

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Parametry impulzů částečných výbojů

V Plzni dne 26.5.2021

Bc. Jakub Horák

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub HORÁK**
Osobní číslo: **E18N0016P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Parametry impulzů částečných výbojů**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište metody diagnostiky elektrických strojů.
2. Uvedte metody diagnostiky točivých strojů a transformátorů z pohledu částečných výbojů.
3. Popište charakteristické závady elektrických strojů a jejich identifikaci pomocí měření částečných výbojů.
4. Na modelových uspořádáních proveďte analýzu částečných výbojů z hlediska normovaných parametrů.
5. Na modelových uspořádáních proveďte analýzu částečných výbojů parametrů jednotlivých impulzů zdánlivého náboje.

Proveďte celkové zhodnocení práce a jejích přínosů pro další vývoj metody založené na hodnocení parametrů impulsu částečných výbojů.




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

Seznam doporučené literatury:

1. Hauschild, W. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2014
2. Küchler, A.: High Voltage Engineering, Springer 2017
3. Bouda, V.: Materiály pro elektrotechniku, ČVUT 2000
4. Mentlík, V. a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
5. Elektronické informační zdroje

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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



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

Dodatek k zadání Diplomové práce
Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Body 1, 2, 3 zůstávají v plném rozsahu.

1. Popište metody diagnostiky elektrických strojů.
2. Uveďte metody diagnostiky točivých strojů a transformátorů z pohledu částečných výbojů.
3. Popište charakteristické závady elektrických strojů a jejich identifikaci pomocí měření částečných výbojů.

Proveďte celkové zhodnocení práce a jejích přínosů pro další vývoj metody založené na hodnocení parametrů impulsu částečných výbojů

Bod 4. původní znění

4. Na modelových uspořádáních proveďte analýzu částečných výbojů z hlediska normovaných parametrů
je změněn na:
4. Uveďte příklady typických záznamů částečných výbojů pro základní modelové situace

Bod 5. původní znění

5. Na modelových uspořádáních proveďte analýzu částečných výbojů parametrů jednotlivých impulzů zdánlivého náboje
je změněn na:
5. Na poskytnutých datech z měření modelových uspořádání proveďte analýzu částečných výbojů parametrů jednotlivých impulzů zdánlivého náboje

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 10.5.2021

V Plzni dne 10.5.2021

Josef Pihera
Digitálně podepsal Josef Pihera
Datum: 2021.05.10 13:36:02
+02'00'

Vedoucí práce: Josef Pihera



Student: Jakub Horák

V Plzni dne prof. Ing.
Zdeněk
Peroutka, Ph.D.
Digitálně podepsal prof.
Ing. Zdeněk Peroutka,
Ph.D.
Datum: 2021.05.13
13:59:57 +02'00'

prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá diagnostikou dielektrických izolačních systémů pomocí částečných výbojů. V práci je popsána diagnostika a její metody pro zhodnocení stavu izolačního systému se zvláštním důrazem na částečné výboje. V části zabývající se částečnými výboji jsou popsány základní defekty způsobující přítomnost částečných výbojů a formy jejich specifických projevů. V poslední části je provedena analýza poskytnutých naměřených dat parametrů částečných výbojů.

Klíčová slova

Částečné výboje, parametry impulzů, diagnostika, korónový výboj, povrchový výboj, vnitřní výboj

Abstract

This master thesis deals with the diagnostics of dielectric insulation systems using partial discharges. The work describes diagnostics and its methods for evaluating the condition of the insulation system with special emphasis on partial discharges. The part dealing with partial discharges describes the basic defects causing the presence of partial discharges and the forms of their specific manifestations. In the last part, the analysis of the provided measured data of partial discharge parameters is performed.

Key words

Partial, discharges, impulse parameters, diagnostic, corona discharge, surface discharge, internal discharge

Prohlášení

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

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



.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za jeho čas, odbornou pomoc a cenné rady, které poskytoval při zpracování mé diplomové práce, a to zvláště za ztížených podmínek, při kterých tato práce vznikala.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“.

Obsah

Obsah	9
Úvod	11
Seznam symbolů a zkratk	12
1 Elektrotechnická diagnostika.....	14
1.1 Druhy diagnostiky.....	15
1.2 Off-line diagnostiky	16
1.3 On-line Diagnostika.....	17
1.4 Predikce chování diagnostického modelu.....	17
1.5 Způsoby diagnostiky transformátorů a točivých strojů	19
1.5.1 Měření izolačního odporu a polarizačního indexu	19
1.5.2 Měření ztrátového činitele $\tan\delta$	21
1.5.3 Měření kapacitního poměru $C2/C50$ na transformátorech	23
1.5.4 Napěťová zkouška atmosférickým a spínacím impulzem.....	24
1.5.5 Zdroje pro impulzní zkoušky.....	25
2 Částečné výboje.....	28
2.1 Vznik elektrického průrazu v plynném dielektriku a elektrická pevnost	28
2.2 Vznik částečných výbojů	29
2.3 Dělení částečných výbojů dle místa vzniku.....	30
2.3.1 Vnější částečné výboje	31
2.3.2 Povrchové částečné výboje.....	32
2.3.3 Vnitřní částečné výboje	33
2.4 Parametry charakterizující impulzy částečných výbojů	34
2.4.1 Přímě měřené veličiny	35
2.4.2 Odvozené veličiny	35
2.5 Zařízení pro měření částečných výbojů	36
2.6 Zkušební obvody.....	37

2.7	Časový průběh proudu částečného výboje.....	38
2.8	Vazební zařízení pro měření částečných výbojů	39
2.9	Neelektrické projevy částečných výbojů a metody jejich měření	40
2.10	Měření částečných výbojů na transformátorech při střídavém napětí.....	41
2.11	Měření částečných výbojů na točivých strojích	43
3	Charakteristické závady a jejich identifikace měřením částečných výbojů	46
3.1	Projevy korónového výboje	46
3.2	Projevy vnitřních a povrchových částečných výbojů	47
4	Nejčastější závady u transformátorů.....	51
5	Nejčastější závady u točivých strojů	54
6	Analýza dat částečných výbojů modelových uspořádání	58
6.1	Experiment a měřicí sestava	58
6.2	Zpracování a vyhodnocení dat.....	61
	Závěr.....	76
	Seznam použité literatury:	77

Úvod

Elektrotechnická diagnostika má v dnešní době klíčovou úlohu při výrobě, údržbě a uvádění do provozu velkých výkonových zařízení, jako jsou např. transformátory nebo generátory. Její hlavní poslání je zjistit vady vzniklé při výrobě, transportu a provozu a tím včasným zásahem předejít velkým škodám vzniklým při selhání izolačních systémů těchto zařízení. Jednou z hlavních moderních metod využívaných v diagnostice je měření částečných výbojů. Výhodou této metody je především její neinvazivnost a specifčnost pro jednotlivé specifické druhy poruch, která usnadňuje jejich lokalizaci a tím zkracuje čas a náklady potřebné k jejich odstranění.

Úvodní kapitola této diplomové práce se zabývá diagnostikou v elektrotechnice a popisuje hlavní metody používané pro zjištění stavu izolačního systému u transformátorů a velkých točivých strojů.

Druhá kapitola se zabývá částečnými výboji. Popisuje mechanismus jejich vzniku, druhy částečných výbojů a jejich dělení z hlediska místa vzniku. Dále také popisuje normované parametry, způsob jejich měření a další jejich projevy.

Třetí kapitola diplomové práce popisuje charakteristické závady a defekty v izolaci a jejich specifické projevy umožňující jejich identifikaci.

Čtvrtá a pátá kapitola se věnuje nejčastější závady u transformátor a točivých strojů, v jakých místech k daným závadám dochází, jaké druhy částečných výbojů jsou pro danou závadu specifické, jaké jsou jejich projevy a jak je možné je identifikovat.

Poslední šestá kapitola se zabývá pracováním a analýzou poskytnutých dat, které nahrazují původní zamýšlené experimentální měření, které nemohlo být realizováno z důvodu vládní restriktivních opatření. Analyzovanými parametry jsou doba čela, doba sestupné hrany a amplituda částečných výbojů na příslušné výbojové činnosti na několika modelových uspořádání.

Cílem této diplomové práce bylo popsat současnou diagnostiku v elektrotechnice v oblasti částečných výbojů a z analyzovaných dat a parametrů se pokusit zjistit, zda nemohou být potenciálně využity jako alternativní metoda monitoringu degradace izolačního systému.

Seznam symbolů a zkratek

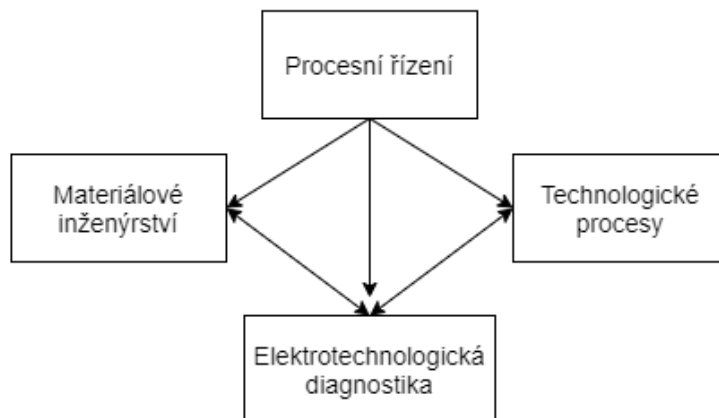
R	Odpor (Ω)
C	Kapacita (C)
$t_{živ}$	Přibližná doba životnosti zařízení
x_{krit}	Kritická hodnota sledovaného parametru
x'_1	Směrnice parametru pro predikci chování diagnostického modelu
$x_k(t_k)$	Hodnota parametru v čase t_k
p_{i60}	Polarizační index (-)
R_{60}	Odpor v 60 sekundě po přivedení napětí (Ω)
R_{15}	Odpor v 15 sekundě po přivedení napětí (Ω)
C_2	Kapacita izolace při frekvenci 2 Hz (C)
C_{50}	Kapacita izolace při frekvenci 50 Hz (C)
τ	Časová konstanta charakterizující stav izolace
$\tan \delta$	Ztrátový činitel
C_2/C_{50}	Kapacitní poměr
V_0	Průrazné napětí (V)
E_p	Elektrická pevnost (V/m)
ϕ_i	Fázový úhel ($^\circ$)
I	Střední proud částečných výbojů (A)
n	Četnost impulzů částečných výbojů
q	Zdánlivý náboj impulzu částečného výboje (pC)
N	Opakovací kmitočet impulzů (Hz)
t_i	Čas výskytu impulzu částečného výboje (s)
T	Perioda přiloženého zkušebního napětí (s)

T_{ref}	Referenční časový interval (s)
q_i	Celkový součet zdánlivého náboje (C)
P	Výkon částečných výbojů (W)
u_i	Okamžité hodnoty napětí pro jednotlivé impulzy (V)
D	Střední kvadratická součet (C^2/s)
C_k	Vazební kondenzátor
f_1	Dolní mezní kmitočet (Hz)
f_2	Horní mezní kmitočet (Hz)
Δf	Šířka pásma s útlumem menší jak -6 dB (Hz)
f_m	Střední kmitočet pásma (Hz)

1 Elektrotechnická diagnostika

V současné době dochází k nárůstu nároků na elektrotechnické výrobky a jedním z hlavních nároků na ně kladené jsou nároky na kvalitu provedení. Obor, který se zabývá ověřením kvality je diagnostika elektrotechnických zařízení a jejím cílem je ověřit kvalitu provedení tak, že ověří, zda daný produkt splňuje požadavky na něj kladené. Diagnostika v elektrotechnice je tedy soubor detekčních metod, které slouží k rozpoznání stavu daného zařízení a jeho vyhodnocování z hlediska požadavků, které jsou na něj kladeny, a to jak z hlediska podnikových, národních, nebo mezinárodních norem. Dále se diagnostika používá také v řízení procesů, kdy ověřuje plnění požadavků zařízení v průběhu výroby a identifikuje slabá a problematická místa ve výrobním procesu, a proto jí nazýváme za diagnostiku elektrotechnologickou. Úloha diagnostiky je tedy naprosto klíčová pro správné fungování managementu kvality a jeho rozhodování ohledně kvalifikace pracovníků, používání materiálů a technologických postupů, testování výrobků, stanovování standardů kvality a úpravu výrobních procesů. [1] [3]

Elektrotechnologická diagnostika je součástí širší skupiny elektrotechnologických disciplín, mezi které patří také materiálové inženýrství, technologické procesy a procesní řízení. První zmíněné materiálové inženýrství se zabývá studiem látek, materiálů a jejich modifikacemi a aplikací v daném výrobním procesu. Výběr materiálu je prováděn na základě jeho struktury a vlastností tak, aby bylo vyhověno požadavkům, které jsou na něj kladeny. Druhou zmíněnou disciplínou jsou technologické procesy, které se zabývají oblastí výroby, know-how a implementací nových výrobních postupů. Poslední procesní řízení se zabývá řízením všech těchto dříve zmíněných procesů, vyhodnocováním jejich vstupů a výstupů, rozhodováním a určováním dalšího směřování. [1]



Obr. 1 - Vztahová struktura mezi prvky moderní elektrotechnologie [1]

Účelem elektrotechnologické diagnostiky poskytovat potřebnou zpětnou vazbu pro již zmíněné procesní řízení a materiálové inženýrství, jak je znázorněno na obr.1. V případě materiálového inženýrství diagnostika poskytuje informace ohledně materiálů, zda splňují potřebné parametry a zda se pohybují v žádaných tolerancích, stejně jako informace ohledně interakcí v rámci vlastního výrobního procesu. Ještě důležitější roly zastává diagnostika u procesního řízení. Nejdůležitější zpětná vazba jsou vstupní kontroly a kontroly mezi jednotlivými výrobními kroky, které mají za cíl vyloučit vadný materiál a výrobky z dalšího procesu výroby a tím snížit finanční ztráty vzniklé v důsledku vpuštění vadné součástky do další výroby. Kontroly mezi jednotlivými výrobními kroky také umožňují určit slabá místa v rámci výrobního procesu a napomáhají tak k jejich odstraňování a dalšímu zlepšování efektivity výroby. Neméně důležitou kontrolou je i kontrola výstupní, která určuje, zda již hotový výrobek splňuje požadavky na něj kladené a zabrání dodání vadného kusu zákazníkovi. [1]

Diagnostika není ale pouze součástí procesu výroby elektrotechnického zařízení, ale je také součástí sledování, sběr a vyhodnocování parametrů zařízení v rámci jeho následného provozu, tu pak nazýváme provozní diagnostika. Na základě sledovaných a nasbíraných dat při provozu zařízení můžeme následně předpovědět chování daného zařízení i v budoucnu, čemuž říkáme elektrotechnická prognostika. [1]

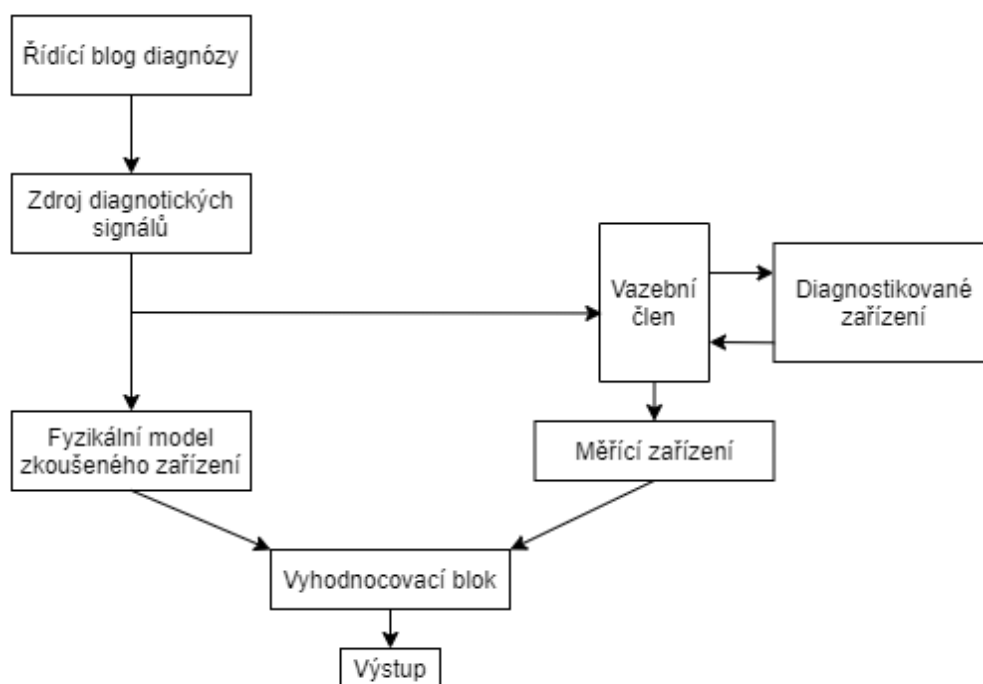
1.1 Druhy diagnostiky

První způsobem diagnostiky je manuální diagnostika, kdy operátor posílá do zařízení diagnostický signál a zaznamenává potřebné veličiny, které jsou následně zpracovány do zkušebního protokolu. Druhým způsobem jsou automatické diagnostické

systémy kdy operátor ovládá zařízení, které samo posílá předdefinované zkušební signály do zkoušeného zařízení a následně vyhodnocuje odezvu, kterou následně zobrazuje na své periférii nebo zaznamenává k dalšímu zpracování. Asi nejkomplexnější formou diagnostiky jsou tzn počítačem řízené diagnostické procesy. Ty jsou rozděleny a řešeny buď jako on-line, nebo off-line systémy diagnostiky. [1]

