

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Mechanismus částečných výbojů v izolačních kapalinách

**vedoucí práce: Ing. Josef Pihera, Ph.D.
autor: Bc. Tomáš Grubr**

2013

Anotace

Tato práce je zaměřena na problematiku výbojové činnosti v izolačních kapalinách. Jsou zde popsány vlivy výbojové činnosti na tento systém.

Práce je rozdělena na čtyři hlavní části:

První část se zaměřuje na vznik a popis částečných výbojů obecně. V druhé části jsou popsány kapalné izolanty, které jsou používány v oblasti energetických zařízení a jejich výbojová činnost. Třetí část je věnována ověření a vlivu výbojové činnosti na kapalný izolační systém a odzkoušení měřicím přístrojem. V poslední čtvrté kapitole jsou uvedeny příklady použití a vyhodnocení částečných výbojů.

Klíčová slova

Částečné výboje, výbojová činnost, degradační mechanismy, izolační kapaliny

Abstract

This thesis deals with partial discharge activities in insulation liquid system. There are described effects of discharge activities on this system. Thesis is divided into four main parts. The first part deals with generation partial discharge and described them. The second chapter describes the liquid insulating system, which are used in energy equipment and their discharge activity. The third chapter deals with verification activities and the influence of liquid insulation system and their testing. The last chapter described examples of the use and testing of partial discharges.

Key words

Partial discharge, partial discharge activities, degradation mechanism, insulating liquids

51 pages

35 figures

15 tables

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 3.5.2013

Tomáš Grubr

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za cenné profesionální rady v této problematice, konzultace, připomínky a odborné vedení práce. Dále také Jaroslavu Bartoňovi za praktické rady při tvorbě vzorků experimentu.

OBSAH

OBSAH	7
ÚVOD.....	1-8
SEZNAM SYMBOLŮ	1-9
1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	1-10
1.1 VZNIK ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	1-10
1.2 VÝVOJ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ (ELEKTRICKÉHO STROMEČKU).....	1-11
1.3 ÚČINKY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLAČNÍ SYSTÉM	1-13
1.3.1 Elektrické účinky	1-13
1.3.2 Chemické účinky	1-13
1.3.3 Tepelné účinky	1-14
1.3.4 Mechanické namáhání	1-14
2 KAPALNÉ IZOLANTY	2-15
2.1 VÝBOJE V KAPALNÝCH IZOLANTECH.....	2-15
2.2 NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ KAPALNÉ IZOLANTY	2-18
2.2.1 Minerální oleje.....	2-18
2.2.2 Syntetické kapaliny	2-18
2.2.3 Rostlinné oleje	2-20
2.3 PARAMETRY KAPALNÝCH IZOLANTŮ.....	2-21
2.3.1 Elektrické vlastnosti	2-21
2.3.2 Fyzikální vlastnosti.....	2-23
2.3.3 Chemické vlastnosti.....	2-24
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	3-26
3.1 MĚŘÍCÍ SYSTÉM.....	3-28
3.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU	3-29
3.2.1 Hodnoty pro 0 hodin stárnutí olejů.....	3-29
3.2.2 Hodnoty pro 148 hodin stárnutí olejů.....	3-32
3.2.3 Hodnoty pro 316 a 436 hodin stárnutí.....	3-32
3.2.4 Uspořádání hrot – deska se zaoblenou elektrodou	3-33
3.3 KORÓNA VE VZDUCHU	3-36
3.3.1 Ověření výpočtem pro případ koróny ve vzduchu	3-37
3.4 POROVNÁNÍ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI VZDUCH – OLEJ.....	3-39
4 PŘÍKLADY POUŽITÍ A VYHODNOCENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	4-41
5 ZÁVĚR.....	5-46
POUŽITÁ LITERATURA.....	5-47

Úvod

Diplomová práce se zaměřuje na popis a mechanismus částečných výbojů v izolačních kapalinách elektrických zařízení. Obecně je izolační systém velice důležitou součástí těchto zařízení a výrazným způsobem ovlivňuje jejich spolehlivost, bezpečnost a kvalitu. Z tohoto hlediska se na tento systém stále musí zaměřovat pozornost a pomocí experimentů určovat jejich životnost. Konkrétní experimenty v oblasti izolačních kapalin jsou především věnovány typům olejů a jejich stárnutí.

Spolehlivost izolačních systémů významně ovlivňuje výbojová činnost, což je nežádoucí vliv, který negativně působí na jejich systém. Tyto vlivy mohou vést k nevratným změnám až k úplnému poškození. K částečným výbojům dochází v oblasti místních nehomogenit, které se vlivem technologických procesů a dále vlivem dlouhodobého provozního namáhání vyskytují v izolačním systému. Z praktického hlediska jim zabránit nelze, proto je vývoj zaměřen na použitý materiál, používané technologie a diagnostické metody. S pomocí nich je možné tyto jevy sledovat.

V této práci je nejprve obecně rozebrána problematika částečných výbojů a jejich nežádoucích účinků na izolační systém. Dále se věnuje oblasti kapalných izolantů a jejich typům s popsáním nejdůležitějších parametrů, jenž je nutné pro správné zhodnocení sledovat.

Zaměřením práce je pak především výbojová činnost v izolačním systému olej – papír a hlavní částí je experimentální ověření této oblasti v daném uspořádání pro dva typy oleje, konkrétně minerální a řepkový olej. Pro analýzu jsou tyto typy vystaveny tepelnému stárnutí, reprezentující stav izolačního systému po určité době používání a namáhání.

S pomocí tohoto měření je možné odhadnout stav oleje s možností předejít náhlým poruchám a možnost udržovat elektrické zařízení v provozuschopném stavu. Dále jsou pak informace vhodné pro určení životnosti zařízení a jejich dalšího vývoje.

Seznam symbolů

ϵ_r [-]	relativní permitivita
ϵ [-]	permitivita daného materiálu
ϵ_0 [F/m]	permitivita vakua
q [pC]	zdánlivý náboj
U_i [V]	zapalovací napětí
U_e [V]	zhášecí napětí
E_p [kV · mm ⁻¹]	elektrická pevnost
U_p [kV]	průrazné napětí
ρ [$\Omega \cdot m$]	rezistivita
γ [S · m ⁻¹]	konduktivita
Q_{iec} [pC]	zdánlivý náboj
N [-]	četnost výbojů
σ [-]	směrodatná odchylka
v [%]	variační koeficient

1 Částečné výboje

Působení částečných výbojů v elektrických zařízeních negativně působí na jejich izolační systém a významně tak snižuje jejich životnost. Jejich vznik je způsoben nedokonalostmi při samotné výrobě izolačních materiálů, které jsou reprezentovány vznikem malých dutinek vyplněných plynem. Následkem stálého provozního namáhání může tedy dojít k neobnovitelnému poškození izolace. Podle místa výskytu rozlišujeme druhy částečných výbojů na **vnitřní výboje**, jež vznikají v plynných dutinkách uvnitř izolantu, **povrchové výboje** vyskytující se na povrchu izolantu vlivem působení vnějšího elektrického pole (drážkové, klouzavé) a **vnější výboje**, které vznikají v okolí elektrod malých zakřivení (korónové). [1]

Existuje několik definic částečných výbojů:

Elektrické výboje přemostřující jen částečně izolaci mezi elektrodami, které jsou na různých potenciálech – **dle ČSN EN 60270**.

Výboj v dutině dielektrika znamená částečný nebo úplný výboj mezi protilehlými elementy povrchu dutiny ve směru intenzity elektrického pole, ve velmi krátkém čase – **dle Gemant a Philippova**. [1, 6]

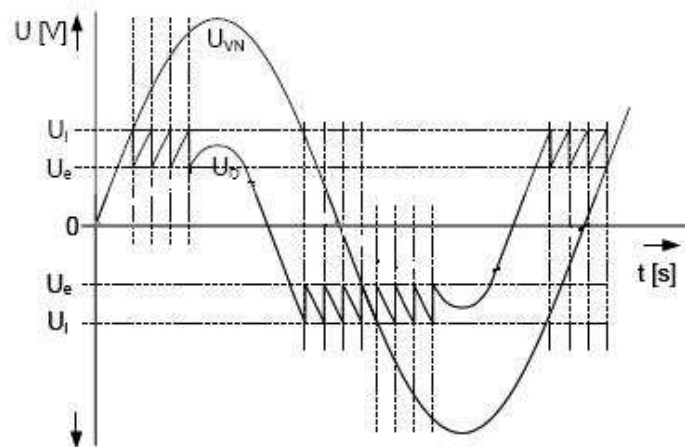
1.1 Vznik částečných výbojů

Základním faktorem pro vznik částečných výbojů jsou strukturální nehomogenity zapříčiněny technologickými procesy při výrobě. Tyto nehomogenity jsou zastoupeny v podobě dutinek vyplněné plynem. Dutinky jsou mnohem více namáhány než samotný materiál izolantu, jelikož prostor dutinky vyplňují plyny s permitivitou mnohem menší než je permitivita pevných látek v izolantu, permitivita je udávána vztahem (1)

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

kde ε_r je relativní permitivita [-],
 ε_0 je permitivita vakua $8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m],
 ε je permitivita daného materiálu [-].

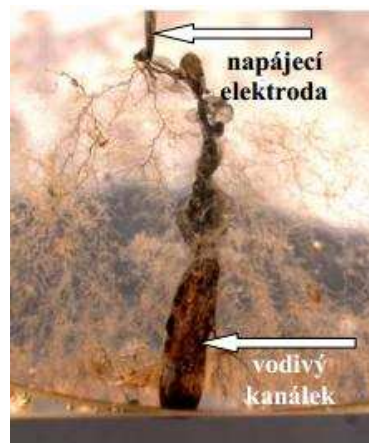
Působením elektrického namáhání na plyn v dutince a překročením určité hodnoty napětí, dochází ke vzniku částečných výbojů. Toto napětí nazýváme zapalovací napětí (U_i), což je hodnota minimálního napětí, při kterém se nám částečné výboje zaznamenají. Výboje se v dutince drží po dobu, než klesnou pod hodnotu tzv. zhašecího napětí (U_e), napětí při kterém se nám výboje přestávají objevovat a uhasínají. Tyto napěťové průběhy jsou uvedeny na (obr. 1).



Obr. 1: Napěťové průběhy na modelu vnitřního částečného výboje [4]

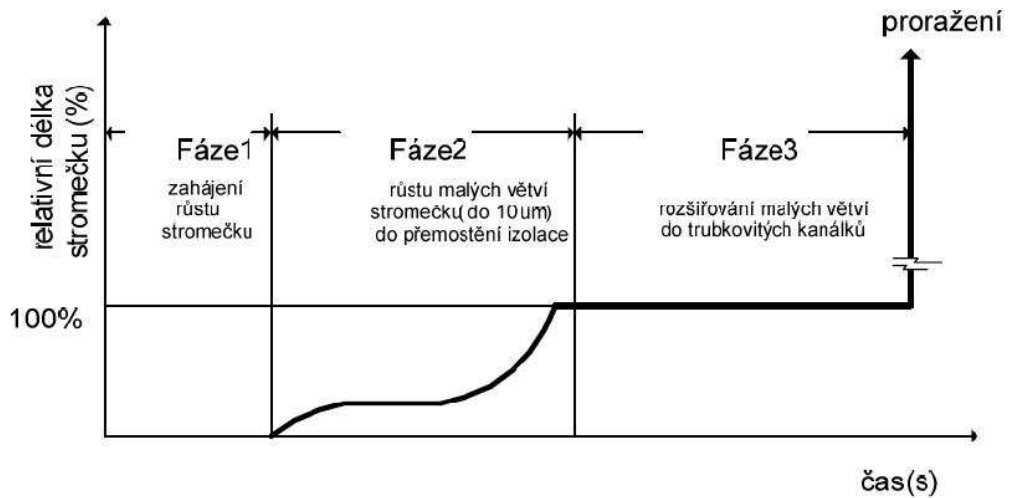
1.2 Vývoj částečných výbojů (elektrického stromečku)

Vývoj částečných výbojů je spojován s vývojem elektrických stromečků, kde za působení silného elektrického pole dojde k jejich vzniku a šíření vodivou drahou. Poté následuje růst elektrického stromečku v nehomogenitách izolačního systému, který se šíří v podobě kanálků dále do izolantu ke vzdálenosti mezi elektrodami, kde vrcholí průrazem po určité době. Postupným šířením a rozvětčováním kanálků se vytváří tzv. stromečkové struktury. Na (obr. 2) je vidět znázornění vývoje elektrického stromečku. [9]



Obr. 2: Vývoj elektrického stromečku, převzato z [9]

Jednotlivé fáze elektrického stromečku jsou zobrazeny na (obr. 3), které popsali autoři v publikaci [1].



Obr. 3: Fáze růstu elektrického stromečku v izolaci, převzato z [1]

Růst elektrického stromečku je simulován s pomocí hrotu jehly a uzemněné elektrody, která je přiložena na krychličku epoxidové pryskyřice, nebo je zalita v jejím objemu.

Fáze 1 – nastává v počátečním okamžiku růstu stromečku, kde detekce je možná jen za použití velmi citlivé techniky, vzhledem k velikosti stromečku. [1]

Fáze 2 – ukazuje růst stromečku k uzemněné elektrodě, kde se k první větvi tvoří další malé větve, až dojde k dosažení uzemněné elektrody, tato fáze končí. Vzhledem k malé vodivosti a protékajícímu proudu těchto malých větví, nedochází u této fáze k průrazu. Jejich největší průměr dosahuje $10\mu\text{m}$ a nejmenší ve špičkách méně než $1\mu\text{m}$. Dle podrobné analýzy bylo zjištěno, že větve jsou vyplněny rozloženými produkty polymeru, důsledkem růstu samotného stromečku. Růst malých větví je způsoben malými výboji o průměrných hodnotách 5 až 30 pC [1]. Délka kdy dojde ke spojení elektrod je asi 24% celkového času, než dojde k absolutnímu průrazu. [1]

Fáze 3 – dochází v době prvního spojení elektrod a je ukončena totálním průrazem dielektrika. V této fázi se stromeček zvětšuje a kanálky se rozšiřují do hodnot větších než $10\mu\text{m}$ s typickými hodnotami mezi 60 až $150\mu\text{m}$. Kanálky jsou již duté, a když dosáhne do uzemněné elektrody, následně dochází ke zmíněnému průrazu. Tyto kanálky dosahují hodnoty zdánlivého náboje 50 až 220 pC. [1]

1.3 Účinky částečných výbojů na izolační systém

Přítomnost výbojové činnosti přímo ve vzniklých nehomogenitách a okolí izolačních systémů zařízení způsobuje nežádoucí degradační účinky, vedoucí k omezení spolehlivosti a životnosti elektrických zařízení. Výboje vlivem namáhání vytváří čtyři základní druhy negativních účinků, jimiž jsou erozivní, elektrické, chemické a tepelné účinky. Jelikož je prakticky nemožné vyrobit izolační systém bez strukturních nehomogenit, jsou tyto účinky nevyhnutelnou součástí systému zařízení.

