

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostika částečných výbojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Eva VILÍMOVÁ**
Osobní číslo: **E13B0160P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostika částečných výbojů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte základní typy částečných výbojů a tyto typy charakterizujte.
2. Analyzujte vliv částečných výbojů na životnost izolačního systému.
3. Popište metody měření částečných výbojů a jejich moderní trendy.
4. Proveďte praktické měření částečných výbojů na modelovém uspořádání.

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.).

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Hornak

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato práce je zaměřená na shrnutí problematiky diagnostiky částečných výbojů. Práce zahrnuje hlavní rozdělení a charakteristické parametry částečných výbojů, rozebírá jejich vliv na izolační systém a shrnuje měřicí metody. Metody jsou doplněny i o jejich případné inovace. Cílem této práce je ověřit teoretické předpoklady z první části práce na modelovém uspořádání hrot-deska a zhodnotit vliv vkládaných bariér na parametry částečných výbojů. V závěru práce je hodnocení měření a experiment zabývající se vytvořením Lichtenbergových obrazců. Hlavním výsledkem práce je úspěšné ověření zpracovaných teoretických poznatků a zjištěný vliv bariér na zapalovací napětí částečných výbojů.

Klíčová slova

Částečné výboje, degradace izolace, elektrické metody, neelektrické metody, hrot-deska, zapalovací napětí, Lichtenbergovy obrazce.

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to summarize diagnostic of partial discharges. The paper includes the main distribution and characteristic parameters of partial discharges, analyzes their impact on the insulation system and summarizes the measuring methods. The methods are accompanied by possible improvements. The aim of this work is to verify the theoretical assumptions of the first part of the work on model needle-plane and assess the impact of barriers on the parameters of partial discharge. The conclusion includes evaluation of the measuring and experiment involved in the creation Lichtenberg figures. The main result of this work is successful validation of processed theoretical knowledge and observed effect of the barriers on the ignition voltage of the partial discharge.

Key words

Partial discharges, degradation of insulation, electrical method, non-electrical method, needle-plate, ignition voltage, Lichtenberg figure.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 27.5.2016

Eva Vilímová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Hornakovi za čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky, za cenné rady, připomínky a metodické vedení.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	12
1.1 VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	12
1.2 VNĚJŠÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	13
1.3 CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY A PARAMETRY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	13
1.3.1 Veličiny vztažené k jednotlivým impulzům.....	14
1.3.2 Integrované veličiny	14
1.3.3 Napětí vztahovaná k částečným výbojům	15
1.3.4 Typy obrazců částečných výbojů	16
1.4 MODEL Y ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	21
1.4.1 Gemant-Philippovův model	21
1.4.2 Böningův model	22
2 VLIV ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA ŽIVOTNOST IZOLAČNÍHO SYSTÉMU	25
2.1 CHEMICKÉ ÚČINKY	25
2.2 TEPelnÉ ÚČINKY.....	26
2.3 ELEKTRICKÉ ÚČINKY	26
2.4 EROZIVNÍ ÚČINKY	26
2.4.1 Elektrické stromečky.....	26
2.4.2 Růst elektrického stromečku	27
3 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	29
3.1 ELEKTRICKÉ METODY	29
3.1.1 Galvanická metoda	30
3.1.2 Metoda induktivně vázané sondy.....	32
3.1.3 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy.....	33
3.1.4 Kapacitní drážková sonda	34
3.1.5 Kapacitní a induktivní snímače	35
3.2 NEELEKTRICKÉ METODY	36
3.2.1 Akustická metoda.....	36
3.2.2 Chemická metoda	36
3.2.3 Optická detekce.....	37
3.2.4 UHF metoda	37
4 MĚŘENÍ NA MODELOVÉM USPOŘÁDÁNÍ	38
ZÁVĚR	52
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53

Seznam symbolů a zkratk

q	Zdánlivý náboj
$q_{\check{v}}$	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 náboj
P	Výkon částečných nábojů
$u_{\check{v}}$	Okamžitá hodnota testovacího napětí
U_i	Zapalovací napětí
U_e	Zhášecí napětí
U_v	Zůstatkové napětí
U_z	Zotavené napětí
T_1	Doba trvání čela impulzu
T_2	Doba trvání pultýlu impulzu
Z_m	Měřicí impedance
Z_m^*	Měřicí impedance
Δf	Šířka pásma
f_1 a f_2	Dolní a horná mezní frekvence

Úvod

Ve spolehlivostním řetězci elektrických zařízení bývá nejslabším článkem, a tedy největší hrozbou, v mnoha aspektech izolační systém. To je důvod, proč se provádí diagnostika těchto zařízení. Na izolační systém působí v provozu mnoho negativních vlivů, které snižují jeho životnost a ohrožují tak správnou funkci celého zařízení. Jedním z těchto negativních vlivů jsou právě částečné výboje. Proto jsou velmi důležitým diagnostickým signálem a je jim věnována velká pozornost. Protože jsou odstávky zařízení velmi nákladné, je v dnešní době vyžadován on-line monitoring částečných výbojů během provozu zařízení, aby byla degradace způsobená částečnými výboji zachycena včas.

Práce má přiblížit tuto problematiku, nastínit metody, kterými lze částečné výboje měřit, zhodnotit momentální vývojový trend metod a demonstrovat částečné výboje na modelovém uspořádání v praktické části. V první části práce jsou uvedeny charakteristické vlastnosti částečných výbojů. Jejich základní rozdělení a základní vlastnosti, charakteristické veličiny a parametry. Také jsou částečné výboje rozděleny podle druhu, vysvětleny jejich základní vlastnosti a popsáno, jak je umět rozpoznat pomocí metody Lissajousových obrazců, kde jsou proudové impulzy výbojů superponovány na napětí. V závěru první části práce jsou představeny dva modely částečných výbojů, podle kterých se výboje modelují.

V druhé kapitole této bakalářské práce je rozebrán vliv částečných výbojů na životnost izolačního systému. Jsou zde vysvětleny základní principy snižování životnosti působením částečných výbojů a popsány jednotlivé degradační vlivy. Chemický vliv, tepelný vliv, elektrický vliv a erozivní vliv částečných výbojů. Všechny tyto degradační účinky vyústí v konečné fázi degradace izolantu v elektrické stromečky, které mají za následek nevratné zničení dielektrika.

Třetí kapitola je zaměřená na jednotlivé měřicí metody, které se používají k odhalení částečných výbojů v elektrickém zařízení. Základní rozdělení měřicích metod je na elektrické a neelektrické metody. Mezi elektrické metody patří galvanická metoda, metoda induktivně vázané sondy, diferenciální elektromagnetická sonda, kapacitní drážková sonda a kapacitní a induktivní snímače. Mezi neelektrické metody patří akustická metoda, chemická a optická detekce a UHF metoda. Také jsou v této kapitole nastíněny případné inovace těchto metod.

Prakticky byly částečné výboje demonstrovány na modelovém uspořádání hrot-deska ve vzdálenosti 1 cm, které bylo izolováno vzduchem. Na konci práce je představen experiment, tvorba Lichtenbergových obrazců.

Cílem této práce je demonstrovat částečné výboje na modelovém uspořádání hrot-deska, ověřit teoretické předpoklady, které jsou shrnuty v první části bakalářské práce a zhodnotit vliv vkládaných bariér na parametry částečných výbojů.

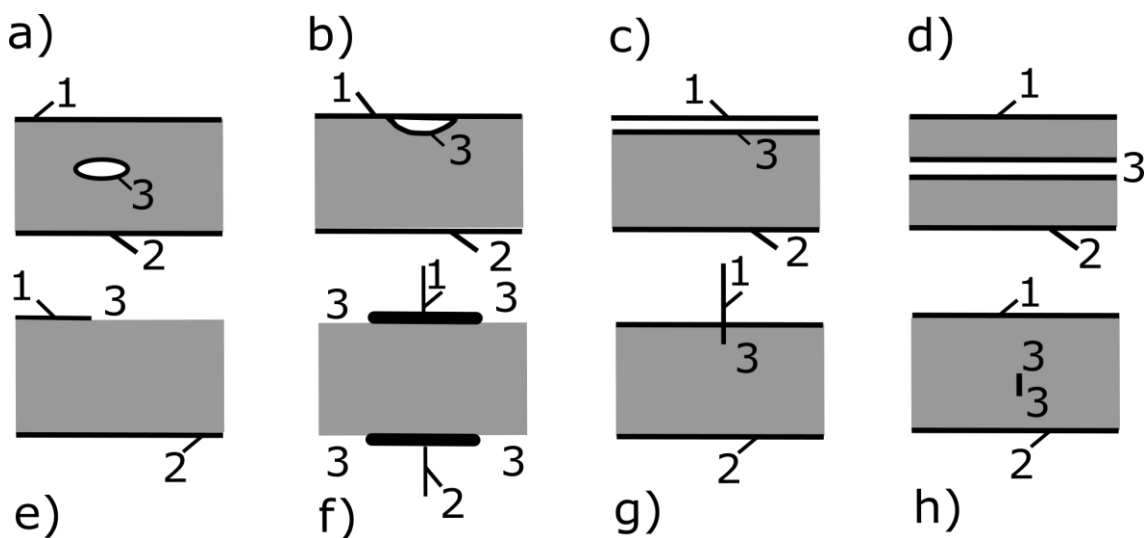
1 Částečné výboje

V elektrotechnice se lze setkat s jevem, který se nazývá elektrický výboj. Elektrický výboj se projevuje tím, že vytvoří za splnění určitých podmínek vodivé spojení v izolačním systému mezi dvěma elektrodami o různém potenciálu. Jedním z mnoha druhů elektrických výbojů jsou částečné výboje.

Vzhledem k tomu, že místo, kde vznikají částečné výboje, má vždy menší elektrickou pevnost než okolní dielektrikum (jedná se většinou o plynové dutiny v pevném dielektriku nebo bubliny v kapalném dielektriku), dojde k výboji v tomto místě při daleko nižším napětí, než odpovídá průraznému napětí okolního izolantu. Tedy okolní izolant je schopen vydržet namáhání zkušebním napětím. Nejedná se tedy o úplný elektrický průraz. Norma ČSN EN 60270 definuje částečný výboj jako: „Lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může a nemusí objevit v okolí vodiče“. Obvyklá doba trvání částečných výbojů je velmi malá, menší než 1 μ s. [1]

1.1 Vnitřní a povrchové částečné výboje

Vzhledem k tomu, že i při sebelepších technologiích výroby dochází k mikroskopickým nedokonalostem v materiálu, projevují se částečné výboje na různých místech, které jsou zobrazeny na *Obr. 1*. Elektrody jsou popsány čísly 1 a 2, oblast výbojové činnosti číslem 3. Prvním příkladem je pevný izolant s plynou dutinkou v objemu dielektrika (*Obr. 1a*) nebo v oblasti pod elektrodou (*Obr. 1b*). Dalšími příklady jsou mezery vzniklé při delaminaci vrstev pevného izolačního

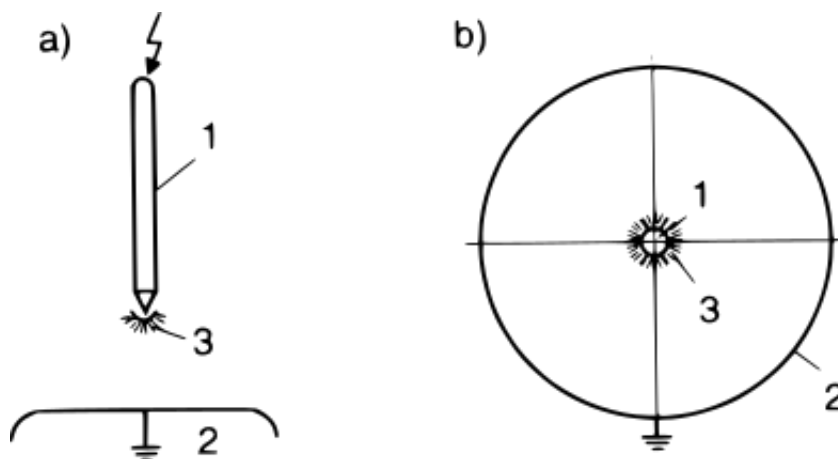


Obr. 1: Elektrodotová uspořádání pro vnitřní a povrchové částečné výboje [2]

materiálu (*Obr. 1c, 1d*). Ke vzniku klouzavých výbojů může docházet v případech znázorněných na *Obr. 1e, 1f*. Použití jehlové elektrody (*Obr. 1g*) může mít za následek růst elektrického stromečku vlivem vnitřní výbojové činnosti. Tento jev může také nastat, pokud je ve vnitřní struktuře materiálu obsažena např. příměs nečistot (*Obr. 1h*). [2]

1.2 Vnější částečné výboje

Pro ten to druh výbojů je charakteristické uspořádání elektrod hrot-deska (*Obr. 2a*) nebo koncentrické uspořádání dvou elektrod (*Obr. 2b*), protože vnější částečné výboje se nejčastěji objevují na hranách nebo elektrodách malých poloměrů, které se nacházejí v plynném prostředí. Mezi tento druh výbojů patří například korónové nebo doutnavé výboje. [2]



Obr. 2 Elektrodotová uspořádání pro vnější částečné výboje a) hrot-deska, b) koncentrické elektrody (převzato z: [2])

1.3 Charakteristické veličiny a parametry částečných výbojů

Pro hodnocení intenzity částečných výbojů se používají níže uvedené měřitelné veličiny. K charakterizování jejich typu se používají parametry závislé na fázovém úhlu napájecího napětí, tzv. obrazce částečných výbojů [1].

Impulz částečného výboje

Je proudový nebo napěťový impulz vznikající jako výsledek přítomnosti částečného výboje objevujícího se ve zkoušeném objektu. Tento impulz je zaznamenán měřicí technikou, která je použita pro detekci výbojové činnosti. [3]

1.3.1 Veličiny vztažené k jednotlivým impulzům

Zdánlivý náboj q

Je to základní diagnostický parametr pro měření a vyhodnocování částečných výbojů a vyjadřuje se v pikocoulombech [pC]. Je to takový náboj, který při svém mžikovém přivedení na svorky zkoušeného objektu způsobí změnu napětí na hodnotu, která by odpovídala změně napětí při částečném výboji. Tento náboj se ovšem nerovná skutečnému náboji q_{cv} , který je přenesen skutečným částečným výbojem a nemůže být přímo měřen. [1, 3]

Fázový úhel φ_i a čas výskytu t_i

Fázový úhel φ_i je dán vztahem (1). Čas výskytu t_i je doba mezi předchozím průchodem zkušebního napětí nulou a následujícím impulzem částečného výboje. Perioda zkušebního napětí je T . [1, 3]

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

Četnost impulzů n

Udává střední hodnotu počtu proudových impulzů vyvolaných částečnými výboji v poměru k určitému časovému intervalu. Vyjadřuje se v impulzech za sekundu. Pro praxi se používá předepsaná minimální velikost impulzu. Menší impulzy se neuvažují. [1, 3]

1.3.2 Integrované veličiny

Vzhledem k tomu, že částečné výboje působí opakovaně, byly zavedeny veličiny, popisující tento jev, které jsou odvozeny od základních veličin jejich sumarizací za určitý časový interval.

Střední proud částečných výbojů I

Střední proud částečných výbojů I je dán součtem absolutních hodnot zdánlivých nábojů q za určitý časový interval T , dělený délkou tohoto intervalu. Je vyjádřen v coulombech za sekundu nebo ampérech a je dán vztahem (2): [1, 3]

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

Střední kvadratický součet D

Je součet druhých mocnin hodnot zdánlivých nábojů za určitou délku časového intervalu T , děleného jeho velikostí. Lze ho vypočítat podle vztahu (3): [1, 3]

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

Výkon částečných výbojů P

Tento parametr vyjadřuje střední hodnotu výkonu impulzů částečných výbojů přivedeného mezi svorky testovaného objektu po dobu výbojové činnosti T . Je určen vztahem: [1, 3]

$$P = \frac{1}{T} (q_1 u_{\check{c}v1} + q_2 u_{\check{c}v2} + \dots + q_i u_{\check{c}vi} + \dots + q_m u_{\check{c}vm}) [W] \quad (4)$$

Součtový náboj Q

Poslední parametr je v poslední době nahrazován středním proudem částečných výbojů I . Pro úplnost je zde také uveden. Součtový náboj Q se udává jako součet zdánlivých nábojů q obvykle za půlperiodu napájecího napětí. [1]

1.3.3 Napětí vztahovaná k částečným výbojům**Zkušební napětí částečných výbojů**

Zkušební napětí má danou předepsanou hodnotu, které zaručí, že na testovaném objektu nebude probíhat výbojová činnost překračující předepsanou velikost. Předepsaná velikost částečného výboje je určena libovolným diagnostickým parametrem. [1, 3]

Zapalovací napětí částečných výbojů U_i

Za splnění podmínky, že je napětí plynule zvyšované z určité nízké hodnoty, při které se neobjevují částečné výboje, do hodnoty, která spustí výbojovou činnost, lze tuto nejnižší spouštěcí hodnotu napětí označit jako zapalovací napětí částečných výbojů. [1, 3]

Zhášení napětí částečných výbojů U_e

Pokud je napětí snižované z hodnoty, kdy je zaznamenávána stabilní výbojová činnost na hodnotu, kdy výboje ustanou a nelze je zjistit použitým detekčním obvodem, lze toto napětí označit jako zhášecí napětí částečných výbojů. [1, 3]

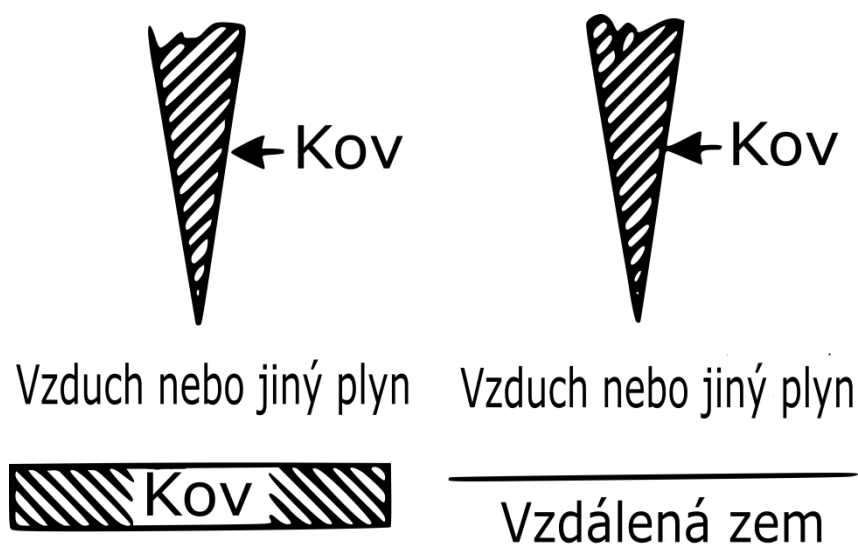
1.3.4 Typy obrazců částečných výbojů

Částečných výbojů rozeznáváme pět základních druhů. Základní kritérium pro správné určení druhu je umístění částečných výbojů na křivce napájecího napětí pomocí tzv. obrazců částečných výbojů. Zjištění fázového posunutí výbojů pak dále určuje povahu a místo výskytu výbojové činnosti.

