

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Online měřicí systém částečných výbojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KOŽANT**
Osobní číslo: **E17N0103P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Online měřicí systém částečných výbojů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Popište diagnostické metody používané v elektrotechnice
2. Popište problematiku měření částečných výbojů
3. Navrhněte měřicí řetězec pro měření ČV online
4. Proveďte ověřovací experiment



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:


1. internetové zdroje
2. Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Mentlík a kol.
3. ČSN EN 60270
4. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, Mentlík a kol. BEN 2011

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá teoretickým popisem diagnostiky elektrických zařízení, jednotlivými typy částečných výbojů a metodami měření částečných výbojů. Pro praktickou názornost online detekce částečných výbojů byl navržen vhodný řetězec. Jako software pro realizaci online diagnostiky částečných výbojů byl použit LabVIEW, ve kterém byl graficky naprogramován zmíněný měřicí řetězec. Online měřicí systém částečných výbojů dokázal zachytit částečné výboje a předejít tak možnému průrazu izolace testovaného objektu.

Klíčová slova

Diagnostika, částečný výboj, dielektrikum, izolace, online měřicí systém, měřicí řetězec, LabVIEW, testovaný objekt

Abstract

This thesis deals with theoretical description of power equipment diagnostics as well as with individual types of partial discharges and methods for their measurement. Suitable procedure was designed for online diagnostic of partial discharges to illustrate their detection. LabVIEW application was utilized to implementation of partial discharges online diagnostics using graphical representation of given measurement procedure. Partial discharge online measuring system was able to detect partial discharges, this avoid the risk of insulation penetration of tested object.

Key words

Diagnostics, partial discharge, dielectric, isolation, online measuring systém, measuring string, LabVIEW, test object

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 18.6.2020

Martin Kožant

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat svému zaměstnavateli EGC – EnerGoConsult ČB s.r.o., konkrétně Ing. Pavlu Čurdovi za konzultace ohledně softwaru LabVIEW a Ing. Františku Kysnarovi, Ph.D. za možnost uskutečnit měřicí experiment při zaměstnání.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 DIAGNOSTIKA	12
1.1 DIAGNOSTIKA OFF-LINE A ON-LINE	14
1.1.1 <i>Systém off-line – testovací diagnostiky</i>	14
1.1.2 <i>Systém on-line – funkční diagnostiky</i>	15
2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	16
2.1 TYPY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	17
2.1.1 <i>Částečné výboje typu A</i>	17
2.1.2 <i>Částečné výboje typu B</i>	17
2.1.3 <i>Částečné výboje typu C</i>	18
2.1.4 <i>Částečné výboje typu D</i>	18
2.1.5 <i>Částečné výboje typu E</i>	18
2.1.6 <i>Částečné výboje typu F</i>	19
2.1.7 <i>Částečné výboje typu G</i>	19
2.1.8 <i>Částečné výboje typu H</i>	20
2.1.9 <i>Částečné výboje typu I</i>	21
2.1.10 <i>Částečné výboje typu J</i>	21
2.1.11 <i>Částečné výboje typu K</i>	21
2.1.12 <i>Částečné výboje typu L</i>	22
2.1.13 <i>Částečné výboje typu M</i>	22
2.1.14 <i>Částečné výboje typu N</i>	23
2.1.15 <i>Částečné výboje typu O</i>	23
2.2 CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	23
2.2.1 <i>Zdánlivý náboj částečných výbojů</i>	24
2.2.2 <i>Četnost impulzů</i>	24
2.2.3 <i>Čas výskytu impulzu ČV a jeho fázový úhel</i>	24
2.2.4 <i>Střední proud ČV</i>	24
2.2.5 <i>Výkon částečných výbojů</i>	25
2.2.6 <i>Střední kvadratický součet</i>	25
2.2.7 <i>Zkušební napětí částečných výbojů</i>	25
2.2.8 <i>Počáteční napětí částečných výbojů</i>	25
2.2.9 <i>Zhášecí napětí částečných výbojů</i>	25
2.3 VLIVY VNITŘNÍCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA MATERIÁLY	26
2.3.1 <i>Elektrické účinky</i>	26
2.3.2 <i>Chemické účinky</i>	26
2.3.3 <i>Kapalné produkty</i>	27
2.3.4 <i>Plynné produkty</i>	27
2.3.5 <i>Pevné produkty</i>	27
2.3.6 <i>Erozivní účinky</i>	28
2.3.7 <i>Tepelné účinky</i>	28
2.4 RŮST ELEKTRICKÉHO STROMEČKU	28
3 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	30
3.1 PŘÍMÉ ELEKTRICKÉ METODY MĚŘENÍ ČV.....	30
3.2 GLOBÁLNÍ GALVANICKÁ METODA MĚŘENÍ ČV.....	31
3.2.1 <i>Měřicí obvod s paralelní snímací impedancí</i>	32
3.2.2 <i>Měřicí obvod se sériovou snímací impedancí</i>	32
3.2.3 <i>Měřicí obvod v můstkovém zapojení</i>	33
3.3 MĚŘICÍ IMPEDANCE PRO MĚŘENÍ ČV.....	35
3.3.1 <i>Dolní (f_1) a horní (f_2) mezní kmitočty</i>	36

3.3.2	Šířka pásma Δf a střední kmitočet pásma f_m	36
3.3.3	Rozlišovací doba pulzu T_r	36
3.4	NEPŘÍMÉ ELEKTRICKÉ METODY.....	37
3.5	METODA INDUKTIVNĚ VÁZANÉ SONDY.....	37
3.6	KAPACITNÍ DRÁŽKOVÁ SONDA.....	38
3.7	KAPACITNÍ SNÍMAČE.....	39
3.8	METODA DIFERENCIÁLNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ SONDY.....	40
3.9	LEMKE SONDA.....	41
3.10	INDUKTIVNÍ SNÍMAČE.....	41
3.11	AKUSTICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	43
3.12	OPTICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	43
3.13	CHEMICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	44
3.14	DETEKCE OBSAHU PLYNŮ.....	44
4	KALIBRACE.....	45
4.1	KALIBRACE MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE.....	45
4.2	KALIBRACE MĚŘICÍHO OBVODU.....	46
5	UKÁZKA ZACHYCENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	47
6	LABVIEW.....	49
7	POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	50
7.1	ZDROJ NAPĚTÍ.....	50
7.2	DIGITÁLNÍ OSCILOSKOP.....	51
7.3	PROUDOVÁ SONDA.....	51
8	OVĚŘOVACÍ EXPERIMENT.....	52
8.1	NÁVRH MĚŘICÍHO ŘETĚZCE.....	53
8.2	POPIS ŘÍDÍCÍHO PANELU.....	56
8.3	MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	59
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	1

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na diagnostiku částečných výbojů v elektrických zařízeních. V dnešní době jsou na elektrická zařízení kladeny ty nejvyšší požadavky směřující k dlouhodobému a bezporuchovému stavu. Ať už jde o elektrické, chemické, tepelné či erozivní vlivy, tak mají částečné výboje velmi negativní dopad na izolační systémy elektrických zařízení a snižují tím jejich životnost a spolehlivost.

Práce pojednává o diagnostice a problematice měření částečných výbojů v elektrických zařízeních a je rozdělena do několika částí.

V první části je obecně popsána současná diagnostika a její úkoly. Dále se zaměřuje na diagnostický systém a jeho části. Popis off-line, on-line diagnostiky a předpověď chování diagnostikovaného objektu.

Druhá část diplomové práce se zaměřuje na částečné výboje a jejich typy. Ve třetí části je popsána problematika měření částečných výbojů a jejich jednotlivé metody. Čtvrtá kapitola popisuje kalibraci měřicích obvodů.

V páté části je vypracováno jednoduché blokové schéma pro měření částečných výbojů a jejich následné zachycení. Jsou zde k dispozici průběhy z osciloskopu.

Šestá kapitola stručně popisuje software LabVIEW, který byl použit pro on-line detekci částečných výbojů. Jsou zde zmíněny základní údaje a možnosti použití tohoto softwaru.

V sedmé kapitole jsou popsány všechny použité měřicí prvky, které byly použity pro ověření experimentu.

Poslední kapitola patří návrhu měřicího řetězce pro online měření částečných výbojů. Popisuje se zde funkcionalita blokového diagramu v softwaru LabVIEW a provádí se ověřovací experiment, který je následně zhodnocen.

Seznam symbolů a zkratk

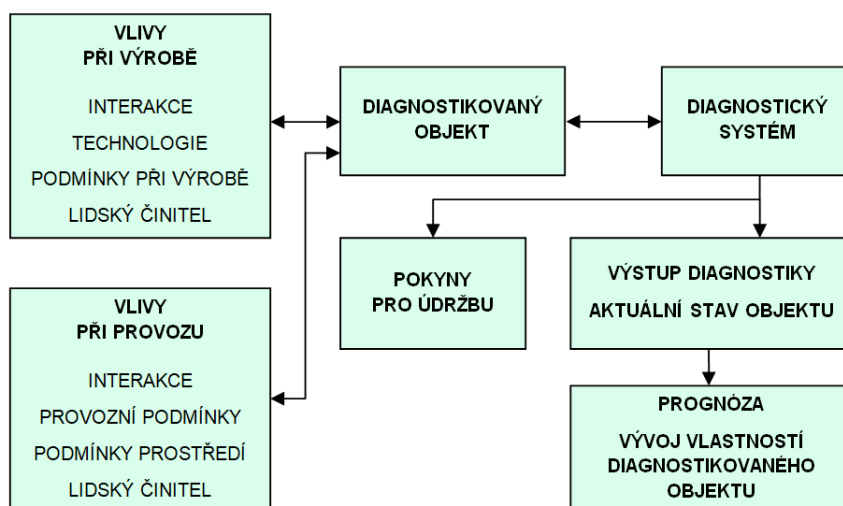
ČV	–	částečný výboj
pC	–	pikocoulomb
W	–	watt
R _j	–	množina signálů
T	–	časový interval
φ	–	fázový úhel
q	–	zdánlivý náboj
P	–	výkon
I	–	proud
Hz	–	Hertz
H	–	intenzita magnetického pole
B	–	magnetická indukce
D	–	střední kvadratický součet

1 Diagnostika

Pojem diagnostika je odvozeno ze dvou řeckých slov „Dia“ a „Gnosis“ neboli „skrze“ a „poznání“. V dnešní době je vyráběno čím dál více nových zařízení, které by měly vyhovovat různým požadavkům. Ať už jde o porovnání ceny, výkonu, životnosti, spolehlivosti, ale také i emisemi a mnoho dalších. S ohledem na konkurenceschopnost je nutné uvedené požadavky respektovat. Jako prostředek zjišťování stavu zařízení se používá diagnostika. Ta je v dnešní době nedílnou součástí jak při výrobě, tak i v provozu zařízení. Diagnostika zkoumá chování zařízení a získává informace, které jsou podstatné ve všech jejich systémech, podsystémech, ale i jednotlivých prvcích. [1,32]

Diagnostika však nesnižuje pouze možné ekonomické ztráty. Je velmi důležitá z hlediska zjišťování poruch, které vznikají při běžném provozu zařízení. Zjištěné poruchy jsou dále tříděny a uloženy v databázích. Na základě informací, které jsou uchovávány v databázích, jsou nadále analyzovány a prokážou-li se některé poruchy jako opakovatelné, ukáže to na nedostatky v samotné výrobě. Tyto nedostatky se pak řeší například v konstrukci zařízení, programování či jinému procesu, který se prokáže jako nedokonalý. Jednat se může i o špatné provozní prostředí. Odhalí-li diagnostika poruchu, má k dispozici vlastní návrh na postup, který se v co nejkratším čase provede. Tato skutečnost opět zabrání ekonomickým ztrátám, které mohou být vysoké už za pár chvil od přerušení výroby. [1]

Pokud tedy vycházíme ze strukturálního propojení technologických procesů s materiálovým inženýrstvím pomocí elektrotechnologické diagnostiky, je tato diagnostika brána jako velmi důležitou součástí pro sledování životnosti elektrických zařízení či zařízení jako takových. Jedná se o provozní diagnostiku, která shromažďuje data zařízení a ukládá je do archivu, kde se pak sledují parametry chování jednotlivých zařízení a následně se z této diagnostiky dá určit chování zařízení dopředu. Toto je završením diagnostiky a jde o tzv. elektrotechnologickou prognostiku. [1]



Obr. 1.1: Základní souvislosti při diagnostice elektrických zařízení – inspirováno z [1]

Sledované objekty dělíme podle jejich struktury do dvou základních skupin. V první skupině jsou objekty, které mají nepřístupnou strukturu. U takovýchto objektů se sleduje pouze vstup a výstup s tím, že objekt bude v rámci dovolené tolerance diagnostického systému správně reagovat na vstupní zkušební signály. Z toho vyplývá, že se nesoustředíme na odehrávající se procesy uvnitř struktury sledovaného objektu, ale o procesní vlastnosti, které jsou pro správný chod zařízení rozhodující. Parametry, které se při diagnostice sledují, musí odpovídat vytyčeným mezím. Do druhé skupiny patří objekty, které mají jejich strukturu přístupnou. Tam sledujeme vedle vstupů s výstupy i dění ve struktuře. To prakticky znamená, že se kontrolují i vstupy a výstupy u všech jednotlivých prvků ve struktuře. Jde o parametry, které kvantitativně či kvalitativně popisují chemické, fyzikální a popřípadě i jiné vlastnosti systémové struktury diagnostikovaného objektu. [1]

Zařízení je během svého života převážně v bezporuchovém stavu, ve kterém plní všechny funkce. Opačným stavem je stav poruchový, v němž alespoň jedna z funkcí nesplňuje požadavky. Pokud zařízení pracuje jen částečně, jedná se o provozuschopný stav. [1]

Diagnostikovaný objekt je nejčastěji provozován při normálních podmínkách. V těchto podmínkách jsou brány v úvahu zásady o údržbě a návod k obsluze zařízení. Pokud tedy při těchto podmínkách vznikne porucha zařízení, jde o vnitřní příčinu jako je například provedení nebo konstrukce diagnostikovaného objektu. Poruchy mohou nastat i z vnějších příčin, jako je třeba špatná obsluha zařízení či nepříznivé vnější podmínky. V takovémto

případě jde o provoz zařízení v nenormálních podmínkách. [1]

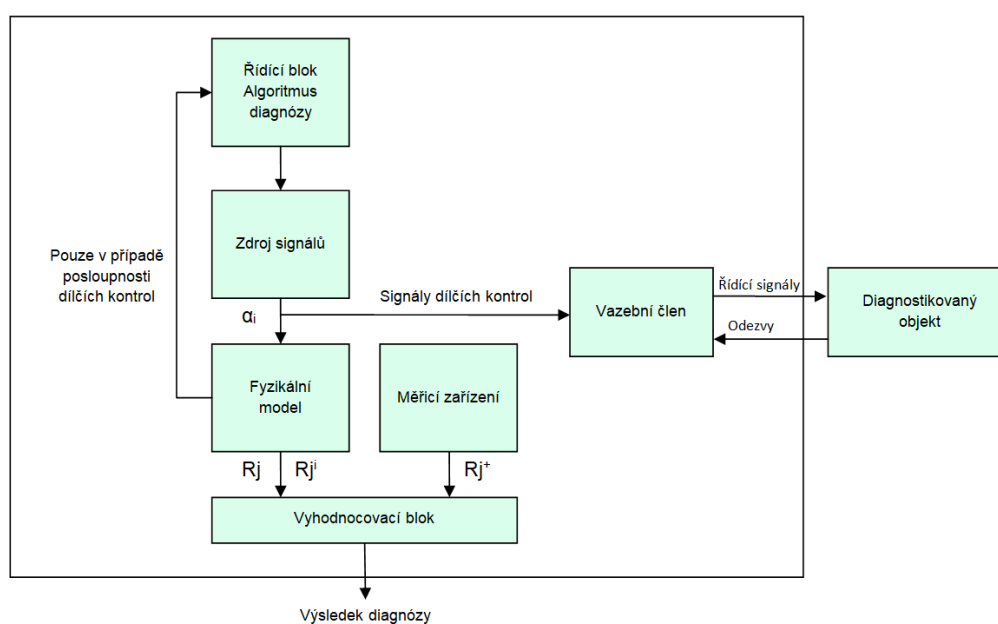
Držitelem informací o technickém stavu sledovaných objektů je diagnostická veličina. Jelikož je stochastického charakteru, musí se respektovat její rozptyl a používat statistické veličiny a charakteristiky diagnostických ukazatelů. Pokud nejsou strukturní parametry přímo měřitelné veličiny (nemají numerický charakter), musí se přetransformovat do stavu pro zpracování. [1]

1.1 Diagnostika off-line a on-line

Z pohledu provádění vlastní diagnostiky zařízení rozlišujeme dva zásadní způsoby. Vše se odvíjí od toho, jestli je diagnostikované zařízení v provozu či mimo provoz. Pokud je zařízení v plném provozu, jedná se o funkční diagnostiku on-line. Je-li zařízení mimo provoz, jde o testovací diagnostiku off-line. [1]

Online monitoring ČV, na rozdíl od jiných off-line metod, pracuje s běžným provozním stavem objektu. Výhodou monitoringu je neustálý přísun informací o stavu zařízení v provozu. Pokud jsou detekovány částečné výboje, jedná se o nežádoucí jev, který je potřeba vyřešit dříve, než dojde k úplnému průrazu izolace. [33]

