



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta Elektrotechnická
Katedra Elektroenergetiky**

Experimentální ověření jednotlivých typů částečných výbojů

Experimental Verification of Partial Discharges Patterns

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika, management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Martin Kněnický

Štolfa Radim

Praha 2015 / 2016

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 15. 5. 2016

.....

Štolfa Radim

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinovi Kněnickému za poskytnutí odborných rad, věcné připomínky, ochotu a vstřícný přístup během zpracování této práce.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Radim Štolfa**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Experimentální ověření jednotlivých typů částečných výbojů**

Pokyny pro vypracování:

1. Typy částečných výbojů a jejich identifikace.
2. Měření a vyhodnocování částečných výbojů.
3. Návrh a realizace vzorků pro vybrané typy částečných výbojů.
4. Měření částečných výbojů na realizovaných vzorcích.

Seznam odborné literatury:

- [1] Václav Mentlík a kol. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [2] Karel Záliš. Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů. Praha: Academia, 2005.
- [3] ČSN EN 60270: Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. High Voltage Engineering Fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.

Vedoucí: Ing. Martin Kněnický

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou částečných výbojů. Zkoumá důvody jejich vzniku a řeší jejich působení na izolační systém elektrických strojů a kabelů. V teoretické části jsou uvedeny základní typy částečných výbojů, včetně jejich průběhů a nejčastějších míst vzniku. Dále jsou zde popsány způsoby jejich měření a lokalizace. Nejpodrobněji je vysvětlena globální galvanická metoda, protože je použita pro měření částečných výbojů v praktické části. Pro co nejlepší popis jejich působení je měření provedeno na třech vzorcích reprezentujících nejčastější typy elektrické izolace. V závěru je uvedeno zhodnocení vzorků a porovnání naměřených paternů s teoretickou předlohou.

Klíčová slova

Částečné výboje, paterny, zdánlivý náboj, elektrická izolace, elektrický stromeček, koróna, galvanická metoda

Abstract

This bachelor thesis presents issues caused by partial discharges. It investigates the principles of their creation and describes their effects on electrical devices isolation system. In the theoretical part there are basic types of partial discharges mentioned, including the process and the most common place of their presence. Then there are methods of their measurement and localization described. Global galvanic method is more widely explained, because it is used for measuring partial discharges in the practical part of the thesis. For the most accurate description the measurement was done on three samples, the most common types in electrical isolation. The final part evaluates the samples and compares the measured results with theoretical patterns

Keywords

Partial discharges, patterns, apparent charge, electrical isolation, electrical tree, corona, galvanic method,

Obsah

1.	Úvod	3
2.	Částečné výboje	4
2.1.	Veličiny používané v diagnostice částečných výbojů	4
3.	Druhy částečných výbojů	6
3.1.	Vnitřní částečné výboje	6
3.2.	Povrchové částečné výboje	10
3.3.	Vnější částečné výboje	11
4.	Působení částečných výbojů na materiály	12
5.	Rozdělení částečných výbojů podle fázového úhlu	15
6.	Měření částečných výbojů	19
6.1.	Neelektrické metody měření částečných výbojů	20
6.2.	Elektrické metody pro měření částečných výbojů	20
7.	Praktická část bakalářské práce	23
7.1.	Měřicí soustava	24
8.	Souprava se vzduchovou izolací	25
9.	Souprava s transformátorovým olejem	28
10.	Souprava s epoxidovou pryskyřicí	32
11.	Porovnání a zhodnocení výsledků	35
12.	Závěr	36
	Seznam použité literatury	37
	Seznam použitých obrázků	38

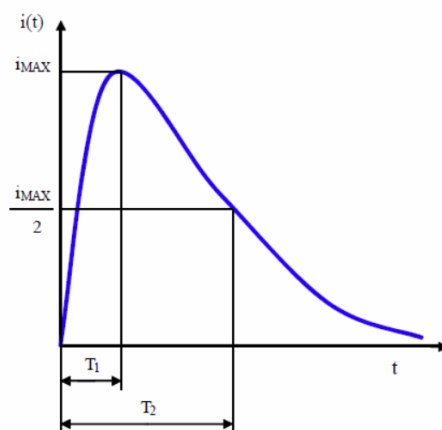
1. Úvod

V dnešní vysokonapěťové energetice je kladen velký důraz na bezporuchový chod strojů, jelikož pořizovací cena např. výkonových transformátorů, nebo generátorů je vysoká. Výrobní doba je dlouhá a každá porucha má za následek odstavení, případné zničení stroje a s tím spojené značné finanční ztráty. Proto je požadavkem těmto situacím předcházet pokud možno bez častých kontrol stroje, vyžadujících jeho odpojení z provozu. Jelikož jedním z nejdůležitějších parametrů mající vliv na dlouhotrvající a bezporuchový chod stroje je stav jeho elektrické izolace, je nutností vyrobit izolační systém nejlépe s co největší elektrickou pevností, aby bylo zabráněno případným zkratům uvnitř stroje. Ale i při nejdokonalejších způsobech výroby vysokonapěťové izolace, jaké jsme dnes schopni, vznikají uvnitř izolace malé nehomogenity „vzduchové dutinky“, které snižují elektrickou pevnost a zvyšují pravděpodobnost poruchy. V těchto vzduchových dutinkách totiž dochází vlivem elektrického pole uvnitř stroje k zapalování krátkých proudových impulzů, takzvaných částečných výbojů. Jejich úroveň a četnost je dnes jedním z hlavních ukazatelů stavu vysokonapěťové izolace. Proto se snažíme tyto nepatrné výboje co nejpřesněji měřit a analyzovat, abychom byli schopni včasným zásahem a opravou izolace prodloužit činnost zařízení někdy i o pár desítek let a tím ušetřit částky v řádech deseti, někdy stamilionů korun. Metody detekce částečných výbojů uvnitř izolace mají mnoho výhod oproti jiným zkouškám. Jsou velmi přesné, nedestruktivní a při určitých podmínkách je možné je provozovat bez nutnosti odpojit stroj z provozu. Navíc pokud je úroveň částečných výbojů dlouhodobě nízká můžeme ušetřit náklady spojené s celkovou diagnostikou stavu stroje a jeho izolačního systému.

Pro bezchybnou diagnostiku částečných výbojů je nicméně nutné znát průběhy napětí a proudů pro jednotlivé typy výbojů a dokázat je od sebe rozlišit, což obzvláště za chodu stroje nebývá jednoduché. Cílem této bakalářské práce je proto přehledně ukázat jednotlivé případy částečných výbojů, vysvětlit rozdíl mezi nimi a snažit se předpovědět jejich působení na dielektrický systém.

2. Částečné výboje

Částečné výboje jsou elektrické výboje vznikající na povrchu elektrod, nebo mezi nimi při dostatečně velkém rozdílu potenciálu. Termín částečný naznačuje, že dochází k neúplnému elektrickému spojení elektrod. Výboj překlene jen část izolačního systému mezi elektrodami a zbytek izolace má dostatečně velkou elektrickou pevnost, aby vydržel napěťové namáhání. Působení částečných výbojů však může v delším časovém horizontu vést ke znehodnocování a nakonec i zničení izolačního systému stoje. Čím horší je stav izolace, tím více částečných výbojů lze naměřit. Proto je detekce částečných výbojů v izolačních systémech v dnešní době jedním z nejpoužívanějších diagnostických nástrojů pro zjišťování kvality izolace.



Obr. 1 Tvar proudového impulsu částečného výboje [4]

Částečný výboj má velice podobný průběh jako plný atmosférický. T_1 je doba čela (doba, za kterou výboj dosáhne maximální hodnoty). T_2 je pak doba půltýla, což je čas, za který výboj klesne na polovinu své amplitudy. Integrací tohoto náboje lze získat velikost náboje q . Doba trvání impulsu je mnohem menší než $1 \mu\text{m}$.

2.1. Veličiny používané v diagnostice částečných výbojů

Pro popis částečných výbojů je nutné definovat si některé charakteristické veličiny tzv. parametry částečných výbojů. Celý seznam a popis těchto veličin je uveden v normě [1]. Zde však budou uvedeny pouze ty, které jsou nutné pro základní pochopení částečných výbojů a účely této práce.

Zdánlivý náboj q impulsu částečného výboje je takový unipolární náboj, který na daném měřicím přístroji vyvolá stejnou změnu, jako samostatný pulz částečného výboje.

Zdánlivý náboj je nejpoužívanější a nejdůležitější veličina při popisu částečných výbojů. Základní jednotkou je C (Coulomb), ale protože v praxi je tato hodnota mnohonásobně nižší používá se spíše pC. Zdánlivý náboj ale není roven množství náboje působícího v místě výboje, protože tuto hodnotu není možné změřit. Vztahuje se k určitému časovému intervalu, většinou k době periody zkušebního napětí.

Četnost impulzů n je poměr celkového počtu impulzů částečných výbojů ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu.

Zapalovací napětí částečných výbojů U_z je takové napětí, při kterém jsou ve zkoušeném objektu poprvé prokazatelně pozorovány částečné výboje. Pro zjištění tohoto napětí musí být přiložené napětí postupně zvyšováno až do hodnoty U_z

Zhášecí napětí částečných výbojů U_e je napětí, při kterém se přestanou ve zkoušeném objektu objevovat částečné výboje. Pro praktické zjištění tohoto napětí musí být na zkoušeném objektu napětí, při kterém jsou částečné výboje pozorovány a toto napětí je pak snižováno až na hodnotu U_e

Impulz částečného výboje je proudový, nebo napěťový impulz vznikající jako důsledek přítomnosti částečného výboje ve zkoušeném objektu. Je měřen pomocí vhodného měřicího obvodu a příslušné normy

Fázový úhel a čas výskytu částečných výbojů je $\Phi_i = 360 (t_i / T)$ kde čas t_i je čas měřený předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem částečného výboje. T je perioda zkušebního napětí. Fázový úhel bývá vyjádřen ve stupních (°)

Střední proud částečných výbojů je součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného časového intervalu T děleno tímto intervalem:

$$I = \frac{1}{T_{ref}} * (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) \quad (1)$$

Střední proud částečných výbojů je vyjádřen v coulombech za sekundu (C/s) nebo v ampérech (A)

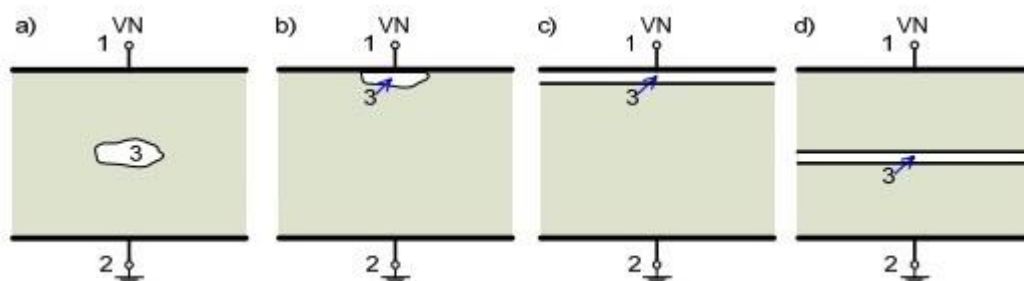
Součtový náboj Q je součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje. Stejně jako zdánlivý náboj se vztahuje k časovému intervalu, nejčastěji k době periody. [1]

3. Druhy částečných výbojů

Částečné výboje lze dělit podle různých kritérií do několika skupin. Pravděpodobně nejkompaktnější rozdělení je podle místa výskytu na vnější, vnitřní a povrchové. Nejznámějšími vnějšími částečnými výboji jsou korónové výboje, které jsou někdy nesprávně používány jako obecný termín pro všechny typy částečných výbojů. Vnější částečné výboje jsou ale všechny výboje probíhající v plynech, nebo v okolí elektrod malých průměrů, či velkých zakřivení. Mimo korónových výbojů jsou to také doutnavé výboje a Trichelovy impulsy. Vnitřní částečné výboje se vyskytují, jak již napovídá název, uvnitř izolačních systémů, nejčastěji v malých plynných dutinkách obklopených kapalinou, nebo pevným izolantem. Povrchové částečné výboje se nacházejí v okolí přechodů mezi pevným a plynným izolantem. Jsou to například výboje na výstupu vinutí z drážek v točivých strojích. [2]

3.1. Vnitřní částečné výboje

Jednotlivé druhy vnitřních částečných výbojů lze nejlépe demonstrovat na obrázcích zobrazujících vzájemné postavení dvou elektrod a místa výskytu částečného výboje.



Obr. 2 Druhy částečných výbojů při různém uspořádání elektrod [4]

Obr. 2a) Dutinka v dielektriku

Obr. 2b) Održená izolace

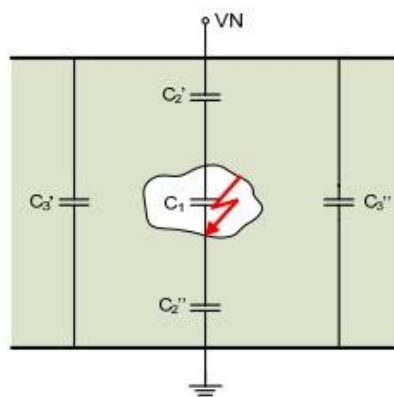
Obr. 2c) Štěrbina v izolaci

Obr. 2d) Štěrbina v dielektriku

Elektrody jsou označeny číslicemi 1, 2 a místo částečného výboje číslem 3. V případě 2a) je v dielektriku dutinka, která vznikla jako nedokonalost výrobního procesu izolačního systému. Například při lití epoxidové izolace se i přes to, že se výrobní proces odehrává ve vakuu, dostanou do izolace miniaturní vzduchové dutinky. Elektrická pevnost těchto dutinek je pak mnohem menší než pevnost okolního dielektrika a při přiložení napětí na svorky stroje

dojde vlivem působení elektrického pole k ionizaci prostoru dutinky a zapálení výboje uvnitř. Tento výboj následně ničí okolní izolaci a při opakovaném a dlouhodobém působení je schopen vytvořit nízkoodporovou cestu spojující elektrody na různých potenciálech a způsobit tak zkrat, který poškodí, případně zničí celý izolační systém. Obrázek 2b) představuje případ odtržení části izolace od elektrody, kde následně proběhne stejný děj popsáný v případě 2a). Obrázky 2c) a 2d) jsou případy výskytu štěrbin mezi elektrodou a izolantem, nebo přímo v izolantu. Tyto případy nastávají především při výrobě izolačního systému mimo vakuum. Obrázky 2a-2d představují konkrétní případy pro jednu nedokonalost v dielektriku, ale v praxi je těchto nedokonalostí mnohonásobně více. Záleží především na způsobu výroby izolace.

