

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nekonvenční metody sledování částečných výbojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav HUBÁČEK**
Osobní číslo: **E11N0014K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Nekonvenční metody sledování částečných výbojů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zabývejte se problematikou sledování částečných výbojů.
2. Diskutujte význam této problematiky v diagnostice elektrotechnických zařízení.
3. Proveďte rozbor konvenčních a nekonvenčních metod sledování částečných výbojů.
4. Zabývejte se jejich porovnáním, možnostmi uplatnění v praxi, zařazením do mezinárodních standardů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá částečnými výboji, mechanismem jejich vzniku a jejich škodlivým působením na vysokonapěťovou izolaci elektrických strojů. Je zde uveden jejich základní teoretický popis a případy, kdy vznikají. Popsány jsou dostupné měřicí metody a to jak konvenční galvanická metoda, tak i zejména nekonvenční metody založené na snímání jejich optických, akustických, elektromagnetických a chemických projevů. Zvláštní pozornost je u nekonvenčních metod věnována možnostem lokalizace zdroje částečných výbojů včetně matematického popisu. Následně je provedeno porovnání výhod a nevýhod jednotlivých metod a uvedení jejich praktického použití. V závěru práce jsou uvedeny perspektivy možného vývoje diagnostiky elektrických zařízení pomocí sledování částečných výbojů.

Klíčová slova

Částečné výboje, degradace izolace, diagnostika, elektromagnetické rušení, galvanická metoda, IEC 60270, IEC 62478, konvenční metody, lokalizace částečných výbojů, nekonvenční metody, plynová chromatografie, UHF signál, UHF snímače, výkonové transformátory, vysokonapěťová izolace, zdánlivý náboj.

Abstract

This master theses is concerned with partial discharges, mechanisms of their origin, their harmful impact on high-voltage insulation of electric machines and also their basic theoretical descriptions and cases of inception. We describe accessible measurable methods as conventional galvanic method or especially non-conventional methods based on scanning of their optical, acoustical, electromagnetic and chemical manifestation. Special attention is given to possibilities of localization of sources of partial discharges in use of non-conventional methods including mathematical descriptions. You can read about pros and cons of each method and about their practical use. In the conclusion of this dissertation are possibilities of future progress in diagnosis of electric devices by means of scanning partial discharges.

Key words

Apparent charge, conventional method, degradation of insulation, diagnostics, dissolved gas analysis, electromagnetic interference, galvanical method, high-voltage insulation, IEC 60270, IEC 62478, partial discharge, partial discharge location, power transformers, UHF sensors, UHF signal, unconventional method.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 25.4.2013

Bc. Jaroslav Hubáček

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za odbornou pomoc, ochotu a vedení při zpracování této diplomové práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD.....	10
2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	12
2.1 Druhy částečných výbojů.....	13
2.2 Gemant-Philippovův model dielektrika	15
2.3 Zobrazení naměřených hodnot na měřicích přístrojích.....	18
2.4 Parametry částečných výbojů.....	20
2.5 Škodlivé působení částečných výbojů na izolaci	22
3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	26
3.1 Konvenční měření částečných výbojů – galvanická metoda.. ..	27
3.2 Nekonvenční metody měření částečných výbojů.....	30
3.2.1 Detekce částečných výbojů v kmitočtovém rozsahu UHF.....	30
3.2.1.1 Analýza UHF signálu částečných výbojů z transformátoru	39
3.2.2 Akustická (ultrazvuková) detekce částečných výbojů.	41
3.2.2.1 Teoretický rozbor akustických vln	43
3.2.2.2 Šíření ultrazvuku v pevných látkách.	45
3.2.2.3 Šíření ultrazvuku v kapalných látkách.	46
3.2.2.4 Piezoelektrické snímače.	47
3.2.3 Chemická detekce – plynová chromatografie (DGA).....	48
3.2.3.1 Metoda Duvalova trojúhelníku.....	49
3.2.3.2 Rogersova metoda	52
3.2.3.3 Dörnenburgova metoda	53
3.2.3.4 Metoda podle IEC 60 599	54
3.2.4 Optická detekce částečných výbojů	55
4 POUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH METOD A JEJICH SROVNÁNÍ.....	58
5 ZÁVĚR	60
SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

A	amplituda výchylky	[m]
b	absolutní teplotní součinitel	[m s ⁻¹ K ⁻¹]
b'	relativní teplotní součinitel	[K ⁻¹]
c	rychlost šíření vlny	[m.s ⁻¹]
c_L	podélné vlnění	[m.s ⁻¹]
c_T	příčné vlnění	[m.s ⁻¹]
C	kapacita	[μF]
D	střední kvadratický součet	[C ² .s ⁻¹]
E	dynamický modul pružnosti v tahu	[Pa]
G	modul pružnosti ve smyku	[Pa]
I	intenzita	[W.m ⁻²]
I	střední proud částečných výbojů	[C.s ⁻¹ nebo A]
K	adiabatický modul objemové pružnosti	[Pa]
n	četnost výskytu impulzu	[-]
N	výkon ultrazvukové vlny	[W]
p	amplituda akustického tlaku	[Pa]
P	výkon částečných výbojů	[W]
P	tlak	[Pa]
q	zdánlivý náboj	[pC]
Q	součtový náboj	[pC]
S	plocha	[m ²]
t_i	čas výskytu impulzu částečného výboje	[s]
T	doba periody zkušebního napětí	[s]
U_e	zhasací napětí částečných výbojů	[V]
U_i	zapalovací napětí částečných výbojů	[V]
v	akustická rychlost	[m.s ⁻¹]
V_0	objem	[m ³]
x	souřadnice polohy	[m]
Z	impedance	[Ω]
β_{ad}	adiabatická stlačitelnost	[Pa ⁻¹]
β_{iz}	izotermická stlačitelnost	[Pa ⁻¹]
μ	Poissonovo číslo	[-]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
φ_i	fázový úhel	[° nebo rad]
ω	úhlová frekvence	[rad.s ⁻¹]
CH ₄	metan	
C ₂ H ₂	acetylen	
C ₂ H ₄	etylen	
C ₂ H ₆	ethan	
C ₃ H ₆	propylen	
H ₂	vodík	
PE	polyetylen	
PTFE	polytetrafluoretylen	
XLPE	zesíťovaný polyetylen	

1 Úvod

Stav izolace elektrického stroje je jedním z nejdůležitějších parametrů, který má velký vliv na jeho dlouhodobý bezporuchový chod. Případná havárie výkonových prvků v elektrizační soustavě má za následek vysoké finanční náklady na opravu nebo výměnu zařízení. Značné jsou i ztráty způsobené nevýrobou nebo nefunkčností části energetické sítě. Někdy může dojít k dalším vedlejším efektům jako je poškození životního prostředí a v nejhorším případě může být porucha vážným nebezpečím pro zdraví a život zaměstnanců nebo i veřejnost. Nejčastější příčinou těchto poruch je stárnutí a poškození izolace provozním namáháním nebo poruchami výkonového stroje.

Výkonové prvky v elektrizační soustavě jako například transformátory a generátory mají velmi vysokou pořizovací hodnotu a velký vliv na správný chod této soustavy. Pro kvalitní dodávku elektrické energie je proto třeba zajistit jejich vysokou provozní spolehlivost. Jejich cena se pohybuje řádu jednotek až desítek miliónů Kč. Taktéž jsou velmi nákladné jejich opravy a případné výpadky v provozu. Proto jsou vyvíjeny nové diagnostické a monitorovací metody, které budou schopny bez narušení provozu přesně zhodnotit jejich stav. Průběžným sledováním stavu lze zabránit fatálním poruchám a výpadkům strojů a zároveň je toto sledování umožňuje dlouhodobě provozovat s vyšší spolehlivostí a efektivitou. Vhodnými metodami lze i odhalit postupující degradaci izolace v raném stádiu. Například běžný výkonový transformátor má projektovanou životnost cca 20-35 let. Správnou údržbou a diagnostikou lze prodloužit jeho životnost až na 60 let.

Především poruchy transformátorů jsou obvykle způsobeny vnějšími vlivy jako je např. úder blesku, přechodovými jevy při spínání nebo zkraty. Tyto události se neobejdou bez negativního dopadu na izolační systém. Sledované diagnostické parametry se pak zhoršují také stárnutím stroje. Za zhoršováním parametrů vlivem stárnutí je zvláště elektrické, teplotní a mechanické namáhání. Také znečištění zařízení během provozu, výrobní vady a nesprávný návrh stroje stojí za zhoršováním provozních vlastností. Se stoupajícím časem v provozu se samozřejmě také zvyšuje riziko poruchy.

O stavu stroje a zejména jeho izolace vypovídá především úroveň částečných výbojů vyskytujících se uvnitř této izolace. Škodlivé jevy spojené s částečnými výboji byly objeveny počátkem minulého století, kdy začaly vznikat první vysokonapěťové technologie pro výrobu a přenos elektrické energie. Měření částečných výbojů má velmi široké využití. Lze ho použít u generátorů, motorů, transformátorových vinutí, transformátorových průchodek, výkonových vypínačů, zapouzdřených vodičů a rozveden, přístrojových transformátorů, kabelových

vedení atd. Metody měření částečných výbojů v pevných, plynných a kapalných dielektrikách jsou velmi citlivé nedestrukční diagnostické metody.

Podle úrovně výbojové činnosti lze celkem přesně určit stav stroje, současně je však žádoucí lokalizovat místo kde dochází k nejhorším projevům těchto výbojů. Lokalizace místa zvýšené výbojové činnosti je důležitá především u velkých výkonových transformátorů. Současná diagnostická měření se provádí nejčastěji po určité době, moderní diagnostický trend je provádění měření podle skutečného stavu stroje. Je-li dlouhodobě stroj z hlediska měření v dobré kondici, je možné prodloužit servisní intervaly a tím významně snížit náklady na jeho provoz.

Velmi důležité je však oddělení signálu částečných výbojů od rušení a jeho správné vyhodnocení. V současné době je práce vývojářů těchto systémů zaměřena zvláště na sledování výbojové činnosti on-line, tedy za plného provozu stroje. Metody on-line totiž umožňují zjistit případné vady a připravit se na ně při plánované odstávce. Snímání měřených parametrů při standardním provozu stroje však skýtá mnoho úskalí. Dalším problémem je i zajištění bezpečnosti obsluhy a ochrany měřicího systému, protože jsou tyto systémy provozovány v oblasti vysokého až velmi vysokého napětí.

Pro určení míry spolehlivosti zde hraje velmi důležitou roli včasné zjištění míst s vyskytujícími se poruchami. Následně je třeba přesně určit místo, kde se porucha vyskytuje, aby mohl být stroj při odstávce nebo revizi efektivně opraven. Provozovatelé výkonových zařízení požadují po jejich výrobcích diagnostické systémy, které mají určit typ poruchy, který se v zařízení vyskytuje a zároveň požadují i určení místa poruchy. Důvodem je ekonomický tlak na provozovatele, kteří potřebují prodloužit dobu provozu bez nutné odstávky zařízení. Bude-li předem známa porucha a místo jejího výskytu, pak se lze na opravu velmi dobře připravit a doba odstávky takového zařízení se velmi zkrátí a tím i zlevní. Proto jsou vyvíjeny nové nekonvenční metody, které buď zcela nahradí stávající detekci částečných výbojů především galvanickou (konvenční) metodou a nebo výrazně pomohou zlepšit interpretaci výsledků měření.

2 Částečné výboje

Zvláštním druhem elektrického výboje je tzv. částečný výboj. Zatímco u klasického elektrického výboje dochází k průrazu dielektrika v celé délce mezi elektrodami, u částečného výboje je průraz pouze v části tohoto dielektrika. K propojení elektrod nedochází, nevzniká mezielektrodový zkrat a elektrické zařízení může pokračovat v činnosti. Zbylá část izolace má dostatečnou elektrickou pevnost, aby byla schopna vydržet působící napětí.

Částečný výboj je dle technické normy IEC 60270 [5], [7] definován jako lokální elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Tyto výboje vznikají v důsledku koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na jejím povrchu a vytvářejí proudové impulzy, které mají dobu trvání menší než 1 μs . Tyto impulzy jsou doprovázeny vznikem zvuku, světla, tepla a chemickými reakcemi. Vzniklé světelné záření se projevuje jak ve viditelné oblasti, tak i v ultrafialovém spektru. Ultrafialové záření má vyšší energii a proto je nebezpečnější. Významnou měrou se kvůli vyššímu energetickému potenciálu podílí na spouštění chemických reakcí. Tyto malé výboje mají obvykle velmi špatné účinky na izolaci. Částečné výboje jsou sice v počátečním vývojovém stádiu velmi malé, svým charakterem však způsobují degradující proces způsobující chemický rozklad a erozi izolace. Tím zhoršují její vlastnosti a trvale ji poškozují a samozřejmě zkracují její životnost a spolehlivost. Poškozovaná část se však dále může rozšiřovat až do zničení celé izolace.

Částečný výboj je jev, kdy dochází k mikroprůrazu části izolace v plynném dielektriku. K tomuto mikroprůrazu dojde, když elektrické pole překročí elektrickou pevnost izolace v lokální oblasti. Částečné výboje vznikají především ve vysokonapěťových izolačních systémech. Tyto výboje vznikají v malých plynových dutinkách, které vzniknou nedokonalou výrobou izolace stroje. Vzniku těchto dutinek se nelze vyhnout ani při nejlepší technologické pečlivosti.

Zdrojem částečných výbojů jsou velmi často i nehomogenity vznikající při styku materiálů kov-izolant. Dutinky mohou vznikat také lokálním elektrickým namáháním. Za zhoršováním stavu izolace stojí též degradační procesy způsobené stárnutím izolace a provozem. Je-li napětí na izolaci zvyšováno, při určitém tzv. zápalném napětí se v plynových dutinkách izolace začnou vytvářet drobné jiskrové výboje.

Průrazná odolnost dutinky závisí především na jejím rozměru, ale také na druhu a tlaku plynu, který je v dutince obsažen.

Protože mají plynné látky nižší permitivitu, vzniká v nich vyšší hodnota namáhání elektrickým polem než v pevných materiálech. Elektrické namáhání se totiž rozděluje v opačném poměru permitivit. Nejčastěji je dutinka vyplněna vzduchem s relativní permitivitou $\epsilon_r=1$. Dutinka je však namáhána elektrickou intenzitou E_r (permitivita okolního pevného izolantu) krát vyšší. Elektrická pevnost dutinky je podstatně nižší než okolního pevného izolantu a proto zde tedy i při nižším napětí snadněji dochází k výbojové činnosti. Napětí, při kterém dochází k výbojům v jednotlivých dutinkách není stejné a závisí zejména na jejich geometrických rozměrech.

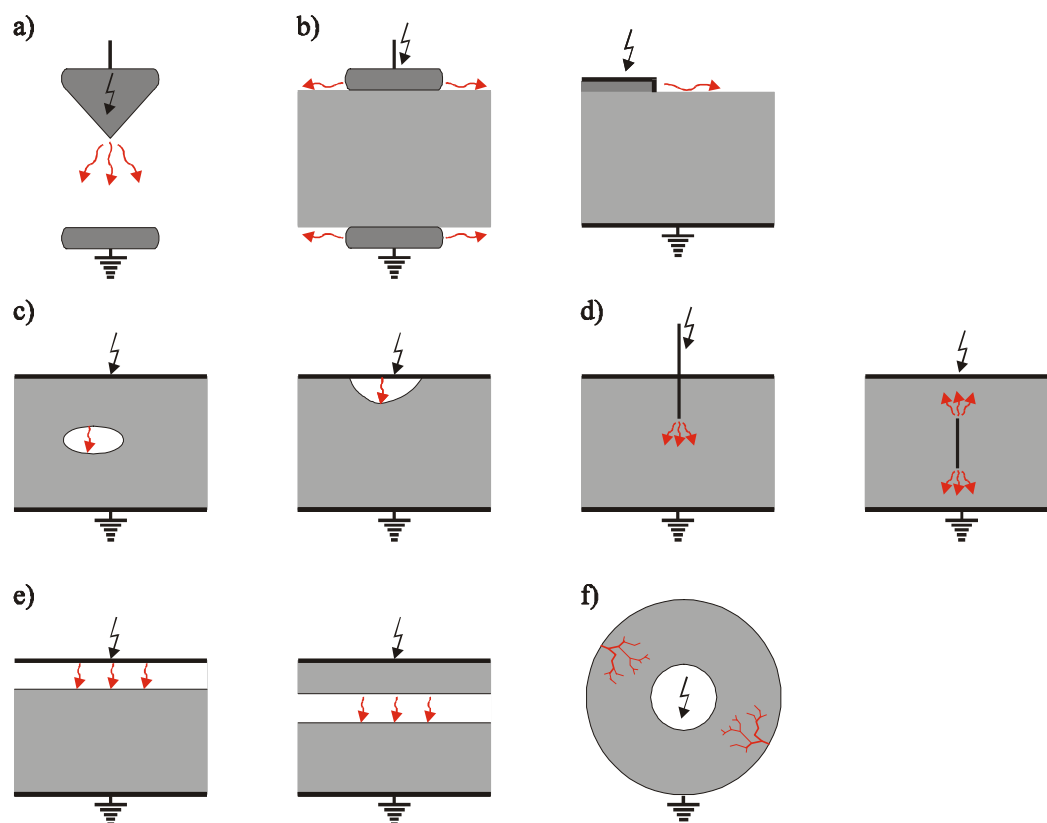
Při sledování výbojové činnosti zjišťujeme hlavně její intenzitu (může být představována zdánlivým nábojem q), typ (určuje druh poruchy) a místo (určuje vážnost poruchy).

Částečné výboje můžeme rozdělit podle místa výskytu [1] na:

- *vnější (externí) částečné výboje* - výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, jako např. doutnavé nebo koronové výboje
Nejčastěji se vyskytují na elektrodovém uspořádání typu hrot-deska.
- *vnitřní (interní) částečné výboje* - výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, jako např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku
- *povrchové částečné výboje* - vznikají v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, nazýváme je též klouzavými výboji a nejčastěji se u točivých strojů vyskytují na výstupu vinutí z drážky

2.1 Druhy částečných výbojů

Různé druhy částečných výbojů vznikající mezi elektrodami, izolačním materiálem a plyny nebo kapalinami jsou graficky znázorněny na obr. 1 [2].



Obr. 1 Typická uspořádání elektrod pro částečné výboje [2]; a) vnější (externí); b) povrchové a klouzavé; c), d), e), f) vnitřní (interní) částečné výboje

Na obr. 1a je zobrazeno uspořádání elektrod hrot-deska typické pro koronový výboj. Koronové výboje vznikají v plynech na ostrých bodech v elektrickém poli. Obvykle se vyskytují na straně vysokého napětí, ale mohou se též objevit na ostrých hranách se zemním potenciálem. I když vzdálenost mezi elektrodami může být velká, vysoká koncentrace pole na hrotu může způsobit částečný průraz v obklopujícím plynu. Kvůli těmto výbojům je vhodné volit taková konstrukční řešení, kde se v jednotlivých dílech zařízení nevyskytují ostré body a hrany.

Obr. 1b zobrazuje povrchové a klouzavé výboje vytvářející se na rozhraní elektroda-dielektrikum-plyn. Povrchové výboje vznikají, jestliže elektrické namáhání působí rovnoběžně s dielektrickým povrchem. Vznikají zejména na průchodkách transformátorů, kabelových koncovkách a na povrchových kontaktech. Výboje ovlivňují elektrické pole tak, že se výboje mohou rozšiřovat i mimo původní povrch, kde výboje začaly vznikat.

Na obr. 1c,e jsou uvedeny nejčastější případy pro vznik částečných výbojů. Jedná se o dutinky v samotném izolačním materiálu nebo těsně pod elektrodou, popř. o delaminaci (oddělení vrstev) jednotlivých materiálů mezi sebou (ve styku elektroda-izolant nebo izolant-

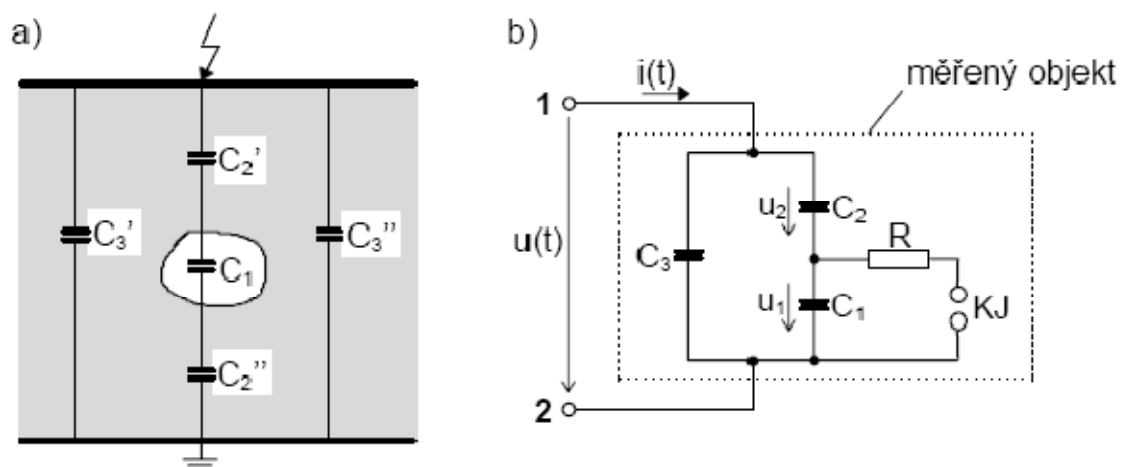
izolant). K delaminaci může dojít jak při samotné výrobě nedokonalostí technologických postupů nebo za provozu působením vysoké teploty a tlaku na jednotlivé vrstvy. Dutinky (bublinky) zase často vznikají při používání litých izolací. Dutinky bývají nejčastěji vyplněny plynem ale vyplňující látkou může být i kapalina. Miniaturní bublinky vznikají v plastických materiálech, které jsou vyráběny extruzí, v izolacích na bázi pryskyřice, izolačního papíru, izolačního oleje atd. Napětí, při kterém dochází k výskytu výbojů závisí na elektrickém namáhání dutinky a na její elektrické pevnosti.