1.3.1 Elektrické účinky

Intenzita elektrického pole při působení výboje způsobuje mikroskopické účinky, které se ukládají na povrchu izolačního materiálu a vedou k degradaci systému. Elektrické pole je zodpovědné za vznik vedlejších ionizovaných částic, které vedou ke zvýšení ztrát a namáhání dutinky. Tyto negativní produkty mohou mít za následek elektrický průraz. [3]

1.3.2 Chemické účinky

Jak již bylo zmíněno, dopad částic společně s dlouhotrvajícím tepelným a mechanickým namáháním mají za následek změnu chemické struktury izolačního systému zařízení, následně pak vznikají při dlouhém působení částečných výbojů chemické účinky. Nejčastějším médiem dutinek je vzduch, jehož prostřednictvím jsou částečné výboje šířeny do struktury. Vzduch je směs plynů, kde hlavními komponenty jsou dusík a kyslík s oxidy uhlíku. Působením chemických reakcí vznikají produkty pevné, plynné a kapalné. [1, 3]

- Pevné produkty

Jedná se o produkty vznikající působením částečných výbojů po určité době až několik stovek hodin. Následně vznikají pevné produkty ve formě krystalu, jenž vychází z dříve vytvořených kapiček, které se tvoří na místech působení výbojové činnosti. Složení těchto produktů je hydrát kyseliny šťavelové. Podmínkou pro vznik krystalů je přítomnost prvků vodíku (H), uhlíku (C) a kyslíku (O) v plynném prostředí. [1]

- Kapalné produkty

Pro vznik kapalných produktů je opět důležitá přítomnost již zmíněných prvků, vodíku, uhlíku a kyslíku, jakmile by totiž jeden z prvků obsažen nebyl, žádné kapičky, jež jsou směsí organických sloučenin, jako např. kyselina octová nebo kyselina mravenčí, by se neobjevily

[1]. Výsledkem vytvoření kapalných produktů je zvětšení povrchové vodivosti dutinek, což způsobuje rozpuštění degradačních produktů ve vodě a tím se vytváří elektrolytická vrstva. Ta má za následek zmíněný nárůst povrchové vodivosti o několik řádů. [1]

- Plynné produkty

Přítomností plynných produktů se zabývaly výzkumy, na něž je odkázáno v publikaci [1], kde byl zjištěn výskyt uhlíkových monoxidů, dioxidů a menší množství vodíku působením částečných výbojů na XLPE (zesíťovaný polyetylén). Dalšímu testu na výskyt plynných produktů byl podroben elektrický stromeček a opět se potvrdila přítomnost těch samých produktů. [1]

1.3.3 Tepelné účinky

Vlivem působení částečných výbojů dochází k tepelné nestabilitě, která se projevuje zvýšením teploty v místním okolí plynného média. Tepelný rozdíl způsobují molekuly plynu v teplejší oblasti, jež se stěhují do oblasti chladnější. Takové tepelné namáhání částečných výbojů může být dostatečné k poškození polymerních materiálů, ale není tomu tak u jiných pevných izolačních materiálů. Z toho vyplývá, že pevné materiály, jako jsou slída a porcelán jsou odolnější než např. PE (polyetylén), který je vůči tomuto mechanismu citlivější. Degradace vlivem tepelného namáhání v případě polymerních materiálů nebude taková, jako v případě s dalšími přítomnými degradačními mechanismy. [1,3]

Reakce polymerních materiálů na čistě tepelné namáhání je závislá na struktuře materiálů [3].

1.3.4 Mechanické namáhání

Vlivem mechanického namáhání izolačních materiálů a působením vnějšího elektrického pole vznikají nosiče náboje, které se postupně seskupují v izolantu. Nosiče stejné polarity se vzájemně odpuzují a náboje různé polarity se navzájem přitahují, těmito reakcemi nábojů se dále zvyšuje mechanické namáhání, které je závislé na počtu dopadajících částic a rychlosti jejich srážek. Celý proces vede ke zvětšování dutinky a následnému možnému průrazu. [1, 3]

2 Kapaln \acute{e} izolanty

Důležitou součástí energetických systémů a zařízení, jako transformátory vyšších výkonů jsou jejich izolační kapaliny, jež plní nejen funkci izolační, ale jsou využívány rovněž jako chladicí médium. Z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti musí tyto izolanty splňovat určité požadavky elektroizolačních vlastností a parametrů uvedených níže, např. elektrická pevnost, elektrická vodivost a viskozita. Výzkum v této oblasti izolačních kapalin a s ním spojená *výbojová činnost* v nich je složitou a stále neprobádanou záležitostí. Nejrozšířenějšími kapalnými izolanty používanými v praxi jsou stále ještě minerální oleje, které jsou z největší části směsí uhlovodíků a dalších sloučenin síry, dusíku a kyslíku, získávané destilací z ropy. Jejich nevýhodou je špatná biologická odbouratelnost. Dalšími kapalnými izolanty, kterými se je snaží výrobci nahradit, jsou syntetické a rostlinné izolační kapaliny, které jsou ekologicky výhodnější. Na druhou stranu jsou cenově náročnější než minerální oleje. [12, 13]

2.1 Výboje v kapalných izolantech

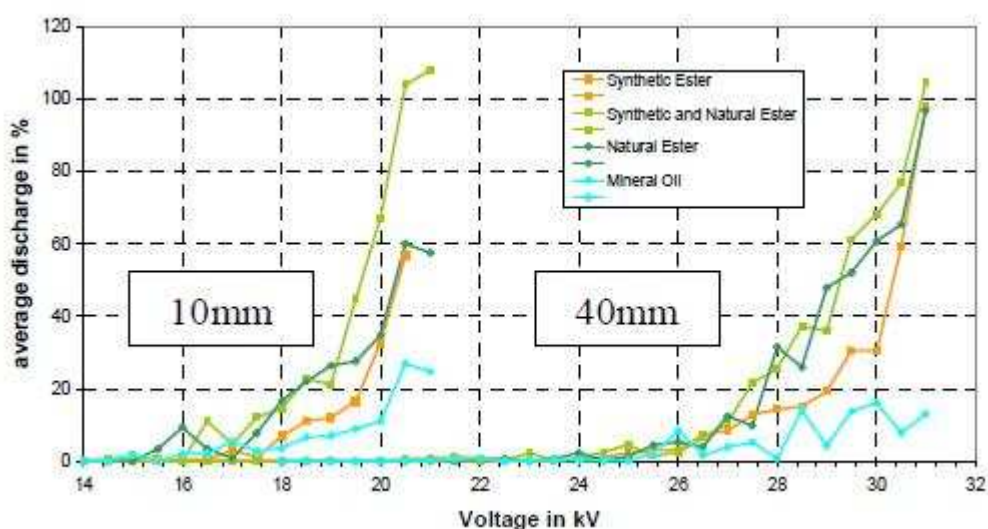
Existuje několik hypotéz a experimentů, týkajících se obecně přeskoku a elektrické pevnosti v kapalných izolantech související s výbojovou činností, jež jsou zmíněny níže, podle [2]. Na (obr. 4) je uveden příklad plynové bublinky v transformátorovém oleji. Příkladem jsou pak experimenty a měření vlivu částečných výbojů na izolační systém olej – papír, na něž je zaměřena i studie v této práci. Výbojová činnost je závislá na mnoha faktorech, které souvisejí přímo s elektrickým výbojem v kapalném izolačním systému. Jedná se o rozložení elektrického pole mezi elektrodami, nečistotách elektrody a v jejich okolí, teplotě, napětí a další. [2] Charakteristickými rysy výbojů v kapalných izolantech jsou:

- mají větší elektrickou pevnost než izolanty plynné
- částečný výboj se tvoří v místech nečistot izolantu, jimiž jsou hlavně plynové bublinky
- hodnota přeskokového napětí je ovlivněna také materiálem elektrod a jejich úpravou
- přeskok může mít různý charakter (čistě elektrické nebo tepelný průraz)



Obr. 4: Plynová bublinka v kapalném izolačním systému transformátoru, převzato z [11]

Ve studii [12] byla zkoumána průměrná výbojová činnost, kde elektrody byly uspořádány jako jehla a deska ve dvou vzdálenostech a v různých izolačních kapalinách (minerálního oleje, přírodních esterů a syntetických esterů). Tento výzkum poukazuje na větší chování z hlediska použitých izolačních kapalin v transformátorech a významné rozdíly výbojové činnosti mezi kapalinami.

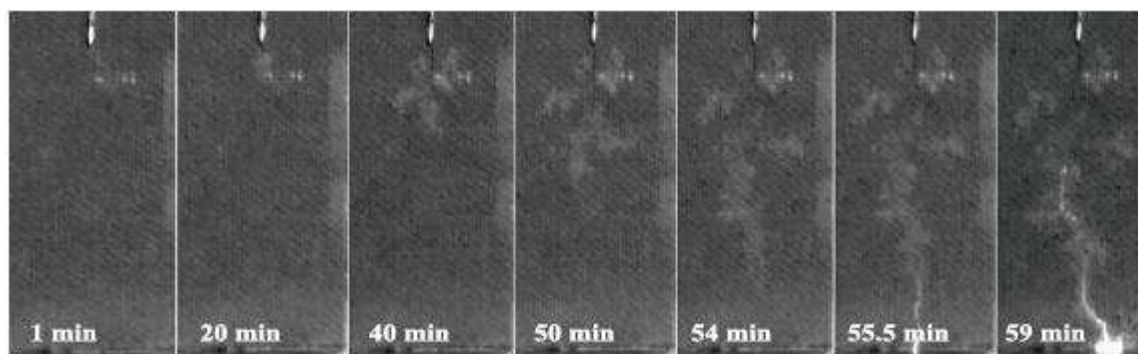


Obr. 5: Průměrná výbojová činnost, převzato z [12]

Další experiment spojený s touto činností a podobný této práci je uváděn v [22], kde je na povrchu lepenky zkoumán vliv výbojové činnosti v odlišných izolačních kapalinách, jmenovitě syntetická kapalina MIDEL 7131 a minerální olej. Znamky výbojové činnosti jsou tvořeny uvnitř povrchové vrstvy materiálu v plynových bublinkách, které se vyskytují vlivem její impregnace. Obecně je rozhraní pevná látka – kapalina (papír - olej) považována za slabé místo izolačního systému. Z tohoto hlediska je na tento systém nutné dbát zvláštní pozornosti. Existují dva typy povrchových jevů na tomto rozhraní. Jedná se o působení střídavého napětí, které může způsobit dlouhodobé poškození vlivem povrchových erozí. Druhým jevem je

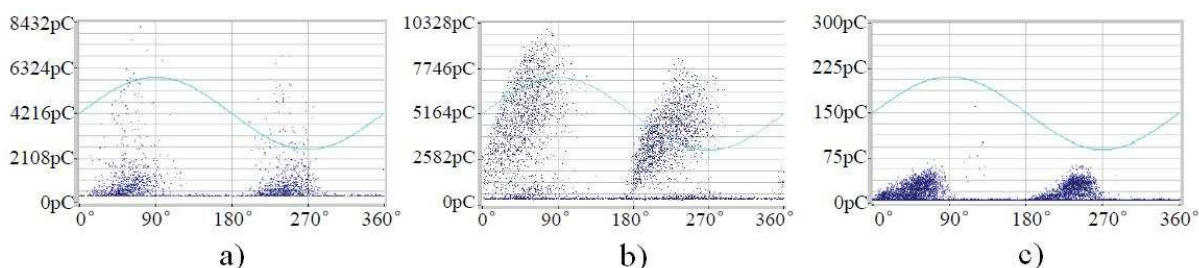
přepětí způsobené bleskem, které vytvoří přeskok na rozhraní a dojde k okamžitému selhání systému. Proti tomuto jevu jsou transformátory chráněny svodiči přepětí. [22]

Na (obr. 6) je zobrazen příklad růstu výboje na povrchu lepenky, v izolační kapalině MIDEL 7131, která byla vysušena po určitou dobu, aby vlhkost dosahovala maximální hodnoty 0, 5%. Přiložené střídavé napětí po určitou dobu vykazuje viditelný nárůst výboje kolem hrotu jehly.