Vnitřní částečné výboje lze dobře vysvětlit na tzv. trojkapacitním modelu, který je zobrazen na obrázku 3.



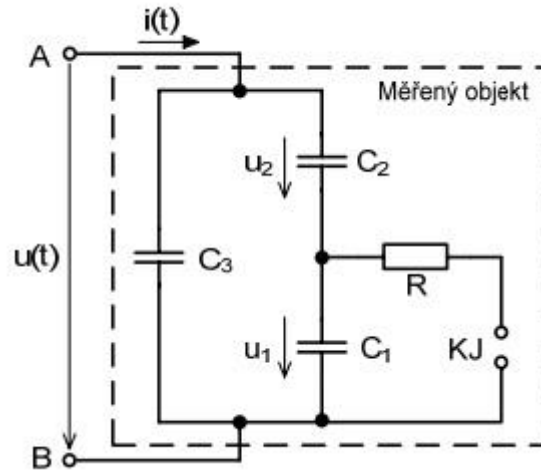
Obr. 3 Trojkapacitní model pro částečné výboje [4]

Kapacita C_1 zobrazuje kapacitu plynové dutinky uvnitř izolace. Kapacity C_2' a C_2'' zobrazují kapacitu zbytku zdravé izolace a C_3' a C_3'' je kapacita samotného izolantu.

Celková kapacita izolačního systému je potom

$$C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2'} + \frac{1}{C_2''} \right) + (C_3' + C_3''). \quad (2)$$

Obrázek číslo 4 je náhradní schéma Gemant-Philippovova modelu pro vnitřní částečné výboje.

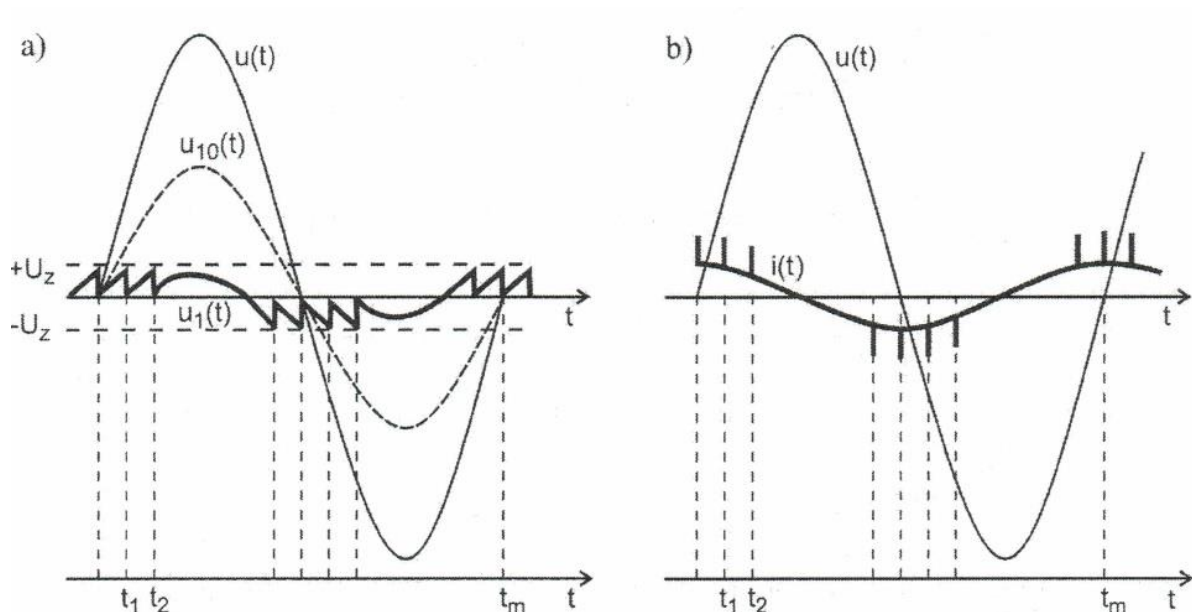


Obr. 4 Náhradní schéma pro trojkapacitní model [2]

Kulové jiskřiště KJ paralelně připojené ke kapacitě C_1 značí přeskok v plynové dutince při překročení její elektrické pevnosti (částečný výboj) a odpor R symbolizuje odpor výbojové cesty po přeskoku na kulovém jiskřišti. Po přiložení napětí $u(t)$ na svorky je průběh napětí $u_1(t)$ dán vztahem:

$$u_1(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} * u(t) \quad (3)$$

Časový průběh napájecího napětí $u(t)$, napětí v dutince bez přeskoků $u_{10}(t)$ a napětí v dutince s přeskokem $u_1(t)$ je zobrazeno na obrázku 5a). Pro zjednodušení popisu předpokládáme, že dutinka má zapalovací napětí stejné při obou polaritách, tzn. neuplatní se zde polaritní efekt a $|+U_z| = |-U_z|$ a zároveň zhášecí napětí je rovno nule. Obrázek 5b) představuje případ, kdy se na kapacitní proud $i(t)$ protékající izolačním systémem, superponují proudové špičky vzniklé opakovanými částečnými výboji.



Obr. 5 Časové průběhy napětí a proudu [2]

Obr. 5a) Průběh napětí v dutince

Obr. 5b) Proudové špičky

Při pohledu na průběhy můžeme učinit následující závěry:

- 1) Proudové špičky vzniklé částečnými výboji mají stejnou polaritu, jako přiložené napětí.
- 2) Počet výbojů vzrůstá s velikostí přiloženého napětí.
- 3) Náboj Δq_i vybitý v dutince izolantu jako částečný výboj není stejný, jako zdánlivý náboj q měřitelný na svorkách vzorku. Náboj vybitý v dutince se dá vyjádřit vztahem

$$\Delta q_1 = (C_1 + C_2) * U_z \quad (4)$$

a zdánlivý náboj $q = C_2 * U_z \quad (5)$

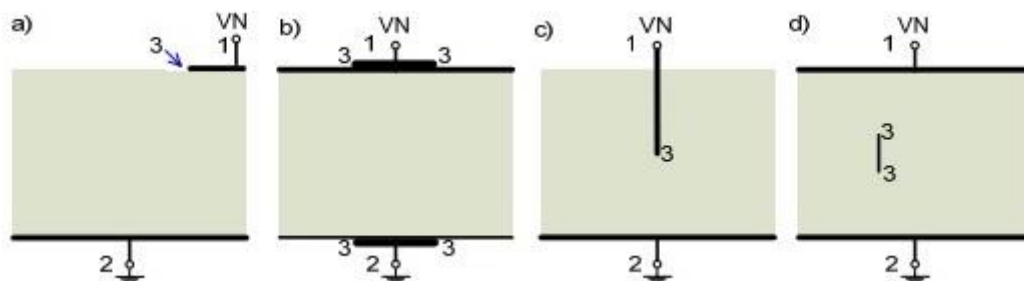
potom $\Delta q_1 = q * \frac{C_1 + C_2}{C_2} = q * (1 + \frac{C_1}{C_2}) \quad (6)$

Protože poměr C_1/C_2 je téměř vždy neznámý a v podstatě neměřitelný hlavně při složitějších případech uspořádání, není možné přesně určit velikost náboje Δq_i . Vzhledem k této skutečnosti je měření částečných výbojů obtížné a téměř nikdy se nedají měřit přímo. Navíc se v rámci zjednodušení zanedbávají některé skutečnosti. Například zapalovací napětí obvykle nejsou stejná a navíc se mohou v čase měnit. Zbytkové napětí v dutince není nulové a mění se podle polaritu přiloženého napětí. V neposlední řadě jsme zanedbali fakt, že při průrazu dutinky se na vybíjení nepodílí pouze plocha dutinky, ale i určitá část okolí dutinky.

Vzhledem k tomu, že dochází k odsávání nosičů elektrického náboje z okolí do blízkosti dutinky je elektrická pevnost okolí menší, než elektrická pevnost ostatních částí izolantu. V důsledku této skutečnosti dochází k degeneraci izolace okolo dutinky a snižování elektrické pevnosti celého systému. Pro přesnější výpočty částečných výbojů se někdy užívají čtyřkapacitní, nebo pětikapacitní schémata. Ty jsou ale na pochopení základní problematiky příliš složité a proto zde nebudou uvedeny. Jak se částečné výboje měří v praxi, bude probráno později.

3.2. Povrchové částečné výboje

Stejně jako při vnitřních částečných výbojích je nejnázornější ukázat jednotlivé případy na obrázku.



Obr. 6 Povrchové částečné výboje [4]

Obr. 6a) Částečný výboj na hraně elektrody

Obr. 6b) Částečný výboj na hraně elektrody

Obr. 6c) Částečný výboj na hrotu elektrody

Obr. 6d) Částečný výboj na hrotu elektrody

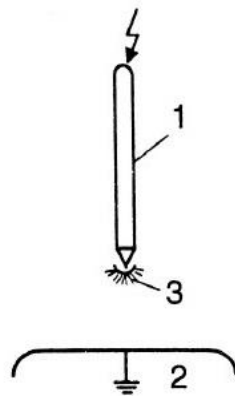
Obrázky 6a) a 6b) ukazují případy výskytu částečných výbojů na hranách elektrod rovnoběžně s povrchem pevného, nebo kapalného izolantu. Tyto výboje jsou označovány jako klouzavé výboje a ve většině případů nejsou tak nebezpečné, jako vnitřní částečné výboje, neboť nemohou samy o sobě způsobit zkrat. Tyto typy výbojů způsobují pouze povrchové namáhání a předčasné stárnutí izolace. Obrázky 6c) a 6d) uvádějí dva typy povrchových částečných výbojů okolo jehlové, nebo hrotové elektrody. Jsou způsobené lokálním zvýšením intenzity elektrického pole v okolí elektrody, což je také jeden ze zdrojů částečných výbojů.

Povrchové částečné výboje představují největší problém zejména u vysokonapěťových přístrojů. Nicméně tento typ částečných výbojů nemusí být výhradně negativním jevem.

Povrchové částečné výboje se dají využít k lepší konstrukci uzemnění, k čištění vody [9], nebo ve vakuu jako zdroj usměrněných elektronů na kovové katodě k vytvoření laseru [7].

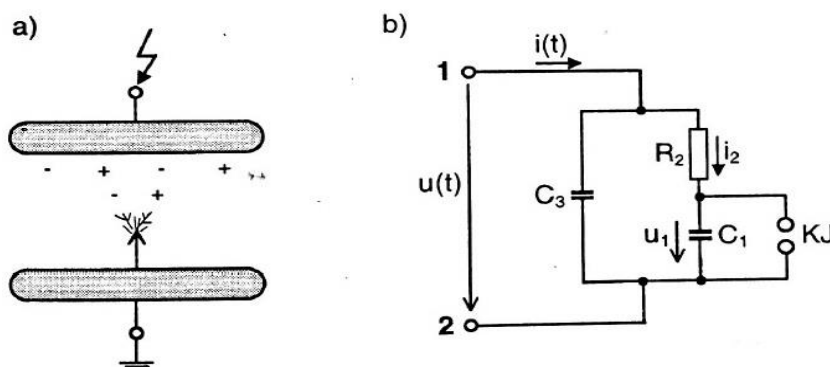
3.3. Vnější částečné výboje

Nejznámější, nejlépe pozorovatelnou a pravděpodobně nejméně nebezpečnou formou částečných výbojů jsou výboje vnější. Ve většině případů se objevují na hranách, nebo na malých poloměrech elektrod v plynném prostředí a nemají trvalý destruktivní vliv. Zjednodušené schéma těchto výbojů je na obrázku níže.