1.1.1 Systém off-line – testovací diagnostiky



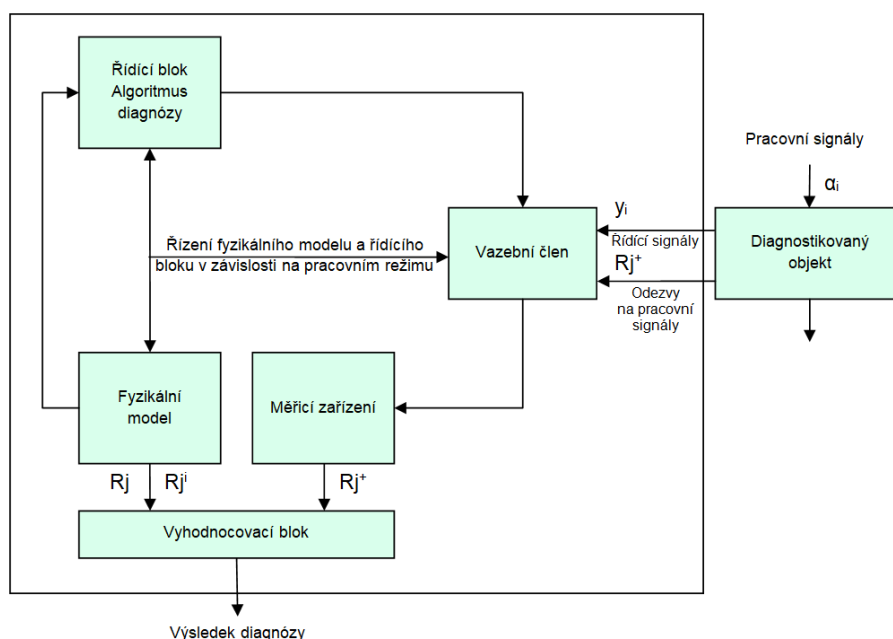
Obr. 1.2: Vazby při vzniku diagnostiky, dopady a oblasti jejího působení – inspirováno z [1]

Řídicí blok obsahuje algoritmus diagnózy. Zdroj signálů pak podle něj generuje signály jednotlivých dílčích kontrol, které jdou ve sledu tohoto algoritmu. Tyto signály jdou do vazebního členu a následně do diagnostikovaného objektu, popřípadě i do fyzikálního modelu diagnostikovaného zařízení. Fyzikální model realizuje při kontrole správnosti diagnostikovaného zařízení funkce jak pro bezporuchový stav (množina signálů R_j), tak i pro stav poruchový (množina signálů R_j^i). Vyprodukované informace tohoto fyzikálního modelu jdou do vyhodnocovacího bloku, ve kterém jsou zpracovány výsledky diagnostického systému. [1]

Na signály jednotlivých kontrol α^i diagnostický objekt reaguje a vystupují z něj skutečné výsledky kontrol R_j^+ , které jdou do měřicího zařízení skrze vazební člen. Z měřicího zařízení jsou tyto informace přivedeny do vyhodnocovacího bloku. [1]

Vyhodnocovací blok má za úkol porovnat možné výsledky R_j a R_j^i se skutečnými hodnotami R_j^+ jednotlivých kontrol. Po tomto porovnání se pak vyhodnotí výsledek diagnózy. [1]

1.1.2 Systém on-line – funkční diagnostiky



Obr. 1.3: Schéma on-line – funkční – diagnostiky (zařízení je v plném provozu) – inspirováno z [1]

On-line (funkční) diagnostika je prováděna za plného chodu diagnostikovaného zařízení. Funkční blokové schéma je znázorněno na obrázku č. 1. 5. Zde je vidět, že

do diagnostikovaného zařízení jsou přiváděny provozní signály α_j . Diagnostický systém poté ze zkoušeného objektu přijímá řídicí signály y_i a také odezvy na pracovní signály R_j^+ . Vyhodnocovací blok porovnává dílčí kontroly (R_j^+) s těmi možnými (R_j a R_j^i), které produkuje fyzikální model a stejně jako u off-line metody se určí výsledek. [1]

2 Částečné výboje

V pevném, plynném i kapalném dielektriku izolačního systému elektrických strojů může docházet k elektrickým výbojům. Když výboje jen částečně přemostí izolaci mezi elektrodami různého potenciálu nebo vodiči, jedná se o částečné výboje. [1]

Částečné výboje vznikají v důsledku lokálního elektrického namáhání na povrchu izolace v blízkosti vodičů, přímo v izolaci, atd. Objevují se jako impulzy, které trvají méně než 1 μ s. Ať už se jedná o elektrické, chemické, erozivní či tepelné vlivy, tak mají částečné výboje velmi negativní dopad na izolační systémy daných elektrických zařízení a snižují tím jejich životnost a spolehlivost. [1,2]

Rozdělení částečných výbojů podle jejich výskytu:

- Vnější částečné výboje
- Povrchové částečné výboje
- Vnitřní částečné výboje

Mezi vnější částečné výboje se řadí takové výboje, které vznikají v plynech v blízkosti elektrod malých poloměrů či větších zakřivení. Jedná se například o korónové nebo doutnavé výboje. [1]

Povrchové částečné výboje se poznají tak, že vznikají poblíž elektrod na rozhraní mezi dvěma dielektriky, plynným a pevným. Například se může jednat o klouzavé výboje na průchodkách, na konci vinutí u točivých strojů atd. [1]

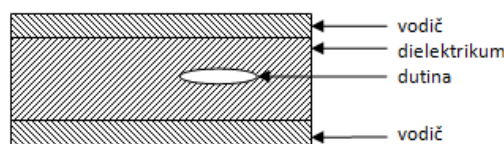
Pokud jde o výboje vzniklé v plynech, kde jsou obklopené kapalným nebo pevným dielektrikem, jedná se o vnitřní částečné výboje. Např. částečné výboje v dutinkách v pevném dielektriku. [1]

2.1 Typy částečných výbojů

Existuje plno typů částečných výbojů, které můžeme změřit. Rozlišují se podle umístění, tj. fázového úhlu na křivce napájecího napětí. V následujících podkapitolách jsou stručně popsány jednotlivé typy možných částečných výbojů. [1]

2.1.1 Částečné výboje typu A

Tyto částečné výboje vznikají přiložením vnějšího napětí na zařízení ve vzduchové mezeře. [1]

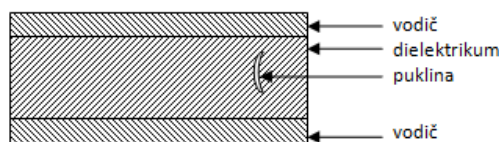


Obr. 2.1: Výboje v dutince uvnitř dielektrika – inspirováno z [1]

Mají přibližně stejnou velikost a objevují se jak v kladné, tak i záporné půlplně. Objevují se mezi nulou a maximem přiloženého sinusového napětí v nezávislých polohách. [1]

2.1.2 Částečné výboje typu B

Nehomogenita ve směru elektrického pole nebo dutina v termoplastických izolantech či elastomerech má za následek vznik částečných výbojů typu B. [1]

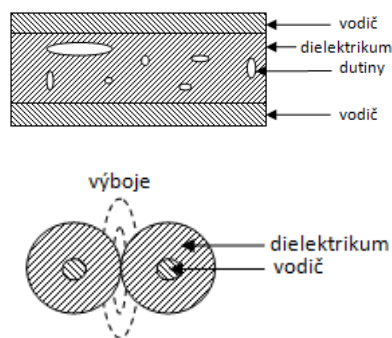


Obr. 2.2: Puklina v elastomeru – inspirováno z [1]

Při krátkodobém nárůstu a poklesu zkušebního napětí jsou tyto výboje podobné typu A. Pokud se však napětí opět zvýší, nedojde k průrazu a nechá se přiloženo delší dobu, bude se zdánlivý náboj zmenšovat. To má za následek samozhášení. Zhášecí napětí je vyšší než zapalovací napětí. Čím delší dobu bude zařízení pod tímto napětím, tím větší bude hodnota zhášecího napětí. [1,3]

2.1.3 Částečné výboje typu C

Jedná se o vnitřní částečné výboje ve více dutinkách o různé velikosti (viz obrázek) nebo vnější výboje mezi izolacemi dotýkajících se vodičů. [1]

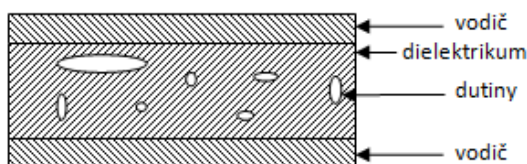


Obr. 2.3: Výboje typu C – inspirováno z [1]

Počet těchto částečných výbojů se zvyšuje zároveň se zvyšujícím se napětím. Což má poté za následek jejich špatné rozeznání. Zhášecí napětí je stejné nebo o něco menší než zapalovací napětí. [1]

2.1.4 Částečné výboje typu D

Vyskytují se v elektrických izolantech vyrobených na bázi pryskyřic, kde vzniká při výrobě větší množství dutinek o různé velikosti. Jsou podobné předchozímu typu C. [1]

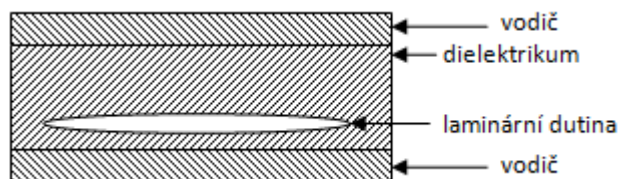


Obr. 2.4: Dutiny v izolantu na bázi pryskyřice – inspirováno z [1]

2.1.5 Částečné výboje typu E

Částečné výboje typu E vznikají v dielektriku, kde se vyskytuje laminární dutina. Jsou podobné jako předchozí dva typy C a D, tudíž se zvyšujícím se napětím roste i počet výbojů v dielektriku. Pokud se udržuje konstantní zkušební napětí nad hladinou zapalovacího napětí, velikost částečných výbojů chvíli mírně vzrůstá a poté se ustálí. [3]

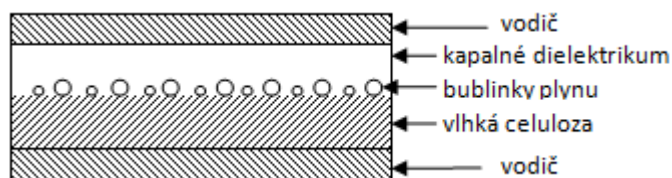
Na následujícím obrázku je vidět dielektrikum s laminární dutinou.



Obr. 2.5: Laminární puklina v dielektriku[1]

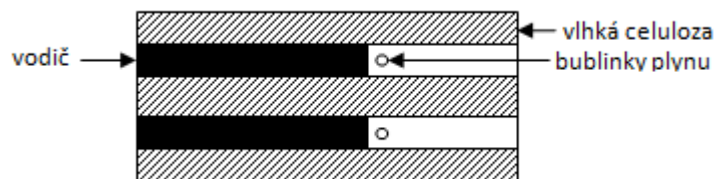
2.1.6 Částečné výboje typu F

Částečné výboje typu F vznikají v kapalném dielektriku v bublinkách plynu, je-li kondenzátor v kontaktu s vlhkou celulózą. Viz obrázek níže.



Obr. 2.6: Uspořádání u částečných výbojů typu F – inspirováno z [1]

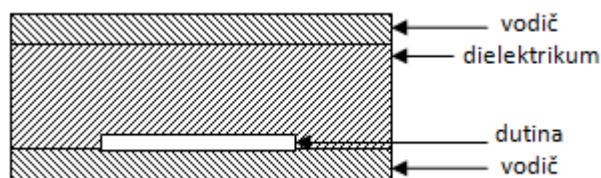
Jedná se o podobný vývoj částečných výbojů jako u předešlých třech typů. Pokud se drží konstantní zkušební napětí delší dobu (v řádu minut) nad hladinou zapalovacího napětí, tak velikost částečných výbojů vzroste až stokrát. Po snížení přiloženého napětí se sníží i napětí zhášecí a to až třikrát od jeho původní hodnoty. [3]



Obr. 2.7: Uspořádání u částečných výbojů typu F – inspirováno z [1]

2.1.7 Částečné výboje typu G

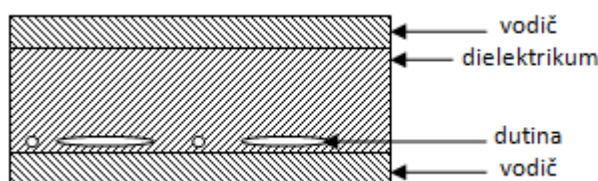
Výboje typu G se objevují hlavně mezi dielektrikem a vodičem, kde je nějaká dutina. Ty mohou mít nesterodný povrch a mohou mít v sobě i uhlíkové částičky. Tato skutečnost pak může způsobit obtížné rozeznávání výbojů. Zdánlivý náboj není závislý na změně přiloženého napětí a zapalovací napětí je stejné nebo vyšší než napětí zhášecí.[3]



Obr. 2.8: Dutina mezi dielektrikem a vodičem – inspirováno z [1]

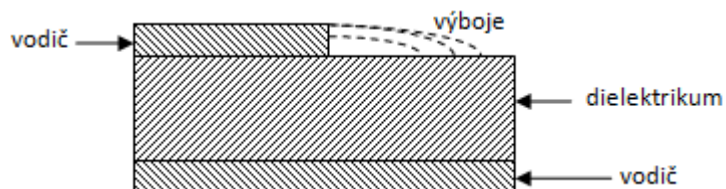
2.1.8 Částečné výboje typu H

Částečné výboje typu H jsou vnitřní i vnější. Vnitřní jsou v dutinách mezi vodičem a dielektrikem (viz obrázek 2.9).



Obr. 2.9: Uspořádání při částečných výbojích typu H – inspirováno z [1]

Vnější částečné výboje vznikají mezi povrchem vodiče a dielektrika. (viz obrázek 2.10).



Obr. 2.10: Uspořádání při částečných výbojích typu H – inspirováno z [1]

Jsou podobné předchozím výbojům typu G, kde při zvyšujícím se napětí dochází ke zvyšování počtu výbojů, tudíž je pak téměř nemožné rozeznat jednotlivé proudové impulzy. Zapalovací napětí je opět stejné nebo nepatrně vyšší než to zhášecí. [3]

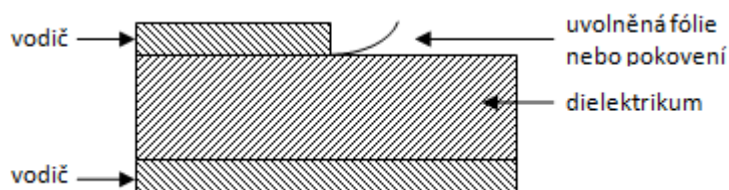
2.1.9 Částečné výboje typu I

Jsou to výboje či parazitní rušení ve vzduchové mezeře o malém průměru mezi vodiči uvnitř zkoušeného zařízení nebo na „plovoucích objektech“. Proudové pulzy jsou o stejném počtu a velikosti. [1]

Vniklé částečné výboje typu I mají mezi sebou cca stejný fázový úhel a při optickém pozorování se mohou místy jevit jako zdvojené. Při zvyšování napětí se mezery mezi pulzy zmenšují, z důvodu jejich vyššího počtu. Velikost ale zůstává stejná i po následném snížení přiloženého napětí až k úrovni napětí zhášecího. To bývá obvykle stejné jako zapalovací napětí. Někdy mohou dokonce tyto výboje při snižování napětí zcela vymizet a objevit se po chvíli znovu ve stejné míře při nižším napětí. Nejsou závislé na době trvání přiloženého napětí. [3]

2.1.10 Částečné výboje typu J

Příčinou těchto částečných výbojů může být například uvolněná elektroda, která je díky účinkům elektrického pole v pohybu. Projevují se jako symetricky umístěné dva pulzy kladné či záporné amplitudy přiloženého napětí. Pokud vzrůstá napájecí napětí, roste fázový úhel proudových impulzů těchto výbojů. Zachovávají si však velikost a symetrii vůči maximálnímu napětí. Zapalovací a zhášecí napětí jsou totožná. Výboje jsou nezávislé na časové délce přiloženého napětí. [3]

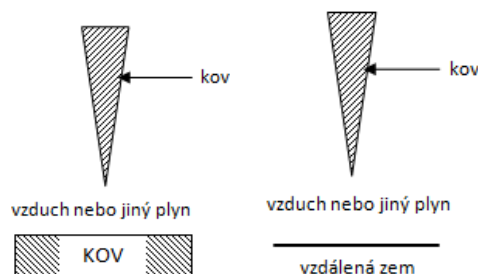


Obr. 2.11: Uvolněná část elektrody při výbojích typu J – inspirováno z [1]

2.1.11 Částečné výboje typu K

Vznikají při výskytu vnější koróny v okolí kovových hran nebo hrotů. Při detekci se pohybují pouze v jedné půlčlenně přiloženého napájecího napětí a jsou symetricky rozloženy kolem vrcholu napěťové křivky. Jejich pulzy jsou přibližně stejně fázově vzdáleny od sebe a mají přibližně stejnou amplitudu. Zvyšování výbojů je úměrné

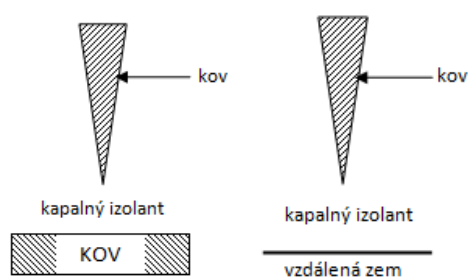
zvyšování napětí, avšak jejich rozmístění je pořád symetricky uspořádané vůči maximu napětí. Zhášecí napětí je stejné jako zapalovací a doba měření nemá vliv na odezvu těchto výbojů. [3]



Obr. 2.12: Uspořádání při výbojích typu K – inspirováno z [1]

2.1.12 Částečné výboje typu L

Koróna vytváří odezvu pro částečné výboje, vznikající na kovové hraně či ostrém hrotu v kapalném izolantu. Pulzy se vyskytují v záporné i kladné půlčísle napájecího napětí a jsou symetricky uspořádané v maximech ($+90^\circ$ a -270°). V každé půlčísle je jinak velký impulz. Při zvyšování napájecího napětí se začnou vyskytovat částečné výboje s větší hodnotou zdánlivého náboje, déle se pak zapálí i menší výboje, u kterých zůstává konstantní velikost. Doba měření většinou nemá žádný vliv na odezvu těchto výbojů a zapalovací napětí je stejné jako zhášecí. [3]



Obr. 2.13: Uspořádání při výbojích typu L – inspirováno z [1]

2.1.13 Částečné výboje typu M

Tyto částečné výboje vznikají mezi nedokonale spojenými kovy. Tato nedokonalá spojení mohou být v testovaném zařízení kdekoli. Charakteristicky se projevují jako šum, který je symetricky rozložen v okolí napěťových nul. Částečné výboje typu M mají přibližně stejnou velikost, jen v okolí maxim napěťových amplitud se zmenšují až k nule.