Na obr. 1d jsou zobrazeny vnitřní výboje vznikající na ostrých hrotech působením velké intenzity elektrického pole na špičce elektrody.

Na obr. 1f jsou nakresleny tzv. elektrické stromečky (treeing), které se vyvíjejí z vad v izolačních materiálech. Někdy se stromeček rozroste do určité velikosti a je vyplněn dutinami. V těchto dutinách pak dochází k výbojové činnosti a vznikají tak zvláštní případy vnitřních výbojů. V porovnání s běžnými vnitřními výboji jsou tyto výboje velmi nestálé a stromeček se může velmi rychle rozrůstat až dojde k poškození izolačního materiálu.

2.2 Gemant-Philippovův model dielektrika

Chování vnitřních částečných výbojů může být velmi dobře popsáno obvodem na obr. 2, tzv. Gemant-Philippovovým modelem. Kapacita dutinky je představována kondenzátorem C_1 , který je přemostěn jiskřištěm. Kapacita dielektrika v sérii s dutinkou je znázorněna kondenzátorem C_2 . Zdravou část dielektrika představuje kondenzátor C_3 . Podobné uspořádání platí pro povrchové výboje, koronové výboje a pro výboje v elektrických stromečcích. Přivedeme-li na tento obvod střídavé napětí dostatečné velikosti, mohou se začít vyskytovat částečné výboje.



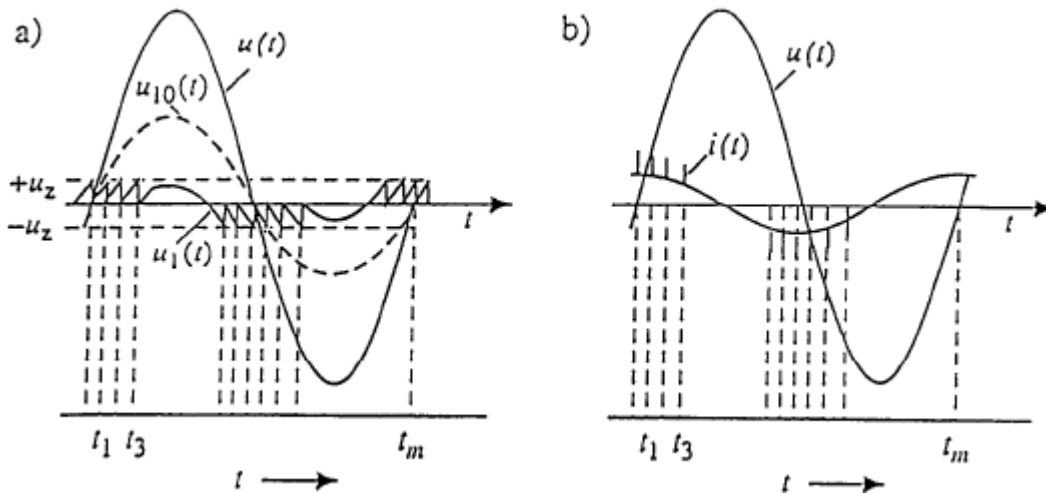
Obr. 2 Dielektrický obvod a jeho náhradní elektrické schéma [5]

$U(t)$ je napětí na celém dielektriku, U_1 je napětí pouze na dutince. Překročí-li napětí U_1 na dutince její elektrickou pevnost, dochází v této dutince ke vzniku výboje. Napětí na dutince klesne na velmi malou hodnotu a výboj uhasne. Na všech dutinkách dielektrika dochází k přeskokům napětí při různých hodnotách. Doba trvání takového výboje je velmi krátká, jedná se o jednotky až desítky nanosekund. Při výboji dochází k rozpadu neutrálních molekul plynu v dutince na kladné a záporné ionty. Kationty a anionty se pohybují proti směru působení vnějšího elektrického pole. Náboj se koncentruje na stěnách dutinky, vytváří opačně polarizované elektrické pole a postupně vyruší intenzitu vnějšího pole. Až klesne rozdíl vnějšího a vnitřního pole pod hodnotu zhasacího napětí U_e dojde k zániku výboje. Po uhasnutí jednoho výboje opět dochází ke zvýšení napětí na dutince. A opět když dojde k překročení zapalovacího napětí U_i , dochází ke vzniku dalších nových výbojů. Pokud nebude rozdíl vnějšího a vnitřního pole větší než zapalovací napětí U_i , k dalším výbojům již nedochází. Velikost povrchového odporu dutinky a vnitřní odpor izolace určují jak rychle je vnitřní náboj v dutince vykompenzován vnějším polem. Čím je izolační materiál kvalitnější, tím jsou doby mezi jednotlivými výboji delší a materiál je namáhán menšími počty částečných výbojů. Tento jev se opakuje několikrát během kladné půlperiody a stejně tak i během záporné půlperiody napájecího napětí. Výboje v dutinkách mají za následek vznik proudových impulzů v dielektriku.

Jestliže na svorky dielektrického obvodu přiložíme střídavé napětí U a pokud nedojde k přeskokům v dutince, je výsledné napětí na dutince (kondenzátor C_1) dáno vztahem:

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot U \quad (1)$$

Zobrazení průběhu napětí $u(t)$ a fiktivního napětí $u_{10}(t)$ na dutince bez přeskoků je na obr. 3a [5], kde U_z je zapalovací napětí výboje. V tomto vyobrazení je předpokládáno, že je zapalovací napětí v obou půlperiodách stejné a po přeskoků výboje není na dutince žádné zbytkové napětí.



Obr. 3 Časové průběhy proudů a napětí pro vnitřní částečné výboje [5]

Na obr. 3b je zobrazen proud $i(t)$, který má kapacitní charakter a na který jsou namodulovány proudové pulzy výbojů.

Z uvedených průběhů je zřejmé, že v různých periodách mají proudové pulzy různou polaritu [5], velikost výbojů je zhruba stejná ale počet se zvyšuje s velikostí napájecího napětí.

Pro náboj Δqi skutečně vybitý v dutince dielektrika platí vztah:

$$\Delta qi = (C_1 + C_2) U_z \quad (2)$$

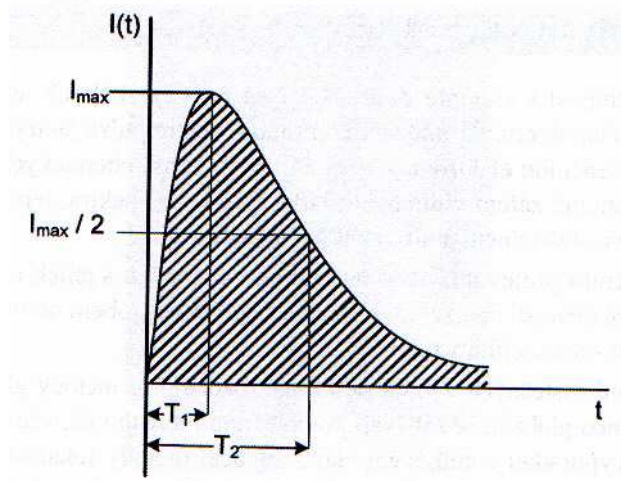
Tento náboj však nejsme schopni změřit a zjistíme pouze tzv. zdánlivý náboj, který je různý od skutečného náboje částečného výboje. Zdánlivý náboj je odvozen vztahem :

$$q = C_2 U_z \quad (3)$$

Protože jsou velikosti kapacit C_1 a C_2 nezjistitelné výpočtem ani měřením, je tato vypočtená hodnota zdánlivého náboje q pouze relativní.

Z fyzikálního hlediska mohou tyto výboje vznikat v plynných a kapalných dielektrikách. Elektrický náboj těchto pulzů má hodnotu pouze několik pC . Lavina výbojů může mít náboj od 10 až do 100 pC . Charakteristická doba trvání částečného výboje je pouze několik jednotek až desítek ns. Frekvenční spektrum takového výboje se pohybuje v celém VHF až UHF pásmu. Průchodem pulzu od místa vzniku až k měřicímu obvodu se velmi

deformuje jeho tvar. Pro vyhodnocení výbojů se proto nevyužívá špičková hodnota pulzu, ale především jeho celkový náboj. Tvar ideálního průběhu částečného výboje je na obr. 4.



Obr. 4 Ideální tvar proudového pulzu částečného výboje [1].

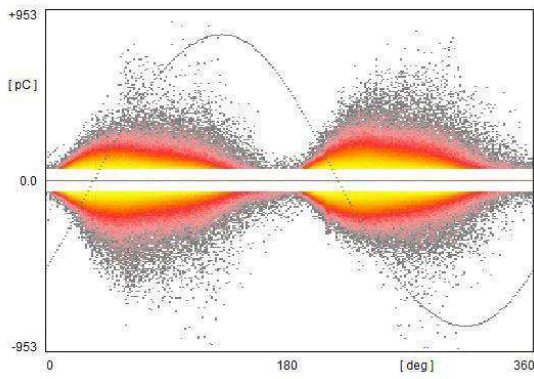
Jsou definovány dvě doby T_1 a T_2 . Doba T_1 „doba čela“ je čas od počátku průběhu do maxima a doba T_2 je tzv. „doba půltýlu“ a je určena dobou, za kterou klesne hodnota výboje na poloviční velikost.

Integrací tohoto průběhu pak získáme náboj q obsažený v tomto pulzu.

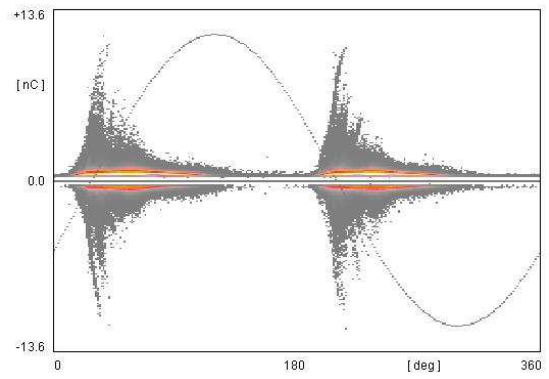
$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (4)$$

2.3 Zobrazení naměřených hodnot na měřicích přístrojích

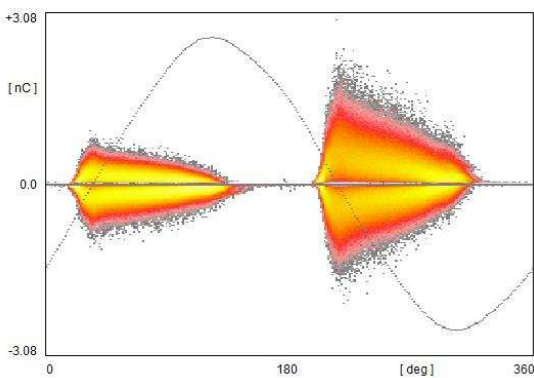
Zobrazování naměřených hodnot částečných výbojů se dříve na analogových měřicích provádělo na eliptické časové základně napájecího napětí formou Lissajousových obrazců. S rozvojem digitálních měřicích systémů se výbojová činnost zobrazuje přímo na tvaru sinusovky napájecího napětí. Z tvaru a barevné intenzity naměřených obrazců se pak určuje o jaký druh poruchy v izolantu se jedná. Barva udává počet výbojů dané velikosti. Na obr. 4 je uvedeno několik ukázek naměřených průběhů [3]:



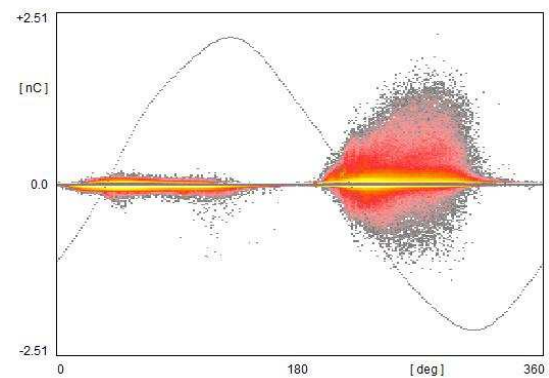
Mikrodutinky - fáze nového stroje



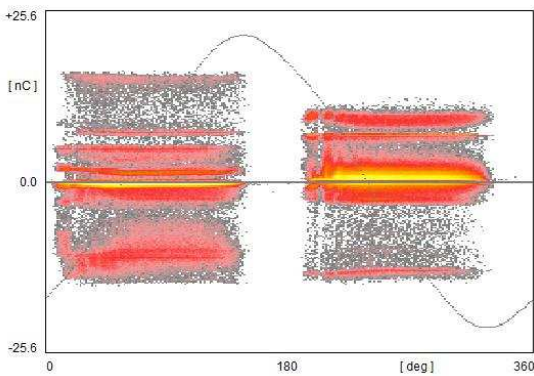
Znečištění vinutí olejem



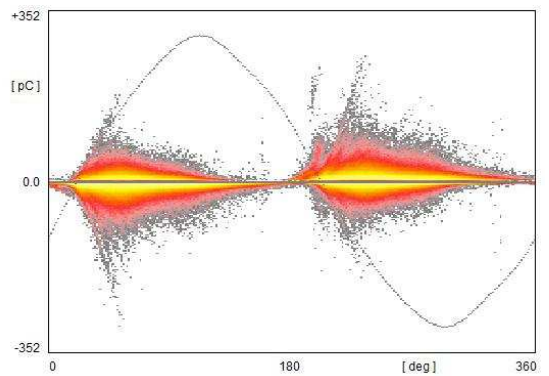
Drážkové výboje - měření na modelu



Kluzavé výboje vlivem porušené polovodivé ochrany



Výboje mezi plovoucí elektrodou a palci stahovací desky statoru



Dutina mezi vrstvami izolace

Obr. 5 Ukázky zobrazení měření částečných výbojů [3]

2.4 Parametry částečných výbojů

Abychom mohli porovnávat aktivitu částečných výbojů, musíme stanovit základní měřitelné charakteristické parametry [5]. Tyto parametry se pak využívají pro vyhodnocování činnosti výbojů. V praxi nás však většinou zajímá jak samotná velikost jednotlivých parametrů, tak především vývoj těchto sledovaných parametrů v závislosti na čase – sledování trendů.

Parametry částečných výbojů se rozdělují na tři skupiny [5]:

- parametry jednotlivého pulzu částečného výboje, např. zdánlivý náboj, tvar pulzu
- parametry sady pulzů částečných výbojů, např. střední proud částečných výbojů, součtový náboj, četnost impulzů částečných výbojů
- parametry sady pulzů částečných výbojů a přiloženého napětí, např. energie částečných výbojů, výkon částečných výbojů

Vyhodnocení výbojové činnosti se provádí především z parametrů sady pulzů. Základní elektrické parametry jsou definovány normou ČSN EN 60270 [7] :

- *Zdánlivý náboj* \Leftrightarrow Zdánlivý náboj q patří mezi parametry jednotlivého pulzu. Jedná se o nejpoužívanější a nejdůležitější veličinu pro určení intenzity výbojové činnosti. Je to celosvětově uznávaná veličina. Zdánlivý náboj je definován jako náboj, který na daném indikátoru výboje vyvolá stejný údaj jako samotný pulz částečného výboje. Základní jednotka C (Coulomb) je však pro praktické využití velmi vysoká a proto se většinou uvádí v mnohem menší jednotce pC . Hodnota tohoto parametru se však nerovná skutečné hodnotě částečného výboje, jedná se o přenesenou hodnotu, protože skutečnou hodnotu výboje nelze zjistit, protože se nachází někde uvnitř materiálu. Velikost tohoto parametru se udává k určitému časovému intervalu, nejčastěji k době periody zkušebního napětí.
- *Četnost impulzů* \Leftrightarrow Četnost impulzů n je počet impulzů vztažený k časové jednotce. Udává se v impulzech za sekundu s^{-1} . Obvykle se nepočítají všechny pulzy, ale jen pulzy, které jsou vyšší než udaná významná hodnota. Pulzy menší než tato hodnota jsou malé a svým významem nedůležité a proto se nezapočítávají.

- *Střední proud částečných výbojů* \Leftrightarrow Střední proud částečných výbojů I je integrální veličina, která udává součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného vztažného intervalu T dělený tímto intervalem. Udává se v jednotkách $C.s^{-1}$ nebo A resp. μA . V časovém intervalu T je tedy střední proud částečných výbojů:

$$I = \frac{1}{T} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_m|] \quad [C.s^{-1} \text{ nebo } A], \quad (5)$$

kde m je počet výbojů v časovém intervalu T .

Mají-li všechny výboje stejnou velikost zdánlivého náboje q , zjednoduší se vztah na:

$$I = nq \quad [C.s^{-1} \text{ nebo } A], \quad (6)$$

kde n je četnost částečných výbojů.

- *Součtový náboj* \Leftrightarrow Součtový náboj Q udává součet velikostí absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů. Tento součet se obvykle vztahuje k jedné periodě napájecího napětí. Udává se v jednotkách C , resp. pC . V běžné technické praxi se však tento parametr obvykle nepoužívá. Je nahrazován parametrem I .
- *Výkon částečných výbojů* \Leftrightarrow vyjadřuje střední výkon impulzů, které jsou dodávány na vývody měřené impedance. Vztahuje se vždy k danému časovému intervalu označovaném jako T :

$$P = \frac{1}{T} [q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_m U_m] \quad [W], \quad (7)$$

kde U_1, U_2, \dots, U_m jsou okamžité hodnoty zkušební napětí v okamžicích výbojů q_1, q_2, \dots, q_m a m je počet výbojů v časovém intervalu T .

Parametr se udává v jednotkách W , resp. mW . Parametr lze zjistit buď měřením nebo výpočtem.

Při stanovení parametru výpočtem je potřeba znát náboj q_i a okamžité hodnoty napětí na měřené impedanci U_i .

- *Střední kvadratický součet* je součet ploch jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů q_i během zvolené doby T dělený touto dobou. Označuje se D , udává se v jednotkách $A^2 \cdot s$, resp. $C^2 \cdot s^{-1}$.
Podobně jako předchozí parametr ho lze získat buď měřením nebo výpočtem podle vzorce ze zjištěných hodnot q_i :

$$D = \frac{1}{T} [q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2] \quad [A^2 \cdot s \text{ nebo } C^2 \cdot s^{-1}], \quad (8)$$

kde m udává počet výbojů za dobu T .

- *Počáteční napětí částečných výbojů* U_i označuje přiložené napětí, při kterém jsou ve zkoušeném objektu pozorovány opakující se částečné výboje, když je napětí přiložené ke zkoušenému objektu postupně zvyšováno z nižší hodnoty, při které nejsou pozorovány žádné částečné výboje. Toto napětí se udává ve voltech V , resp. kV [5].
- *Zhášecí napětí částečných výbojů* U_e představuje zkušební napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje, když je napětí přiložené ke zkoušenému objektu postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které jsou pozorovány částečné výboje. Stejně jako počáteční napětí se udává ve voltech V , resp. kV [5].

2.5 Škodlivé působení částečných výbojů na izolaci

Každý izolant stárne a postupem času se snižuje jeho elektrická pevnost. Tato elektrická pevnost může klesnout až na hodnotu, kdy může dojít k průrazu materiálu. Přes veškerou péči o izolační materiál se někdy může stát, že v materiálu dojde k elektrickému průrazu i při nižším napětí, než jaké materiál vydržel při přepětíových zkouškách. Tento jev vzniká působením částečných výbojů v plynně vyplněných dutinkách nalézajících se v izolantu.