1.2 Off-line diagnostiky

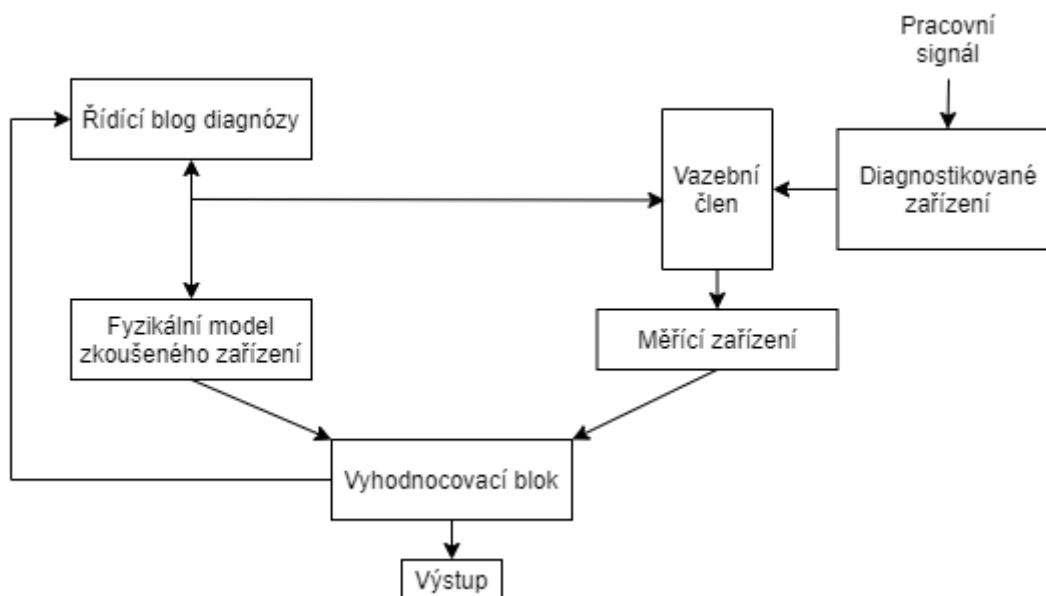
Systém off-line diagnostiky je složen z řídicího bloku diagnózy, který dle svého předdefinovaného nastavení dává povel zdroji diagnostického signálu. Ten posílá testovací signál do zkoušeného zařízení přes vazební člen a také do fyzikálního modelu zkoušeného zařízení. Diagnostikovaný objekt na zkušební signál, který je do něj dodáván z vazebního členu reaguje odezvou, která je přes vazební člen zaznamenávána měřicím zařízením. Následně jsou výsledky z měřicího zařízení a fyzikálního modelu porovnávány ve vyhodnocovacím zařízení, které následně vyhodnocuje výsledek diagnózy. Schéma off-line diagnostiky je znázorněno na obr. 2 a je použitelné pouze pro zařízení, které je mimo provoz. [1]



Obr. 2 - Schéma off-line diagnostiky [1]

1.3 On-line Diagnostika

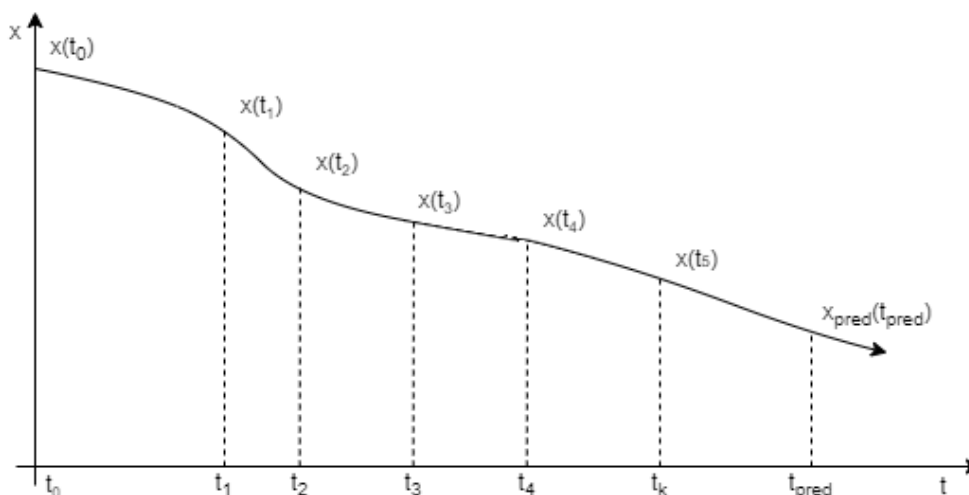
Na rozdíl od off-line diagnostiky probíhá on-line diagnostika za plného provozu zařízení. Jak je znázorněno na obr. 3, do diagnostikovaného zatíženého zařízení je přiváděn provozní signál, díky čemuž není potřeba zdroj diagnostických signálů. Diagnostikované zařízení následně předává své řídicí a pracovní signály do vazebního členu, který zde má k němu pouze pasivní funkci. Vyhodnocovací blok porovnává výsledky z měřicího zařízení s možnými výsledky získané z fyzikálního modelu a vyhodnocuje výsledek diagnózy. [1]



Obr. 3 - Schéma on-line diagnostiky [1]

1.4 Predikce chování diagnostického modelu

V případě dobré znalosti současného stavu a předchozího vývoje diagnóz zařízení je možné predikovat další budoucí vývoj a včasným zásahem předejít budoucím možným poruchám v tzn. prognóze. V prognóze je zde sledován určitý parametr $x = (x_1, x_1, \dots, x_n)$ v určitém časovém okamžiku $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ a je vyjádřen jeho časová závislost $x_n = \varphi_n(t)$.



Obr. 4 - Časový průběh sledovaného parametru [1]

Předpověď provádíme pomocí výpočtu směrnice změny parametru x'_1 , který vypočítáme z posledních dvou naměřených veličin jako:

$$x'_1 = \frac{x_k(t_k) - x_i(t_i)}{t_k - t_{k-1}} \quad (1.1)$$

Kde $x_k(t_k)$ je poslední známá hodnota parametru x_i v čase t_k a $x_i(t_i)$ je předcházející zvolená hodnota parametru x_i v příslušném čase t_i . Následně lze provést predikci budoucí hodnoty x_{pred} na následující čas t_{pred} podle:

$$x_{pred}(t_{pred}) = x_k(t_k) + x'_1 * (t_{pred} - t_k) \quad (1.2)$$

Zde je nutné brát zřetel také na to, že změna parametru se může měnit v čase, a proto rozestup měření t_k a t_i a jim příslušné parametry x_k a x_i , ze kterých se dělá extrapolace trendu do budoucnosti, je potřeba volit tak, aby byl tvořen jejich celočíselnými násobky jejich periody. Z tohoto důvodu je nutné mít větší množství měření tak, abychom odhalili periodické změny v trendu a predikci budoucího vývoje prováděli ze správně zvolených hodnot. Dobu mezi měřeními je nutné volit v závislosti na znalostech provozního cyklu, zněm v zatížení během provozu a dalších cyklicky se opakujících změnách v sledovaném období. Pokud jsou tyto podmínky splněny, lze následně přibližně předpovědět, za jaký časový interval od posledního měření, dojde k dosažení kritické hodnoty sledovaného parametru x_{krit} dle:

$$t_{živ} = \frac{x_{krit} - x_k}{x'_1} \quad (1.2)$$

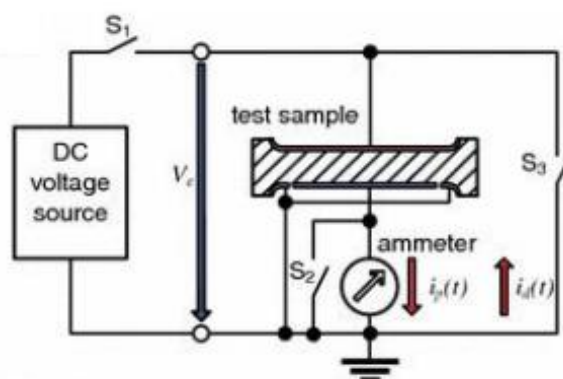
Kde $t_{živ}$ je přibližná doba životnosti zařízení od posledního měření do překročení kritické hodnoty sledovaného parametru. [1]

Výhodou takovýchto predikcí je, že dokážou předpovědět selhání dielektrika dříve, než k němu dojde, a tím mu včasným servisním zásahem zabránit. Takovouto preventivní údržbou lze zvýšit dostupnost zařízení a minimalizovat náklady na údržbu. K její realizaci je ale zapotřebí účinný monitorovací (ideálně on-line) systém diagnostiky, který vyžaduje jisté investice do vybavení a personálu. [5]

1.5 Způsoby diagnostiky transformátorů a točivých strojů

1.5.1 Měření izolačního odporu a polarizačního indexu

Měření izolačního odporu je jedna z nejstarších a nejjednodušších metod diagnostiky elektrických strojů a provádí se jak u transformátorů, tak u točivých strojů. Metoda slouží k detekci kontaminace izolačního materiálu, nebo přítomnosti závažného defektu. Metoda je založená na měření izolačního odporu mezi uzemněnou kostrou zařízení a vinutím. Na vinutí je ze stejnosměrného zdroje přivedeno záporné elektrické napětí a na kostru zařízení, která má být uzemněna, napětí kladné a je snímán časový elektrický proud, který je tímto napětím vyvolán. Z přiloženého napětí a proudu se vypočítá dle Ohmova zákona odpor. Hodnoty se odečítají v různé časy po připojení napětí, v případě transformátorů se odečítá odpor v 15 a 60 sekundě a v případě točivých strojů v 15, 60 a 600 sekundě. [1] [4] [5]



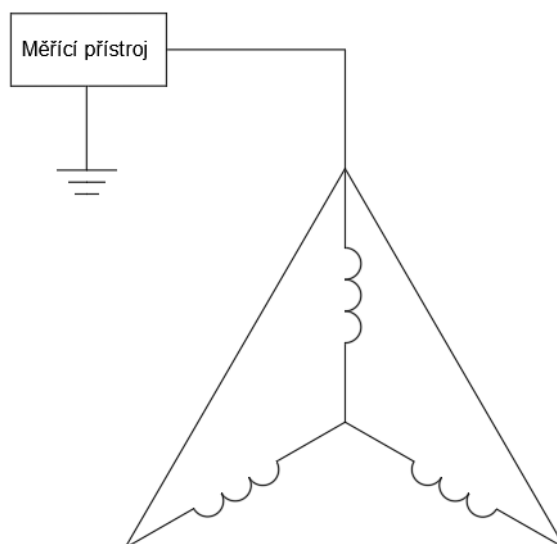
Obr. 5 - Schéma zapojení pro měření polarizačního indexu – Převzato z [4]

Z naměřených hodnot se vypočítají tzn. polarizační indexy jako poměr těchto odporů:

$$p_{i60} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1.3)$$

Kde R_{60} je izolační odpor v 60 sekundě po připojení napětí a obdobně R_{15} je 15 sekundě. Podobným způsobem se se vypočítává p_{i600} kde se jedná o poměr odporu v 600 a 60 sekundě v případě točivých strojů. [1]

V případě že je izolační dielektrikum s defekty, je navlhlé, nebo obsahuje nečistoty, tak se izolační proud s časem nemění a polarizační index se blíží, nebo je roven hodnotě 1. Naopak, pokud nedošlo k degradaci izolačního systému, tak může polarizační index být vyšší a přesáhnout hodnotu 2, v tomto případě se jedná o známku dobrého stavu izolace. [1] [4] [5]



Obr. 6 - Schéma zapojení měření izolačního odporu pro motor [1]

V případě točivých strojů se provádí test pomocí stejnosměrného napětí od velikosti 1 až 5 kV s nerozpojeným uzlem jako v případě na Obr. 6 nebo s rozpojeným uzlem, kdy je napětí připojeno na vinutí pouze jedné z fází a ostatní fáze jsou odpojené a uzemněné. Měření izolačního odporu se u motorů s vinutím chlazených vodou provádí až po jejím odstranění a vakuovém vysušení chladicích kanálů. V opačném případě hrozí zkreslení výsledku měření a vývin vodíku v důsledku elektrolýzy. Zkušební DC napětí pro měření izolačního odporu je závislé na jmenovitém napětí daného vinutí a je uvedeno v Tab. 1, která vychází z mezinárodní normy IEEE 43-2014. [1] [5]

Tab. 1- Hodnoty zkušební napětí měření izolačního odporu pro různé vinutí [5]

Jmenovité napětí vinutí [V]	Zkušební DC napětí [V]
<1000	500
1001-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12001	5000-10000

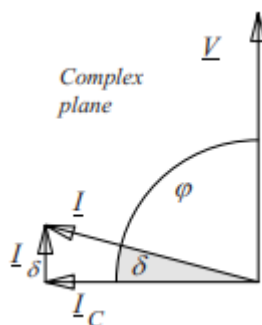
V případě transformátorů se měření provádí na stroji, který je z obou stran odpojený od sítě a již došlo k jeho vychladnutí, resp. ustálení teploty. Následně se proměří odpor jednotlivých vinutí proti sobě a v případě troj vinutového stroje jsou dvě z měřených vinutí připojeny spolu na jeden potenciál, popř. k zemi. U transformátorů se provádí ještě měření tzn. časové konstanty τ , která není závislá na rozměrech, výkonu a jiných parametrech transformátoru. Ta též charakterizuje stav izolace a její výpočet je dle:

$$\tau = R_{60} * C_{50} \text{ [s]} \quad (1.3)$$

Kde C_{50} je kapacita izolace změřená při přiložení napětí o frekvenci 50 Hz. [1]

1.5.2 Měření ztrátového činitele $\tan \delta$

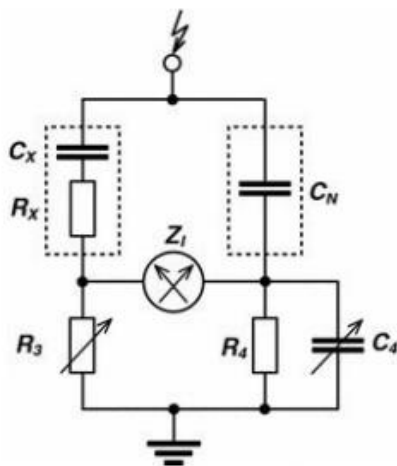
Jedná se o zkoušku pomocí střídavého napětí. Ztrátový činitel $\tan \delta$, který je vyjádřen poměrem reálné a imaginární složky proudu dielektrikem, který za normálních okolností je zpožděn o 90° za zkušebním napětím. Úhel této odchylky od tohoto zpoždění je označován jako δ , jak je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7 - Fázorový diagram složek proudu dielektrikem – Převzato z [3]

V případě, že je izolace navlhlá, tak molekuly vody, které jsou snadno polarizovatelné, vedou k nárůstu vodivosti a polarizačních ztrát. V případě že je izolace suchá a nenavlhlá ztrátový činitel je nízký a konstantní. Vyšší ztrátový činitel naopak napovídá o navlhlosti izolace. V tomto případě je možné pozorovat jeho pokles s rostoucím zkušebním napětím v důsledku poklesu činné složky proudu. V minulosti byl ztrátový činitel používán též k detekci částečných výbojů, protože v případě jejich přítomnosti došlo s nárůstem přikládaného napětí v určité hodnotě k nárůstu hodnoty ztrátového činitele v důsledku nárůstu činné složky proudu. [1] [2] [3] [4]

Jednou z klasických metod pro měření ztrátového činitele je metoda tzn. Scheringova můstku. Ten, jak je znázorněn na Obr. 8, se skládá z měřené části zařízení, která je znázorněna sériovým zapojením kapacity C_x odporu R_x . Nízkonapěťová část zkoušeného objektu je připojena k zemi přes odporovou dekádu R_3 . Vysokonapěťová část je tvořena referenčním děličem skládajícím se z nízkoztrátového kapacitoru C_N , který je uzemněn přes paralelně zapojený odpor R_4 s kapacitní dekádou C_4 . Vyvažování se provádí pomocí dekád R_3 a C_4 a to sledováním nulového indikátoru Z_I , tak aby na něm indikované napětí bylo co možná nejmenší.