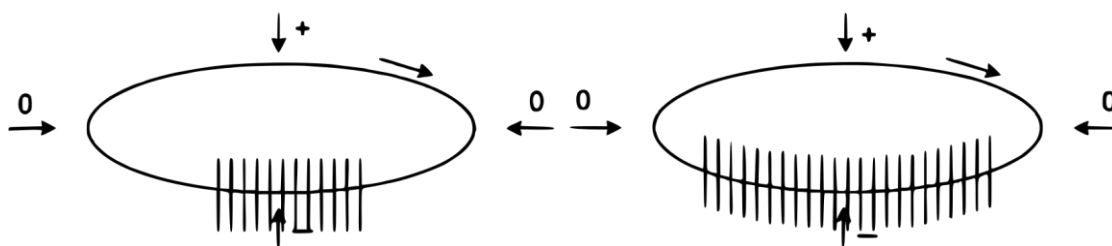
Tyto obrazce se zobrazují na osciloskopu metodou Lissajousových obrazců tak, že proudové impulzy výbojů jsou superponovány na napěťový průběh. S příchodem digitální techniky se od této metody částečně upouští a upřednostňuje se zobrazení v časové oblasti v rozvinuté periodě sinusového zkušebního napětí. [1, 2]

Typ A

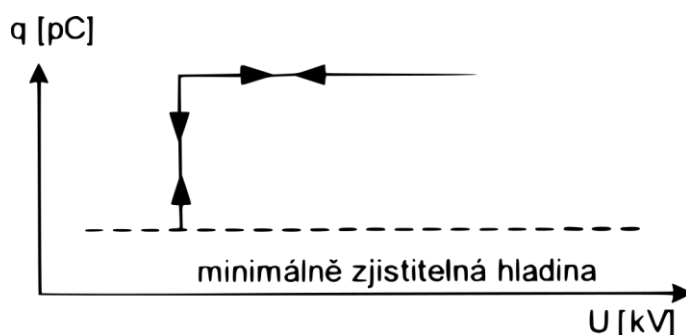
Tento druh výboje vzniká v okolí ostrého hrotu nebo hrany umístěné v plynném prostředí (*Obr. 3*). Výbojová činnost je zaznamenána jen v jedné půlperiodě napájecího napětí a je symetricky rozložena v okolí amplitudy. Všechny pulzy mají srovnatelnou velikost i fázové posunutí (*Obr. 4*). Se zvyšující se hodnotou napětí se zvyšuje i počet výbojů, pořád ve stejném uspořádání. Jsou-li výboje zaznamenány v kladné půlplně napětí, je hrot uzemněn. Jsou-li výboje zaznamenány v záporné půlplně napětí, je na hrot přivedeno vysoké napětí. Ze závislosti je vidět (*Obr. 5*), že zhášecí a zapalovací napětí jsou totožné. [1, 2]



Obr. 3: Uspořádání způsobující výboje typu A (převzato z: [1])



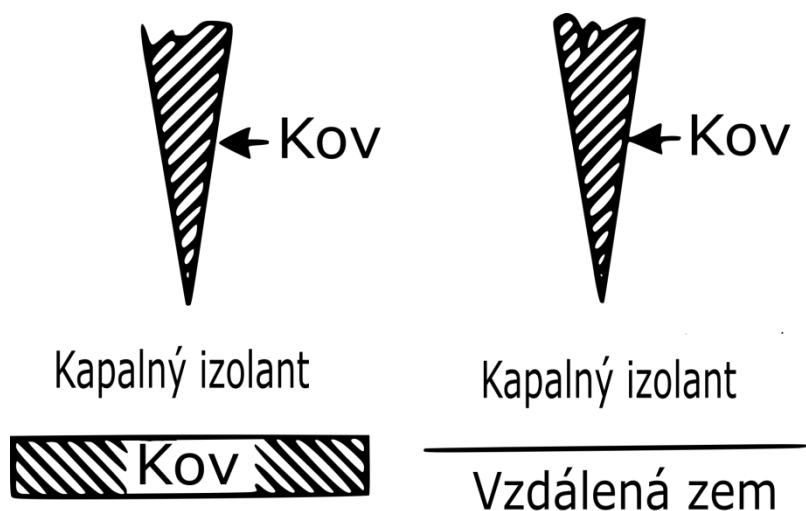
Obr. 4: Modelové oscilogramy částečných výbojů typu A (převzato z: [1])



Obr. 5: Závislost velikost náboje na zkušebním napětí – typ A (převzato z: [1])

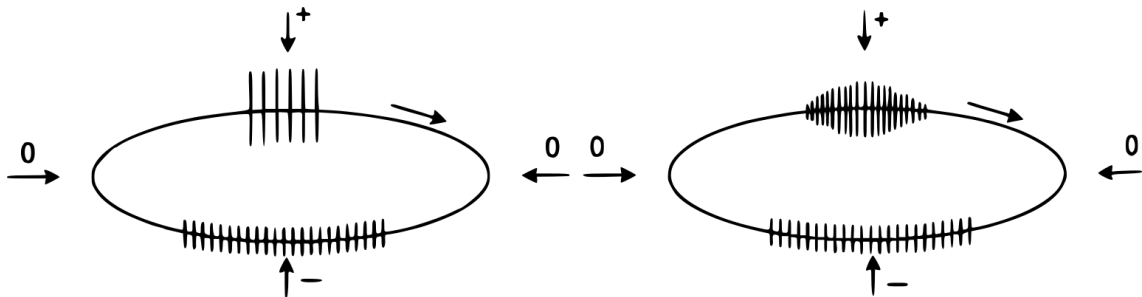
Typ B

Výboje typu B se vytváří stejně jako u typu A v okolí ostrých hrotů nebo hran, ovšem ne v plynném prostředí, ale v kapalných izolantech. Tvoří se během kladné i záporné půlvyňny a shlukují se symetricky kolem obou amplitud. Fázové posunutí částečných výbojů je v jedné půlvyňně přibližně stejně velké, ale v následujících půlvyňnách se různí, stejně jako velikost (Obr. 7). Při zvyšování napětí se nejprve

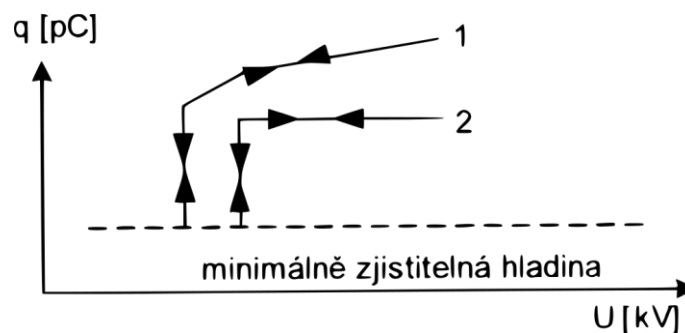


Obr. 6: Uspořádání způsobující výboje typu B (převzato z: [1])

objevují výboje s větší hodnotou zdánlivého náboje. Tato hodnota roste se zvyšujícím se napětím. Později se zapalují i menší výboje, které mají i přes zvyšující se napětí stejnou velikost (Obr. 8). [1, 2]



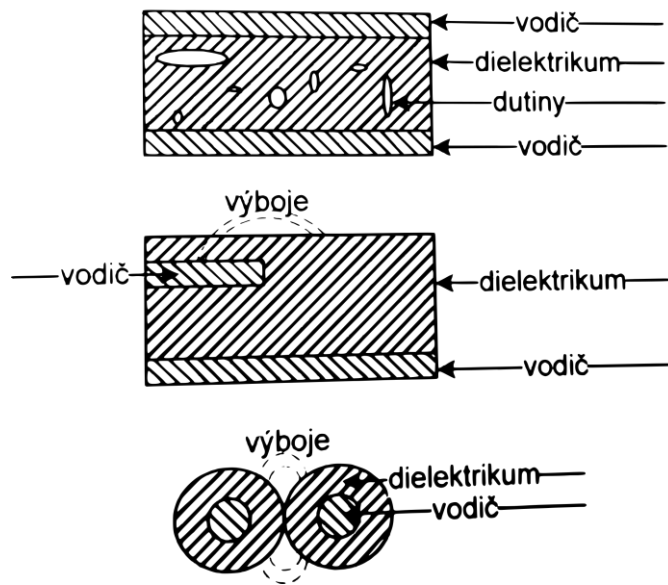
Obr. 7: Modelové oscilogramy částečných výbojů typu B (převzato z: [1])



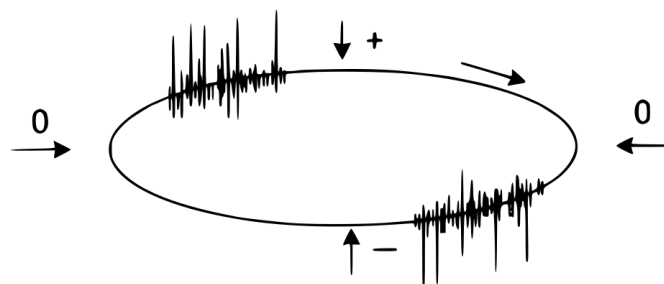
Obr. 8: Závislost velikost náboje na zkušebním napětí – typ B (převzato z: [1])

Typ C

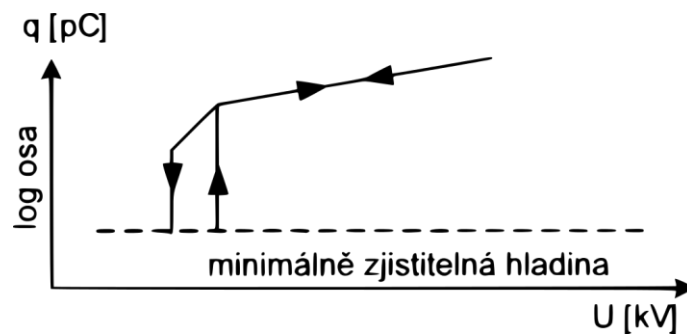
Tento typ výbojů se objevuje v dutinkách pevného izolantu, ve vzduchových bublinách v kapalném izolantu, při dotyku dvou izolovaných vodičů, na povrchu bez galvanického spojení jako klouzavý výboj nebo na neuzemněné kovové části měřicího obvodu (Obr. 9). Pulzy jsou umístěny mezi průchody napětí nulou a vrcholy v obou půlperiodách. V obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost (Obr. 10). Tento druh výbojů je velmi nebezpečný pro izolační systém. Zhášecí napětí je stejně velké jako zapalovací nebo trochu menší (Obr. 11). [1, 2]



Obr. 9: Uspořádání způsobující výboje typu C (převzato z: [1])



Obr. 10: Modelové oscilogramy částečných výbojů typu C (převzato z: [1])

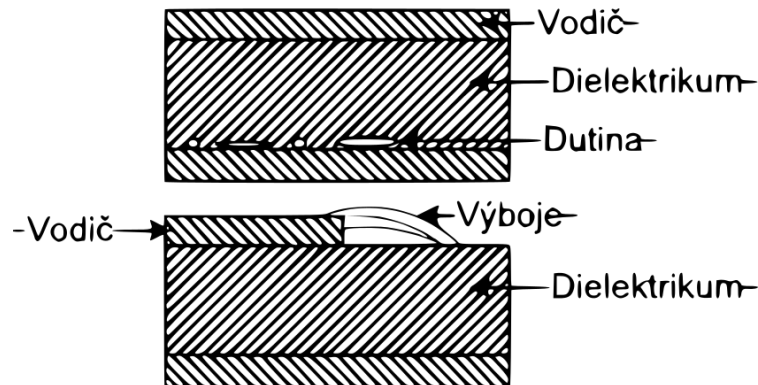


Obr. 11: Závislost velikost náboje na zkušebním napětí – typ C (převzato z: [1])

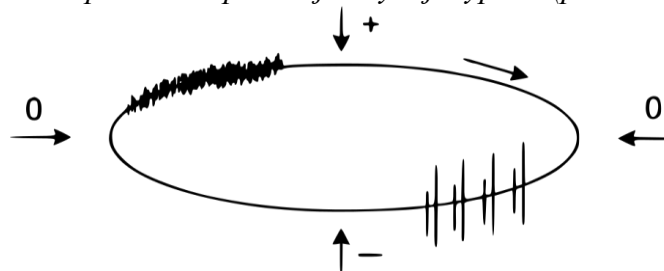
Typ D

Tento typ výbojů se tvoří uvnitř dutin mezi dielektrikem a elektrodou nebo se projevují jako vnější výboje mezi povrchem dielektrika a vodičem (Obr. 12). Jsou speciálním případem typu C a mají velikost pulzů v jedné půlperiodě větší než ve druhé.

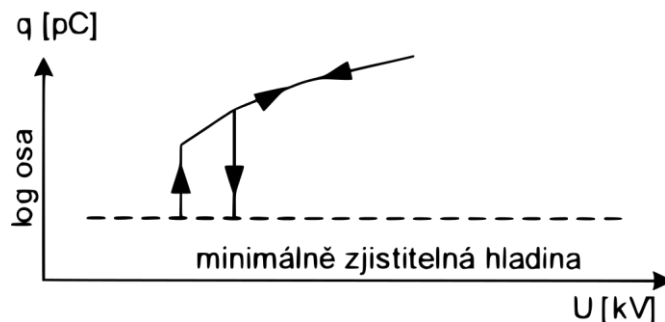
Jestliže jsou pulzy větší v kladné půlperiodě zkušební napětí, je dutinka na vysokém potenciálu. Pokud jsou větší pulzy v záporné půlperiodě, je dutinka uzemněná. Tento typ výbojů, stejně jako typ C, je velmi nebezpečný, protože dochází k velké degradaci izolace. Při dosažení určité úrovně zkušební napětí už není možné rozeznat jednotlivé pulzy (Obr. 13). Pulzy se vytváří v oblasti před amplitudou zkušební napětí. Zhášecí napětí je stejně velké nebo o trochu nižší než napětí zapalovací (Obr. 14). [1, 2]



Obr. 12: Uspořádání způsobující výboje typu D (převzato z: [1])



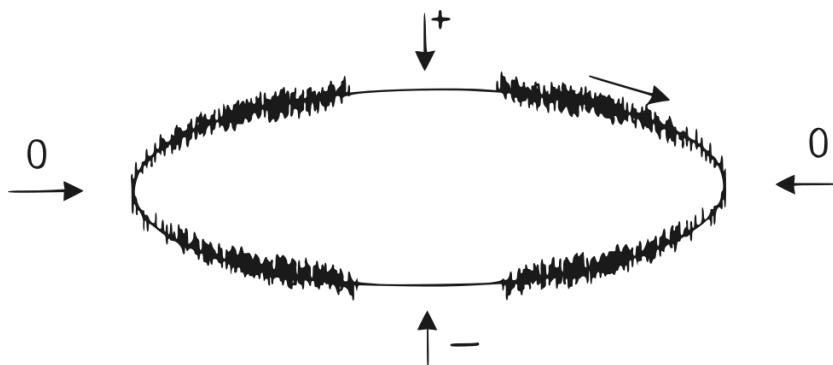
Obr. 13: Modelový oscilogram částečných výbojů typu D (převzato z: [1])



Obr. 14: Závislost velikost náboje na zkušebním napětí – typ D (převzato z: [1])

Typ E

Pro tento typ výbojů je charakteristické, že je objevují ve spojení kovu s kovem. Na oscilogramu se projevují jako šum symetricky rozmístěn v okolí bodu, kdy zkušební napětí prochází nulou (*Obr. 15*). V okolí amplitud mají nulovou velikost, jinak je jejich velikost přibližně stejná. Může se stát, že při určité velikosti napětí výboje zcela ustanou a už se neobjeví, například když se spoj výboji nataví a utvoří se lepší kontakt. (*Obr. 16*). [1]



Obr. 15: Modelový oscilogram částečných výbojů typu E (převzato z: [1])

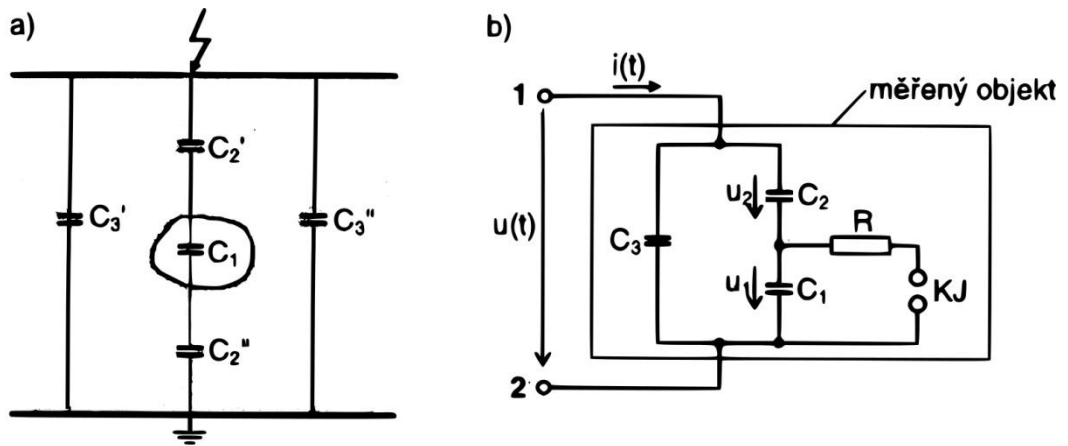
1.4 Modely částečných výbojů

Analýza modelů částečných výbojů umožňuje hodnotit jejich vznik a určit jejich základní parametry. Podle Paschenova zákona [4] nedochází k přeskoku ve všech dutinách izolantu současně při stejném napětí, ale postupně podle jejich velikost. Proto podmínkou pro modelování částečných výbojů je pevné nebo kapalné dielektrikum s jednou dutinou, která reprezentuje vnitřní nehomogenitu dielektrika. [1]

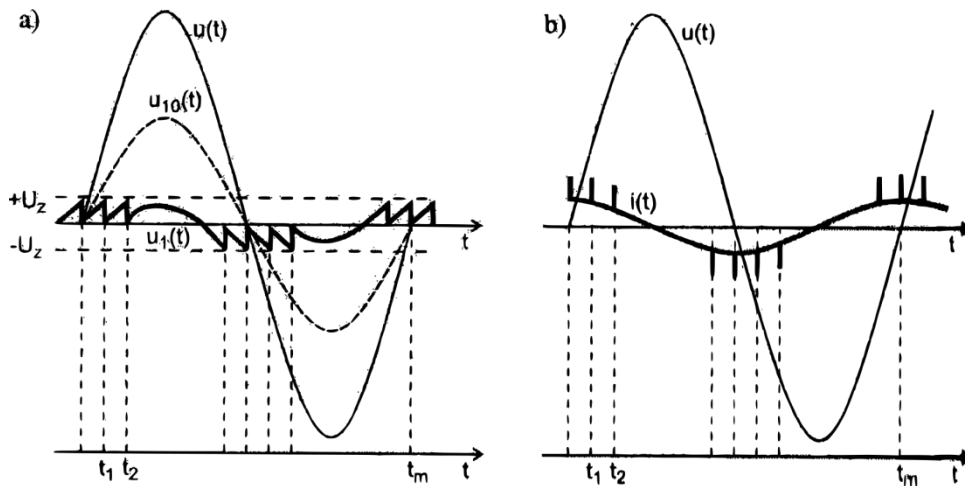
1.4.1 Gemant-Philippovův model

Jednoduchý trojkapacitní model a náhradní schéma pro analýzu vnitřních částečných výbojů zobrazuje *Obr. 16*. Kapacitu plynové dutiny představuje kondenzátor C_1 . Kondenzátor C_2 vyjadřuje kapacitu zbytkové části zdravé izolace v sérii s dutinkou a C_3 reprezentuje kapacitu zbytku nepoškozeného izolantu. Rezistor R představuje odpor výbojové cesty po přeskoku na kulovém jiskřišti KJ, které napodobuje výboj v plynové dutince při překročení její elektrické pevnosti.