Všechny druhy výbojové činnosti mají škodlivý vliv na izolační systém. Částečné výboje svými účinky způsobují změny chemických a fyzikálních vlastností izolantu. Působení částečných výbojů má za následek fyzikální erozi materiálu ačkoliv je energie výbojů velmi malá. Tyto změny jsou nevratné a poškození izolačního systému se projeví zkrácením doby

jeho životnosti a snížením elektrické pevnosti. Nejvíce škodlivé jsou zvláště chemické účinky, kdy působením částečných výbojů dochází k porušení povrchu dutinky vlivem ostřelování stěn dutinky elektrony a ionty. Porušení povrchu může být buď rovnoměrné, nebo se koncentruje do několika míst, kde se pak vytváří prohlubně. Stěna dutinky se tak stává vodivější a celková elektroizolační schopnost materiálu klesá. Úbytek vlastního materiálu izolantu je způsoben chemickými reakcemi a přeměnou pevné látky izolantu na plynné a kapalné sloučeniny. Produkty těchto reakcí se ukládají na stěnách dutinky a dochází ke vzniku krystalů. Tyto krystaly se vytvářejí, vyskytují-li se v prostředí, kde působí výboje prvky jako je vodík H_2 , uhlík C a kyslík O_2 . Někdy dokonce dochází ke vzniku kapiček nebo tenké vrstvičky kapaliny na povrchu dutinky. Na hranách a hrotech vzniklých krystalů se vytváří vysoká intenzita elektrického pole, což usnadňuje vznik dalších výbojů. Zvyšování nehomogenity v dutince vede k vytváření tzv. elektrického stromečku a jeho postupnému rozrůstání. V nejhroším případě může dojít k jeho nárůstu do té míry, že dojde k průrazu celé izolace.

Ne všechny pevné izolační materiály mají stejnou odolnost vůči působení částečných výbojů [1], [5]. Velmi dobrou odolnost mají materiály na anorganické bázi jako je porcelán, slída a sklo. I působení výbojů po dlouhou dobu nezpůsobí podstatné zhoršení vlastností. Výhodou je i vysoká teplotní odolnost těchto materiálů. Tyto materiály se však bohužel kvůli svým materiálovým vlastnostem (především křehkost) nedají přímo použít na výrobu izolace. Proto se zejména slída používá jako příměs do pryskyřic a textilií, ze kterých se již vytváří izolace vodičů elektrických strojů. Naopak materiály na organické bázi jako je např. polyetylen (PE), zesíťovaný polyetylen (XLPE), polytetrafluoretylen (PTFE, teflon), lamináty s pryskyřicovým základem a materiály využívající jako pojivo silikony, jsou na působení výbojů velmi citlivé. I působení výbojů po krátkou dobu může vést až k průrazu izolace. Z hlediska zkoumání částečných výbojů je tedy hlavní pozornost zaměřena především na organické materiály.

Malý škodlivý vliv mají vnější částečné výboje, které vznikají ve vnějších plynných látkách, protože se v těchto látkách přirozeně obnovuje jejich izolační schopnost.

Částečné výboje se v dielektrikách projevují elektro-erozivními, chemickými a tepelnými účinky popř. jejich kombinacemi [5].

➤ **Elektro-erozivní účinky** nastávají při vzniku oblouku v dutince. V blízkosti konce výbojového kanálu má elektrické pole podobné účinky jako pole v blízkosti špičatého

hrotu. Intenzita pole je velmi vysoká a pole je velmi nehomogenní. Při velké intenzitě elektrického pole může koncentrace tohoto pole vytvořit elektrický průraz. Tyto průrazy mohou v dutinkách vytvářet uhlíkové vodivé dráhy. Tyto vodivé dráhy od různých dutinek se mohou spojovat a vytvářet delší vodivé řetězce. Vznikající a spojující se kanály mají tvar tzv. elektrického stromečku. Erozivní účinky mají i elektrony a ionty, které ostřelují stěny dutinky a způsobují její rozrušování. Tím se zvětšuje rozměr dutinky, který může nabýt až takových hodnot, že přemostí elektrody a dojde k průrazu. To, jak daný izolant odolá výbojům ovlivňuje především jeho chemické složení a struktura, dále pak četnost výskytu výbojů a doba jejich působení.

- **Chemické účinky.** Chemickým působením mohou v dutince vznikat látky všech třech skupenství, tedy plynné, kapalné i pevné. Uvnitř dutinky se vytváří různé plyny, jako produkt reakcí kyslíku v dutince s chemickými sloučeninami vytvořenými na stěně dutinky. V dutince vlivem těchto procesů vzrůstá tlak a společně se změnou vodivosti stěn dutinky se změní i chování výbojů v dutince. Změněné vlastnosti prostředí pak vytváří vhodné podmínky pro výbojovou činnost. Ze vzduchu v dutinkách se na tyto chemické reakce uplatňují zejména prvky kyslík a dusík. Kyslík se působením výbojů rozkládá na ozón O_3 , který má značné oxidační účinky. Z dusíku se působením výbojů vytváří tzv. aktivní dusík, který má mnohem erozivnější účinky než běžný dusík. Dále při výbojích mohou vznikat i oxidy dusíku. Tyto dusíkaté oxidy obvykle reagují se vzdušnou vlhkostí a vytváří dusíkaté kyseliny. Společně s působením vysoké teploty se vytváří kyselina dusičná, která způsobuje intenzivní erozi stěn dutinky. Chemické látky se zpočátku vytváří pouze v prostoru dutinky. S postupem času však těchto látek přibývá a tyto se začnou šířit i do oblastí obklopujících dutinku a narušováním izolačního materiálu a jejich infiltrací do něj zvyšují jeho vodivost. Tyto vodivé oblasti často dosahují velkých rozměrů a významným způsobem zhoršují elektrické vlastnosti výchozího materiálu. Působí-li výboje v nehomogenitách zesíťovaného polyetyleny (XLPE) [1], vznikají plynné látky jako uhlíkové monoxidy a uhlíkové dioxidy. Ve velmi malém množství se vytváří i vodík H_2 . Obsahuje-li atmosféra vodu a je-li přítomný uhlíkový monoxid, vytváří se na povrchu zesíťovaného polyetyleny kapaliny na základě kyseliny mravenčí, octové a karboxylové. Z těchto kapalných látek se pak působením výbojů stávají pevné krystaly. Obdobně se na povrchu epoxidů vytváří kapaliny převážně kyselého charakteru. Tyto tekuté produkty pak pronikají do povrchu a zvyšují vodivost stěny dutinky až o 7 řádů [1].

- **Tepelné účinky.** Výbojový kanál se zahřívá na vysokou teplotu, která působí na stěny dutinky. Působením této vysoké teploty může docházet až k zuhelnatění povrchu tam, kde vznikl tento kanál. Tím se samozřejmě zvyšuje elektrická vodivost povrchu dutinky. Výboj jako takový je spojen s uvolněním nezanedbatelného množství tepelné energie. Není-li vytvořené teplo izolačním materiálem dostatečně dobře odváděno, může dojít k přehřátí materiálu a v nejhorším případě i k tepelnému průrazu. V materiálu izolantu vzniká jak teplo od výbojů, tak i teplo vzniklé dielektrickými ztrátami. Společně tak mohou přispět ke snížení napětí potřebného pro tepelný průraz. Zvyšování teploty materiálu má sice pozitivní efekt na snižování počtu výbojů, na druhé straně však dochází k tomu, že vznikající výboje mají větší intenzitu.

Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny některé havárie způsobené částečnými výboji a zároveň velmi názorně ukazují, proč je nutné částečné výboje sledovat.



Obr. 6 Zničený vývod zapouzdřeného vodiče 132 kV [26]



Obr. 7 Zničený blokový transformátor elektrárny [27]



Obr. 8 Poškozené vinutí transformátoru a jeho detail po rozebrání [13]

3 Měření částečných výbojů

Pro diagnostiku elektrických zařízení jsou důležité především citlivé nedestruktivní metody, pomocí kterých se dá dobře vyhodnotit stav izolačního systému stroje. Cílem měřicích metod částečných výbojů je určení typu a intenzity výbojové činnosti a pokud možno alespoň hrubé určení místa, kde k výbojům dochází. V návaznosti na tyto požadavky byly vyvinuty různé technologie pro sledování částečných výbojů v elektrických zařízeních zahrnující detekci elektrických, akustických, chemických a optických projevů částečných výbojů.

Základní rozdělení detekčních metod užitých podle fyzikálních projevů výbojů velmi názorně popisuje obr. 9.



Obr. 9 Principy detekce částečných výbojů [30]

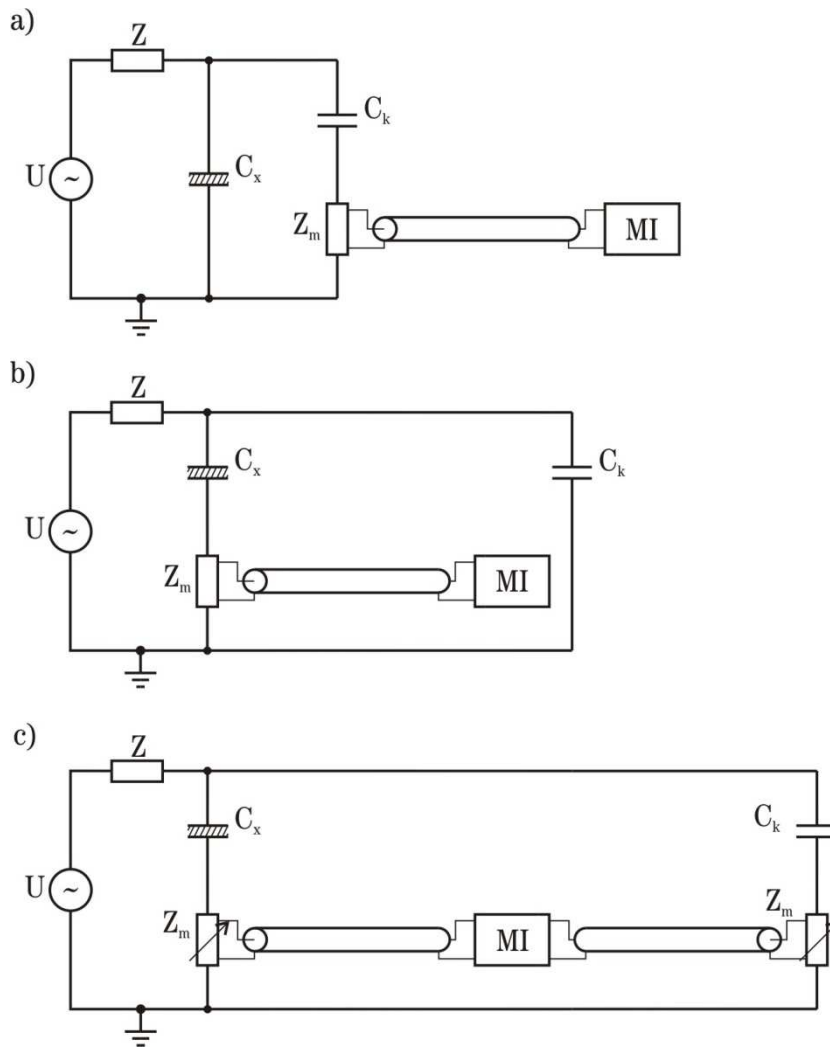
3.1 Konvenční měření částečných výbojů – galvanická metoda

Galvanická metoda patří mezi nejrozšířenější a nejužívanější měření částečných výbojů. Proto jsou i největší praktické zkušenosti s aplikací této metody.

První průmyslové zařízení pro měření částečných výbojů ve vysokonapětových izolacích bylo představeno počátkem roku 1940 [34]. Použitá metoda byla založena na standardu NEMA 107, která definovala měření ovlivňování zařízení radiovými vlnami a byla vyjadřována v μV . Nicméně jednou z chyb této metody bylo to, že tato úroveň byla odvozena od subjektivního dojmu akustického šumu slyšitelného lidským uchem, která však nebyla ve vzájemném vztahu s činností částečných výbojů. Proto byl vytvořen nový standard pro elektrické měření částečných výbojů odvozený od velikosti zdánlivého náboje, který je nově udáván v pC . První a druhé vydání publikace IEC 270 bylo v roce 1968 a 1981. Norma IEC 60270 (Metody pro testování vysokonapětových zařízení – Měření částečných výbojů, třetí vydání) byla vydána v prosinci roku 2000 a zahrnuje požadavky jak pro klasická analogová zařízení, tak i požadavky na digitální měřicí systémy. Nadto zachovává a doporučuje možnost specifického popisu měřicím systémem uživatele.

Pro lepší pochopení souvislostí aktuální verze normy IEC 60270, byla vydána technická brožura WG D1.33 „Metody pro měření a testování vysokého napětí“, která je určena jako směrnice pro konstruktéry, kteří se zabývají měřicími systémy založenými na konvenčním elektrickém měření částečných výbojů dle normy IEC 60270.

Dle normy IEC 60270 jsou navrženy celkem tři základní obvody pro měření částečných výbojů galvanickou metodou. Liší se zapojením měřicí impedance Z_m . Tyto obvody jsou dány výše uvedenou normou z toho důvodu, aby byla zajištěna reprodukovatelnost a porovnatelnost získaných hodnot. Dané tři obvody jsou zobrazeny na obr. 10 [2].



Obr. 10 Zkušební obvody dle normy IEC 60270 pro měření částečných výbojů [2]

- a) měřicí impedance v sérii s vazebním kondenzátorem
- b) měřicí impedance v sérii se zkoušeným objektem
- c) můstkový měřicí obvod

U - vn testovací transformátor

Z - odrušovací impedance

C_x - kapacita testovaného objektu

C_k - vazební kondenzátor

Z_m - měřicí impedance

MI - měřicí přístroj částečných výbojů

Odrušovací impedance Z je nečastěji řešena jako RLC člen, který funguje jako nízkofrekvenční propust. K tomuto RLC členu jsou obvykle paralelně připojeny ochranné prvky. Přívod k měřicímu přístroji je z důvodu eliminace rušení proveden stíněným koaxiálním kabelem.

Nejčastěji je používáno zapojení dle obr. 10a, kde je měřicí impedance Z_m zapojena v sérii s vazebním kondenzátorem C_k . Přes vazební kondenzátor C_k projdou pulzy částečných výbojů na měřicí impedanci Z_m . Testovaný objekt je přímo uzemněn. V praxi je často obtížné nebo nebezpečné testovaný objekt odpojit od země (i z důvodu elektrické ochrany) a protože to u tohoto měřicího obvodu není nutné, je tedy toto zapojení často využíváno. Další výhodou tohoto obvodu je to, že i v případě průrazu izolace na testovaném objektu nedojde ke zničení měřicího obvodu.

Obvod dle obr. 10b je možno použít tam, kde lze testovaný objekt odpojit od země. Výhodou tohoto zapojení proti předchozímu je však větší citlivost obvodu. Rozptylové kapacity se řadí paralelně k vazebnímu kondenzátoru C_k a tím jeho hodnotu zvyšují.

Obvod na obr. 10c se používá tam, kde se ve větší míře vyskytují rušivá pole. Oproti předchozím zapojením je však nutné použít dvě nastavitelné impedance. Diagonálně zapojené měřidlo měří rozdílové napětí na impedancích. Rušivé napětí vytvoří na obou impedancích stejný úbytek a měřidlo tedy nevykáže žádnou odchylku. Toto ale neplatí pro výbojový proud, který na impedancích způsobí nenulový rozdíl potenciálů, na který zareaguje měřidlo.

Měření částečných výbojů pomocí galvanické metody je velmi citlivé na rušení především od pulzů silové elektroniky, signály rádiových vysílačů, korony na vedení i kapacitních výbojů na částech pod napětím. Na odstranění tohoto rušení se nejčastěji používají digitální filtry.

Galvanická metoda používá jako vyhodnocovací parametr tzv. zdánlivý náboj, který nelze přímo změřit. Aby bylo možné jednotlivá měření mezi sebou porovnávat je nezbytné změřit odezvu měřicího obvodu na daný náboj. Proto se před samotným měřením provádí proces kalibrace obvodu. Toto se provádí tak, že se daným přístrojem (kalibrátorem) injektuje do obvodu předem známý náboj a na zobrazovacím zařízení se sleduje výstupní signál. Podle této referenční úrovně se pak provádí přepočet změřeného zdánlivého náboje.

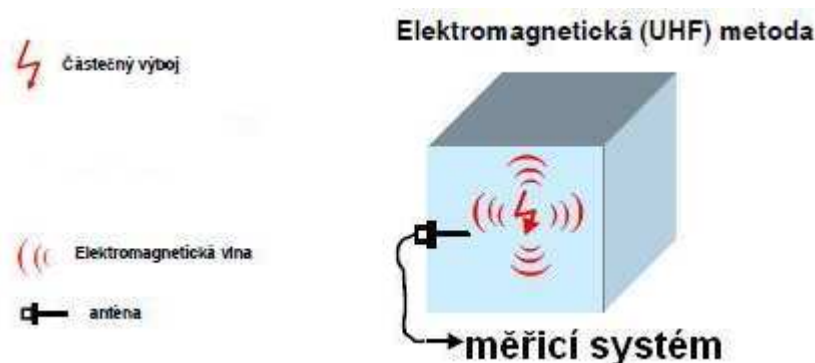
3.2 Nekonvenční metody měření částečných výbojů

Jako nekonvenční metody jsou označována ta měření částečných výbojů, která používají pro indikaci výbojové činnosti nepřímé projevy těchto výbojů. Do této oblasti zahrnujeme projevy optické, chemické, akustické a snímání elektromagnetických vln při výbojích vznikajících. Nekonvenční metody obvykle dosahují lepších parametrů při porovnání velikosti získaného signálu vůči šumu [28]. Nekonvenční metody nedokáží zjistit hlavní diagnostický parametr označovaný jako zdánlivý náboj z důvodu nemožné kalibrace obvodu známým nábojem.

Některá z těchto měření budou zahrnuta do nově připravované normy IEC 62478. Jedná se o snímání elektromagnetických projevů částečných výbojů a o detekci akustických vln.

3.2.1 Detekce částečných výbojů v kmitočtovém rozsahu UHF

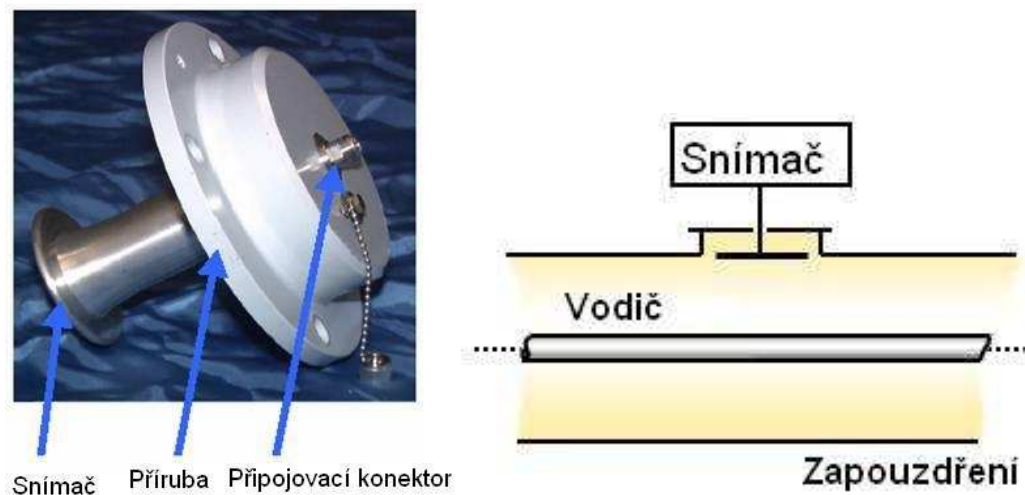
Z mnohých metod, které se v současné době využívají k měření částečných výbojů, se dostávají do popředí zájmu metody využívající měření ve frekvenčním pásmu UHF. Dle normy se toto pásmo definuje od 300 MHz do 3000 MHz.



Obr. 11 Základní princip UHF metody [20]

S těmito technikami pro UHF se začalo poprvé experimentovat asi před dvaceti lety. Techniky měření částečných výbojů pomocí UHF mohou být velmi užitečné z hlediska hodnocení stavu izolace. Tyto techniky přitom nepatří mezi cenově nákladné, mohou být

prováděny on-line a zároveň i umožňují lokalizovat místo poruchy. Prvotní užití bylo zejména u plynem izolovaných systémů.



Obr. 12 Použití UHF kapacitního snímače u zapouzdřených vodičů [26]

Později se tato metoda začala používat i u výkonových transformátorů. Měřicí metodu lze aplikovat i na stanovení stavu vysokonapěťové izolace kondenzátorů, kabelů, průchodek a vypínačů. U transformátorů je zdrojem problémů především celulózový papír použitý na izolaci vinutí. Životnost tohoto papíru je podstatně kratší než životnost ostatních dílů a proto je třeba se zaměřit na sledování výbojové činnosti probíhající v tomto materiálu.

Při použití galvanické metody totiž u transformátorů dochází k poměrně velkému útlumu signálu částečných výbojů ve vinutí cívek a v různých parazitních kapacitách a indukčnostech. Proto se galvanickou metodou měří zhruba do 1 MHz. Při době trvání částečného výboje v řádu ns jsou následné signály pohlceny velkou kapacitou vinutí. Vyšší frekvence nad 1 MHz lze však poměrně dobře zachytit v prostoru mezi vinutím a nádobou transformátoru.