Obr. 6: Příklad výboje na povrchu lepenky v izolační kapalině MIDEL 7131, převzato z [22]

Na základě experimentální studie povrchového procesu lepenky se udává, že kapalinou impregnovaný povrch je náchylný k erozi, během výboje v blízkosti povrchu lepenky, kde se vytváří plynové kanálky a může dojít až k přeskoku. K intenzivnímu výboji dochází u esterů snadněji vlivem vyššího tvoření plynových kanálků a též se vyznačují vyšší viskozitou, než je tomu u minerálních olejů. Pozornost by proto měla být věnována esterům u velkých výkonových transformátorů. Vzhledem k dobré biologické odbouratelnosti a vysoké tepelné odolnosti jsou syntetické a přírodní estery v široké míře použitelné pro distribuční transformátory. [22]



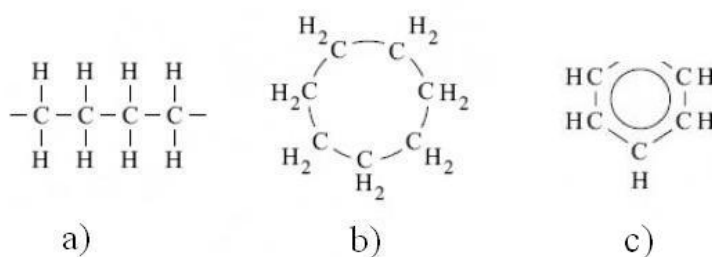
Obr. 7: Příklad rozložení částečných výbojů kolem hrotu jehly za dobu 60s v izolačním oleji MIDEL 7131, při 43kV; a) Vznik jiskrového výboje kolem špičky jehly; b) rozšiřující se výboj směrem k deskové elektrodě; c) konečná fáze přeskoku, převzato z [22]

2.2 Nejrozšířenější kapalně izolanty

V dnešní době, kdy se bezpečnost v napájecích zdrojích stává stále více důležitou součástí, je využití alternativních kapalin vyžadováno u většiny transformátorů. Významným hlediskem pro tyto kapaliny je zlepšení životnosti a spolehlivosti. S těmito kapalinami se ovšem váže málo zkušeností s provozem u transformátorů velkých výkonů, proto jsou prováděny testy a experimenty pro potvrzení využitelnosti těchto kapalin ve srovnání s běžně používanými kapalinami. V této kapitole jsou uvedeni právě tyto zástupci.

2.2.1 Minerální oleje

Tyto elektroizolační kapaliny jsou vyrobené destilací z ropy a jsou to směsi uhlovodíkových sloučenin, jmenovitě uhlíků a vodíků různých vazeb (obr. 8). Jsou tedy tvořeny řetězci atomů uhlíků C, na které jsou vázány atomy vodíku H. Podle použití, dělíme minerální oleje na transformátorové, kabelové a kondenzátorové, jenž se liší ve viskozitě. Transformátorový olej, jakožto izolant i chladicí médium disponuje malou viskozitou, naopak pro kabely by měla být viskozita co největší, aby impregnační kapalina při určitých podmínkách kabelu případně nestékala níže a nevytvářela tak nežádoucí plynové dutinky. Kondenzátorové oleje se používají pro kondenzátory s dielektrikem z impregnovaného papíru. [12, 13]



Obr. 8: Uhlovodíkové sloučeniny v minerálním oleji: a) parafinické, b) naftenické, c) aromatické [12]

2.2.2 Syntetické kapaliny

Vedle běžně se vyskytujících izolačních kapalin na bázi minerálních olejů, jsou také k dispozici syntetické kapaliny. V posledních letech byl výzkum zaměřen právě na vytvoření těchto kapalin, aby se vyrovnali svými vlastnostmi již zmíněným minerálním olejům. Na začátku se potýkaly s problémy, jako např. vznik toxických látek, špatná biologická odbouratelnost. Další nespornou nevýhodou je jejich vysoká cena. Postupem času docházelo k jejich zlepšení a v současnosti se vyrábí tyto kapaliny na kvalitativní úrovni minerálních

olejů a jsou dobře biologicky odbouratelné.

Syntetické kapaliny jsou rozděleny dle výroby na polybutyleny, alkyl – benzeny, chlorované uhlovodíky, silikonové oleje a organické estery [14], kde základem jsou produkty z chemických reakcí. Vybrané vlastnosti polybutylenu jsou uvedeny v (tab. 1). Vyznačují se nízkým bodem tuhnutí, vysokou hodnotou viskozity a dobrou stabilitou při vyšších teplotách.

Tab. 1: Vybrané vlastnosti polybutylenu [14]

Parametr	Jednotka	Hodnota dle IEC
Průrazné napětí	kV	40
Rezistivita	$\Omega \cdot m$	$1,5 \cdot 10^{12}$
Oxidační stabilita	mg KOH/g	$\leq 0,03$
Obsah vody	ppm	-

Alkyl – benzeny jsou složeny z látek, které mají řetězce až 25 atomů uhlíku. V přítomnosti kyslíku jsou nestabilní, proto nejsou vhodné pro použití v transformátorech, na druhé straně nereagují s mědí, takže se používají při plnění kabelů buď samostatně, nebo ve směsi s minerálním olejem. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v (tab. 2).

Tab. 2: Vybrané vlastnosti Alkyl – benzenů [14]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Průrazné napětí	kV	>60
Rezistivita	$\Omega \cdot m$	10^{12}
Ztrátový činitel při 90°C	-	0,0004
Relativní permitivita	-	2,15 – 2,5

Do skupiny chlorovaných uhlovodíků patří chlorované benzeny a difenyly, jež produkují sloučeniny zvané askarely nebo také PCB. [14] Vyznačují se svými dobrými elektroizolačními vlastnostmi a vysokým bodem hoření. Navzdory tomu byly pro svou špatnou biologickou odbouratelnost a ekologickou závadnost zakázány po celém světě. Silikonové oleje se vyznačují dobrými elektroizolačními vlastnostmi, jsou teplotně stálé a ekologicky nezávadné. Jejich chemická struktura je reprezentována křemičitými sloučeninami s organickými strukturami postraních řetězců. V (tab. 3) je porovnání důležitých vlastností běžně používaných minerálních a silikonových olejů. Organické estery vykazují vysoký bod vzplanutí a větší viskozitu než minerální oleje. Nejčastěji jsou používány v kondenzátorech a v současnosti se používají také v transformátorech, viz MIDELE 7131

(syntetická kapalina na bázi organických esterů). [14, 15] V (tab. 4) jsou uvedeny některé parametry tohoto oleje.

Tab. 3: Vlastnosti běžně používaných izolačních olejů [14]

Parametr	Jednotka	Minerální olej	Silikonový olej
Rezistivita	$\Omega \cdot m$	$10^{11} - 10^{13}$	10^{13}
Teplotní stabilita	$^{\circ}C$	90	150
Bod vzplanutí	$^{\circ}C$	145	>300
Bod tuhnutí	$^{\circ}C$	-40	-55
Obsah vody	ppm	25	50
Oxidační stabilita	mg KOH/g	<0,03	-
Průrazné napětí	kV	28	10
Ztrátový činitel (tg δ), při 25 $^{\circ}C$	-	0,001	0,0002

Tab. 4: Parametry izolačního oleje MIDEL 7131 podle výrobce [23]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Viskozita při 40 $^{\circ}C$	mm ² /s	28
Viskozita při -20 $^{\circ}C$	mm ² /s	1400
Bod vzplanutí	$^{\circ}C$	260
Bod tuhnutí	$^{\circ}C$	-60
Obsah vody	mg/kg	50
Oxidační stabilita	mg KOH/g	0,01
Průrazné napětí	kV	>75
Ztrátový činitel (tg δ), při 90 $^{\circ}C$, 50Hz	-	<0,008

2.2.3 Rostlinné oleje

Další alternativou z řad olejů vedle zmíněných minerálních a syntetických olejů jsou rostlinné oleje. Tyto oleje jsou z chemického hlediska směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin a rozdělují se na *vysýchavé* a *nevysýchavé*. Jsou získávány lisováním semen olejnatých rostlin nebo ze semen olejnatých dřevin, poté následuje rafinace, kde se jedná o technologický proces, při němž se olej čistí od určitých nežádoucích složek, které mohou

snižovat izolační vlastnosti. Hlavními výhodami oproti minerálním olejům je jejich šetrnost k životnímu prostředí, vysoký bod vzplanutí a také dobré elektrické vlastnosti. Jejich nevýhodami jsou pak, nestabilita v oxidaci a vážou na sebe velké množství vody.

Vysýchavé oleje vznikají na základě jejich styku se vzduchem a za působení tepla a světla dochází k chemické reakci, kde látka přechází do tuhého stavu vytvrdnutí a na jejich vrstvě se vytváří tenká lesklá vrstva, která má dobré elektroizolační vlastnosti. Nejčastěji používanými oleji v této kategorii je lněný olej, který se získá lisováním semen lnu a dřevný olej, získávaný lisováním semen tungového stromu, proto je také nazýván olej tungový. Rozdíl mezi těmito druhy je rychlost schnutí a větší odolnost vůči vlhkosti dřevného oleje oproti lněnému. Nevýhodou je pak jeho tepelné stárnutí, při kterém popraskává a tím odpadá od povrchu. Použití vysýchavých olejů je především ve výrobě elektroizolačních laků. [10]

Nevysýchavé oleje, jmenovitě olej ricinový, který je získáván z lisovaných semen skočce, je používán pro napouštění papírových kondenzátorů, zejména pak pro stejnosměrné obvody. Při studiích parametrů tohoto oleje bylo zjištěno, že pokud je olej vhodně upraven, je možno ho využít v transformátorech jako elektroizolační a chladicí médium. Hodnoty, jež byly naměřeny, jsou v rámci norem stanovených požadavků. Dalším zástupcem je olej řepkový, který je používán v transformátorech. [10, 17]

2.3 Parametry kapalných izolačních kapalin

V následující kapitole jsou popsány nejdůležitější parametry izolačních kapalin, na něž je potřeba brát ohled při aplikaci kapalin v elektrickém zařízení. Jejich kvalita je posuzována podle stanovených norem, dle kterých by měl olej splňovat i jednotlivé parametry v přípustných hodnotách. Tyto vlastnosti rozdělujeme do tří základních skupin na elektrické, fyzikální a chemické. [1]

2.3.1 Elektrické vlastnosti

Mezi nejdůležitější a nejčastěji stanovované elektrické vlastnosti patří elektrická pevnost, vnitřní rezistivita a ztrátový činitel. V následujících odstavcích jsou popsány více.

2.3.1.1 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je stanovena jako poměr průrazného napětí U_p ke vzdálenosti elektrod d , podle vztahu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (2)$$

kde E_p je elektrická pevnost [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$],
 U_p je průrazné napětí [kV],
 d je vzdálenost elektrod [mm].

Jedná se o nejčastěji stanovovaný parametr při aplikaci izolačních kapalin. Průrazné napětí se označuje jako nejmenší napětí, při kterém vznikne přeskok mezi elektrodami. Podle hodnoty elektrické pevnosti se určí, zda olej obsahuje nečistoty a plyny. Pro měření průrazného napětí kapalných izolantů se používají elektrody, které jsou od sebe pevně vzdáleny 2,5 mm. Na (obr. 9) je znázorněn měřicí přístroj elektrické pevnosti. [1]



Obr. 9: Měřicí přístroj Oil Tester DPA 75C, převzato z [19]

2.3.1.2 Vnitřní rezistivita

Elektrická vodivost (převrácená hodnota vnitřní rezistivity), která je způsobena vlhkostí a různými cizími složkami, je tedy závislá na vlhkosti, obsahu nečistot a také na teplotě (s rostoucí teplotou dochází ke snížení rezistivity a zvětšení elektrické vodivosti) a velikosti měřicího napětí. Pro určení materiálu z hlediska jeho elektrické vodivosti využíváme rezistivitu ρ (měrný elektrický odpor) a konduktivitu γ (měrná elektrická vodivost). Vzájemný vztah těchto veličin je [1]:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad (3)$$

kde ρ je rezistivita [$\Omega \cdot \text{m}$],
 γ je konduktivita [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$].

Dle měření vnitřní rezistivity získáme hodnoty o stavu oleje, z hlediska obsahu vody a cizí složky v něm. Pro výpočet vnitřní rezistivity existuje vztah [1]:

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

kde ρ_v je vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot m$],
 C_0 je kapacita prázdné měřicí nádoby [F],
 R_v je naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu [Ω],
 ε_0 je permitivita vakua $8,8 \cdot 10^{-12}$ [$F \cdot m^{-1}$].

2.3.1.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel značíme jako $\tan \delta$ a jedná se o dielektrické ztráty úměrné příkonu, které se přemění na teplo působením střídavého elektrického pole. Ohřátí dielektrika způsobí snížení rezistivity, narůstá vodivost a to se projeví zvýšením procházejícího proudu. Tento proud se projeví v ohřátí izolace a se vzrůstající teplotou se značně zrychluje stárnutí izolace s možností poškození. Čisté izolační oleje, které neobsahují nečistoty a příměsi polárního charakteru, se projeví u dielektrických ztrát, které jsou dány pouze vodivostí dielektrika. Jestliže je vodivost malá, tak i ztrátový činitel je malý. Ztrátový činitel závisí na teplotě, jež je rostoucí s kladnou druhou derivací. Zestárlé izolační oleje obsahující nečistoty či polární a iontové složky, u nich jsou dielektrické ztráty dány vodivostními a polarizačními ztrátami, jsou tedy vyšší než čisté oleje. Z tohoto hlediska pak ztrátový činitel závisí na teplotě a frekvenci, kde vlivem určitých polarizačních ztrát dosahuje ztrátový činitel lokálního maxima. Ztrátový činitel nám udává informaci o možném ohřevu oleje. [1]

2.3.2 Fyzikální vlastnosti

Mezi tyto vlastnosti řadíme především hustotu, viskozitu, bod vzplanutí, bod tuhnutí a barvu kapalných izolačních kapalin. V následujících odstavcích jsou více popsány.