Pokud přivedené napětí $u(t)$ dosáhne hodnoty zapalovacího napětí U_i , vytvoří se v dutince výboj. Po klesnutí hodnoty napětí pod hodnotu zhašecího napětí U_e výboj zaniká. Pokud napětí opět vzroste na hodnotu zapalovacího napětí, výboj se opakuje. Průběh napětí v dutince $u_1(t)$ je zobrazen na Obr. 17a. Na průběh kapacitního proudu se superponují proudové impulzy částečných výbojů Obr. 17b. [2]



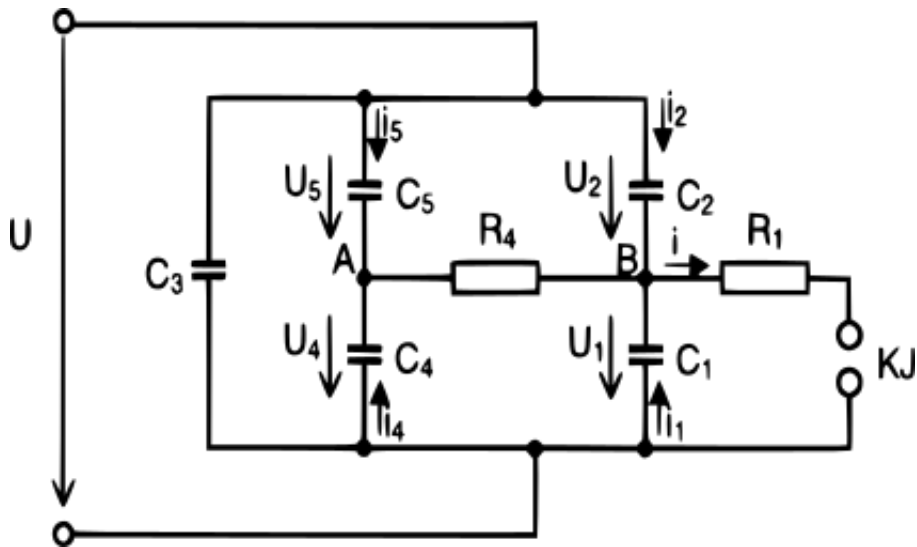
Obr. 16: Gemant-Philippovův model a náhradní schéma (převzato z: [2])



Obr. 17: Časové průběhy napětí a proudu (převzato z: [2])

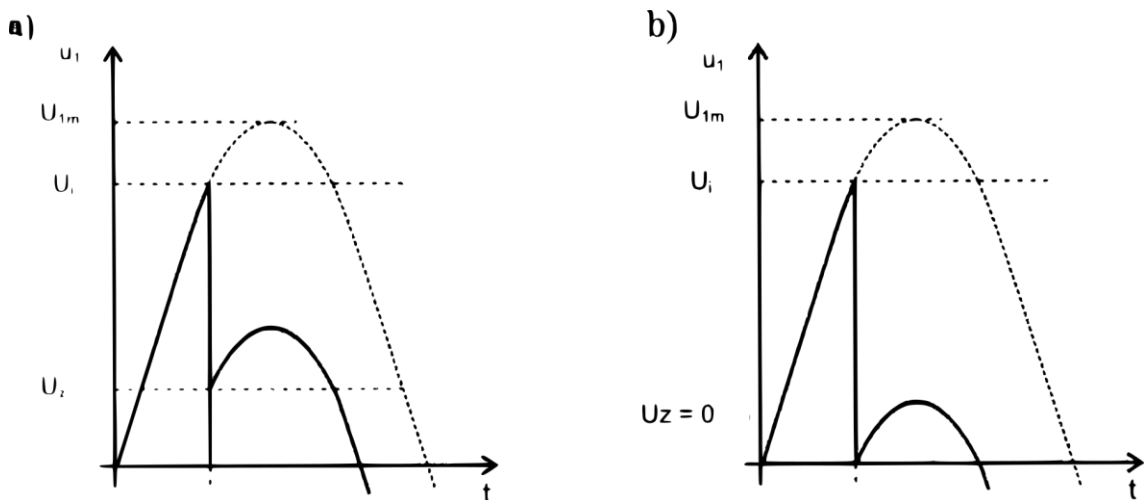
1.4.2 Böningův model

Gemant-Philippovův model ovšem nevysvětluje všechny jevy, které se při výbojové činnosti v izolantu odehrávají. Nepostihuje skutečnost, že se na procesu vybíjení podílí nejen stěny dutinky, ale i blízké okolí dutinky, ze kterého je také odčerpáván elektrický náboj. Proto vznikl Böningův model, který zahrnuje vliv okolního izolantu (Obr. 18). [2]



Obr. 18: Böningův rozšířený model pro vnitřní částečné výboje (převzato z: [2])

Do základního modelu byl přidán kondenzátor C_4 reprezentující vliv okolí plynné dutinky. Velikost C_4 je taková, že napětí U_1 a U_4 se před výbojem rovnají a rezistorem R_4 neprochází žádný proud. Rezistor R_4 představuje odpor výbojové cesty mezi pevnou částí izolantu, jejíž kapacitu vyjadřuje kondenzátor C_5 , a plochou dutiny. Böningův model se liší v tom, že napětí poklesne z hodnoty zapalovacího napětí U_i na hodnotu zůstatkového napětí U_v (Obr. 19). Následně hodnota napětí vzroste na hodnotu tzv. zotaveného napětí U_z . Celý proces trvá řádově μs . Na kapacitě C_1 se tento proces projeví jako zotavené napětí. [1, 2]



Obr. 19: Průběh napětí na kapacitě C_1 pro a) pětikapacitní model a b) trojkapacitní model (převzato z: [1])

Tyto dva modely nejsou jediná možnost, jak modelovat částečné výboje. Existují různé modifikace těchto dvou základních modelů [5]. Další způsob modelování jsou matematické metody založené na fyzikální podstatě částečných výbojů (metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí aj.) nebo stochastické modely (nelineární regresní model). [6, 7]

2 Vliv částečných výbojů na životnost izolačního systému

Jeden z důvodů, proč je vlastně důležité věnovat se diagnostice částečných výbojů, je jejich vliv na izolační systém, ve kterém působí. Přestože se výrobní technologie neustále zdokonalují, nelze úplně zabránit vzniku povrchových nebo objemových nehomogenit. Tyto nehomogenity jsou zdrojem částečných výbojů, které následně oslabují izolační systém a zkracují jeho životnost. Vnitřní částečné výboje jsou oproti vnějším pro izolaci daleko nebezpečnější. Jejich působení vyvolává fyzikální a chemické změny, které jsou nevratné. Snižuje se například elektrická pevnost vlastního izolantu nebo velikost napětí, při kterém dochází k tepelnému průrazu. Postupem času může dojít až k úplnému průrazu izolantu. [2]

Pevné izolanty nalezneme hlavně v izolačním systému točivých elektrických strojů a kabelů. Pro tyto stroje, které jsou jinak spolehlivostí téměř 100%, je největší slabina právě vysokonapěťová izolace statorových vinutí. Statorové vinutí je opatřeno vrstvou odporového povlaku, který zajišťuje nulový potenciál, tudíž nevznikají částečné výboje. Při provozu však dochází k odírání povlaku vlivem dynamického namáhání. To má za následek vznik částečných výbojů [2]. Velkou roli zde hraje použitý izolační materiál. Anorganické materiály jsou mnohem odolnější vůči degradaci než materiály organické a kompozitní, které obsahují epoxidová nebo silikonová pojiva. [1, 2, 8]

Degradační účinky částečných výbojů působí i na kapalně izolanty. Výboje se zpravidla začnou tvořit v místech zvýšené koncentrace nečistot. Za nehomogenitu v kapalném izolantu považujeme určité příměsi (voda, rozpuštěné plyny atd.), znečištění elektrod, plynové bubliny, pevné nečistoty a další. Působením částečných výbojů může dojít k zuhelnatění a jinému snížení izolační schopnosti kapaliny. [4]

2.1 Chemické účinky

Při delším působení částečných výbojů dochází k lokálnímu rozkladu izolantu. Je-li přítomen kyslík, vytvoří se při výbojové činnosti ozon. Ozon má velmi oxidační vlastnosti a je velmi agresivní. Při výbojích vzniká také tzv. aktivní dusík, který je mnohem reaktivnější než normální dusík. Dále vznikají oxidy dusíku, které mohou pokračovat v reakci a vytvořit dusíkaté kyseliny [4]. Pokud jsou v dutině přítomny prvky H, C nebo O, mohou se při chemických reakcích vytvářet také kapalně a pevně produkty. Experimentem [9] bylo potvrzeno, že vznik krystalů kyseliny šťavelové

zvyšuje povrchovou vodivost dutiny. To má za následek, že krystaly ovlivňují v místě působení vznik tepelného průrazu nebo růst elektrického stromečku. [1, 2, 10]

2.2 Tepelné účinky

Tepelné účinky částečných výbojů byly prokázány na teplotním modelu. Model ukázal, že změna dielektrických ztrát, v důsledku působení částečných výbojů, snižuje tepelné průrazné napětí až 4x [11]. Dále teplota urychluje růst elektrického stromečku, který je následkem eroze stěn dutinky. Přestože částečné výboje mají určité tepelné účinky, nebyl dosud prokázán přímý účinek teploty na stárnutí dielektrika. [1, 2, 10]

2.3 Elektrické účinky

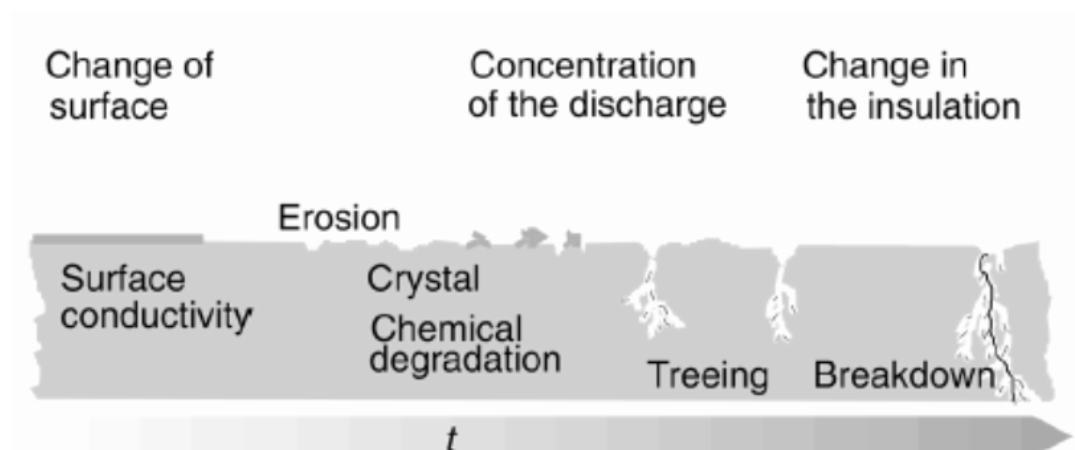
Při vzniku výboje a při dostatečně velké intenzitě elektrického pole je možné, že vlivem koncentrace elektrického pole dojde v místě působení k čistě elektrickému průrazu a vodivá dráha se může postupně rozšířit celým izolantem. [1, 2, 10]

2.4 Erozivní účinky

Další degradační účinek způsobují elektrony tím, že bombardují stěny dutiny a způsobují erozi jejích stěn. Dutina se postupně zvětšuje a při delším působení částečných výbojů může dojít k průrazu celého izolantu. [1, 2, 10]

2.4.1 Elektrické stromečky

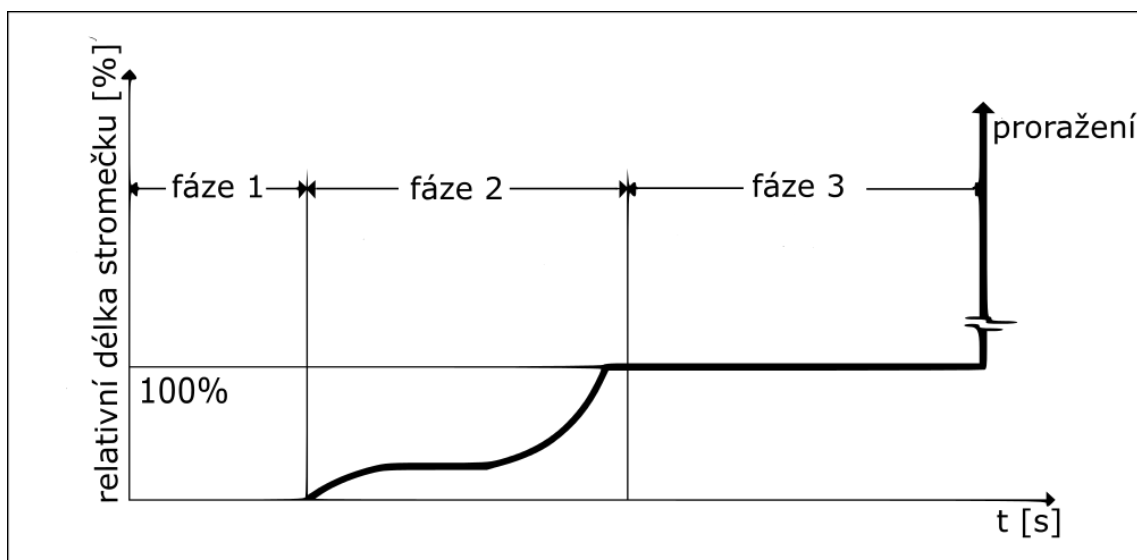
Elektrické stromečky jsou stromovitého nebo keřovitého tvaru. Jde o degradační jev. Stromečky mohou vést až k průrazu elektrické izolace i při jmenovité hodnotě elektrické intenzity [12]. V praxi většinou působí více účinků najednou. Pokud se například v dutince vytvoří krystaly kyseliny šťavelové, vlivem výbojové činnosti a přítomností prvků H, C nebo O, změní se rozložení elektrického pole tak, že se částečné výboje začnou zapalovat na vrcholcích krystalů. Sníží se sice velikost výbojů, ale zvýší se lokální hustota energie. V blízkosti vrcholů krystalů se objevují krátery zasahující dále do objemu izolantu, které se postupně mohou rozšířit a vyvolat růst elektrického stromečku. Tento proces je znázorněn na následujícím obrázku (*Obr. 20*). [12, 13]



Obr. 20: Etapy poškození způsobené částečnými výboji na povrchu izolantu
(převzato z: [13])

2.4.2 Růst elektrického stroměčku

Růst elektrického stroměčku je nejčastěji modelován pomocí hrotu jehly a uzemněné elektrody, přiložených na krychličku epoxidové pryskyřice nebo zalitím do jejího objemu. Vývoj stroměčku lze rozdělit do několika časových fází (Obr. 21). Tento průběh je obecně platný v různých elektroizolačních materiálech.