Obr. 8 - Schéma Scheringova můstku – Převzato z [4]

Následně se ztrátový činitel $\tan \delta$ vypočítá pomocí vztahu:

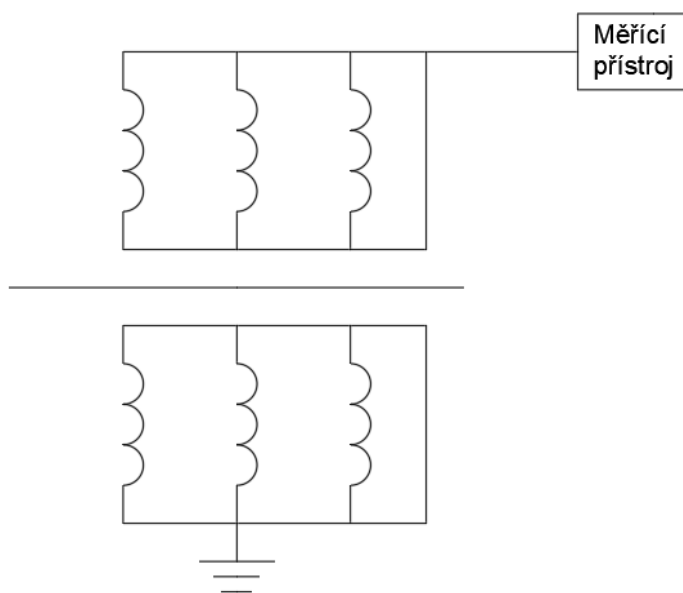
$$\tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (1.4)$$

Pro případ oteplení testovaného objektu a s tím spojené změně odporu je vhodné vybavit odporovou dekádu R_3 paralelním rezistorem s výrazně menším odporem, aby bylo v případě nutnosti zabráněno jako přehřátí a zničení. [4]

Měření ztrátového činitele se provádí na transformátorech i motorech pomocí střídavého napětí o velikosti 10 kV, popř. nižším, které je vybrané z řady 0,5, 1, 2 a 5 kV dle izolační hladiny daného vinutí, která nesmí být během zkoušky překročena. Ideální teplota měřeného objektu by měla být ustálená na 20 °C. [1]

1.5.3 Měření kapacitního poměru C_2/C_{50} na transformátorech

Měření kapacitního poměru C_2/C_{50} , které se provádí na transformátorech, je založeno na rozdílné kapacitě vinutí při frekvencích střídavého napětí o velikosti 2 Hz u C_2 a 50 Hz v případě C_{50} . Podobně jako u předchozích metod, že suchá a izolace má téměř stejnou kapacitu při obou frekvencích. Naopak u navlhle izolace je s rostoucí frekvencí pozorovatelný pokles její kapacity a tím dochází k nárůstu kapacitního poměru C_2/C_{50} . Měření se provádí nejdříve na straně vysokého napětí, kdy je strana nízkého napětí (popř. i vinutí střední je-li přítomno) společně s kostrou transformátoru uzemněny. Následně se provádí obráceně pro stranu nízkého napětí (popř. i pro střední vinutí). Nakonec se provede měření pro kapacitu obou (popř. všech tří) vinutí proti zemi. Zapojení prvního případu je znázorněno na Obr. 9.



Obr. 9 - Schéma zapojení kapacitního poměru C_2/C_{50} - [1]

Měření se provádí napětím 100 V a mezi měřeními se musí dodržovat interval 3 minuty pro vybíjení, kdy jsou všechny vinutí spojená s kostrou transformátoru a uzemněna. Následně se vypočítá poměr kapacit C_2/C_{50} dle následující vztahu:

$$C_2/C_{50} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad (1.5)$$

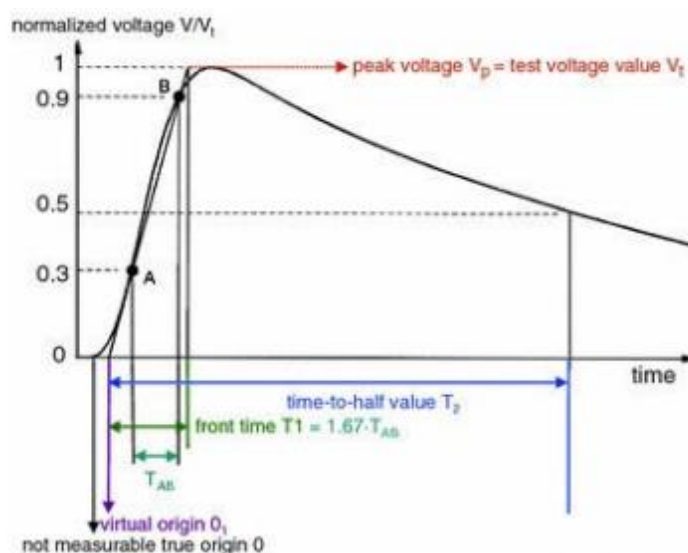
Pro zjištěné poměry platí následující hodnoty, kdy, aby transformátor vyhověl zkoušce, tak naměřený poměr kapacit musí být menší než daná hodnoty z Tab. 2 pro danou teplotu vinutí během měření. [1]

Tab. 2 - Mezní hodnoty nejvyššího přípustného poměr C_2/C_{50} - Převzato z [1]

Teplota vinutí [$^{\circ}\text{C}$]	10	20	30	40	50
Poměr C_2/C_{50}	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

1.5.4 Napěťová zkouška atmosférickým a spínacím impulzem

Zkouška elektrické pevnosti atmosférickým impulzem se provádí u transformátorů z důvodů ověření odolnosti transformátoru proti charakteristickým přepětím, které vznikají při úderu blesku. Napěťový průběh tohoto impulzu je znázorněn na Obr. 10.



Obr. 10 - Průběh atmosférického impulzu – Převzato z [4]

Doba čela T1 je 1,2 μ s a je počítána z doby mezi virtuální nulou a maximem napětí, které jsou v místě průsečíku protažené spojnice bodů dosažení 0,3 a 0,9 vrcholového napětí pulzu s nulovým a vrcholovým napětím. Doba T2 o velikosti 50 μ s půltýlu je počítána od virtuální nuly do času kdy napětí týlu atmosférického impulzu poklesne na polovinu napětí vrcholového. Tyto hodnoty jsou definovány evropskou normou IEC 60060-1 a z těchto hodnot také vychází jeho označení 1,2/50. [1] [3] [4]

Zkoušky na transformátorech jsou prováděny pro ověření dostatečné elektrické pevnosti mezi jednotlivými vinutími navzájem a vinutími a kostrou u transformátorů s jmenovitým napětím 6 a více kV. Hodnoty rázového zkušební napětí pro atmosférický impulz u transformátorů zapojených do hvězdy s izolovaným nulovým bodem pro jednotlivé napěťových hladin jsou uvedeny v Tab. 3. [1]

Tab. 3 - Zkušební napětí atmosférickým impulzem pro jednotlivé řady transformátorů –
Převzato z [1]

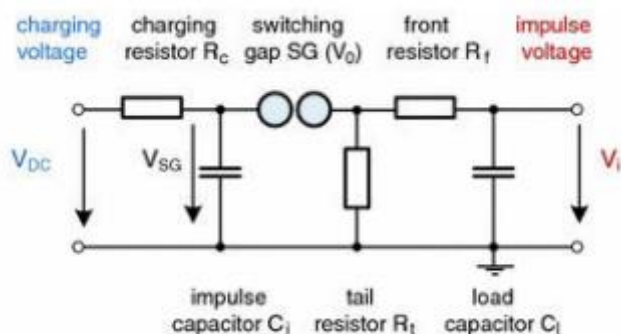
Jmenovité napětí [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
6	60
10	175
22	150
35	190
110	550
220	1050

Zkouška spínacím impulzem se provádí impulzem, který má stejný průběh jako impulz atmosférický s tím rozdílem, že doba čela je v tomto případě 250 μ s a doba půltýlu je 2500 μ s, odtud má tento impulz označení 250/2500, jak udává evropská norma IEC 60060-1. Zkouška opět ověřuje kvalitu vnitřní izolace transformátoru a její schopnost odolávat přepětovým impulzům vzniklým při spínacích operacích v rámci provozu. [1] [3] [4]

1.5.5 Zdroje pro impulzní zkoušky

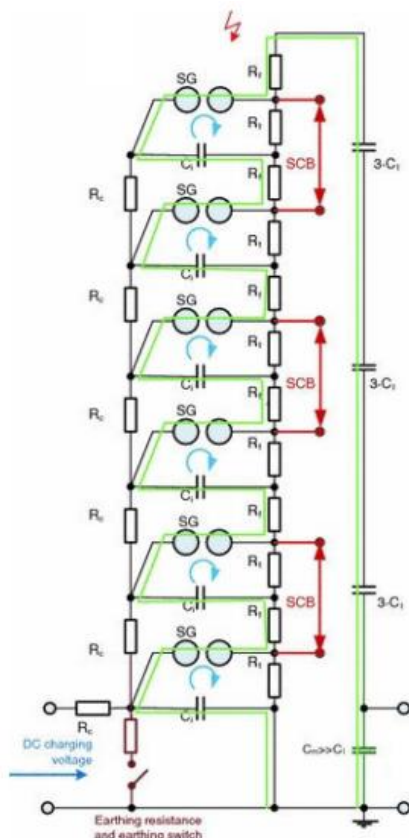
Základem generátoru pro impulzní zkoušky je základní jednostupňový RC obvod, jehož schéma je znázorněno na Obr.11. Impulzní kapacita C_i je nabíjena přes nabíjecí odpor R_c až do okamžiku dosažení průrazného napětí V_0 , kdy dojde k přeskoku v jiskřišti SG. Následně, když je dosaženo přeskoku, je nabíjena zátěžová kapacita C_l přes odpor

R_f , který tvaruje čelo impulsu. Zároveň je zátěžová kapacita vybíjena odporem R_t , který tvaruje tyl impulsu a společně s odporem R_f určuje jeho konečný tvar. [3] [4]



Obr. 11 - Schéma základního RC obvodu pro impulzní zkoušky – Převzato z [4]

Základní jednostupňový generátor je vhodný pouze pro užití pro generované napětí nižší, než je 200 kV. Pro vyšší napěťové impulzy je nutné použít vícestupňový impulzní generátor. Jeho schéma je znázorněno na Obr. 12. [4]



Obr. 12 - Schéma vícestupňového RC obvodu pro impulzní zkoušky – Převzato z [4]

Jedná se o v podstatě sériovou realizaci jednostupňového generátoru napěťových impulzů. Zde jsou impulzní kapacity C_i nabíjeny přes nabíjecí odpory R_c spojené do série v jednom sloupci a jejich nabíjení probíhá společně. Po dosažení příslušného napětí, kdy dojde k přeskoku na jiskřistích SG a následnému sériovému spojení nabytých kapacit, čímž je dosaženo adekvátně vyššího napětí v závislosti na počtu stupňů generátoru. [3]
[4]

2 Částečné výboje

Jedním z hlavních způsobů diagnostiky, jemuž se hlavně věnuje tato diplomová práce, je měření částečných výbojů. Diagnostika založená na částečných výbojích detekuje přítomnost elektrických výbojů vzniklých v důsledku nedokonalosti dielektrika. Takovouto nedokonalostí mohou být např. dutiny vyplněné plynem v pevném dielektriku, vzduchové bubliny v kapalném dielektriku, nebo přítomnost ostrých hran na rozhraní elektrody a vzduchu. Přítomnost těchto částečných výbojů vypovídá o přítomnosti vad v izolačním systému zařízení a vedou k jeho degradaci a následnému selhání. Dopady těchto částečných výbojů jsou značně rozdílné pro stejnosměrné, střídavé a impulzní napětí, kdy největší negativní dopady můžeme pozorovat v případě střídavého napětí. [3] [4] [6] [8]

Částečné výboje vznikají v místech defektu, kde je rozdíl potenciálů větší, než je elektrická pevnost daného prostředí, aby došlo k výboji v místě poruchy, který ale nevede ke kompletnímu selhání izolace. Tento výboj přemostňuje izolaci pouze částečně. Takovýto výboj je doprovázen přítomností měřitelných krátkých napěťových, nebo proudových pulsů, jejich délka je z pravidla výrazně menší než $1 \mu\text{s}$. Částečné výboje jsou také v některých případech doprovázeny tepelnými, zvukovými, optickými, nebo chemickými projevy. [1] [4] [6] [10]

2.1 Vznik elektrického průrazu v plynném dielektriku a elektrická pevnost

Pro pochopení vzniku částečných výbojů je zapotřebí si nejdříve uvést, co je to elektrická pevnost a jak dochází k vzniku průrazů v dielektriku.

Pokud napětí překročí kritickou hodnotu, dochází k nárůstu počtu volných nosičů náboje v důsledku čehož roste elektrická vodivost dielektrika, a to tím přestává plnit svou funkci, a to buď dočasně, nebo trvale. Elektrická pevnost je definována jako podíl napětí U_p , kdy dochází k elektrickému průrazu, a tloušťce d daného dielektrika dle vztahu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ (V/m)} \quad (2.1)$$

Vlivem přiloženého elektrického pole o vysoké intenzitě, dochází k urychlování volných elektronů, které jsou přirozeně přítomny v každém dielektriku, např. z důvodu

přirozeného radiačního pozadí. Pokud mají tyto urychlující se elektrony dostatečně dlouhou volnou dráhu, mohou následně kolizí s dalšími neutrálními částicemi uvolni další elektrony nárazovou ionizací. Takto dochází ve směru pohybu elektronů k vzniku lavinové ionizace plynu, kdy dochází k prudkému nárůstu počtů nosičů náboje, resp. elektronů. V případě, že urychlený elektron nemá dostatečnou energii, dojde pouze k excitaci elektronů u neutrální částici do vyšší energetické hladiny a při jejím rekombinaci, resp. návratu do původní energetické hladiny, je excitován foton, který může opět způsobit následnou ionizaci další částice. Proti směru pohybů volných elektronů se pohybují kladné ionty a dochází k vzniku vodivého kanálu s elektrickým výbojem. [2] [3]

Na začátku je vodivý kanál slabý a sám o sobě nijak neovlivňuje okolní elektrické pole. Tento druh výboje nazýváme Townsendův výboj. S nárůstem proudu ve výbojovém kanálu dochází k deformaci elektrického pole, které v důsledku vede k dalšímu nárůstu proudu i v případě poklesu napětí mezi elektrodami. V tomto vodivém kanálu dochází k vlivem intenzivní excitace a rekombinace k vzniku fotonů, které pozorujeme v podobě světelného záření vodivého kanálu. Tomuto výboji říkáme jiskrový, nebo také streamer. [3]

V případě velkých proudů dochází k značnému vývinu tepla a v důsledku toho k následné termální ionizaci, a to i v případě malého napětí mezi elektrodami. Takovýto výboj nazýváme obloukový, nebo též leader, a je doprovázen intenzivně zářícím a někdy zakřiveným, nebo plápolajícím elektrickým obloukem. [3]