Hlavní předností této techniky je vyšší odolnost proti rušení oproti konvenčním metodám měření dle IEC 60270 a možnost použití této metody pro on-line měření. Potlačení rušení se dosahuje laděním měřicího systému do pásma, kde se rušící pozadí nevyskytuje nebo je minimální [31]. Tato metoda patří v současné době mezi nejperspektivnější směry pro nekonvenční sledování výbojové činnosti. Je zařazena do nově připravované mezinárodní normy IEC 62478.

Senzory v pásmu UHF snímají signály šířící se prostorem nádoby transformátoru. To je rozdíl oproti galvanické metodě, která snímá signály šířící se po vedení. Převod elektromagnetického signálu obvykle zajišťují senzory pracující na induktivním nebo kapacitním principu. Aktivní část UHF antény je namontována do vnitřního prostoru měřeného zařízení.

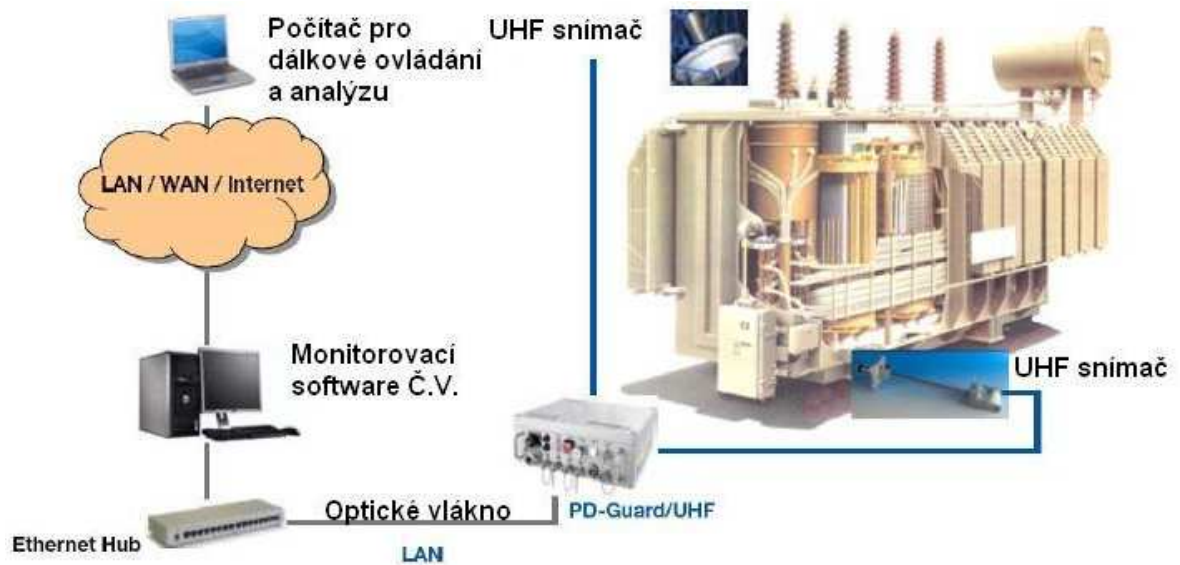
Měření pomocí UHF dosahuje oproti klasickým metodám vyšší citlivosti a dosahuje i lepšího poměru signál/šum. Je to dáno tím, že se v tomto frekvenčním pásmu vyskytuje mnohem méně rušivých signálů. Např. rušení korunou se v těchto frekvencích vůbec nevyskytuje. Použije-li se více rozmístěných čidel, lze pomocí časové diskriminace signálu provádět detekci místa působení částečných výbojů.

V transformátorech vytváří částečné výboje elektromagnetické vlny na frekvencích 200-1500 MHz, které mohou být snímány širokopásmovými UHF čidly. Částečnými výboji jsou vytvářeny i vyšší frekvence ale ty jsou poměrně výrazně tlumeny použitými materiály v transformátoru (olej, papír). Pro některá frekvenční pásma je útlum signálu velmi malý, dokonce nižší než pro klasickou galvanickou metodu a v těchto pásmech lze dosáhnout velmi vysoké citlivosti snímání.

Při měření výbojů u transformátorů galvanickou metodou se obvykle instaluje snímací člen na průchodku. Tímto měřením lze zachytit silné výboje o úrovni až tisíců pC . Tato úroveň však již indikuje velmi vážnou poruchu a je třeba okamžitě nasadit citlivější metodu pro určení místa výbojů nebo typu poruchy. Vývoj vážné poruchy může být velmi rychlý a trvá i jen několik hodin a proto je nutné včas zareagovat a transformátor odpojit. Metoda měření v pásmu UHF je citlivější a dokáže indikovat úrovně částečných výbojů ve stovkách pC . Pro potvrzení správné diagnózy pro odpojení transformátoru z provozu se obvykle použijí ještě výsledky měření pomocí analýzy rozpuštěných plynů v oleji.

Ne všechny druhy výbojů jsou nebezpečné, mezi vážné patří zejména výboje ve vinutí strojů, výboje v průchodkách a výboje v oblasti přívodů do průchodek. Zde je nejčastěji použita papírová izolace, která je velmi náchylná na zuhelnatění působením výbojů a tedy k velkému riziku průrazu.

Tyto znalosti mohou být uplatněny především na výkonových transformátorech, kde mohou rychle určit druh a polohu poruchy.

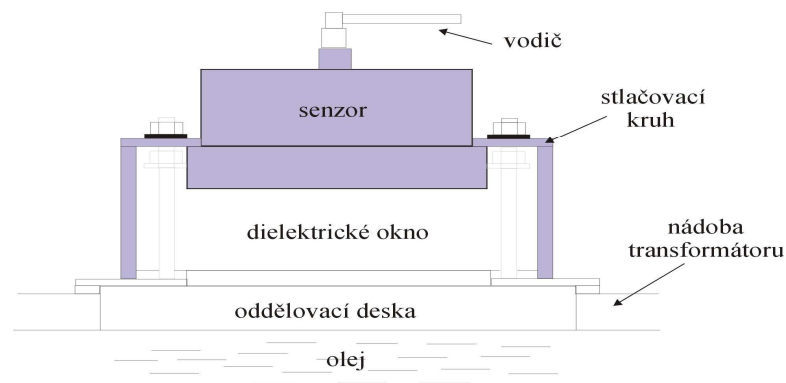


Obr. 13 Schéma monitorovacího systému UHF na transformátoru [27]

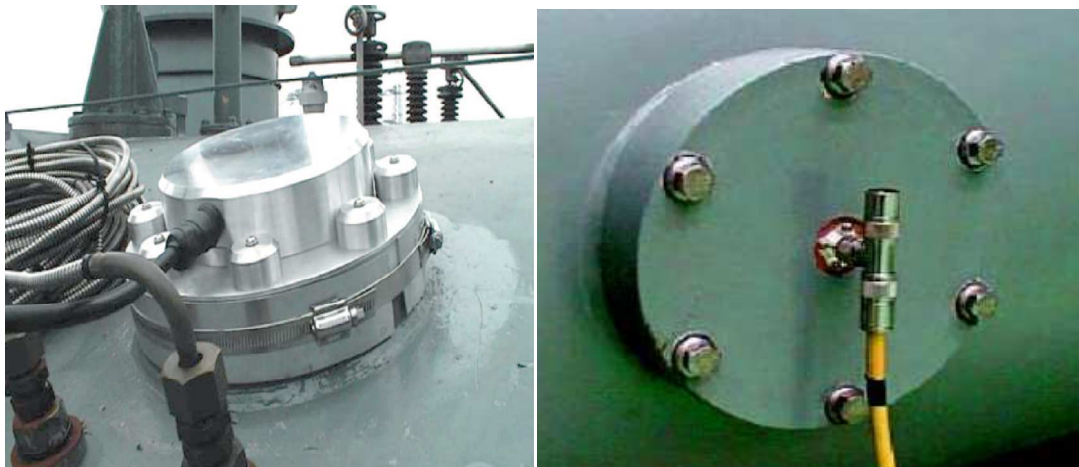
Ve vývoji jsou i další metody, pomocí kterých by se dala lokalizovat výbojová činnost. Praxí je však požadován konkrétní elektrický model, který dostatečně přesně popíše chování vinutí. Poměrně dobře umožňuje určit polohu výbojů akustické měření částečných výbojů, ale může vzniknout problém s výkladem výsledků měření. To je způsobeno tím, že se akustická vlna může šířit rychleji po povrchu ocelové nádoby transformátoru než její přímá část, která se objemem olejové náplně šíří pomaleji.

V současné době se na transformátorech stále více začíná nasazovat metoda UHF, která je citlivější než akustická metoda, protože signál prochází přímo hmotou izolace. Metoda měření pomocí UHF signálu umožňuje zjištění signálu částečných výbojů, umožňuje zjistit polohu, umožňuje provádět analýzu a monitoring. Transformátor ale musí být již z výroby opatřen třemi nebo čtyřmi UHF snímači. Nádrž transformátorového oleje musí být opatřena tzv. dielektrickými okny nebo dielektrickými pouzdry, které umožní instalaci UHF snímačů. U nových transformátorů se toto okno připraví ve výrobě. Dielektrické okno je v podstatě velký otvor v kovové nádobě transformátoru, přes který mohou procházet elektromagnetické vlny na snímací anténu (snímač). Jako nejvhodnější dielektrický materiál na tato okna se jeví PTFE a materiály na bázi epoxidových pryskyřic. Je možné použít i jiné materiály, které propustí signál UHF k anténě a zároveň budou dobře odolné vůči účinkům oleje a umožní hermetické uzavření nádoby transformátoru. Starší transformátory obvykle nejsou těmito okny vybaveny, ale je možno je dodatečně vytvořit např. při opravě a revizi. Je doporučeno tato okna nebo pouzdra předpřipravit i když nemusí být hned využívána pro

instalaci antén. Toto řešení potom umožní i za plného provozu připojit antény a provádět měření.



Obr. 14 Řez dielektrickým oknem s UHF senzorem [14]



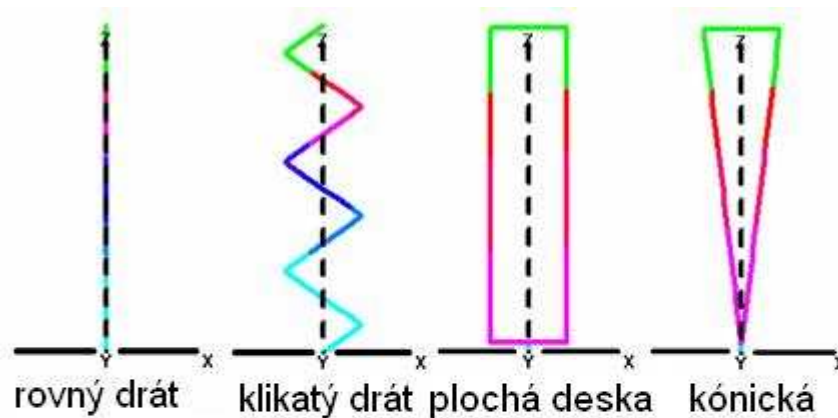
Obr. 15 Praktické provedení dielektrického okna [21], [24]

UHF senzory musí být širokopásmové, protože frekvenční spektrum vzniklého částečného výboje dopadající na snímač, je silně závislé na poloze výboje a cestě signálu ke snímači. Minimální citlivost těchto snímačů by měla být v rozmezí 200 MHz – 1500 MHz. Snímač je obvykle vyroben z kovové destičky vložené do trubice se stlačeným plynem. Měřené frekvence se nastavují hornopropustním filtrem a nastavitelnou vstupní impedancí [14].

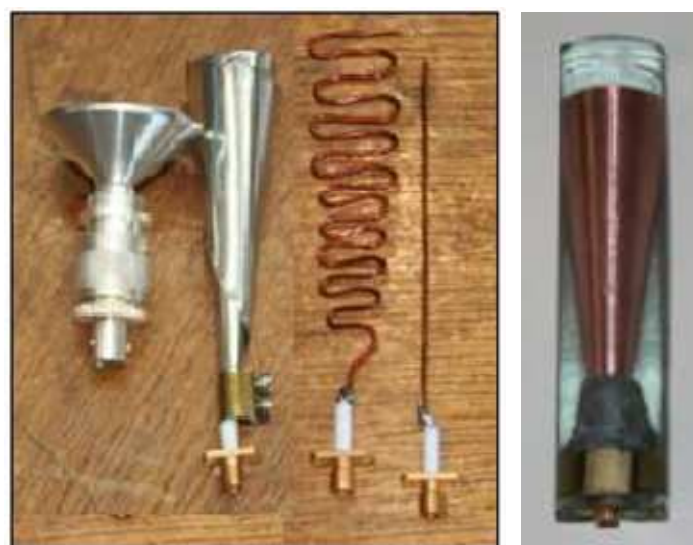
Protože starší transformátory obvykle nejsou dielektrickými okny vybaveny, byl vynalezen jiný způsob pro osazení UHF snímače (antény) [31]. Nejvhodnější místo pro

vložení tohoto snímače je skrze olejový ventil osazený na nádobě transformátoru. Při instalaci této antény většinou ani není nutné transformátor odpojit ze sítě. Velikost otvoru vypouštěcího ventilu oleje je omezující faktor pro návrh vhodné antény. Průměry těchto otvorů se liší dle výrobce a výkonu transformátoru. Nejčastěji používaný průměr je pak 50-60 mm.

Na základě již provedených studií je nutný frekvenční rozsah antény přijímaného signálu v oblasti 200 MHz až 1,5 GHz. Pro toto frekvenční pásmo by bylo nejvhodnější použít spirálovou anténu. Ale rozměry olejového otvoru vyžadují konstrukční úpravy snímací antény. Pomocí počítačových simulací je nutné navrhnout anténu, která splňuje požadavky na tvar přijímané UHF vlny, impedanci antény, efektivní plochu a dostatečný zisk. Délka antény je cca 200-300 mm. Průměr antény je cca 25 mm. Vhodné tvary antén pro daný účel jsou na obr. 16.



Obr. 16 Tvary UHF antén [31]



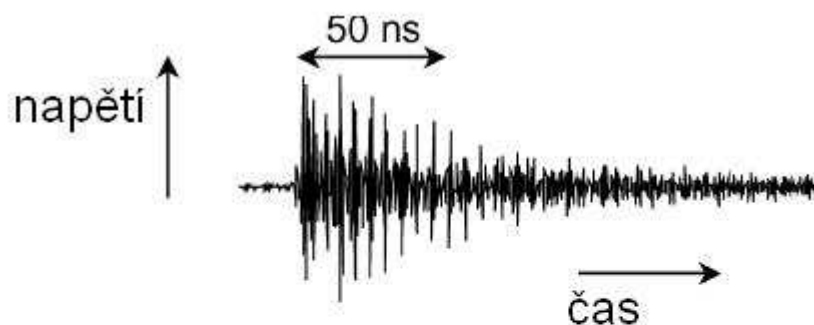
Obr. 17 Ukázky praktického provedení antén (krátká kónická, dlouhá kónická, trapezoidní, rovný drát) [31]

Provedením testování jednotlivých antén a porovnáním jejich parametrů bylo zjištěno, že nejlepších provozních výsledků dosahuje kónická anténa. Nejlepších výsledků při měření (nejvyšší citlivosti) se dosahuje při jejím plném vnoření do prostoru transformátoru. Není tedy žádoucí, aby její jakákoliv část byla překryta kovovou trubkou olejového ventilu. Anténa dosahuje i velmi dobrých výsledků, co se týče potlačení šumového pozadí. Tato metoda vkládání antény přes olejový ventil je další možností, jak měřit UHF signály částečných výbojů. Nevýhodou oproti použití více UHF snímačů přes dielektrická okna je to, že neumožňuje lokalizaci zdroje částečných výbojů. Její primární využití se primárně předpokládá jako doplňková metoda ke galvanické metodě dle IEC 60270. Je však nutno provést srovnávací kalibraci, aby výsledky měření z obou metod byly porovnatelné.



Obr. 18 Ukázka instalace UHF antény skrze olejový ventil [33], [32]

Energie UHF signálu vytvořeného částečným výbojem je částečně pohlcena konstrukčními materiály použitými v daném zařízení. Odhad útlumu signálu vzhledem k vzdálenosti od jeho působení může být proveden ze znalosti průběhu poklesu amplitudy typického UHF signálu. Doba trvání prvotního proudového pulzu částečného výboje je kolem jednotek ns. Po zhruba 50 ns trvání elektromagnetické vlny, klesá její velikost na polovinu počáteční hodnoty. Elektromagnetická vlna se šíří od zdroje rychlostí světla všemi směry kulovou vlnou, pokud ovšem není zdeformována lomy a odrazy. Signál, který zachytíme na snímači je většinou výsledkem mnohačetného odrazu ve zkoumaném prostoru.



Obr. 19 Typický průběh UHF signálu [21]

Metoda UHF měření částečných výbojů je založena na skutečnosti, že jsou působením výboje elektrony odtrženy od molekuly nebo atomu. Během pulzu částečného výboje jsou elektrony nejprve v klidu, pak jsou uvolněny z atomů nebo molekul a následně jsou prudce urychleny elektrickým polem (proud narůstá). Po krátké době jsou opět uvedeny do klidu (proud klesá). Když elektrický náboj mění svou rychlost, vznikne elektromagnetické záření. Zdrojem elektromagnetického záření je především velmi krátká doba čela pulzu částečného výboje. Vzniklá elektromagnetická vlna má přechodný charakter. Toto záření se šíří od zdroje částečných výbojů rychlostí světla všemi směry. Většina těchto UHF signálů zůstává uzavřena v nádobě transformátoru. Pro změření těchto signálů je tedy třeba do tohoto vnitřního prostoru instalovat vhodné snímače.

Frekvence elektromagnetického vyzařování pulzu částečného výboje je především v UHF pásmu (300-3000 MHz). Platí, že čím je kratší doba trvání pulzu, tím je vyšší generovaná frekvence. Proto mají kratší impulzy částečných výbojů vyšší spektrální energii na vyšších frekvencích [14]. Proud i jednotlivého výboje je popsán exponenciální rovnicí:

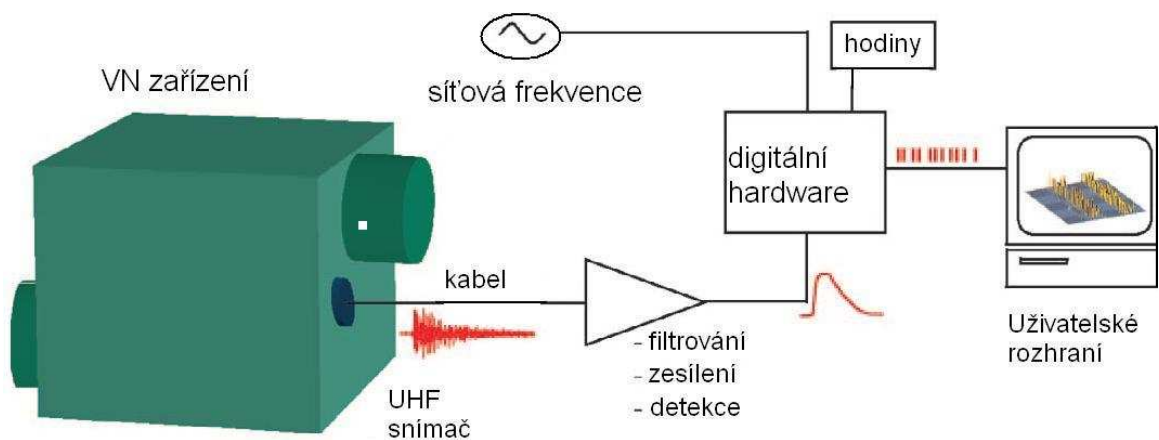
$$i(t) = \frac{I}{T} t e^{(1-t/T)} \quad (9)$$

kde t je čas, I je parametr popisující špičkový proud a T je parametr charakterizující dobu náběhu. Celkové množství náboje q v tomto pulzu je:

$$q = eIT \quad (10)$$

V omezeném prostoru jako je transformátorová nádoba, vznikají odrazy díky mnoha vodivým plochám. Další odrazy vznikají na spojích dielektrik. Vytvořená elektromagnetická energie se šíří prostorem transformátoru všemi směry. Pulzy částečných výbojů mohou být nejlépe snímány za podmínky, že délka vlny vyzářené energie je menší než jsou rozměry transformátorové nádoby. Pro zjišťování signálů v oblasti UHF pásma musí platit, že rozměr nádoby musí být větší než 1 metr. Délka vlny UHF je 10cm – 1m.

Základní blokové schéma monitorovacího systému UHF je zobrazeno na obrázku 20. UHF signály z jednoho nebo více snímačů jsou filtrovány a zesíleny před detekcí a převodem na číslicový signál. Získaná signálová data jsou ukládána v počítači. Každý získaný pulz může být potom spojen s konkrétním časem. Velikost zobrazených pulzů je pak úměrná energii UHF signálu. Pomocí specializovaných softwarových nástrojů mohou být rozpoznány vzory v získaných datech a poskytnuty důležité informace ohledně podstaty a charakteru zdroje částečných výbojů. Realizace uvedeného blokového schématu je použitelná jak pro přenosné monitorovací systémy, tak i pro stacionární průmyslové instalace s dálkovým přístupem z řídicího centra.