Obr. 7 Vnější částečné výboje [2]

Obrázek 8) představuje pravděpodobně nejznámější případ vnějšího částečného výboje, kdy na ostrém zakončení hrotu elektrody (průměr < 1mm) dochází k viditelným přeskokům. Tento výboj se nazývá korona a je pozorovatelný především na částech vedení vysokého napětí. Zjednodušené schéma uspořádání a náhradní schéma tohoto případu je na obrázcích 8a), 8b)



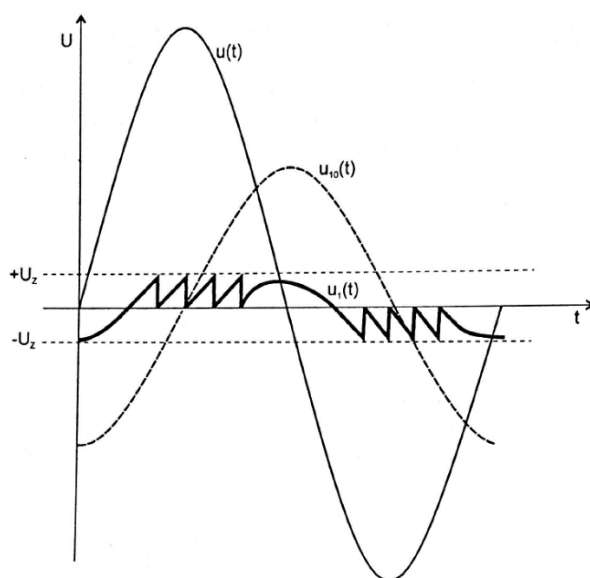
Obr. 8 Náhradní schéma uspořádání deska-hrot [2]

Obr. 8a) Schéma uspořádání deska-hrot

Obr. 8b) Náhradní schéma deska-hrot

Kondenzátor C_1 představuje kapacitu vzduchu mezi hrotem a deskou. Tento prostor je zkratován pokaždé, když hodnota přiloženého napětí přesáhne přeskokové napětí U_p . Pro reprezentaci přeskoků je ve schématu kulové jiskřiště KJ. Náboj vytvořený na konci hrotu putuje vlivem elektrického pole k zemní elektrode (k desce) a jeho vodivost je charakterizována odporem R_2 . Kondenzátor C_3 zobrazuje kapacitu vzduchu v elektrodevém uspořádání. Vnější částečné výboje mohou mít různé parametry v závislosti na okamžité hodnotě přiloženého napětí. Jejich délka i náboj mohou být různě velké a závisí také na intenzitě elektrického pole mezi deskou a hrotem. Kromě korony se může objevit i doutnavý výboj.

Typický průběh napětí vnějšího částečného výboje je zobrazen na obrázku 9.



Obr. 9 Ideální průběh napětí vnějších částečných výbojů [2]

Napětí $u(t)$ je napájecí, $u_{10}(t)$ je fiktivní napětí na kondenzátoru C_1 v případě, že nedošlo k částečnému výboji, a u_1 je skutečné napětí na kondenzátoru C_1 . K částečnému výboji dojde pokaždé, když je okamžitá hodnota přiloženého napětí rovna zapalovacímu napětí $\pm U_z$

4. Působení částečných výbojů na materiály

Jeden z hlavních důvodů pro měření částečných výbojů je jejich destruktivní působení na izolační systémy. Jejich účinky se však značně liší podle typu částečných výbojů a použité

izolace. Patrně nejnebezpečnějším druhem částečných výbojů jsou ty vnitřní, protože poškozují izolaci uvnitř zařízení, což je velice špatně zjištělné. Vnitřní částečné výboje poškozují izolaci zejména chemickou degradací, jelikož stěny dutinky jsou bombardovány částicemi (např. ionty) a tím rozkládají dielektrikum okolo. Dále snižují elektrickou pevnost vzduchové dutinky tím, že způsobují na jejích vnitřních stěnách vlhkost. Aktivita částečných výbojů v kapalných izolantech (především v izolačních olejích transformátorů atd.) způsobuje vytváření lokálních pevných produktů ve formě krystalů. Na konečcích krystalů poté dochází ke zvětšení nehomogenity elektrického pole a k nárůstu lokálních částečných výbojů. Což tvoří prohlubně v dielektriku, kde následně roste tzv. elektrický stromeček, který může vést až k průrazu izolace.

Částečné výboje nepůsobí na všechny druhy materiálu stejně destruktivně. Např. slída, porcelán nebo sklo jsou proti částečným výbojům poměrně odolné, a to i v delších časových intervalech. Na druhou stranu organické materiály jako PEN, PET, PE nebo kompozitní materiály obsahující epoxidová či silikonová pojiva jsou velice náchylná na degradační působení částečných výbojů i v krátkých časových intervalech. Trend používání organických materiálů v izolačních systémech v 60. letech 20. století byl hlavní důvod pro začátek zkoumání částečných výbojů. [2]

Chemické účinky

Při dlouhodobějším působení částečných výbojů na okolní izolaci se začínají projevovat chemické děje probíhající ve vlhkosti na povrchu dutinky a v jiných produktech odloučených ze vzduchu působením částečných výbojů. Výsledkem těchto reakcí je vznik plynných, kapalných a pevných produktů. Tyto produkty se dále dostávají do okolní izolace, čímž vytvářejí vodivé oblasti. Pokud dutinka obsahuje kyslík, což většinou obsahuje, výboje ho rozštěpí a vzniká ozon. Ozon společně s oxidy dusíku vytváří kyselinu dusičnou, která je vysoce agresivní a leptá okolní izolaci. Tyto jevy jsou charakteristické především pro vnitřní částečné výboje, nicméně může k nim docházet i na povrchu, kde jsou občas patrné vyleptané dráhy částečných výbojů.

Elektro-erozivní účinky

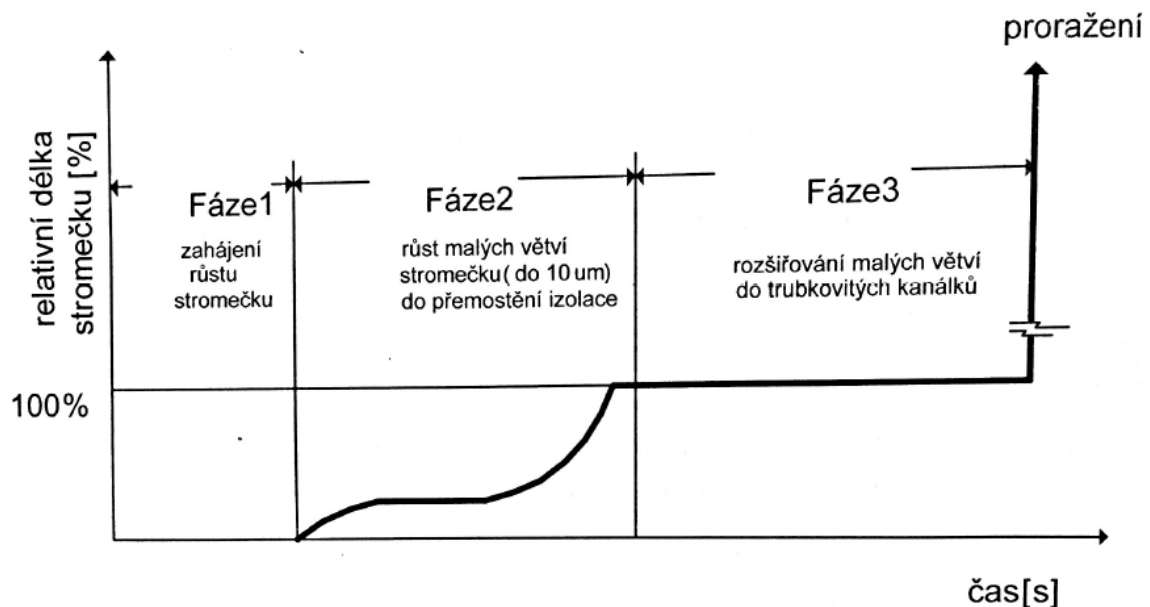
Začínají se projevovat až po zapálení oblouku uvnitř dutinky a vytvoření vodivé dráhy. Při vysoké intenzitě elektrického pole se může vodivá dráha z dutinky postupně šířit do dielektrika, při dostatečně dlouhém působení může zapříčinit elektrický průraz izolace. Dalším důsledkem elektro-erozivních účinků částečných výbojů je bombardování stěn dutinky, čímž způsobují jejich erozi a postupné zvětšování dutinky, čímž může taky dojít k průrazu.

Tepelné účinky

Elektrické výboje uvnitř dutinky způsobují oteplení okolní izolace a mohou mít vliv na tepelnou nestabilitu dielektrika a podílet se na tepelném průrazu izolace. Doposud však nebyly tepelné účinky částečných výbojů na všechny druhy izolace spolehlivě prokázány. Nicméně je prokázáno, že při výskytu elektrického stromečku uvnitř izolace teplota rapidně urychluje jeho růst a zmenšuje tím dobu průrazu dielektrika. Tepelné účinky se projevují i při vnějších a povrchových částečných výbojích opalováním okolní izolace, nebo samotných elektrod.

Elektrický stromeček

Elektrický stromeček uvnitř izolace je pojem pro vytvoření vodivé cesty izolantem, vlivem působení částečných výbojů. Jeho růst může být rozdělen do několika fází.



Obr. 10 Fáze průběhu elektrického stromečku [3]

Fáze 1) Intenzita elektrického pole je dostatečně vysoká a elektrická pevnost v okolí dutinky dostatečně malá pro počátek růstu stromečku.

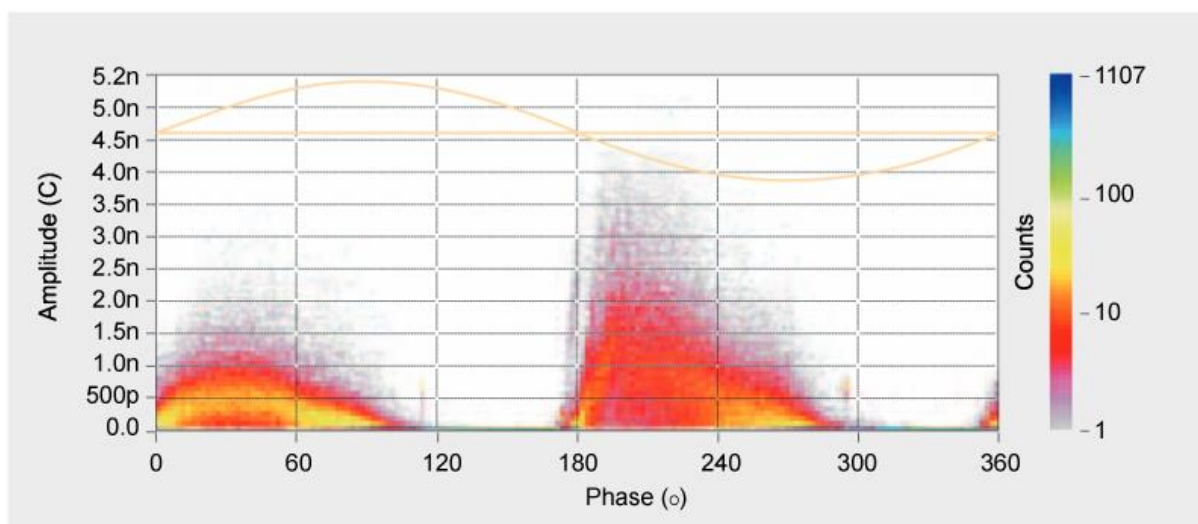
Fáze 2) Nastává růst prvních větví stromečku směrem k zemnicí elektrodě, až dojde ke spojení. V této fázi ještě nedochází k průrazu a zničení izolace. Šířka hlavních větví je menší než 10 μm , takže mají moc malou elektrickou vodivost, aby jimi mohl protéci proud schopný způsobit zkrat. Větve ve druhé fázi jsou vyplněny produkty vznikající při rozkladu polymeru, způsobené růstem stromečku

Fáze 3) Větve stromečku se rozšiřují, zvětšuje se jejich elektrická vodivost a nakonec nastává průraz izolace. V této fázi jsou větve již duté.

Elektrické stromečky se nejčastěji vyskytují v jednovrstvých izolantech, například v kabelech, kde jsou velice nebezpečné.

5. Rozdělení částečných výbojů podle fázového úhlu

Při praktickém měření částečných výbojů lze rozlišovat několik typů částečných výbojů, podle jejich umístění na křivce napětí tzn. podle fázového úhlu. Podle pozice fázového úhlu lze odhadnout druh výbojové činnosti a stanovit tak místo působení částečných výbojů tzv. zřídlo výbojové činnosti. V dnešní době se již výbojová činnost zobrazuje díky rozvoji digitální techniky na sinusovém napájecím napětí. [3]



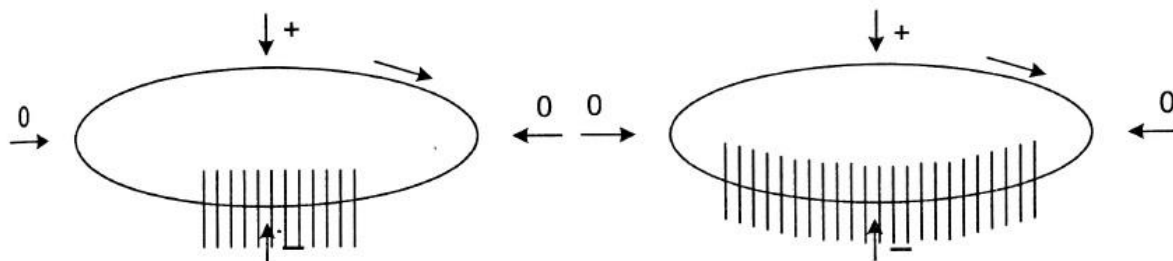
Obr. 11 Typické zobrazení částečných výbojů na napájecím napětí [6]

Z tvaru odhadujeme, druh a místo poruchy v izolantu a barva udává počet výbojů dané velikosti.

Nicméně pro vysvětlení různých druhů a typů částečných výbojů se dodnes používá zobrazení starých analogových přístrojů tzv. Lissajousovy obrazce, které zobrazují superpozici proudových impulzů na napájecím napětí, které je vyobrazeno jako eliptická křivka. Existuje pět základních obrazců částečných výbojů. Samozřejmě při poněkud detailnějším rozboru a zahrnutí některých speciálních případů můžeme obrazců dostat mnohem více, ale pro základní rozdělení jich stačí pět, plus si uvedeme jeden případ rušení,

kteří sice není částečným výbojem v pravém slova smyslu, ale při neznalosti, nebo špatné kalibraci může být považováno za částečný výboj.