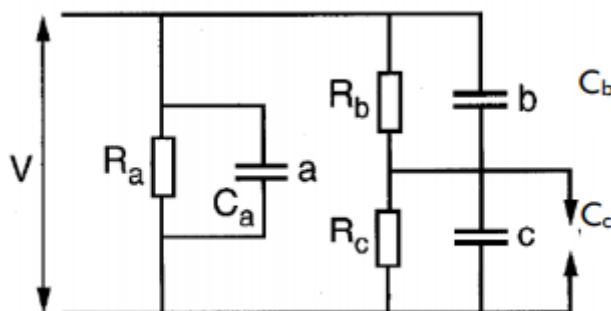
Elektrická pevnost a s ní spojený vznik průrazů je značně ovlivněn heterogenitou elektrického pole. U nehomogenního elektrického pole je elektrická pevnost výrazně nižší a vznikající průrazy jsou provázeny vznikem korónového výboje v místech s jeho vysokou intenzitou, kde je lokálně převýšena elektrická pevnost. [2]

2.2 Vznik částečných výbojů

Jak již bylo zmíněno, k částečným výbojům dochází v důsledku nárůstu intenzity elektrického pole, které vede v místě se sníženou elektrickou pevností (typicky lokální defekt) k ionizaci, vzniku elektronové laviny a ve výsledku k elektrickému výboji vedoucímu k přeskoku a vybití nahromaděného náboje. Kvůli rychlosti vzniku elektronové laviny je vzestupná část částečného výboje velice krátká po pohybuje se

v řádech nanosekund. K vzniku elektronových lavin je zapotřebí prostředí vyplněné plynem, z tohoto důvodu nedochází k částečným výbojům v pevném, nebo kapalném dielektriku, ale pouze ve vzduchových bublinách, jež jsou v tomto dielektriku přítomny. Velikost náboje těchto pulsů se odvíjí od druhu samotného výboje, v případě doutnavého výboje se jedná o jednotky pF, u jiskrového výboje se jedná o desítky až stovky pF a pokud dojde k zformování obloukového výboje, tak náboj může překročit i 1000 pF. [3] [4] [7]

Částečné výboje v dutině izolantu lze popsat pomocí náhradního "abc" modelu znázorněného na Obr. 13. Kde C_a a R_a , odpovídají kapacitě, resp. odporu okolního nepoškozeného dielektrika, C_b a R_b části dielektrika v sérii s defektní dutinou a nakonec C_c a R_c odpovídají samotnému defektu (dutině). [6] [12]



Obr. 13 - Náhradní "abc" obvod pro částečný výboj v dutině izolantu [6]

Napětí na kapacitě C_c po částečném výboji poklesne k nule a dochází k jeho opětovnému nabíjení skrz R_b v případě stejnosměrného a skrz R_b a C_b v případě střídavého napětí až do dosažení zápalného napětí na kondenzátoru C_c , což vede k opětovnému zapálení částečného výboje. Odpor R_b je teplotně závislý, proto četnost částečných výbojů v případě stejnosměrného napětí je závislá na teplotě na rozdíl od střídavého napětí. [6] [12]

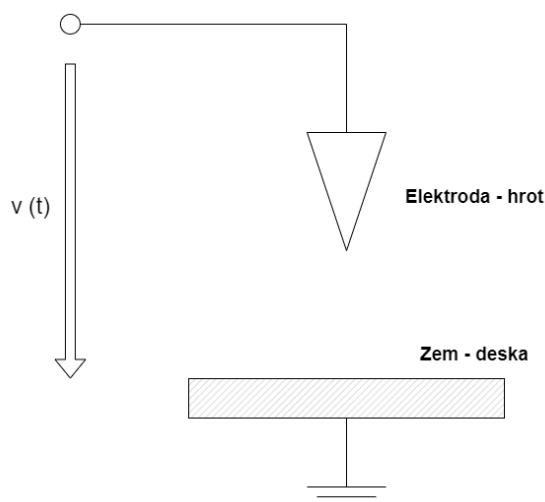
2.3 Dělení částečných výbojů dle místa vzniku

Částečné výboje lze rozdělit podle místa jejich vzniku na dvě části, vnější, povrchové a vnitřní částečné výboje. [1] [7]

2.3.1 Vnější částečné výboje

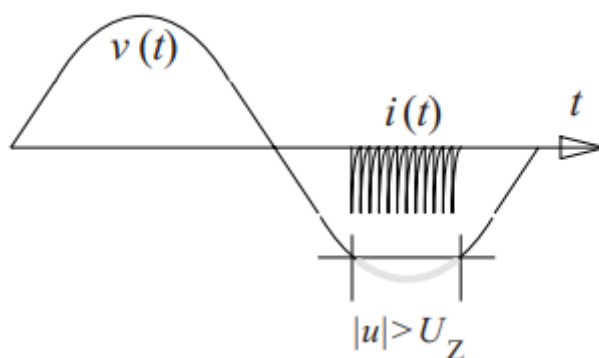
Vnější částečné výboje v okolním vzduchu elektrody, někdy též nazývané korónové výboje, vznikají na rozhraní vodiče a vzduchu v případě, že na dané elektroda jsou přítomny ostré hrany nebo malý poloměr zakřivení. Jejich přítomnost vede k intenzivní erozi povrchu dané elektrody v důsledku vysokých teplot při nich vzniklých. [1] [7]

Vznik korónového výboje je zapříčiněn vysoce nehomogenním elektrickým polem elektrod v oblasti již zmíněných hrotů, ostrých hran, nebo zakřivení s malým poloměrem v případě, že u střídavého napětí dojde v okolí vrcholu k překročení zápalného počátečního korónového napětí. Znázornění uspořádání elektrody vůči zemi je na Obr. 14. [3] [4]



Obr. 14 - Uspořádání hrotové elektrody vůči ploché zemi

Tento druh částečných výbojů tedy můžeme pozorovat v oblasti okolí vrcholu sinusového průběhu střídavého napětí. Vzhledem k přítomnosti polarizačního efektu, způsobeného přítomností kladné potenciálové bariéry v oblasti elektrody, pozorujeme přítomnost korónového výboje v oblasti záporného vrcholu sinusového průběhu napětí na elektrodě, jak je znázorněno na Obr. 15. Pokud je hrot na straně zemněné části zařízení, tak se tyto částečné výboje vyskytují v oblasti kladné půlvlny. [3]



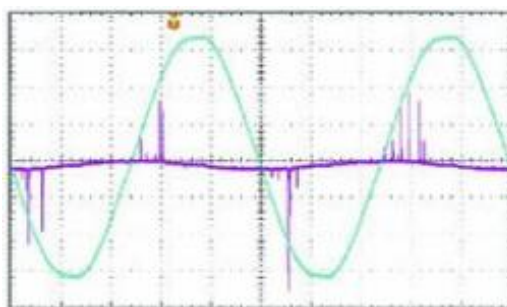
Obr. 15 - Přítomnost korónových výbojů u hrotové elektrody – Převzato z [3]

U stejnosměrného napětí dochází po překročení zápalného napětí pro korónový výboj ke konstantní výbojové činnosti bez přerušování, jako je tomu u střídavého napětí. [3]

Korónové výboje jsou také častým zdrojem rušícího signálu, který může být skrz vodiče přenášen do měřícího zařízení částečných výbojů. Proto v případě detekce korónových výbojů je nutné ověřit, zda rušení není způsobeno okolním prostředím, stejně tak, zda špatným uzemněním zkoušeného zařízení. [3] [4]

2.3.2 Povrchové částečné výboje

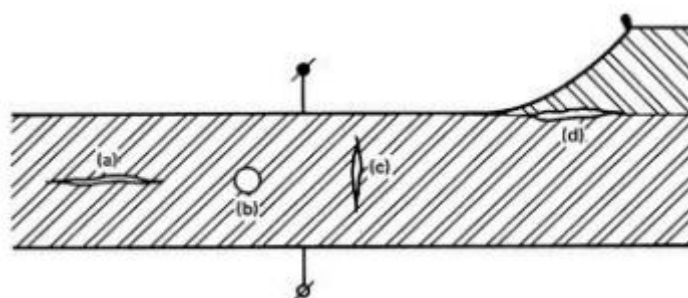
Povrchové částečné výboje vznikají na obdobných místech jako vnější částečné výboje, teda na rozhraních elektrody a vzduchu. Tyto klouzavé povrchové výboje vznikají v oblastech střídavého sinusového průběhu mezi nulovou a vrcholovou hodnotou. Teda na rozdíl od korónového výboje není jejich výskyt lokalizován v okolí vrcholového napětí, ale v oblastech narůstajícího napětí prvních polovin půlvln pro obě polarity, jak je znázorněno na Obr. 16. [1] [3] [4]



Obr. 16 - Povrchové částečné výboje (fialově) zachycené na osciloskop – Převzato z [4]

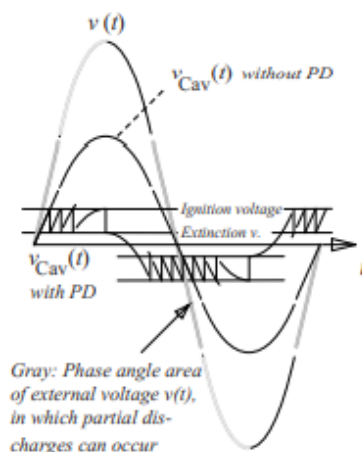
2.3.3 Vnitřní částečné výboje

Pod pojmem vnitřních částečných výboje jsou chápány částečné výboje, ke kterým dochází uvnitř dutin různých tvarů v rámci kapalného, nebo pevného dielektrika, které jsou znázorněny na Obr. 17. Tyto dutiny, pukliny, bubliny či jiné defekty jsou vyplněny plynem, a proto v nich může docházet k vzniku elektronových lavin a tím k částečným výbojům. Částečné výboje vedou k rychlé degradaci izolačního systému tepelnými a chemickými účinky výbojů, vzniku stromečkových struktur v dielektriku, což vede v budoucnu k jeho úplnému selhání. [1] [3] [4] [7]



Obr. 17- Příklady defektů v pevném dielektriku – Převzato z [4]

U střídavého napětí k částečným výbojům dochází při překročení zápalného rozdílu potenciálů pro daný defekt při napěťových změnách. Při samotném částečném výboji dohází k vyrovnávání napěťových hladin a poklesu jejich rozdílu až na zhášecí úroveň a poté dojde k jeho zániku. Pokud je napěťová amplituda dostatečně velká oproti zápalnému napětí daného defektu, může se částečný výboj opakovat, a to i několikrát v rámci půlvlny střídavého napětí. Pokud nedojde k překročení zápalného napětí a následnému zapálení částečného výboje, tak napětí na defektu sleduje napětí vnější. Napěťová hladina je tedy posunuta proti směru polarity dané půlvlny a z tohoto důvodu může dojít na sestupné části k opětovnému zapálení částečných výbojů v opačné polaritě, jak je znázorněno na Obr. 18 a k spojení výskytu částečných výbojů a plynulému přechodu na částečné výboje následující půlvlny. [3] [4]



Obr. 18 - Průběh vnějšího napětí a napětí na defektní oblasti vedoucím k částečným výbojům -
Převzato z [3]

Protože u menších dutin je pravděpodobnost výskytu volného elektronu, který by následně spustil elektronovou lavinu a způsobil výboj, menší než u dutin s větším poloměrem, je zde riziko, že tyto malé defekty budou nerozpoznány při kratších měřeních. Nicméně k tomuto v praktických měřeních nedochází z důvodu, že defekty v dielektriku se nevyskytují samostatně a také, že napětí na defektu výrazně překračuje jeho elektrickou pevnost. [3]

K částečným výbojům v defektech izolace dochází i pokud je vnější napětí stejnosměrné. K těm dochází po přivedení vnějšího stejnosměrného napětí. Po proběhnutí částečného výboje dochází k opětovnému nabíjení defektu přes odporovou složku dielektrika až do opětovného překročení zápalného napětí a vytvoření výboje. Vzhledem k velmi velké rezistivitě dielektrika je toto nabíjení velmi pomalé a z tohoto důvodu jsou časové rozestupy mezi jednotlivými výboji velmi dlouhé. Naopak během spínání se projevují kapacitní složky dielektrika a dochází k jeho polarizaci. Z tohoto důvodu je po přivedení stejnosměrného napětí možno z počátku pozorovat větší množství částečných výbojů, které postupně ustanou a následně dochází pouze k sporadickým výbojům v dlouhém časovém intervalu což komplikuje vyhodnocení naměřených hodnot. [3]

2.4 Parametry charakterizující impulzy částečných výbojů

Při měření a vyhodnocování částečných výbojů je sledováno několik veličin a parametrů, ty jsou shrnuty a definovány v normě ČSN EN 60270 [10].

2.4.1 Přímě měřené veličiny

Zdánlivý náboj q impulzu částečného výboje

Jedná se o takový náboj, který v daném zkušebním objektu způsobí obdobnou výchylku napětí na jeho svorkách jako samotný proudový impulz částečného výboje. Tento parametr je jednou z nejvíce důležitých měřených hodnot a jeho velikost je nejčastěji vyjádřena v pikocoulumbech (pC). [1] [10]

Četnost impulzů n

Jedná se o poměr impulzů částečných výbojů zaznamenaných a časovém intervalu, kdy došlo k jejich měření. Většinou se udává v impulzech za sekundu. V praxi se nezaznamenávají všechny impulzy, ale pouze ty, které překročí určitou hodnotu, popř. pohybují se v předepsaném intervalu. [1] [10]

Opakovací kmitočet impulzů N

Jedná se o počet impulzů částečných výbojů za sekundu, které jsou od sebe stejně vzdálené. [10]

Čas t_i výskytu impulzu částečného výboje

Čas t_i je čas měřený mezi posledním kladným průchodem zkušebního (popř. zátěžného) střídavého napětí nulou a samotným impulsem částečného výboje. [10]

2.4.2 Odvozené veličiny

Fázový úhel ϕ_i částečného výboje

Fázový úhel částečného výboje ϕ_i se vypočítává z času výskytu impulzu částečného výboje t_i dle vztahu:

$$\phi_i = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right) \quad (^\circ) \quad (2.2)$$

Kde T je perioda přiloženého zkušebního (popř. zátěžného) napětí. [10]

Střední proud částečných výbojů I

Jedná se o odvozenou veličinu z celkového součtu zdánlivého náboje q_i během referenčního časového intervalu T_{ref} . Vztah pro jeho výpočet je:

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) \quad [\text{A}] \quad (2.3)$$

Pro T_{ref} je obvykle volen interval o délce 60 s. [1] [10]

Výkon částečných výbojů P

Tato veličina je odvozena z okamžitých naměřených hodnot zkušební napětí a k nim příslušným zdánlivým nábojům q_i . Výkon částečných výbojů tedy představuje střední výkon částečných impulzů dodávaný na svorky a platí pro něj vztah:

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i) \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

Kde u_1, u_2, \dots, u_i jsou okamžité hodnoty napětí na svorkách pro jednotlivé impulzy a q_1, q_2, \dots, q_i jsou jejich zdánlivé náboje. [10]

Střední kvadratický součet D

Velichina odvozená od součtu kvadrátů jednotlivých zdánlivých nábojů q_i částečných impulzů za daný referenční čas T_{ref} dle vztahu: [10]

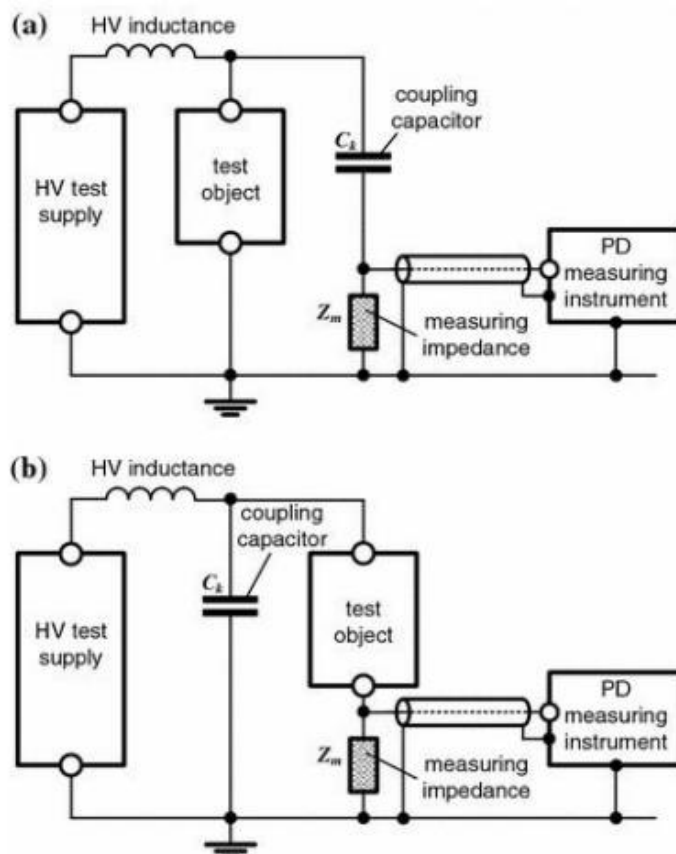
$$D = \frac{1}{T_{ref}} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2) \quad [\text{C}^2/\text{s}] \quad (2.5)$$