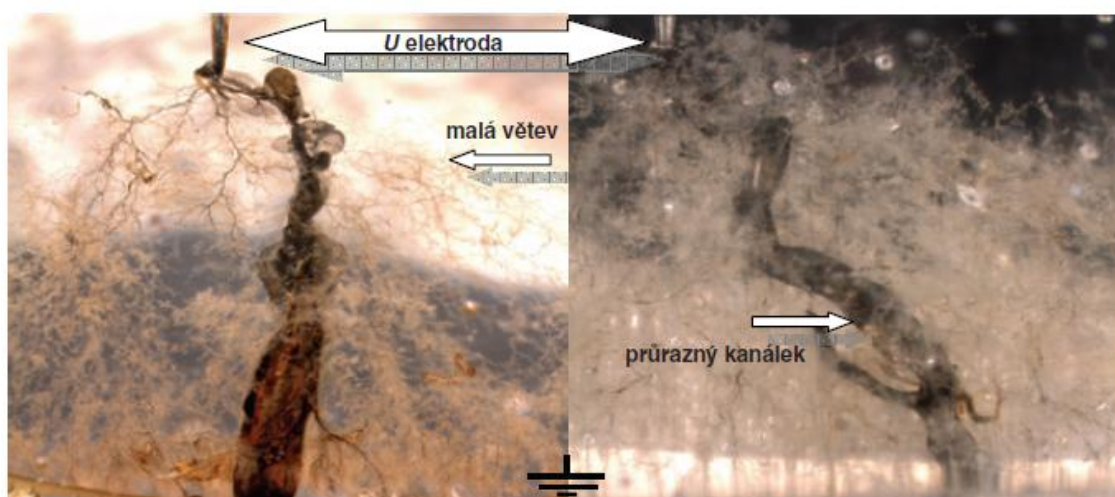
Obr. 21: Fáze růstu elektrického stroměčku v izolaci (převzato z: [1])

První fáze začíná po zahájení růstu stroměčku. Tento stav se dá detekovat jen velmi citlivou technikou.

Druhá fáze nastává po vytvoření první malé větve stroměčku. Z této větve se pak tvoří další větve, které se šíří směrem k uzemněné elektrodě. Druhá fáze končí při

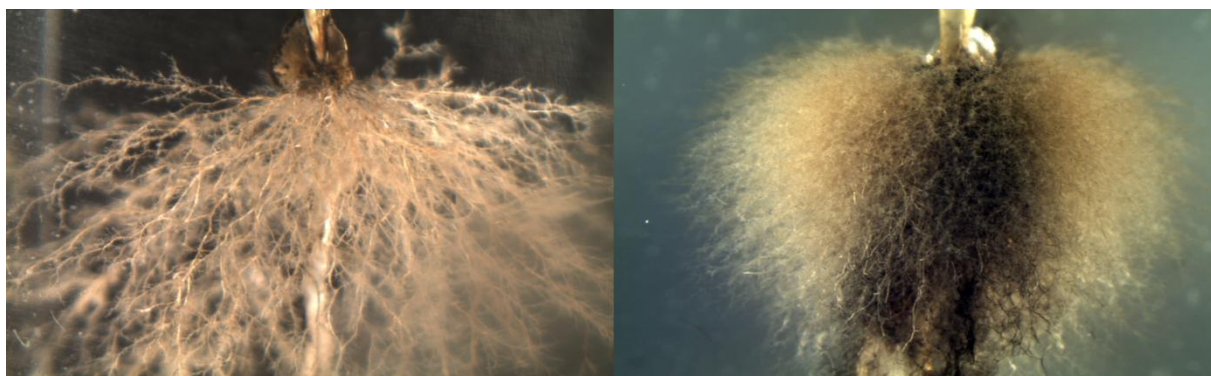
dosazení první větve opačné elektrody. K průrazu zatím nedochází, protože větve jsou malé a mají malou vodivost. Proud, který jimi teče, zatím nemá dostatečnou velikost, aby způsobil průraz.

Poslední fáze nastane v okamžiku prvního spojení elektrod a končí úplným průrazem dielektrika. Během této fáze se stromeček rozvětvuje a rozšiřují se jeho kanálky. Tyto kanálky jsou duté, a jakmile jeden dosáhne uzemněné elektrody, dochází k průrazu, protože elektrický proud je už k tomu dostatečně velký (Obr. 22). [1, 12]



Obr. 22: Elektrické stromečky (převzato z: [12])

Experimentem bylo zjištěno, že přidáním mikro- nebo nanočástic oxidu křemičitého do epoxidové pryskyřice se zvýší čas průrazu. To je dáno tím, že částice zvyšují odpor průrazného kanálku, mění tím jeho tvar, a tak se zvyšuje čas do úplného průrazu. [14]



Obr. 23: Tvar elektrického stromečku, vlevo – čistá epoxidová pryskyřice, vpravo – pryskyřice s nanočásticemi SiO_2 (převzato z: [14])

3 Metody měření částečných výbojů

Jednotlivé měřicí metody nejsou schopny podat veškeré informace o částečných výbojích v měřeném objektu, ze kterých by se dal vyhodnotit stav izolačního systému. Používají se proto soubory metod, které zajistí všechny potřebné hodnoty k posouzení výbojů. Jsou to kombinace metod globálních, které měří částečné výboje v celém zařízení s cílem zjistit stav izolace, a metod lokalizačních, které určují místo vzniku výbojů. [1, 2]

V praxi je vhodné získaná data porovnávat s daty naměřenými při uvedení stroje do provozu, s daty získanými během pravidelných kontrol stroje mimo provoz nebo při generální údržbě či revizi. Tento způsob získávání informací o stavu izolace se nazývá off-line měření. Se vzrůstajícími nároky na spolehlivost strojů se upřednostňuje sledování parametrů izolace během provozu, tzv. on-line. Výhodou on-line měření je skutečnost, že je možné zjistit změnu izolačního stavu okamžitě a předpovědět tak případnou poruchu. Další výhodou měření parametrů během provozu je, že při měření off-line bývají části izolačního systému zatěžovány jiným napětím, než je napětí provozní. [2]

K měření částečných výbojů lze využít elektrických nebo neelektrických metod. Kterých metod využít určuje zařízení, na kterém je měření prováděno. Například neelektrické chemické metody lze využít spíše v zařízeních, kde částečné výboje působí dlouhodobě, jelikož částečné výboje mají poměrně malou energii, např. olejové transformátory, zapouzdřené rozvodny s SF₆. Obecně jsou ale elektrické metody rozšířenější pro lepší měřitelnost a citlivost. [2]

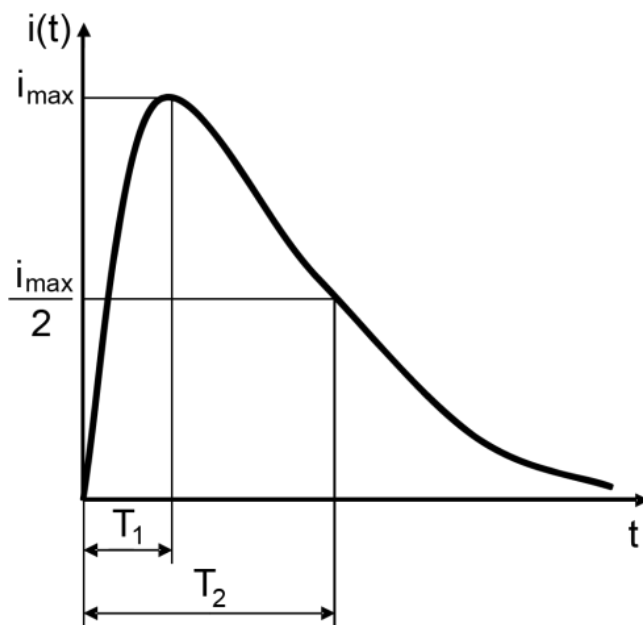
3.1 Elektrické metody

Při měření částečných výbojů elektrickou metodou jsou sledovány proudové impulzy, které částečné výboje vytvářejí. Vyhodnocením těchto impulzů měřicí technikou lze určit jejich velikost. Při působení výboje v dutině izolantu poklesne na svorkách zkoušeného objektu napětí. Indukčnost zdroje tento pokles nedovolí uhradit, proto je tento pokles úměrný proudovému impulzu výboje. Proudový impulz částečného výboje má svoji délku trvání závislou na materiálu, ve kterém vznikají. V kapalinách trvají déle, než v pevných izolantech. Pro pevný izolant je doba čela T_1 (doba do maxima) několik ns a pro pultýl T_2 (doba do poklesu na poloviční hodnotu) několik

desítek ns. U kapalin se tyto doby zvyšují na zhruba 1 μs pro čelo a několik μs pro pultýl impulsu. [1, 2]

Proudový impuls je zobrazen na *Obr. 23* a velikost náboje pulzu je dána vztahem (5). [1]

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



Obr. 24: Průběh proudového impulsu částečného výboje (převzato z: [2])

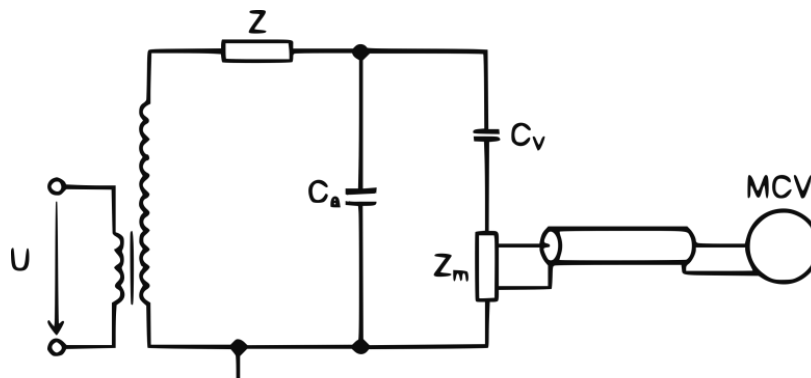
3.1.1 Galvanická metoda

Tato metoda je přímá a patří do skupiny globálních metod měření částečných výbojů. Spočívá v zaznamenávání proudových impulsů částečných výbojů měřicí impedancí. Měřicí impedance je většinou RLC člen, který odděluje impulzy výbojů superponované na napájecím napětí od napájecí frekvence. K tomuto členu jsou paralelně připojeny ochranné prvky proti přepětí (bleskojistky, kulové jiskřiště apod.). [1, 2]

Existují tři základní zapojení pro přímé měření částečných výbojů, které specifikuje norma ČSN 60270 [3]. Měřicí obvody obsahují napájecí obvod U , filtr rušení Z , měřený objekt C_a , vysokonapěťový vazební kondenzátor C_v , měřicí impedanci Z_m a měřič částečných výbojů MVC. Impedance Z zamezuje rušení a vybití částečných výbojů přes impedanci zdroje. Vazební kondenzátor musí být dimenzován na testovací

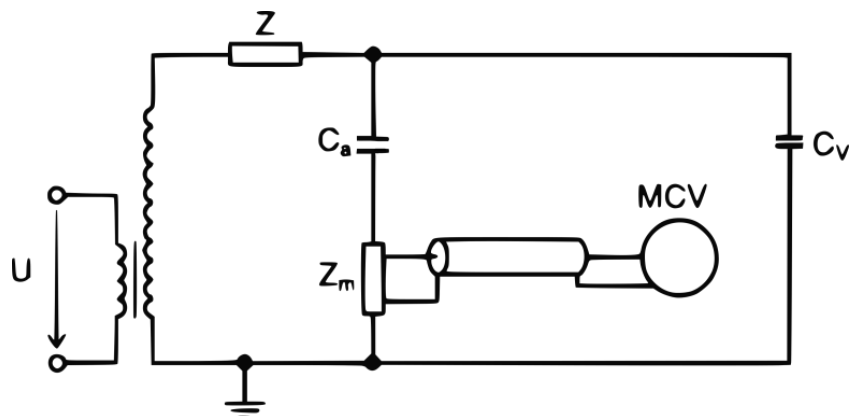
napětí, musí mít malou impedanci a nesmí vykazovat vlastní aktivitu částečných výbojů. [2]

První zapojení, zapojení impedance do větve vazebního kondenzátoru (*Obr. 24*), patří mezi nejpoužívanější. To je dáno možností měření uzemněných objektů nebo objektů o velkých kapacitách. Takto zapojená impedance umožňuje snímání pulzů částečných výbojů, aniž by vznikly obavy o měřicí přístroj při případném průrazu měřeného zařízení. [1, 2]



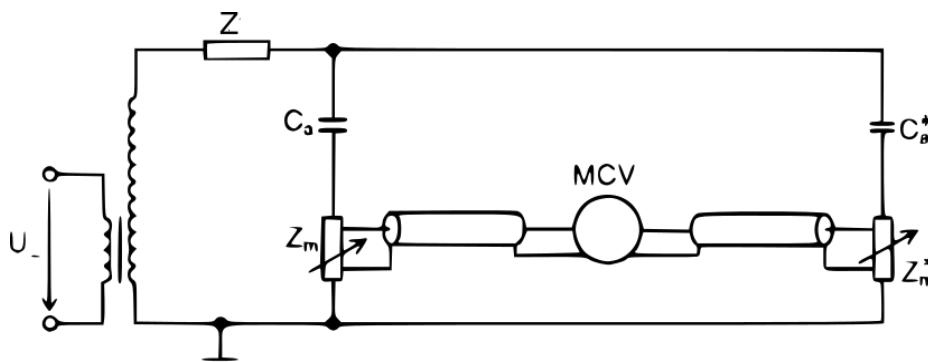
Obr. 25: Zkušební obvod s paralelní snímací impedancí (převzato z: [2])

V druhém zapojení (*Obr. 25*) je měřicí impedance připojena do větve měřeného objektu. Toto zapojení umožňuje u měřeného zařízení rozpojit uzemnění. Rozptylové kapacity, paralelně připojené k vazebnímu kondenzátoru, mohou zvýšit citlivost zapojení. Pokud je rozptylová kapacita obvodu vůči zemi větší než kapacita měřeného obvodu, lze ji vynechat. [1, 2]



Obr. 26: Zkušební obvod se sériovou snímací impedancí (převzato z: [2])

Pokud je třeba měřit zařízení v místě jeho instalace za provozních podmínek, je vhodné použít můstkové zapojení (Obr. 26). S takto zapojeným měřicím obvodem je možné potlačit vliv vnějšího rušení. Měřicí impedance snímají rozdílové proudové impulzy. Tyto impedance Z_m a Z_m^* jsou volně nastavitelné. Místo vazebního kondenzátoru o kapacitě blízké kapacitě měřeného objektu lze do obvodu připojit měřený objekt se známou hladinou částečných výbojů. [1, 2]



Obr. 27: Zkušební obvod v můstkovém zapojení (převzato z: [2])

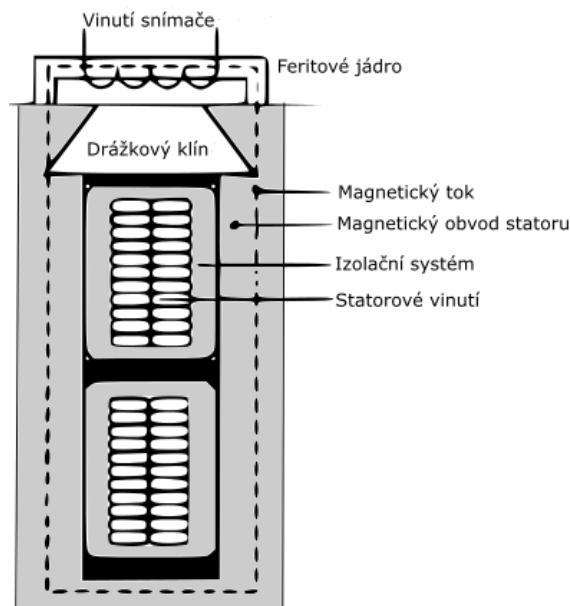
Měřicí impedance lze rozdělit na úzkopásmové, širokopásmové a ultra širokopásmové. Norma ČSN [3] doporučuje hodnoty $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$, $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$ pro úzkopásmové měřicí systémy a $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$, $30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$, $f_2 \leq 500 \text{ kHz}$ pro širokopásmová zařízení. Pro ultra širokopásmová zařízení norma rozsah frekvencí nespécifikuje. Experimentem [15] bylo zjištěno, že při použití vhodného impedančního přizpůsobení lze touto metodou měřit až do 3 GHz.

Mezi výhody galvanické metody patří vysoká citlivost, kterou lze měnit velikosti vazební kapacity. Další výhodou je možnost použití této metody on-line. Při měření on-line je malé ohrožení izolačního systému, protože každá jeho část je na svém pracovním potenciálu a není přetěžována. Nevýhodou je určitá citlivost na vnější i vnitřní rušení. [1, 2]

3.1.2 Metoda induktivně vázané sondy

Měření částečných výbojů induktivně vázanou sondou je vhodné pro diagnostiku izolačního systému elektrických točivých strojů. Induktivně vázanou sondou je možné poměrně přesně určit místo vzniku částečných výbojů, řadí se tedy mezi metody lokalizační. Měření je realizováno na stroji s demontovaným rotorem. Sonda se skládá z feritového jádra tvaru C a navinuté cívky. Po přiložení sondy na drážku statoru

(Obr. 27) vznikne proudový transformátor a do vinutí jádra sondy se začnou indukovat pulzy způsobené částečnými výboji.