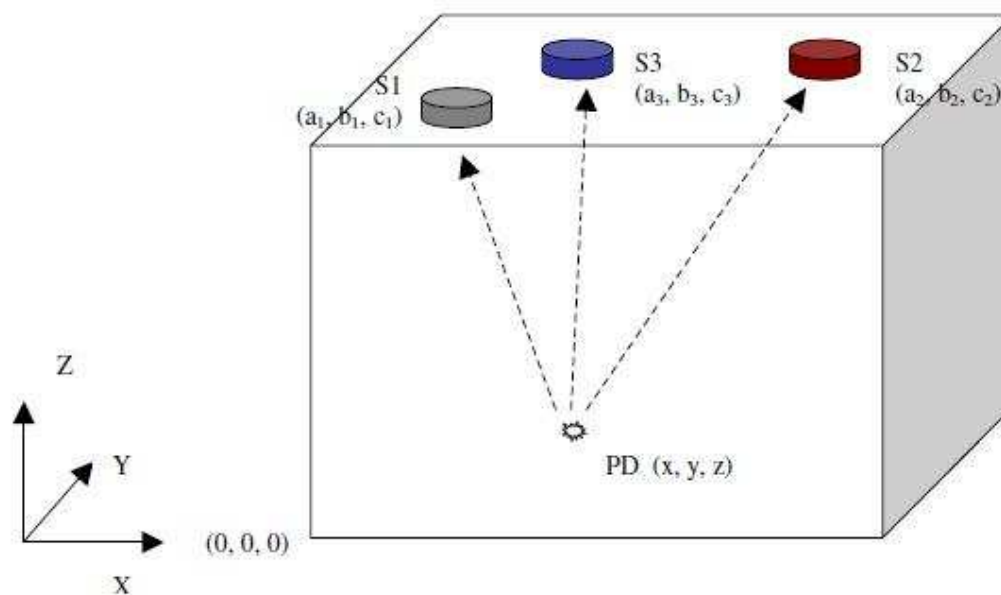


Obr. 20 Blokové schéma monitorovacího systému UHF [21]

3.2.1.1 Analýza UHF signálu částečných výbojů z transformátoru

Šíření UHF elektromagnetických vln v geometricky složitém prostředí a jejich matematický popis je velice komplikovaná záležitost. Je třeba vytvořit trojrozměrný model transformátoru a formulovat vliv prostředí na šíření vln, t.j. zohlednit dráhy vlny v prostoru a její možné odrazy. Elektromagnetickou vlnu mohou též negativně ovlivňovat velmi silná magnetická pole obvykle působící ve vysokonapěťovém zařízení. Snímací senzor může ovlivnit i rušení působící v prostředí elektráren nebo rozveden.

Signál UHF od částečných výbojů dopadne na dva snímače současně pouze v případě, že je zdroj signálu stejně vzdálen od obou snímačů a když jsou přívodní kabely ke snímačům stejně dlouhé [24]. V opačném případě vzniká mezi příchozími signály na snímače časová odchylka. Pro určení správné polohy zdroje signálu v definovaném prostoru je zapotřebí použít nejméně tři snímače. Na obr. 21 je zobrazen princip snímání pomocí těchto snímačů.



Obr. 21 Použití tří snímačů pro lokalizaci zdroje částečného výboje [24]

Pro každý výskyt částečného výboje jsou zaznamenány tři časové odchylky Δt_{12} , Δt_{23} , Δt_{31} . Bude-li docházet k výbojové činnosti na několika místech v jeden okamžik, budou opakovaně zaznamenávány shodné časové rozdíly Δt , které budou odpovídat konkrétním místům výbojů. Polohy všech tří snímačů jsou v počítačovém modelu předdefinovány.

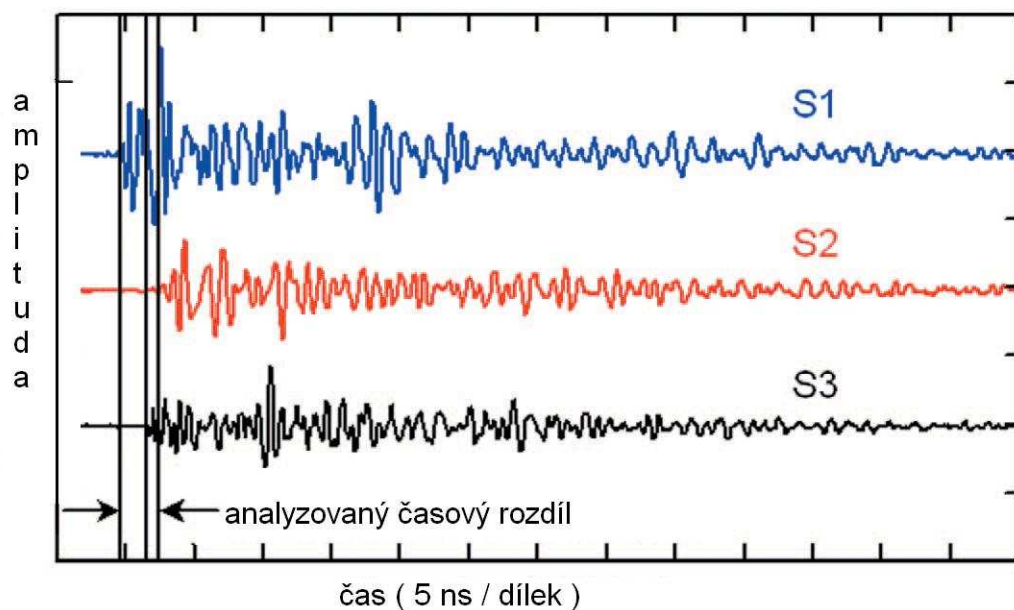
Rychlost šíření elektromagnetických vln v prostředí označíme jako v . Na základě těchto poznatků můžeme sestavit tři rovnice popisující vzdálenosti.

$$v \cdot \Delta t_{12} = \sqrt{(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 + (z - c_1)^2} - \sqrt{(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 + (z - c_2)^2} \quad (11)$$

$$v \cdot \Delta t_{23} = \sqrt{(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 + (z - c_2)^2} - \sqrt{(x - a_3)^2 + (y - b_3)^2 + (z - c_3)^2} \quad (12)$$

$$v \cdot \Delta t_{31} = \sqrt{(x - a_3)^2 + (y - b_3)^2 + (z - c_3)^2} - \sqrt{(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 + (z - c_1)^2} \quad (13)$$

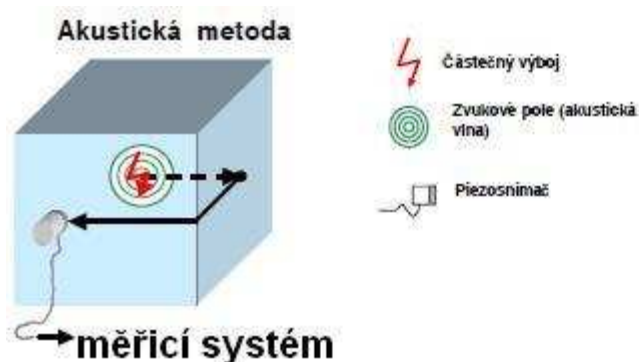
Vyřešením těchto tří rovnic získáme souřadnice x , y , z , které určí polohu zdroje částečného výboje. Toto je však pouze ideální teoretický předpoklad. Signál částečného výboje v reálném prostředí však podléhá mnoha zlomům a odrazům než se dostane na UHF snímač. V úvahu je nutné brát i útlum samotného signálu. V přímé cestě signálu obvykle stojí mnoho překážek, které tento signál nemůže přímo překonat. Pro přesné určení místa výboje je třeba započítat malé časové zpoždění signálu. Pro tyto výpočty je nezbytné znát vnitřní geometrickou strukturu zkoumaného zařízení a pro praktický výpočet je nutné vytvořit velmi složitý numerický model odlišný pro každý typ a konstrukci transformátoru.



Obr. 22 Typické UHF signály získané třemi snímači [22]

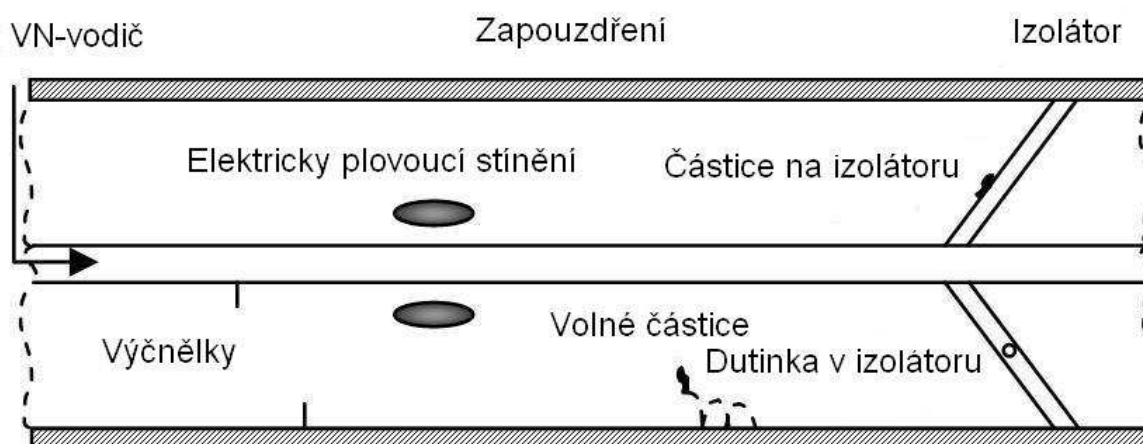
3.2.2 Akustická (ultrazvuková) detekce částečných výbojů

Při vzniku částečných výbojů dochází v dielektriku ke změnám náboje, které způsobí velmi rychlé uvolnění energie. Akustický signál je způsoben tlakem, který vyvolá částečný výboj v izolaci.



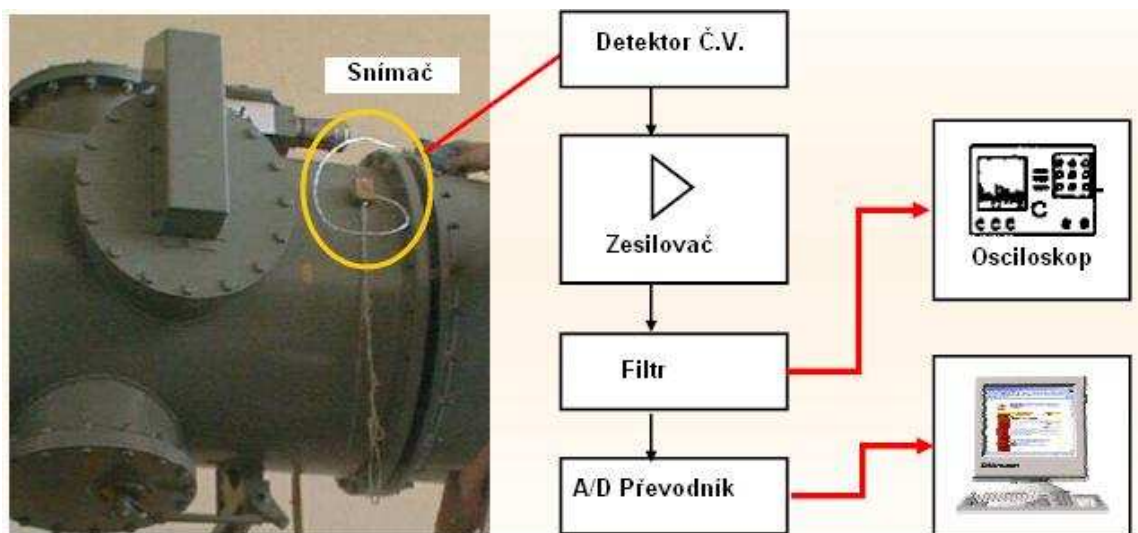
Obr. 23 Základní princip akustické metody [20]

Při vzniku výboje vznikají různé typy vln, které se šíří prostředím různými rychlostmi. Pro detekci těchto tlakových vln se používají mikrofony, ultrazvukové kondenzátorové směrové mikrofony a piezoelektrické měniče. Dle doporučení sdružení CIGRE JWG 33/23.12 se toto měření provádí ve frekvenčním pásmu 10 kHz až 300 kHz [26]. Nejčastější užití metody je na zapouzdřených vodičích, rozvodnách a transformátorech. Používá se především pro lokalizaci místa částečných výbojů.



Obr. 24 Zdroje částečných výbojů u zapouzdřených vodičů [26]

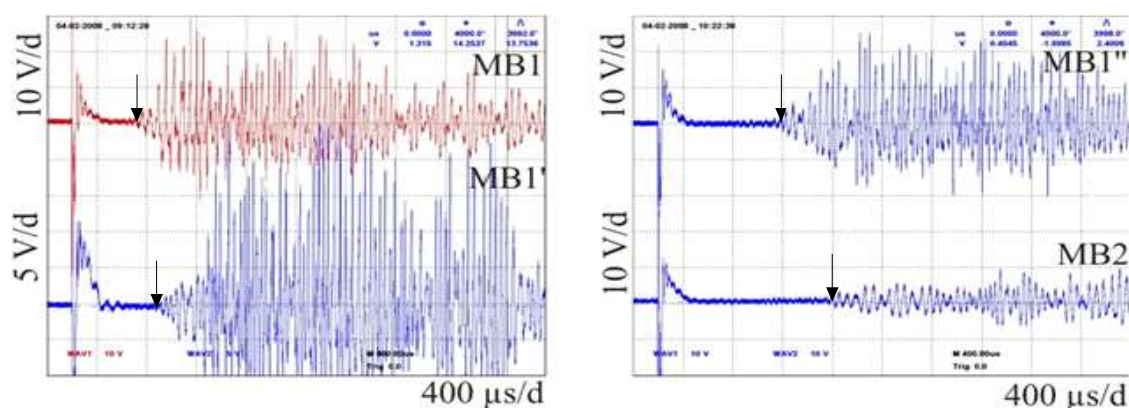
Tvar naměřeného signálu je ovlivněn mnoha vnějšími parametry (zdroj signálu, cesta signálu, měřicí systém, charakteristika snímače apod.). Pro vyhodnocení se používá počítač s příslušným programem. Oproti galvanické metodě má toto měření několik nesporných výhod. Mezi ně patří především odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Toho se často využívá především v prostředí zapouzdřených rozvodů a elektráren, kde toto rušení obvykle velmi zkresluje výsledky naměřené galvanickou metodou. Ovšem ani této metodě se nevyhnou některé rušivé faktory. Jsou to zdroje mechanických vibrací (motory, čerpadla, ventilátory), vibrace způsobené elektromagnetickými silami, magnetostrické, vibrace jádra transformátoru atd. Frekvence vibrací těchto zdrojů rušení je obvykle nižší než spektrum vibrací vytvořené částečnými výboji a proto většinou nedochází k ovlivnění výsledků měření. Pomocí digitálních metod zpracování signálu lze většinou zdroje rušení z naměřeného signálu poměrně účinně vyfiltrovat [8].



Obr. 25 Princip akustické detekce částečných výbojů [30]

Metoda měření částečných výbojů pomocí snímání odezev ultrazvukových vln je metoda nevyžadující žádné zásadní mechanické narušení měřeného zařízení (piezočidla se umísťují na povrch měřeného zařízení nejčastěji lepením).

Metoda snímání ultrazvukových vln je metoda lokalizační a lze ji aplikovat kdykoliv za provozu stroje. Tuto metodu lze použít pro krátkodobé i dlouhodobé (on-line) sledování výbojové činnosti. Akustické měření má významný přínos především pro předvídání dlouhodobého stavu stroje.



Obr. 26 Ukázka zpoždění signálů při akustickém měření [16]

Na obr. 26 je uveden osciloskopický záznam měření částečných výbojů akustickou metodou. Je zde vidět jasné zpoždění příchodu signálu na dva snímače. Tohoto zpoždění se využívá při výpočtu lokalizace signálu. Matematické řešení lokalizace je shodné jako v případě šíření UHF signálu, viz rovnice (11), (12), (13). Pouze je jiná (nižší) rychlost šíření signálu v .

3.2.2.1 Teoretický rozbor akustických vln

Při výskytu částečného výboje dochází k vytvoření akustické vlny. Tato vlna má však kmitočet obvykle vyšší než 20 kHz a proto hovoříme o ultrazvukové detekci. Ultrazvuk je akustické mechanické vlnění, které je mimo slyšitelný rozsah lidského ucha. Vlnová délka ultrazvuku je menší než vlnová délka zvukového vlnění, proto je ultrazvuk méně ovlivněn ohybem. Výrazný je jeho odraz od překážek a je méně pohlcován kapalinami a pevnými látkami [35]. Získaný signál závisí jak na použitém čidle, tak i na vlastnostech prostředí, kterým ultrazvuk proniká. Ultrazvukové čidlo snímá akustický tlak p dané ultrazvukové vlny. Tento tlak je definován rovnicí:

$$p = z \cdot v \quad (14)$$

Kde p je akustický tlak, z je měrná akustická impedance a v je akustická rychlost [15]. Akustická rychlost je rychlost kmitání částice kolem rovnovážné polohy. Jde o mechanické kmity částic pro frekvence vyšší než 20 kHz a akustická rychlost je vyjádřena derivací

okamžité výchylky kmitů a . Pro energeticky malé zdroje ultrazvuku jsou tyto amplitudy velmi malé a příliš se neodlišují od sinusového průběhu [15].

Obecně je akustická impedance komplexní, protože může být fázový posun mezi akustickým tlakem a rychlostí. Uplatní se především pro postupnou rovinnou nebo kulovou vlnu. V nekonečném prostředí má reálný charakter a označuje se jako měrný akustický vlnový odpor, který udává vzorec ρc . Akustická impedance má zásadní vliv na odraz a přestup ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí [16].

Akustická rychlost je pak dána vztahem [17]:

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A \cos(\omega t - \varphi) \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (15)$$

Kde a rovinná vlna,
 $\omega = 2\pi f$ úhlová frekvence [rad.s⁻¹],
 A amplituda výchylky [m],
 $\omega(x/c) = \varphi$ fázový úhel [rad].

Ultrazvuková vlna projde prostředím s vlnovým odporem ρc a vytvoří v něm akustický tlak

$$p = \omega \cdot A \cdot \rho c \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \text{ [Pa]} \quad (16)$$

kde $P = \omega A \rho c$ amplituda akustického tlaku [Pa],
 $V = \omega A$ amplituda akustické rychlosti [m.s⁻¹],
 c rychlost šíření vlny [m.s⁻¹],
 x souřadnice polohy [m].

Stejně jako pro elektrotechniku se i zde zavádí efektivní hodnoty [17]:

$$p_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}}, \quad v_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Součin těchto efektivních hodnot pak udává intenzitu ultrazvukové vlny:

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{1}{2} \cdot P \cdot V = \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{\rho c} \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (18)$$

Obdobně jako u elektrotechnických veličin je intenzita určena výkonem procházejícím přes jednotkovou plochu. Výkon vlny určuje vztah:

$$N = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot S \quad [\text{W}] \quad (19)$$

Ultrazvukové vlny se mohou šířit prostředím několika možnými způsoby [15], [16]:

- **podélné vlny** – částice prostředí se pohybují ve směru šíření vlny. Toto šíření se uplatňuje nejčastěji pro všechna skupenství látek, kde je délka vlny menší než rozměr prostředí.
- **příčné vlny** – částice prostředí kmitají kolmo ke směru šíření vlny. Uplatňuje se pouze pro pevné skupenství látky. Rychlost šíření je nižší než u šíření podélného.
- **povrchové vlny** – částice se pohybují po povrchu tuhého prostředí nebo v jeho tenkých vrstvách, hloubka průniku těchto částic je menší než vlnová délka ultrazvukové vlny.
- **deskové (Lambovy) vlny** – vlny se šíří materiálem jehož geometrické rozměry přibližně odpovídají ultrazvukové vlně. Typicky se toto šíření uplatňuje v deskách nebo drátech.

3.2.2.2 Šíření ultrazvuku v pevných látkách

Pevné látky přenáší všechny druhy ultrazvukových vln. Rychlost šíření je konstantní ve všech směrech. Tato rychlost závisí na vlnové délce ultrazvuku a rozměru prostředí, kde se šíří.

Rychlost šíření vyjadřuje rovnice [17]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (20)$$

kde E je dynamický modul pružnosti v tahu [Pa],

ρ - hustota [kg m^{-3}],

μ - Poissonovo číslo.