2.5 Zařízení pro měření částečných výbojů

Měřicí obvody pro měření částečných výbojů jsou popsány v normě ČSN EN 60270 a v souladu s ní také kalibrovány tak, aby plnili příslušné požadavky. Měření částečných výbojů je zde jedním z hlavních ukazatelů pro zajišťování kvality a diagnostiku izolačních systémů při analýze jejich stavu a ověřování plnění příslušných norem. [4] [10]

2.6 Zkušební obvody

Zkušební obvody používané pro měření jsou uvedeny v normě ČSN EN 60270, popř. z nich mohou vycházet jejich příklad je zobrazen na Obr. 19. Tyto obvody slouží k přímému pozorování impulsů částečných výbojů, které jsou odděleny od napájecího (zkušebního) napětí pomocí vazebního zařízení. [1] [10]



Obr. 19 - Zkušební obvod pro střídavá napětí s vazebním zařízením v paralele (a) a v sérii (b) se zkoušeným objektem – Převzato z [4]

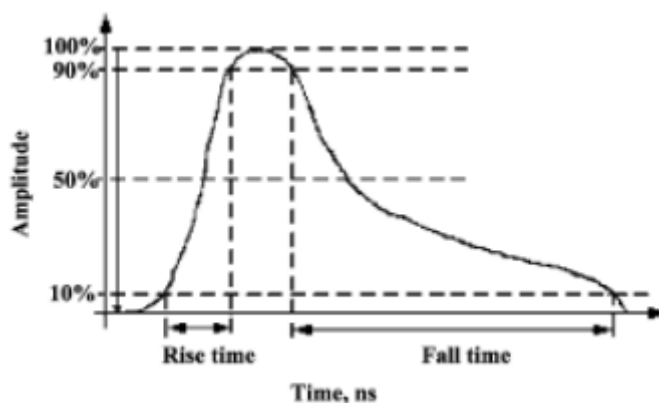
Tyto zkušební obvody se skládají z několika následujících částí:

- **Zkušebního objektu**, který má kapacitní charakter.
- **Vazebního kondenzátoru C_k** v provedení s nízkou indukčností a nízkou hladinou částečných výbojů až do úrovně zkušebního napětí.
- **Vysokonapětového zdroje** s dostatečným napěťovým rozsahem na nízkou úroveň šumu pozadí.

- **Vazební zařízení** se svou vstupní impedancí, které přeměňuje proud jím protékající na napěťové impulzy, které jsou dále předávány měřicímu přístroji, s výjimkou frekvencí zkušebního napětí a jejich násobků.
- **Filtru** mezi zdrojem zkušebního napětí a zkoušeného objektu pro zabránění přenosu šumu ze zdroje.
- **Vysokonapěťovými vodiči** s nízkou hladinou šumu pozadí a bez přítomnosti vlastních částečných výbojů až do úrovně zkušebního napětí. [4] [10]

2.7 Časový průběh proudu částečného výboje

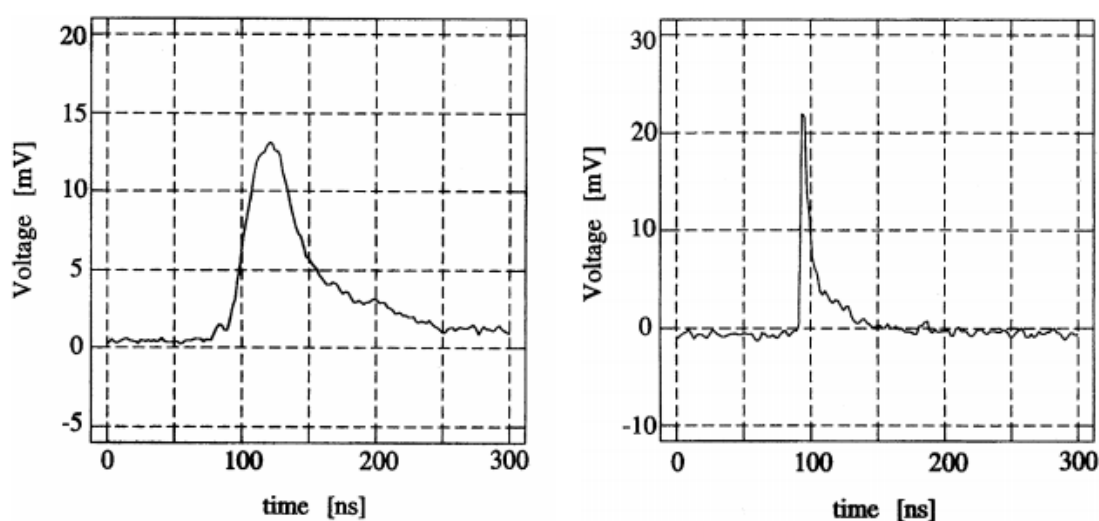
Jak již bylo dříve zmíněno, doba trvání impulsu částečného výboje je velmi krátká a pohybuje se pod úrovní $1 \mu\text{s}$ a to v některých případech až v jednotkách nanosekund. Délka jejich trvání je závislá na množství různých parametrů. Jedním z nich je druh částečného výboje, zda se jedná o výboj vnější, klouzavý na povrchu, nebo výboj vnitřní. Další parametry ovlivňující jeho časový průběh jsou velikost defektu, kde k částečnému výboji dochází, tlaku vzduchu (popř. plynu), amplitudě přiloženého napětí a době, po kterou je dielektrikum diagnostikovaného objektu namáháno. Příklad časového průběhu proudu povrchového klouzavého výboje je zobrazen na Obr. 20. Částečné výboje mají podobně jako tomu u atmosférického nebo spínacího impulsu dobu nástupné hrany a dobu sestupné hrany. Doba nástupné hrany je definována stejně jako doba čela, nicméně doba sestupné hrany je zde doba při poklesu z 90 % na 10 % vrcholové amplitudy v týlní části impulsu. U pevných dielektrik je doba nástupné hrany v jednotkách a doba sestupné hrany v desítkách nanosekund. U kapalných dielektrik jsou tyto doby výrazně vyšší, doba čela se zde standartně pohybuje okolo $1 \mu\text{s}$ a doba půltýlu je několik μs . [1] [7] [14]



Obr. 20 – Tvar impulsu částečného výboje s vyznačeným časem nástupné a sestupné hrany –
Převzato z [14]

Vzhledem k tomu, že zkušební obvody pro měření částečných výbojů měří až na výstupu objektu za vazebním zařízením je napětí měřené měřicím zařízením způsobené částečným výbojem časově zpožděn a oploštěné z důvodů dějů uvnitř testovaného objektu jako jsou např. útlumy a odrazy. Celkový pulzní náboj na výstupu ze zařízení však odpovídá náboji částečného výboje. Ten je následně převeden na odpovídající napětí ve vazebním zařízením, jehož amplituda odpovídá náboji impulzu částečného výboje. [4]

Doba a amplituda impulzu se liší dle typu částečného výboje a rozděluje se na Townsendův výboj a streamerový výboj. Jak je vyobrazeno na Obr. 21 Townsendův výboj má nižší amplitudu, a naopak delší dobu trvání (resp. delší dobu čela a týlu). V případě, že se jedná výboj streamerový má naopak amplitudu vysokou a jeho doba trvání je krátká. Na dobu trvání pulzu má také vliv velikost defektu, ve kterém vzniká. S narůstající velikostí dutinového defektu dochází k prodlužování doby čela. Účinky těchto dvou druhů výbojů na dielektrikum jsou také rozdílné, zatímco Townsendův výboj způsobuje plošnou a méně intenzivní degradaci dielektrika v místě výboje, tak streamerový výboj způsobuje intenzivnější bodovou degradaci. [22] [23]



Obr. 21 - Townsendův výboj (vlevo) a streamerový výboj (vpravo) v dutině velikosti 0,1 mm -
Převzato z [22]

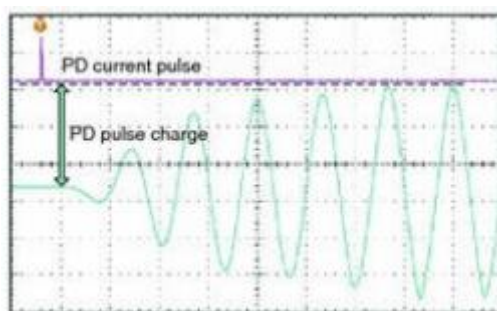
2.8 Vazební zařízení pro měření částečných výbojů

Vazební zařízení pro měření částečných výbojů se podle normy ČSN EN 60270 rozdělují na širokopásmové a úzkopásmové, dle jejich frekvenčního rozsahu, který je vymezen dolním f_1 a horním f_2 mezním kmitočtem. Tyto kmitočty vymezují šířku pásma

Δf v rámci kterého je útlum menší jak -6 dB a ve kterém dochází k měření proudových impulzů částečných výbojů vycházejících z diagnostikovaného zařízení. Vzhledem k jejich krátkému trvání je žádoucí, aby horní mezní kmitočet vazebního zařízení byl co nejvyšší, ideálně u normou předepsaného 1 MHz. [4] [10]

Širokopásmová vazební zařízení mají doporučené hodnoty 30 až 100 kHz pro dolní a 100 až 400 kHz pro horní mezní kmitočet. Výstupem těchto přístrojů, v reakci na proudový impuls částečného výboje, je utlumená oscilace, od které se odvozuje zdánlivý náboj q a polarita impulsu částečného výboje. Časové rozlišení impulsu T_r , které udává schopnost systému rozeznat dva obdobné po sobě jdoucí impulzy částečných výbojů, je v případě širokopásmových zařízení malé v rozmezích 5 až 20 μs . [10]

Úzkopásmové přístroje jsou narození od širokopásmových přístrojů charakterizovány také středním kmitočtem pásma f_m , který je definován jako průměr hodnot horního a dolního mezního kmitočtu. Doporučené hodnoty pro střední kmitočet jsou 50 kHz až 1 MHz a 9 až 30 kHz pro šířku pásma, uprostřed kterého se střední kmitočet nachází. Ve vzdálenosti větší, než je šířka pásma Δf od středního kmitočtu f_m , by měl být útlum větší jak 20 dB. Odezvou úzkopásmových přístrojů na impuls částečného výboje je kmitavá oscilace s kladnými a zápornými vrcholy viz. Obr. 22, jejíž obálka je úměrná zdánlivému náboji q bez ohledu na polaritu. Časové rozlišení impulsu T_r je typicky větší než 80 μs . [10]



Obr. 22 - Odezva úzkopásmového přístroje (zeleně) na impuls částečného výboje (fialově) -
Převzato z [4]

2.9 Neelektrické projevy částečných výbojů a metody jejich měření

Přítomnost částečných výbojů je často doprovázena i dalšími neelektrickými efekty, které sice nemohou sloužit ke kvantitativnímu normovanému vyhodnocování

diagnostikovaného objektu, nicméně je možné je použít při lokalizaci, nebo detekci přítomnosti částečných výbojů za pomoci speciálních, k tomu určených přístrojů. [1] [10]

První z těchto metod je akustická detekce založená na využití směrových mikrofonů s vysokou citlivostí a rozsahem až do, neslyšeného, ultrazvukového pásma, zvláště u korónového výboje, nebo piezoelektrických čidel. Měření by se mělo provádět v místnosti s nízkou hladinou šumu. Tento způsob detekce je vhodný pro lokalizaci částečných výbojů, a to jak uvnitř, tak vně zařízení. [1] [10]

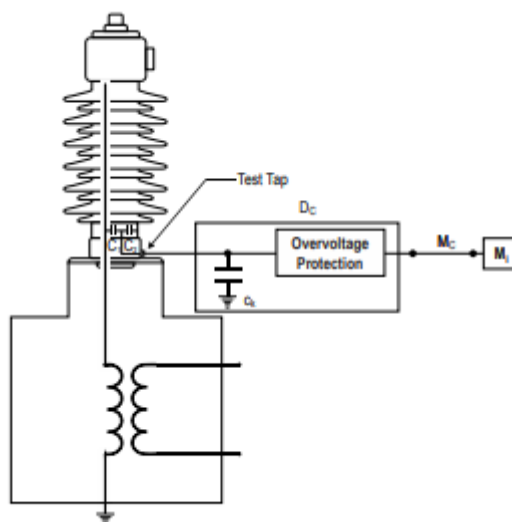
Dalším neelektrickou metodou detekce částečných výbojů je vizuální, nebo optická detekce. Mezi optickou detekci se počítá jak samotná vizuální obhlídka přístupných částí zařízení, kde se hledají projevy přítomnosti částečných výbojů, nebo také je možné provádět detekci částečných výbojů pomocí termokamer, kdy se detekuje místo, které je přítomností částečných výbojů zahříváno. Vnější částečné výboje, jako např. korónový výboj je možné sledovat pomocí ultrafialových kamer. Detekovat přítomnost částečných výbojů lze i lidským zrakem nebo pomocí fotografie s dlouhou expozicí, a to v dobře zatemněné místnosti. [1] [10]

Poslední z neelektrických metod detekce částečných výbojů je detekce chemická, založená na detekci produktů vzniklých při výbojové činnosti v kapalném, nebo plynném dielektriku. Vzhledem k dlouhodobému hromadění těchto chemických produktů výbojové činnosti je chemická detekce vhodná pro odhad degradace způsobená činností částečných výbojů. U transformátorů s izolačním olejem se detekují plyny jako vodík, metan, propylen, acetylen, nebo ethylen a vyhodnocuje se jejich vzájemný poměr. U zařízení chlazených vzduchem, kde dochází k výskytu částečných výbojů za přítomnosti vzdušného kyslíku se provádí detekce ozónu. Metodami chemické detekce částečných výbojů se podrobněji zabírají mezinárodní normy IEC 60567, IEC 60599 a IEC 61181. [1] [10]

2.10 Měření částečných výbojů na transformátorech při střídavém napětí

Monitoring a měření částečných výbojů u transformátorů má za cíl odhalit defekty v dielektriku vzniklých při výrobě nebo při používání a tím zbránit případným havarijním stavům, které mohou vést až k destrukci transformátoru. [1]

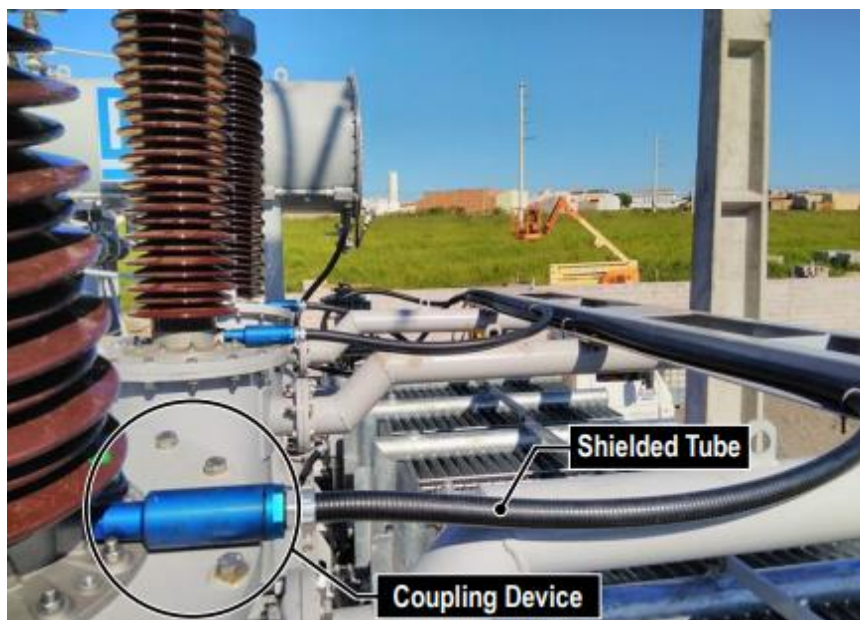
Před měřením částečných výbojů musí být zajištěno, aby byl povrch vnější izolace zkoušeného objektu suchý a čistý pro zabránění vzniku částečných výbojů. Zkouška by se neměla provádět okamžitě po předchozích zkouškách, ale měla by být zajištěna určitá časová prodleva, tak aby zkoušený objekt srovnal svou teplotu s okolím a aby předchozí mechanické a elektrické namáhání nemělo vliv na výsledek zkoušky. Vyčištěné průchodky by též měly být opatřeny stíněním proti koruně. Měření se pak provádí při odpojení primárního vinutí transformátoru, na které je připojen zdroj střídavého napětí. Měřicí přístroj je přes vazební kondenzátor tak jak je zobrazeno na Obr. 19 a). Toto zapojení je nejčastěji realizováno použitím zapojení s vývodem průchodky transformátoru, jak je zobrazeno na Obr.22, nebo popř. použitím měřících polepů. [1] [9] [10]