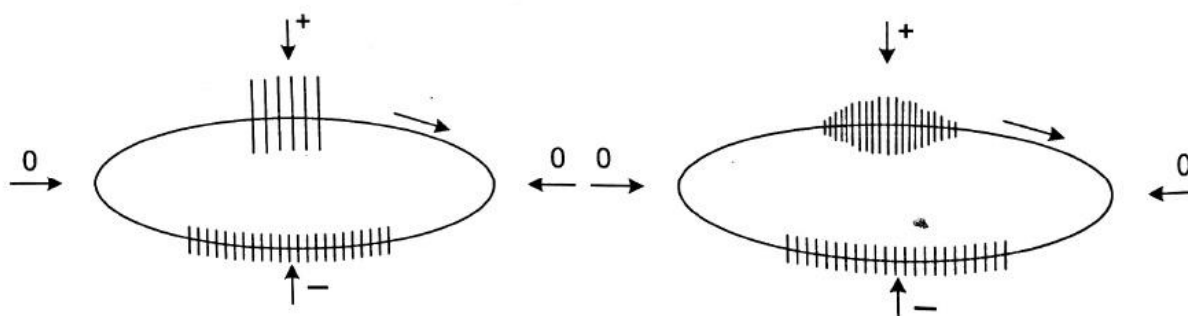
Typ A



Obr. 12 typ A modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Typ A má pulzy stejné velikosti rozmístěné od sebe přibližně ve stejném fázovém úhlu, umístěné v jedné půlvině napájecího napětí symetricky okolo vrcholu napěťové křivky. Při zvyšování napájecího napětí stoupá počet výbojů, rozložení se však nemění. Tento typ je typický pro uspořádání částečných výbojů hrot-deska ve vzduchu. Je-li hrot připojen na vysokém napětí, superponují se proudové impulzy na zápornou půlvinu. Jsou-li pulzy v kladné půlvině, je deska uzemněna. Doba měření tohoto uspořádání nemá na výsledek větší vliv.

Typ B

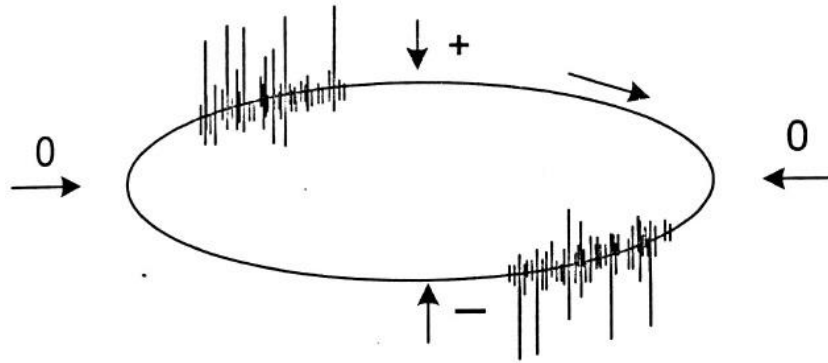


Obr. 13 typ B modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Typ B má pulzy částečných výbojů rozmístěné v obou půlvinách a jsou symetricky rozloženy okolo obou napěťových maxim. Na obou půlvinách jsou od sebe výboje vzdáleny o stejný fázový úhel, ale v každé půlvině o jiný. Velikost měřených pulzů je v obou půlvinách různá. Při zapálení pulzů je velikost zdánlivého náboje větší, a se zvyšujícím napájecím

napětím stoupá. Po určitém čase ovšem začne amplituda pulzů klesat a to navzdory zvyšujícímu se napětí. Typ B je typický pro korónu vnikající na konci hrotu umístěné v kapalném izolantu. V kladné půlperiodě je hrot na vysokém potenciálu, v záporném je na zemnicím.

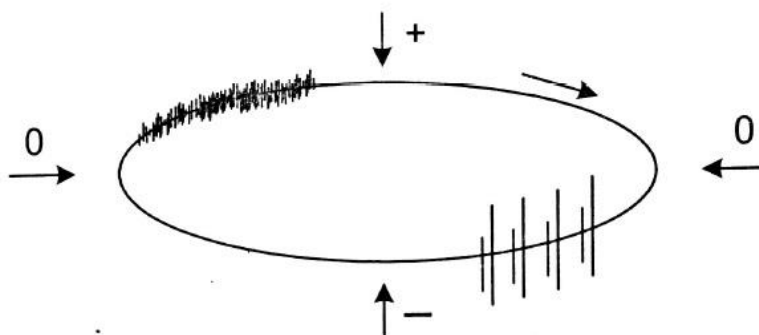
Typ C



Obr. 14 typ C modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Typ C je má přibližně stejnou velikost pulzů v obou půlvlnách a jsou umístěny mezi nulové a maximální napětí. Takové rozmístění se objevuje v případě, že se nosiče obou polarit nedostanou ani na uzemněnou, ani na vysokonapěťovou elektrodu. Jsou detekovatelné ihned po zapálení a se zvyšujícím napájecím napětím se budou zvětšovat, ovšem po nějaké době se znemožní jejich jednotlivé rozlišení. Zapalovací napětí u tohoto typu je stejné, nebo trochu vyšší, než zhášecí. Typickým příkladem tohoto typu je umístění dutinek v pevném, nebo kapalném izolantu, případně vnější výboje mezi dvojicí izolovaných navzájem se dotýkajících vodičů. Tyto výboje se dají pozorovat také na povrchu bez galvanického spojení a na neuzemněných kovových částech obvodu. Tyto výboje jsou velice nebezpečné pro izolační systém.

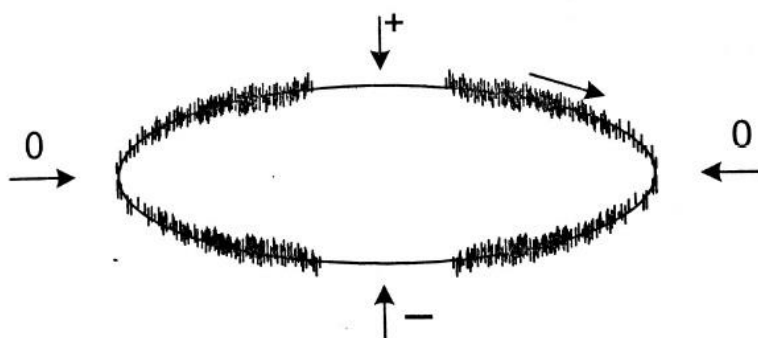
Typ D



Obr. 15 typ D modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Typ D je charakteristický tím, že velikost pulzů v jedné půlperiodě je až trojnásobně vyšší než v půlperiodě druhé. Jestliže jsou vyšší pulzy v záporné půlperiodě, jsou výboje na zemnicím potenciálu, pokud jsou v kladné půlperiodě mají vyšší potenciál. Pro tento typ je charakteristické rozmístění dutina v dielektriku, nebo mezi elektrodami. Dutinky ovšem mohou obsahovat uhlíkové částičky vznikající přítomností částečných výbojů uvnitř, což má za následek nesterjnorodou povrchovou vodivost dutinky a je tedy obtížné určit, jestli se o dutinku vážně jedná. V laboratorních podmínkách bylo nicméně zjištěno, že pulzy tohoto typu se superponují na sinusovku ještě před jejím vrcholem a to v obou polaritách navíc různých velikostí pulzů.

Typ E

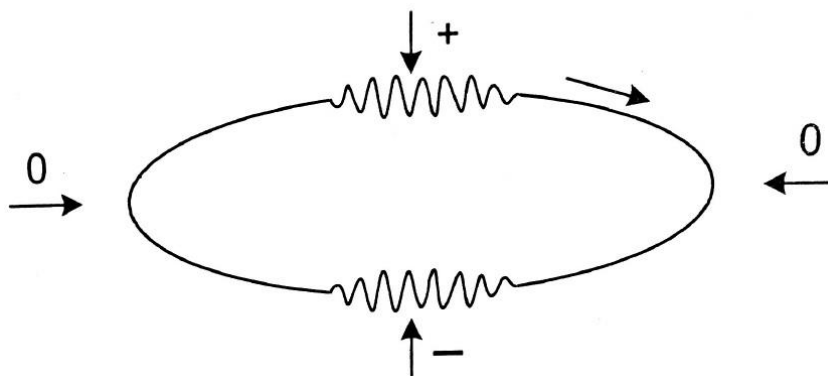


Obr. 16 typ E modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Typ E má pulzy zhruba konstantních velikostí (kromě oblasti nulového napětí) rozmístěné okolo obou průchodů nulovým napětím. Tento typ bývá někdy obtížné rozlišit, protože výboje mohou připomínat rušení. Jinak tento typ značí špatný kontakt mezi kovovými částmi

obvodu. Tyto špatné spoje však mohou být v kterékoliv části měřícího obvodu a je proto vhodné zamezit alespoň vnějším špatným spojením, protože u vnitřních to nelze.

Typ F



Obr. 17 typ F Zobrazení rušení na modelovém oscilogramu [3]

Typ F – Příčinou těchto typů rušení a částečných výbojů s tím spojených jsou vyšší harmonické, generované magneticky nasycenými jádry transformátorů, nebo generátorů v testovaném obvodu. Je to způsobeno především vysokou hustotou proudu. Typ F tedy není částečný výboj, tak jak jsme si ho doteď popisovali, ale je to odezva měřícího obvodu, která může být jako výboj nesprávně detekovaná. Je způsobena vlivem okolního rušení i rušení testovaného předmětu. Proto se před každým měřením částečných výbojů musí provádět kalibrace, viz norma [1].

6. Měření částečných výbojů

Částečné výboje uvnitř izolačního systému způsobují celou řadu doprovodných parazitních jevů, které je možno měřit a podle nich stanovit úroveň, četnost výskytu, ale třeba i poměrně přesně místo výskytu částečných výbojů. Jsou to kromě generování proudových impulzů a jimi generovaného vysokofrekvenčního elektromagnetického pole také vznik chemických nečistot uvnitř pevného, nebo kapalného izolátoru, světelné záření, zvukové vlny, nebo tepelné projevy. Měření těchto projevů lze provádět různými metodami. Dají se rozdělit na metody neelektrické, kam patří akustické, rentgenové, optické a další, a na metody elektrické kam patří třeba metody se snímací impedancí, metoda měření postupné vlny, nebo ztrátového činitele. [2] Tyto elektrické metody se v poslední době neustále vyvíjí hlavně

proto, že některé umožňují měřit na zařízení, které je v provozu tzv. měření on-line. Provozovatel zařízení tak nemusí přístroj odstavovat a tím ušetří nemalé částky.

6.1. Neelektrické metody měření částečných výbojů

Jak bylo popsáno výše, částečné výboje vykazují i neelektrické projevy, které lze sledovat a měřit. Pro měření vnějších částečných výbojů se používají především metody optické a akustické. Tyto metody používají speciální diagnostické nástroje, jako třeba fotonásobiče, noktovizory, směrové mikrofony pro různý rozsah spektra a jiné. Pro vnitřní částečné výboje se používají chemické metody k detekci látek způsobených rozkladem izolantu příčinou částečných výbojů. [2]

Ačkoliv jsou neelektrické metody měření částečných výbojů poměrně rozsáhlou kapitolou, nebudou se v této práci podrobněji rozebírat. Za zmínku stojí akorát to, že akustická detekce se používá zejména k přesnému určení polohy výskytu částečných výbojů pomocí snímacích sond umístěných zvenku na zkoušeném objektu. A chemická detekce je vhodná pro analýzu přítomnosti částečných výbojů v olejových transformátorech pomocí plynové chromatografie, což je zjišťování obsahu plynů rozpuštěných v oleji. Ani jedna z těchto metod však není možná provádět on-line. Dále budou uvedeny takové, které jsou.

6.2. Elektrické metody pro měření částečných výbojů

Základem všech elektrických metod je měření a vyhodnocování malých proudových impulzů v napájecí síti, vznikajících právě přítomností částečných výbojů. Elektrické metody jsou velice oblíbené především pro svoji citlivost a lepší kvantifikovatelnost. Můžeme je rozdělit do dvou skupin – globální a lokální metody. Při globálních metodách nás zajímá celkový stav izolace, a proto měříme částečné výboje v celém zařízení najednou. Naproti tomu při lokálních metodách se snažíme určit přesné místo výskytu částečných výbojů. V praxi se používají obě metody naráz. [3]

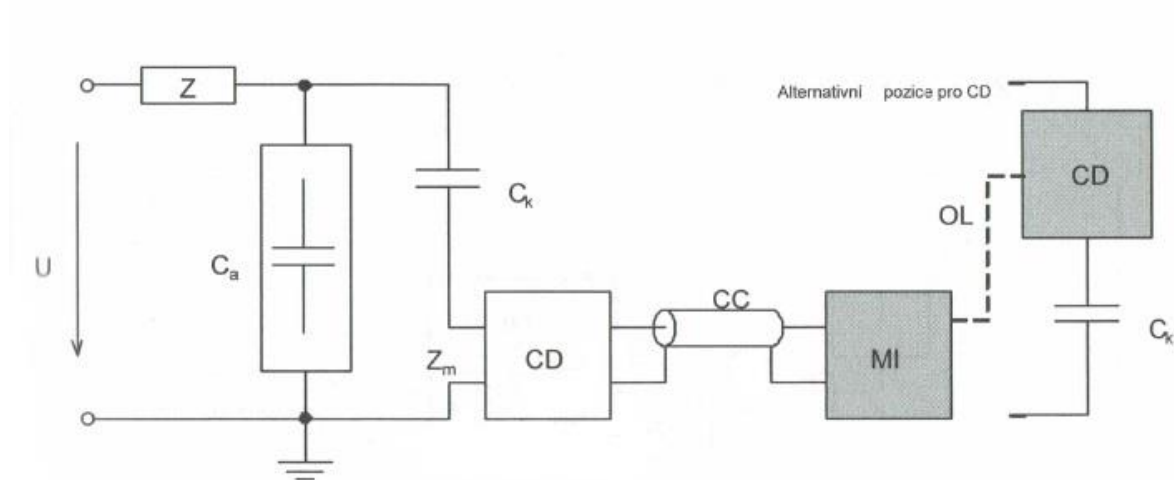
Globální galvanická metoda měření částečných výbojů

Jednou z nejrozšířenějších globálních metod pro detekci částečných výbojů je galvanická metoda. Vzhledem k tomu, že bude použita pro měření částečných výbojů v praktické části bakalářské práce, bude zde vysvětlena trochu důkladněji. Tato metoda je založená na sledování proudových impulzů částečných výbojů pomocí měřicí impedance, realizované většinou jako RLC člen s ochrannými a přepět'ovými prvky. Indukčnost napájecího obvodu

zabrání napájecímu zdroji kompenzovat úbytek elektrické energie vyvolaný výbojem v dutince dielektrika a na svorkách zkoušeného objektu klesne napětí. Tento pokles je úměrný náboji proudového impulsu výboje. Výboj v dutině dielektrika tedy vyvolá v měřícím obvodu vyrovnávací proud, který na svorkách měřicí impedance vyvolá ekvivalentní napěťovou odezvu.[10] Přesný postup měření a všechny náležitosti popisují normy [1], [5].