Příčné vlny se šíří dle rovnice [17]:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (21)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku (Pa)

Poměr rychlosti příčného a podélného šíření je dán Poissonovým číslem podle vztahu [17]:

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \quad (22)$$

Poissonovo číslo je převrácená hodnota Poissonovy konstanty, udává poměr mezi příčným zkrácením a podélným prodloužením tyče čtvercového průřezu při tahové deformaci. Různé druhy materiálů nemají tuto konstantu stejnou [15]. Pro frekvenční rozsah 20 kHz – 20 MHz je rychlost šíření ultrazvuku nezávislá na jeho frekvenci.

3.2.2.3 Šíření ultrazvuku v kapalných látkách

Oproti pevným látkám je rychlost šíření ultrazvuku v kapalinách ovlivněna hustotou dané kapaliny a jejím tlakem. V kapalinách se ultrazvuk šíří podélnými vlnami, výjimkou jsou pouze extrémně husté kapaliny. Rychlost šíření ultrazvuku pro tyto podélné vlny je dána vztahem [17]:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\beta_{iz}\rho}} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (23)$$

kde $K = -(\partial P/\partial V_0) V_0$ je adiabatický modul objemové pružnosti [Pa],

- P - tlak [Pa],
- V_0 - objem [m^3],
- β_{ad} - adiabatická stlačitelnost [Pa^{-1}],
- β_{iz} - izotermická stlačitelnost [Pa^{-1}],
- $\kappa = \beta_{iz}/\beta_{ad} = c_p/c_v$ - poměr měrného tepla při konstantním tlaku p a objemu V ,
Poissonova konstanta

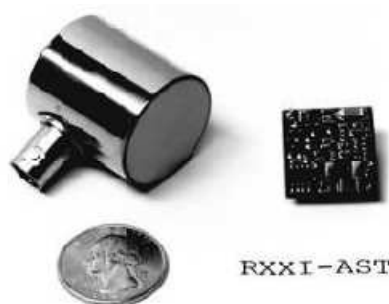
Při změně teploty kapaliny dochází i ke změně rychlosti šíření vlny. Toto zhruba vystihuje následující rovnice [17]:

$$c(\Theta) = c_0 + b(\Theta - \Theta_0) = c_0[1 + b'(\Theta - \Theta_0)] \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (24)$$

- kde c_0 je rychlost při počáteční teplotě Θ_0 [m s^{-1}],
- b - absolutní teplotní součinitel [$\text{m s}^{-1} \text{K}^{-1}$],
- b' - relativní teplotní součinitel [K^{-1}].

3.2.2.4 Piezoelektrické snímače

Pro zachycení ultrazvuku se používají především piezoelektrické sondy osazené na povrch nádoby transformátoru a vhodně rozmístěné. Tato čidla převádí dopadající mechanickou energii uloženou v ultrazvukové vlně na elektrický signál. Piezoelektrický jev je založen na vzniku elektrického napětí na plochách krystalu při jeho mechanické deformaci. Nejznámějšími materiály využívající piezoelektrický jev je křemen nebo Seignettova sůl (tetrahydrát vínanu draselno-sodného).



Obr. 27 Piezosnímač [26]

Tyto materiály mají takovou krystalovou mřížku, že působení síly na krystal vyvolá vznik elektrického náboje na protilehlých stranách krystalu. Elektrický náboj vytvoří posunutí iontů v krystalové mřížce. Piezoelektrický jev se vytvoří pouze u krystalů, které nemají střed souměrnosti. Krystaly vykazující piezoelektrický jev jsou ze své podstaty anizotropní, tedy že jejich vlastnosti závisí na směru orientace síly. Pro průmyslové využití se nejčastěji používají materiály na bázi piezokeramiky a piezoelektrických polymerů [15]. Důležitým parametrem udávaným u piezoelektrických materiálů je tzv. piezoelektrický koeficient, který určuje závislost hustoty elektrického náboje na síle působící na krystal [15]. Je vyjádřen vztahem:

$$d_{ik} = \frac{\text{coulomb}/\text{metr}^2}{\text{newton}/\text{metr}^2} = \frac{\text{coulomb}}{\text{newton}} \quad [\text{C/N}] \quad (25)$$

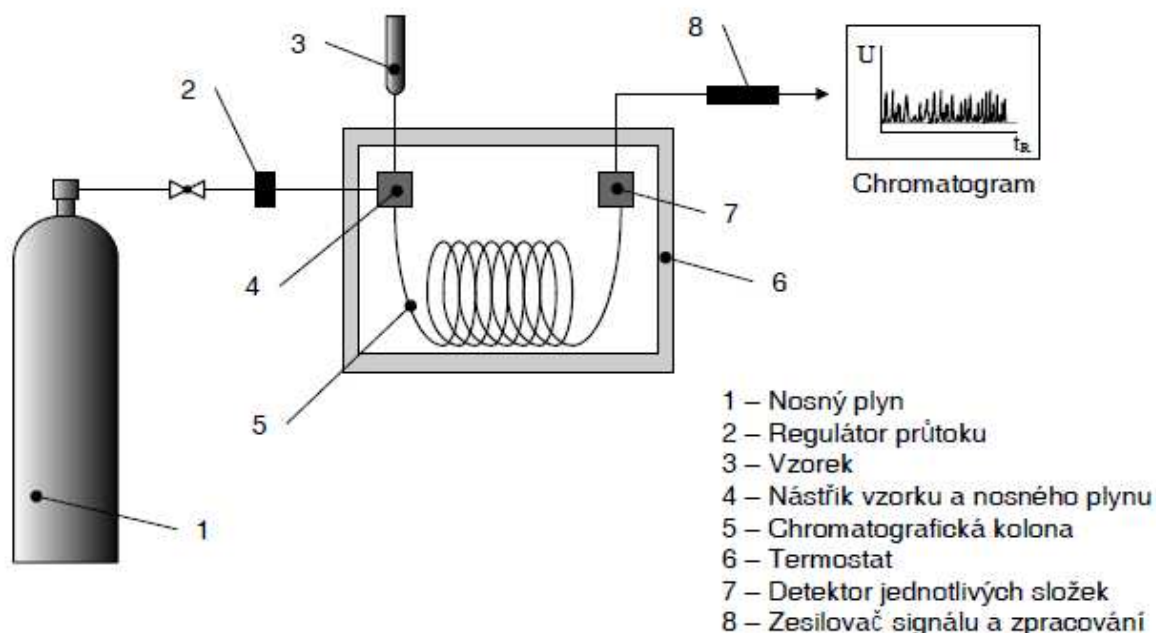
Výsledný signál naměřený piezoelektrickým snímačem může být ovlivněn vlastnostmi daného snímače i třeba způsobem jeho namontování na měřené zařízení. Velmi často se v měřeném signálu mohou vyskytovat parazitní frekvence, které je třeba odfiltrovat.

Proto se před samotnou aplikací senzoru v praxi musí provést testovací měření pro daný typ senzoru a upevnění s cílem nalézt tyto nežádoucí parazitní frekvence.

3.2.3 Chemická detekce – plynová chromatografie (DGA)

U přístrojů, které používají jako izolační nebo chladící médium olej nebo plyn, lze detekovat výbojovou činnost pomocí analýzy plynů vyskytujících se v tomto médiu. Chemická metoda měření částečných výbojů spočívá v detekci vzniklých produktů při reakcích částečných výbojů a plynem v dutinkách dielektrika a na jejich následné analýze [1]. Toho se využívá především u olejem plněných transformátorů, u přístrojů využívající jako izolant hexafluorid síry SF₆ nebo např. u velkých turboalternátorů chlazených vodíkem H₂.

Metoda, která tyto vzniklé plyny detekuje, je nazývána jako plynová chromatografie, v anglicky psaných textech je většinou označena zkratkou DGA (Dissolved gas analysis – analýza rozpuštěných plynů). Analýza rozpuštěných plynů v oleji je již úspěšně používána po mnoho desetiletí pro zjištění výbojové činnosti zejména ve výkonových transformátorech. Tato metoda poskytuje dostatečné údaje o charakteru a škodlivosti částečných výbojů vyskytujících se ve vinutí a hlavní izolaci. Dalšími ovlivňujícími činiteli pro transformátorový systém olej-papír jsou teplota, obsah kyslíku a vlhkosti v izolačním oleji. Metoda DGA je často používána a proto je dále vyvíjena a zlepšována. Metoda je velice citlivá a pro vyhodnocení výsledku měření se používají jednotky ppm (parts per million), tedy v milióntina obsahu. Analýza rozpuštěných plynů ze své podstaty poukazuje pouze na přítomnost nějakých druhů výbojů v plynu nebo oleji, nedá se samozřejmě použít pro určení místa působení výbojů. DGA využívá dlouhodobého sledování produktů chemického rozkladu materiálu působícími výboji a slouží především pro odhad poškození, které tyto výboje způsobily. Dlouhodobé sledování je nutné z toho důvodu, že energie destruktivních částečných výbojů je velmi malá a musí se počkat až tyto výboje vytvoří určitý objem plynů, který je již možno zjistit. Velkou výhodou oproti ostatním metodám je její necitlivost na elektromagnetické rušení např. v elektrárně nebo silným elektromagnetickým polem v transformátoru. Metoda odhaluje různé druhy plynů, které odpovídají různým druhům výbojů. Působením částečných výbojů se izolační materiál rozkládá a vznikají plyny: vodík H₂, etylen C₂H₄, metan CH₄, acetylen C₂H₂ a propylen C₃H₆. Analýza zkoumá přítomnost těchto pěti plynů a jejich vzájemné objemové poměry.



Obr. 28 Principiální schéma plynové chromatografie [9]

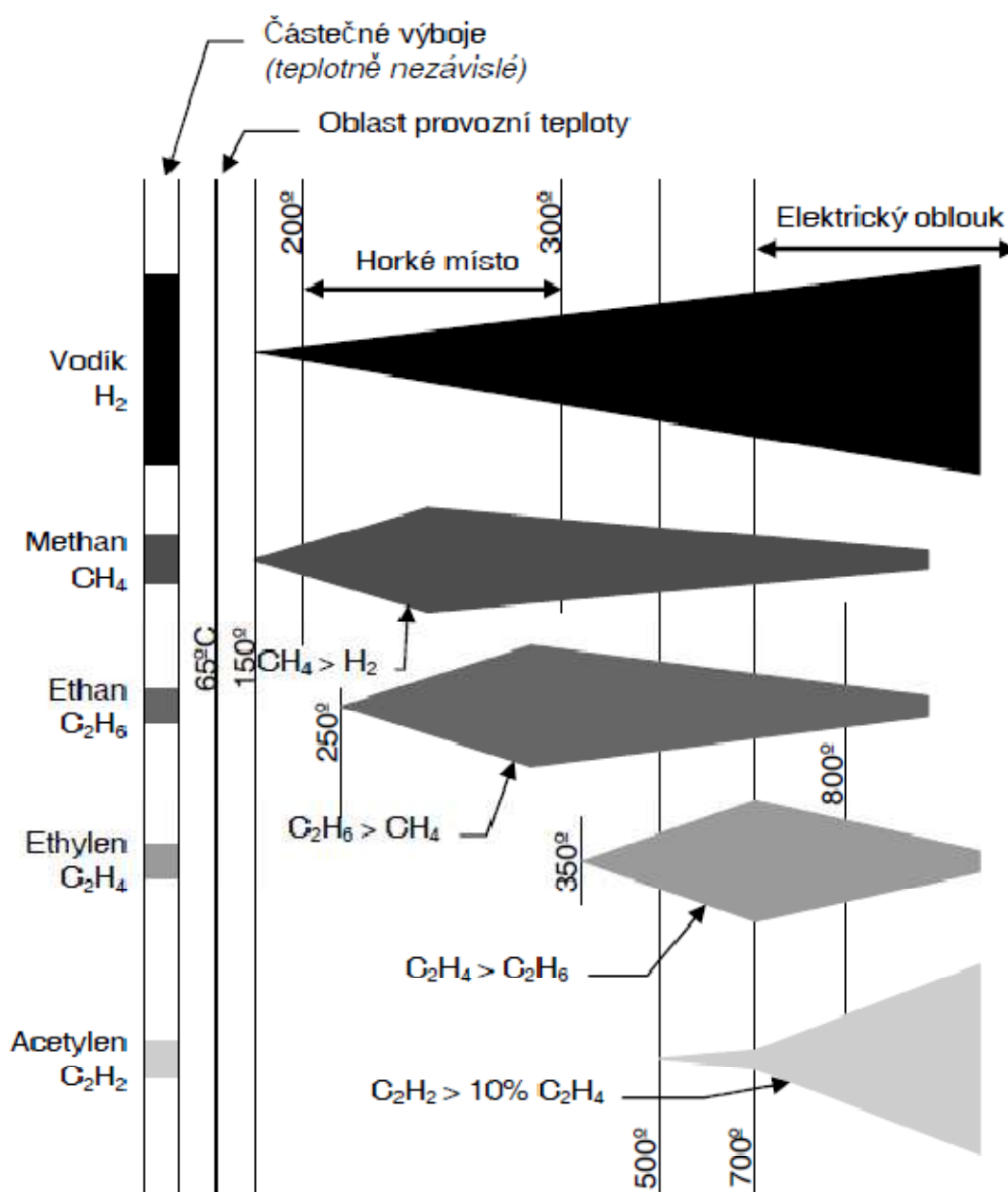
Plynová chromatografie se používá pro zkoumání všech látek, které je možné převést do plynného stavu [1]. Testovaný plyn (analyt) je smíchán s nosným plynem a poté je tato směs vedena přes chromatografickou kolonu, která obsahuje stacionární fázi. V této koloně na sebe navzájem působí stacionární a mobilní fáze. V koloně dochází k rozdělení koncentrace analytu mezi stacionární a mobilní fázi na základě adsorpce (technika GSC) nebo rozpouštění (technika GLC). Vzájemným působením dochází k zadržování (retenci) jednotlivých složek v koloně a k rozdílnému vymývání (eluci). Jednotlivé složky vystupující z kolony se analyzují detektorem [9]. Dané složky se určují podle časové polohy jednotlivých píků a jejich plochy.

3.2.3.1 Metoda Duvalova trojúhelníku

Analýza rozpuštěných plynů (DGA) v oleji je poměrně často používaná metoda pro zjištění počátečních poruch v transformátoru. Jednou z možností interpretace výsledků je zobrazení výsledků pomocí tzv. „Duvalova trojúhelníku“.

Nejčastěji používaným izolačním systémem transformátorů je tzv. systém olej-papír. Olej jako takový se v transformátoru používá jako izolant a chladiivo. V izolačním systému transformátoru se nejčastěji používají minerální oleje vyráběné z ropy. Izolační oleje na minerální bázi je složitá směs uhlovodíkových molekul obsahující CH_3 , CH_2 a CH chemické

skupiny, které jsou navzájem propojené. Rozpad některých vazeb je výsledkem tepelného namáhání nebo působením elektrických výbojů. Při rozpadu těchto vazeb vznikají částice jako je H, CH₃, CH₂CH a C, které spolu vytvářejí plynové molekuly jako vodík, metan CH₃-H, etan CH₃-CH₃, etylen CH₂-CH₂ a acetylen CH-CH. Pro vytváření těchto chemických vazeb se spotřebovává nemalé množství energie. Plyny jako ve vodík H₂, metan CH₄ a etan CH₆ jsou vytvářeny při nízkých energiích jako jsou koronové částečné výboje nebo při relativně nízkých teplotách nižších než 500 °C. Při středních teplotách se tvoří etylen C₂H₄ a při velmi vysokých teplotách nad 1000 °C se vytváří acetylen C₂H₂. Vysoké teploty nad 1000 °C, při kterých se vytváří acetylen jsou způsobeny hořením oblouku v oleji.



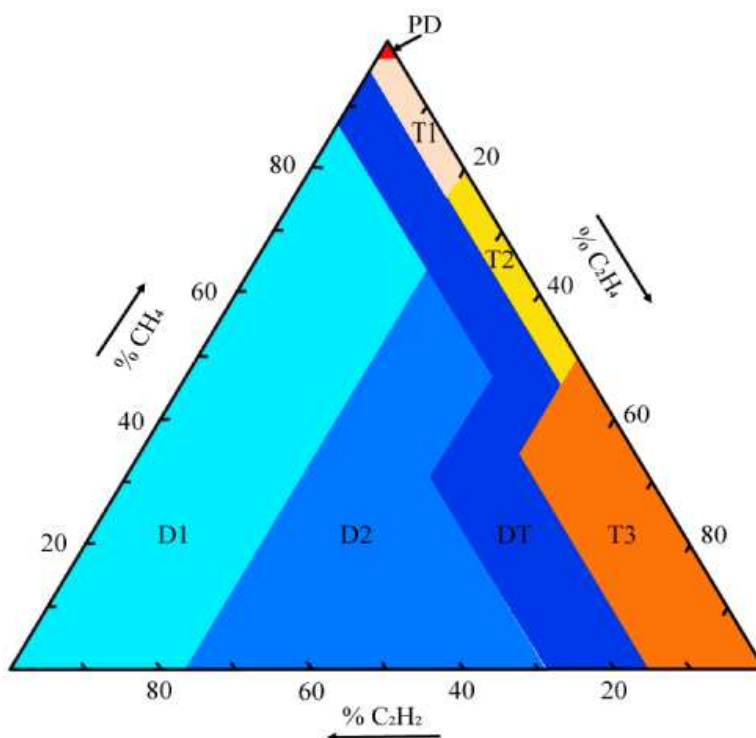
Obr. 29 Plyny vznikající při rozkladu oleje v transformátoru [9]

Pro sestavení trojúhelníku se použijí koncentrace plynů acetylen C_2H_2 , etylen C_2H_4 a metan CH_4 [Šimková]. Výpočet se provádí dle následujícího vzorce:

$$\% C_2H_2 = 100 \cdot C_2H_2 / (C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4), \quad \% C_2H_4 = 100 \cdot C_2H_4 / (C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4) \text{ a}$$

$$\% CH_4 = 100 \cdot CH_4 / (C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4).$$

Koncentrace plynů se pak vynesou do souřadnic ve tvaru rovnostranného trojúhelníku.