Objevují se úměrně pomalu se zvyšujícím se zkušebním napětím. Vlivem případného zlepšení kontaktu mezi kovy tyto výboje mohou zaniknout i přes dále se zvyšující napětí. Pokud je přiložené napětí na konstantní hodnotě, tak jeho doba působení nemá žádný vliv na velikost pulzů. [3]

2.1.14 Částečné výboje typu N

Jedná se o typ rušení. Jejich příčinou jsou harmonické, které jsou generované magnetickým nasycením jader transformátorů či reaktorů v testovacím obvodu. [1]

Nejsou to klasické výboje jako spíše odezva měřicího obvodu, která by mohla být detekována jako částečné výboje. Tato odezva je charakterizována nízkofrekvenční oscilací na kladné i záporné půlvlně zkušebního napětí. Doba přiloženého napětí ani jeho zvyšování nemají vliv na velikost zdánlivého náboje těchto částečných výbojů. [1, 3]

2.1.15 Částečné výboje typu O

Jde o detekci venkovního rušení s širokým rozsahem odezev měřicího systému. Jedná se například o nemodulované signály, vysokofrekvenční amplitudově modulovaný signál (rozhlas), dále pak jsou to signály z rádiového přenosu. Všechny tyto zmíněné rušení obvykle nejsou statické, často jsou však na časové ose. [3]

Nejčastější typy těchto odezev jsou například výboje, které se konstantně pohybují v jednom směru podle napájecího napětí. U tyristorových a rtuťových usměrňovačů se jedná typickou odezvou, kde jsou pulzy o různém počtu rovnoměrně rozmístěny po sinusovce přiloženého napětí. Dalším příkladem jde o rušení u spínacích prvků, jako jsou například relé či spínače u zabezpečovacích systémů. Odezvy trvají tak dlouho, dokud neklesne napětí k nule a nejsou závislé na zkušebním napětí. [1, 3]

2.2 Charakteristické veličiny částečných výbojů

Abychom mohli hodnotit aktivitu částečných výbojů, je nejprve potřeba zjistit jejich charakteristické veličiny. Několik změřených a odvozených parametrů už existuje, a tak se dále mohou rozdělit do elementárních skupin. V následujících podkapitolách jsou tyto veličiny typické pro měření částečných výbojů popsány podle normy ČSN EN 60270. [4]

2.2.1 Zdánlivý náboj částečných výbojů

Zdánlivý náboj patří mezi základní charakteristickou veličinu ČV. Značí se písmenem q a je obvykle vyjádřen v pikocoulombech [pC]. Jedná se o takový náboj, který pokud je injektován v krátkém čase na svorky testovaného zařízení, měl by mít stejnou výchylku jako proudový impulz částečného výboje. [4]

2.2.2 Četnost impulzů

Značí se malým písmenem n a vyjadřuje se v impulzech za sekundu. Četnost impulzů je poměr mezi sumárním počtem impulzů ČV a dobou trvání časového intervalu. V praxi platí, že jsou uvažovány pouze ty impulzy, které jsou vyšší, než je předepsaná velikost či interval velikostí. [1,4]

2.2.3 Čas výskytu impulzu ČV a jeho fázový úhel

Fázový úhel je dán vztahem:

$$\varphi_i = 360 \frac{t_i}{T} [^\circ],$$

kde t_i je okamžitý čas výskytu ČV měřený od posledního kladného průchodu napětíovou nulou a T je časová perioda přiloženého zkušební napětí. Vyjadřuje se v radiánech nebo úhlových stupních. [4]

2.2.4 Střední proud ČV

Střední proud ČV je součet absolutních hodnot q (zdánlivých nábojů) za určitou dobu intervalu T . Značí se velkým písmenem I a je dán následujícím vztahem:

$$I = \frac{(q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n)}{T_{ref}} [\text{C/s nebo A}],$$

Tento proud je vyjádřen buďto v ampérech, resp. [mA] nebo v coulombech za sekundu [C/s]. [4]

2.2.5 Výkon částečných výbojů

Výkon ČV se značí velkým písmenem P a je dán vztahem:

$$P = \frac{(q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_n u_n)}{T_{ref}} [\text{W}],$$

kde T_{ref} je referenční doba výbojové činnosti a u_1 až u_n jsou okamžité hodnoty přiloženého zkušební napětí, při kterém vznikly náboje q_1 až q_n . [4]

2.2.6 Střední kvadratický součet

Jedná se o odvozenou veličinu D, která je dána součtem ploch každých úrovní zdánlivého náboje vůči zvolenému referenčnímu časovému intervalu T_{ref} . [4]

Vztah středního kvadratického součtu D je pak dán vztahem:

$$D = \frac{(q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_n^2)}{T_{ref}} [\text{C}^2/\text{s}]. [4]$$

2.2.7 Zkušební napětí částečných výbojů

Toto napětí je předepsané pro měření částečných výbojů. Jde o takové přiložené napětí, které nezpůsobuje předepsanou úroveň ČV v měřeném objektu. [4]

2.2.8 Počáteční napětí částečných výbojů

Počáteční napětí ČV neboli také zapalovací napětí, je takové přiložené napětí k testovanému zařízení, při kterém začíná aktivita částečných výbojů. V praxi se jedná o pomalé zvyšování testovacího napětí od hodnoty, kde nebyla výbojová činnost až po dobu, kdy začíná. Udává se ve voltech, respektive kilovoltech. [4,1]

2.2.9 Zhášecí napětí částečných výbojů

Zhášecí napětí ČV je takové napětí, při kterém zanikají částečné výboje vlivem jeho pomalým snižováním. V praxi se jedná o nejmenší možné přiložené napětí, při kterém je úroveň zvolené veličiny impulzu částečných výbojů menší nebo rovna než nejmenší předepsaná hodnota. Značí se U_e a udává se nejčastěji v kilovoltech. [4,1]

2.3 Vlivy vnitřních částečných výbojů na materiály

Částečné výboje svým dlouhodobým vlivem způsobují selhávání izolací. Způsobují fyzikální i chemické změny v jejich přímé blízkosti. Jde o takové změny, které už jsou nevratné a způsobují celkově horší elektrické vlastnosti materiálu izolantu.

Degradace dielektrika je buď chemická, nebo je způsobena narážením částic například iontů v dutinách izolantu. Tím se díky reakčním dějům vlhkosti zvyšuje vodivost na povrchu dutiny. Ve vnitřní dutince jsou patrné i malé kapičky či rovnou vrstva kapaliny. [1,2,7]

Delším namáháním ČV dochází ke zdrsnění povrchu dutinek v dielektriku a začnou se vytvářet krystalky. Tím začne docházet k dalšímu intenzivnějšímu nárůstu částečných výbojů, které čím dál více prohlubují nehomogenitu v dielektriku. V takovém případě už dále vzniká vytvoření elektrického stromečku, který následně vede k celkovému proražení izolace. [8]

Výbojová činnost působí na každé skupiny izolačních materiálu jinak. Například porcelán, slída a další anorganické materiály jsou na vlivy částečných výbojů vcelku rezistentní, kdy jim nevadí i delší namáhání. To ale neplatí u organické skupiny materiálů, jako jsou např. PE, PEN, PET, PTFE a kompozity, obsahující silikonová nebo epoxidová pojiva. Všechny tyto organické materiály jsou poměrně dost citlivé i na krátkodobé namáhání částečnými výboji. [8]

2.3.1 Elektrické účinky

Vytvoří-li se v dutince dielektrika elektrický oblouk, má to za následek vytvoření vodivé dráhy, která může způsobit při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole průraz a vodivá dráha se může dále šířit dielektrikem. Tento ničivý účinek mají za následek elektrony s ionty narážením o stěny dutiny v izolantu. [1]

2.3.2 Chemické účinky

Vznikají při dlouhodobějším elektrickém namáhání. Ze začátku jde o reakce, které se odehrávají ve vlhkosti a odloučených produktech ze vzduchu působením částečných

výbojů. Výsledkem těchto chemických reakcí jsou kapalné, plynné a vedlejší pevné produkty. Produkty rozkladu pak pronikají do okolí pevného dielektrika a vytváří nezanedbatelně velké vodivé oblasti. [1]

2.3.3 Kapalné produkty

Podle prováděných výzkumů, publikovaných v [9], se prokázala přítomnost kapiček na povrchu izolantu XLPE, za předpokladu přítomnosti vody a uhlíkového monoxidu v atmosféře. Tyto kapičky jsou tvořeny směsí jako je např. kyselina octová, mravenčí a jiné karboxylové kyseliny. [7]

V další výzkumné práci [7] se uvádí, že pokud jeden z prvků C, O nebo H není obsažen, žádné kapičky se nevytvoří. Dále autoři tohoto výzkumu studovali kapičky, vytvořené v důsledku ČV na povrchu epoxidu. Charakter kapiček byl kyselý. Glykolát, formiát a glyoxilát byl objeven chromatografií. [1]

Zvětšení vodivosti na povrchu dutin je jeden z výrazných efektů při tvorbě tekutých produktů. Takový efekt je zapříčiněn, pokud jsou ve vodě rozpouštěny degradační produkty, které vytváří elektrolytickou vrstvičku. Povrchová vodivost se pak zvýší až o 7 řádů. [7]

2.3.4 Plynné produkty

Výzkumy plynných produktů, které byly provedeny plynovou chromatografií, ve vzduchové nehomogenitě zesíťovaného polyetyleny (XLPE) a vystaveny aktivitě ČV, zjistili malý obsah vodíku a větší množství uhlíkových dioxidů a monoxidů. Vodík s oxidem uhlíku byly objeveny i v dalším měření, kde se zkoumalo složení plynů skopickou metodou v elektrickém stromečku. [7,10]

2.3.5 Pevné produkty

Pevné produkty vznikají působením částečných výbojů až po několika týdnech, měsících a jsou složeny z hydrátu kyseliny šťavelové. Mají tvar krystalů, které vznikají v místě dopadu ČV z již vytvořených kapek. Tyto krystaly byly objeveny za předpokladu přítomnosti prvků C, O a H. [1]

2.3.6 Erozivní účinky

Jsou způsobovány účinky částečných výbojů a obzvláště za to mohou ionty, které bombardují stěny dutinek. Toto bombardování způsobuje rozšiřování dutinky a po nějaké době může dojít až k úplnému průrazu dielektrika. [1]

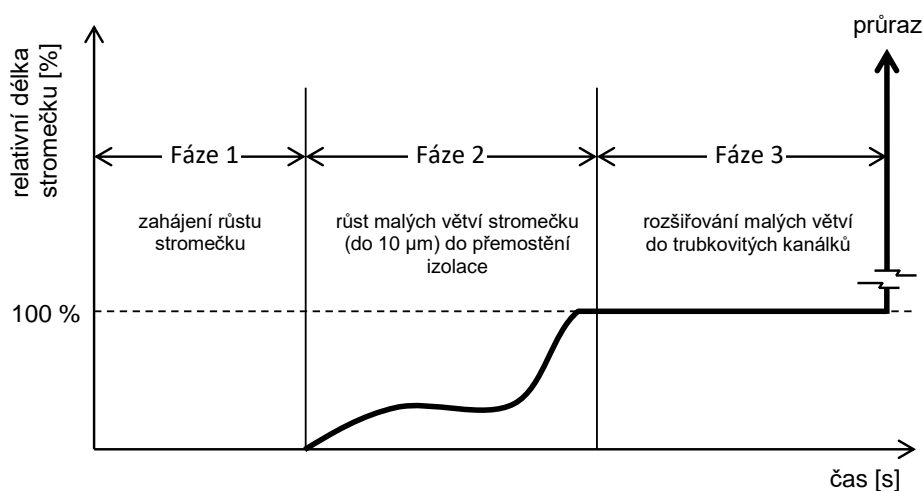
2.3.7 Tepelné účinky

Částečné výboje mají negativní vliv na materiál izolace z důvodu tepelného namáhání, které následně vyvolává tepelný průraz. Se zvyšující teplotou roste amplituda a zmenšuje se intenzita částečných výbojů. To může být způsobeno zvyšující se vodivostí epoxidových pryskyřic či zvětšením materiálu. Větší amplituda ČV by tedy mohla být způsobena větší plochou, která se vybíjí a snížení počtu částečných výbojů lze přisoudit vyšší povrchové vodivosti, kde dochází ke snížení intenzity pole v nehomogenitě izolace. [11,7,9]

Pokud je v dielektriku vytvořen elektrický stromeček, teplota velmi zrychluje jeho růst, čímž zapříčiní rychlejší průraz dielektrika. [7]

2.4 Růst elektrického stromečku

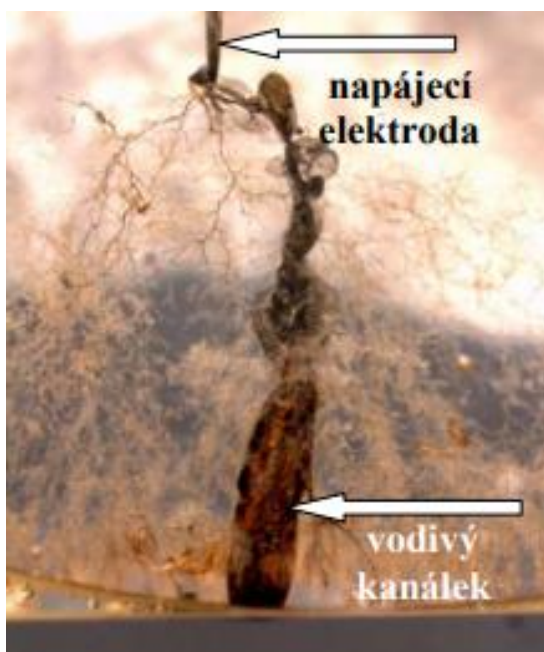
Jde o růst vodivé cesty v materiálu vlivem působení částečných výbojů. Vznik a růst elektrického stromečku je rozdělen do jednotlivých časových fází, které obecně platí pro různé elektroizolační materiály. [1]



Obr. 2.14: Vznik a růst elektrického stromečku v izolaci – inspirováno z [2]

V první fázi nastává počátek růstu elektrického stroměčku. Tuto fázi je těžké zachytit, proto je k tomu zapotřebí velmi citlivé techniky. [2]

Po vytvoření první větve elektrického stroměčku nastává druhá fáze. Z této první vzniklé větve se rozmnoží další menší větve směrem k elektrodě, která je uzemněna. Pokud relativní délka stroměčku k uzemněné elektrodě dosáhne 100%, končí druhá fáze. Průraz zatím nenastává, jelikož v malých větvích elektrického stroměčku teče malý proud, který nemá hodnotu k průrazu. Větve stroměčku jsou vyvolány výboji s průměrnými hodnoty zdánlivého náboje o hodnotě 5 až 30 pC. Z výzkumu bylo také zjištěno, že k prvnímu spojení elektrod dojde ve 24 % t z celkového času nutného na průraz. [2]



Obr. 2.15: Elektrický stroměček v epoxidové pryskyřici [12]

Třetí fáze nastává tehdy, když jsou obě elektrody propojeny a nastává průraz v dielektriku. Vzniká rozvětvení elektrického stroměčku a jeho duté kanálky se rozšiřují z cca 10 μm na hodnoty od 60 do 150 μm . Tyto kanálky jsou tvořeny výboji o zdánlivém náboji 50 až 220 pC. Pokud se kanálek kontinuálně dotkne uzemněné elektrody, nastává totální průraz izolace. [2]

3 Metody měření částečných výbojů

Částečné výboje doprovází mnoho fyzikálních jevů. Tyto jevy mohou být elektrické i neelektrické. Jsou to například chemické zplodiny, vysokofrekvenční elektromagnetické pole, tepelný ohřev, světelné záření a zvukové stopy. [1]

Právě z důvodu výše zmíněných fyzikálních jevů je možno zjistit i míru aktivity ČV v elektrickém zařízení včetně místa. [1]

Obecně se metody zjišťování ČV dělí na dva typy. Prvním typem je metoda globální, u které se zjistí výskyt a dopad částečných výbojů na zkoušený objekt jako celek. Druhá metoda je lokalizační. Ta se používá pro určení přesného místa vzniku částečných výbojů. V praxi se běžně tyto metody podporují tak, že se nejprve použije globální metoda, kde se zjistí celkový stav zařízení a následně proběhne metoda lokalizační, která zjistí přesné místo. [1]

V následujících podkapitolách jsou popsány používané elektrické i neelektrické metody detekce částečných výbojů.