2.3.2.1 Viskozita

Viskozita udává tekutost kapalin a patří mezi důležité vlastnosti izolačních olejů. Tato veličina charakterizuje vnitřní tření a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi. Čím jsou přitažlivé síly větší, tím je i viskozita větší (hustější olej). Jestliže jsou síly menší, následně viskozita je také menší, to znamená tekutější. Například u transformátorů vyžadujeme, aby kapalina byla tekutá, tedy měla nižší viskozitu, z hlediska dobrého proudění izolačního média

a dobrého chlazení. [1]

2.3.2.2 Bod vzplanutí

Bod vzplanutí se udává z hlediska požární bezpečnosti a jedná se o nejmenší teplotu, při které se vytvoří určitá směs par se vzduchem, která se po přiložení plamínku vznítí a následně zhasne. Pokud by nedošlo k uhašení, nejedná se o bod vzplanutí, ale o bod hoření, při kterém páry nad zkoušeným olejem hoří neustále. K měření bodu vzplanutí oleje je použit Pensky - Martensův přístroj. [1]

2.3.2.3 Bod tuhnutí

Dalším důležitým parametrem je bod tuhnutí, na který se bere ohled, zejména při nízkých teplotách, kde dochází ke zvětšení viskozity a snižuje se schopnost chlazení u transformátorů. To je důležité především u spouštění transformátorů při obzvláště nízkých teplotách, kde při zhoršení chladicího systému může dojít k jeho přehřátí. Jedná se tedy o teplotu, při které dochází k přechodu do pevného skupenství. [1]

2.3.2.4 Barva kapalných izolantů

Podle tohoto parametru lze na první pohled při odběru vzorku ze stroje orientačně posoudit stav kapalného izolantu. Jedná se o vyjádření jakosti izolační kapaliny a přítomnosti cizích částic. Tato hodnota se stanovuje a porovnává se vzorky barevných standardů a výsledek je vyjádřen číslem nebo číslem a písmenem. Čím mají izolanty větší jakost, tím je jejich barva světlejší. Naopak při provozu, kdy dochází ke stárnutí olejů, jsou tmavější. [1]

2.3.3 Chemické vlastnosti

Mezi nejčastější vlastnosti této oblasti patří obsah vody v oleji, číslo kyselosti a oxidační stabilita kapalin.

2.3.3.1 Obsah vody v oleji

Množství a přítomnost vody negativně ovlivňuje jejich parametry, především pak elektrickou pevnost izolačního oleje. Do kapaliny se dostane zejména z ovzduší nebo vzniká jako produkt jeho stárnutí a vyskytuje se v podobě rozpuštěné, emulgované a volné.

2.3.3.2 Číslo kyselosti

V případě stárnutí oleje se zvyšuje počet kyselých látek a podle čísla kyselosti můžeme určit stupeň zestárnutí oleje. Číslo kyselosti nám udává množství KOH (hydroxidu draselného), které je potřeba k neutralizaci kyselých reaktivních látek v jednom gramu oleje. U nových kapalných izolantů lze zjištěním čísla kyselosti určit stupeň jejich rafinace. Při jejím nedokonalém provedení se vyskytují naftenové kyseliny, kyselina sírová a podobné kyselé látky, jejichž podíl se zvyšuje při stárnutí oleje. [1]

Norma ČSN EN 62021-1 (Izolační kapaliny- Stanovení čísla kyselosti) nám popisuje postup stanovení čísla kyselosti nepoužitých a použitých minerálních elektro-izolačních olejů metodou potenciometrické titrace. Tato metoda může být používána k indikaci relativních změn, které se vyskytují v minerálních izolačních olejích v průběhu používání za oxidačních podmínek, bez ohledu na barvu nebo další vlastnosti používaného minerálního oleje. Kyselost může být použita pro kontrolu kvality nepoužitého (nového) minerálního oleje. Jelikož různé oxidační produkty přítomné v použitých minerálních olejích přispívají k jejich kyselosti a tyto produkty se široce liší v korozivních vlastnostech, tato zkouška nemůže být použita k předpovídání korozivních účinků minerálního oleje v provozních podmínkách. Výsledné hodnoty čísla kyselosti oleje, zjištěné pomocí této metody, mohou nebo nemusí být stejné jako hodnoty čísla kyselosti, získané kolorimetrickými metodami, ale zpravidla se shodují. [20]

2.3.3.3 Oxidační stabilita

Oxidační stabilitu kapalných izolantů sledujeme z hlediska dlouhodobého provozního namáhání a pro možnost porovnání oxidační stálosti různých izolačních olejů. Při měření tohoto parametru namáháme olej zvýšenými degračními parametry, které urychlují stárnutí. Mezi ně zařazujeme zvýšení teploty, výskyt kyslíku nebo vzduchu a přítomnost některých kovů. Následně se hodnotí oxidační stabilita, na základě zhoršení jejich elektrických, fyzikálních a chemických vlastností.

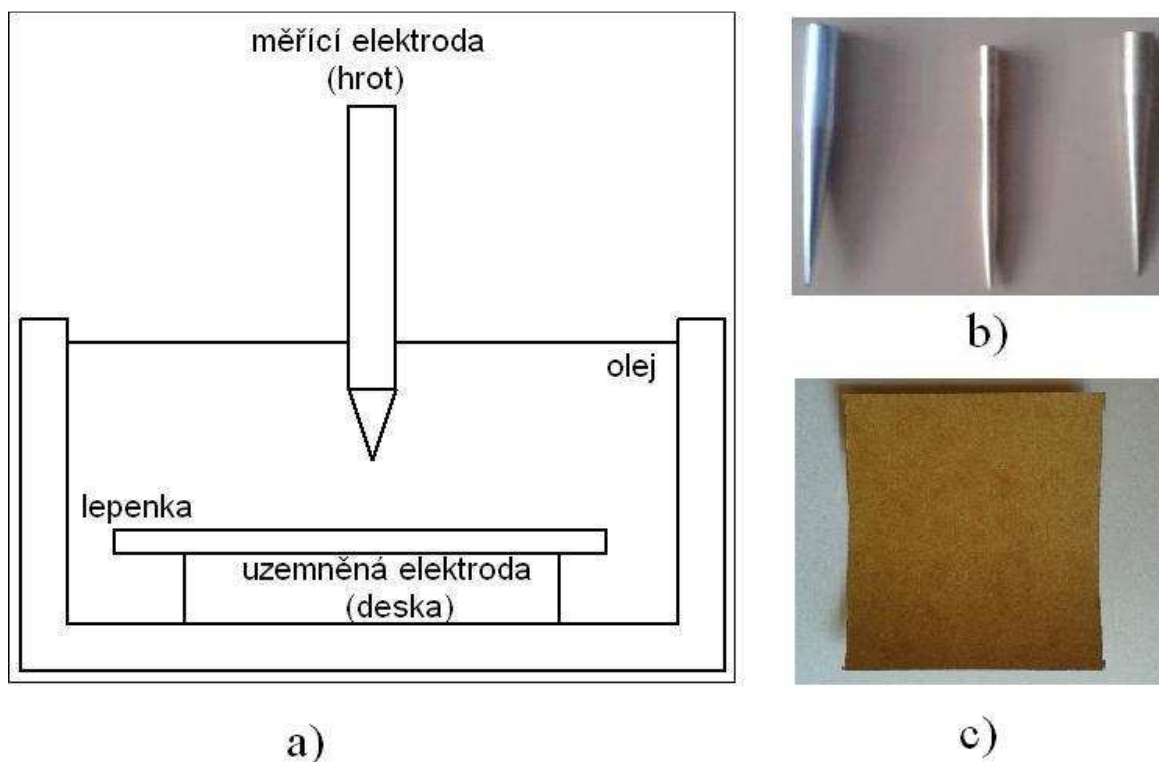
Oxidace udává reakci mezi kyslíkem ze vzduchu a molekulami dané izolační kapaliny, většinou se jedná o kyslík a uhlovodíky. Při oxidaci, jež je podporována teplotou, je kyslík v molekulách oleje a mění jeho vlastnosti. Jestliže je teplota kapaliny větší, tím se rychleji oxiduje. [1, 21]

3 Experimentální část

Na základě výše zmíněných informací byl proveden experiment, jehož cílem bylo studium výbojové činnosti v různých izolačních olejích s postupnou dobou stárnutí 148, 316 a 436 hodin při 110°C, 130°C a jejich vzájemným porovnáním. Vybrány byly dva izolační oleje, v prvním případě se jednal o minerální olej MOGUL TRAF0 CZ, který je využíván v elektrických strojích a přístrojích jako izolační a chladicí kapalina. V druhém případě pro porovnání byl využit olej rostlinný ŘEPKOVÝ, který má oproti minerálnímu horší viskozitu a ztrátový činitel [28]. Pro tento olej je důležité dobré vysušení, vzhledem k jeho navlhání (zhoršují se jeho parametry).

K samotnému měření byly použity vzorky lepenky o rozměrech 100 x 100 mm a tloušťce 0,5 mm (obr. 10c), které byly nejdříve vysušeny po dobu 90 hodin při teplotě 90°C, následně pak ponořeny do olejů k impregnaci při 45°C po dobu 72 hodin.

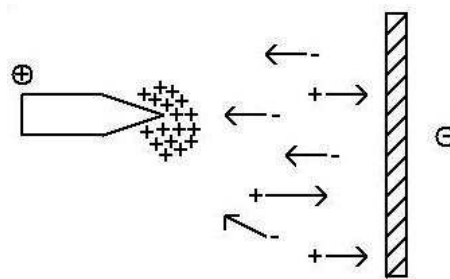
Pro měřicí vzorek bylo využito elektrodové uspořádání hrot – deska, který je znázorněn na (obr. 10a). Ocelové a mosazné jehly (hrot) s průměrem 67,5 μm; 57,5 μm a 731 μm (obr. 10b) jsou vzdáleny 10 mm od uzemněné elektrody (deska). V mezeře mezi hrotem a deskou je vložena lepenka, která simuluje izolační systém olej – papír.



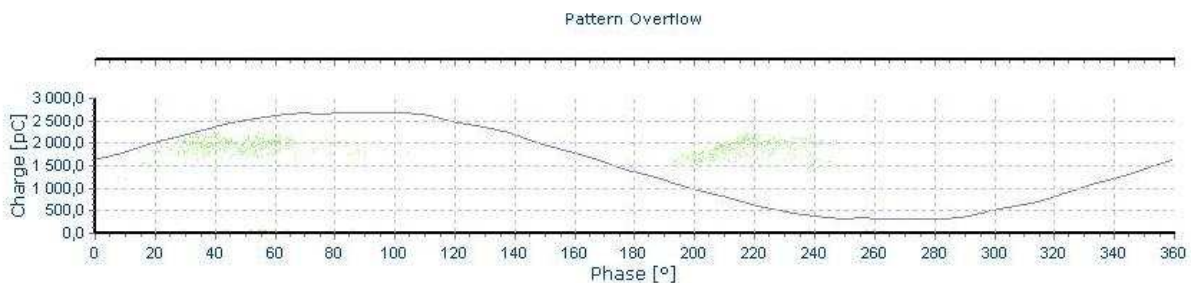
Obr. 10: a) Elektrodové uspořádání hrot – deska; b) Hroty s průměry 67, 5 μm; 731 μm a 57, 5 μm; c) použitý vzorek lepenky 100 x 100 mm

Elektrodové uspořádání hrot – deska je typickým příkladem vnější výbojové činnosti, kdy se výboje začínají projevovat kolem hrotu jehly se značným zakřivením a s vyššími hodnotami intenzity elektrického pole. Tyto výboje se nazývají *korónové výboje*.

Koróna se obecně vyskytuje v oblasti hran nebo značně zakřivených elektrod, zvyšujeme – li napětí mezi elektrodami a dosáhne – li intenzita elektrického pole dostatečných hodnot, pak se elektrody obalí slabě svítící vrstvou. [25] Při zvyšování přiloženého napětí vznikají v okolí hrotu volné elektrony a kladné ionty, které vytvářejí prostorový náboj (obr. 11). Na počáteční stav koróny má vliv především čistota povrchu elektrod. Pro rozpoznání o jaký druh výbojové činnosti se jedná, slouží fázové rozložení této činnosti. Pro problematiku vzniku výbojů v oleji je modelové rozložení hrot – deska zobrazeno na (obr. 12), kde se výboje objevují v obou půlvlnách s rozdílnou četností a velikostí. [25]

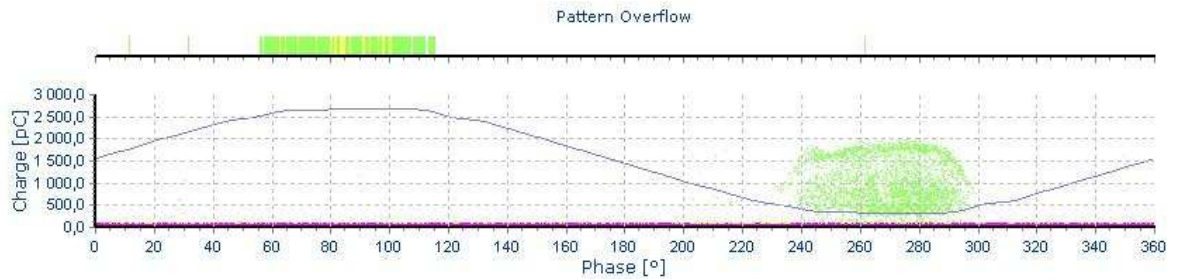


Obr. 11: Prostorový náboj v okolí hrotu [1]



Obr. 12: Fázové rozložení výbojové činnosti při uspořádání hrot – deska v oleji

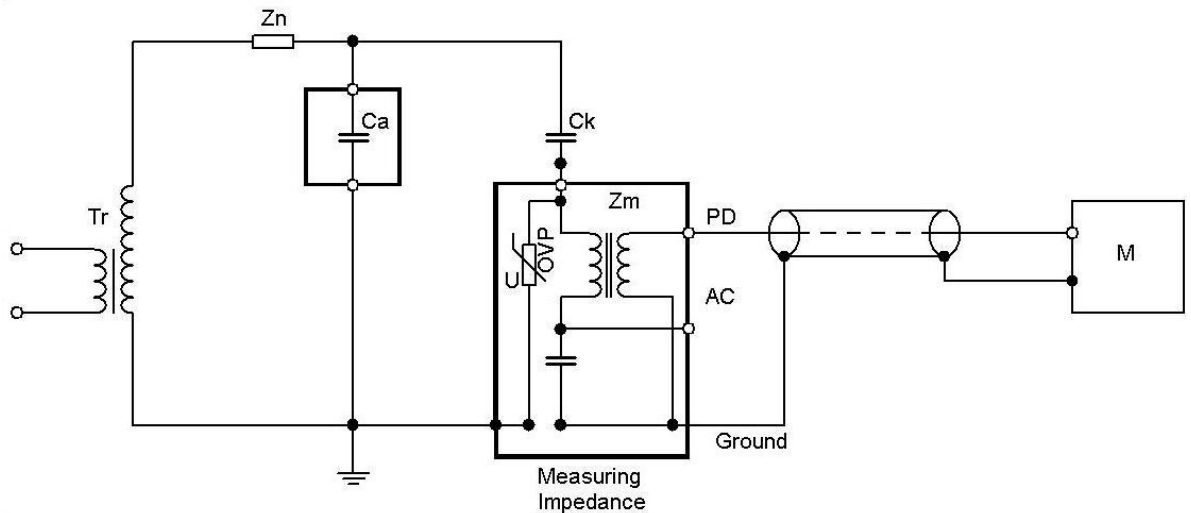
Na (obr. 13) je pro porovnání zobrazeno fázové rozložení výbojové činnosti hrot – deska na vzduchu při vzdálenosti elektrod 10 mm. Z něhož je patrné, že výboje se objevují pouze v jedné půlvlně v maximu amplitudy s rozdílnou četností a velikostí oproti rozložení v oleji.