Obr. 30 Duvalův trojúhelník [29]

Plocha trojúhelníku je rozdělena na 7 dílů. Každý díl odpovídá typické poruše viz tabulka:

Tab. 1 Popis oblastí Duvalova trojúhelníku [12]

Zkratka	Typ poruchy
PD	Částečné Výboje
D1	Výboje nízké energie
D2	Výboje vysoké energie
T1	Tepelná porucha $T < 300^{\circ}C$
T2	Tepelná porucha od 300 do 700 $^{\circ}C$
T3	Tepelná porucha $T > 700^{\circ}C$
DT	Tepelná porucha nebo elektrický oblouk

3.2.3.2 Rogersova metoda

Tzv. Rogersova metoda-1 [11] je založena na měření koncentrace plynů acetylen C_2H_2 , etylen C_2H_4 , metan CH_4 , vodík H_2 a etan C_2H_6 . Vypočítávají se 4 poměry těchto plynů a to:

C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 a C_2H_6/CH_4 . Vypočteným hodnotám poměrů se přiřazuje kód dle následující tabulky:

Tab. 2 Kódy pro jednotlivé poměry Rogersovy metody [12]

Kód	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
5			$\leq 0,1$	
0	$< 0,5$	< 1	$> 0,1 < 1$	< 1
1	$\geq 0,5 < 3$	≥ 1	$\geq 1 < 3$	$\geq 1 < 3$
2	≥ 3		≥ 3	≥ 3

Zjištěným kódům je pak přiřazeno celkem jedenáct možných poruchových stavů dle tabulky:

Tab. 3 Kódy a typy poruch [12]

Porucha	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Bezporuchový stav	0	0	0	0
Částečné výboje	0	0	5	0
Přehřátí $T < 150$ °C	0	0	1; 2	0
Přehřátí 150-200 °C	0	1	1; 2	0
Přehřátí 200-300 °C	0	1	0	0
Přehřátí vodičů	0	0	0	1
Porucha vinutí oběhových proudů	0	0	1	1
Přehřátí spojů, jádra a nádrže cirkulujících proudů	0	0	1	2
Přeskok bez opakování	1	0	0	0
Hoření oblouku s opakováním	1; 2	0	0	1; 2
Jiskření s možností změny místa	2	0	0	2
Částečné výboje se stopou po výboji	1; 2	0	5	0

V praxi se využívá i tzv. Rogersova metoda-2 [11], která je založena na výpočtu pouze tří poměrů z pěti plynů stejných jako u Rogersovy metody-1 a využívá se při nadlimitních

koncentracích plynů. Zjišťují se poměry C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 a C_2H_4/C_2H_6 . Metodou se analyzuje 5 typů poruch dle tabulky 4:

Tab. 4 Typy poruch Rogersovy metody-2 [12]

Doporučená diagnóza chyby	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Bezporuchový stav	< 0,1	> 0,1 < 1	< 0,1
Nízkoenergetické výboje	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Oblouk, vysokoenergetické výboje	$\geq 0,1 \leq 3$	$\geq 0,1 \leq 1$	> 3
Nizkotepelná porucha	< 0,1	> 0,1 < 1	$\geq 1 \leq 3$
Tepelná porucha do 700 °C	< 0,1	> 1	$\geq 1 \leq 3$
Tepelná porucha T > 700 °C	< 0,1	> 1	> 3

3.2.3.3 Dörnenburgova metoda

V této metodě [11] se sledují hodnoty plynů C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , H_2 a C_2H_6 . Z hodnot těchto plynů se vypočítávají čtyři poměry: C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_2/CH_4 a C_2H_6/C_2H_2 . Na základě těchto vypočtených poměrů se určují tři typy poruch dle tabulky 5:

Tab. 5 Typy poruch u Dörnenburgovy metody [12]

Doporučená diagnóza chyby	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$
Tepelná porucha	< 0,75	> 0,1	> 0,4	< 0,3
Nízkoenergetické výboje	Bezvýznamné	< 0,1	> 0,4	< 0,3
Oblouk, vysokoenergetické výboje	> 0,75	> 0,1 < 1	< 0,4	> 0,3

3.2.3.4 Metoda podle IEC 60 599

Základ metody vychází z Rogersovy metody [12]. Protože je tato metoda definována normou, používá se jako výchozí metoda pro určení plynů rozpuštěných v oleji. Pomocí používání poměru veličin se snáze určí druh závady. Vzniklé závady mohou být elektrické, tepelné nebo jejich kombinace. Nevýhodou metod založených na poměru koncentrací je značné zkreslení vypočtených výsledků při nízkých koncentracích měřených plynů nebo nevyskytují-li se vůbec. Další věcí, na kterou je třeba klást důraz je to, že se vypočítává poměr. Ten však může být stejný, jsou-li v čitateli i jmenovateli jak velká tak i malá čísla. Proto je normou udána i nejmenší možná koncentrace plynů, aby vypočtené údaje byly relevantní. Používají se plyny: C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , H_2 a C_2H_6 . Pro zjištění koncentrace plynů se vypočítávají jejich poměry C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 . Metodou se určuje šest poruch dle tabulky 6:

Tab. 6 Poměry plynů a jejich význam [30]

Porucha	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Č. V.	nevýznamné	<0,1	<0,2
V1	>1	0,1 – 0,5	>1
V2	0,6 – 2,5	0,1 – 1	>2
T1	nevýznamné	>1	<1
T2	<0,1	>1	1 – 4
T3	<0,2	>1	>4

Č.V. – částečné výboje

V1 – výboje nízké energie

V2 – výboje vysoké energie

T1 – tepelná porucha do 300 °C

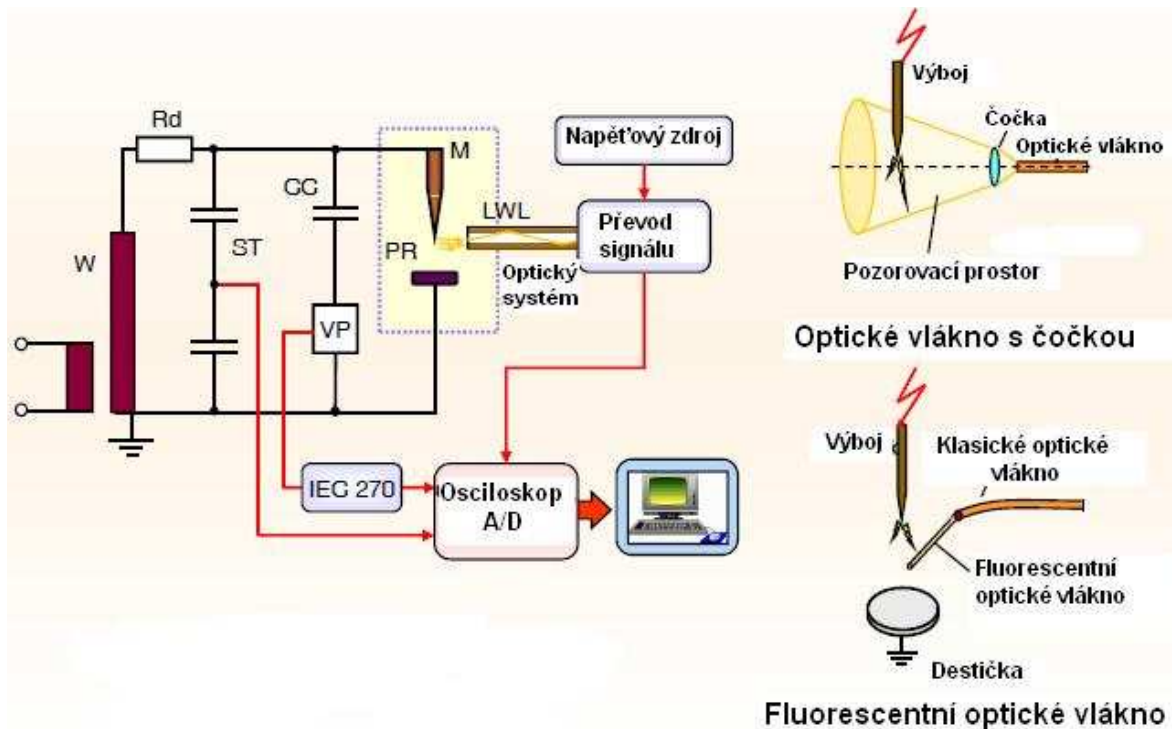
T2 – tepelná porucha 300 °C až 700 °C

T3 – tepelná porucha nad 700 °C

Tato metoda má jednu zásadní nevýhodu a to, že zjištění tepelných, elektrických popř. kombinovaných poruch je možné až s určitou časovou prodlevou až se vytvoří dostatečné množství plynu, které je možné detekovat. Tato prodleva může trvat i hodiny.

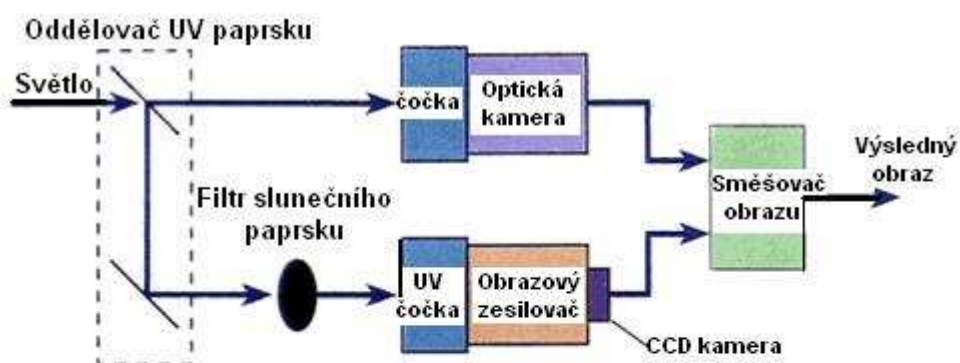
3.2.4 Optická detekce částečných výbojů

Tato metoda využívá optické projevy částečných výbojů v ultrafialovém, viditelném a infračerveném pásmu [29]. Při výbojové činnosti vzniká jak viditelné světelné záření, tak i zejména záření ultrafialové, které má vyšší energii než viditelné. Spektrum světelného záření závisí na izolaci obklopující zdroj částečného výboje jako je plyn nebo olej. Dalšími faktory ovlivňujícími vznikající světelné spektrum jsou teplota a tlak. Z principu snímání není použitelná na točivé elektrické stroje a transformátory. Své uplatnění má především pro zjišťování vnějších výbojů u venkovního vedení. Snímání se provádí kamerami, pracujícími v ultrafialovém pásmu, optickými snímači a optickými kabely.



Obr. 31 Principy optické detekce částečných výbojů [30]

Nejčastěji používaným komerčním systémem pro optickou detekci výbojů je systém izraelské firmy OFILSYSTEMS [36] a její kamery s označením DayCor[®] pracující v ultrafialovém a viditelném spektru.



Obr. 32 Blokové schéma kamery DayCor® [36]

Systémy mohou pracovat za šera, tmy i za plného denního světla. Citlivost detekce je indikace částečných výbojů o velikosti 1,3 pC na vzdálenost 10 m což je velice vysoká citlivost. Nasazení těchto systémů je především pro venkovní vysokonapětová vedení, na železničních tratích, ale dají se obecně využít pro všechna elektrická zařízení kam je volný přístup např. pro zjištění výbojů u statorového vinutí generátoru při vyjmutém rotoru (při odstávce).



Obr. 33 Použití kamery DayCor® [36]

Hlavní předností optické metody je necitlivost vůči elektromagnetickému rušení a vysoká citlivost měření oproti klasickým metodám měření částečných výbojů.

Pro více informací ohledně fungování optické detekce v praxi (např. detekce výbojů u venkovního vedení pomocí vrtulníku) doporučuji shlédnout produktová videa na www.ofilsystems.com.

4 Použití jednotlivých metod a jejich srovnání

Elektrická metoda (konvenční dle IEC 60270):

Použití: zapouzdřené vodiče a rozvodny, transformátory, točivé stroje, venkovní vedení

Výhody: dlouho a často používaná- jsou velké praktické zkušenosti; lze využít pro zjištění velikosti náboje uvolněného při výboji; lze určit typ výbojů; nejvhodnější metoda pro on-line monitorování

Nevýhody: nelze použít k lokalizaci výbojů; v porovnání s ostatními metodami je drahá; velmi se uplatňuje elektromagnetické rušení

Optická metoda:

Použití: zapouzdřené vodiče a rozvodny; venkovní vedení

Výhody: nemá na ni vliv elektromagnetické rušení; možnost lokalizace místa výboje; vysoká citlivost

Nevýhody: nemožnost získat informaci o velikosti náboje uvolněného při výboji; není za provozu použitelná na důležité prvky energetické soustavy jako jsou transformátory a generátory

Chemická metoda:

Použití: zapouzdřené vodiče a rozvodny; transformátory; točivé stroje; olejem, plynem izolované kabely

Výhody: nemá na ni vliv elektromagnetické rušení; dlouho a často používaná- jsou velké praktické zkušenosti; citlivá- dle koncentrace vyvíjených plynů lze určit, zda zařízení ještě dále provozovat či ho odstavit

Nevýhody: nemožnost získat informaci o velikosti náboje uvolněného při výboji; nelze zjistit intenzitu výbojů; nelze použít k lokalizaci výbojů; je pomalá- než se vytvoří potřebné množství plynů, které lze detekovat, je zapotřebí určitý čas (někdy desítky až stovky hodin) což může být při rychlém vývoji poruchy pozdě.

Akustická metoda:

Použití: vysokonapěťové kabely; zapouzdřené vodiče a rozvodny; transformátory; venkovní vedení

Výhody: vysoká citlivost; odolná vůči elektromagnetickému rušení; vysoce účinná při vyhledávání místa výbojů; v porovnání s ostatními metodami je levná; možná geometrická lokalizace výboje

Nevýhody: problémy s odrazy signálu v kovové nádobě transformátoru; vliv mechanického rušení; nízká úroveň vznikajícího mechanického vlnění-metoda musí být velice citlivá; útlum signálu závisí na vzdálenosti snímače od zdroje částečného výboje; není dostupná možnost zjištění základního parametru o částečných výbojích a to zdánlivého náboje

UHF metoda:

Použití: zapouzdřené vodiče a rozvodny, transformátory

Výhody: vhodná pro on line monitorování; při použití tří snímačů možnost lokalizace výbojů; velmi nízký útlum signálu v pevných izolačních materiálech a oleji; při použití snímače instalovaného přes olejový výpustný ventil není nutné transformátor odpojovat z provozu; velmi nízká úroveň rušení (signál se nachází v prostoru, který je elektromagneticky odstíněn - většinou kovová nádoba transformátoru)

Nevýhody: v určitých prostředích se uplatňuje elektromagnetické rušení; nutnost vytváření dielektrických oken u starších transformátorů, zatím není dostupná možnost zjištění základního parametru o částečných výbojích a to zdánlivého náboje

5 Závěr

Působení částečných výbojů v izolaci a následně vyvolaný degradační proces může způsobit velmi vážné poruchy i vyřazení provozovaného zařízení z činnosti. I když je energie výbojů velmi malá, dlouhodobým působením může dojít k úplnému zničení izolace. Proto se vývoji detekčních metod pro odhalování počátečních stádií poruch věnuje mnoho specializovaných pracovních týmů na celém světě již desítky let. Metody měření částečných výbojů jsou tedy poměrně dost vyvinuté a stále dochází k jejich zdokonalování. Měřicí systémy jsou obvykle dosti cenově nákladné a proto se nasazují pouze na nejdůležitější výkonové prvky v soustavách. To, jak finančně nákladná konfigurace diagnostického systému se nakonec na diagnostikované zařízení použije je většinou dáno předpokladem úspor při údržbě a to jak díky nižší pracnosti tak i předpokládanou nižší potřebou opravných dílů. Svou roli hraje i předpoklad prodloužení životnosti stroje a snížení pravděpodobnosti havárie.

V příloze této práce jsou uvedeny některé sestavy měřicích systémů a jejich orientační ceny. Měřicí systém je obvykle konfigurován „na míru“ danému zařízení a proto může být cenový rozptyl dle informací dodavatelů až v řádech desítek procent od základní ceny. Nezanedbatelné nejsou ani náklady na dopravu, montáž a zaškolení obsluhy. V úvahu je třeba brát i specifické užité vlastnosti každého systému. Z těchto důvodů není provedeno cenové srovnání těchto systémů, protože by nebylo objektivní.

Výkonové prvky, na které se tyto měřicí systémy nasazují, obvykle pracují s velkými toky energií a vždy se v jejich okolí vyskytuje velmi silné elektromagnetické rušení. To je často při měření částečných výbojů nepřekonatelný problém, protože tyto výboje mají velmi nízkou energii a často jsou jejich signály překryty okolními vlivy.

Z nekonvenčních metod se jeví jako nejperspektivnější metoda měření částečných výbojů v pásmu UHF i z toho důvodu, že ji je možno použít i pro určení místa výbojů. V této práci jsou uvedeny i teoretické matematické a fyzikální předpoklady pro tuto lokalizaci. Je ale nutné upozornit na to, že pro použití v praxi to představuje vyřešení mnoho velice náročných úkolů.

Po konzultacích přímo s odborníky na diagnostiku vysokonapěťových zařízení z E.ON, ČEZ a ČEPS, nejsou systémy pro měření částečných výbojů pomocí UHF sond v České republice téměř používány. Na základě sledování trendů v zahraničí je pomocí grantu Evropské unie financován společný výzkumný projekt společností EGÚ-VVN Praha a TES Třebíč pod názvem „Výzkum a vývoj detekce výbojové aktivity ve výkonových olejových transformátorech“. Tento projekt je zaměřen na detekci částečných výbojů v pásmu UHF ve

výkonových olejových transformátorech. Prvotní využití se předpokládá pro transformátory na JE Dukovany.

Pro měření částečných výbojů je dnes nejrozšířenější tzv. „galvanická metoda“. Měření důkladně popisuje norma IEC 60270. Tato metoda je poměrně dobře propracována a dnes je již celkem běžně užívána. Pro měření pomocí této metody dnes existuje dostatek komerčně dostupných systémů pro měření a jeho následné vyhodnocení. U tzv. „nekonvenčních metod“ je situace mnohem komplikovanější. Měření částečných výbojů pomocí akustických odezev nebo sledováním UHF signálu těchto výbojů se komerčně zabývá nepoměrně méně výrobců. Důvody jsou zřejmé: požadavky na diagnostiku, měření a lokalizaci vzešly od provozovatelů energetických zařízení v posledních desetiletích. Důvodem je především neustálý tlak na snižování nákladů a na vyšší efektivitu využívání provozovaných zařízení. Málo byla i prozkoumána problematika šíření a odrazu vln jak akustických a elektromagnetických v geometricky komplikovaném prostoru především transformátorů. Důvodem byla finančně nákladná výpočetní technika a nedostupnost softwarového vybavení pro simulaci a prostorové modelování. Toto se však v posledních letech velice rychle mění. V současnosti ale ještě stále není nalezena spolehlivá metoda, která by byla schopna určit počátek degradace izolace stroje. Rovněž tak i neexistuje absolutně spolehlivá metoda pro určení místa této poruchy. Pro rozhodnutí v zásadních věcech ohledně oprav strojů se obvykle pro validaci rozhodnutí použije ještě jiná metoda.

V mnoha pracích se vyskytují i úvahy o tom, zda-li je vůbec možné s naprostou jistotou zhodnotit stav izolačního systému. Procesy probíhající ve vysokonapěťových izolacích jsou složité a provázané s ostatními provozními stavy. Předvídání a lokalizace poruch je velmi složitým diagnostickým fenoménem. Na toto téma jistě bude ještě zpracováno mnoho výzkumných prací, avšak je velmi pravděpodobné, že se již žádných zásadních řešení nedočkáme.

Lze s jistotou konstatovat, že měření a vyhodnocování částečných výbojů zřejmě vždy bude zatíženo velkou nepřesností, kdy se budou muset vždy zohledňovat i veškeré možné vlivy na zařízení, které však i v současnosti nejmodernější měřicí systémy nedokáží zohlednit. Toto výsledné vyhodnocení pak může být zatíženo subjektivní chybou vyhodnocující osoby. Ve světě se již objevují rozsáhlé počítačové systémy pracující s databázemi tisíců měření, kde se jednotlivá měření na podobných strojích porovnávají. Ke slovu přicházejí i diagnostické expertní systémy pracující na bázi umělé inteligence. Ovšem ani tyto systémy nejsou schopny vyhodnotit proces, který vzejde z nějakých nepředvídatelných událostí.

Vzhledem k tomu, že konvenční galvanická metoda měření částečných výbojů dle IEC 60270 již zřejmě dosáhla svých maximálních možností lze do budoucna očekávat rozvoj především nekonvenčních metod, což lze vysledovat i z nově připravované normy IEC 62478 reagující na tyto nové trendy.

Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] Mentlík, V., Pihera, J., Polanský, R., Prosr, P., Trnka, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN-technická literatura, Praha 2008. ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] Martínek, P.: *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Disertační práce ZČU, Plzeň 2005.
- [3] Klasna, J., Martínek, P., Fanta, R., Pihera, J.: *Částečné výboje ve vysokonapěťové izolaci turbogenerátorů*. Mezinárodní konference Electric Power Engineering EPE2010
- [4] Mentlík, V.: *Dielektrické prvky a systémy*. BEN-technická literatura, Praha 2006. ISBN 80-7300-189-6
- [5] Záliš, K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, Praha 2005. ISBN 80-200-1358-X
- [6] Hubáček, J.: *Částečné výboje na generátorech velkých výkonů a jejich měření*, Bakalářská práce ZČU, Plzeň 2011.
- [7] *Technika zkoušek vysokým napětím – měření částečných výbojů*, ČSN EN 60270, Český normalizační institut, Praha 2001.
- [8] Kováčik, J.: *Detekcia a lokalizácia vnútorných zdrojov čiastkových výbojov vo výkonových transformátorov akustickou metódou*, Časopis EE, 6, 2000, č.2 – č.3.
- [9] Schejbal, V.: *Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*, Disertační práce ZČU, Plzeň 2007.
- [10] exkurze na JE Temelín při měření částečných výbojů prováděném dne 6.8.2010
- [11] Šimková, M.: *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010. 155 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Hammer M., CSc.
- [12] Hindra, M.: *Diagnostické metody sledování plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Ministr
- [13] Rozmiler, J.: *Návrh kontinuálního monitorovacího systému výkonového transformátoru*, Bakalářská práce JČU, České Budějovice 2010.
- [14] Bujaloboková, M., Trnka, P.: *Detekce poruch vn strojů analýzou výbojové činnosti se zaměřením na transformátory*. <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/83878>
- [15] Müllerová, E.: *Nestandardní užití ultrazvukových lokalizačních metod v diagnostikování transformátorů*, Habilitační práce ZČU, Plzeň 2009.
- [16] Humlová, V.: *Akustické odezvy částečných výbojů v diagnostice izolačních vad výkonových transformátorů*, Diplomová práce ZČU, Plzeň 2011.