Globální galvanická metoda má celkem tři možnosti zapojení zkušebních obvodů. Ve všech třech obvodech hraje důležitou roli vysokonapěťový vazební kondenzátor, který musí mít nízkou indukčnost, mnohem vyšší kapacitu v porovnání s rozptylovou kapacitou a nízkou úroveň vlastních částečných výbojů v rozsahu měřících napětí. Dále měřicí impedance, nejlépe čistě ohmického charakteru s takovým frekvenčním rozsahem, aby neovlivňovala měřicí přístroj. K měřicímu přístroji je připojena stíněným koaxiálním kabelem pro eliminaci rušení. Podle konstrukce snímací impedance a použitého měřícího přístroje lze rozdělovat měřicí obvody ještě na širokopásmové a úzkopásmové. Posledními společnými rysy různých zapojení je požadavek na zdroj konstantního napětí a pokud možno co nejnižší úroveň okolního šumu.

1) Zapojení s paralelní snímací impedancí



Obr. 18. Globální galvanická metoda s paralelní snímací impedancí [3]

U - Napájecí napětí

Z - Filtr rušení, zábrana vybíjení částečných výbojů přes impedanci zdroje

C_a - Testovaný objekt

C_k - Vazební kondenzátor

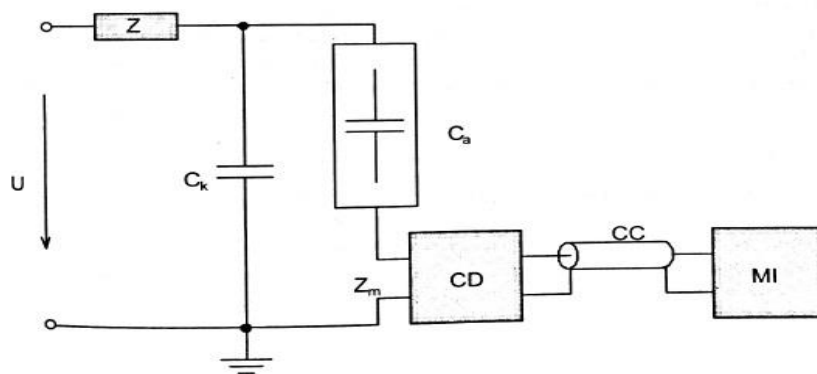
Z_m - Snímací impedance

CD - Vazební zařízení

- CC - Spojovací stíněný kabel
- MI - Detektor
- OL - Optický kabel

Tento typ zapojení se používá pro měření přístrojů o velkých kapacitách, protože umožňuje snímání impulzů částečných výbojů bez toho, aby bylo třeba bát se o detekční obvod v případě, že by se přetížil a následně prorazil zkoušený přístroj.

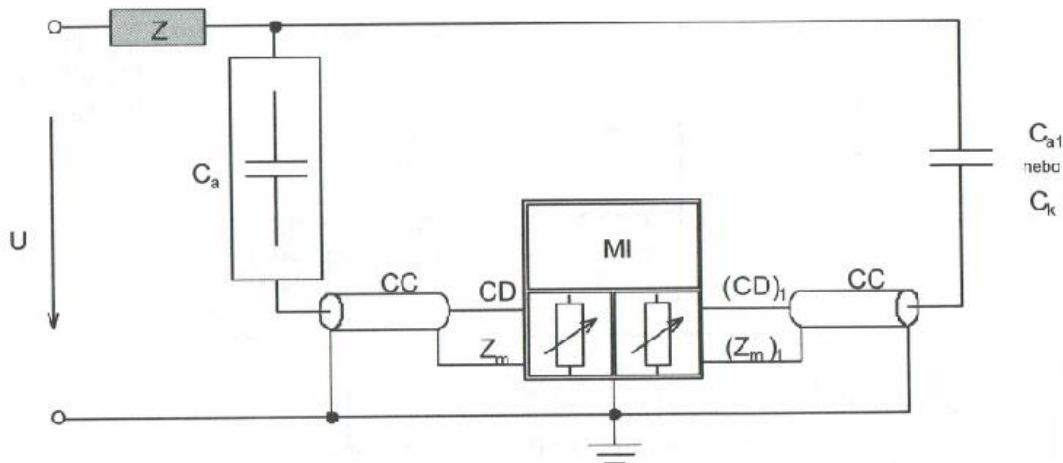
2) Zapojení se sériovou snímací impedancí



Obr. 19 Globální galvanická metoda se sériovou snímací impedancí [3]

Zapojení se sériovou impedancí je možné použít, pokud je požadavek na dosažení vyšší citlivosti měření, než u paralelní kombinace. Nicméně je vhodné potom používat ochranné prvky proti přepětí.

3) Můstkové zapojení



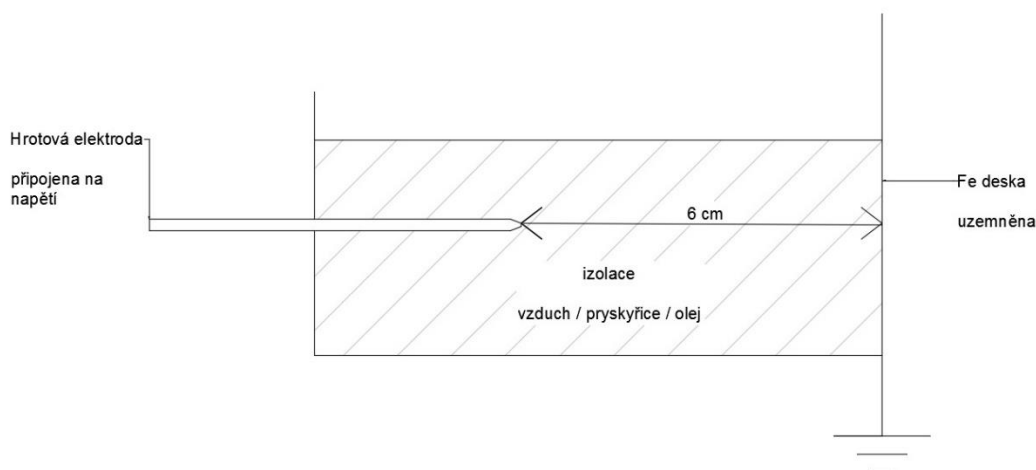
Obr. 20 Globální galvanická metoda můstkové zapojení [3]

Toto zapojení je vhodné, pokud je potřeba měřit částečné výboje přímo v místě instalace zařízení. Předchozí zapojení jsou poměrně citlivá na okolní rušení a musí být proto prováděna v laboratořích, nebo speciálních komorách. Můstkové zapojení má dvě nastavitelné měřicí impedance a proto lze jedna použít pro odfiltrování vlivu okolního rušení.

Před samotným měřením částečných výbojů ať už v jakémkoliv způsobu zapojení je nutné pro každý měřený objekt zkalibrovat měřicí systém. Proto je velice důležitý vysokonapětový vazební kondenzátor. Pomocí tohoto kondenzátoru lze určit převodní konstantu k podle normy [1] a začít s měřením. Místo vysokonapětového vazebního kondenzátoru lze použít i jiný objekt, ale s přesně definovanou a předem známou kapacitou.

7. Praktická část bakalářské práce

Praktický přínos této bakalářské práce spočívá v ověření, vyhodnocení a vysvětlení paternů tří typů izolace. Budu porovnávat a ověřovat vzduchovou izolaci, epoxidovou pryskyřici a použitý transformátorový olej. Aby bylo vůbec možné je mezi sebou porovnat, sestavil jsem tři stejné měřicí soupravy typu deska-hrot na kterých budu měřit. Schéma těchto souprav je na obrázku 21.

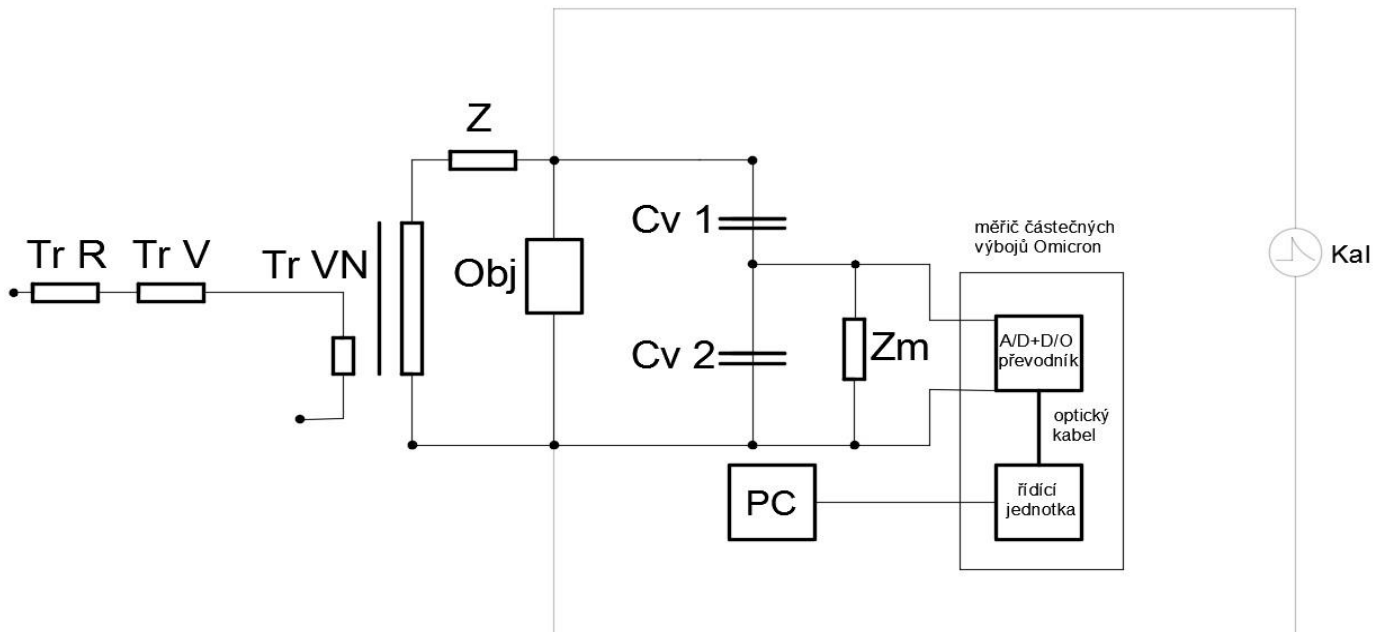


Obr. 21 Nákres navržených měřicích schémat

Na tyto soupravy bude připojen měřicí obvod a přivedeno napětí 15kV po dobu jedné minuty. Jednotlivé paterny porovnáme mezi sebou, s teoretickou předlohou a s jinými praktickými měřeními.

7.1. Měřicí soustava

Pro praktické měření bylo nutné sestavit soustavu vhodnou pro měření částečných výbojů. Schéma zapojení je na obrázku 22.



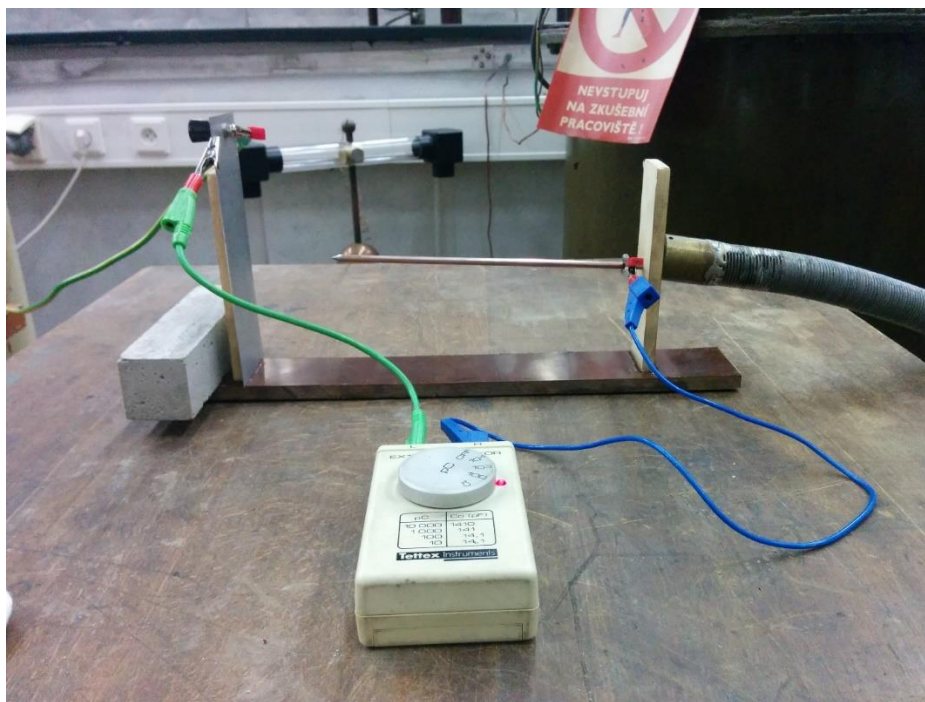
Obr. 22 Schéma zapojení měřicí soustavy.