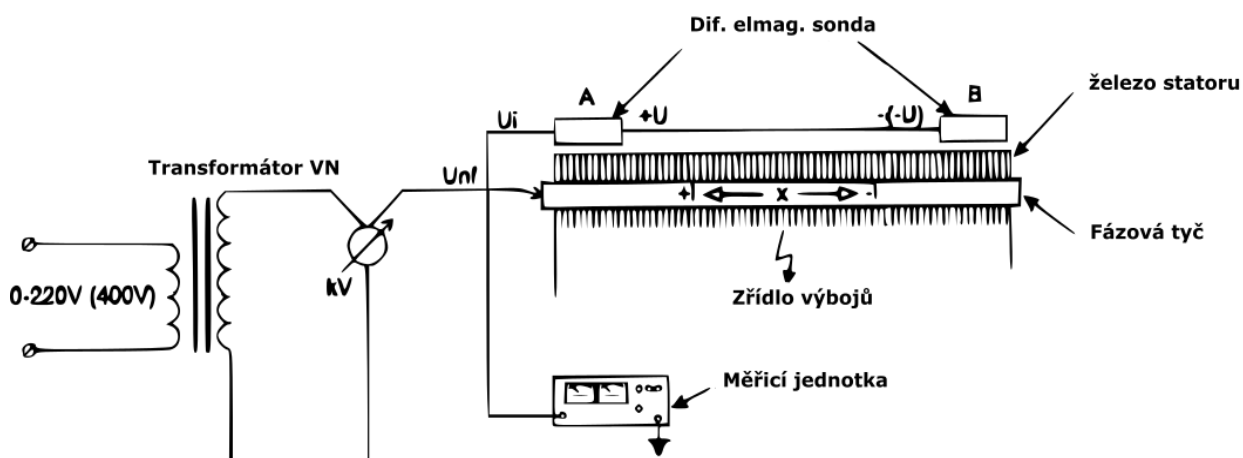
Obr. 28: Principiální schéma měření – přiložení sondy na drážku (převzato z: [1])

Ze sondy jsou data zaznamenávána v grafické podobě. Záznam je veden v souřadnicích X-Y, kde x jsou pořadová čísla drážek statoru a y je kvazivrcholová hodnota zdánlivého náboje nebo střední hodnota zdánlivého proudu. Výbojová činnost v jednotlivých drážkách se hodnotí podle rozdílu střední hodnoty výbojové činnosti všech drážek a úrovní kvazivrcholové hodnoty zdánlivého náboje i-té drážky. Pokud některé drážky vykazují výbojovou činnost s tímto rozdílem vyšším než 20 dB, je nutné se na tyto drážky zaměřit. [1, 2]

3.1.3 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

Další technika, jak lokalizovat místo vzniku částečných výbojů, je použití diferenciální elektromagnetické sondy. Metoda je vhodná pro zkoumání jednotlivých drážek fáze statorového vinutí točivého stroje. Sonda se skládá ze dvou sériově spojených induktivních snímačů, které jsou zapojeny proti sobě. Měření probíhá tak, že se snímače přiloží každý na jeden konec drážky vinutí (Obr. 28). Pokud je snímán jen rušivý signál, výstupní signály snímačů se vzájemně vyruší, protože proudový impuls se šíří oběma snímači stejným směrem. Pokud se mezi snímači nachází zřídlo částečných výbojů, proudový impuls prochází snímači v opačných směrech a výstupní signály se

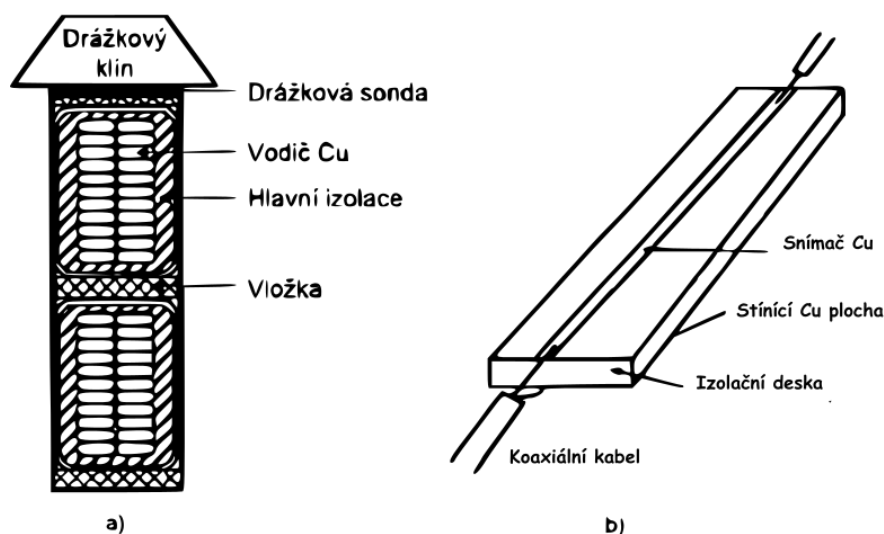
sčítají. Výhodou této metody je potlačení okolního rušení a vliv okolní výbojové činnosti. [1, 2]



Obr. 29: Principiální schéma měření diferenciální elektromagnetickou sondou (převzato z: [2])

3.1.4 Kapacitní drážková sonda

Potřeba diagnostikovat částečné výboje během provozu dala vzniknout drážkové sondě. Drážková sonda se vkládá do statorových drážek elektrických točivých strojů již při výrobě (Obr. 29a). Je tvořena izolační destičkou, která má jednu stranu pokrytou stínící měděnou vrstvou a druhou stranu tvoří měděný pásek, který slouží jako snímač (Obr. 29b). Sonda je připojena koaxiálním kabelem k vyhodnocovacímu zařízení. Ze způsobu uložení sondy plyne jednoznačná výhoda a to, že lze výbojovou činnost zaznamenat během provozu. Další výhodou je odolnost vůči vnějšímu rušení.



Obr. 30: Drážková sonda (převzato z: [1, 2])

Instalace konvenční kapacitní drážkové sondy do malého točivého stroje je vzhledem k vysokým instalačním nákladům neekonomické. Byl proto vyvinut senzor PDLC (Partial Discharge Locating Coupler). Tento senzor se montuje na povrch statorového vinutí nebo na povrch klínu, je tedy ekonomičtější. Přestože PDLC moc dobře nezachytí částečné výboje při nízkých kmitočtech, v porovnání s konvenčním senzorem je schopný detekovat výboje až do desítek MHz [16]. Také byl vyvinut senzor CSC (Capacitive Slot Coupler), který vykazuje lepší charakteristiky než konvenční senzor při měření více než pár metrů od zdroje částečných výbojů. [17]

3.1.5 Kapacitní a induktivní snímače

Při výbojové činnosti je do okolí vyzařována vysokofrekvenční energie, jejíž elektrickou složku zachycují kapacitní snímače a magnetickou složku induktivní snímače. Tento druh měření je vhodný pro orientační zjišťování výbojové činnosti a také pro měření on-line. [2]

Kapacitní snímače

Nejpoužívanějším tvar kapacitního snímače je koaxiální tvar. Lze s ním měřit koncovky kabelů nebo zařízení zapouzdřených rozvodů. Za značnou nevýhodu je považován fakt, že kapacitní snímače měří jen elektrické pole vyzářené do okolí a není tak možné měřit zdroj částečných výbojů, který je elektricky odstíněn. [1, 2]

Induktivní snímače

Výhodou induktivních snímačů je možnost použití při on-line diagnostice. Induktivní snímače se dělí na lineární a toroidní. Toroidní sondy jsou vhodné pro snímání částečných výbojů poblíž uzemnění. Vodič pracovního uzemnění prochází toroidem a tvoří primární vinutí magnetického obvodu. Sekundární vinutí tvoří vinutí toroidu. Lineární sonda se umísťuje do elektromagnetického pole tak, aby podélná osa senzoru byla orientována shodně s vektory magnetické indukce a intenzity. Lineární snímače jsou vhodné spíše pro orientační určení výbojové činnosti. Jejich výhodou je, že při jejich použití není nutné rozpojit silový obvod. [1, 2]

3.2 Neelektrické metody

Světelné záření viditelného i ultrafialového spektra, zvukové vlny, tepelný ohřev a chemické zplodiny. Všechny tyto projevy částečných výbojů zjišťují a kvantifikují neelektrické metody. [1]

3.2.1 Akustická metoda

Akustická detekce spočívá ve snímání zvukových vln, které jsou vytvářeny výbojovou činností. Akustické vlny jsou snímány vhodnými mikrofony ve slyšitelném pásmu nebo v ultrazvukovém pásmu. Tato metoda má menší citlivost než elektrické metody, ale nepodléhá elektromagnetickému rušení, protože je elektricky izolována. Vzhledem k této vlastnosti se akustická metoda jeví jako vhodná pro měření transformátorů v provozu. [18]

První způsob měření je jednou akustickou sondou, kterou je postupně hledáno místo vzniku výbojové činnosti. Druhý způsob, vhodný pro on-line měření, je založen na detekci pomocí několika pevně instalovaných sond a následného softwarového zpracování. Softwarové zpracování je možné vylepšit algoritmem, který detekuje možné zkreslení jednotlivých senzorů a přispívá tak k přesnější lokalizaci místa vzniku částečných výbojů. Využívá se také vlnkové a diskrétní vlnkové transformace [19, 20]. V průmyslu je více využíváno měření v ultrazvukovém pásmu, protože ultrazvukové vlny jsou spíše charakteristické pro částečné výboje než pro okolní prostředí. [1, 2]

3.2.2 Chemická metoda

Chemická detekce je velmi využívána při on-line monitoringu velkých olejových transformátorů nebo zařízení s plynou izolací SF₆. Metoda není schopná lokalizovat částečné výboje, bylo by nutné použít mnoho senzorů, je tedy vhodná pouze pro zjištění přítomnosti problému, například při on-line monitoringu. Tato metoda je založená na detekci rozpuštěných plynů v oleji nebo plynu, které vznikají při reakci částečných výbojů s plynem v dutinkách izolantu. Míra koncentrace plynů určuje stupeň degradace izolantu a druh rozpuštěných plynů určuje degradační vliv (částečné výboje, přehřátý olej, elektrický oblouk atd.), který v oleji působí [21]. Tyto produkty rozkladu jsou: vodík H₂, metan CH₄, etylen C₂H₄, acetylen C₂H₂ a propylen C₃H₆. Plyny jsou v oleji zjišťovány plynovou chromatografií, tzv. DGA (Dissolved Gas Analysis). Pokud je v zařízení použit vzduch jako chladicí médium, využívá se metoda indikace ozonu.

Ozon vzniká při reakci částečných výbojů s kyslíkem (ionizace). Jeho přítomnost tedy indikuje výskyt částečných výbojů v zařízení. [1, 2, 21]

Vodík je jedním z hlavních rozpuštěných plynů, který poukazuje na výskyt degradačního vlivu. Polovodičové senzory na bázi SnO_2 jsou široce používány pro jejich účinnost a širokou použitelnost. Jejich jistá nevýhoda je nevyhovující selektivita a dlouhodobá stabilita. S cílem zlepšit vlastnosti senzoru je SnO_2 dotován oxidem měďnatým CuO . Spojení CuO-SnO_2 vykazuje vyšší reakci na vodík a nižší provozní teplotu v porovnání s SnO_2 . Studie prokázala, že manipulace s PN přechodem je metoda, která vede k výrobě nových kompozitních nanostruktur, které mohou vodík indikovat daleko efektivněji. [22]

3.2.3 Optická detekce

Částečné výboje se opticky projevují ve viditelném, infračerveném a ultrafialovém spektru. Výboje lze za vhodných podmínek pozorovat, zachytit kamerou nebo fotoaparátem. Většinou je ovšem místo vzniku výbojů skryté uvnitř dielektrika, tudíž není možné je pozorovat. Z tohoto důvodu se optická detekce příliš nepoužívá. [1]

3.2.4 UHF metoda

Signál částečných výbojů obsahuje i velmi vysoké kmitočtové složky, řádově stovky megahertz až jednotky gigahertz, tzn. pásmo ultra krátkých vln (anglicky UHF). Při použití galvanické metody v tomto frekvenčním pásmu dochází k poměrně velkému útlumu. UHF metoda snímá vysokofrekvenční signál šířící se prostorem nádoby transformátoru, a to pomocí různých druhů antén. To je hlavní rozdíl oproti galvanické metodě, která snímá signál šířící se po vedení. Výhodou UHF metody je větší citlivost oproti galvanické i akustické metodě, tudíž možnost zachytit výbojovou činnost v době, kdy ještě není pro izolační systém tak nebezpečná. Nevýhodou je, že jsou snímány i vnější rušivé signály (DVB-T, GSM, aj.), lze to však částečně potlačit úzkopásmovým UHF snímačem. Vzhledem k tomu, že UHF metodu nelze kalibrovat, je brána spíše jako detekční metoda. V poslední době lze už ale i pomocí UHF metody částečné výboje lokalizovat. Jako snímače pro UHF metodu jsou například používány tyto druhy antén: čtvrtlenný monopól, disková anténa [23] nebo Vivaldiho anténa [24]. [25, 26]

4 Měření na modelovém uspořádání

V předchozí teoretické části práce je nastíněn vznik částečných výbojů a jejich parametry. Praktickou částí této práce je měření výbojů na modelovém uspořádání hrot-deska ve vzdálenosti 1 cm. Částečné výboje byly měřeny galvanickou metodou, měřicím systémem PD Smart. Před měřením byla provedena kalibrace obvodu (popsána níže). Bez kalibrace software měřil rušení sítě. Mezi hrot a desku byly postupně vkládány čtyři vzorky o známé tloušťce, relativní permitivitě a materiálu (*Tabulka 1*). Byl zkoumán vliv materiálu na parametry částečných výbojů. Nejprve bylo měřeno uspořádání bez přiložených vzorků, poté byly postupně změřeny i vzorky. Uspořádání bylo měřeno s přiloženým střídavým i stejnosměrným napětím a byly zaznamenávány parametry částečných výbojů jako je zapalovací napětí U_i , zhasací napětí U_e a zdánlivý náboj q . Nejprve byly měřeny výboje pro střídavé napětí. Měření probíhalo tak, že bylo postupně plynule zvyšováno napětí až do hodnoty, kdy se zapálily první částečné výboje v záporné půlperiodě. Poté bylo napětí dále zvyšováno až do chvíle, kdy se objevily výboje i v kladné půlperiodě. Následně bylo napětí snižováno a zkoumána hodnota napětí, při kterém zhasly částečné výboje v kladné a poté záporné půlperiodě. Pro stejnosměrné napětí byl postup měření shodný s tím rozdílem, že bylo nutné polaritu napětí měnit manuálně. V *Tabulce 2* je vidět porovnání těchto parametrů pro obě napětí.

Druhá část měření je experiment, konkrétně vytvoření Lichtenbergových obrazců na jednotlivých bariérách modelového uspořádání s přiloženým střídavým i stejnosměrným napětím. Lichtenbergovy obrazce jsou útvary vytvořené působením vysokonapěťových výbojů na povrchu materiálu. Jsou to v podstatě zobrazení drah nábojů. Z obrazců lze poznat následující: [27]

- Zda působí kladné nebo záporné napětí,
- Velikost kladného obrazce je větší než záporného při působení stejně velkého napětí,
- Poloměr obrazců je lineární funkcí napětí,
- Forma obrazce určuje, zda působí střídavé nebo stejnosměrné napětí,
- Tvar obrazců závisí na použité elektrodě.

Vzorky byly měřeny ve vzdálenosti 1 cm od hrotu. Na každý vzorek byla nanášena vrstva jemného pudru. Po dobu 10 minut bylo přiloženo zkušební napětí a působily na bariéru částečné výboje. U střídavého napětí byla nastavena hodnota zapalovacího napětí, u stejnosměrného napětí byla nastavena kladná hodnota rovna minimálně dvojnásobku zapalovacího napětí, tj. 20 kV, 700 pC. Takto vysoké napětí bylo zvoleno z důvodu, že při nastavení hodnoty zapalovacího napětí a uplynutí časového intervalu 10 minut nebyly obrazce tak viditelné, jako při působení střídavého napětí. Pro záporné napětí se netvořily obrazce ani pro -20 kV. Z fotografií výsledných obrazců je na první pohled jasné, že je rozdíl, jestli působí výboje vyvolané střídavým nebo stejnosměrným napětím. U střídavého napětí se tvoří kruh a u stejnosměrného napětí se tvoří nepravidelné větve vzdalující se od místa působení.

Tabulka 1: Bariéry použité při měření

Materiál	Tloušťka [μm]	Relativní permitivita [-]
Plexisklo	848	3,6
Kartit	484	5,7
Relastik	285	3,4
Sklotextit FR-4	565	4,8

Kalibrace obvodu

Kalibrace obvodu se provádí bez zkušebního napětí a před každým měřením nového objektu nebo uspořádání. Externí kalibrátor připojujeme co nejbližší k měřenému objektu z důvodu omezení parazitních kapacit. Kalibrační pulzy o známé zvolené hodnotě jsou generovány do celého obvodu. Tato hodnota se volí podle předpokládané hodnoty zdánlivého náboje pulzů při měření, které tak budou změřeny bez velké odchylky. [1] Pro měření byla zvolena hodnota kalibračních pulzů 50 pC.

Naměřené hodnoty

Hodnoty zapalovacího a zhášecího napětí pro střídavé napětí jsou převedeny na maximální hodnotu z důvodu možnosti porovnání se zapalovacím a zhášecím napětím pro stejnosměrné napětí. Při zjišťování zapalovacího napětí bylo nutné nastavovat hodnotu napětí opravdu velmi jemně, aby bylo možné rozeznat vnik výbojů v záporné a kladné půlperiodě. Pokud nebylo napětí nastavováno jemně, objevily se výboje v obou půlperiodách najednou. Z naměřených hodnot v *Tabulce 2* a *Tabulce 3* je možné v grafech vyčíst jistou závislost zapalovacího napětí na tloušťce materiálu. Se zvyšující

se tloušťkou stoupá i velikost zápalného napětí. Tato závislost je zobrazena v grafech na Obr. 30 a Obr. 31. Vzhledem k malému počtu vzorků je těžší určit trend křivek, ale i přes odchylky je vcelku zřetelný. Rozdíl mezi tloušťkami jednotlivých vzorků je nepatrný, řádově mikrometry. Pokud by byly použity tlustší bariéry, byl by vliv na zapalovací napětí patrnější. To může být tématem pro další výzkum, např. v diplomové práci. V pulzních diagramech (Obr. 32.-37.) a diagramech četnosti (Obr. 38.-43.) je možné vidět, že naměřené výboje se shodují s teoretickým předpokladem. Shodují se s výboji typu A, které vznikají při uspořádání hrot-deska, mezi nimiž je vzduch, mají stejnou velikost a vyskytují se kolem maxima.