Obr. 23 - Zapojení měření částečných výbojů u transformátorové průchodky – Převzato z [13]

Měřicí zařízení je připojeno k vazebnímu zařízení pomocí koaxiálního kabelu, který poskytuje potřebné stínění, jehož příklad je vyobrazen na Obr. 24. První měření se provede při úrovni 10 % jmenovitého napětí tak, aby byla zjištěna úroveň rušení pozadím. Pokud úroveň rušení nepřesáhne 50 % užitečného signálu, je to považováno, za vyhovující, v opačném případě je potřeba přijmout příslušná opatření. Měření se musí provádět při napěťových hladinách, kdy minimálně jedna musí být pod jmenovitým napětím, dále se jedná o 100 % a 110 % jmenovitého napětí. Na každé napěťové hladině musí být napětí přiváděno minimálně po dobu 5 minut, kdy dochází k sledování a záznamu částečných výbojů na osciloskop. Záznam z osciloskopu je nutný ze všech fází o obou vinutí a v případě vybavení transformátoru odbočkami, se provádí na

jmenovité a krajních odbočkách, pokud se částečné výboje vyskytují v povolených hodnotách. Nejintenzivnější zdroje částečných výbojů se projevují při nejnižších napěťových hladinách měření, a naopak nejvyšší hladiny měření jsou vhodné pro záznam charakteristických vlastností impulzů. [1] [9]



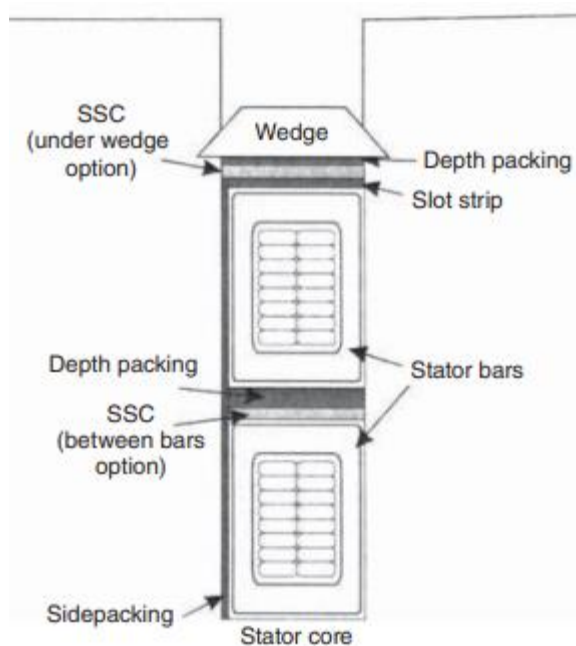
Obr. 24 - Ukázka zapojení vazebního zařízení a vývodu vodiče na průchodce transformátoru –
Převzato z [13]

2.11 Měření částečných výbojů na točivých strojích

Stejně jako v případě měření částečných výbojů u transformátorů je i zde hlavním cílem ověřit kvalitu provedení izolačního systému statorového vinutí točivého stroje a detekovat zhoršující se vlastnosti v důsledku stárnutí izolace. U motorů se provádí jak off-line tak online měření částečných výbojů, které se od sebe liší frekvenčně, kdy šířka pásma u off-line měření je 3 až 30 kHz a v případě online měření 30 až 300 kHz. [5]

System pro online měření částečných výbojů u točivých strojů se skládá z vysokonapěťového kondenzátoru připojeného na svorkách stroje, nebo vysokofrekvenčního proudového transformátoru, který je připojen na neutrální střed vinutí točivého stroje tak, aby bylo zabráněno nízkým frekvencím napájecího napětí, včetně jeho vyšších harmonických, vstoupit do měřicího zařízení pro částečné výboje. V dnešní době je většina měření online prováděná za pomoci připojení vysokonapěťového kondenzátoru v sérii s odporem o velikosti 50 ohmů připojeném na svorkách všech fází vůči zemi. V závislosti na velikosti kapacity kondenzátoru jsou

detekovány pulzy částečných výbojů různých frekvencí. Pro snímání pulzů s frekvencemi nad 40 kHz se volí kapacita 80 pF a pro měření nad 3 MHz se volí kapacita 1000 pF. Jelikož jsou kondenzátory jsou připojeny přímo na svorky motoru s vysokým napětím, tak jsou kladeny vysoké nároky na jejich odolnost, která je obecně vyšší u kondenzátorů s menší kapacitou z důvodu větší tloušťky dielektrika. Kondenzátory s nižší kapacitou mají také větší poměr signálu k šumu a z toho důvodu jsou dnes nejvíce používány. Další formou je online monitoringu je instalace různých antén uvnitř motoru, kdy nejznámější z nich je tzn. kapacitní drážková sonda (SSC z anglického „stator slot coupler“), která se instaluje pod drážkový klín statoru, nebo mezi jednotlivé vinutí statoru, jak je znázorněno na Obr. 25. Kapacitní drážkové sondy se nejčastěji používají u velkých turbínových generátorů chlazených vodíkem. Šířka pásma měřených částečných výbojů je u kapacitní drážkové sondy od 10 do 1000 MHz. [1] [5]

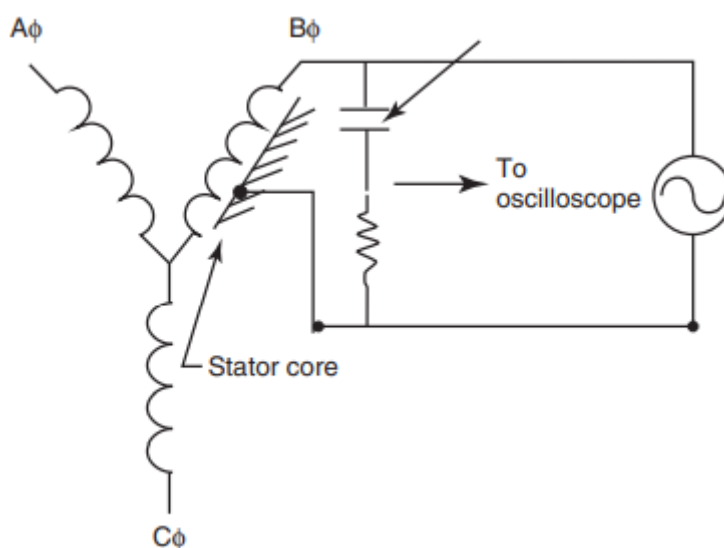


Obr. 25 - Umístění kapacitní drážkové sondy v drážce statorového vinutí stroje – Převzato z [5]

Během měření a jeho vyhodnocování je zapotřebí odlišit signály z částečných výbojů, ke kterým dochází v důsledku výbojové činnosti uvnitř sledovaného točivého stroje, a signály, které přicházejí z napájecí sítě, které jsou způsobeny například korónou z elektrostatických odlučovačů popílků či z vedení, nebo pulzními měniči a počítačovými zdroji atd. Také je zapotřebí brát v potaz podmínky, při kterých byly částečné výboje měřeny a které ovlivňují jejich úroveň. Patří mezi ně napětí na statoru, vlhkost, teplota vinutí zatížení stroje a tlak chladícího vodíku. Též by mělo být

přihlédnuto ke stáří stroje, kdy by mělo být bráno v potaz, že v průběhu prvních 6 měsíců provozu stroje je hladina částečných výbojů vyšší z důvodu dotvrzení epoxidové impregnace izolace až při provozu stroje. [1] [5]

V případě off-line měření částečných výbojů se přivádí střídavé napětí o frekvenci 50 Hz na jeden příslušné vinutí statoru, kde se provádí měření, zatímco svorky ostatních vinutí jsou uzemněné. Měření částečných výbojů se provádí postupným zvyšováním přiloženého napětí až do úrovně, kdy je zaznamenána první výbojová činnost a toto zapalovací napětí je zaznamenáno. Následně je napětí zvýšeno na předepsanou hodnotu a po uplynutí 10 až 15 minut a až poté je možné měřit částečné výboje. Následně je napětí opět sníženo až na úroveň kdy částečné výboje ustanu a toto zhášení napětí je opět zaznamenáno. Napětí se zvyšuje a snižuje buďto ve skocích o velikosti 20 % předepsané hodnoty v intervalech o velikosti 10 sekund, nebo plynule. Z hlediska kvality provedení izolace je žádoucí, aby byly hodnoty jak zapalovacího, tak zhášecího napětí co největší a při opakovaném měření je žádoucí jejich co nejmenší pokles, který indikuje degradaci izolace. Samotné zapojení měření je obdobné jako už u dříve popsáního měření online a je zobrazeno na Obr. 26. [5] [17]



Obr. 26 - Zapojení pro off-line měření částečných výbojů na statorovém vinutí – Převzato z [5]

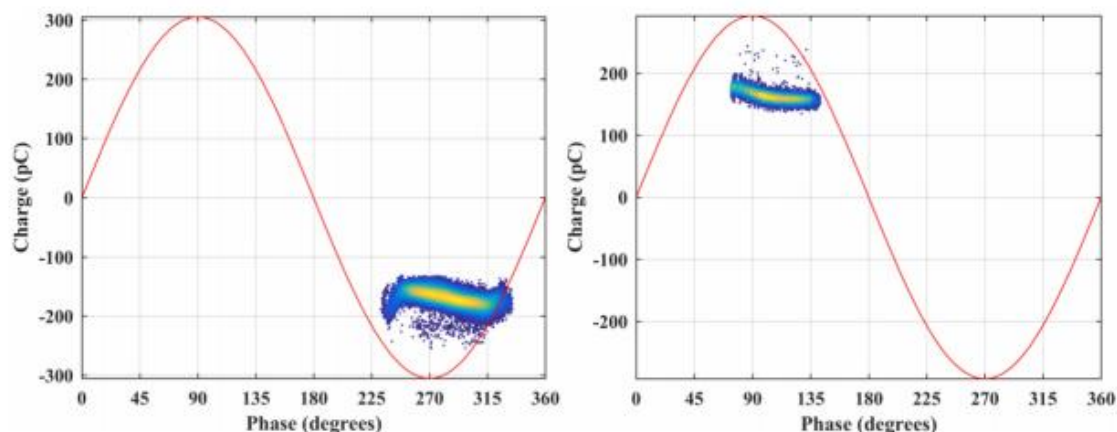
3 Charakteristické závady a jejich identifikace měřením částečných výbojů

Narozdíl od jiných diagnostických metod, jako je např. Měření izolačního odporu, má diagnostika pomocí měření částečných výbojů tu výhodu, že lze z naměřených hodnot a jejich vyobrazení pomocí diagramů a oscilogramů odhadnout, o jaký druh poruchy se jedná, v jakém počtu se vyskytuje a ve výsledku kde se v daném diagnostikovaném objektu nachází a o jak závažnou závadu se jedná. Elektrické metody měření částečný výbojů, které jsou založeny na měření proudových pulzů, jsou vhodné zvláště při využití v provozech, kde detekce pomocí akustických metod a metod založených na měření elektromagnetických emisí částečných výbojů nejsou možné z důvodu vysoké hladiny okolního rušení. Jejich využití, především v rámci online monitoringu, společně se specifikací a přibližnou lokalizací poruch je cenným zdrojem informací pro provádění údržby daného zařízení. [9] [14]

Nejčastěji vyskytující se částečné výboje u elektrických strojů jsou dvojího druhu, buď se jedná o výboje korónové, nebo výboje vnitřní. [11]

3.1 Projevy korónového výboje

Jak již bylo dříve popsáno, korónový výboj se vyskytuje na rozhraní vodič/vzduch v oblast ostrých hran, nebo elektrod s malým poloměrem zakřivení. Výbojová činnost se vyskytuje v oblasti vrcholových hodnot sinusového průběhu střídavého napětí. Z důvodu již dříve zmíněné přítomnosti polarizačního efektu se částečné výboje vyskytují na záporné půlčluně v případě, že ostrá, hrotová část je přítomna na elektrodě. Takovémuto výboji říkáme pozitivní koróna a je znázorněna na Obr. 27 v levé části. Naopak, pokud je ostrá hrana s korónovým výbojem naopak na části uzemněné, je přítomnost těchto výbojů zaznamenána v okolí záporného vrcholu půlčluně napětí, nazývaný negativní koróna s příkladem na Obr. 27 v pravé části. Korónové výboje jsou také charakteristické svou konstantní amplitudou. [3] [16]

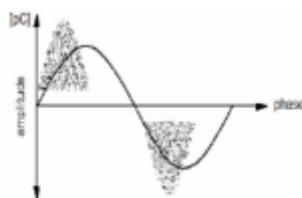


Obr. 27 - φ - q - n diagram kladného (vlevo) a záporného (vpravo) korónového výboje - Převzato z [15]

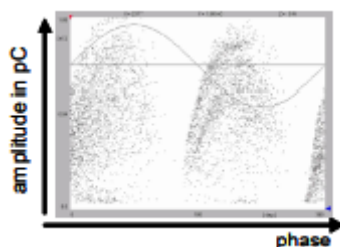
3.2 Projevy vnitřních a povrchových částečných výbojů

Vznik vnitřních částečných výbojů v rámci dielektrika je značně ovlivněn na tvaru, druhu a pozici daného defektu vůči elektrodám. Z tohoto důvodu se vnitřní částečné výboje rozdělují na několik druhů, které lze od sebe svými charakteristickými projevy odlišit. [11]

První z nich je částečný výboj vznikající v nevodivé dutině (popř. dutinách), která nemá přímý kontakt s elektrodou. Takovéto defekty můžeme rozpoznat výbojovou činností v oblasti narůstajícího napětí, a to jak v kladné, tak i záporné půlčísle, jak je znázorněno na Obr. 28 a hodnota zdánlivého náboje těchto impulzů sleduje křivku napětí. Tvar těchto defektů může být různý, stejně jako jejich prostorová orientace, proto i jednotlivé diagramy se od sebe mohou lišit, přičemž v některých případech je možné rozeznat množství jednotlivých a vzájemně oddělených defektů. [11] [16]

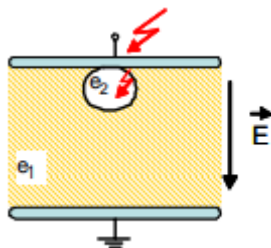


Obr. 28 - Typická oblast výskytu částečných výbojů u dutiny bez kontaktu s elektrodou – Převzato z [11]

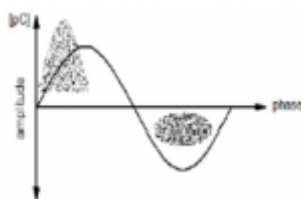


Obr. 29 - Příklad φ - q - n diagramu vnitřní výbojové činnosti dutiny bez kontaktu s elektrodou – Převzato z [11]

V případě, že daná dutina v kontaktu s elektrodou dle Obr. 30. je zde výrazný rozdíl mezi jednotlivými polaritami v závislosti, zda se dutina nachází u elektrody, nebo u uzemněné část. V případě, že se nachází u elektrody, je výbojová činnost intenzivnější v kladné půlvině (viz. Obr. 31), v případě, že se nachází u uzemněné části, je tomu naopak. [3] [11]



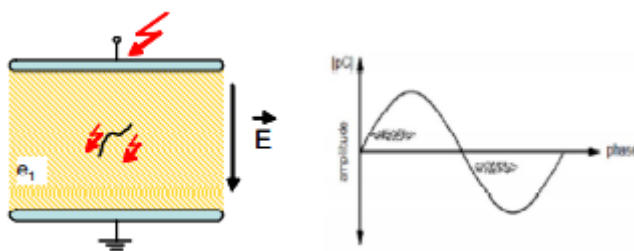
Obr. 30 - Dutina v dielektriku v kontaktu s elektrodou – Převzato z [11]