Obr. 13: Fázové rozložení výbojové činnosti při uspořádání hrot - deska na vzduchu

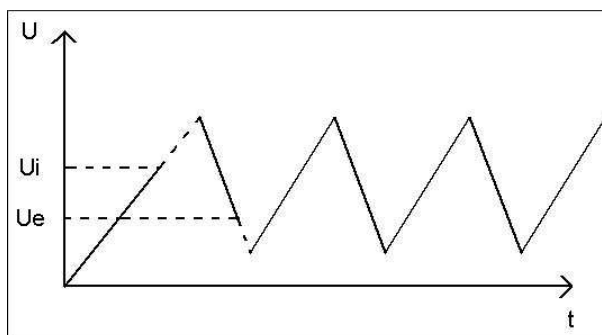
3.1 Měřicí systém

Kompletní měřicí systém je znázorněn na (obr. 14). Je sestaven ze zdroje vysokého napětí 15/200kV (T_r), ochranné impedance Z_n , měřící impedance Z_m , testovaného vzorku C_a , vazebního kondenzátoru C_k , spojovacího kabelu a detektoru částečných výbojů M .



Obr. 14: Měřicí systém výbojové činnosti [16]

Měření probíhalo pro každou elektrodu a pro každý olej jednotně, v tomto případě tedy tři elektrody a dva testované oleje. Pro každou elektrodu bylo změřeno 5 hodnot zapalovacího napětí U_i a zhášecího U_e bez lepenky a 5 hodnot s lepenkou mezi elektrodami. Průběh měření U_i a U_e je znázorněn na (obr. 15). Napětí, kdy je zaznamenána stabilní výbojová činnost v oleji, byla nastavena při překročení velikosti náboje 100 pC. Následně byla nastavena průměrná hodnota zapalovacího napětí a po dobu 1 minuty byly sledovány hodnoty náboje částečných výbojů Q_{iec} , četnost výskytu výbojů za 1 sekundu N a proudu I . Měření bylo provedeno i pro vyšší hodnotu napětí, které bylo nastavováno na 1,1 násobek U_i . Výsledná výbojová činnost je znázorněna v závislosti na fázi testovaného napětí.

Obr. 15: Průběh měření hodnot zapalovacího napětí U_i a zhášecího napětí U_e

3.2 Výsledky experimentu

3.2.1 Hodnoty pro 0 hodin stárnutí olejů

A) Minerální olej MOGUL TRAF0

První měření bylo sledováno na vzorcích v izolačním oleji MOGUL TRAF0.

U všech naměřených hodnot (tab. 7) s přiloženou lepenkou v elektrodevém systému je vidět mírně zvýšená hodnota zapalovacího napětí pro všechny tři různé poloměry, kde jsou rozdíly minimální. Je to s určitostí dáno zvýšením izolační bariéry o tloušťku lepenky 0,5 mm.

Při zvýšeném testovacím napětí na $1,1U_i$, což je uvedeno v (tab. 8) se výbojová činnost projevovala výrazně stabilněji a se zvýšenou hodnotou jak náboje Q_{iec} , tak i proudu I . V případě měření zapalovacího (U_i) a zhášecího napětí (U_e) částečných výbojů bylo naměřeno celkem 5 hodnot pro každou elektrodu.

Z hlediska vyhodnocení, kde se snažíme zjistit skutečnou hodnotu měřené veličiny, byla vypočtena střední hodnota zapalovacího a zhášecího napětí $U_{stř}$, jako aritmetický průměr, který je dán jako podíl, součtem všech naměřených hodnot a počet těchto hodnot. Následně byla vypočtena směrodatná odchylka σ a variační koeficient v .

Tab. 5: Hodnoty U_i a U_e pro minerální olej MOGUL TRAF0 bez lepenky

	bez lepenky					
	67,5 μm		57,5 μm		731 μm	
	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]
	9,8	9,7	9,85	9,7	9,6	9,5
	9,9	9,5	10	9,9	9,95	9,7
	9,9	9,3	10,1	9,8	9,9	9,5
	9,8	9,6	10,1	10	9,9	9,8
	9,9	9,6	10,2	9,9	9,95	9,5
$U_{stř}$ [kV]	9,86	9,54	10,05	9,86	9,86	9,60
σ	0,05	0,14	0,12	0,10	0,13	0,13
v [%]	0,50	1,42	1,18	1,03	1,34	1,32

Tab. 6: Vybrané hodnoty při U_i a $1,1U_i$ pro minerální olej MOGUL TRAF0 bez lepenky

U_i								
67,5 μm			57,5 μm			731 μm		
Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek
1	252	22000	0,7	255	22000	0,9	250	22000
$1,1 U_i$								
1,5	350	22000	1,6	330	22000	2	370	22000

Tab. 7: Hodnoty U_i a U_e pro minerální olej MOGUL TRAF0 s lepenkou

s lepenkou						
67,5 μm		57,5 μm		731 μm		
U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]	
10,1	9,9	10,2	9,6	10	9,7	
10,3	9,8	10,1	9,8	10,1	9,8	
10,2	10	10,1	9,8	10,2	9,8	
10,2	10	10,2	9,7	10,1	9,85	
10,2	10	10,1	9,7	9,9	9,75	
$U_{stř}$ [kV]	10,20	9,94	10,14	9,72	10,06	9,78
σ	0,06	0,08	0,05	0,07	0,10	0,05
v [%]	0,62	0,80	0,48	0,77	1,01	0,52

Tab. 8: Vybrané hodnoty při U_i a $1,1U_i$ pro minerální olej MOGUL TRAF0 s lepenkou

U_i								
67,5 μm			57,5 μm			731 μm		
Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek
1,1	253	22000	1,3	275	22000	1,7	255	22000
$1,1 U_i$								
1,4	320	22000	1,8	360	22000	1,95	400	22000

B) Rostlinný olej ŘEPKOVÝ

Pro druhé měření byl použit rostlinný olej ŘEPKOVÝ, který se vyznačuje jinými elektrotechnickými parametry než běžně využívaný minerální olej pro elektrotechnické účely. Z výsledných hodnot v (tab. 9, 11) je vidět patrný nárůst zapalovacího napětí U_i . Hodnota náboje Q_{iec} a proudu I byla také mírně zvýšená oproti minerálnímu oleji. Výbojová činnost při 1,1 násobku zapalovacího napětí U_i v (tab. 10, 12) byla opět stabilnější a vyšší. Je to především dáno právě zvýšeným napětím o daný násobek. Stabilnější činnost byla zaznamenána a je zobrazena na (obr. 16).

Tab. 9: Hodnoty U_i a U_e pro ŘEPKOVÝ olej bez lepenky

	bez lepenky					
	67,5 μm		57,5 μm		731 μm	
	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]
	10,5	10	10,2	9,9	10,8	10,3
	10,7	10,5	10,2	9,3	11,1	10,5
	10,8	10,4	10,3	9,8	11	10,6
	11,3	9,9	10	9,5	10,8	10,6
	10,8	10,1	10,2	9,2	10,8	10,6
$U_{\text{stř}}$ [kV]	10,82	10,18	10,18	9,54	10,90	10,52
σ	0,26	0,23	0,10	0,27	0,13	0,12
v [%]	2,44	2,27	0,96	2,86	1,16	1,11

Tab. 10: Vybrané hodnoty při U_i a $1,1U_i$ pro ŘEPKOVÝ olej bez lepenky

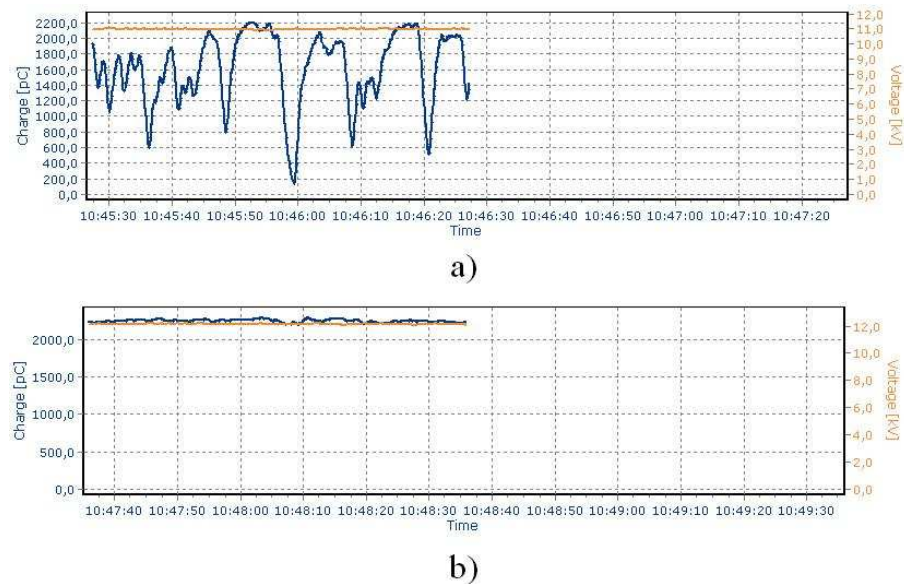
U_i								
67,5 μm			57,5 μm			731 μm		
Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek
1,55	350	22000	2	400	22000	1,8	350	22000
$1,1 U_i$								
2,3	450	22000	2	450	22000	2,2	460	22000

Tab. 11: Hodnoty U_i a U_e pro ŘEPKOVÝ olej s lepenkou

	s lepenkou					
	67,5 μm		57,5 μm		731 μm	
	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]	U_i [kV]	U_e [kV]
	10,3	10	10,4	9,3	11,5	10,1
	10,2	10	10,3	9,4	11,1	10,8
	10,4	10	10,3	9,6	11,2	10,6
	10,2	10,1	10,3	9,2	11,2	10,2
	10,6	10,2	10,3	9,7	11,2	10,7
$U_{\text{stř}}$ [kV]	10,34	10,06	10,32	9,44	11,24	10,48
σ	0,15	0,08	0,04	0,19	0,14	0,28
v [%]	1,45	0,80	0,39	1,96	1,21	2,66

Tab. 12: Vybrané hodnoty při U_i a $1,1U_i$ pro ŘEPKOVÝ OLEJ s lepenkou

U_i								
67,5 μm			57,5 μm			731 μm		
Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek	Q_{iec} [nC]	I [nA]	N/sek
1,8	320	22000	2,1	420	22000	2,2	450	22000
$1,1 U_i$								
2,1	440	22000	2,3	470	22000	2,3	475	22000



Obr. 16: Záznam výbojové činnosti řepkového oleje bez lepenky po dobu 1min. s hrotem 731 μm ; a) pro U_i ; b) pro $1,1 U_i$

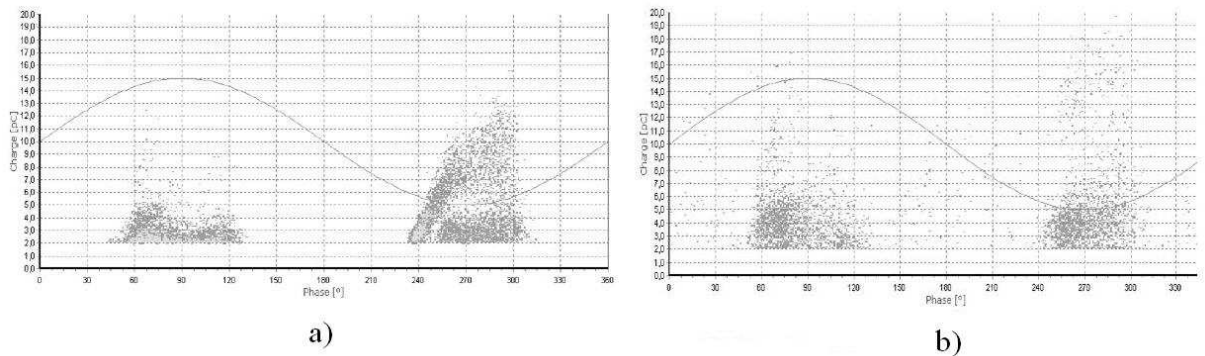
3.2.2 Hodnoty pro 148 hodin stárnutí olejů

Při tomto měření výbojové činnosti byly oleje nejprve vysušeny po dobu 148 hodin při teplotě 110°C. Z následného měření se ukázalo, že vzorky oleje pro experiment jsou absolutně zbaveny vlhkosti a částečné výboje tak nejsou zaznamenány PD detektorem. Při zvyšování napětí dochází až k následnému průrazu při hodnotě napětí 27 kV. Při dalším stárnutí olejů se začínají rozpadat výše zmíněné vazby atomů uhlíků C a vodíků H a výrazněji vedou ke zhoršení fyzikálních, elektrických nebo chemických vlastností, což se projeví ve zvýšené výbojové činnosti. Vlivů, které ovlivňují stárnutí je několik, jako jsou účinky kyslíku za působení tepla, účinky elektrických výbojů a elektrického pole nebo chemických látek kyselého povahy. Při oxidačním stárnutí vznikají kyslíkaté látky, jejichž molekuly jsou v oleji rozpustné a jako vedlejší produkty vznikají oxid uhličitý a voda. Tyto látky pak zvětšují viskozitu, dochází ke změně barvy a celkově zhoršují výše zmíněné vlastnosti. Dále se v oleji vyskytují tzv. kaly, jež jsou tvořeny pevnými částicemi, na které se vážou uhlovodíky. Tyto nečistoty mohou postupně ucpávat chladicí kanálky a tím znemožňují dobrý odvod tepla z povrchu vinutí, tím se zvyšuje teplota vodičů, až mohou úplně zabránit proudění oleje. [26]

3.2.3 Hodnoty pro 316 a 436 hodin stárnutí

Částečné výboje byly měřeny ve stejném uspořádání po 316 a 436 hodinách stárnutí oleje při teplotách 110°C a 130°C, umístěné ve skleněných nádobách. Při těchto hodnotách opět nebyla zaznamenána stabilní výbojová činnost a oleje se jevily jako vysušené.