3.1 Přímé elektrické metody měření ČV

Tyto metody jsou založeny na měřeném obvodu, snímajícím proudové impulzy, které způsobují částečné výboje. Vhodný měřicí obvod tak určí skrze tyto proudové impulzy velikost částečných výbojů. [1]

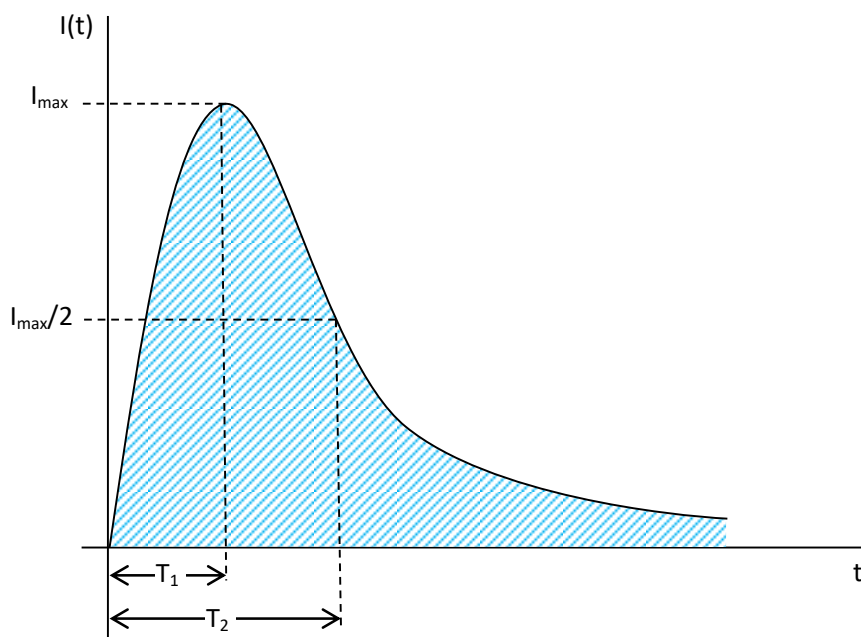
V napájecím obvodu je indukčnost, která zamezuje tomu, aby byl hrazen ze zdroje potřebný úbytek energie náboje, vyvolaný částečnými výboji v dutinkách dielektrika. Tím pádem poklesne napětí na svorkách testovaného objektu na danou hodnotu. Takto vyvolaný pokles napětí na svorkách zařízení je úměrný náboji proudového impulsu, charakterizující částečný výboj. Z důvodu vyvolání vyrovnávacího proudu (díky výboji v dutině dielektrika) je na svorkách impedance vyvolána ekvivalentní napěťová odezva. Tento impuls napětí je superponován na AC napětí zdroje a z této skutečnosti je potřeba vyfiltrovat frekvenci díky vhodnému filtru. [5]

Podstatnou roli na délce proudových impulzů má samotný materiál izolace. V pevných izolantech trvají impulzy částečných výbojů kratší dobu, než je tomu u kapalných izolantů. Pro pevné izolanty platí časové měřítko ČV v jednotkách či desítkách nanosekund. U kapalných izolantů trvá proudový impulz v řádu mikrosekund. [6]

Velikost náboje ČV je dána integrálem jeho proudového impulzu.

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt [C].$$

Proudový impulz částečného výboje je zachycen na obrázku níže. Je zde vyznačena i plocha, ze které se určuje daný náboj Q.



Obr. 3.1: Proudový impulz částečného výboje – inspirováno z [6]

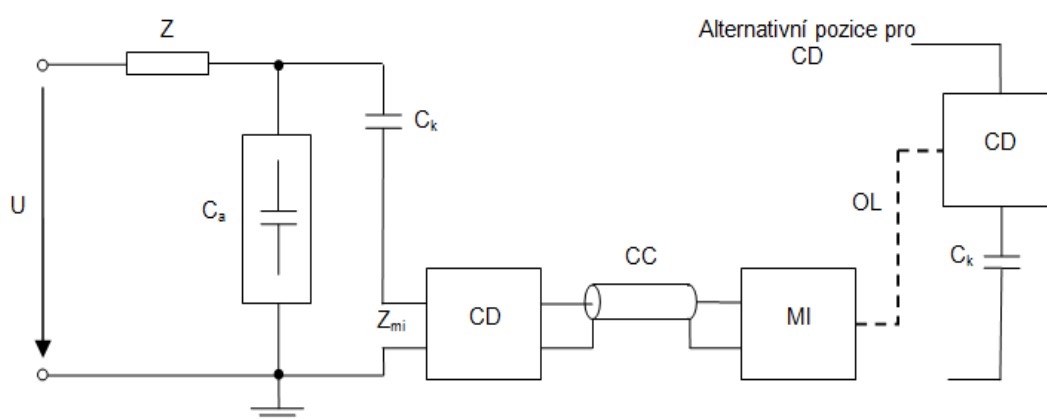
3.2 Globální galvanická metoda měření ČV

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších metod vhodnou k měření částečných výbojů pomocí měřicí impedance. Impedance je většinou tvořena RLC členem s ochranami proti přepětí a navíc slouží jako filtr superponovaných proudových impulzů ČV od frekvence napájení. [1]

V následujících podkapitolách jsou popsána tři základní zapojení pro přímé měření částečných výbojů, která určuje norma ČSN EN 60270. [4]

3.2.1 Měřicí obvod s paralelní snímací impedancí

Měřicí obvod s paralelní snímací impedancí se používá pro uzemněné objekty s velkými kapacitami. Jedná se o zapojení vazebního kondenzátoru do větve se snímací impedancí, což umožňuje bezproblémově snímat částečné výboje, aniž by byl při možném průrazu zničen detekční obvod. [1]



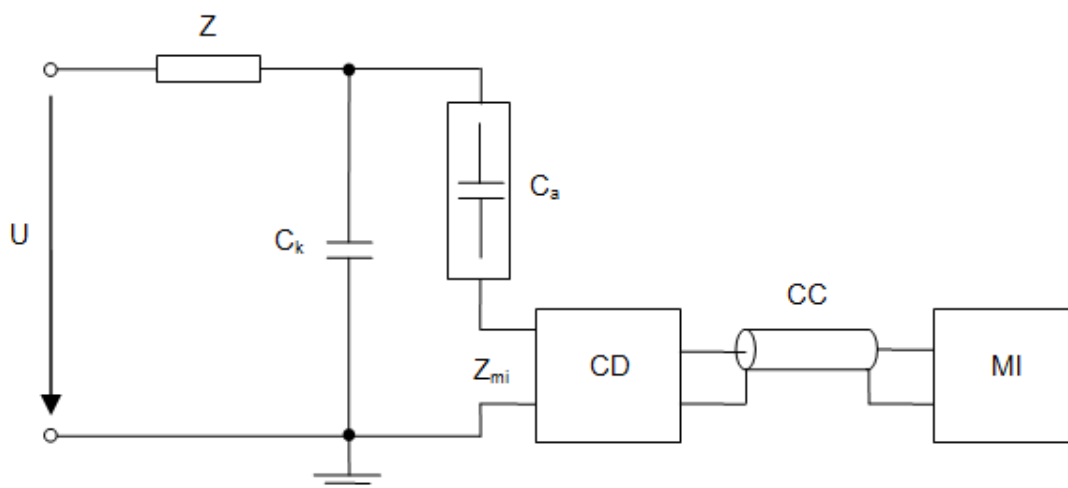
Obr. 3.2: Vazební zařízení zapojeno v sérii s vazebním kondenzátorem [4]

U	vysokonapěťový zdroj
Z_{mi}	vstupní impedance měřicího systému
CC	spojovací kabel
OL	optický kabel
C_a	testovaný objekt
C_k	vazební kondenzátor
CD	vazební zařízení
MI	měřicí přístroj
Z	filtr

3.2.2 Měřicí obvod se sériovou snímací impedancí

Tento měřicí obvod se používá pro měření zařízení s možnou volbou odpojení zemního přívodu. Výhodou takto zapojeného obvodu je citlivější měření díky rozptylovým

kapacitám, které jsou k vazebnímu kondenzátoru C_k připojeny paralelně. Pokud je kapacita měřeného objektu k zemi menší než rozptylová kapacita měřicího obvodu, lze vazební kapacitu C_k z obvodu vyřadit. [1]



Obr. 3.3: Vazební zařízení zapojeno v sérii s testovaným objektem [4]

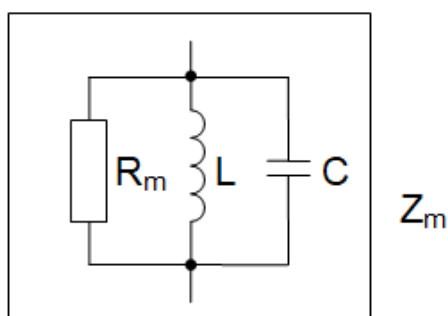
U	vysokonapěťový zdroj
Z_{mi}	vstupní impedance měřicího systému
CC	spojovací kabel
C_a	testovaný objekt
C_k	vazební kondenzátor
CD	vazební zařízení
MI	měřicí přístroj
Z	filtr

3.2.3 Měřicí obvod v můstkovém zapojení

Můstkové zapojení je vhodné použít při měření částečných výbojů v místě instalace testovaného objektu, z důvodu schopnosti umět potlačit vlivy vnějších rušení. Na měřicích impedancích jsou měřeny rozdílové proudové impulzy, přičemž lze impedance Z_m a Z_{m1} individuálně nastavovat. Na místě vazební kondenzátoru (pokud má kapacitu podobnou jako testovaný objekt) se dá použít jiný měřený objekt, u kterého je známa hladina částečných výbojů. [1]

3.3 Měřicí impedance pro měření ČV

V ideálním případě se jedná o čistě ohmický charakter. V obvodu jde většinou o čtyřpól s frekvenční citlivostí takovou, aby samotná frekvence zdroje napětí neměla vliv na měřicí přístroj. Měřicí impedance slouží k převodu proudových impulzů, které jsou vyvolány částečnými výboji, na výstupní pulzy napětí, které jsou vedeny do měřicího zařízení. Obecně může být tato impedance tvořena rezistorem, rezonančním obvodem nebo paralelním zapojením kondenzátoru a odporu. Úzkopásmové měřicí obvody využívají naladění impedance na frekvenci přístroje. [1]



Obr. 3.5: Měřicí impedance – inspirováno z [1]

Podle použitého měřicího přístroje (frekvenčnímu rozsahu) a konstrukce snímací impedance

se měřicí obvody dělí do dvou skupin. Jde o úzkopásmové a širokopásmové měřicí obvody. [1]

Úzkopásmové měřicí systémy mají malou šířku frekvenčního pásma Δf . Doporučené hodnoty tohoto pásma jsou v intervalu mezi 9 až 30 kHz. Zpočátku je odezva těchto systémů na proudový impulz oscilující, přičemž záporné i kladné maximální hodnoty jsou úměrné zdánlivému náboji, ale také nezávislé na polaritě. Z tohoto důvodu nelze určit polaritu pulzu ČV. Rozlišovací doba T_r úzkopásmového měřicího systému je řádově ve stovkách μs . [1]

Používanějšími systémy jsou pro měření částečných výbojů širokopásmová zařízení. Doporučené hodnota šířky frekvenčního pásma Δf a dolní i horní mezní frekvence (f_1 a f_2) jsou:

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz},$$

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}.$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz},$$

Odezva těchto širokopásmových přístrojů je na neoscilující impulsy proudu silně tlumená oscilace. Její nejvyšší nebo počáteční hodnota udává polaritu a velikost zdánlivého náboje. Jejich rozlišovací doba (T_r) je řádově desítky μs . [1]

Následující parametry definují charakteristiky těchto měřicích obvodů:

3.3.1 Dolní (f_1) a horní (f_2) mezní kmitočty

Dolní i horní kmitočty uvádějí, při jakých hodnotách klesne odezva systému o 6 dB na konstantní vstupní sinusové napětí od hodnoty maximální v propustném pásmu. V praxi bývá vlivem rušení často problém se zvolením vhodné dolní mezní frekvenci. Obvykle bývá tato dolní mez pro zesilovače s filtry a měřicí impedancí zvolena mezi 30 až 50 kHz, z důvodu potlačení rušivých periodických impulsů (tj. počítačové zdroje, tyristorové spínače, atd.) z napájecí sítě. [1]

3.3.2 Šířka pásma Δf a střední kmitočty pásma f_m

Pro všechny typy měřicích systémů jsou tyto parametry definovány vztahem:

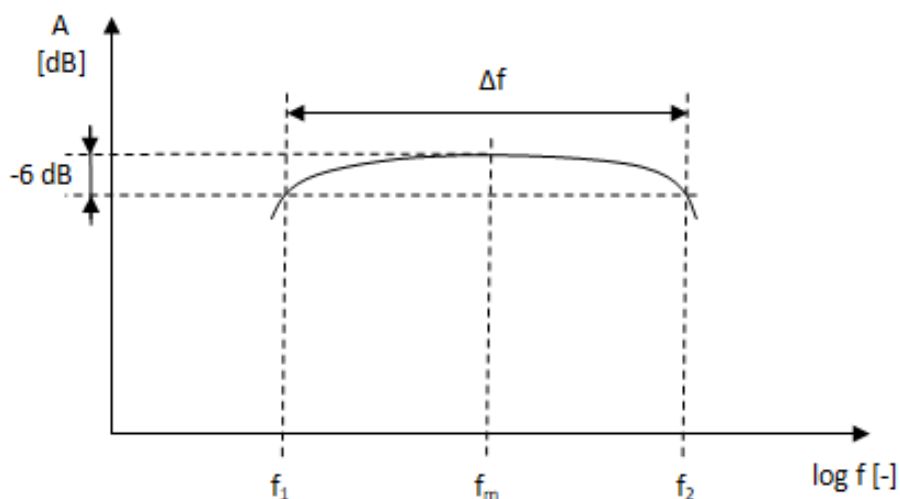
$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

3.3.3 Rozlišovací doba pulzu T_r

Rozlišovací doba pulzu T_r je nejmenší časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími pulzy stejného tvaru, polarity, krátké délky a velikosti náboje, jež způsobuje amplitudovou chybu do 10%. Tato chyba je zapříčiněna superpozicí proudových pulzů. Chyba nastane

tehdy, dojde-li k překrytí výše zmíněných pulzů. Rozlišovací doba T_r není přímo úměrná šířce frekvenčního pásma Δf a udává se v μs . Při měření je vhodné tuto dobu dodržet jak pro testovací obvod, tak i pro samotný měřicí systém, protože může být následně způsobena již zmíněná superpoziční chyba vlivem testovacího objektu (například špatné impedanční přizpůsobení prvků měřicího řetězce). [1]



Obr. 3.6: Přenosová frekvenční charakteristika – inspirováno z [1]

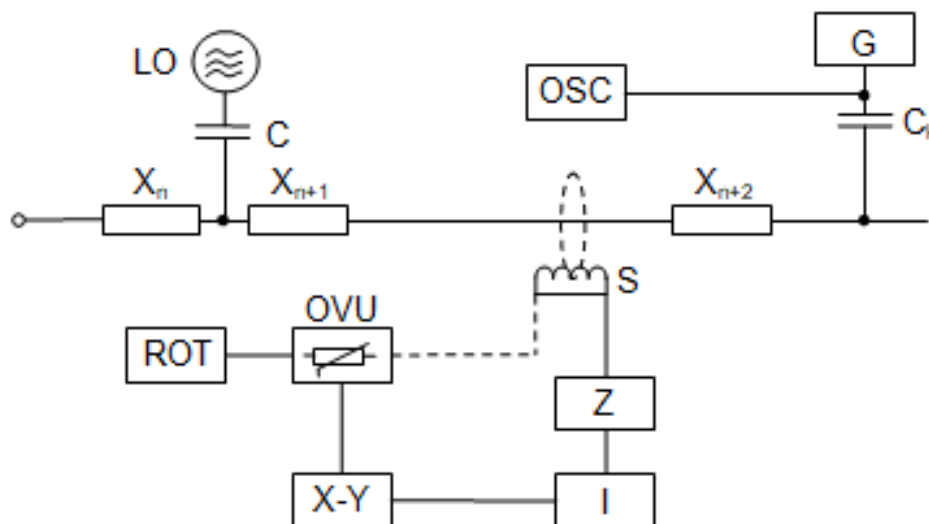
3.4 Nepřímé elektrické metody

Tyto metody detekce ČV vyplývají ze skutečnosti, že dochází v místě vzniku částečných výbojů k elektromagnetickému vyzařování do okolí. Takovéto elektromagnetické pole se dá detekovat za pomoci vhodných antén, snímačů apod. [1]

3.5 Metoda induktivně vázané sondy

Tato metoda ve spolupráci se zařízením pro měření částečných výbojů u elektrických točivých strojů patří mezi lokalizační metody. Určují tedy přesné místo působení ČV. [1]

Výstupem měření je grafický záznam, kde na ose x je vnitřní rozvinutý povrch statoru (číslo drážky) a na ose y je hodnota zdánlivého náboje, popřípadě střední hodnota zdánlivého proudu. Drážky s vinutím, převyšující svou výbojovou úroveň 20 dB je zapotřebí dále přezkoumat. [13,14]