- Tr VN - Zkušební bezvýbojový transformátor 120 kV, ČKD Praha
- Tr R - Regulační transformátor
- Tr V - Oddělovací transformátor
- Z - Omezovací odpor
- Cv1,2 - Kapacitní dělič OMICRON 1 nF, 100 kV
- Zm - Snímací impedance Omicron
- PC - Počítač s vyhodnocovacím softwarem
- Obj - Zkoumaný objekt
- Kal - Elektronický kalibrátor Tettex

Pro co nejpřesnější měření bylo nutné co nejvíce potlačit úroveň okolního šumu. Proto byl k napájení soustavy použit speciální bezvýbojový transformátor a připojení na elektrodu bylo realizováno bezvýbojovou trubicí. Pro potlačení kolísání napětí byl za regulační transformátor zařazen ještě oddělovací transformátor, který má vyhladit průběh napětí. Celé měření probíhalo v odstíněné laboratoři, takže úroveň okolního šumu byla nakonec cca 5pC což je přijatelná hodnota.

8. Souprava se vzduchovou izolací

První měřená soustava byla s elektrodou pouze ve vzduchu, což by měl být typický příklad výskytu koronového výboje. Foto mnou realizované soupravy je na obrázku 23. Před každým měřením byla podle normy [1] provedena kalibrace. Kalibrační zařízení bylo poté samozřejmě odpojeno.

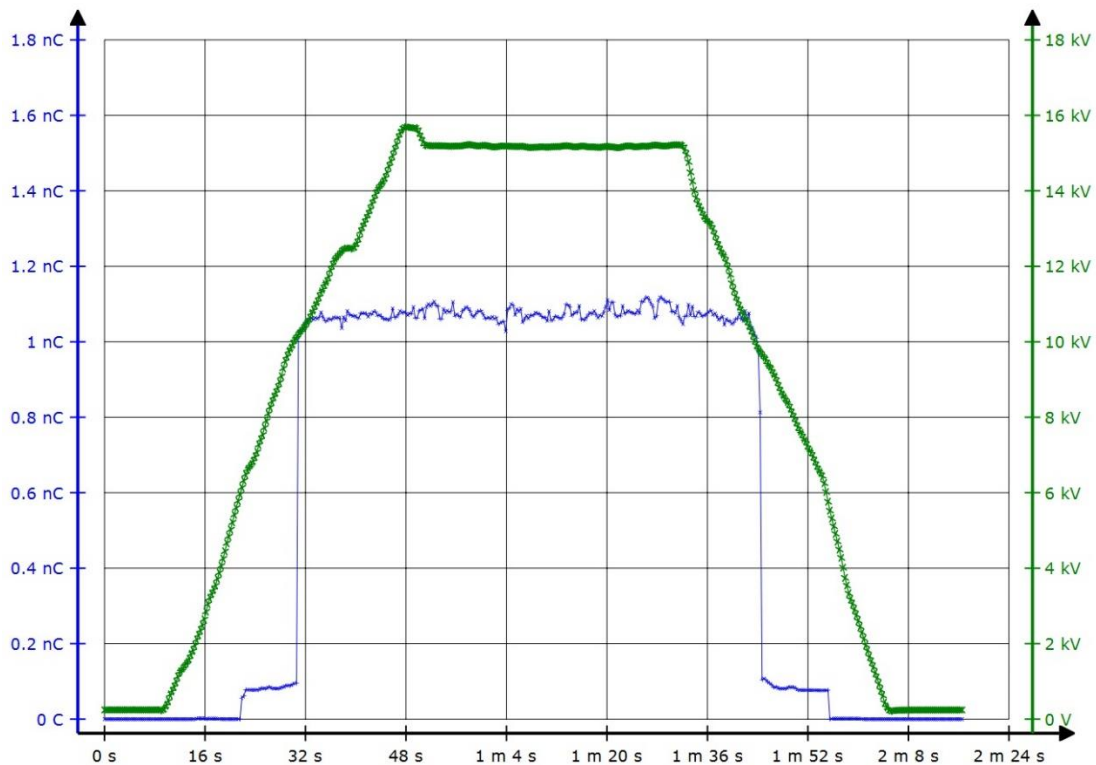


Obr. 23 Vzduchová souprava s kalibračním zařízením.

Samotné měření probíhalo následovně. Nejdřív jsme celou soustavu zkalibrovali kalibrátorem Tettex, poté jsme postupně na regulačním transformátoru zvyšovali napětí až do hodnoty 15 kV, kde jsme zůstali cca jednu minutu. Po uplynutí této doby jsme opět postupně snižovali napětí až do nuly. Během celé délky měření jsme udržovali konstantní síťovou frekvenci 50 Hz. Průběhy jsme zaznamenávali softwarem a měřícím vybavením od společnosti Omicron.

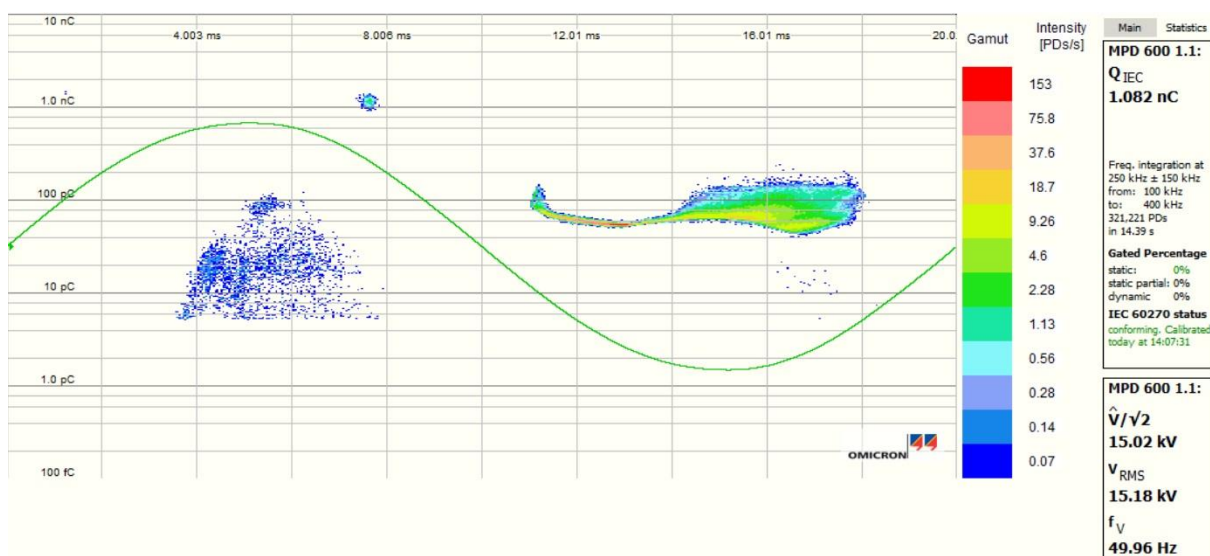
Výsledky měření:

První zaznamenané výboje byly detekovány při napětí 6,14 kV což je hodnota zapalovacího napětí. Po odměření a opětovném snížení napětí, ustaly výboje při 5,53 kV což je naměřené zhášecí napětí. Průběh měření částečných výbojů ve vzduchu je zobrazen na obrázku 24.



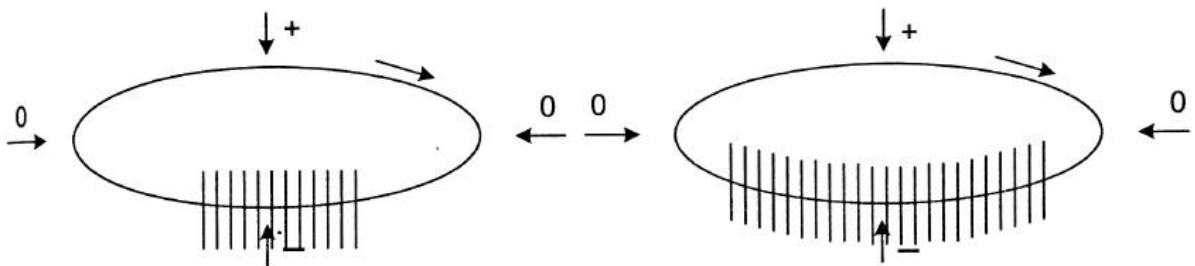
Obr. 24 Průběh částečných výbojů ve vzduchu na napětí a čase.

Jak je z grafu patrné úroveň částečných výbojů byla po celé měření zhruba konstantní na hodnotě 1,1 nC. Pro porovnání s jinými praktickými měřeními to ovšem není úplně vypovídající hodnota, jelikož její velikost závisí mimo jiné na atmosférických podmínkách a ty mohou být různé. Co ovšem porovnávat lze jsou naměřené patrné. Úroveň částečných výbojů na fázovém úhlu napětí je na obrázku 25.



Obr. 25 Průběh částečných výbojů ve vzduchu na fázoru napětí.

Částečné výboje s intenzitou do 0,1 PDs/s zobrazené pod kladnou půlvlnou jsou dle mého názoru způsobeny nějakou nedokonalostí v měřicím obvodu. Pravděpodobně špatným kontaktem způsobujícím sršení někde na rozhraní mezi trubicí a elektrodou. Proto je nebudeme uvažovat. Zbylé výboje nad sinusovkou jsou už samotný, námi hledaný patern. V ideálním naprosto homogenním prostředí by se měl shodovat s modelovým oscilogramem A na obrázku 12.



Obr. 12 Typ A modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Jak je vidět částečné výboje by se měli nacházet pouze na záporné půlvlně, což se mi více méně povedlo. Malá oblast výbojů nad kladnou půlvlnou je pravděpodobně způsobena vnitřní nehomogenitou prostředí. Na záporné půlvlně je v mém případě ještě různá velikost výbojů. Aby byla velikost stejná stejně jako na obr. 12 muselo by být zápalné napětí stejně velké jako zhášecí, což v praxi není možné.

Pro porovnání s jiným praktickým měřením jsem našel naměřený patern od pánů Tatsuki Okamoto, Naohiro Hozumi a Takahisa Imajo z roku 1992.

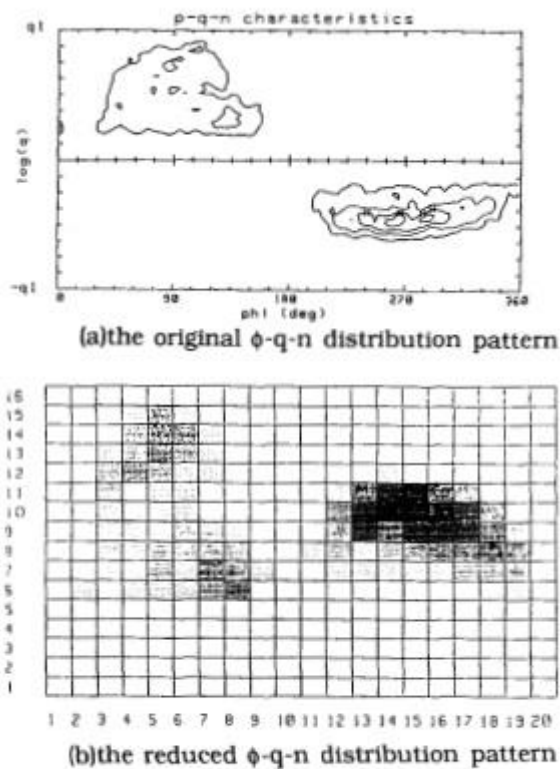


Fig.6 The ϕ -q-n distribution pattern from needle-plane electrode system (2.1 kV)

Obr. 26 Patern deska hrot. [11]

Při porovnání s jiným praktickým měřením je patrné, že mnou naměřený patern je tomuto velice podobný. Lze tedy předpokládat, že moje měření bylo provedeno správně a možná ještě lépe než to se kterým porovnávám, jelikož mnou zaznamenaný patern je podobnější teoretické předloze než ten na obrázku 26.

9. Souprava s transformátorovým olejem

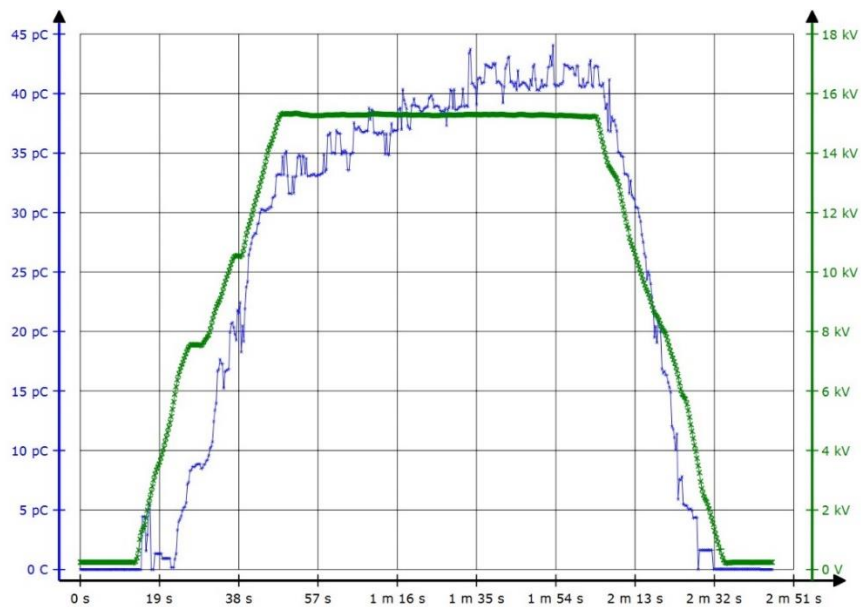
Jako izolaci ve druhé soupravě jsem použil několik let starý transformátorový olej. Tato souprava má reprezentovat výboje ve výkonových transformátorech, kde se částečné výboje měří velice často. Schéma zapojení i postup měření je stejný jako v předchozím případě.