Ze studie, která byla provedena v [29] vyplývá, že se výboje objevují a mění svojí hodnotu po tepelném stárnutí 3000 hodin. Pro experiment byly také použity skupiny olejů na ropné bázi např. (DIALA) a rostlinné bázi (ŘEPKOVÝ) a bylo prokázáno, že hodnoty Q_{iec} se snižují s jejich dobou stárnutí. Příklad zobrazení činnosti a rozdíly ve velikosti nábojů jsou na (obr. 17). [29]

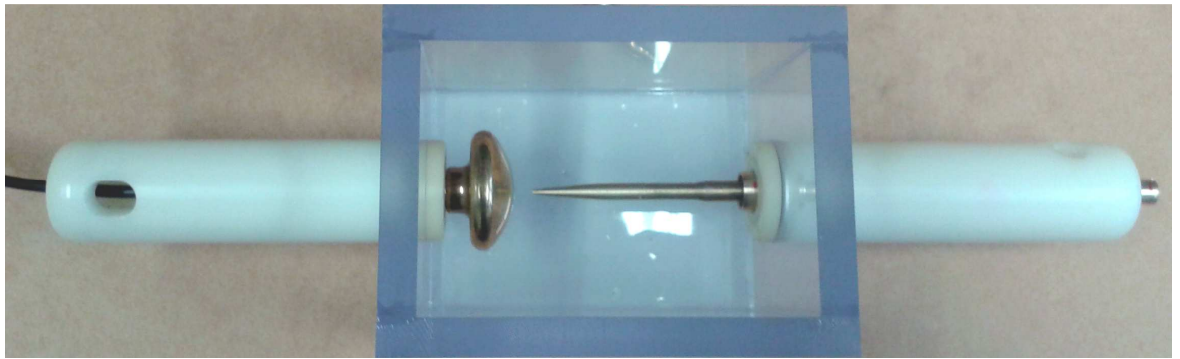


Obr. 17: Fázové rozložení výbojové činnosti minerálního oleje DIALA a) při 0h stárnutí; b) po 3000h stárnutí; převzato z [29]

Z naměřených hodnot byly zjištěny hodnoty náboje Q_{iec} při zapalovacím napětí 12,33 kV. Pro čistý minerální olej DIALA (0h stárnutí) je hodnota 8,9 pC a pro zestárlý (3000h stárnutí) je 3,4 pC, což je výrazně snížená hodnota při stejném napětí a největší rozdíl mezi hodnotami. Vznik výbojů u ŘEPKOVÉHO oleje je při 12 kV a hodnota náboje 8,9 pC (0h stárnutí), po tepelném stárnutí (3000h) klesne hodnota náboje na 6,7 pC, při napětí 10,1 kV. [29]

3.2.4 Uspořádání hrot – deska se zaoblenou elektrodou

Pro toto měření a ověření výbojové činnosti byl vytvořen nový vzorek se stejným uspořádáním elektrod jako v prvním případě, s rozdílnou elektrodou (deska), která byla zaoblená. Měření bylo nastaveno znovu pro minerální olej MOGUL TRAF0 a ŘEPKOVÝ olej, nejprve bez lepenky a poté s lepenkou, kde byl použit čistý nestárnutý olej s určitou vlhkostí a poté byl použit již zestárlý olej s předchozích zkoušek. Hodnota vzdálenosti obou elektrod byla nastavena na 5 mm. Na (obr. 18) je grafické znázornění tohoto případu.



Obr. 18: Nový vzorek uspořádání se zaoblenou elektrodou (deska)

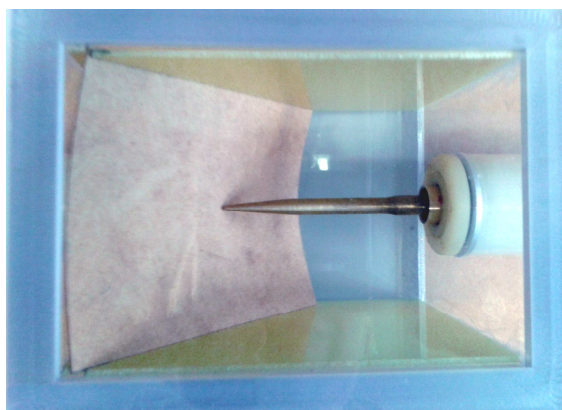
- Čistý nestárnutý minerální olej MOGUL TRAFO

Zjištěné hodnoty výbojové činnosti pro tento olej *bez lepenky* jsou znázorněny na (obr. 19), kde je vidět jejich zvýšená hodnota s velikostí náboje $Q_{iec}=850\text{pC}$ při zapalovacím napětí 25kV, oproti případu s lepenkou.



Obr. 19: Výbojová činnost pro čistý minerální olej MOGUL TRAFO s lepenkou

Pro vzorek *s lepenkou* byl vytvořen vzorek podle (obr. 20), kde lepenka tvoří elektrickou bariéru a výbojová činnost se projevuje a šíří na jejím povrchu, tzv. plazivými výboji. Z hlediska toho dosahují hodnoty výbojů menších hodnot než bez lepenky, kde se výboj šíří nečistotami v oleji. Při tomto měření tohoto oleje dosahovaly hodnoty zapalovacího napětí 25 kV, jež výbojová činnost (obr. 21) se jevila stabilní s hodnotami kolem $Q_{iec}=650\text{pC}$ a počtem pulsů 200/s.



Obr. 20: Vzorek uspořádání hrot - deska pro případ s lepenkou



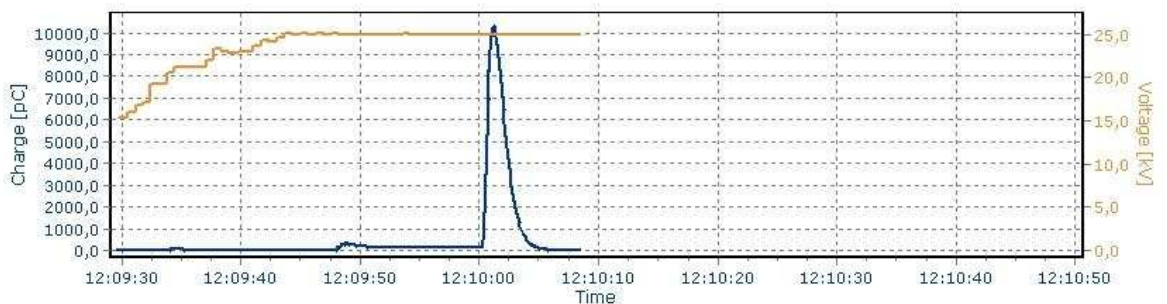
Obr. 21: Výbojová činnost pro čistý minerální olej MOGUL TRAF0 s lepenkou

- *Zestárlý minerální olej MOGUL TRAF0*

Pro tento bod měření bylo použito stejné uspořádání hrot – deska a výbojová činnost se zde měřila v zestárlém oleji po 436 hodinách při teplotě 110°C a 130°C. Výbojová činnost při pokusu *bez lepenky* se zde projevovovala minimálně po dobu 10s (obr. 22) při zapalovacím napětí 25 kV a hodnotami náboje $Q_{iec}=105\text{pC}$, kde následně došlo k elektrickému průrazu, který je znázorněn na (obr. 23). Z toho hlediska se pokusy v této práci přestaly dělat. Tento jev je pravděpodobně dán určitými nečistotami, které byly v oleji obsaženy, a po nich se výboj šířil vodivou cestou.



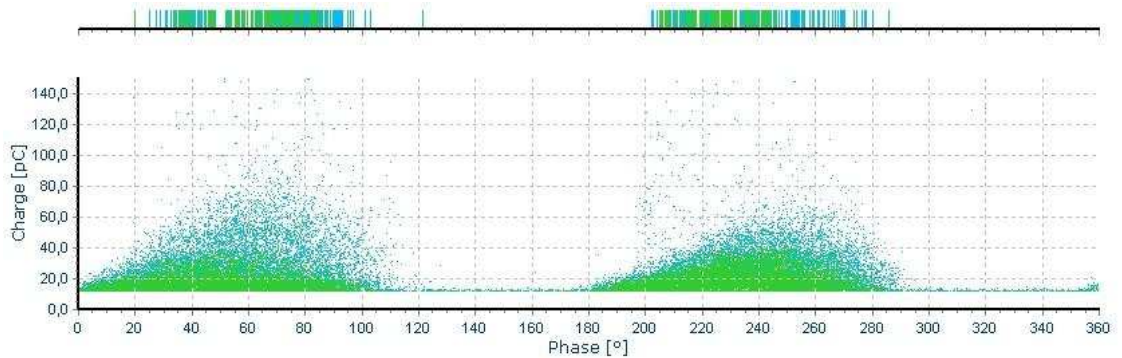
Obr. 22: Výbojová činnost před průrazem napětí



Obr. 23: Výbojová činnost po průrazu napětí

Pokus *s lepenkou* v tom samém uspořádání byl vystaven namáhání po dobu 5 minut, kde se projevovovala konstantní výbojová činnost, která je zobrazena na (obr. 24). Použitím

lepenky mezi elektrodami nedochází k brzkému elektrickému průrazu a výboje se zde mohou šířit po ní. Tím jak se lepenka luhuje v oleji a stárne, se částičky lepenky uvolňují a výbojová činnost se šíří po nich. Z tohoto hlediska se na lepence vytváří vodivý kanálek, po který se výboje zvětšují a po částech si „hledají“ cestu až k případnému průrazu.



Obr. 24: Fázové rozložení výbojové činnosti pro stárnutý olej MOGUL TRAF0 s lepenkou

3.3 Koróna ve vzduchu

Na základě studií bylo experimentálně zjištěno počáteční napětí koróny při uspořádání elektrod hrot – deska dle [25], kde je tento případ řešen v prostředí vzduchu. Ze známé intenzity E_m , vzdálenosti elektrod a , poloměru hrotu r a hustoty vzduchu δ , lze dostat vztah, kde platí:

$$U_0 = \delta \cdot \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot 2r \cdot \ln \cdot \frac{a}{r} \quad (5)$$

kde U_0 je počáteční napětí koróny [kV],
 E_m je intenzita elektrického pole [$\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$],
 r je poloměr hrotu [μm],
 a je vzdálenost elektrod [mm],
 δ je hustota vzduchu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$].

Maximální intenzita elektrického pole je u povrchu každé elektrody a její velikost je dána vztahem:

$$E_m = U \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^{-2} - 1}}{(a - 2r) \ln \left[\frac{a}{2r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^{-2} - 1} \right]} \quad (6)$$

kde U je zapalovací napětí [kV],
 E_m je intenzita elektrického pole [$\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$],
 r je poloměr hrotu [μm],
 a je vzdálenost elektrod [mm].

3.3.1 Ověření výpočtem pro případ koróny ve vzduchu

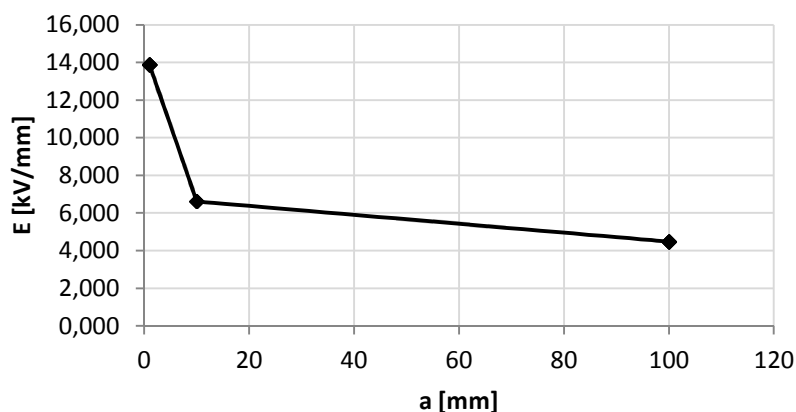
V následujících tabulkách (tab. 13, 14) a grafickém znázornění závislostí je uvedeno ověření výpočtu pro počáteční napětí koróny ve vzduchu při uspořádání hrot – deska ve vzduchu podle výše uvedených vzorců a dle záznamu výbojové činnosti na (obr. 25). Výbojová činnost se zde projevuje při zapalovacím napětí 4,4kV a hodnoty nábojů kolem 6,3 nC, přibližně třikrát více než pro hodnoty v izolačním oleji. Zjištěné naměřené a vypočítané hodnoty dle (5, 6) odpovídají experimentálním předpokladům podle [25].