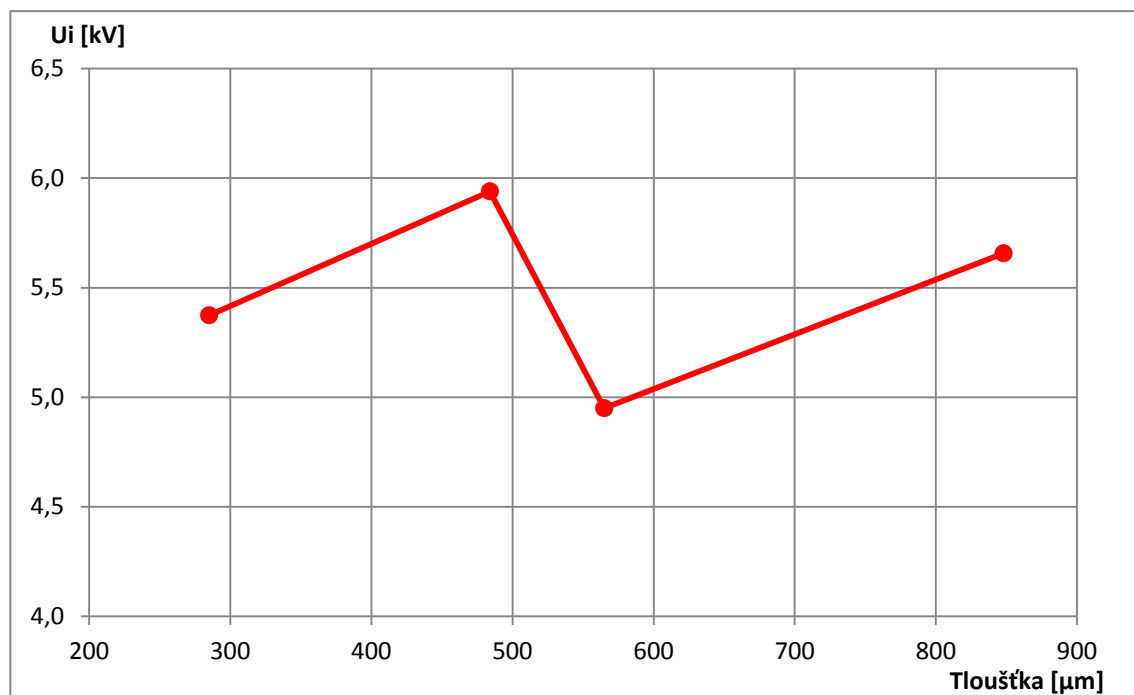
Tabulka 2: Naměřené parametry částečných výbojů – střídavé napětí

		Střídavé napětí				
		Efektivní hodnoty		Maximální hodnoty		q [nC]
		Ui [kV]	Ue [kV]	Ui [kV]	Ue [kV]	
Bez bariéry	Kladná půlvlna	3,9	3,8	5,5	5,4	2,5
	Záporná půlvlna	3,3	3,1	4,7	4,4	0,1
Plexisklo	Kladná půlvlna	4,0	3,9	5,7	5,5	2,5
	Záporná půlvlna	4,0	3,9	5,7	5,5	2,5
Kartit	Kladná půlvlna	4,2	4,1	5,9	5,8	6
	Záporná půlvlna	4,2	4,1	5,9	5,8	6
Relastik	Kladná půlvlna	3,8	3,7	5,4	5,2	3,3
	Záporná půlvlna	3,8	3,7	5,4	5,2	3,3
Sklotextit FR-4	Kladná půlvlna	3,5	3,4	4,9	4,8	2,1
	Záporná půlvlna	3,5	3,4	4,9	4,8	2,1

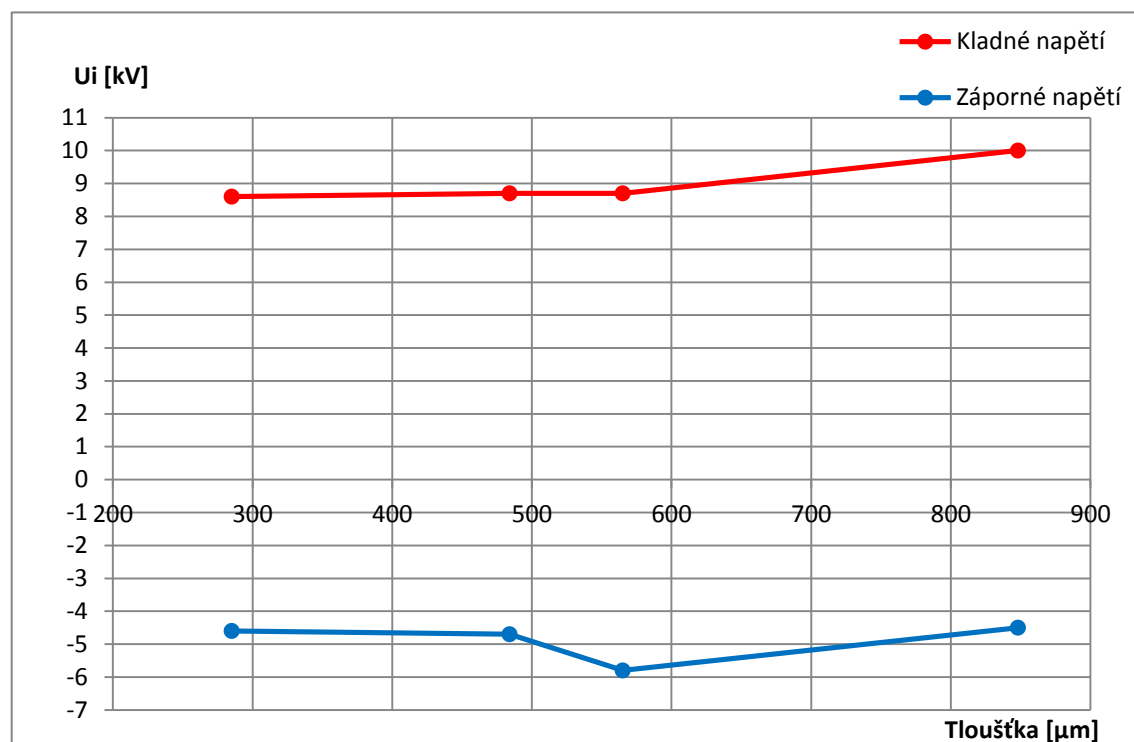
Tabulka 3: Naměřené parametry částečných výbojů – stejnosměrné napětí

		Stejnoseměrné napětí		
		Ui [kV]	Ue [kV]	q [nC]
Bez bariéry	Kladné napětí	7,5	7,4	3
	Záporné napětí	-4	-3,8	0,06
Plexisklo	Kladné napětí	10	9,8	0,7
	Záporné napětí	-4,5	-4,5	0,07
Kartit	Kladné napětí	8,7	8,6	2,5
	Záporné napětí	-4,7	-4,6	0,08
Relastik	Kladné napětí	8,6	8,6	1,2
	Záporné napětí	-4,6	-4,5	0,06
Sklotextit FR-4	Kladné napětí	8,7	8,5	1,6
	Záporné napětí	-5,8	-5,6	0,11

Grafy

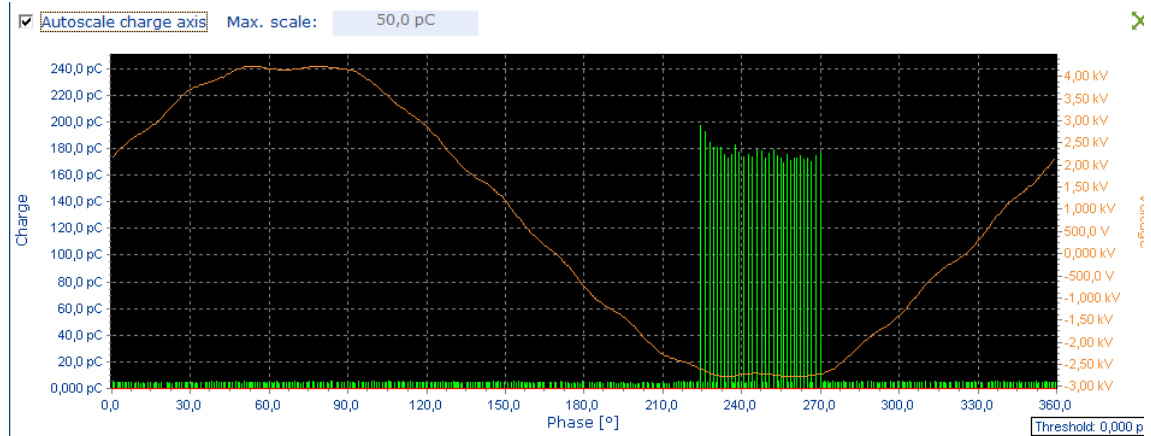


Obr. 31: Závislost zapalovacího napětí na tloušťce bariéry – střídavé napětí

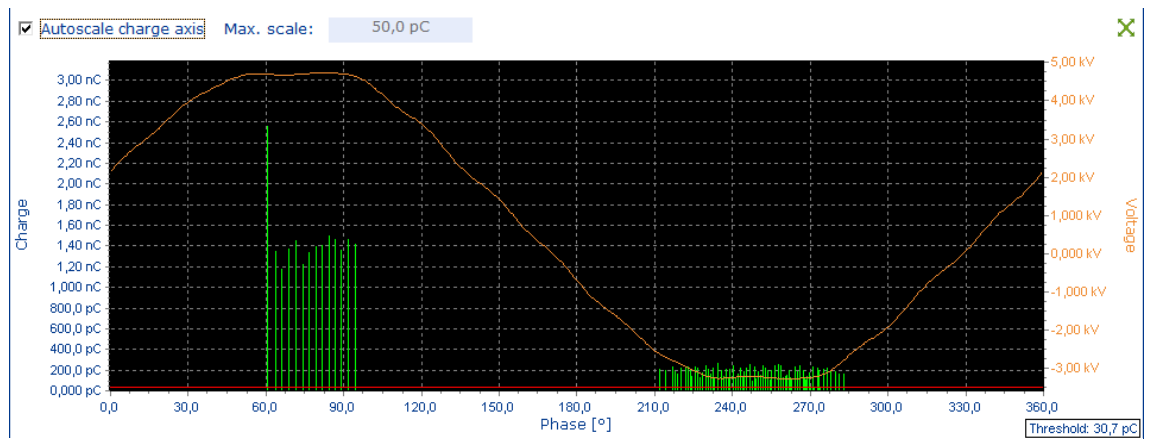


Obr. 32: Závislost zapalovacího napětí na tloušťce bariéry – stejnosměrné napětí

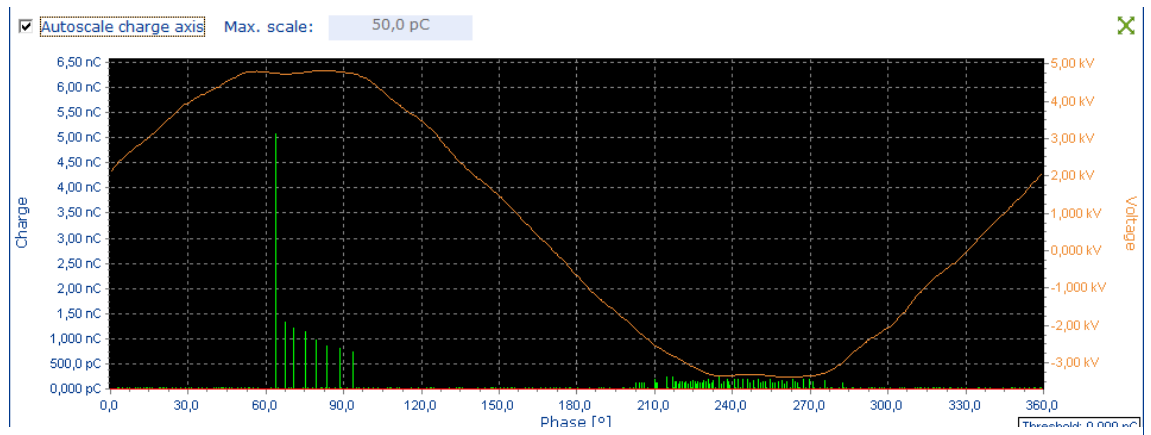
Pulzní diagramy a diagramy četnosti



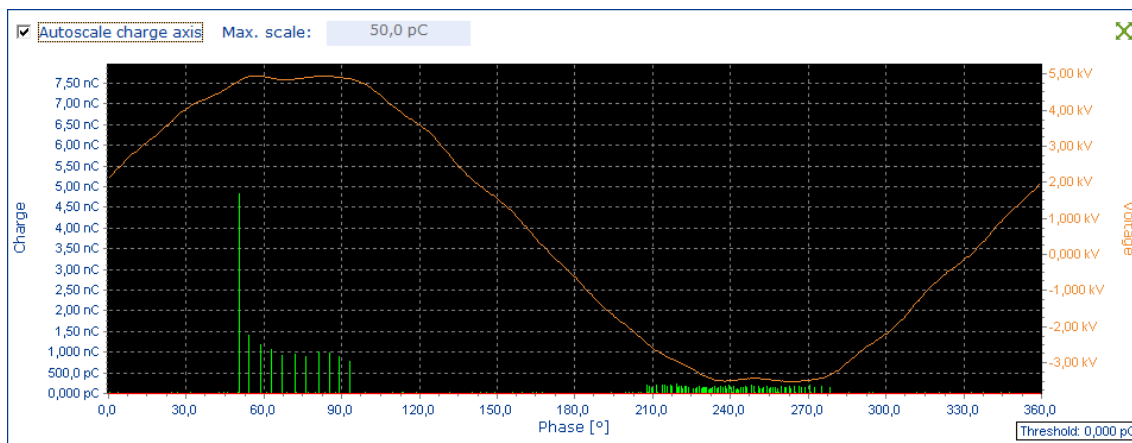
Obr. 33: Pulzní diagram – bez bariéry, výboje v záporné půlvlně



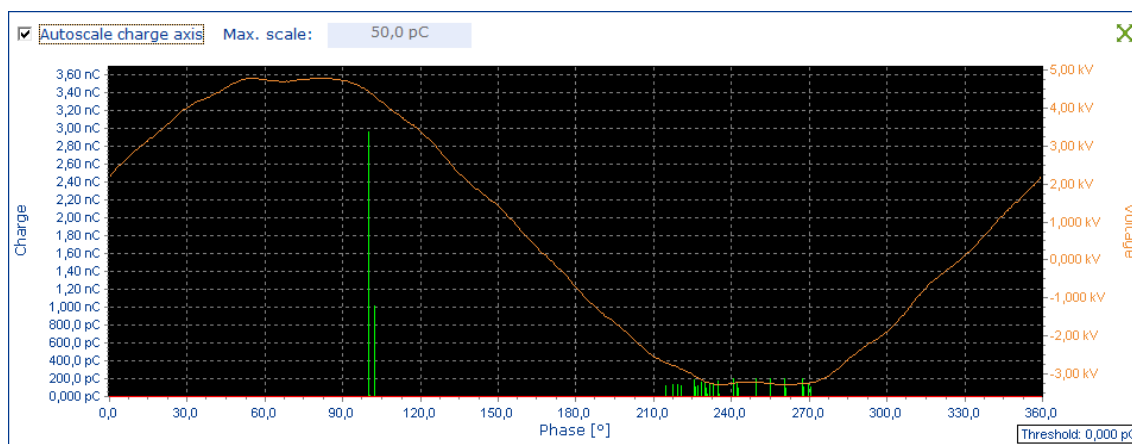
Obr. 34: Pulzní diagram – bez bariéry, výboje v kladné i záporné půlvlně



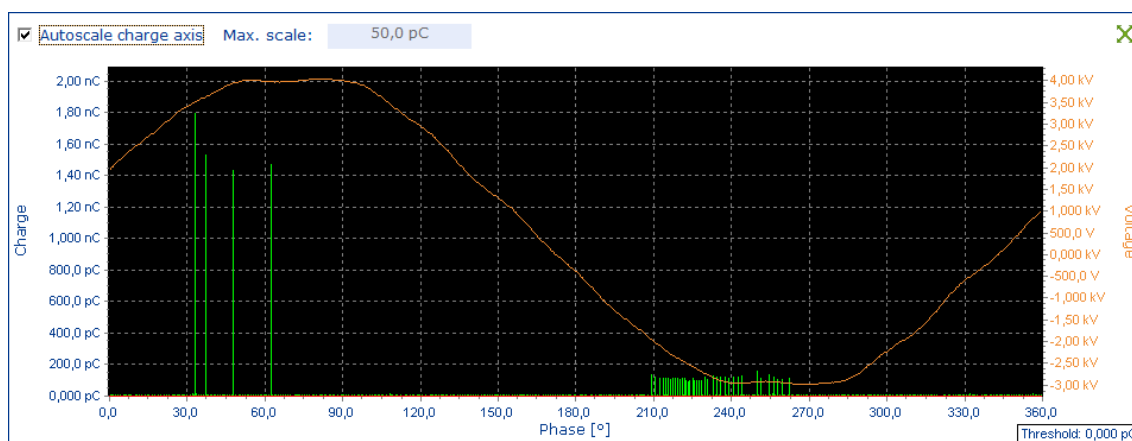
Obr. 35: Pulzní diagram – plexisklo



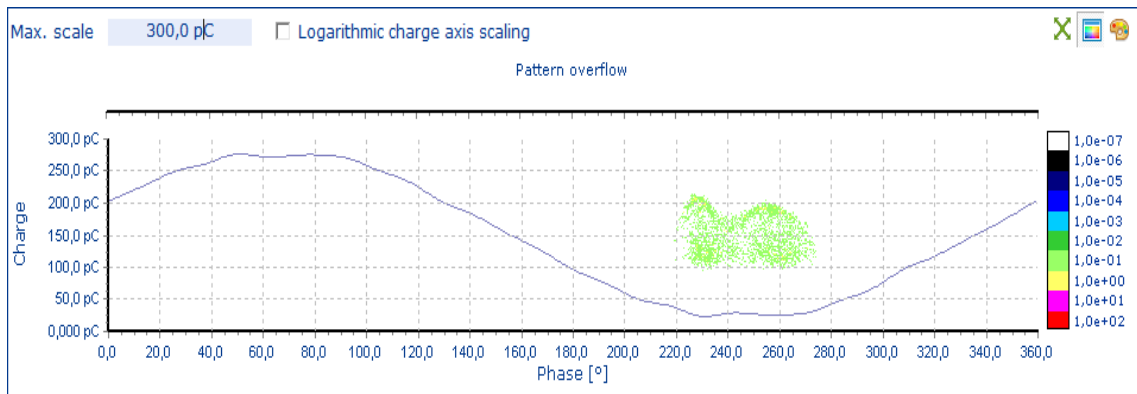
Obr. 36: Pulzní diagram – Kartit



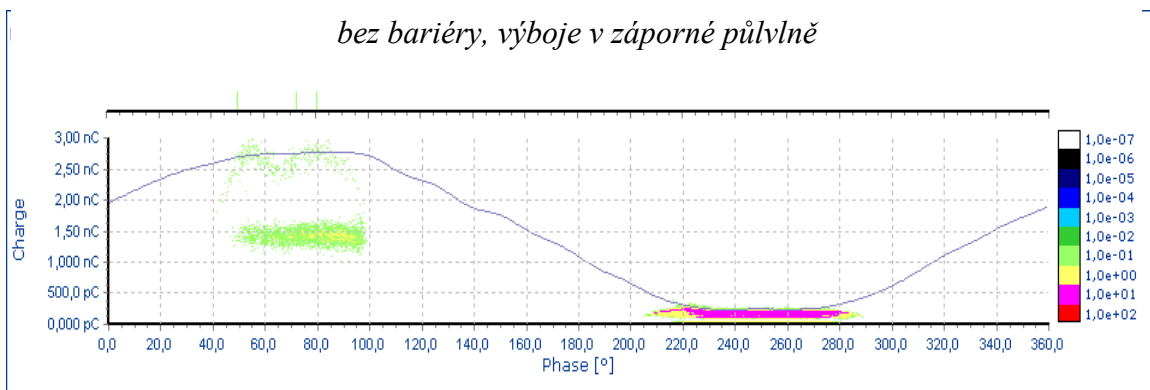
Obr. 37: Pulzní diagram – Relastik



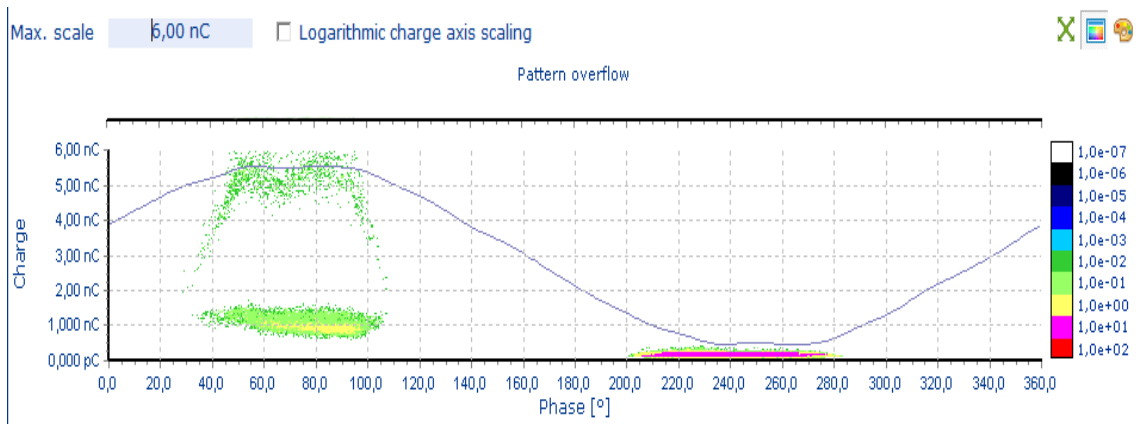
Obr. 38: Pulzní diagram – Sklotextit FR-4