- [17] Obraz, J.: *Ultrazvuk v měřicí technice*. SNTL, Praha 2005.
- [18] Lochman, J.: *On-line diagnostika transformátorů*, Diplomová práce ZČU, Plzeň 2011.
- [19] Kozako, M., Yamada, K., Morita, A., Ohtsuka, S., Hikita, M., Kashine, K., Nakamura, I., Koide, H.: *Fundamental study on partial discharge induced acoustic wave propagation in simulated transformer composite insulation system*, IEEE 9th International conference - Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China 2009.
- [20] Pudlo, G.: *Advanced PD Monitoring of Power Transformers Supporting Asset Management*, <http://www.slideserve.com/rod/advanced-pd-monitoring-of-power-transformers-supporting-asset-management>
- [21] Judd, M. D., Yang, L., Hunter, I. B. B.: *Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation*.
- [22] Judd, M. D., Yang, L., Hunter, I. B. B.: *Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 2: Field Experience*.
- [23] Markalous, S. M., Wilson, A.: *Techniques for detection and location of partial discharges in power transformers*. <http://www.doble-lemke.eu/media/files/Media/Techpapers/PD/2009/2009-01-21>
- [24] Shen, Z. B., El-Saadany, E. F.: *Localization of Partial Discharges Using UHF Sensors in Power Transformers*.
- [25] Boltze, M., Coenen, S., Tenbohlen, S.: *Prospects and Limits of on-site PD Measurement Technique*. Universität Stuttgart, Germany 2011.
- [26] Boltze, M.: *Teilentladungs-Detektion an Hochspannungs- und Mittelspannungsschaltanlagen im Rahmen von Abnahme- und Inspektionsprüfungen*. Doble-Lemke GmbH, Deutschland 2012.
- [27] Boltze, M.: *PD Seminar at power transformers*. ABB Transformers, Drammen, Norway 4.5.2012.
- [28] Cho, S. I.: *On-Line PD (Partial Discharge) Monitoring of Power System Components*. Master's thesis, Aalto University, Finland 2011.
- [29] Muhr, M.: *Developments in Diagnosis of High Voltage Apparatus*. University of Technology Graz 2009.
- [30] Muhr, M.: *IEC 62478 A Prospective Standard for Acoustic and Electromagnetic Partial Discharge Measurements*. University of Technology Graz 2009.
- [31] Lopez-Roldan, J., Tang, T., Gaskin, M.: *Optimisation of a Sensor for Onsite Detection of Partial Discharges in Power Transformers by the UHF Method*.

[32] Lopez-Roldan, J., Tang, T., Gaskin, M.: *Design and Testing of UHF Sensors for Partial Discharge Detection in Transformers.*

[33] Agoris, P., Meijer, S., Smit, J. J.: *Sensitivity Check of an Internal VHF/UHF Sensor for Transformer Partial Discharge Measurements.*

[34] Lemke, E. etc.: *Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270.*

[35] internetové stránky <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk>

[36] internetové stránky <http://www.ofilsystems.com/>

[37] internetové stránky <http://www.doble-lemke.eu>

Přílohy

Příloha č.1: Katalogový list optického systému sledování částečných výbojů DayCor®SUPERB. Cena dle konfigurace 1 – 1,8 mil. Kč bez DPH dle vyjádření dovozce En-Centrum s.r.o. Praha.



Superb is a portable daytime corona and partial discharge detection camera.

It is the most sensitive solar blind bi-spectral UV-Visible imager. Superb detects ultraviolet emission in full daylight with high signal to background ratio from far-off and nearby sources. Superb is an ideal predictive maintenance tool for overhead transmission lines and high voltages substations. Its unique ergonomic design supports tedious extended inspection intervals. Reinforced with reporting and analyzing software, Superb provides a comprehensive detecting, pinpointing and reporting solution.

- >> Corona detection highest sensitivity
- >> Rapid optical zoom of the visible channel
- >> Digital UV zoom
- >> Auto focus of the UV and Visible channels
- >> Background noise reduction

- >> Built-in video and stills recording
- >> Integral folding high resolution color LCD
- >> UV events counter
- >> Reporting software - multilingual
- >> Optional multilingual display

OUTSTANDING UV SENSITIVITY

UV sensitivity of 3×10^{-18} watt/cm² enables detection and displaying of corona emission as weak as 1.3 pC at a distance of 10m, and capture moving targets without smearing the output image. Built-in UV events counter and display for estimation of the corona strength.

PINPOINTS CORONA LOCATION

Equipped with exclusive lenses and powerful zooming capabilities Superb can pinpoint corona on far-away as well as on very close objects. These features and the outstanding sensitivity make Superb an ideal inspection camera for overhead transmission lines and high voltage substations.

EASY TO OPERATE

Control is via keyboard with direct access to functions and with on-screen indication of the selected functions. Straightforward intuitive operation.

DAYCOR® TECHNOLOGY INSIDE

Based on Ofil's DayCor® technology Superb is a bi-spectral solar blind UV-Visible camera allowing operation in full daylight.

BUILT-IN RECORDING & STORING

Superb has built-in recording, playback and storing of high resolution video clips and still pictures with optional inserted text commenting and GPS data. Media is stored on a removable compact flash card. NTSC/PAL compatibility.

RUGGED AND LIGHTWEIGHT

Superb is a heavy-duty system fit for harsh environment and extreme weather conditions. The low weight of the camera is comfortably distributed on the shoulders.

REMARKABLE ERGONOMICS

Superb is unique in its ergonomic design that enables long continuous inspection eliminating hands and eyes strain and back aches. No need to grasp the camera to hold it.

SINGLE AND TEAMWORK

The integral reflective, high-brightness, color, adjustable 5" LCD is ideal for outdoor inspections and for teamwork. Essential for working in hazardous places where operators need to be watchful.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

UV - OPTICAL PROPERTIES	
Minimum Discharge Detection	1.3 pC @ 10 meters (RWE certified, DIN EN 60270 VDE 0340:2001-08)
Minimum RIV Detection	10.7dBµV (RIV) @ 1MHz (RWE certified, DIN EN 60270 VDE 0340:2001-08)
Minimum UV Sensitivity	3x10 ⁻⁹ watt/cm ²
Field of View H x V	5° x 3.75°
Detector Life Span	No degradation
Focus	Manual and full Auto-Focus for the UV and visible channels
Focus Distance	3m to infinity (0.5m with close up lens)
Digital UV/Combined Zoom	X2 and X4
Spectral Range	240-280nm
VISIBLE - OPTICAL PROPERTIES	
UV/Visible Overlay Accuracy	Better than 1 milliradian
Minimum Visible Light Sensitivity	0.1 Lux
Video Standard	NTSC
Rapid Visible Zoom	25 optical x 12 digital attained within 1 sec
DISPLAY	
Type	Integral color Transflective Sunlight Readable LCD, adjustable
Brightness	450 cd/m ² reflective, adjustable
Resolution	640x480 pixels, color
Size	5"
Modes	Combined (UV & Visible), UV only, visible only
External Display	NTSC via BNC jack
CONTROLS & OPERATION	
Method	Keyboard
Functions Activation	One touch button
Rapid Zoom	Continuous push button max attained withing 1 second
System Status Indicator	LCD shows low battery
ENVIRONMENTAL	
Storage and Operation Temp	-20°C up to +55°C -4°F up to +131°F
Encapsulation	IP54, Certified
INTERNAL DATA STORAGE	
Video Format	AVI
Image Format	BMP
Playback	Video and pictures
Storage Media	Memory flash card
PHYSICAL CHARACTERISTICS & POWER SOURCE	
Weight	3.3 Kg 7.3 lb
Dimensions L x W x H	L23 x W18 x H15 cm L9.1 x W7.1 x H5.9 in
Nominal Power Consumption	12V DC, 16 Watts
Power Source	Rechargeable battery for over 2.5 hours continuous operation Universal AC/DC 12V Adapter
ACCESSORIES	
Close-up lens; Wide FOV lens; GPS; Title editor; Flight table; Remote control; Database reprotng software	

* Specifications are subject to change without notice. Imagery used for illustration purposes only. Copyright Ofil Ltd, 2012



P.O.B 4016 Nes-Ziona, Israel 74000
Tel. +972.8.940.7953 | Fax. +972.8.940.7873
www.OfilSystems.com

Příloha č.2: Katalogový list měřicího systému částečných výbojů galvanickou metodou (dle IEC 60270). Systém obsahuje přístroj LDS-6, vazební kondenzátor 1 nF/120 kV, měřicí impedanci LDM-5/U8, kalibrátor LDC-5. Cena konfigurace cca 0,9 mil. Kč bez DPH. Cenu poskytl Ing.Voda-Doble Lemke GmbH.



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

LDS-6

Applications

The LDS 6 is a highly sophisticated digital measuring system for the Partial Discharge (PD) detection according to the standard IEC 60270, VDE 0434 as well as various IEEE and other standards for the High Voltage Test and Measurement Technology. It meets also ICEA T-21-380 standard of the Cable Industry.

- » PD quality tests on high voltage equipment
- » PD diagnosis on developing insulating materials
- » Designed for on-site PD diagnosis tests as well as for manufacturing and research
- » PD commissioning tests and maintenance tests on HV equipment
- » PD fault location for power cables

Application fields:

- » Rotating machines (e.g. motors, generators)
- » Transformers
- » MV and HV cable systems
- » Switchgears (e.g. gas-insulated, air-insulated)
- » Other HV accessories / insulating materials



Benefits

» Well-known Lemke Noise Gating Technology. The LDS-6 provides two separate channels for real hardware gating. The noise suppression of external noises happens via a separate antenna (gating sensor). These features are already included in the standard LDS-6 delivery volume. No other units are needed and thus no extra costs will apply.

» Highly-sophisticated PD statistics, diagnosis and analysis software to evaluate the PD in the most convenient and expert manner. The LDS-6 software also includes a comprehensive reference database. This helps to analyze your partial discharge measurement results quickly and easily.

» Well-established technology due to hundreds of LDS-6 systems in daily use. The LDS-6 is thus field-proven and got high acceptance in the industry (e.g. manufacturers, universities, OEM's). Due to its rugged housing and its reliable software, the LDS-6 is the perfect day-to-day tool under all conditions.

» Modular design of the LDS-6 allows a variety of measurements. The LDS-6 is expandable with:

- » RIV pulse processing unit (for transformer testing)
- » UHF processing unit
- » Narrow Band processing unit



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

LDS-6

- » DG processing unit
- » Cable Fault Location Unit

» The LDS-6 is optimal for HV test set solutions due to its 19" Rack-version and software interface.

» Report generator for creating customized test reports is optional available.

Specifications

- » Sensitivity range: 1pC to 100,000pC (Autoranging 0-93db)
- » Upper limited frequency: 20 MHz
- » Digital input of signals: 12 bit
- » Partial Discharge Location (Reflectometer method, Enhancement of the location sensitivity), optional available
- » Computer-based, phase resolved PD data acquisition, storage, analyzing and post-processing
- » Simultaneous PD data and test voltage acquisition
- » Diagnostic tools for PD failure recognition/statistical data evaluation
- » Hardware settings completely software controlled
- » Polarity recognition of the PD pulses
- » Double pulse resolution 10 ms
- » Minimal Superposition error and single pulse recognition capability up to 100 kHz pulse repetition rate
- » Ethernet connection between measuring system and computer
- » UHF-Frequency Range, bandwidth 110MHz - 1700 MHz, optional available

Accessories

Accessories for all application fields:

- » LDC-5 - Calibrator for external calibration of the PD measuring circuit in pC of apparent charge up to 500 pC
- » LDM-5 or LDM-5/U - Measuring impedance for signal and test voltage decoupling (bandwidth 20 MHz, maximum current 5 A, optional 50 A)
- » LDB-5 - Bridge impedance for PD detection on the basis of balanced bridge (IEC 60270)
- » LDF-5 - Filter for suppression of radio interferences
- » LDM-5/E - Extension unit for matching the voltage measuring adjustment of LDM-5/U to several ranges and different coupling capacitors



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

LDS-6

» LDM-5/M6 - Switching box for channel switching of the PD- and voltage channels (software-controlled), more channels on request available

Accessories for measurements on cables:

- » HFCT Sensors
- » PD Fault Location Unit (Reflectometry method)

Accessories for measurements on rotating machines:

- » PDDG-24 for decoupling PD pulses (with integrated measuring impedance and high-voltage fuse)
- » PDDG-17 for decoupling PD pulses (with integrated measuring impedance)
- » calibrator LDJ-5 with higher pulse charges

Accessories for measurements on transformers:

- » Measuring Adaptor LDM-6/U: PD Measuring Impedance with voltage decoupling for power transformer bushings
- » Measuring impedance LDM-5/U5 with add. 2 switches for 4 Gu's
- » Software Automation "LDC-TR"

Doble Lemke GmbH
Zschoner Ring 9, 01723 Kesselsdorf / Dresden
Germany
www.doble-lemke.eu

Doble Lemke AG
Kaiserstrasse 9, 4310 Rheinfelden
Switzerland
www.doble-lemke.eu



Doble-Lemke ist zertifiziert nach
DIN EN ISO 9001

Příloha č.3: Katalogový list měřicího systému částečných výbojů akustickou metodou s možností lokalizace. Systém obsahuje přístroj LDA-6 + 4 akustické sondy + přístroj PD-Smart pro elektrickou synchronizaci. Cena konfigurace cca 1,5 mil. Kč bez DPH.



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

LDA-6

Applications

The LDA-6 was developed for acoustic localisation of dangerous Partial Discharges inside Powertransformers. Advanced algorithm allows a high precision localisation of the Partial Discharge Source. A graphical user interface visualise the spatial position of the Partial Discharge Source.



Benefits

- » precise localisation of dangerous Partial Discharges
- » can combined with electrical Partial Discharge Measurement Devices LDS-6 or PD-Smart to increase the accuracy (electrical trigger)
- » easy and fast installation of the acoustic sensors due to the magnetic fastener
- » piezoelectric, acoustic sensors with a small bandwidth (noise-suppression outside the resonant frequency)
- » up to 8 acoustic channels possible
- » automatic calculation of the propagation velocity depending of the Oil-temperature
- » graphical user interface for visualisation of the measurement results

Specifications

Power mains

- » voltage 115-120 VAC or 230-240 VAC, 47-63 Hz
- » power consumption 100 VA, approx. (max.)

Signal Stage

Sensor

- » frequency: appr. 150kHz
- » bandwidth: appr. 8kHz

Signal Input:

- » output bias voltage via input 20-28 VDC; internal adjusted
- » max. output current via input 200 mA
- » bias current fuses cut-out 200 mA
- » wave impedance 50 Ω
- » max. input signal 10 V_{Peak}
- » overvoltage protection > 12 V_{Peak}

Signal Output to PG-DAQ card

- » max. number of channels 8 (7)
- » max. RF output signal 10 V_{Peak}
- » output center frequency approx. 150 kHz (by amplification "1")
- » approx. 90 kHz (not by amplification "1")



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

LDA-6

- » bandwidth approx. 100 kHz
- » switcheable max. amplifications 1, 10, 50, 100

Testvoltage Stage

Signal Input

- » max. input signal 50 VPeak
- » overvoltage protection > 90 VPea

Signal Output to PC-DAQ card

- » max. number of channels 1
- » max. output signal 10 VPeak
- » output frequency 0-300 Hz

Dimensions 342.1 mm * 132.5 mm * 326 mm (w*h*l)

Weight main unit approx. 6 kg,

Protection class IP 20

Environmental conditions

operating temperature: + 5 °C ... + 40 °C

storage temperature: - 5 °C ...+ 60 °C

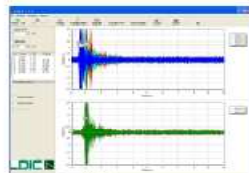
max. relative atmospheric humidity: 93 % at 30 °C max., not condensed

atmospheric pressure: standard pressure

Accessories

- » acoustic sensor (150kHz) incl. magnetic fastener

Additional Pictures



Doble Lemke GmbH
Zschoner Ring 9, 01723 Kesselsdorf / Dresden
Germany
www.doble-lemke.eu

Doble Lemke AG
Kaiserstrasse 9, 4310 Rheinfelden
Switzerland
www.doble-lemke.eu



Příloha č.4: Katalogový list měřicího systému částečných výbojů v pásmu UHF pro olejem plněné transformátory bez možnosti lokalizace místa výbojů. Systém obsahuje přístroj PD-Smart/UHF, sondu DN80 (pro instalaci přes olejový ventil) a přístroj LDC-7/UHF. Cena konfigurace cca 1,1 mil. Kč bez DPH.



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

PD-Smart/UHF

Applications

The PD-Smart/UHF is a portable and versatile measuring and diagnosis instrument for the UHF processing of Partial Discharges acquired from different UHF sensors. The PD-Smart/UHF is especially developed for periodical UHF PD measurements (on-/offline) on transformers, GIS, cable systems and other HV components.

The PD-Smart/UHF combines the features of a PD detector and spectrum analyzer.



Application:

- » PD testing on gas-insulated switchgears (GIS) using GIS-sensors (internal sensors, GIS-Window-Sensors, GIS-Spacer-Sensors or TEV-Sensors)
- » PD analysis and diagnosis on transformers using UHF-drain-valve DN 50/80 or UHF Top-Hatch Sensors
- » Partial Discharge testing on cable terminations using UHF-Sensors (LDWS-T coupler "type-A")

The application range covers the complete spectrum: Scientific and industrial research and development purposes, and routine tests in a production environment.

Due to the advanced internal noise reduction facilities, the system is suitable not only for laboratory tests, but also for field tests in a rough, noisy environment on HV apparatus in power stations and substations.

Benefits

- » Rugged and reliable housing. The PD-Smart/UHF is field-proven and can be used as day-to-day tool. The PD-Smart/UHF is self-contained in a rugged polyurethane case (ABS Peli), which allows an uncomplicated, fast and easy transport for on-site tests.
- » Integrated Spectrum analyzer ("Zero-Span")-function: The PD-Smart/UHF combines the features of a PD measuring instrument and a spectrum analyzer. It allows full automatic sweeping within the complete frequency range.
- » Outstanding sensitivity and thus unique accuracy as well as excellent measuring results due to the Doble Lemke pre-amplifier LDA-5/GIS.
- » Superior safety in high voltage test set ups due to complete galvanic isolation

PD-Smart/UHF

between the PD-Smart/UHF and Laptop via fibre-optical cabling. This allows also a remarkable reduce of the background noise level.

» Integrated, changeable accumulators (high-performance lithium-Ion batteries) for network independent and interference-free operation. Load indicator is integrated in the sophisticated software.

» User-friendly control and analyze software as well as state-of-the art export functions.

Specifications

» UHF processing of partial discharge signals acquired from installed GIS sensors or other sensors

» pulse sequence recording and continuous UHF PD pulse processing

» frequency domain signal conditioning

» frequency selective PD measuring to eliminate noise

» Sensor Pre-Amplifier:

» amplification: 0 dB / 26 dB / 38 dB, frequency range 110 MHz to 850 MHz

» LED indication for selected amplification

» powered via N-type UHF connector

» Software controlled sensor amplifier power on/off

» protection unit

» UHF Processing Unit:

» Signal Input Unit of the UHF PD Sensors: "N"-type connector

» Software controlled Attenuation Unit

» attenuator 62 dB

» the attenuation (2-dB steps) can be set via control software

» Software controlled band-stop Filter (band width approx.: 7 MHz)

» the mid-frequency of this filter is continuously adjustable between 110 MHz and 850 MHz or can be set to 5 free selectable frequencies

» IF Mixer Unit:

» internal IF signal (peak detected) as output signal for the digital Input Unit of the PD-Smart at a bandwidth between 110 MHz and 850 MHz: 7 MHz (IF)

» input impedance 50 Ohm

Accessories

For all applications:

» LDC-7/UHF - UHF-Impulse Generator

» LDA-5/GIS -pre-amplifier

» Notebook

For measurements on gas-insulated switchgears(GIS):

» UHF-Window-Sensor

» UHF-Spacer Sensor



TOGETHER WE POWER THE WORLD®

UHF-PD Sensor Drain Valve

Applications

Application: UHF-Partial Discharge Measurement on Transformers

- » For decoupling of electromagnetic PD signals from the inner of an oilpaper insulated transformers
 - » Sensors support "Performance/Sensitivity Check" (High frequent test pulse can be injected by further integrated electrodes)
 - » Grounded sensors (for low frequencies)
 - » Sensor set-up at drain valves (e.g. normally used for oil filling)
 - » Standard design for DN 50 or DN 80 drain valves
 - » Further designs and dimensions on request
- » Development in cooperation with Institute of Power Transmission and High-Voltage Technology (IEH) at the University of Stuttgart (Germany)

Benefits

- » Easy-installable sensor
- » No outage needed for installation
- » Shielded against external noise by the transformer tank
- » suitable for PD monitoring (permanently installed)

Specifications

- » Signal decoupling in ultrahigh frequency range: 200 MHz – 1 GHz
 - » Leak-tightness tested for oil temperature 120 °C at 5 bar pressure
 - » Sealing: Viton® (FKM)
 - » Insulation material: PA GF 30
 - » Recommended load impedance: 50 Ohm
- » Flange: DN50/DN80 (other designs on request)
- » Maximum slide-in: 450 mm
- » Weight: approx. 3 kg (6.61 lbs)

Accessories

Instruments:

- » PD Measuring System PD-Smart-UHF or LDS-6/UHF
- » PD Monitoring Device PD-Guard/UHF





TOGETHER WE POWER THE WORLD®

UHF-PD Sensor Drain Valve

- » Carry case for easy and safe transportation
- » UHF Pulse generator LDG-7/UHF

Additional Pictures



Doble Lemke GmbH
Zschoner Ring 9, 01723 Kesselsdorf / Dresden
Germany
www.doble-lemke.eu

Doble Lemke AG
Kaiserstrasse 9, 4310 Rheinfelden
Switzerland
www.doble-lemke.eu



Doble-Lemke ist zertifiziert nach
DIN EN ISO 9001