Obr. 25: Záznam výbojové činnosti při uspořádání hrot - deska ve vzduchu po dobu 1 min

Tab. 13: Hodnoty pro ověření činnosti při uspořádání hrot – deska ve vzduchu při rozdílné vzdálenosti elektrod

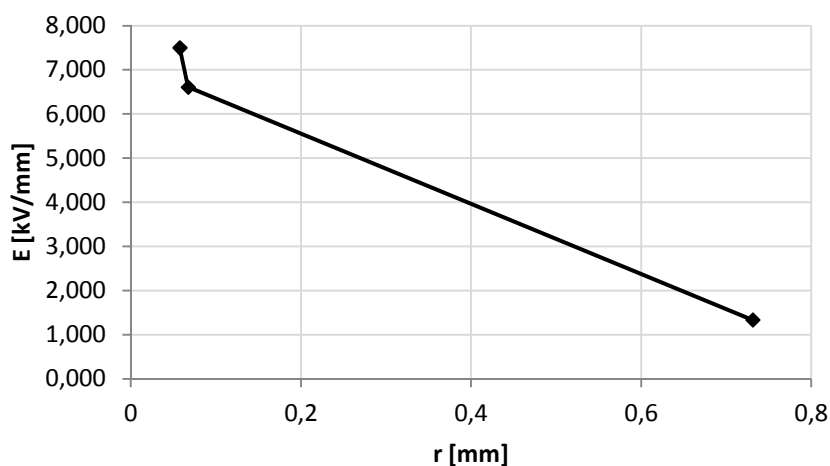
hustota vzduchu při 20°C	vzdálenost elektrod	poloměr hrotu μm	poloměr hrotu 67,5 μm	zapalovací napětí	intenzita elektrického pole	počáteční napětí koróny
δ [kg/m ³]	a [mm]	$2r$ [mm]	r [mm]	U [kV]	E [kV/mm]	U_0 [kV]
1,2047	1	0,135	0,0675	4,4	13,874	4,301
1,2047	10	0,135	0,0675	4,4	6,610	3,799
1,2047	100	0,135	0,0675	4,4	4,470	3,753



Obr. 26: Závislost intenzity elektrického pole E na vzdálenosti elektrod a, při zapalovacího napětí U_i (hrot 67,5 μm)

Tab. 14: Hodnoty pro ověření činnosti při uspořádání hrot – deska ve vzduchu při rozdílném poloměru hrotu

hustota vzduchu při 20°C	vzdálenost elektrod	poloměr hrotu μm	poloměr hrotu	zapalovací napětí	intenzita elektrického pole	počáteční napětí koróny
δ [kg/m ³]	a [mm]	2r [mm]	r [mm]	U [kV]	E [kV/mm]	U_0 [kV]
1,2047	10	0,115	0,0575	4,4	7,503	3,792
1,2047	10	0,135	0,0675	4,4	6,610	3,799
1,2047	10	1,462	0,731	4,4	1,336	4,352



Obr. 27: Závislost intenzity E na poloměru elektrody r, při zapalovacím napětí U_i a vzdálenosti elektrod 10mm

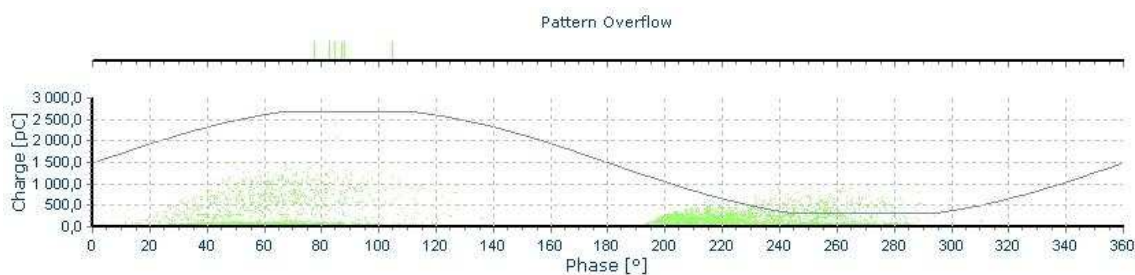
3.4 Porovnání výbojové činnosti vzduch – olej

Z hlediska obecného porovnání výbojové činnosti ve vzduchu a v oleji existují výrazné rozdíly, především pak v šíření výboje a výsledných naměřených hodnot.

Šíření výboje ve vzduchu při uspořádání hrot – deska, známé jako koróna je popsáno výše. Kde při zvyšování napětí a určité vzdálenosti mezi elektrodami se v okolí jejího hrotu vyskytuje dostatečná intenzita, která je potřebná pro vznik samostatného výboje. Koróna se začíná projevovat akusticky poměrným sršením a světélkujícím projevem. Po dalším zvyšování napětí se tyto jevy zvyšují společně s proudem a výboj přechází do další fáze trsový a jiskrový, který se dělí na fáze laviny, strimeru a lideru. [1, 25]

V izolačních kapalinách je toto šíření rozdílné, a hlavní roli zde hrají především nečistoty vyskytující se v něm. Tyto nečistoty následně vytváří vodivou cestu, po které se výboj šíří, tvoří se vodivý kanálek, až dojde k průrazu.

Z hlediska grafického zobrazení je rozdíl ve výskytu fázového rozložení. Korónové výboje v oleji se objevují v obou půlvlnách napětí (obr. 28), což se liší od koróny ve vzduchu.



Obr. 28: Fázové rozložení výbojové činnosti v oleji

Po určité době stárnutí olejů dochází k rozdílu hodnot vlivem změny struktury kapaliny, z hlediska jejich viskozity, barvy a elektrických vlastností. Stabilita výbojové činnosti je výrazně vyšší při zvětšené hodnotě zapalovacího napětí o 1,1 násobek než v jeho blízkosti, viz (obr. 16). Hodnota nábojů Q_{iec} se s časem stárnutí olejů snižuje, což se projevilo při měření v novém uspořádání vzorků. Hodnoty v klasickém uspořádání se změřit nepovedlo, vzhledem k nízké době stárnutí. Naměřené hodnoty podle experimentu [29], jsou ukázány v (tab. 15).

Tab. 15: Naměřené hodnoty náboje při 0h a 3000h stárnutí, převzato z [29]

Typ oleje	Q_{iec} [pC]	
	0h stárnutí	3000h stárnutí
Minerální olej DIALA	8,9	3,4
Minerální olej Y3000	7,4	5,8
Řepkový olej	8,6	6,7

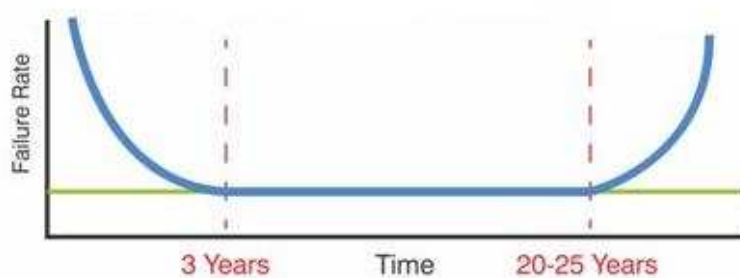
Při teoretickém ověření koróny ve vzduchu, byly zjištěny klesající hodnoty počátečního napětí v závislosti na poloměru elektrod (hrotu), kdy pro nejostřejší poloměr odpovídá nejmenší počáteční napětí koróny při stejné vzdálenosti elektrod. Stejná závislost byla zjištěna i pro vzdálenost elektrod, kde se zvětšující se vzdáleností počáteční napětí má klesající tendenci.

4 Příklady použití a vyhodnocení částečných výbojů

Vlivem částečných výbojů a jejich působením se snižují izolační vlastnosti elektrických zařízení, z tohoto hlediska je nutné dbát pozornost na jejich analýzu a lokalizaci v počátečním stádiu vzniku. Pro tyto účely existují přístroje mnoha výrobců umožňující detekci výbojové činnosti. V této části jsou ukázány některé příklady použití a vyhodnocení lokalizace částečných výbojů v zařízeních s kapalnou izolační složkou.

V dnešní době se vzhledem k několika výhodám praktikuje on – line sledování (testování) částečných výbojů oproti testování off – line. On – line sledování částečných výbojů, nevyžaduje přerušení provozu a provádí se tedy v rámci normálního provozního napětí a zatížení. Nepoužívá se tedy žádné přepětí, při kterém by se zkoušené zařízení vystavilo většímu napětí, než je tomu při normálním běžném provozu. Dalším plusem pro toto měření jsou také náklady s tím spojené, které jsou relativně levnější ve srovnání s off – line testováním, což se projeví při ekonomickém zhodnocení dané společnosti. Hlavní výhodou je včasná detekce začínajících poruch při zhoršení izolačního systému, než dojde k úplnému selhání.

Příkladem společnosti je tedy HVPD (High Voltage Partial Discharge), která se zabývá on – line monitorováním a testováním vysokonapětových zařízení, zejména kabely a kabelových příslušenství, výkonových transformátorů, motorů a generátorů. Z hlediska závislosti poruchovosti zařízení na jeho životnosti by mělo být častější testování částečných výbojů během prvních 3 let provozu a dále pak po každé opravě stroje. Pravidelné testování by pak mělo být prováděno po celou dobu jeho životnosti. Na (obr. 29) je znázorněna poruchovost takového zařízení během jeho provozu. [30, 31]



Obr. 29: Poruchovost v závislosti na životnost zařízení, převzato z [30]

Konkrétní měření s pomocí mnoha specializovaných a modernizovaných zařízení je přesné a podávají dostatečné informace o lokalizaci výbojové činnosti. Příkladem jsou

zařízení uvedené ve studii [31, 32]. V prvním případě se jedná o technologii HVPD 4 – fázové on – line testování výbojové činnosti HV kabelů a točivých strojů, která se pohybuje přes zobrazovací test částečných výbojů s ručním detektorem během velmi krátkého času až k trvalému sledování výbojové činnosti. Tato kombinovaná detekce je považována za dobrý ukazatel izolace v provozu zařízení. První fáze je zaměřena na zobrazovací test na celém zařízení (ruční detektor), v druhé je obsaženo monitorování činnosti po dobu několika minut na místě s možným výskytem výbojů, další fáze je několikadenní s pomocí přenosných diagnostických zařízení a poslední fáze je dlouhodobější analýza za pomoci umístění senzorů na zkoumané zařízení, tyto fáze jsou provedeny na základě potvrzení diagnostického testu s fáze 1 a 2. Jednotlivé přístroje použité jsou na (obr. 30). [31]



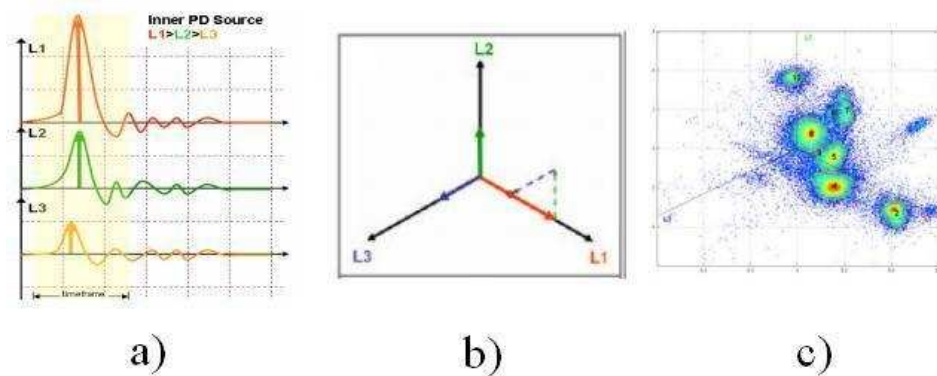
Obr. 30: Používané přístroje technologie HVPD; 1. PD detector handheld, 2. 4-Channel HVPD - Longshot, 3. 16- Channel HVPD - Multi Monitor, 4. HVPD - Multi Permanent Monitor, převzato z [31]

V druhém případě se jedná o technologii systému MPD (obr. 31) pro detekci, záznam a analýzu částečných výbojů, která je schopna určit i malé hodnoty výbojů, díky odfiltrování i slabých signálů z okolí. Pro získání spolehlivější výsledků s účinným potlačením šumu byl prezentován systém MPD (3PAR) k analýze při měření trojfázových zařízení VN (transformátory, točivé stroje). [32]



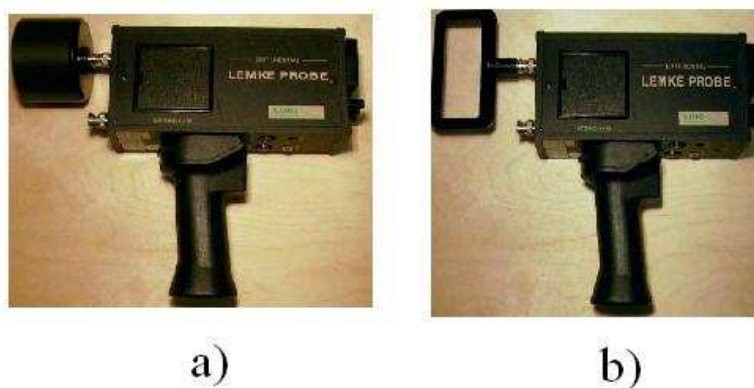
Obr. 31: Měřicí systém MPD, převzato z [32]

Na (obr. 32) je znázorněna aktivita výbojové činnosti v jednotlivých fázích, kde je vidět, že zdroj částečných výbojů je ve fázi L_1 . Dle (obr. 32c) je poznat hlavní výbojová činnost ve fázích L_1 a L_2 , jež jsou barevně rozlišeny podle jejich aktivity (červená= vysoká aktivita). [32]

Obr. 32: Znárodnění výbojové činnosti systému MPD (3PARD), a) napět'ové signály ve fázích, b) posunutí fází o 120° , c) částečné výboje dle reálných dat ve fázích, převzato z [32]

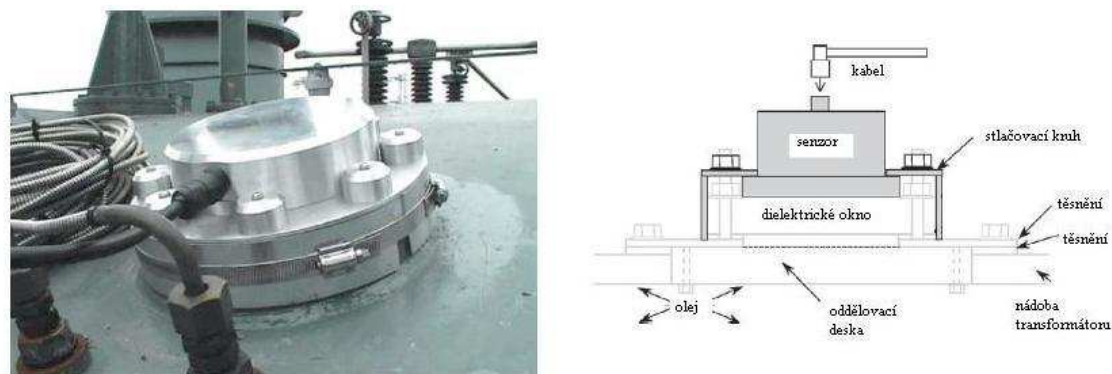
Jak pro rotační stroje, kabely, rozvaděče, tak i pro transformátory s kapalnou izolační složkou existuje několik způsobů a možností vyhodnocení lokalizace výbojové činnosti. Příkladem jsou měřicí přístroje zaměřené na detekci částečných výbojů s pomocí kapacitní nebo induktivní sondy, které jsou závislé především na jejich citlivosti, dále pak měření pomocí senzorů elektrického a magnetického pole nebo UHF (Ultra High Frequency) senzorů. Kapacitní a induktivní sonda (snímání magnetického pole od zdroje výbojové činnosti), jsou vzhledem ke své metodice měření nevýhodná pro transformátory, z hlediska citlivosti vodiče sondy pro magnetické toky nebo vnějšího rušení do obvodu. Rovněž je nutné vyřadit zařízení s provozu, jelikož sondy jsou přímo spojené s vyhodnocovacím systémem.