Obr. 27 Souprava s transformátorovým olejem.

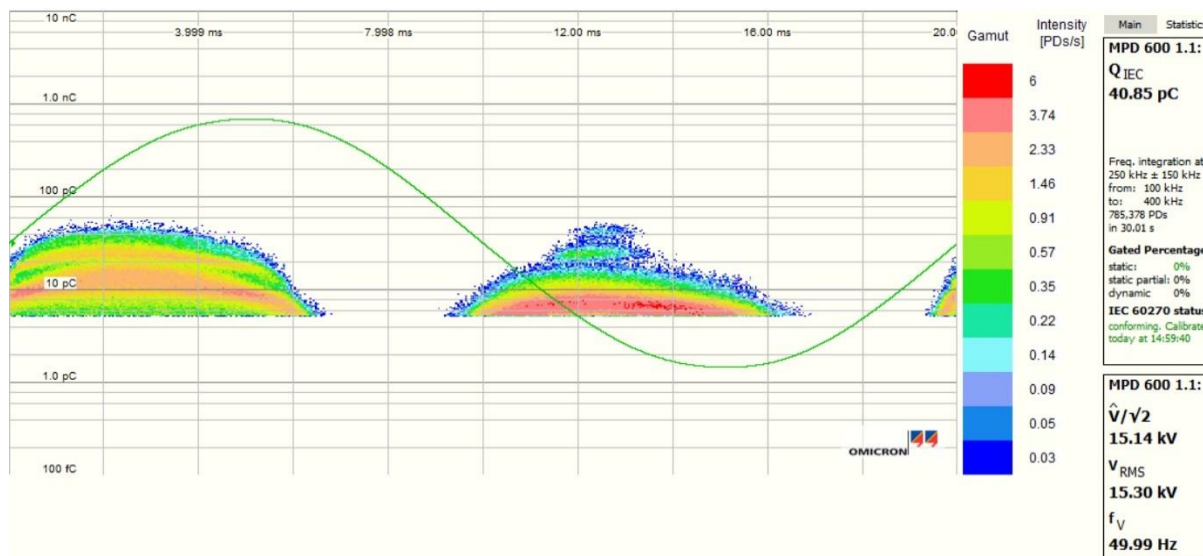
Výsledky měření:

Zapalovací napětí bylo 6,37 kV, zhasací napětí 3,48 kV. Hodnota částečných výbojů tentokrát (jak se dalo očekávat) nebyla konstantní, ale ze začátku poměrně lineárně stoupala, zhruba po 40 sekundách se ustálila a se snižujícím se napětím zase lineárně klesala. Maximální úroveň částečných výbojů byla při 15 kV cca 43 pC. Průběh měření je na obrázku 28.



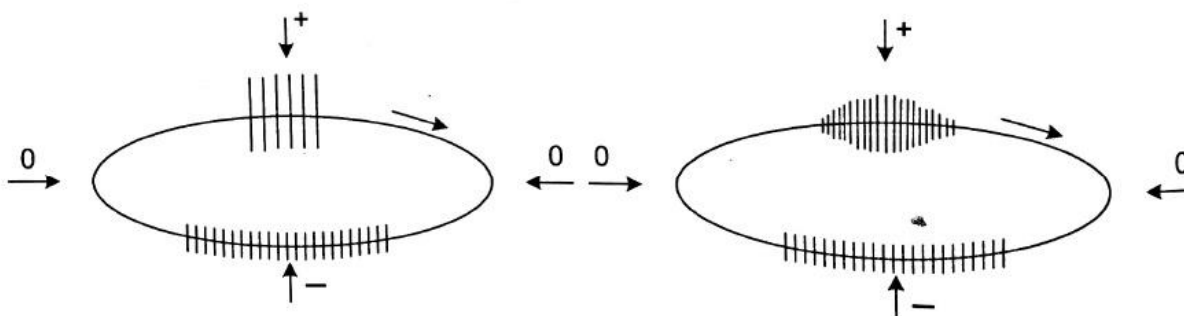
Obr. 28 Průběh částečných výbojů v oleji na napětí a čase.

Pro porovnání patrnů budeme opět potřebovat zobrazení částečných výbojů na fázovém úhlu.



Obr. 29 Průběh částečných výbojů v oleji na fázoru napětí.

Pro případ výbojů v oleji (a jiných izolačních kapalinách) je typický model B zobrazený na obrázku 13.

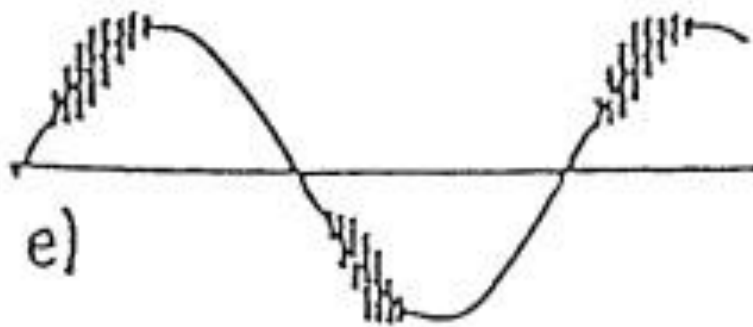


Obr. 13 Typ B modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Pro tento typ částečných výbojů je porovnávání s dokonalým teoretickým případem již poněkud složitější. Vzhledem k tomu, že transformátorových olejů je nepřeborné množství, stejně jako jiných izolačních kapalin, je těžké vytvořit jeden přesný model. Nicméně když porovnáme teorii s praxí, tak lze při troše pozorování najít společné rysy. Rozložení výbojů na sinusovce je sice lehce posunuté, ale minimálně v kladné půlvlně odpovídá teoretické předloze. Hodnoty jednotlivých částečných výbojů se taky mění přibližně tak, jak bychom očekávali. Ale nic není úplně stejné a nikdy ani nemůže být. To je jeden z hlavních důvodů,

proč je rozpoznávání částečných výbojů v uzavřených soustavách tak složité. Na jejich rozložení má vliv spousta různých faktorů a je skoro nemožné je všechny předvídat. Proto se v praxi zakládají obrovské databáze, kam se posílají data z jednotlivých sledovaných přístrojů a ty se na základě statistických metod porovnávají. V případě, že se sledované hodnoty výrazněji odchyľují od průměru, nebo nastala porucha stroje, se údaje teprve blíže zkoumají (například tak, že se stroj rozebere a zjistí se příčina poruchy).

Porovnávání s jiným prakticky naměřeným případem je taky poněkud složitější. Jelikož existuje celá řada různých modifikací měřených soustav i způsobů měření, je těžké najít naprosto stejné a porovnatelné soustavy. Podobné měření však prováděli v The Institute of Electrical and Electronics Engineers v roce 1992. Přesné výsledky sice neuvádějí, ale naměřené oscilogramy překreslili na sinusovku. Mě nejvíce podobný případ je uveden na obrázku 30.



Obr. 30 Patern pro olejové transformátory [12]

Rozložení částečných výbojů na sinusovce je téměř totožné s mým měřením. Určitý rozdíl je, že u mého měření výboje zasahují i do pravých polovin půlvln, což však může být způsobeno rozdílnou úrovní potlačovaného šumu. Toto měření bylo původně provedeno na transformátoru s izolačním papírem napuštěným olejem, nicméně jak je podle výsledků (i autorů práce, kteří na to upozorňují) patrné, rozložení částečných výbojů je v zásadě stejné jako v oleji.

10. Souprava s epoxidovou pryskyřicí

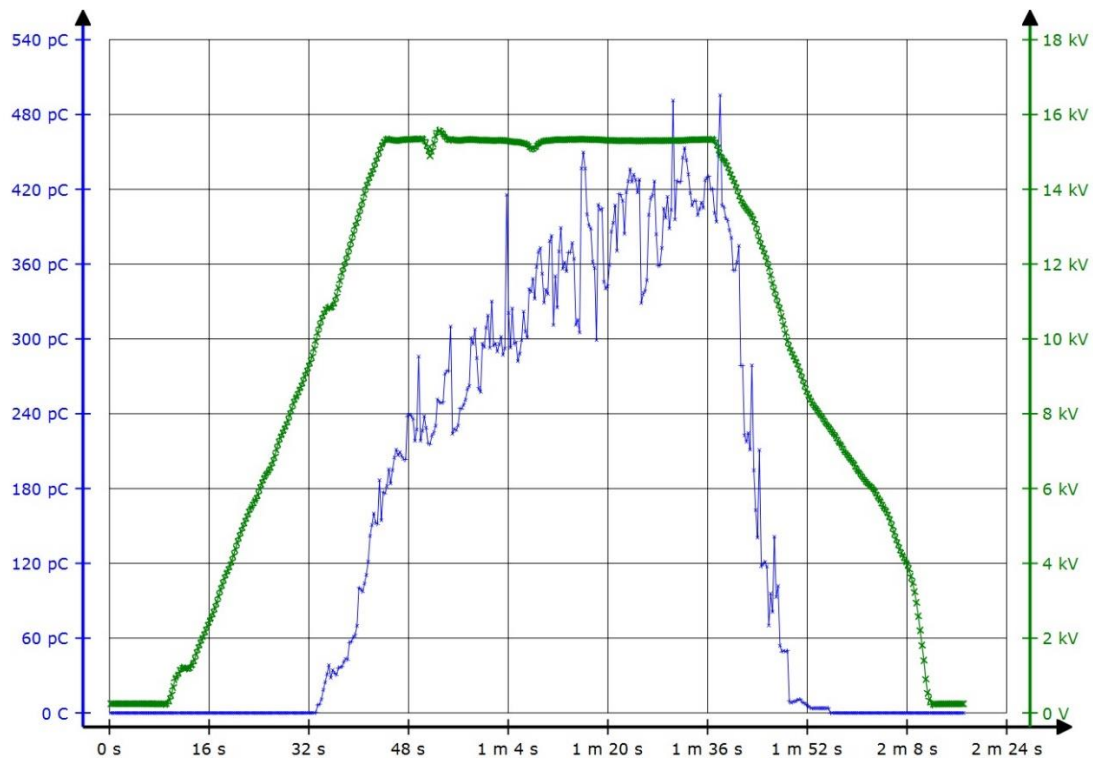
Tato souprava byla asi nejsložitější, co se týče přípravy. Pryskyřici jsem nejprve smíchal s tvrdidlem a důkladně promíchal, přičemž v ní vznikly vzduchové dutinky. (Aby se v praxi tomuto zamezilo, probíhá příprava ve vakuu.) Po promíchání jsem obsah nalil do plastového válce, připevnil jsem elektrodu do vzdálenosti 6 cm od desky jako u ostatních vzorků a nechal 4 dny vytvrdnout. Po následném opracování a připojení měřící soustavy vypadal vzorek takto.



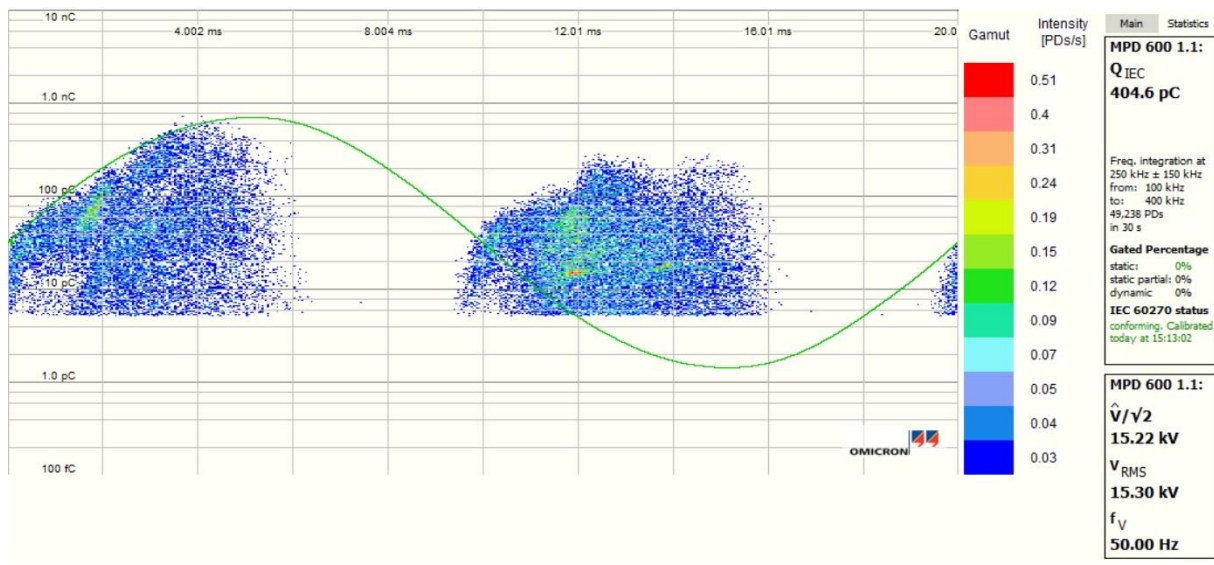
Obr. 31 Souprava s epoxidovou pryskyřicí.