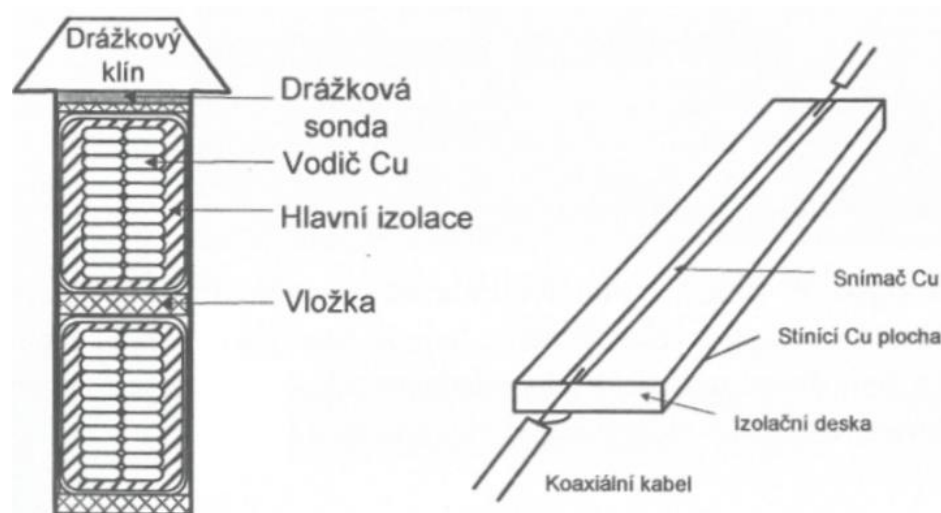


Obr. 3.7: Zapojení induktivně vázané sondy – inspirováno z [1]

LO	zdrojová lokalita ČV
C	kapacitní vazba
X_n	n-tá část impedance vinutí
S	sonda
OVU	odporový vysílač úhlu
ROT	rotátor
Z	zesilovač
Φ	induktivní vazba
I	indikátor
XY	souřadnicový zapisovač
G	generátor kalibračních pulzů
C_k	kalibrační kapacita
OSC	osciloskop

3.6 Kapacitní drážková sonda

Kapacitní drážková sonda umožňuje změřit částečné výboje přímo v provozu točivých elektrických strojů. Aplikuje se už při výrobě do statorových drážek stroje pod jeho drážkové klíny. Sonda se tedy stane pevně zabudovaným snímačem vř elektrických pulzů v dané drážce točivého stroje. [15]



Obr. 3.8: Drážková sonda [1]

Tato kapacitní sonda je na jedné straně tvořena izolační nosnou destičkou s měděnou vrstvičkou a na straně druhé snímačem, představující úzký C_u pásek. Šířka sondy je dána šířkou drážky statoru a délka je čtvrtinová oproti délce vlny, která je příslušná k frekvenci odezvy snímače. Ze sondy se pak pomocí koaxiálních kabelů přenáší signály do vyhodnocovacího zařízení. Snímaná šířka frekvenčního pásma sondy je mezi 10 MHz až 1000 MHz. [15]

Nespornou výhodou kapacitní drážkové sondy je rezistence proti okolnímu rušení a možnost detekovat částečné výboje přímo v provozu elektrického točivého stroje. [1]

3.7 Kapacitní snímače

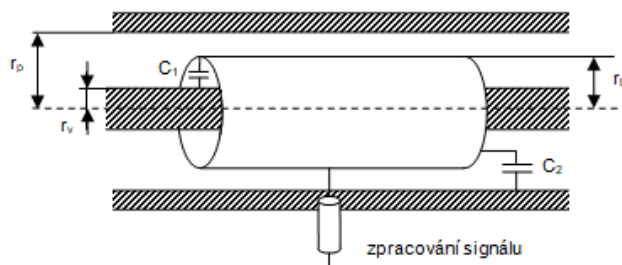
Pro detekci výskytu částečných výbojů v kabelech, jejich koncovkách a spojkách se používá snímač koaxiálního tvaru. [16]

Kapacity těchto koaxiálních snímačů se dají vyjádřit vztahem:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_b}{r_v}}$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_p}{r_b}}$$

r_v	poloměr vodiče
r_b	poloměr snímače
r_p	poloměr vnějšího pláště kabelu
l	délka sondy



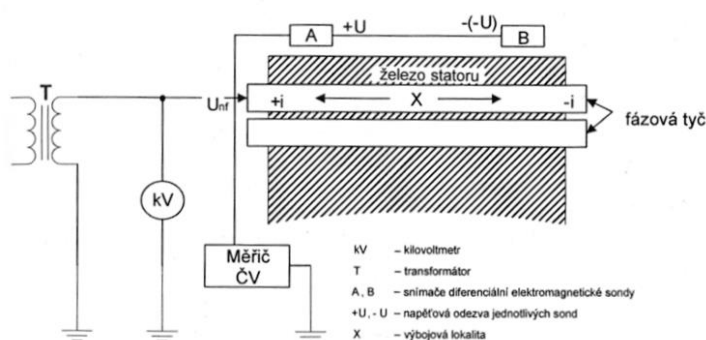
Obr. 3.9: Schéma kapacitní sondy – inspirováno z [17]

Používají se hlavně u zařízení, které je zapouzdřeno v rozvodně nebo pro měření koncovek kabelů. Pokud jsou zdroje částečných výbojů odstíněné, koaxiální kapacitní sondy je nemají šanci zjistit a je nutné při jejich aplikaci přerušit silový obvod. [17]

3.8 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

Pokud je potřeba změřit částečné výboje v drážkách jednotlivých fází statorového vinutí, používá se tato diferenciální metoda elektromagnetické sondy. Ta umožňuje lokalizovat zdroje ČV. [18]

Diferenciální elektromagnetická sonda je tvořena ze dvou sériově spojených induktivních snímačů, které jsou umístěny po jednom na každém konci testované tyče vinutí statoru. [18]



Obr. 3.10: Diferenciální elektromagnetická sonda [1]

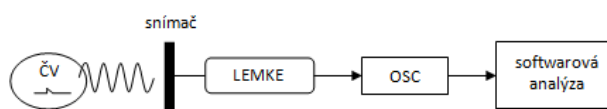
Jde-li proudový impuls stejným směrem oběma sondami, signály na výstupu snímačů se navzájem vyruší. Pokud prochází dobíjecí proudový impuls do místa částečných výbojů mezi sondami, tedy opačným směrem, tak se signál na výstupu sčítá. Tímto zapojením dochází k potlačování vlivu cizího rušení a vlivu částečných výbojů ve vedlejších drážkách statoru. [18]

Mimo měření ČV v drážkách lze tuto sondu použít i u měření částečných výbojů na výstupu vinutí drážek. Evolventní část vinutí se vloží mezi diferenciálně zapojené sondy. [18]

3.9 LEMKE sonda

Vyzařované elektromagnetické pole, vyzařované působením částečných výbojů, je snímáno senzorem, který je tvořen lineární inдукtivní nebo kapacitní sondou, zapojenou ke vstupu diferenciálního zesilovače. Vstup zesilovače musí být navrhnut tak, aby maximálně potlačoval vliv okolních rušivých polí. Měřicí systém funguje na principu zesílení impulsů ČV v širokém pásmu a následném elektronickém integrování pro zjištění zdánlivého náboje. [19] Výstupní signál má pak amplitudu, která odpovídá zdánlivému náboji a stejný tvar s náběhem do 2 μ s, trvajícím 50 μ s. Signál zesilovače je následně přiveden do osciloskopu, kde je jeho průběh uložen. Pro přenos signálu ze zesilovače do osciloskopu je možné použít také optický kabel. [1]

Na obrázku níže je k dispozici výstup částečných výbojů snímáný LEMKE sondou s kapacitním snímačem.



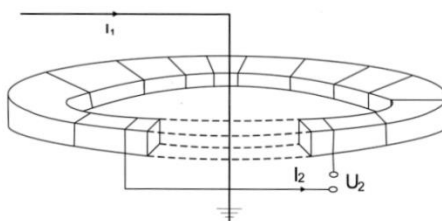
Obr. 3.11: Blokové schéma detekce ČV s LEMKE sondou – inspirováno z [1]

3.10 Induktivní snímače

Induktivní vazbu lze použít při snímání dobíjecích proudů ČV, které protékají přívodem uzemnění u elektrického měřicího obvodu. V místě pracovního uzemnění měřeného objektu se používají vhodné indukční snímače. [20]

Tento způsob měření je výhodný kvůli lepší ochraně měřicích zařízení před zvýšeným napětím při průrazu izolace. Není potřeba využívat impedanci. Další nespornou výhodou je možnost použití této detekce ČV u měření on-line. [21]

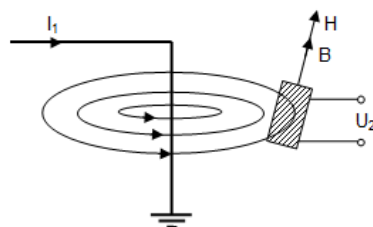
Podle toho jaký mají induktivní snímače magnetické pole, se rozdělují na dva typy. Prvním typem jsou toroidní, kde je vodič zemního spojení uprostřed samotného toroidu a tvoří tím vinutí primární. Sekundární vinutí pak tvoří navinuté vinutí přímo na toroidu. Snímač je nejčastěji umístěn okolo zemního přívodu. Toroidní jádro je obecně vyrobeno z magneticky měkkého materiálu. [21]



Obr. 3.12: Toroidní induktivní sonda [1]

Na rozdíl od toroidních induktivních sond se sondy lineární induktivní umisťují do elektromagnetického pole, aby byla podélná osa snímače orientována totožně jako vektory intenzity magnetického pole H a magnetické indukce B . [1]

Pro jejich aplikaci není potřeba přerušit obvod testovaného zařízení. Je vhodný pro použití s LEMKE sondou, kdy se lineární sonda připojí na její vstup a detekuje signály ČV. [20,19]



Obr. 3.13: Schéma kapacitní sondy [20]

3.11 Akustická detekce částečných výbojů

Částečné výboje při svém vzniku vyvolávají zvukové emise, které se šíří od místa vzniku do okolí. Aby bylo možno detekovat zvukové stopy vln širokého frekvenčního spektra, je zapotřebí použít vhodný typ mikrofону, který umí snímat v ultrazvukovém i slyšitelném pásmu, popřípadě použít např. piezoelektrická čidla. [22]

Existují dva způsoby měření pomocí akustické metody. První akustickou metodou je jedna akustická sonda, která postupně hledá místo nejvyššího signálu. Druhá metoda je založena na umístění více upevněných sond a použití příslušného softwaru, který bude naměřená data zpracovávat. Tato druhá metoda je vhodná pro použití on-line měření částečných výbojů. [23]

V praxi, kde je velké množství okolního hluku, se nejčastěji snímá v ultrazvukovém pásmu. Ultrazvukové vlny jsou totiž krátké a jsou více charakteristické pro částečné výboje. Dají se tedy snáze rozlišit od okolního rušení a lokalizovat tak polohu zdroje. [24]

3.12 Optická detekce částečných výbojů

Částečné výboje se opticky projevují ve třech spektrech. Jedná se o ultrafialové, infračervené a viditelné spektrum. Působení částečných výbojů v zařízení zanechává i viditelné poškození, které je vidět pouhým okem nebo za pomoci ultrafialového světla. Tímto způsobem lze však zkoumat jen vnější části objektu, resp. přístupné části. [1]

Pro měření částečných výbojů v ultrafialovém spektru se používá speciální UV kamera se selektivními filtry, které zvětšují kontrast. Je zde používáno snímání dvojitého spektra v kombinaci ultrafialového senzoru s klasickou kamerou. Je tak možné detekovat i velmi slabé ultrafialové záření a zobrazit je na přehledném pozadí. [24]

Aktivita částečných výbojů má také za následek lokální ohřívání. Povrch zkoumaného zařízení se tedy může snímat citlivou termovizní kamerou, aby bylo zjištěno tepelné rozložení. [24]

3.13 Chemická detekce částečných výbojů

Chemická metoda detekce ČV je založena na zkoumání vzniklých produktů v důsledku dlouhodobého namáhání částečnými výboji. Tyto produkty vznikají v dutinkách dielektrika. Chemická detekce je používána zejména u izolovaných zařízení v plynu či oleji, kde vzniká informace o analýze vzniklých produktů, a tím i o stavu testovaného elektrického zařízení. [1]

Do chemické detekce částečných výbojů u vysokonapěťových zařízení je zahrnuta metoda indikace ozónu v ochlazovacím médiu a plynová chromatografie. Jelikož mají částečné výboje malou energii, je metoda chemické detekce ČV používána hlavně u izolačních systémů dlouhodobě namáhanými částečnými výboji. [1]

3.14 Detekce obsahu plynů

Při působení částečných výbojů v izolaci transformátorů se objevují v prostředí izolačního oleje různé plyny. Jedná se o pět plynů, které jsou vždy v určitém poměru, podle kterého se dají určit jednotlivé druhy částečných výbojů. Jsou jimi methan (CH_4), vodík (H_2), ethylen (C_2H_4), propylen (C_3H_6) a acetylen (C_2H_2). Kromě určení typu částečných výbojů lze touto metodou zjistit i druh závady izolačního systému. Následující tabulka 3.1 uvádí, k jakým závadám dochází podle koncentrace těchto pěti plynů. [31]

Druh plynu	Vztah plynu k částečným výbojům
vodík H_2	Základní plyn charakterizující částečné výboje
methan CH_4	Plyn přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
ethylen C_2H_4	Plyn vyskytující se pouze při elektrickém oblouku a jiskrových výbojích ve velkých objemech - při částečných výbojích nepřítomný
acetylen C_2H_2	Plyn přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
propylen C_3H_6	Plyn vyskytující se pouze při elektrickém oblouku ve velkých objemech - výbojích - při částečných výbojích nepřítomný

Tab. 3.1: Vztahy jednotlivých plynů v izolačním médiu k částečným výbojům [1]

4 Kalibrace

Pro co nejpřesnější výsledky měření částečných výbojů se obvykle používá kalibrace měřicího obvodu. Měřicí přístroje mají určitou hodnotu měřicího zdánlivého náboje, který liší se zdánlivým nábojem v závislosti na vazební kapacitě, rozptylových kapacit, či kapacitě testovaného objektu. [6]

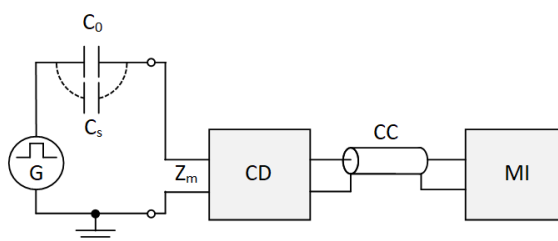
Kalibrace probíhá pomocí kalibračních pulzů o známé hodnotě náboje q_0 , které jsou injektovány do zkoušeného obvodu z generátoru o amplitudě U_0 . [6]

Z praxe bylo zjištěno, že rozhodující není tvar kalibrovacího impulzu, ale jeho frekvenční spektrum. Kalibrační spektrum injektovaných pulzů se tedy musí přibližovat frekvenčnímu spektru částečných výbojů. [5]

4.1 Kalibrace měřicího přístroje

Jak již bylo zmíněno, kalibrační pulzy jsou injektovány z generátoru napěťových pulzů o amplitudě U_0 , sériově zapojeného s kondenzátorem C_0 o malé kapacitě (obr. 4.1). Velikost amplitudy kalibračního impulzu je dána:

$$q_0 = U_0 C_0$$



Obr. 4.1: Kalibrace měřicího přístroje – inspirováno z [1]

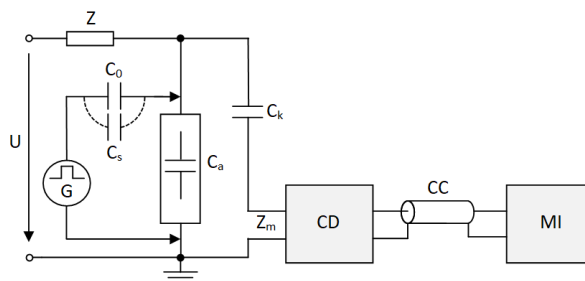
CD	vazební zařízení
MI	měřicí přístroj
CC	spojovací kabel
Z _m	měřicí impedance
C ₀	kapacita kalibračního kondenzátoru
C _s	parazitní kapacita

Kalibrační faktor je dán vztahem:

$$k_i = \frac{q_0 \text{ (kalibrační náboj)}}{\text{údaj měřicího přístroje}}$$

4.2 Kalibrace měřicího obvodu

Kalibrace probíhá stejným způsobem jako u měřicího přístroje. K testovanému objektu se co nejblíže zapojí kalibrátor, aby se omezila velikost parazitních kapacit (viz obrázek 4.2).



Obr. 4.2: Kalibrace měřicího obvodu

C_a	kapacita měřeného objektu
CD	vazební zařízení
C_k	vazební kapacita
C_s	parazitní kapacita
C_0	kapacita kalibračního kondenzátoru
Z_m	měřicí impedance
CC	spojovací kabel
MI	měřicí přístroj

Pokud je $C_0 < 0,1 (C_a + C_k)$, velikost kalibračního impulzu je dána stejným vztahem jako u kalibrace měřicího přístroje. Pokud tomu tak není, je nutné použít následující vzorec:

$$q'_0 = q_0 \frac{C}{C_0 + C},$$

kde C je celková kapacita měřicího obvodu a pokud platí $C \gg C_0$ je $q'_0 = q_0$.