Dalším způsobem je bezkontaktní měření pomocí různých senzorů pole, jejichž zařízení jsou uvedeny na (obr. 33). S jejich pomocí je možno změřit výboje s určité vzdálenosti, z hlediska jejich funkčnosti jako směrová anténa. [34]



Obr. 33: Zařízení pro vyhodnocení částečných výbojů společnosti Doble Lemke; a) kapacitní senzor pole, b) induktivní senzor pole, převzato z [34]

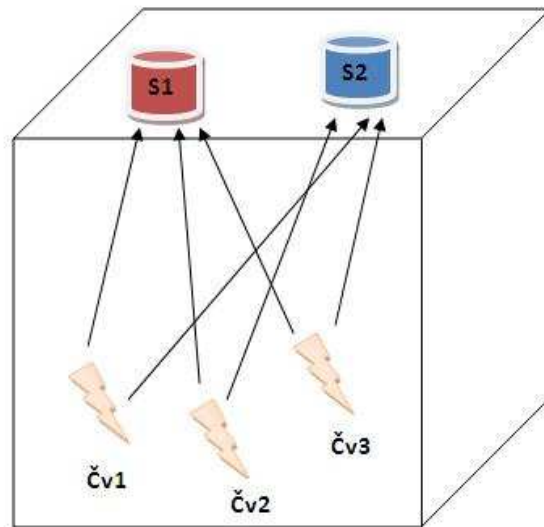
Další variantou vyhodnocení jsou UHF senzory, které zachycují elektromagnetické signály šířící se od místa částečných výbojů různými směry. Frekvenční rozmezí UHF senzorů je v rozmezí od 300 – 3000MHz. Ve studii [33] je popsán vznik UHF signálu a jeho vyhodnocení senzory umístěných v transformátoru. Během výboje jsou elektrony (odtržené z atomů) urychlovány elektrickým polem, což se projeví ve zvýšení proudu a následně jsou opět uvedeny do klidové polohy (snížení proudu). Když se náboje pohybují určitou rychlostí, v závislosti na změně této rychlosti a pohybu nábojů vzniká již zmíněné elektromagnetické pole. Praktická ukázka připojení UHF senzorů je na (obr. 34).



Obr. 34: Připojení UHF senzorů v nádobě transformátoru, převzato z [33]

Na zkoumané zařízení je možno připojit několik senzorů, které přijímají signály částečných výbojů s časovým posunem, z hlediska jejich vzdálenosti místa výskytu této činnosti od senzorů. Na (obr. 35) je znázorněno příkladné rozmístění UHF senzorů, které současně zachytí signály od výbojů s časovým posunem podle vzdálenosti a ty se následně vyhodnotí pomocí osciloskopu. Z následného znázornění je poté poznat časový posun při

náběžných hranách signálu. Získáním několika signálů a časových změn je možno odhalit počet aktivních zdrojů částečných výbojů. [33]



Obr. 35: Možnost rozmístění UHF senzorů (S_1 a S_2) na transformátoru se zdroji částečných výbojů $\check{C}v_1 - \check{C}v_3$ [33]

Obecně se v oblasti vyhodnocení a lokalizace částečných výbojů setkáváme s mnoha systémy a výrobci spolehlivých zařízení (Doble Lemke, EA Technology, HVPD), jež se touto diagnostikou zabývají. Některé z těchto přístrojů v oblasti diagnostiky výbojové činnosti jsou také shrnuty v publikaci [35].

5 Závěr

Práce byla zaměřena na výzkum vlivů výbojové činnosti v kapalných izolantech a následnému porovnání s případem na vzduchu. Tato činnost byla poté ověřena při samotném měření dvou druhů olejů s použitím tří druhů poloměrů s hodnotami 57,5 μm , 67,5 μm a 731 μm . Pro experiment byl použit druh minerálního oleje MOGUL TRAFO a klasický ŘEPKOVÝ OLEJ při uspořádání hrot (jehla) – deska (rovinná a zaoblená elektroda).

Ověření experimentu ukazuje, že při klasickém uspořádání hrot – deska s rovinnou elektrodou jsou hodnoty náboje Q_{iec} menší než při uspořádání se zaoblenou elektrodou, jež je dáno především rozdílným rozložením elektrického pole kolem elektrod. Jedná se především pro hodnoty u čistého nestárnutého oleje, kde pro uspořádání se zaoblenou elektrodou je $Q_{\text{iec}}=850\text{pC}$ a 650pC a pro rovinnou elektrodu $Q_{\text{iec}}=1,5\text{nC}$. Taková změna hodnot je způsobena i změnou vzdálenosti elektrod, pro první případ 5 mm a pro druhý 10 mm.

S rostoucí dobou stárnutí oleje se měnila jejich barva a viskozita. Výbojová činnost se u těchto stárnutých olejů při dané teplotě, při uspořádání s rovinnou elektrodou výrazně neprojevila a docházelo rovnou k elektrickému průrazu při 27 kV. K průrazu docházelo i pro uspořádání se zaoblenou elektrodou a menší vzdálenost elektrod a delší dobou stárnutí.

Na závěr bylo provedeno ověření výbojové činnosti pro případ na vzduchu, kde hodnoty při stejném uspořádání byly výrazně menší, z hlediska rozdílného šíření částečných výbojů. V závěru práce jsou také uvedeny příklady použití pro vyhodnocení výbojové činnosti, kde v této oblasti existuje mnoha systémů sloužící k její lokalizaci a přesnému určení.

Použitá literatura

- [1] Mentlík, V.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN – technická literatura, Praha 2008.
- [2] Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN – technická literatura, Praha 2006.
- [3] HADDAD, A.; WARNE, Doug. *Advances in High Voltage Engineering* [online]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004, 2007 [cit. 2012-09-12]. Dostupné z WWW: http://ebookey.org/Advances-in-High-Voltage-Engineering_484332.html.
- [4] HAVLÍČEK, Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech* [online]. Brno: Vysoké technické učení v Brně, 2009. 120s s. Dizertační práce. Vysoké technické učení v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z WWW: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20100.
- [5] MENTLÍK, Václav , et al.. *Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky* [online]. 2008, č. 12, [cit. 2012-10-13]. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38198.pdf>.
- [6] ČSN EN 60270 [online]. 1. 07. 2007 [cit. 2012-10-18]. ČSN EN 60270. Dostupné z WWW: <http://normy.cz/DetailZmeny.aspx?k=79070>.
- [7] PRSKAVEC, Ladislav . *Částečné výboje ve strojích točivých* [online]. [s.l.], červen 2002. 27 s. Semestrální práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z WWW: http://ladislav.prskavec.net/old/download.php?source=pdf/2002_06_PVCZ_Castecne_vyboje_ve_strojich_tocivych.pdf.
- [8] PIHERA, Josef. *Webs.zcu.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-10-14]. Diagnostika elektrotechnických zařízení. Dostupné z WWW: <http://webs.zcu.cz/fel/ket/dez/-%20cviceni%20dez%20/Diagnostika%20elektrotechnick%ECch%20za%FD%A1zen%A1%20-%20cvi%9Fen%A1%20%5BRe%A7im%20kompatibility%5D.pdf>.

-
- [9] ŠIRŮČEK, Martin. *Www.cez.cz* [online]. 2009 [cit. 2012-11-04]. Degradace izolačních systémů točivých strojů - elektrické stromečky. Dostupné z WWW: <www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/15-sirucek.pdf>.
- [10] TRNKA P., Polanský R., et al.. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej - papír* [online]. 2007, č. 12, [cit. 2012-11-15]. Dostupné z WWW: <http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c13.pdf>.
- [11] Remya Rebecca Manuel, Partial Discharge Analysis. *Http://www.scribd.com* [online]. 2010 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/35044056/Partial-Discharge-Analysis>.
- [12] Eberhardt, R.; Muhr, H. M.; Lick, W.; Wieser, B.; Schwarz, R.; Pukel, G., "Partial discharge behaviour of an alternative insulating liquid compared to mineral oil, [online]. " Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International, vol., no., pp. 426,429, 23-27 May 2010 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5958385&isnumber=5958279>.
- [13] Elektroizolační materiály - Izolanty a dielektrika. *Http://www.janoud.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: http://www.janoud.cz/sub/jcueltech/04b_izolanty.pdf.
- [14] Malik, N.H; Al-Arainy A.A, Qureshi M.I.: Electrical insulation in Power systems, USA 1998.
- [15] MIDEL, Synthetic ester oil. MIDEL 7131 [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://www.midel.com/productsmidel/midel-7131>.
- [16] LDIC (USER MANUAL): HV test, Monitoring, Diagnostics. Německo, 2007. Dostupné z: www.idic.de
- [17] Ilyas, S.M., "Study on the Characteristics of Jatropha and Ricinus Seed Oils as Liquid Insulating Materials," Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on, vol., no., pp.162,165, 15-18 Oct. 2006 [cit. 2012-12-25]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4105394&isnumber=4105356>.

-
- [18] Turek, Jan. *Možnosti ověření vlastností izolačních kapalin*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: <http://theses.cz/id/zudmi5/?lang=en;furl=%2Fid%2Fzudmi5%2F>
- [19] Dielectric Oil Tester. HV Technologies [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.hvtechnologies.com/HVSolutions/InsulatingOilTestEquipment/DielectricOilTester/tabid/132/Default.aspx>.
- [20] ČSN EN 62021-1. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Izolační kapaliny - Stanovení čísla kyselosti. Český normalizační institut, Červen 2004. Dostupné z: http://import.technickenormy.cz/nahledy/70427_nahled.htm.
- [21] Www.oleje.cz: Vlastnosti motorových olejů - Oxidační stabilita, nitrace oleje. OLEJE [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Oxidacni-stabilita--nitrace-oleje>
- [22] Yi, X.; Wang, Z.D.; Perrot, F.; Lashbrook, M., "Surface treeing on pressboard barriers in synthetic and natural ester liquids under AC stress," *Dielectric Liquids (ICDL), 2011 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1,4, 26-30 June 2011. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6015452&isnumber=6015049>.
- [23] Dielectric Insulating Fluid Overview. In: MIDELE 7131 [online]. 2010 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_7131_Dielectric_Insulating_Fluid_Overview.pdf.
- [24] Pratomosiwi, F.; Pattanadech, N.; Wieser, B.; Muhr, M., "The study of electrode corner shape for measuring dielectric properties of oil immersed material," *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2012 International Conference on*, vol., no., pp.553,557, 17-20 Sept. 2012. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6357043&isnumber=6356989>.

-
- [25] Veverka, A.: Technika vysokého napětí, SNTL – nakladatelství technické literatury, Praha 1982.
- [26] Ing. Vít Barborka. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. ELEKTRO [online]. 2002 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085.
- [27] TRNKA, P., M. ŠIRŮČEK a B. PASLAVSKÝ. Vliv tvaru nehomogenity v izolačním systému olej-papír na velikost částečných výbojů. *Electroscope* [online]. 2011 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=244:vliv-tvaru-nehomogenity-v-izolanim-systemu-olej-papir-na-velikost-astenych-vyboj-&catid=32:cislo-12011&Itemid=48.
- [28] Badent, R.; Kist, K.; Ruggemeier, B.; Zierhut, W.; Schwab, A. J., "Dielectric characteristics of rape-seed oil," *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1998. Annual Report. Conference on, vol., no., pp. 456,459 vol. 2, 25-28 Oct 1998. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=732934&isnumber=15805>.
- [29] Pihera, J.; Trnka, P.; Mentlik, V.; Sirucek, M.; Mraz, P., "Corona discharge within organic oil insulations," *Dielectric Liquids (ICDL), 2011 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1,4, 26-30 June 2011. [online] [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6015412&isnumber=6015049>.
- [30] HVPD: High Voltage Partial Discharge. [online]. 2003 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.hvpd.co.uk/oil-gas/>
- [31] The HVPD 4-Phase Partial Discharge Test and Monitoring Solution for Medium Voltage (MV) Electricity Distribution Networks. HVPD: High Voltage Partial Discharge [online]. 2009 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.hvpd.co.uk/media/pdf/brochures/HVPD-4-Phase-PD-Test-and-Monitoring-Solution-May-2009.pdf>

-
- [32] RETHMEIER, Kay a Ronald PLATH. Multi-Channel PD Measurements on Transformers – A New Approach for Real-Time Data Evaluation. OMICRON [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/files/pdf/en/Multi-Channel-PD-Measurements-on-Transformers-Paper-ENU.pdf
- [33] Judd, M.D.; Li Yang; Hunter, I.B.B., "Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: sensors and signal interpretation," *Electrical Insulation Magazine*, [online] *IEEE*, vol. 21, no. 2, pp. 5,14, March-April 2005 doi: 10.1109/MEI.2005.1412214 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1412214&isnumber=30599>
- [34] RUSSWURM, Dirk. On-line Partial Discharge Measurement on Power Transformers. In: HV Technologies [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: http://grouper.ieee.org/groups/transformers/meetings/s2001_Amsterdam/dp_transfo.pdf
- [35] GRUBR, Tomáš. *Možnosti detekce výbojové činnosti*. Plzeň [online], 2011. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická Plzeň. Dostupné z: <http://theses.cz/id/lh6b9y/>.