Výsledky měření:

Zapalovací napětí bylo 10,15 kV, zhášecí 7,38 kV. Úroveň částečných výbojů tentokrát stoupala v podstatě po celou dobu měření. Maximální naměřená úroveň částečných výbojů byla 495 pC. Tato hodnota závisí především na počtu vzduchových dutinek, kterých bylo ve vzorku poměrně dost a na době po kterou měření probíhá. Kdyby měření trvalo déle, dosahovaly by výboje ještě vyšších hodnot, nicméně potom by vzorky nešly mezi sebou objektivně porovnat. Průběh měření je na obrázku 32.

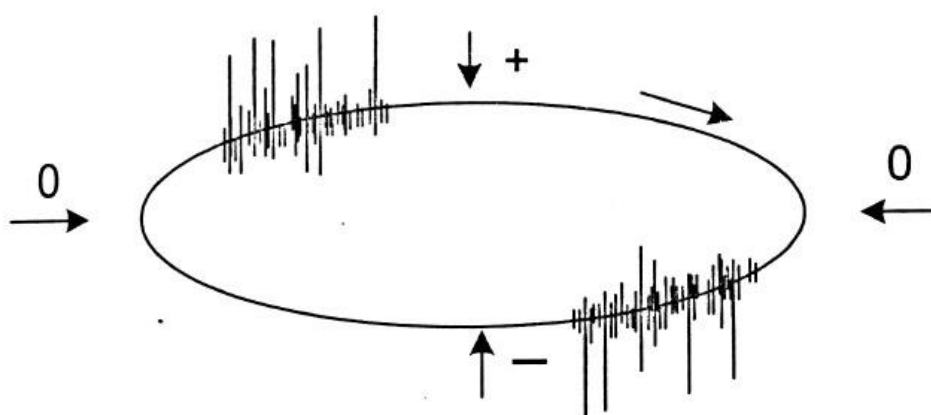


Obr. 32 Průběh částečných výbojů v pryskyřici na napětí a čase.



Obr. 33 Průběh částečných výbojů v pryskyřici na fázoru napětí.

Pro porovnání s touto soustavou musíme vzít případ pro částečné výboje v pevných izolantech, což je v předchozí části práce popsáno jako typ C na obrázku 14.



Obr. 14 Typ C modelového oscilogramu částečných výbojů [3]

Jak je vidět umístění částečných výbojů je skoro totožné s teoretickou předlohou, jen jejich úroveň lehce neodpovídá, ale ta se může měnit s atmosférickými podmínkami, takže není rozhodujícím faktorem. Podobné výsledky, jako jsem naměřil, bychom měli dostat pro většinu pevných izolantů se vzduchovými dutinkami. Pro porovnání s jiným skutečným experimentem jsem našel práci pánů M. Budde a M. Kurrat.

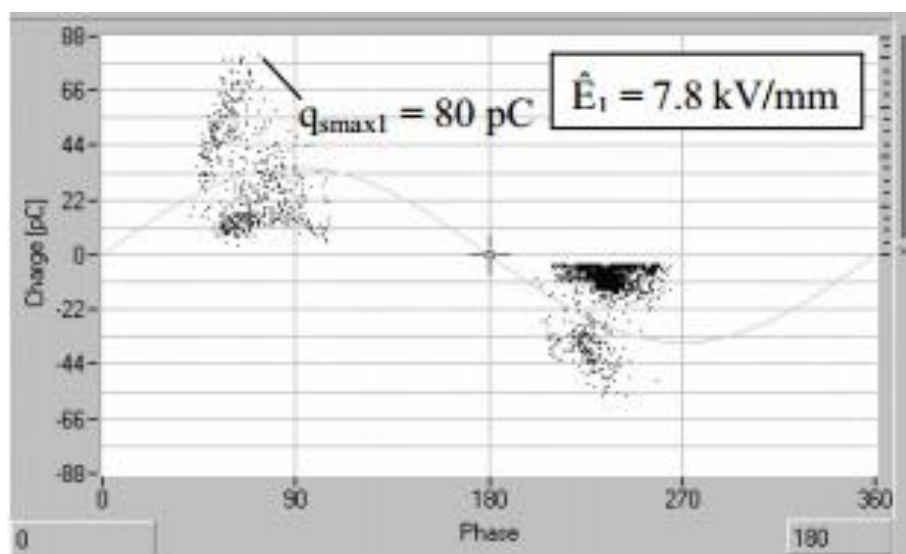


Fig. 4. Test specimen 1: PD activity at inception conditions

Obr. 34 Patern pro epoxidovou pryskyřici [13]

Tento patern odpovídá teoretické předloze o něco více než můj, zejména četností výskytu částečných výbojů. Ale umístění výbojů na sinusovce je podobné a to je to, o co jde při

porovnávání paternů především, takže si myslím, že jsem neudělal nic výrazně jinak než jak je tomu na obr. 33. Proto se dá usoudit, že i toto měření bylo úspěšné.

11. Porovnání a zhodnocení výsledků

Na závěr zbývá zhodnotit naměřené výsledky a porovnat je mezi sebou. Co se týče srovnání s teoretickou předlohou, byly moje paterny srovnatelné, což znamená, že jsou v pořádku. Ve srovnání s jinými praktickými měřeními se objevovaly drobné rozdíly, ale ne moc zásadního charakteru, což je také dobře. Ve výsledku se dá tedy prohlásit, že jsem vytvořil poměrně kvalitní vzorky jednotlivých typů částečných výbojů, které budou v budoucnu sloužit v laboratoři k výuce měření částečných výbojů.

O úrovni částečných výbojů jednotlivých vzorků nelze bez předchozích měření nebo výsledků získaných za stejných podmínek spolehlivě prohlásit jestli jsou dobré, či nikoliv. Na druhou stranu lze je alespoň použít ke srovnání typů izolace mezi sebou, jelikož úrovně napětí, elektrody, desky i vzdálenosti mezi nimi jsou ve všech případech stejné.

	Vzduch	Olej	Pryskyřice
Zapalovací napětí	6,14 kV	6,37 kV	10,15 kV
Zhášecí napětí	5,53 kV	3,48 kV	7,38 kV
Max. úroveň částečných výbojů	1100 pC	43 pC	495 pC

Nejmenší zapalovací napětí a nejvyšší úroveň částečných výbojů měla podle očekávání vzduchová izolace. Co bylo trochu překvapivé je to, že olej měl i přes bezkonkurenčně nejmenší úroveň částečných výbojů také nejmenší zhášecí napětí. Nejedná se ovšem o nijak závažný problém, protože už při napětí 6 kV byla úroveň částečných výbojů v oleji okolo 6 pC, což je hodnota těsně nad hranicí mnou naměřeného šumu. Největší překvapení je ovšem zjištění, že epoxidová pryskyřice měla i přes vysokou úroveň zapalovacího i zhášecího napětí více než 10x vyšší hodnotu částečných výbojů než olej, a jen zhruba poloviční ve srovnání se vzduchem. V ideálním případě by ji měla mít stejnou, nebo dokonce nižší než olej. Problém byl nejspíš v tom, že pryskyřice nestačila ani po 4 dnech pořádně vytvrdnout. Troufám si tvrdit, že kdyby se ten samý vzorek měřil například za měsíc, byly by výsledky výrazně jiné. Nicméně i to, že cca 400 ml pryskyřice tuhne déle než 4 dny je zajímavé zjištění, se kterým by se mělo počítat zejména při uvedení do provozu nových strojů a přístrojů s izolací z pryskyřice.

12. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce, který jsem si na začátku vytyčil, bylo přehledně rozdělit a popsat jednotlivé typy částečných výbojů. Následně zhodnotit jejich negativní dopady na izolační systémy elektrických strojů a uvést měřicí metody.

Tyto cíle jsem splnil v úvodních kapitolách, kde jsem vysvětloval fyzikální charakter částečných výbojů a příčiny jejich vzniku. V závislosti na těchto příčinách jsem detailněji popisoval jednotlivé paterny a uvedl nejčastější místa výskytu různých typů částečných výbojů. Následně jsem popsal destruktivní působení částečných výbojů na elektrickou izolaci a jejich průběhy v čase. Poté jsem se věnoval nejpoužívanějším měřicím metodám a vysvětloval jejich výhody a nevýhody. Pro názornější popis problematiky měření a vyhodnocování jsem sestavil tři vzorky reprezentující jedny z nejčastějších případů výskytu částečných výbojů. Tyto vzorky jsem následně změřil pomocí globální galvanické metody a získal jednotlivé paterny. Na tomto místě je třeba zdůraznit, že i přes veškerou snahu v potlačení okolních vlivů nemohou být výsledky úplně přesné. Důvodem je fakt, že ani v současné době nedokáže žádná měřicí souprava zohlednit veškeré procesy odehrávající se jak uvnitř vzorku, tak mimo něj. Další chybou, která se při vyhodnocování úrovně a paternů částečných výbojů často vyskytuje je subjektivní chyba autora, který špatně zhodnotí úroveň okolního šumu a považuje ho za patern. Abych se této chyby vyvaroval, porovnával jsem výsledky mimo teoretické předlohy také s jinými reálně změřenými vzorky. Následně jsem hodnotil rozdíly mezi nimi a pokusil se odhadnout příčiny. Nakonec jsem mé tři vzorky porovnal mezi sebou, abych určil, která ze zkoušených izolací je nejvíce odolná proti působení částečných výbojů.

Seznam použité literatury

- [1] *Technika zkoušek vysokým napětím – měření částečných výbojů*, ČSN EN 60270, Český normalizační institut, Praha 2001.
- [2] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005, 135 s. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-x.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] HAVLÍČEK Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 120 s. Vedoucí doktorské práce Doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.
- [5] *Přístrojové transformátory - Část 1: Všeobecné požadavky: ČSN EN 61869-1*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [6] *Life expectancy analysis improves maintenance management of high-voltage motors and generators*. ABB review. 2012, 2012(4): 36-41
- [7] BLOSHCHITSYN, Vladimir. *Review of surface discharge experiments [online]*. 2010
- [8] BAZELYAN E. M. RAIZER Y. P. *Lightning physics and lightning protection*. — [б.м.] : CRC Press, 2000. — 325 стр
- [9] YAMABE C. TAKESHITA F., MIICHI T, HAYASHI N., IHARA S. *Water Treatment Using Discharge on the Surface of a Bubble in Water // Plasma Processes and Polymers*. — 2005 г.. — 3 : T. 2. — 246-251 стр
- [10] MENTLÍK Václav. *Dielektrické prvky a systémy*, BEN Technická literatura, ISBN 80-7300-189-6, 240s., Praha, 2006.
- [11] T. OKAMOTO, N. HOZUMI AND T. IMAJO, "Partial discharge pattern recognition for four kinds of electrode systems," *Electrical Insulation, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on*, Baltimore, MD, 1992, pp. 375-378.
- [12] *IEEE Recommended Practice for the Detection of Partial Discharge and the Measurement of Apparent Charge in Dry -Type Transformers*," in *IEEE Std C57.124-1991* , vol., no., pp.0_1-, 1992
- [13] M. BUDDE AND M. KURRAT, "Partial Discharge Diagnostics of Micro Cavities in Epoxy Insulating Materials and their Modelling," *Electrical Insulation*, 2008. ISEI 2008. *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on*, Vancouver, BC, 2008,

Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Tvar proudového impulsu částečného výboje [4].....	4
Obr. 2 Druhy částečných výbojů při různém uspořádání elektrod [4].....	6
Obr. 3 Trojkapacitní model pro částečné výboje [4].....	7
Obr. 4 Náhradní schéma pro trojkapacitní model [2].....	8
Obr. 5 Časové průběhy napětí a proudu [2]	9
Obr. 6 Povrchové částečné výboje [4].....	10
Obr. 7 Vnější částečné výboje [2]	11
Obr. 8 Náhradní schéma uspořádání deska-hrot [2].....	11
Obr. 9 Ideální průběh napětí vnějších částečných výbojů [2]	12
Obr. 10 Fáze průběhu elektrického stromečku [3].....	14
Obr. 11 Typické zobrazení částečných výbojů na napájecím napětí [6].....	15
Obr. 12 typ A modelového oscilogramu částečných výbojů [3].....	16
Obr. 13 typ B modelového oscilogramu částečných výbojů [3]	16
Obr. 14 typ C modelového oscilogramu částečných výbojů [3]	17
Obr. 15 typ D modelového oscilogramu částečných výbojů [3].....	18
Obr. 16 typ E modelového oscilogramu částečných výbojů [3]	18
Obr. 17 typ F Zobrazení rušení na modelovém oscilogramu [3]	19
Obr. 18. Globální galvanická metoda s paralelní snímací impedancí [3]	21
Obr. 19 Globální galvanická metoda se sériovou snímací impedancí [3].....	22
Obr. 20 Globální galvanická metoda můstkové zapojení [3].....	22
Obr. 21 Náskres navržených měřících schémat.....	23
Obr. 22 Schéma zapojení měřící soustavy.	24
Obr. 23 Vzduchová souprava s kalibračním zařízením.....	25
Obr. 24 Průběh částečných výbojů ve vzduchu na napětí a čase.	26
Obr. 25 Průběh částečných výbojů ve vzduchu na fázoru napětí.....	26
Obr. 26 Patern deska hrot. [11]	28
Obr. 27 Souprava s transformátorovým olejem.	29
Obr. 28 Průběh částečných výbojů v oleji na napětí a čase.	29
Obr. 29 Průběh částečných výbojů v oleji na fázoru napětí.....	30
Obr. 30 Patern pro olejové transformátory [12]	31
Obr. 31 Souprava s epoxidovou pryskyřicí.	32

Obr. 32 Průběh částečných výbojů v pryskyřici na napětí a čase.	33
Obr. 33 Průběh částečných výbojů v pryskyřici na fázoru napětí.....	33
Obr. 34 Patern pro epoxidovou pryskyřici [13]	34