Zdroj zkušebního napětí nesmí být při kalibraci zapnutý, ale v obvodu být musí. Kalibrační faktor celého obvodu je pak následně dán vztahem:

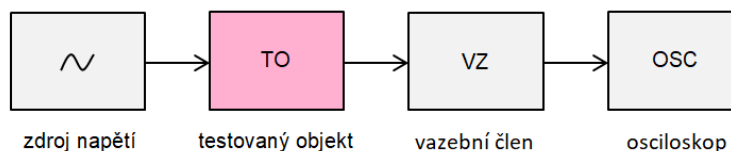
$$k_c = \frac{q_0 \text{ (kalibrační náboj)}}{\text{údaj měřicího přístroje v obvodu}}$$

K dosažení co nejlepší citlivosti měření musí být kalibrační faktor co nejmenší. Tímto faktorem se pak násobí odečtená hodnota z měřicího přístroje a je tak zajištěna přesná hodnota zdánlivého náboje. [6]

Za účelem přesnosti se podle normy ČSN EN 60270 provádí kalibrace na jedné hladině zdánlivého náboje, aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího měření. [4]

5 Ukázka zachycení částečných výbojů

Pro ukázkou bylo zvoleno zapojení podle obrázku 5.1, které se skládá ze zdroje napětí, testovaného objektu, vazebního členu a osciloskopu.



Obr. 5.1: Blokové schéma měření

Zdroj napětí byl použit v rozsahu od 0 do 5 kV AC a jako vazební člen byl použit odporový dělič napětí a sonda, která snímala proud. Výbojová činnost se měřila mezi dvěma hroty až do bodu přeskoku.



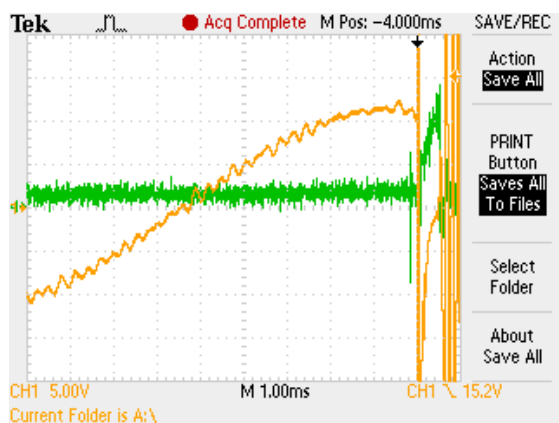
Obr. 5.2: Zapojení měřicího obvodu v laboratoři



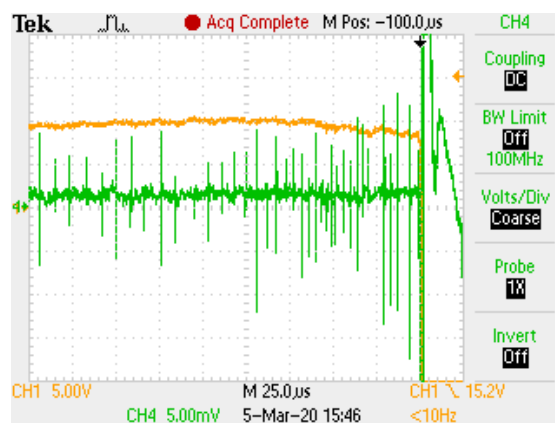
Obr. 5.3 Použité prvky pro měření

Na následujících obrázcích je zachycen průběh částečných výbojů před úplným průrazem.

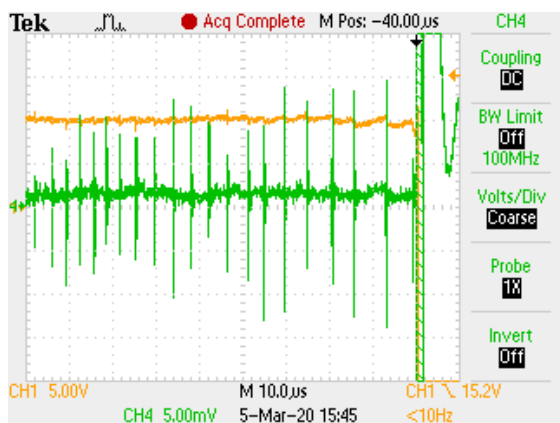
Proudový signál je v osciloskopu zakreslen zelenou barvou a napěťový žlutou barvou. Jak je vidět na obrázku 5.4, při měřítku 1 ms nejsou částečné výboje rozpoznatelné. Při postupném zmenšování měřítka času je částečný výboj zobrazen přehledněji a při 100 ns je zachycen poměrně dobře. Je vidět, že odpovídá teoretickým předpokladům, kdy částečný výboj má délku nástupu čela v jednotkách ns a jeho celková délka se pohybuje v desítkách ns.



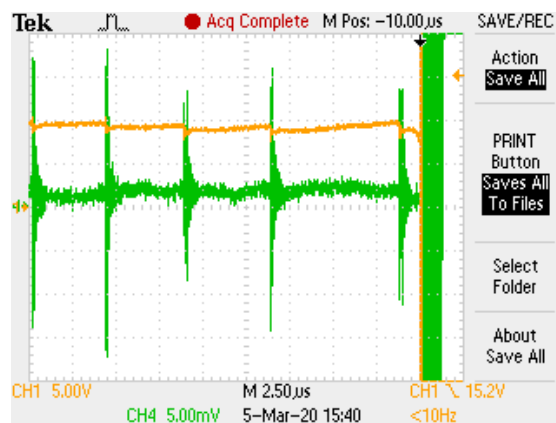
Obr. 5.4: Měřítka 1 ms



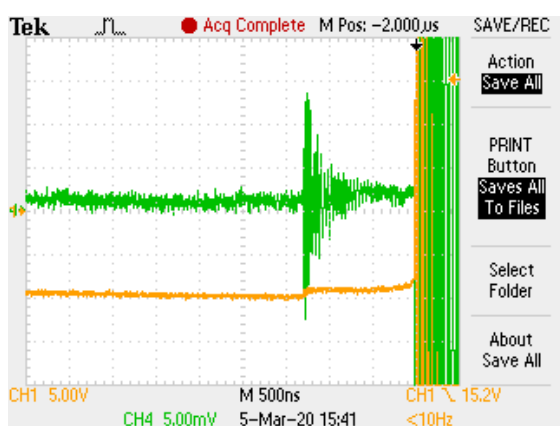
Obr. 5.5: Měřítka 25 μs



Obr. 5.6: Měřitko 10 µs



Obr. 5.7: Měřitko 2,5 µs



Obr. 5.8: Měřitko 500 ns



Obr. 5.9: Měřitko 100 ns

6 LabVIEW

Na softwaru LabVIEW začal v roce 1983 pracovat Jeff Kodosky, pracující se svými dvěma kolegy (podnikateli) Jamesem Truchardem a Billem Nowlinem, v jejich založené společnosti National Instruments (1976). V roce 1987 firma National Instruments uvádí na trh první verzi LabVIEW pro operační systém MS DOS. O pět let později vychází první Windows verze pro PC, která se zdokonaluje do dnes.

Zkratka LabVIEW znamená „Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench, neboli v překladu „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů.“ Prostředí LabVIEW slouží k programování měřicích systémů, analýze signálů, vizualizaci a řízení technologických procesů či složitému programování náročných systémů jako je např. robot.

Hlavním úkolem tohoto softwaru je dočasné či trvalé nahrazení finančně, prostorově a často i časově náročné využití prostředků (hardware) virtuálním řešením za pomoci programových prostředků (software). Dále pak umět zprostředkovat uživateli co nejpřesnější názornost procesu. Toto provedení umožňuje provádět specifické změny či návrh nových procesů. Pouhou změnou v programu se změní celý proces (měření, řízení, regulace atd.), což je při použití reálných prvků často velmi nákladné a někdy i nemožné.

V softwaru LabVIEW se pracuje s programy (soubory), které se označují virtuální instrumenty (VI). Zkratka VI je zároveň i v příponě souboru jako například Project_1.vi. [25]

Z důvodu výše zmíněných možností LabVIEW byl tento software použit pro návrh měřicího řetězce a ověření experimentu.

7 Použité měřicí přístroje

V následujících podkapitolách jsou detailněji popsány všechny použité hardwarové prvky, které byly použity při ověřovacím experimentu online detekce částečných výbojů.

7.1 Zdroj napětí

Jako zdroj napětí byl použit tester elektrické bezpečnosti GW INSTEK GPT-9804. Jedná se o 200 VA AC/DC odolný tester napětí, zemního spojení a izolačního odporu s ručním či automatickým režimem. Obsahuje PWM zesilovač, který vylepšuje výkonovou účinnost a zajišťuje spolehlivost testování. Na čelním panelu je k dispozici dálkový terminál pro řízení start a stop. Tester má velkou výstupní kapacitu, která potlačuje vliv fluktuace napětí vstupního AC zdroje. Tester GPT-9804 je vybaven maticovým LCD displejem s vysokým rozlišením a jednoduchým – jasným číselníkem. [26]



Obr. 7.1: Tester GW INSTEK GPT-9804 [26]

- AC napětí: 0,1 kV – 5 kV
- DC napětí: 0,1 kV – 6 kV
- Ovládatelná doba náběhu
- Vysoce intenzivní záblesk pro upozornění a indikaci stavu
- Bezpečnostní ochrana během testovací periody
- Vysoká účinnost a vysoce stabilní výstup
- Vysoká přesnost a vysoké rozlišení testovacího procesu

7.2 Digitální osciloskop

Digitální osciloskop slouží pro měření signálů v určitém časovém okamžiku. Obsahuje A/D převodník, který signál převádí do digitální podoby. Vzorkovací frekvence musí být minimálně dvakrát vyšší než vzorkovaný signál, jinak dojde ke vzniku tzv. aliasingu – ztrátě informací. Napěťová citlivost se odvíjí od počtu bitů A/D převodníku. Čím více má převodník bitů, tím vyšší má osciloskop přesnost. Nejčastější A/D převodníky v osciloskopech mají rozlišení 8 bitů. [27]



Obr. 7.2: Osciloskop Rigol MS05104 [28]

Pro ověřovací experiment byl zvolen digitální osciloskop Rigol MS05104. Tento model osciloskopu je 100 MHz 4 kanálový digitální osciloskop se vzorkovací rychlostí 8 GS/s na jeden kanál. Jeho vlastnostmi jsou například integrovaný trigger pro sériové sběrnice, 9 palcový barevný dotykový displej pro optimální zobrazení signálů a hloubka paměti až 200 Mpts. Standardně se může ovládat přes USB, LAN či HDMI.

7.3 Proudová sonda

Jako proudová sonda byla zvolena METRIX HX0102. Jedná se o klešťovou osciloskopickou sondu, která měří proudy až do 20 A střídavých a 14 A stejnosměrných. Frekvenční šířka pásma je 0-60 kHz. Měří proud v kabelech až do průměru 11,8 mm.

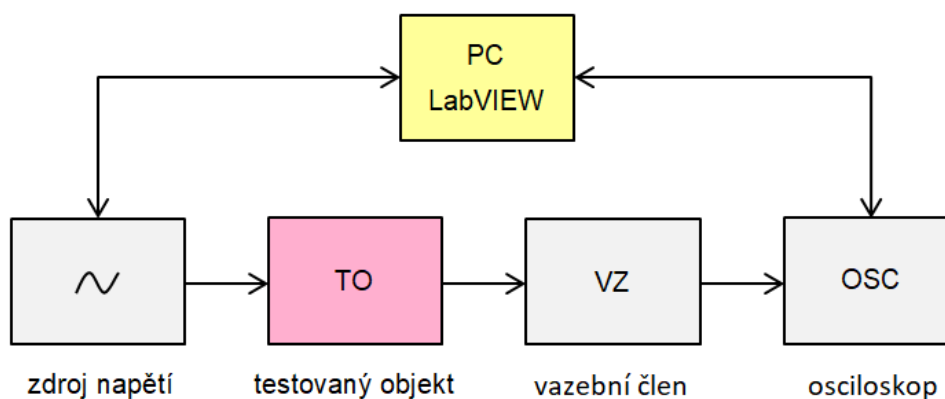


Obr. 7.3: Proudová sonda METRIX HX0102 [29]

Proudové kleště pracují pomocí technologie Hallova jevu. Elektrické napětí vzniká příčně ve vodiči, ve kterém podélně protéká elektrický proud. Magnetickým polem, kolmým ke směru proudu, je elektrický proud odchylován. Toto napětí je přímo úměrné protékajícímu proudu, tudíž se dá podle jejich poměru s přesností do 0,5% určit elektrický proud, protékající vodičem. [30]

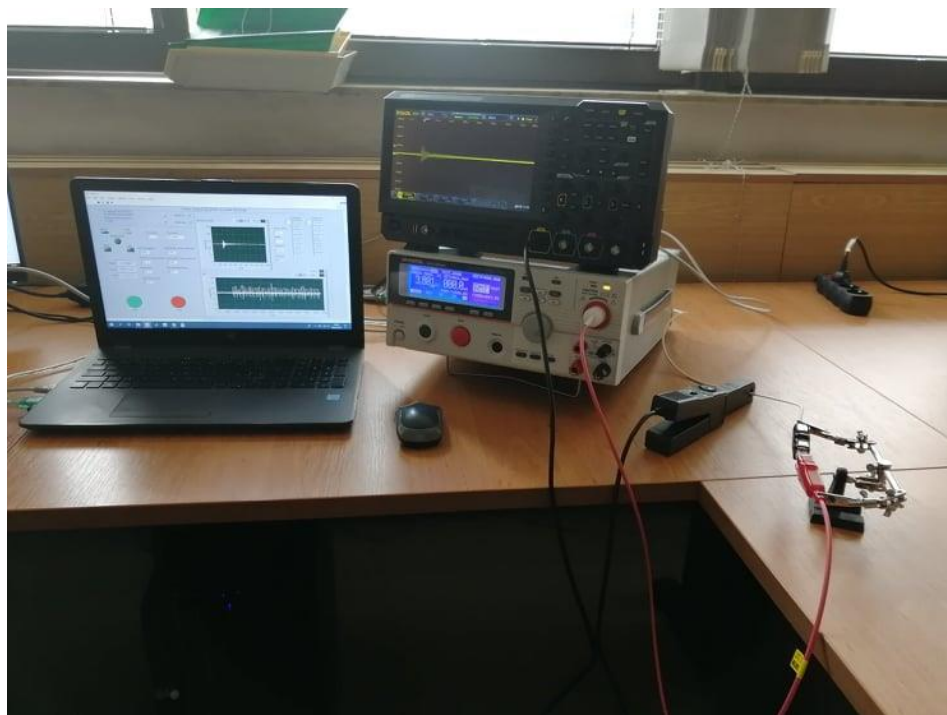
8 Ověřovací experiment

Pro online diagnostiku částečných výbojů bylo zhotoveno funkční blokové schéma, které je znázorněno na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Blokové schéma pro online detekci částečných výbojů

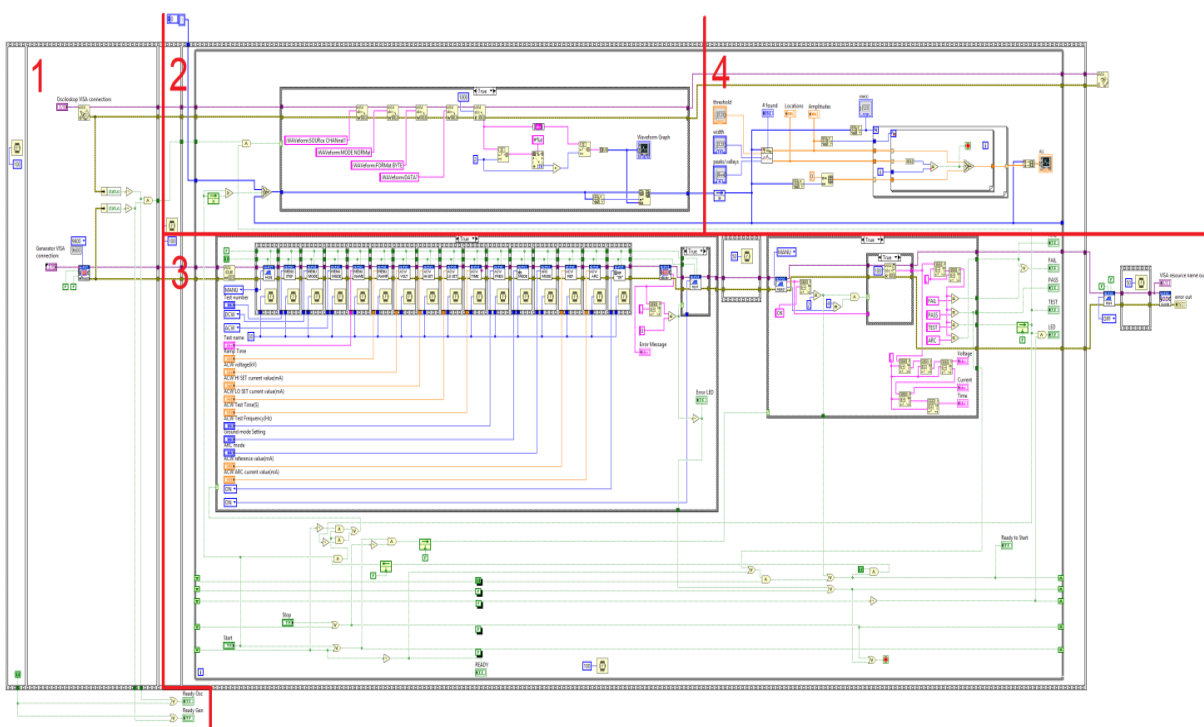
Použité prvky jsou popsány v kapitole 7. Zdroj napětí je k PC připojen pomocí sériové linky a digitální osciloskop přes ethernet. Na obrázku 8.2 je vidět reálné zapojení měřicího obvodu.