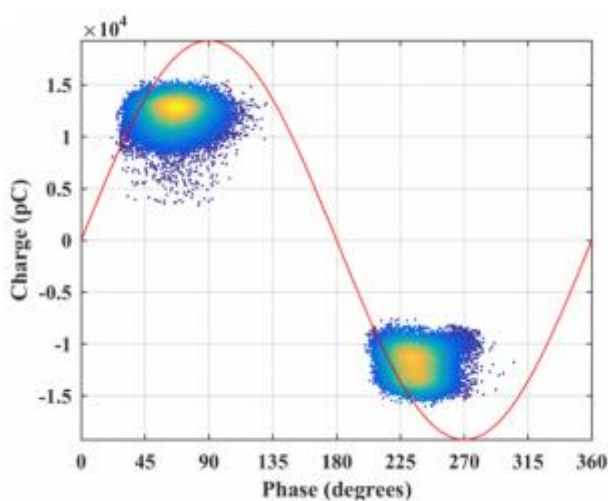
Obr. 31 - Typická oblast výskytu částečných výbojů u dutiny v kontaktu s elektrodou – Převzato z [11]

V dielektriku však nemusí být defekty pouze ve formě nevodivých dutinek, ale naopak v podobě přítomnosti vodivého materiálu v dielektriku, jak je znázorněno na Obr. 32 vlevo. V případě, že vodivý materiál není v přímém spojení s jednou z elektrod se jedná obdobně jako u dutiny o výskyt částečných impulzů v části nárůstu napětí pro obě dvě polarity. Na rozdíl od dutin zde však není v počátku nárůstu napětí patrný trend nárůstu zdánlivého náboje částečných výbojů a na diagramu se vytváří více kompaktní

shluk výskytu částečných výbojů, které na rozdíl od dutin nesledují křivku napětí. [11] [15] [16]

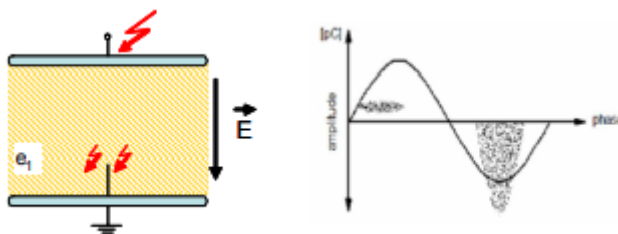


Obr. 32 - Vodivý materiál v dielektriku bez kontaktu s elektrodou a typická oblast výskytu částečných výbojů na ϕ - q - n diagramu – Převzato z [11]



Obr. 33 - Příklad ϕ - q - n diagramu vodivého materiálu v dielektriku bez kontaktu s elektrodou – Převzato z [15]

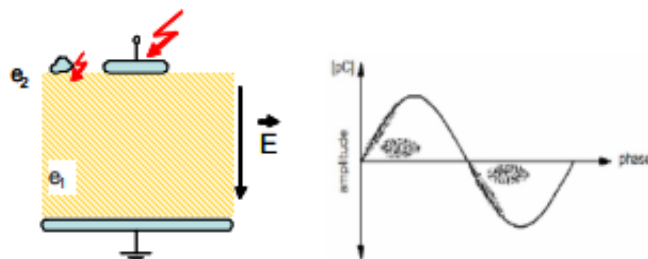
Obdobně jako u dutiny v kontaktu s jednou z elektrod, se i vodivý materiál v dielektriku spojený s elektrodou projevuje asymetrií mezi půlvlnami opačné napěťové polarity dle Obr. 34 vpravo. [11]



Obr. 34 - Vodivý materiál v dielektriku v kontaktu s elektrodou a typická oblast výskytu částečných výbojů na ϕ - q - n diagramu – Převzato z [11]

Poslední významným druhem výbojové činnosti je povrchový výboj. Ten vzniká, když je povrch izolantu kontaminován vodivým materiálem, jako je např. kovová částice

znázorněna na Obr. 35 vlevo. Také k němu ale může dojít i uvnitř dielektrika, kde je přítomna dutina s vodivým povrchem. Povrchové výboje se vyskytují v oblasti nárůstu napětí v kladné a záporné půlce průběhu střídavého napětí, jak je znázorněno na Obr. 35 vpravo. [9] [11]

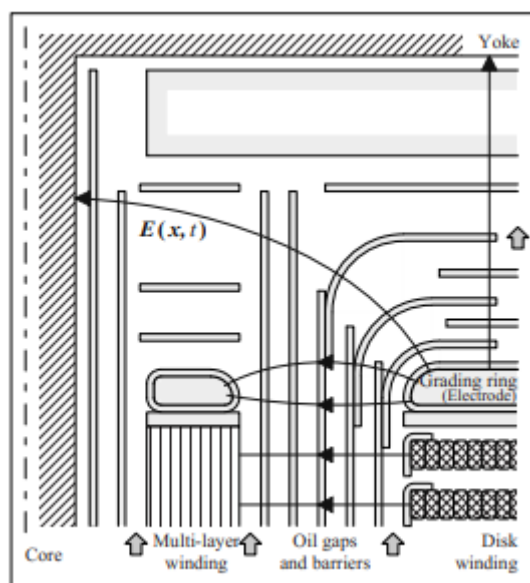


Obr. 35 – Povrch dielektrika znečištěný vodivým materiálem a typická oblast výskytu částečných výbojů na φ - q -n diagramu – Převzato z [11]

4 Nejčastější závady u transformátorů

K výskytu částečných výbojů v rámci transformátoru dochází v oblastech, kde je zeslabená izolace, a to buď v důsledku špatného návrhu, znečištění, chybě při výrobním procesu, poškozením při přepravě a instalaci zařízení, přirozeným opotřebením v důsledku provozu, nebo poškozením při zkouškách impulzním napětím. [9] [11] [13]

Mezi hlavní části, ze kterých se skládá transformátor patří jádro, izolační systém, a vinutí. Vinutí je nejčastěji měděné diskového typu na vysokonapěťové straně a vícevrstvého na straně nízkonapěťové. Izolační systém je tvořen nejčastěji celulózou a olejem. Pro izolaci vinutí a jeho vývodům se používá izolační papír a izolaci mezi primárním a sekundárním vinutím zajišťují desky z vrstveného dřeva nebo lepenky viz. Obr. 36. [3] [11]



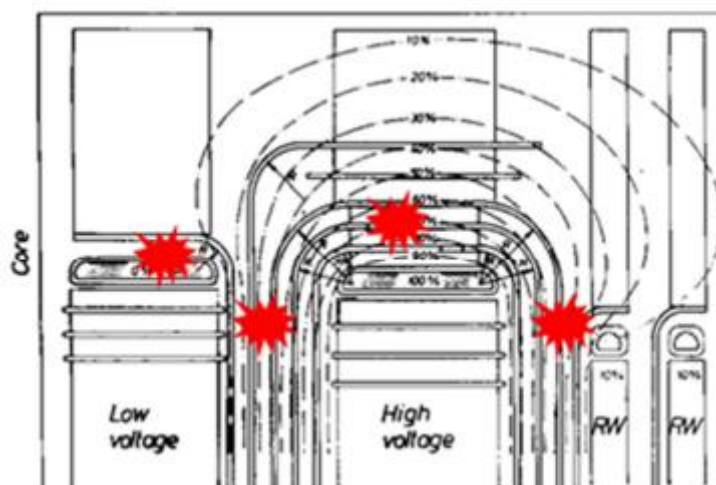
Obr. 36 - Namáhání dielektrického systému na horního konce vinutí vysokého napětí – Převzato z [3]

Izolace mezi primárním a sekundárním vinutím tvořená z lepenky, nebo vrstveného dřeva je během výroby často kontaminována vodivými částicemi bez kontaktu s elektrodou s příslušnými diagramy částečných výbojů. V místech, kde je u této izolace použito lepidlo můžou být v rámci tohoto lepidla přítomny dutiny a dochází k charakteristické výbojové činnosti pro dutiny, které jsou, nebo nejsou v kontaktu s elektrodou. [11]

Částečné výboje způsobené vodivou částicí v kontaktu s elektrodou jsou způsobeny přítomností nehomogenit a výstupků na okrajích jednotlivých plechů tvořící

jádro transformátoru způsobených při jejich řezání. Jejich přítomnost také může být způsobena defekty na vinutí transformátoru jako je např. jeho nepravidelný poloměr. [11]

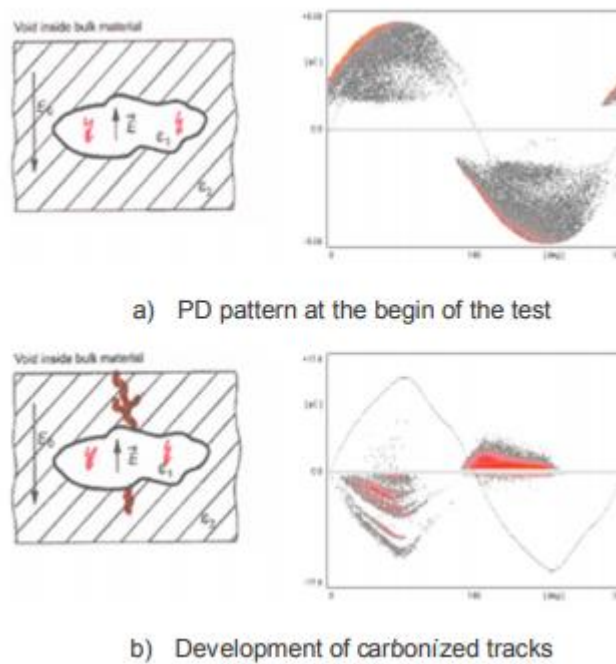
V případě přítomnosti bublin v izolačním oleji jsou pozorovány částečné výboje charakteristické pro dutiny bez kontaktu s elektrodou. Ty je však nemožné rozlišit od částečných výbojů z dutin v rámci pevné izolace, proto je nutné sledovat jejich výskyt v průběhu času. Pokud se jedná o částečné výboje v rámci plyných bublin v oleji, po ohřátí transformátoru a tím způsobené následné cirkulaci oleje dochází obvykle k jejich vymizení. Povrchový výboj je zase přítomen v oblasti, kde je přítomnost vodivé částice na povrchu izolace, nebo v oblastech, kde je izolační materiál v kontaktu s dalšími distančními elementy a transformátorovým olejem. Nejčastější místa výskytu částečných výbojů jsou znázorněna na Obr. 37. [3] [11]



Obr. 37 - Místa častého výskytu částečných výbojů v transformátoru - Převzato z [11]

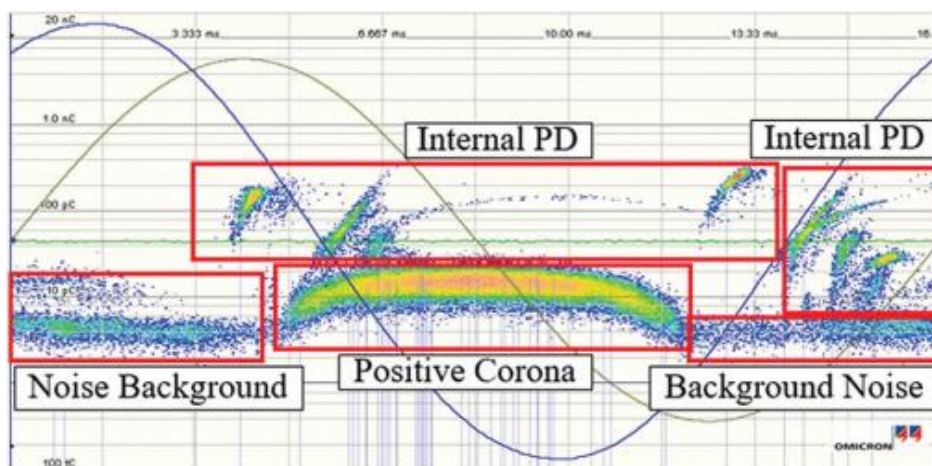
Některé defekty způsobující částečné výboje se mohou projevit až po ostatních zkouškách transformátoru, jako je např. zkouška atmosférickým impulzem, nebo při jeho provozu. Z důvodu první jmenované příčiny je nutné provádět měření částečných výbojů až po provedení příslušných zkoušek, aby bylo ověřeno splnění požadovaných parametrů při uvedení zařízení do provozu. Nejčastěji se jedná o vznik bublin v důsledku dielektrických ztrát a přítomnosti vlhkosti. Přítomnost výbojů také v dlouhodobějším účinky na pevnou izolaci v podobě její karbonizace, která může mít až za následek průraz dielektrika a destrukci zařízení. Karbonizace dielektrika má vliv na podobu ϕ - q - n diagramů, kdy z původního diagramu odpovídajícímu dutině v dielektriku bez kontaktu s elektrodou, znázorněného na Obr. 38 a), může vlivem karbonizace dojít až k spojení s jednou z elektrod a následně i změně obrazců diagramu, které následně odpovídají

vodivému materiálu v dielektriku v kontaktu s jednou z elektrod, znázorněno na Obr. 38 b). [11]



Obr. 38 - Dutina v prvním dielektriku a příslušný ϕ -q-n diagram před karbonizací a) a po vzniku karbonizačních cest b) - Převzato z [11]

Výsledkem měření částečných výbojů může být například ϕ -q-n diagram znázorněný na Obr. 39, kde je přítomna jak kladná koróna, tak i vnitřní částečné výboje.

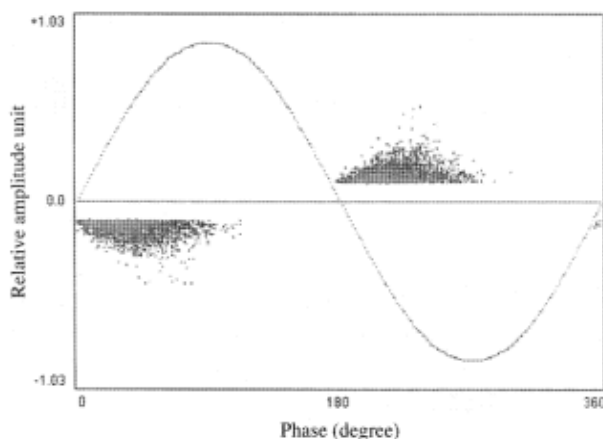


Obr. 39 - ϕ -q-n diagram s několika druhy částečných výbojů – Převzato z [16]

5 Nejčastější závady u točivých strojů

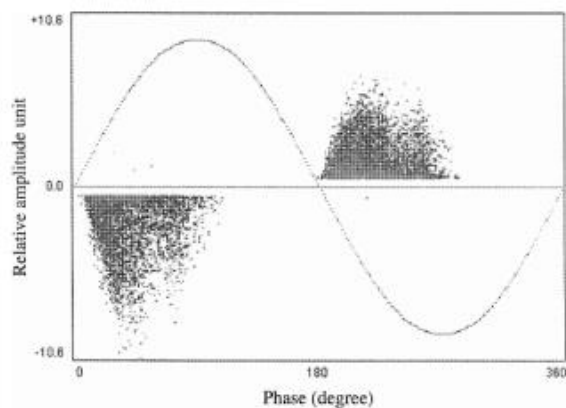
K částečným výbojům u točivých strojů dochází hlavně statorových vinutích v důsledku dutin v rámci izolace u vnitřních výbojů, důsledku znečištění a vlhkosti v případě povrchových výbojů, které se vyskytují mezi vinutím a ostatními částmi zařízení nebo na čelech vinutí. [20] [21]

Vnitřní částečné výboje se vyskytují v rámci dutin izolačního systému a jejich charakteristický ϕ - q - n diagram je stejný jako u výbojů v transformátorech s výskytem výbojové činnosti tvaru obloučku v oblasti narůstajícího napětí jak v kladné, tak záporné půlvině střídavého napětí viz. Obr 40. Přítomnost těchto výbojů je způsobena nedokonalým procesem výroby a za normálních okolností neindikují a nevedou k stárnutí a degradaci izolace. [18] [19]



