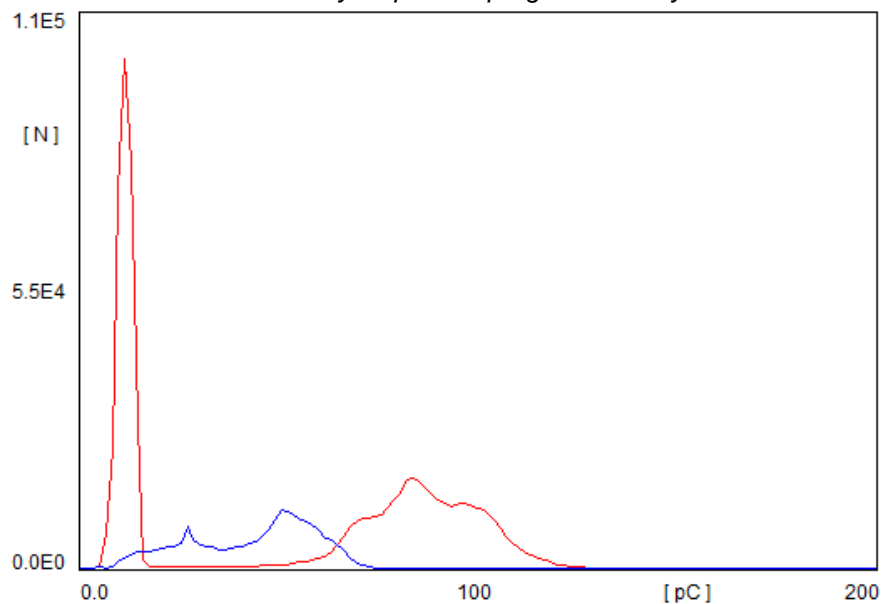
Při otevření záznamového souboru v software ICMsystem je zde i možnost zapnout funkci off-line replay a využít ji například ke sledování průběhu zkoušky v závislosti na čase. Podržetím levého tlačítka myši je možno označit v grafu četnosti výbojů několik vybraných aktivit a software následně informuje uživatele o hodnotě takto označených výbojů.

Měření koróny

Na modelovém uspořádání hrot-miska byly měřeny korónové výboje. Naměřená hodnota zapalovacího napětí byla 4 kV. Napětí bylo dále navýšeno na 7 kV a při této hodnotě byl vytvořen záznam (Obr. 35). Jiným promítnutím grafu, které software nabízí je například projekce oproti ose Y (Obr. 36).



Obr. 35 Měření koróny za pomoci programu ICMsystem



Obr. 36 Měření koróny – projekce oproti ose Y

Závěr

Předkládaná práce v první kapitole definuje základní veličiny, které je nutné znát pro měření částečných výbojů v souladu s platnou normou ČSN EN 60270. Tato norma je obecná a je základem při měření částečných výbojů. Pro skutečné měření v praxi může být potřeba využít některou z dalších norem, které se zabývají konkrétní aplikací měření částečných výbojů. Po provedené rešerši norem, lze uvést, že problematika měření částečných výbojů v kondenzátorech není stále dostatečně popsána.

Praktická část práce popisuje měření částečných výbojů na modelových uspořádáních. Cílem měření bylo porovnat dva rozdílné měřicí systémy (Doble a Power Diagnostix) z hlediska interpretace dat a uživatelské přívětivosti. Oba měřicí systémy a jejich SW jsou uživatelsky přívětivé a umožňují ovládající osobě zobrazovat data jak v reálném čase (např. pulzní diagramy nebo četnost výbojů), tak vytvořit off-line záznam měření. Díky modernějšímu vzhledu může systém od Doble zaujmout více než software od Power Diagnostix.

Ve stati práce bylo představeno několik komerčně dostupných měřicích systémů. Tyto systémy jsou na trhu nabízeny různými výrobci. Ve většině specifikacích těchto měřicích systémů nebývá uvedeno, zda jsou vhodné pro měření částečných výbojů v kondenzátorech. Pro výrobce kondenzátorů bude tedy nutné specifikovat své požadavky na měřicí systém a konkrétní aplikaci řešit přímo s výrobcem měřicích systémů. Jedním z důležitých faktorů při výběru vhodného systému je to, zda je cílem pouze výbojovou aktivitu odhalit nebo zda je podmínkou výboje i lokalizovat.

Ze získaných dat a v návaznosti na korespondenci s produktovým manažerem společnosti Haefely Hipotronics Ing. Petrem Mrázem, Ph.D., lze doporučit pro měření částečných výbojů v kondenzátorech zařízení Haefely Hipotronics DDX 9121b.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MITTAL, Lakshya, R. SARATHI a K. SETHUPATHI. Electrical treeing in XLPE cable insulation at cryogenic temperature under harmonic AC voltages. *Cryogenics* [online]. 2015, roč. 71, s. 62–67. ISSN 00112275. Dostupné z: doi:10.1016/j.cryogenics.2015.05.010.
- [2] KOZÁK, Ondřej. *Částečné výboje při stejnosměrném napětí*. Diplomová práce, Plzeň, 2015. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [3] *Měření a charakter částečných výbojů (ČV) v točivých strojích - ElektroPrůmysl.cz* [online]. [vid. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/mereni-a-charakter-castečných-vyboju-cv-v-tocivých-strojích-3>.
- [4] TECHNKA ZKOUŠEK VYSOKÝM NAPĚTÍM - MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ. ČSN EN 60270. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011.
- [5] MENTLÍK, V., J. PIHERA, R. POLANSKÝ, P. PROSR a P. TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. Vyd 1. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 9788073002329.
- [6] VILÍMOVÁ, Eva. *Diagnostika částečných výbojů*. Bakalářská práce, Plzeň, 2016. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická.
- [7] O'DWYER, J. J. Theory of avalanche breakdown in solids with space charge distortion of the field. In: *Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1969* [online]. B.m.: IEEE, 1969, s. 137–140. ISBN 978-0-309-01764-0. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.1969.7739882.
- [8] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd 1. Praha: Česká matice technická (Academia), 2005. ISBN 802001358X.
- [9] HAVLÍČEK, Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. Bakalářská práce, Brno, 2009. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav mikroelektroniky.
- [10] MENTLIK, V., J. PIHERA, P. TRNKA a P. MARTINEK. Partial Discharge Potential Free Test Methods. *2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* [online]. říjen 2006 [vid. 2016-11-26]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2006.312000.
- [11] BUJALOBOKOVÁ, M. a P. TRNKA. Detekce poruch VN Strojů analýzou výbojové činnosti se zaměřením na transformátory. *AEEE* [online]. 2007 [vid. 2016-11-26].

- Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/83878>.
- [12] HVTECHNOLOGIES. *Partial Discharge Detector, LDP-5* [online]. [vid. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.hvtechnologies.com/HVSolutions/MeasurementSystems/DobleLemkeLDP5HandheldPDDetector/tabid/149/Default.aspx>.
- [13] RUSSWURM, Dirk. *On-Site Partial Discharge Monitoring using the differential LEMKE PROBE LDP-5 and its accessories* [online]. [vid. 2016-11-30]. Dostupné z: http://www.aba2net.com/ldic.de/publications/papers/08-Russwurm-Dirk-On-Site_Partial.pdf.
- [14] BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH: Devices for precise condition evaluation of power cables. *Data sheets* [online]. [vid. 2016-12-02]. Dostupné z: <https://baur.at/en/products/cable-testing-and-diagnostics/online-pd-spot-tester/pd-sgs?pid=279>.
- [15] OMICRONENERGY. *MPD 600 - brochure* [online]. [vid. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/MPD-600-Brochure-ENU.pdf.
- [16] DOBLE. *Partial Discharge Testing with Doble PD-Smart* [online]. [vid. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.doble.com/product/pd-smart/>.
- [17] DOBLE. *IN-DEPTH PARTIAL DISCHARGE TESTING IN THE FIELD PD-Smart* [online]. nedatováno [vid. 2017-05-24]. Dostupné z: www.doble.com.
- [18] POWER DIAGNOSTIX. *Portrait* [online]. [vid. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.pdix.com/company/portrait.html>.
- [19] POWER DIAGNOSTIX. *ICMsystem* [online]. [vid. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.pdix.com/products/pd-measurement-devices/icmsystem.html>.
- [20] *DDX 9121b Partial Discharge Testing Equipment | HAEFELY HIPOTRONICS* [online]. [vid. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/ddx-9121b-3/>.
- [21] HAEFELY HIPOTRONICS. *Brochure Partial Discharge Overview* [online]. nedatováno, s. 1–6. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/ddx-9121b-3/>.
- [22] *Passive Measuring Impedance for Capacitor Testing | HAEFELY HIPOTRONICS* [online]. [vid. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/akv-9330/>.
- [23] HAEFELY TEST AG. *Partial Discharge Test on Power Capacitors* [online].

- [vid. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/ddx-9121b-3/>.
- [24] HAEFELY TEST AG. *Breaking the limit of power capacitor resonance frequency with help of PD pulse spectrum to check and setup PD measurement | Haefely Hipotronics* [online]. [vid. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/document/breaking-the-limit-of-power-capacitor-resonance-frequency-with-help-of-pd-pulse-spectrum-to-check-and-setup-pd-measurement/>.
- [25] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011.
- [26] ALDEBARAN. *Korónový výboj – Aldebaran Glossary* [online]. [vid. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=718>.
- [27] ČSN EN 60060-2. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 2: Měřicí systémy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011.
- [28] KEBBABI, L. a A. BEROUAL. Optical and electrical characterization of creeping discharges over solid/liquid interfaces under lightning impulse voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2006, roč. 13, č. 3, s. 565–571. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2006.1657969.
- [29] ČSN EN 60060-3. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 3: Definice a požadavky na zkoušky na místě*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2006.
- [30] GREGOR, Jan. *Optická diagnostika klouzavého výboje* [online]. B.m., 2016. Masarykova univerzita. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/423957/prif_b/.
- [31] ČSN CLC/TS 60034-27. *Točivé elektrické stroje - Část 27: Offline měření částečných výbojů na izolaci statorových vinutí točivých elektrických strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2012.
- [32] ČSN EN 60664-4. *Koordinace izolace zařízení nízkého napětí - Část 4: Vliv namáhání napětím s vysokým kmitočtem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2006.
- [33] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, metrologii a státní zkušebnictví. *ČSN EN 2591-227 | ČSN online* [online]. [vid. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=98809>.
- [34] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, metrologii a státní zkušebnictví. *ČSN EN 60512-4-2 | ČSN online* [online]. [vid. 2017-05-24]. Dostupné

z: <https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=65797>.

- [35] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, metrologii a státní zkušebnictví. ČSN EN 60885-2 (347003) - *Elektrické zkušební metody pro elektrické kabely - Část 2: Měření částečných výbojů - červenec 2004 - Technické normy* - Ing. Jiří Hrazdil [online]. [vid. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/70617>.