Obr. 8.2: Reálné zapojení měřicího obvodu

8.1 Návrh měřicího řetězce

Jak již bylo zmíněno, blokové schéma bylo vytvořeno v softwaru LabVIEW. Měřicí řetězec je pro lepší orientaci v popisu rozdělen červenou čarou na čtyři části.

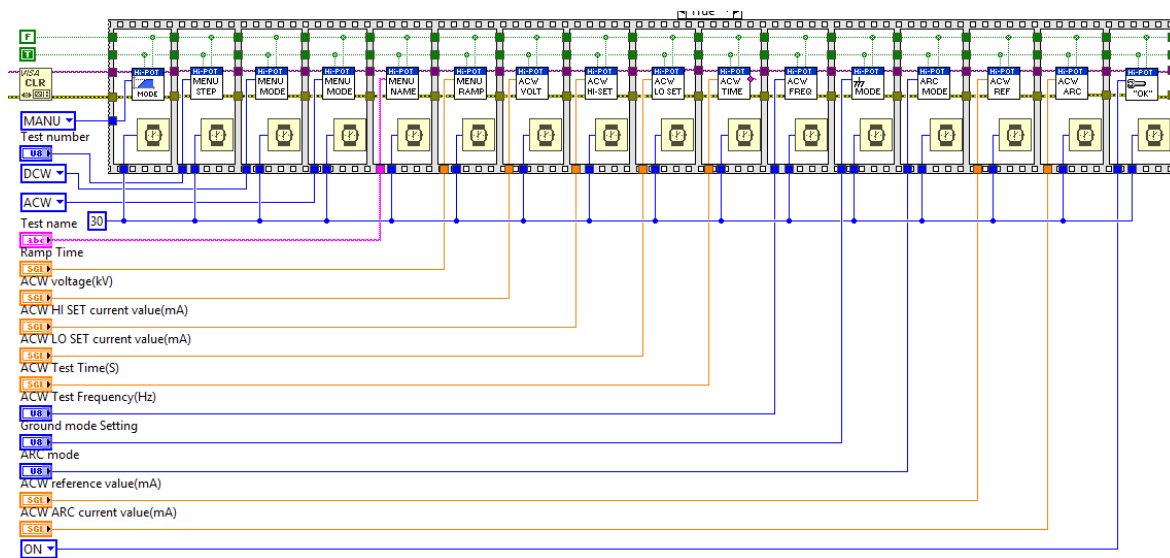


Obr. 8.3: Blokový diagram v softwaru LabVIEW

V první části schématu je vzájemné propojení osciloskopu a zdroje, které je nutné pro komunikaci skrze LabVIEW. Pokud oba prvky v obvodu komunikují, rozsvítí se v řídicím panelu zelené kontrolky a měřicí systém ČV je připraven ke spuštění.

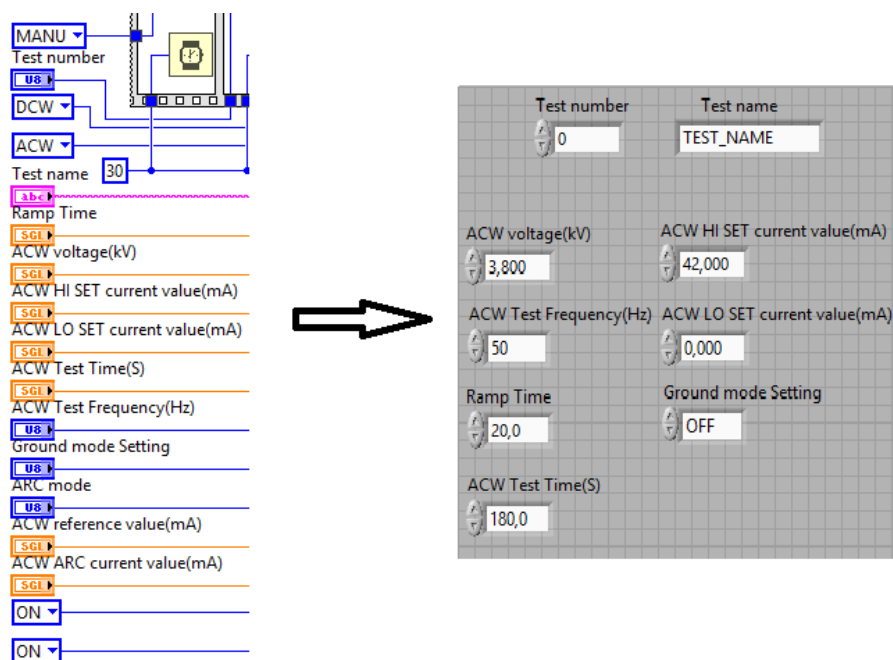
Druhá část blokového diagramu představuje osciloskop. Tento obvod byl použit přímo od výrobce Rigol pro daný typ osciloskopu a je určen přímo pro tyto účely v softwaru. Osciloskop je v tomto případě nastaven, aby zobrazoval data z prvního kanálu. Čte aktuálně zobrazená data z obrazovky. Každý bod vlny představuje jeden byte (8 bitů). V řídicím panelu na obrázku 8.8 pak jde o menší horní graf. Každý záznam osciloskopu je nastaven na 1000 bytů.

Ve třetí části je blokové schéma zdroje, které k tomuto typu GW INSTEK GPT-9804 použito přímo od výrobce.



Obr. 8.4: Detail blokového diagramu zdroje

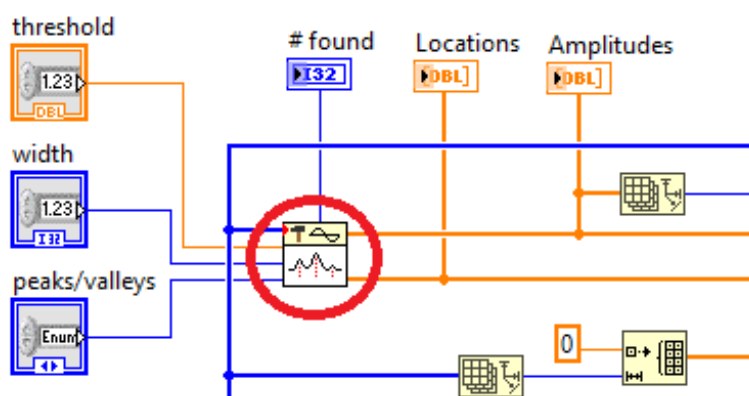
Na obrázku 8.4 je detailněji zobrazeno zapojení, ze kterého se z části skládá řídicí panel. Každý funkční blok má na vstup přiveden požadavek a nachází se každý odděleně ve „flat sequence structure“, což umožňuje vždy vykonat nejprve všechny funkce v daném okně a poté pošle informace ke zpracování dále do dalšího okna. V každém tomto okně se nastavuje časová prodleva, mezi kterou se vykonávají dané funkce. Na obrázku 8.5 je vidět provázání každého prvku v blokovém diagramu s řídicím panelem.



Obr. 8.5: Provázanost blokového diagramu a řídicího panelu

Blokový diagram tedy graficky naprogramuje řídicí panel, který se dá následně editovat podle potřeby.

Ve čtvrté části diagramu je graficky zhotoven obvod s detektorem částečných výbojů. Jedná se o Peak Detector, který snímá amplitudu a lokalizaci špiček nebo poklesů ve výstupním signálu.



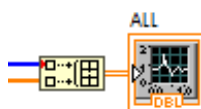
Obr. 8.6: Peak Detector – detail

Na vstup detektoru je přiveden průběh z osciloskopu. Dále se nastaví tři vstupní parametry. Prvním z nich je treshold neboli práh, který přikazuje ignorovat špičky/poklesy,

kteřé jsou příliš malé a mohly by zkreslovat měření. Dále se pak nastaví width (šířka), určující počet po sobě jdoucích datových bodů, které mají být použity v kvadratickém přizpůsobení nejmenších čtverců. Hodnota by měla být minimálně 2 a neměla by být vyšší než polovina šířky špiček/poklesů. V ideálním případě by měla být šířka co nejmenší, ale musí být vyvážená tak, aby nedocházelo k detekci falešných špiček v důsledku šumu. Nakonec se zvolí špičky nebo poklesy podle toho, co bude detektor zachycovat.

Na výstupu detektoru jsou informace o amplitudě a lokalizaci špiček/poklesů, dále pak počet detekovaných špiček podle nastavených parametrů.

Nakonec je zde graficky naprogramován i druhý graf, který zaznamenává celkový průběh měření. Jsou do něj přiváděny průběhy z menšího grafu a zaznamenávají detekované špičky/poklesy, které signalizují výskyt částečných výbojů.

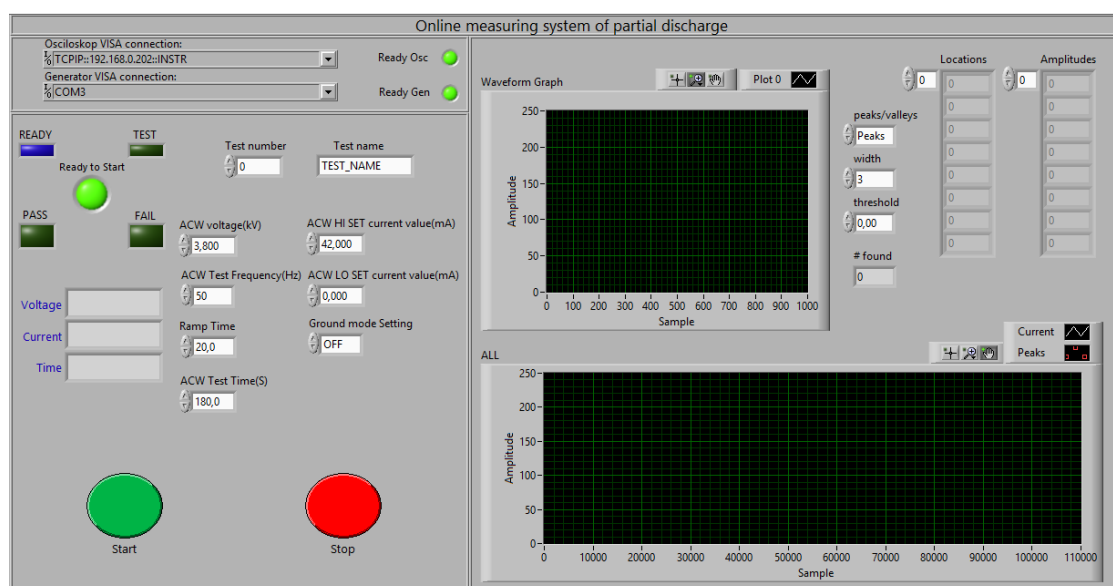


Obr. 8.7: Graf pro celkový průběh měření

Před grafem je umístěna funkce „Build Array“, která zřetězuje více polí nebo připojuje prvky do n-rozměrného pole. Na obrázku 8.7 je modrý přívod výstupem z grafu, zobrazující aktuální záznam osciloskopu a oranžový přívod je výstupem z peak detektoru. Na výstup tohoto pole je tedy připojen další graf, který zaznamenává celý průběh měření i s detekovanými částečnými výboji.

8.2 Popis řídicího panelu

Na obr. 8.8 je zobrazen panel pro řízení měření částečných výbojů. Každé ovládací tlačítko či okno pro vyplnění údajů je vytvořeno v blokovém diagramu programu. Blokovaný diagram je zobrazen a popsán v kapitole 8.1.

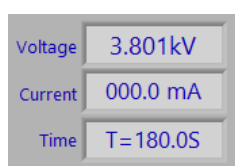


Obr. 8.8: Řídící panel pro měření částečných výbojů

V levém horním rohu se nachází údaje o použitém osciloskopu a generátoru. U obou zařízení je nastavena komunikační adresa. Napravo od nich jsou indikátory, které se zeleně rozsvítí při správné komunikaci. Pokud se u obou tento indikátor rozsvítí, jsou osciloskop s generátorem připraveny pro měření skrze LabVIEW. Zároveň se rozsvítí kontrolka „Ready to start“ („Připraveno ke startu“).

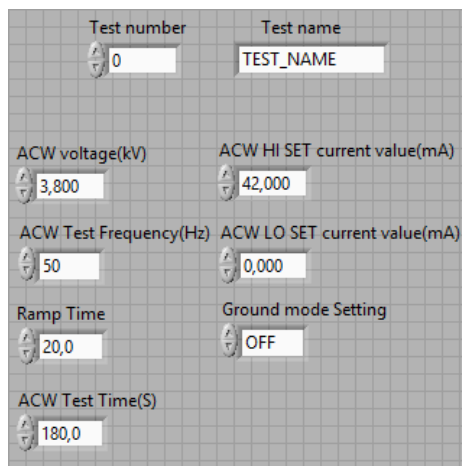
Ve druhé části jsou indikátory ready, test, pass, a fail. Kontrolka ready svítí modře, pokud je vše připraveno ke spuštění měření. V průběhu testu svítí oranžově kontrolka s názvem test, která zároveň signalizuje i nebezpečí možného dotyku vysokým napětím, které zdroj dodává. Indikátor pass svítí, pokud je test dokončen standardní cestou a vše proběhlo bez problémů. Kontrolka fail se rozsvítí při úplném přeskočení, kdy tester/generátor z důvodu bezpečnosti automaticky přestane dodávat napětí na testovaný objekt.

Pod indikátory se nachází položky napětí, proudu a času. Jedná se o nastavené údaje, které se nedají editovat, pouze zobrazují generované napětí, proud a dobu testu.



Obr. 8.9: Nastavené údaje v řídicím panelu

V tomtéž okně se nachází i pole, která slouží k zadávání hodnot a popisu a je možné je editovat. Jedná se o číslo a název testu, nastavení napětí, rampy náběhu napětí na stanovenou hodnotu, dobu testu od dosažení nastavené hodnoty a nastavení dolní a horní hranice proudové hodnoty, která je zvolena v maximálním rozsahu podle manuálu zdroje.



Obr. 8.10: Údaje pro editaci

Po sestavení měřicího ústrojí a spuštění navrhnutého modelu v LabVIEW se může kliknout na velké zelené tlačítko Start. Test se následně spustí a můžeme ho kdykoli zastavit červeným tlačítkem Stop.



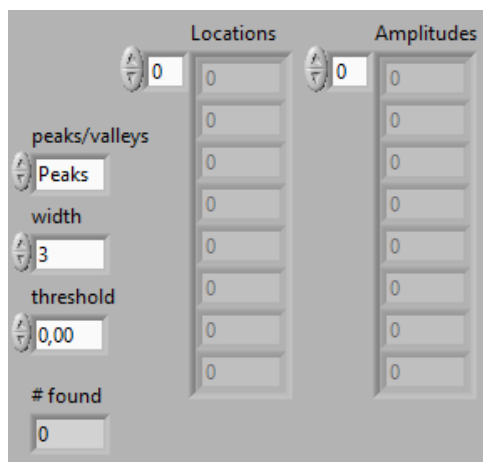
Obr. 8.11: Start a Stop

Na pravé straně řídicího panelu se nachází dva grafy. U obou grafů jsou osy x a y ve stejných veličinách. Osa x znázorňuje počet odebraných vzorků z osciloskopu od začátku až do konce měření. Menší horní graf znázorňuje aktuální záznam osciloskopu při testování. Dolní graf ukládá z horního grafu zobrazené průběhy a skládá tak celý záznam měření. Každý graf má k dispozici nástrojovou lištu s lupou, kde se může libovolně přiblížit každý výboj zvlášť.



Obr. 8.12: Nástrojová lišta pro graf

V pravém horním rohu se nachází parametrizační pole, které souvisí s detektorem špiček. Bílá pole jsou určena k editaci a šedá pouze zobrazují výsledky.



Obr. 8.13: Parametrizační pole detektoru

Na obrázku 8.13 je jsou vidět pole „Locations“ a „Amplitudes“. Jedná se o přesné souřadnice prvních deseti detekovaných částečných výbojů. Pole s názvem „#found“ zobrazuje počet detekovaných amplitud v měření, které překročily nastavenou mez. Další pole jsou popsána v kapitole 8.3.

8.3 Měření částečných výbojů

Do polí pro editaci se navolily parametry šířky (width) a mezní velikost amplitudy (threshold), při které detektor detekoval částečné výboje. Určilo se také to, jestli detektor bude detekovat špičky nebo poklesy. V tomto případě byly zvoleny špičky.

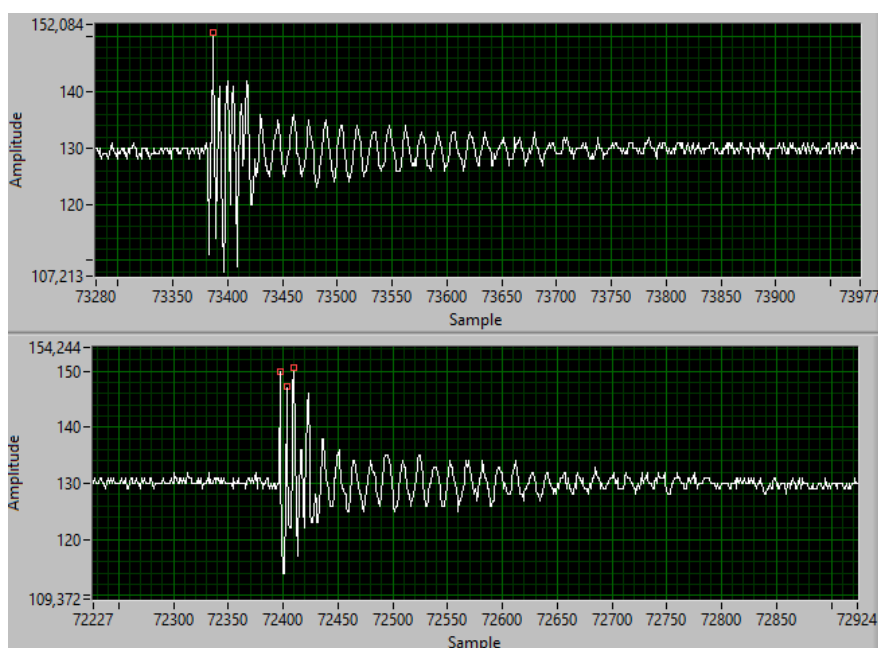
V další fázi se nastavila hodnota napětí, která byla na svorkách zdroje, a na kterou byl připojen zkoušený objekt. Jako testovací objekt byl zvolen rezistor s keramickou izolací. Schématické zapojení obvodu je na obrázku 8.1.