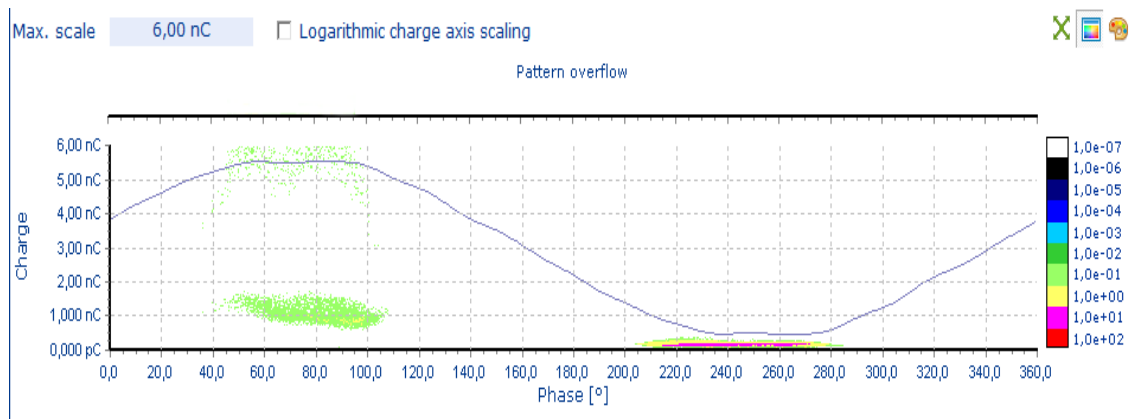
Obr. 39: Diagram četnosti výbojů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi – bez bariéry, výboje v záporné půlčlenně



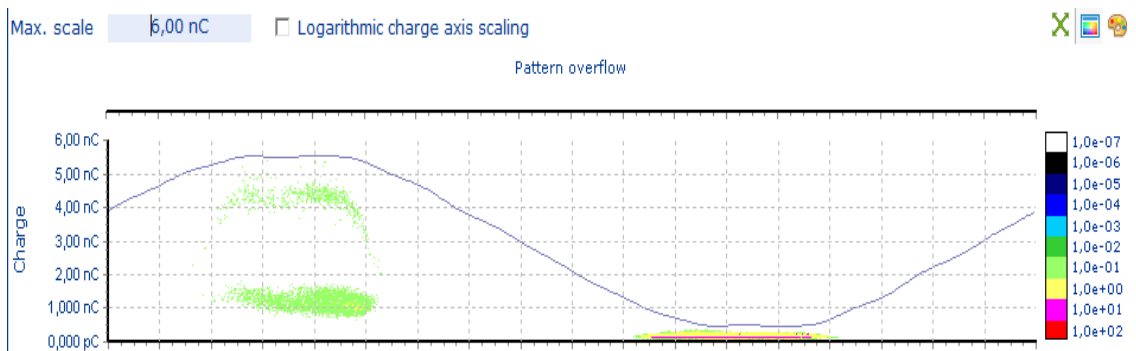
Obr. 40: Diagram četnosti výbojů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi – bez bariéry, výboje v kladné i záporné půlčlenně



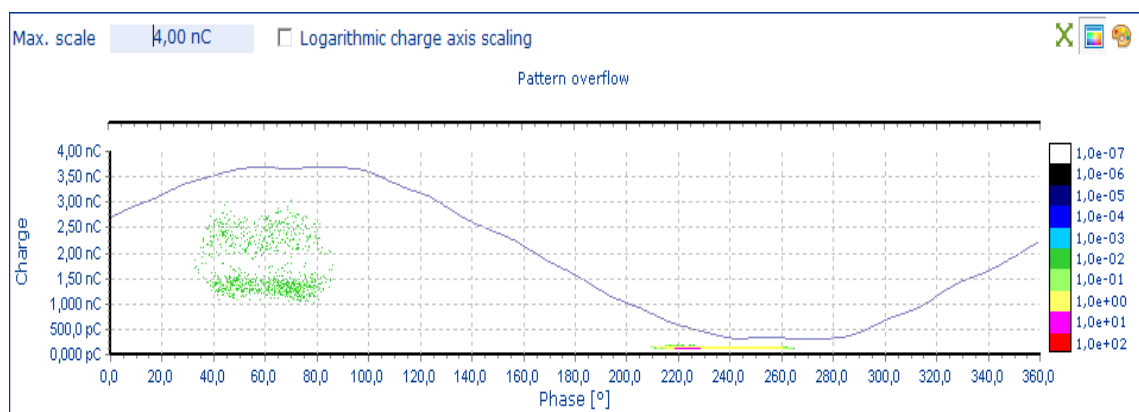
Obr. 41: Diagram četnosti výbojů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi – plexisklo



Obr. 42: Diagram četnosti výbojů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi –
Kartit

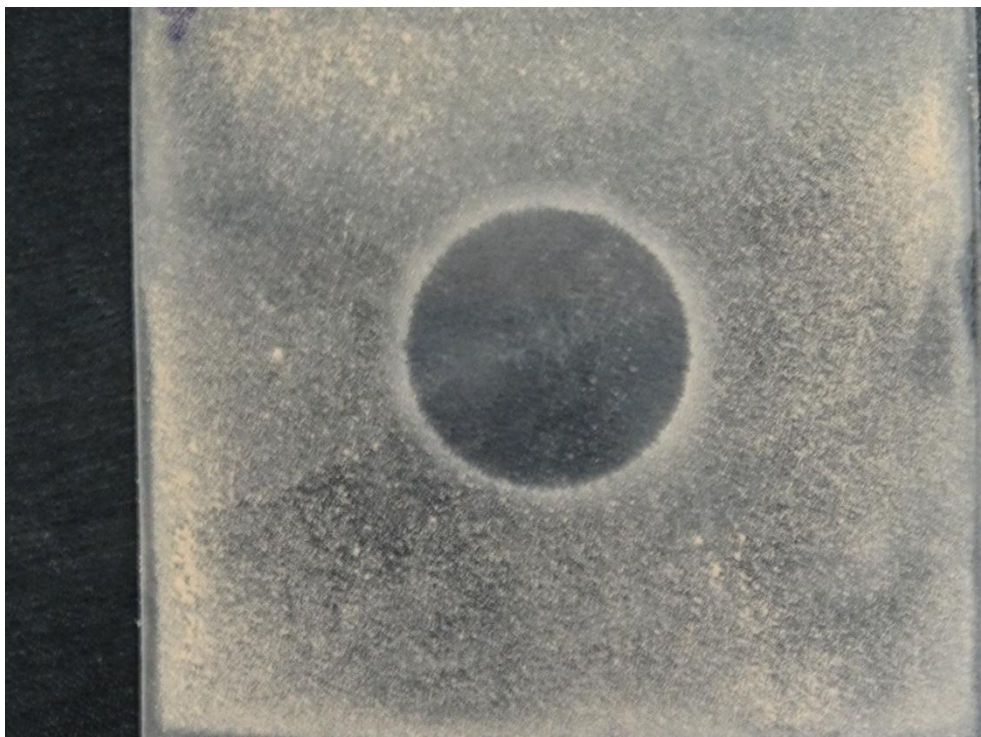


Obr. 43: Diagram četnosti výbojů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi –
Relastik

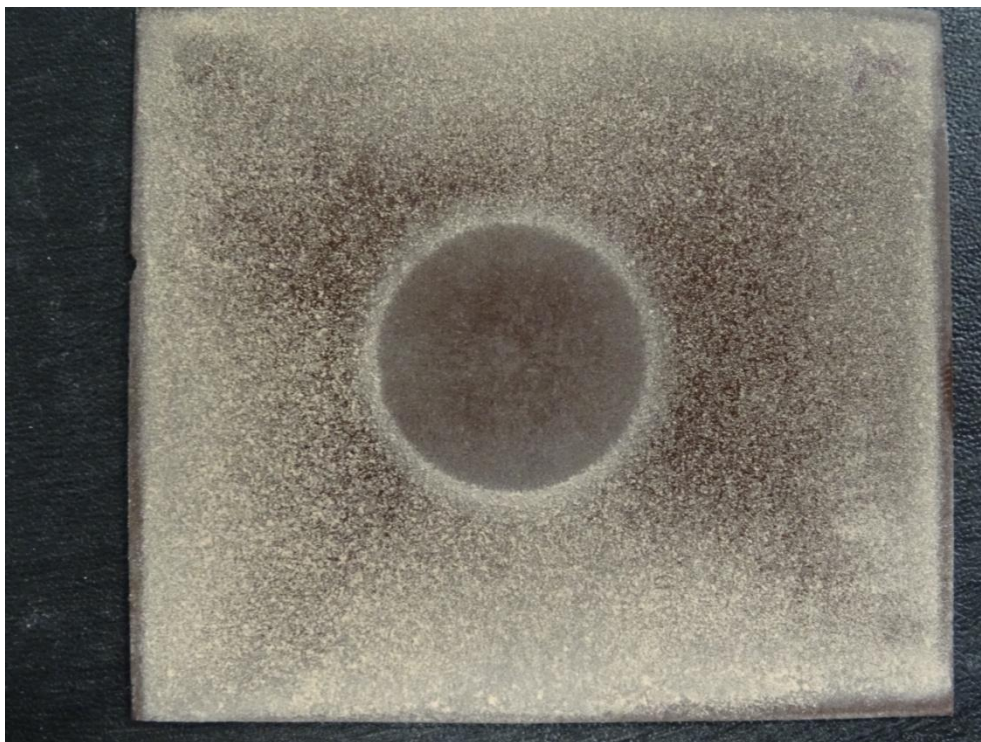


Obr. 44: Diagram četnosti výbojů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi –
Sklotextit FR-4

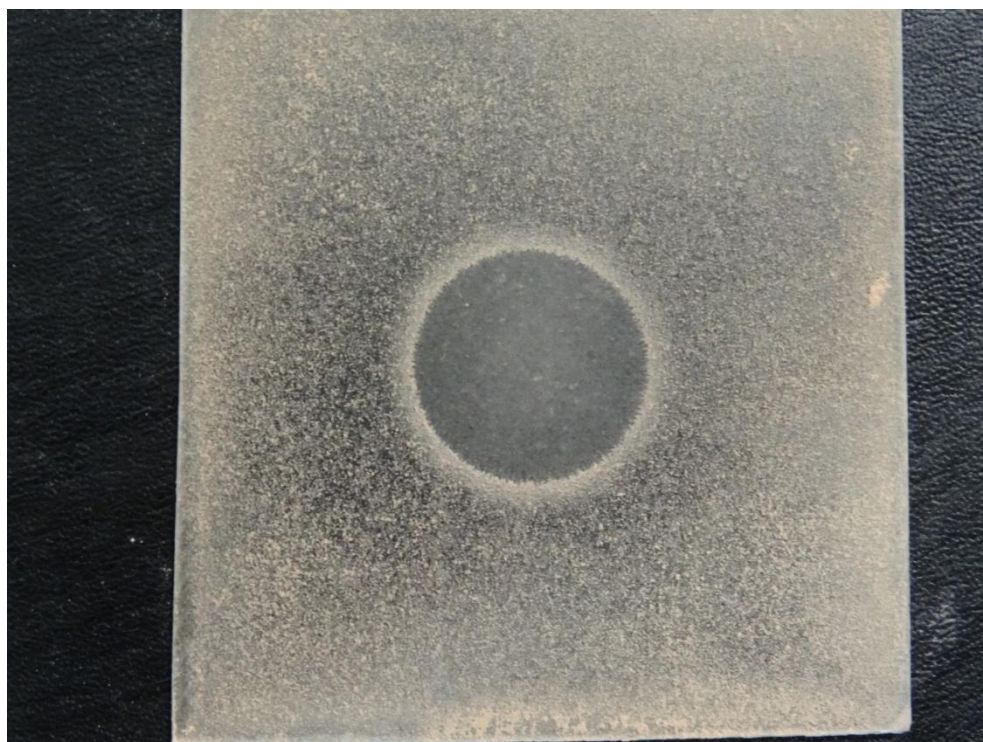
Lichtenbergovy obrazce



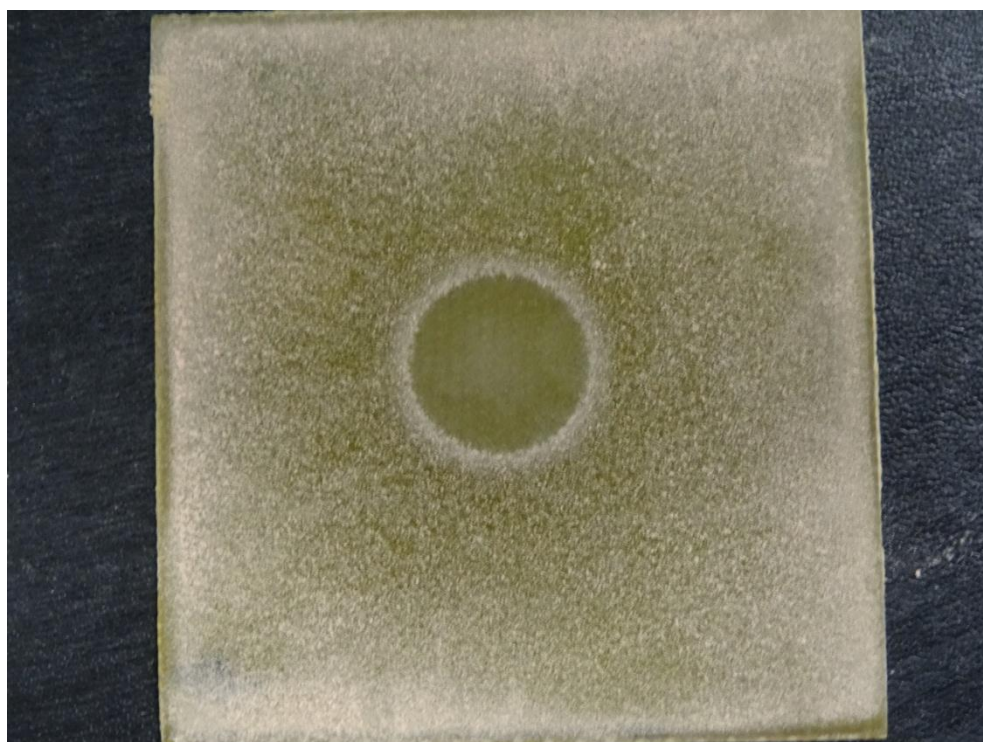
Obr. 45: Lichtenbergův obrazec – AC – Plexisklo