Obr. 8.14: Zkoušený objekt

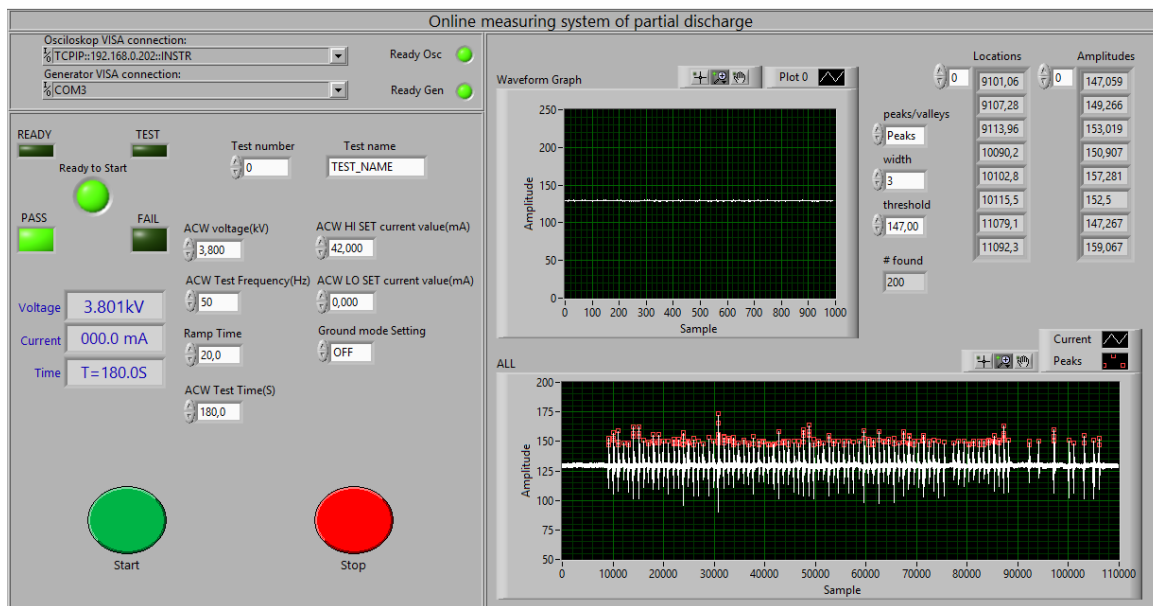
Po navolení zkušebního napětí se zvolila rampa náběhu napětí a čas testu. Při pomalém nárůstu zkušebního napětí se lépe odhaduje zapalovací napětí, při kterém začínají vznikat částečné výboje.

Při určité hodnotě napětí se začaly objevovat částečné výboje s určitou hodnotou amplitudy proudového impulsu. Při každém překročení nastavené meze amplitudy, detektor vyznačil částečný výboj červenou značkou. Každá červená značka je pak sečtena do pole „#found“, které udává přesný počet detekovaných amplitud, které překračují nastavenou mezní hodnotu.



Obr. 8.15: Detail dvou různých částečných výbojů

Jelikož mají proudové impulzy částečných výbojů pokaždé jinou amplitudu, zvolila se přiměřená hodnota k zachycení i nejmenšího proudového impulsu z měření. Tvar ČV se postupně zmenšuje a je tedy možné, že první kmit některého ČV má podobnou velikost jako například třetí kmit jiného výboje. Z toho vyplývá, že u některých ČV s větší amplitudou může detektor přiřadit více červených značek. Částečný výboj s menší amplitudou se pak například detekuje jednou a jiný částečný výboj s větší amplitudou třeba třikrát (viz obrázek 8.15). Pole „#found“ tedy udává přibližný počet částečných výbojů.



Obr. 8.16: Řídící panel pro detekci částečných výbojů

Počet částečných výbojů je tedy složité určit s vysokou přesností, avšak jako detekce ČV tato metoda splnila úkol a spolehlivě detekovala vzniklé částečné výboje, vznikající na keramické izolaci rezistoru. Bylo ověřeno, že navržený měřicí řetězec je schopný spolehlivě detekovat částečné výboje a upozornit na ně signalizačními značkami.

Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo teoreticky nastínit diagnostiku elektrických zařízení, zabývat se problematikou měření částečných výbojů a jejich jednotlivým typům. Přínosem práce pak mělo být navržení měřicího řetězce pro online měření částečných výbojů a následně ověřit, zda tento řetězec dokáže částečné výboje detekovat.

V první fázi přípravy byla pečlivě nastudována vhodná literatura včetně příslušné normy ČSN EN 60270, která pojednává o technice zkoušek vysokým napětím – konkrétně o měření částečných výbojů. Ve druhé fázi přípravy byla poznamenána témata, která by měla být teoreticky zpracována z důvodu splnění všech bodů zadání.

Po nastudování dané problematiky se přešlo ke psaní teoretické části práce. Teoretická část se skládá ze tří kapitol. V první kapitole byla popsána diagnostika, její typy online a offline, diagnostický systém s jeho popisem a nakonec i předpověď chování diagnostického objektu. Druhá kapitola patří jednotlivým typům částečných výbojů, charakterizujícím veličinám, jejich vlivům na materiály izolací a popsán byl i vznik růstu elektrického stromečku. Ve třetí a zároveň i poslední kapitole, která se zaměřuje na teorii daného tématu, jsou popsány jednotlivé metody měření částečných výbojů. Obecně se metody detekování částečných výbojů rozdělují na dva typy. Prvním z nich je metoda globální, u které se zjišťuje výskyt a dopad ČV na testovaný objekt. Druhou metodou je metoda lokalizační, která se používá pro určení přesného místa vzniku částečných výbojů. V praxi se pak tyto dvě metody používají ve spolupráci, kde globální metoda zjistí stav objektu a lokalizační metoda určí přesné místo. U více metod jsou použity kapacitní či induktivní snímače nebo zapojení se snímací impedancí.

V praktické části diplomové práce bylo několik kapitol věnováno ukázce měření částečných výbojů bez softwaru. Jednalo se tedy pouze o zachycení částečných výbojů pomocí osciloskopu. Šlo o výboje u zapojení dvou hrotů elektrod, kdy se zvyšovalo napětí až do přeskoků. Osciloskop však zachytil i částečné výboje před úplným přeskokem. V momentě, kdy se tímto způsobem podařilo zachytit částečné výboje, se mohlo dále pracovat se získanými informacemi.

Aby bylo možno uskutečnit měření částečných výbojů pomocí softwaru LabVIEW, bylo zapotřebí nastudovat základní používání programu a začít se v něm v rámci možností orientovat. Jedna kapitola je proto věnována představení softwaru.

Všechny použité přístroje jsou jednotlivě popsány v šesté kapitole. Jako zdroj napětí byl použit tester elektrické bezpečnosti GW INSTEK GPT-9804, který má v sobě zabudovanou ochranu při přeskoku. Pokud dojde k úplnému výboji, zdroj se z důvodu bezpečnosti vypne. Na částečné výboje toto bezpečnostní opatření zdroje nemá vliv, tudíž ho lze použít pro toto měření. Osciloskop, který se dal dobře využít díky propojení přes ethernet s PC, je Rigol MS05104. Tento model osciloskopu je 4 kanálový 100 MHz digitální osciloskop se vzorkovací rychlostí 8 GS/s na jeden kanál. Jako proudová sonda pro měření proudových impulzů částečných výbojů byla zvolena METRIX HX0102. Jedná se o klešťovou osciloskopickou sondu, která měří díky Hallovi jevu střídavé proudy až do 20 A. Částečné výboje byly detekovány na rezistoru s keramickou izolací.

Navržený měřicí řetězec se skládá ze čtyř částí. Nejprve bylo zapotřebí zajistit blokový diagram zdroje napětí a osciloskopu. Oba diagramy poskytoval samotný výrobce pro daný typ přístroje. Diagramy se však musely přenést do nového listu, kde se musely propojit tak, aby spolu komunikovaly. Když se podařilo graficky naprogramovat tyto dva přístroje tak, aby se daly dálkově ovládat v řídicím panelu pomocí LabVIEW, přišlo na řadu vytvoření obvodu s detektorem, který má za úkol snímat částečné výboje. Výstup z osciloskopu a detektoru a přidání dalšího grafu, který bude zaznamenávat celou historii měření a vykreslovat detekované výboje.

Z provedených měření vyplývá, že detektor v navrženém měřicím řetězci dokázal zachytit a vyznačit částečné výboje. Online měřicí systém tedy splnil úlohu při měření částečných výbojů pomocí softwaru LabVIEW.

Seznam literatury a informačních zdrojů

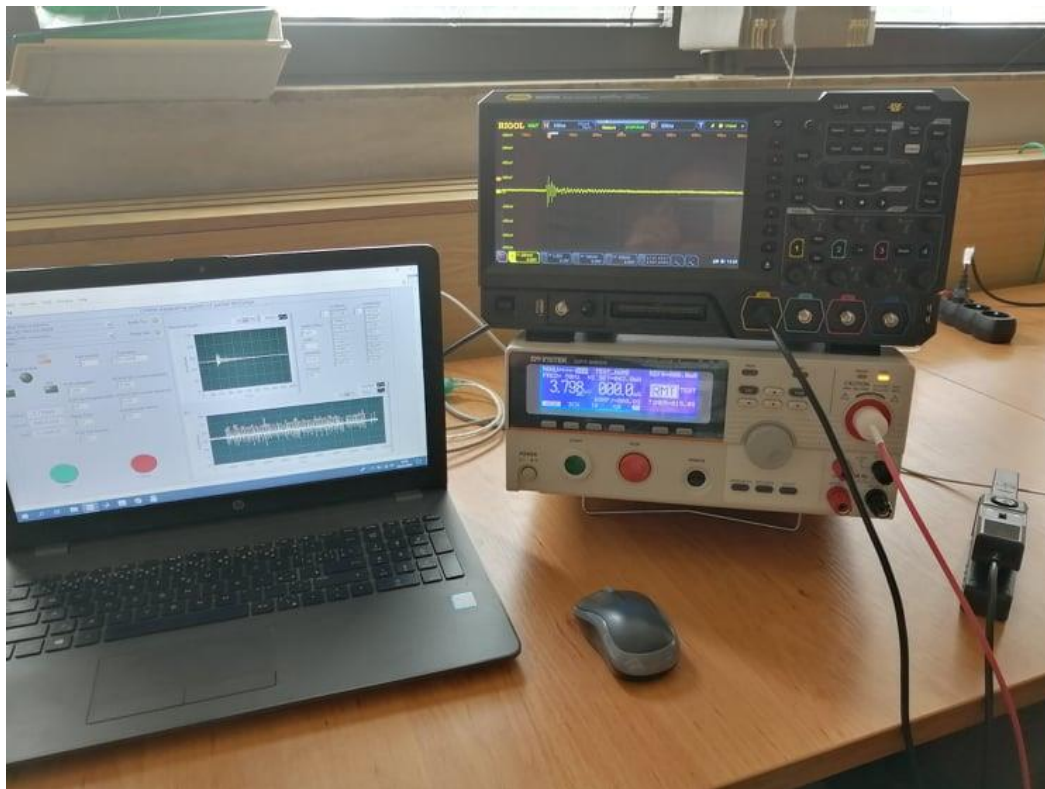
- [1] Mentlík, V., Pihera, J., Polanský, R., Prosr, P., Trnka, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*, BEN – technická literatura, Praha 2008
- [2] Vogelsang R., Fruth B, et. al.: *Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements*. European Transactions on Electrical Power. Volume 15, Issue 3, strana 271-284
- [3] Doležal, J.: *Rozpoznávání částečných výbojů*. Diplomová práce ZČU, Plzeň 1997.
- [4] *Technika zkoušek vysokým napětím – měření částečných výbojů*, ČSN EN 60270, ČSNI, PROSINEC 2001, Praha.
- [5] Martínek, P.: *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Disertační práce ZČU, Plzeň 2005.
- [6] König, D., Rao, Y.N.: *Partial discharge in electrical power apparatus*. VDE-Verlag, Berlin, 1993
- [7] Morshius, P.: *Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some Thoughts on Progress Made and Where to Go Now*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, Number 5, page 905-913
- [8] Mentlík, V.: *Dielektrické prvky a systémy*. BEN – technická literatura 2006
- [9] Shifani, R.: *Direct interaction between partial discharge and temperature on epoxide: Phenomenological lifemodels*, Journal of Physics D, Applied Physycs, Volume 35, page 33-39, 2002.
- [10] Garcia M.: *Modification of XLPE exposed to partial discharge at elevated temperature*, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Volume 25, page 688-692, 1990.
- [11] Veverka, A.: *Technika vysokých napětí*. SNTL/ALFA 1982.
- [12] Širůček, M.: *Degradace izolačních systémů točivých strojů – elektrické stromečky*, ZČU v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření
- [13] Mentlík, V., Šebík, P.: *Zapojení pro diagnostiku výbojové činnosti v dielektrickém systému elektrických točivých strojů – patent 228253 (1986) – diagnostická metoda pro velké točivé stroje*.
- [14] Mentlík, V, Šebík, P.: *Zařízení pro přesné vedení sondy při měření částečných výbojů ve statorech elektrických točivých strojů – patent 224873 (1985), - nedestruktivní diagnostika elektrických strojů točivých*.

- [15] H. G. Sedding, S. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, „A new Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators“, IEEE Trans. EC, December 1991, page 700.
- [16] Lemke, E.: *Fundamentals of the PD Probe Measuring*, online na: [//www.hvtechnologies.com/images/publications/funda-us.pdf](http://www.hvtechnologies.com/images/publications/funda-us.pdf), 2008.
- [17] Záliš, K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Academia 2005.
- [18] Fišer, J.: *Uplatnění měření částečných výbojů v provozní diagnostice elektrických strojů točivých*. Diagnostika '93, Plzeň 1993.
- [19] Russwum, D.: „On-Site Partial Discharge Monitoring using the differential LEMKE PROBE LDP-5 and its accessories“, HV Testing, Monitoring and Diagnostic Workshop, 2000.
- [20] Balogh, J.: *Lineárne toroidálne induktívni sondy ich aplikácie v elektrotechnike*. Disertační práce, Košice 2001
- [21] Krsňák, I.: *Detekcia čiastkových výbojov a analýza výpovedeschopných veličín*. Disertační práce, Košice 1996.
- [22] Müllerová, E.: Acoustic Measurement in Power Transformer Diagnostics. In Komunalna energetika = Powerengineering. Mariobor: Univerza v Mariboru, 2007. Strana 1-7. ISBN 978-961-248-018-9
- [23] Blackburn, T. R.; James, R. E.; Su, Q.; Phung, T.; Tychsen, R.; Simpson, J., „An improved electric/acoustic method for the location of partial discharges in power transformers,“ Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991., Proceedings of the 3rd International Conference on, volume 2, page 1132-1135, 1991.
- [24] Ondrejka, V.: *Metody pro záznam výbojové činnosti*. Diplomová práce ZČU, Plzeň, 2004.
- [25] Kretschmerová, L., Vlach, J.: *Programování v LabVIEW v příkladech*, Technická univerzita v Liberci, 2014.
- [26] Farnell.com. [online]. [cit. 19. 4. 2020]. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/gw-instek/gpt-9804/volt-ir-gnd-bond-tester-200va/dp/2460238>
- [27] Wikipedia.org. [online]. [cit. 20. 4. 2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Digit%C3%A1ln%C3%AD_osciloskop
- [28] Velkoobchod.conrad.cz.[online]. [cit. 20. 4. 2020]. Dostupné z: https://velkoobchod.conrad.cz/digitalni-osciloskop-rigol-mso5104-100-mhz.k1883454?gclid=EAIaIQobChMImvK8hYqc6QIVEO7tCh31IAYYEAAYASAAEgIHDvD_BwE

- [29] Chauvin-arnoux.ch. [online]. [cit. 20. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.chauvin-arnoux.ch/fr/pince-e3n-cvh-oscillo.html>
- [30] odkaz online: <https://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/proudove-senzory-vyuzivajici-halluv-jev>
- [31] Schejbal, V.: *Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*. Disertační práce ZČU, Plzeň 2007.
- [32] Umel.feec.vutbr.cz [online]. [cit. 15. 5. 2020]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/index.php/multimedialni-ucebnice-menu/diagnosticky-system/9-multimedialni-ucebnice/zakladni-pojmy>
- [33] Odbornecasopisy.cz [online]. [cit. 20. 5. 2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/monitoring-castecnych-vyboju--4155>

Příloha

Příloha A – průběh měření ČV



Příloha B – Testovaný objekt