Obr. 46: Lichtenbergův obrazec – AC – Kartit



Obr. 47: Lichtenbergův obrazec – AC – Relastik

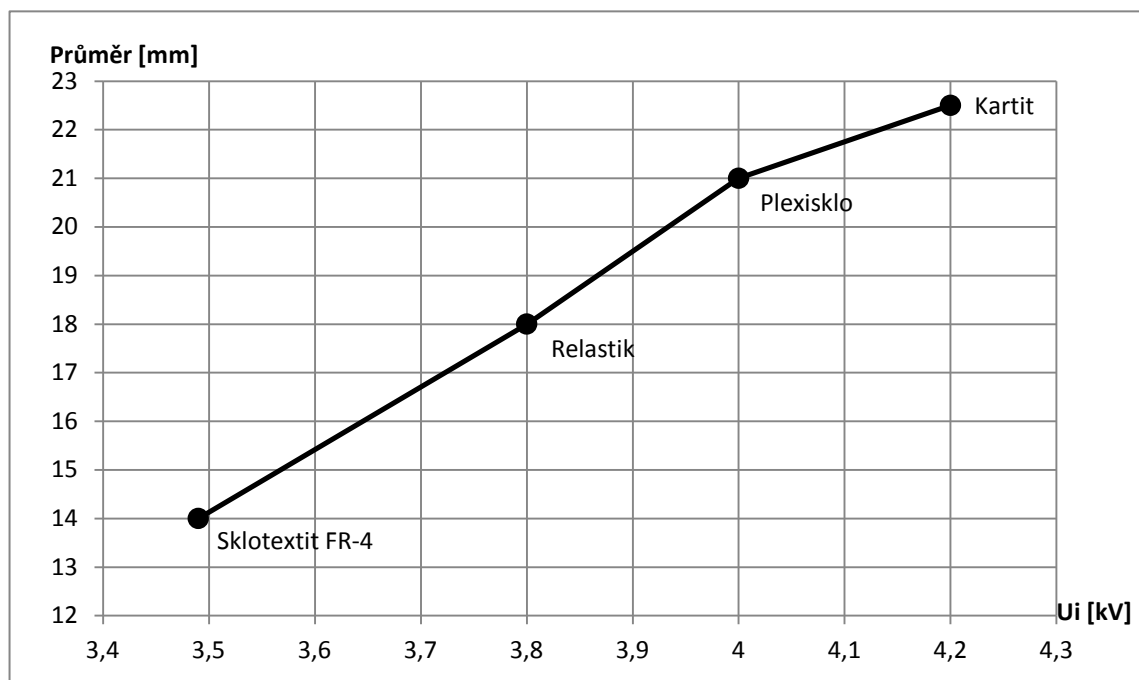


Obr. 48: Lichtenbergův obrazec – AC – Sklotextit FR-4

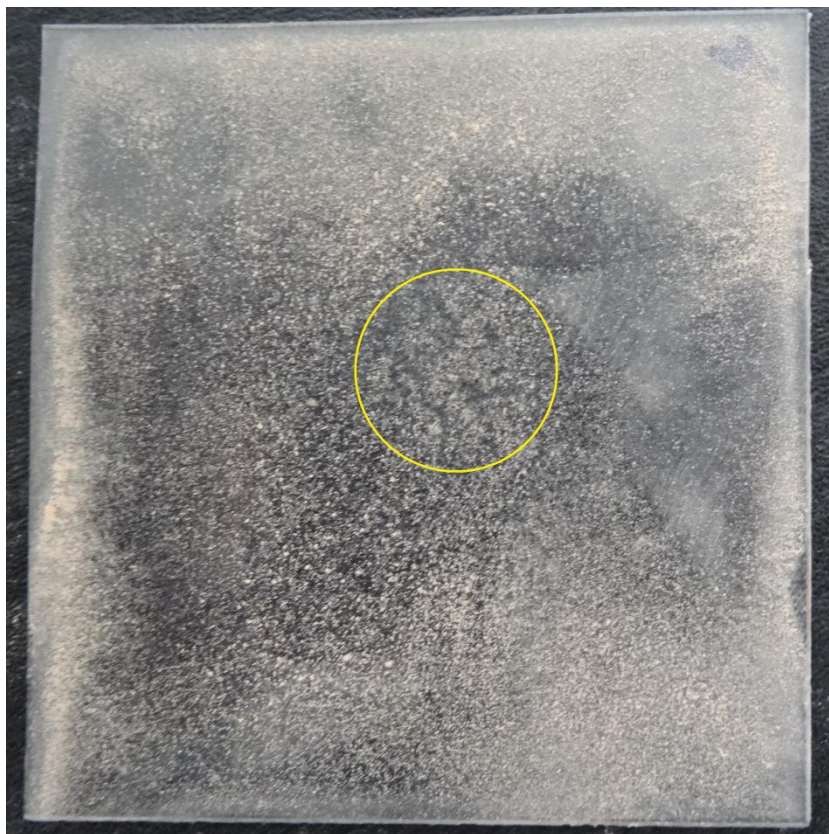
Z fotek je na první pohled vidět, že pokud jsou částečné výboje vyvolány střídavým napětím, tvar Lichtenbergových obrazců je kruh bez viditelných drah po nábojích. V následující *Tabulce 4* je porovnání průměru kruhu se zapalovacím napětím materiálu. Z grafu na *Obr. 48* je vidět, že tato závislost, se zdá lineární, což potvrzuje teoretický předpoklad [27]. Pro větší věrohodnost výsledků by bylo vhodnější změřit větší množství vzorků.

Tabulka 4: Závislost průměru kruhu na zapalovacím napětí.

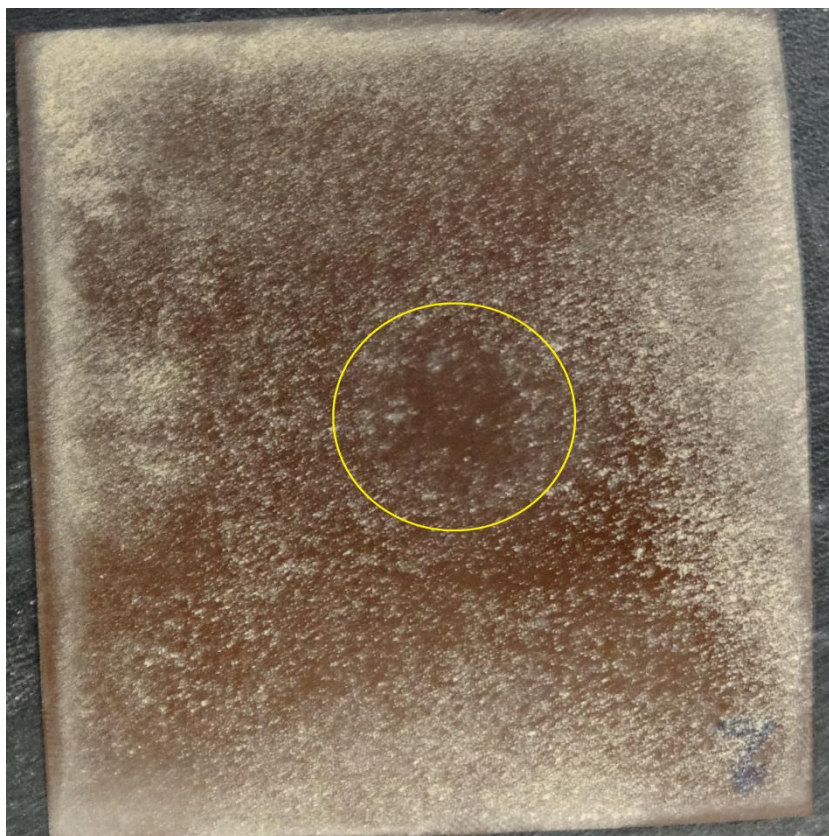
Materiál	Průměr [mm]	U _i [kV]
Sklotextit FR-4	14	3,49
Relastic	18	3,8
Plexisklo	21	4
Kartit	22,5	4,2



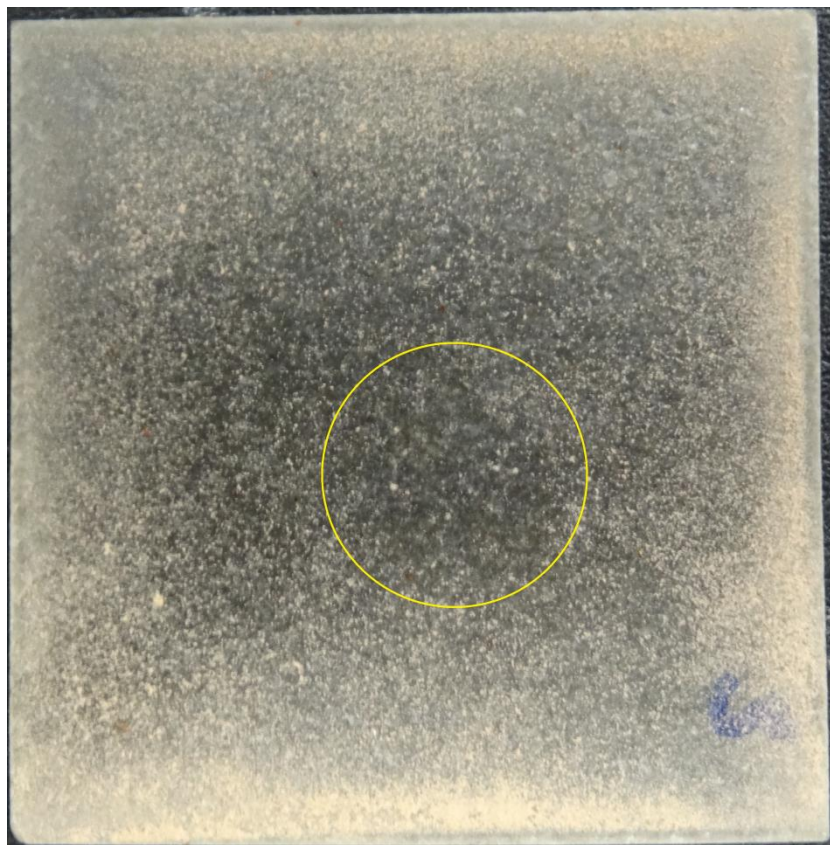
Obr. 49: Závislost průměru kruhu na zapalovacím napětí



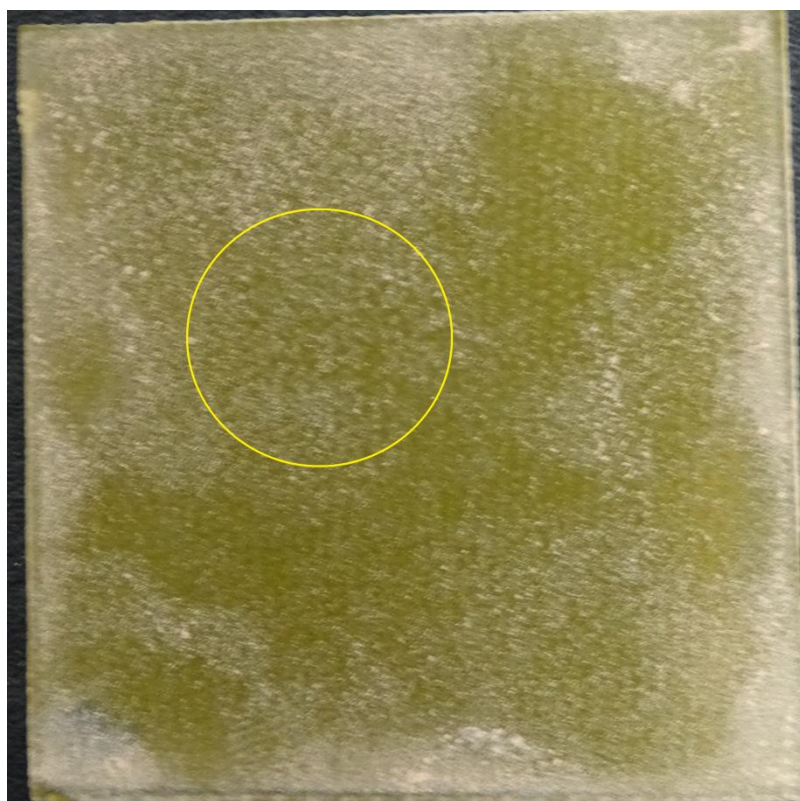
Obr. 50: Lichtenbergovy obrazce – DC – Plexisklo



Obr. 51: Lichtenbergovy obrazce – DC – Kartit



Obr. 52: Lichtenbergovy obrazce – DC – Relastik



Obr. 53: Lichtenbergovy obrazce – DC – Sklotextit FR-4

Lichtenbergovy obrazce vznikající při stejnosměrném napětí mají jiný charakter než při střídavém napětí. Tvar obrazců je sice také kruhový, ale tvoří se také větve rostoucí do všech stran od místa působení.

Obrazce jsou velmi slabé, což může být způsobeno tím, že elektroda byla vzdálená od povrchu 1 cm. V provedených experimentech [27, 28] byla elektroda vždy přikládána přímo na povrch materiálu. Také to může být důvod, proč se pro záporně orientované napětí neukázaly žádné obrazce.

Závěr

V této práci byly částečné výboje prakticky demonstrovány na modelovém uspořádání hrot-deska ve vzdálenosti 1 cm, které bylo izolováno vzduchem. Cílem měření bylo změřit charakteristické parametry částečných výbojů, porovnat je s teoretickými předpoklady a zhodnotit vliv vkládaných bariér. Z výsledných diagramů je zřejmé, že naměřené částečné výboje jsou typu A, tedy vyskytující se při uspořádání hrot-deska s plynným izolantem. Z naměřených hodnot parametrů U_i , U_e a q je také vidět, že se jedná o tentýž typ výbojů. Dosažené výsledky tedy odpovídají teoretickým předpokladům. Z grafů je možné usoudit, že je jistá závislost mezi zapalovacím napětím a tloušťkou dielektrika. Vzhledem k malému počtu vzorků je obtížné hodnotit trend křivek, přesto je však vzrůstající tendence patrná. Mezi tloušťkou jednotlivých bariér je jen nepatrný rozdíl (řádově mikrometry), pokud by byly použity tlustší bariéry v jednotkách až desítkách centimetrů, byl by vliv patrnější. To může být tématem pro další výzkum, například v diplomové práci. Je tedy možné říci, že zapalovací napětí částečných výbojů se zvyšuje s rostoucí tloušťkou dielektrika.

V závěru této práce je představen experiment, zobrazení Lichtenbergových obrazců. Experiment byl zvolen jako doplněk k analýze vlivu jednotlivých druhů napětí. K experimentu byly využity všechny čtyři vzorky a uspořádání z předchozí měřicí úlohy a byly vystaveny působení výbojů po dobu 10 minut. Měřeno bylo střídavé napětí a stejnosměrné napětí v obou polaritách. Výsledné obrazce odpovídají teoretickým předpokladům. Závislost průměru obrazců a napětí je lineární, avšak pro větší důvěryhodnost výsledku by bylo vhodné změřit větší počet vzorků. Pro získání patrnějších obrazců při stejnosměrném napětí by bylo vhodné přiložit elektrodu přímo na povrch bariér. To je také důvod, proč se Lichtenbergovy obrazce při záporném stejnosměrném napětí neprojevíly.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [3] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [4] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [5] ARIEF, Y., IZZATI a ADZIS. Modeling of partial discharge mechanisms in solid dielectric material. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. 2012, roč. 1, č. 4, s. 315–320.
- [6] NYANTEH, GRABER, EDRINGTON, SRIVASTAVA a CARTES. Overview of simulation models for partial discharge and electrical treeing to determine feasibility for estimation of remaining life of machine insulation systems. In: *Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland*. 2011, s. 327–332.
- [7] DAS, P. a CHAKRAVORTI. FDM based simulation of PD patterns due to narrow void considering stochastic parameters. In: *2006 IEEE Power India Conference*. 2006, s. 344–348.
- [8] JAYARAM, S.H., E.A. CHEMRNE a L.C. SIMO. Partial discharge erosion of nano-filled enameled wires subjected to high frequency waveforms. In: *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2006, s. 396–399.
- [9] HUDON, C. Surface conductivity of epoxy specimens subjected to partial discharges. In: *1990 IEEE International Symposium on Electricca Insulation*. 1990, s. 153–155.
- [10] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [11] NIASAR, M., CLEMENCE a NATHANIEL. Effect of partial discharges on thermal breakdown of oil impregnated paper. In: *Conference Proceedings of ISEIM 2014*. 2014, s. 196–199.
- [12] TRNKA, Pavel a Josef PIHERA. Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech. *Elektro, časopis pro elektrotechniku* [online]. 2010, s. 18–22. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricke-stromecky-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech--10217>, [cit. 13.2.2016]
- [13] MORSHUIS, Peter. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: Some thoughts on progress made and where to go now. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005, roč. 12, č. 5, s. 905–913.

- [14] HARVÁNEK, Lukáš, HORNAK, Jaroslav, MENTLÍK, Václav a ČEJKOVÁ, Anna. *The Effect of Fillers and Barrier on Electrical Tree*. University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering, Pilsen, 2016.
- [15] EMERALDI, Primas a Umar KHAYAM. Design of matching impedance for ultra wide band partial discharge detection. In: *International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*. 2013, s. 1–6.
- [16] DONG-SIK, Kang. Novel sensor for locating partial discharges in high-voltage rotating machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007, roč. 22, č. 3.
- [17] KIM, Yong Joo, Geun Ju KIM, Jung Il KIM, Hee Dong KIM a Tae Sik KONG. Capacitive Slot Coupler for on-line partial discharge monitoring of stator winding insulation. In: *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. Philadelphia, 2014.
- [18] PARK, Dae-won, Sang-wook CHA a Gyung-suk KIL. Acoustic detection of partial discharges in insulation oil. In: *Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Instrumentation, measurement, circuits and systems*. 2011.
- [19] AL-MASRI, Wasim M F, Mamoun F ABDEL-HAFEZ a Ayman EL-HAG. A Multi-hypothesis sequential probability test for partial discharges localization in power transformers. In: *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium*. 2015.
- [20] LI, Yancheng, Jinyang DU, Junguo GAO, Xiaohong ZHANG, Tong LIU, Guoli WANG, Ruihai LI, Zhihong LIU a Jianying WANG. Classification of partial discharge under different voltages using acoustic emission techniques. In: *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. Bologna: IEEE, 2013, s. 121–124.
- [21] HAEMA, J. A prediction technique of power transformer condition assessment via DGA parameters. In: *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2013, s. 3–6.
- [22] CHEN, W. G., GAO, LI, Q.Z. a GAN, H.L. Study on enhanced H₂ gas sensing characteristics of CuO-SnO₂ nanostructures. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Poznan: IEEE, 2014.
- [23] MACHALA, Petr. *Metody lokalizace polohy zdroje impulzního širokospektrého signálu*. Bakalářská práce, 2013. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] ROBLES, G. a R. ALBARRACIN. On the use of Vivaldi antennas in the detection of partial discharges. *Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*. 2013, s. 302–305.
- [25] HUBÁČEK, Jaroslav. *Nekonvenční metody sledování částečných výbojů*. Diplomová práce, Plzeň, 2013. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [26] DE KOCK, Nicholas, Branko CORIC a Ralf PIETSCH. UHF PD detection in Gas-Insulated Switchgear - suitability and sensitivity of the UHF method in comparison with the IEC 270 Method. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 1996, s. 20–26.
- [27] MAGNUSSON, Edward. Lichtenberg figures. *IEEE Journal of the A.I.E.E.* 1928, roč. 47, č. 11.
- [28] GRANEAU, Peter. Lichtenberg figures produced by high-voltage discharges in vacuum. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1973, roč. EI-8, č. 3.