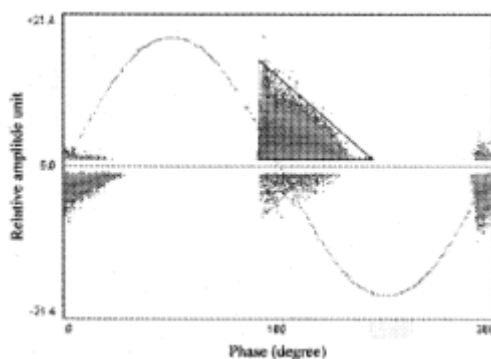
Obr. 40 - ϕ - q - n diagram vnitřních částečných výbojů točivého stroje - Převzato z [19]

Další druh částečných výbojů je spojen s vnitřní delaminací způsobenou podélně protaženými kapsami vzduchu mezi vrstvami izolace, nebo mezi izolací a vodičem. Diagram ϕ - q - n je podobný diagramu u vnitřní výbojové činnosti s tím rozdílem, že jeho tvar je méně zaoblený s větším lineárním vzrůstem výbojové činnosti v oblasti průchodu nulou zkušebního napětí. V případě, že se jedná o delaminaci mezi vodičem a izolací, je výsledný obrazec nesymetrický, znázorněno na Obr. 41. Naopak symetrický obrazec můžeme pozorovat u delaminace mezi vrstvami uvnitř izolace. K delaminaci izolace nejčastěji dochází v důsledku mechanického namáhání, nebo vysokých teplot. [18] [19]



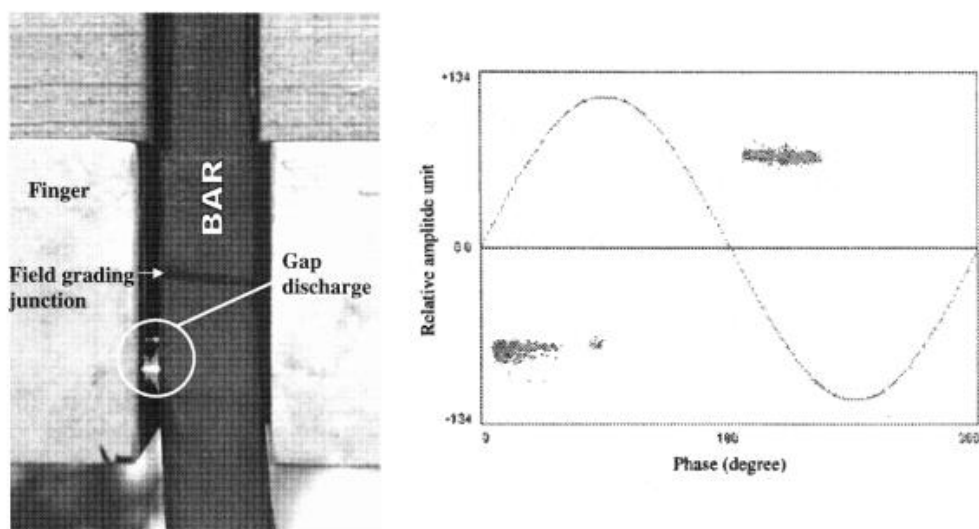
Obr. 41 φ -q-n diagram částečných výbojů točivého stroje způsobených delaminací izolace – Převzato z [19]

K částečným výbojům také dochází v drážkách vinutí statoru v případě, že dojde ke ztrátě kontaktu drážky jádra statoru a povlakem vodiče a vytvoření vzduchové kapsy, např. obroušení způsobené jejich vibrací v důsledku jejich uvolnění. Příslušný diagram φ -q-n je znázorněn na Obr. 42 a je charakteristický svou nesymetrií ve prospěch kladných výbojů během záporné půlperrody zkušebního střídavého napětí se svým trojúhelníkovým tvarem. [17] [18] [19]



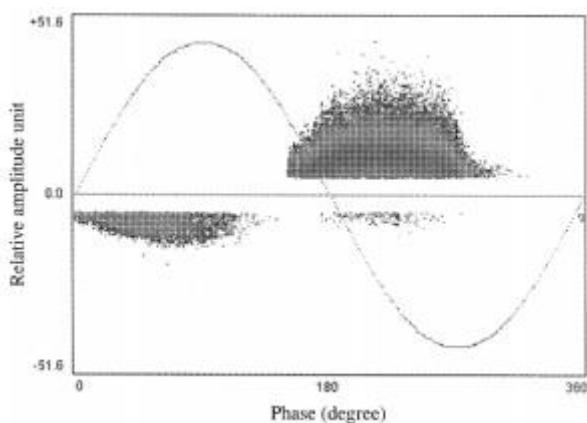
Obr. 42- φ -q-n diagram drážkových částečných výbojů točivého stroje – Převzato z [19]

Částečné výboje se taky vyskytují v mezerách, a to buď mezi samotným dvěma tyčemi, nebo mezi tyčí a tlačným čepem jádra statoru. Diagram φ -q-n je zde specifickým přítomností výbojů v obou polaritách při nárůstu napětí, které vytvářejí na obrazci vodorovný oblak. Charakteristický diagram a znázornění výbojové činnosti v mezeře jsou znázorněny na Obr. 43. [18] [19]



Obr. 43 - Částečný výboj v mezeře a charakteristický φ -q-n diagram – Převzato z [19]

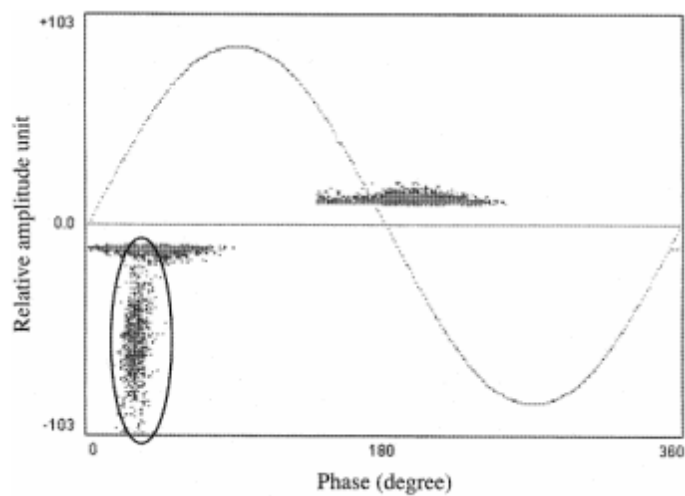
K částečným výbojům dochází také v čelech vinutí. Jedním z nich je koronová aktivita na přechodu drážky a vodiče, kde vzniká v důsledku lokálního vysokého gradientu pole. Koronový výboje jsou charakteristické svými diagramy na Obr. 44 s nesymetrií ve prospěch počtu (a někdy i amplitudě) kladných pulzů v záporné půlplně střídavého napětí a vedou k velkému elektrickému namáhání a opotřebení povlaku vodiče. [18] [19]



Obr. 44 – Diagram koronového výboje v čele vinutí točivého stroje – Převzato z [19]

Kromě korony se na čelech vinutí mohou vyskytovat povrchové částečné výboje v důsledku znečištění prachem, či jinými nečistotami na rozhraní izolace a vzduchu. Výbojový činnost má na obrazci φ -q-n diagramu tvar vertikálního shluku výbojů negativní polaritě s velkou amplitudou v oblasti 30° fázového úhlu střídavého napětí zvýrazněný na Obr. 45. V některých případech lze pozorovat i v opačné polaritě při 210° fázového úhlu. Výskyty povrchových částečných výbojů jsou závislé na faktorech jako

je vlhkost, teplota a znečištění čel vinutí, a proto jejich výskyt není trvalého charakteru jako v případě korony. [18] [19]



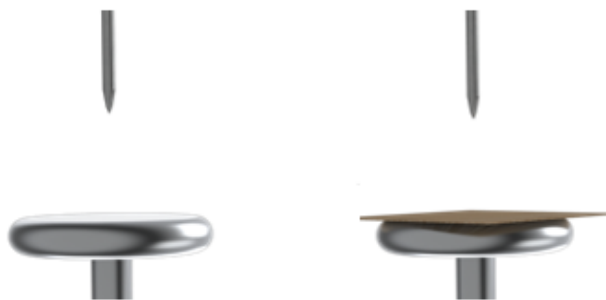
Obr. 45 – Diagram povrchového výboje v čele vinutí točivého stroje – Převzato z [19]

6 Analýza dat částečných výbojů modelových uspořádání

Poslední část diplomové práce se zabývá analýzou poskytnutých dat částečných výbojů, které nahrazují původní experimentální laboratorní měření neuskutečněné z důvodu vládní proti epidemiologických opatření. Analýze budou podrobena data měřená na sestavě hrot-deska s a bez desky polymethylmethakrylátu (PMMA) s výskytem korónového výboje různé intenzity a také povrchového klouzavého výboje. Data budou analyzována z hlediska doby čela a sestupné hrany impulzu částečného výboje a také jeho amplitudy.

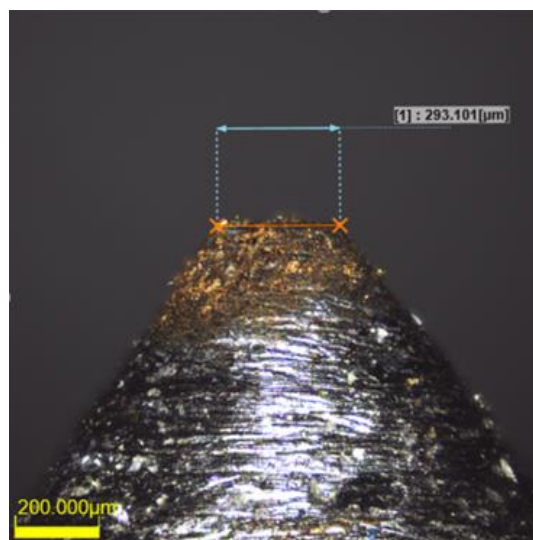
6.1 Experiment a měřicí sestava

Měření částečných výbojů bylo prováděno na sestavě hrot-deska, které byly od sebe odděleny 10 mm vzduchovou mezerou. Při některých měřeních byla na desku umístěna izolační bariéra z polymethylmethakrylátu (PMMA), který je také běžně veřejnosti znám pod pojmem plexisklo, o tloušťce 2 mm jehož relativní permitivita ϵ_r se pohybovala okolo hodnoty 3. Sestava hrot-deska bez a s izolační bariérou je znázorněna na Obr. 46. [24] [25]



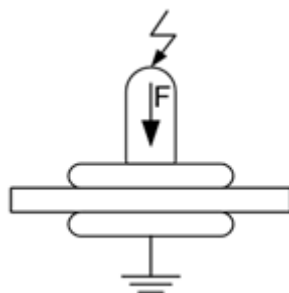
Obr. 46 - Měřená sestava hrot-deska bez (vlevo) a s (vpravo) izolační PMMA bariérou –
Převzato z [25]

Hrot má kuželovitý tvar s nedokonalou špičkou na jejímž vrcholu se nachází ploška o průměru 0,29 mm znázorněná na Obr. 47. [25]



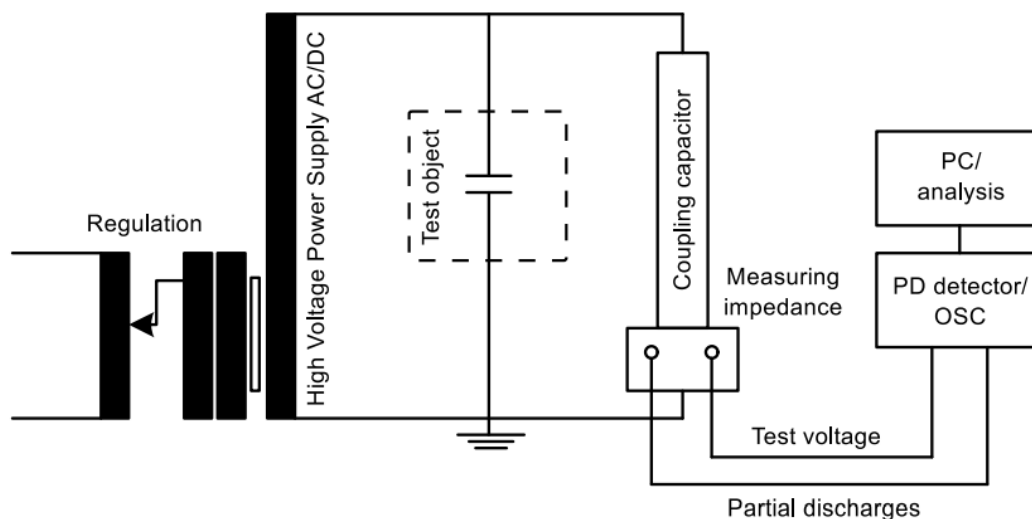
Obr. 47- Snímek vrcholu hrotu – Převzato z [25]

V případě sestavy pro měření povrchových klouzavých výbojů je zapojení dle Obr. 48 se stejnou izolační bariérou z polymethylmethakrylátu jako v předchozím případě pro oddělení obou plochých elektrod.



Obr. 48 – Deskové uspořádání pro měření klouzavého výboje

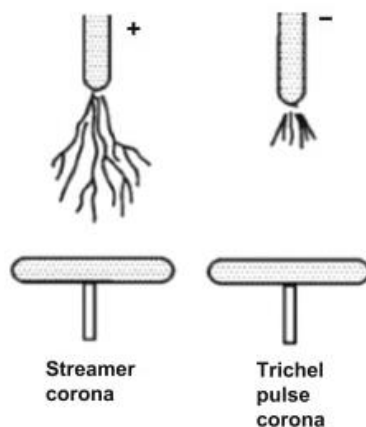
Měřicí obvod byl použit standardizovaný obvod pro měření částečných výbojů dle normy ČSN EN 60270 v paralelním zapojení s vazebním kondenzátorem znázorněného na Obr. 49. Vazební kapacita má velikost $1000 \text{ pF} \pm 10 \%$ a je schopen vyvinout vrcholové napětí až 200 kV v případě AC a až 135 kV v případě DC. [10] [24]



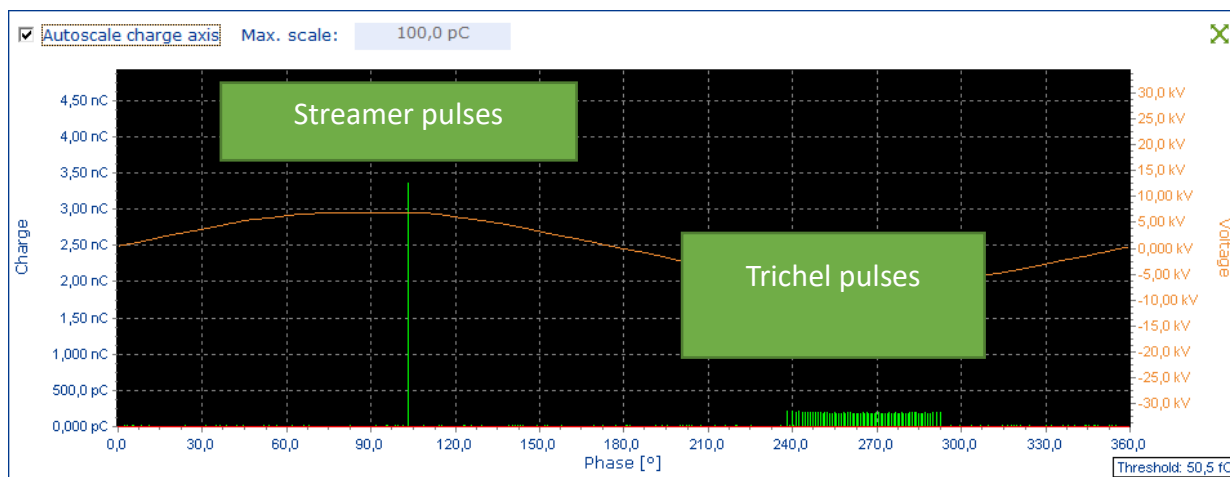
Obr. 49 - Schéma použitého měřícího obvodu – Převzato z [24]

Měřicí impedance byla navržena pro daný experiment tak, aby měřený tvar impulzu maximálně odpovídal realitě a měl správnou délku sestupné hrany. Měřicí impedance je schopná měřit vstupní signály o frekvenčním rozsahu 140 kHz až 300 kHz s útlumem do 6 dB. [24] [25]

Měření bylo prováděno střídavým napětím na všech tří sestavách zvlášť pro obě polarity z důvodu přítomnosti různé výbojové činnosti. V případě kladné půlvlny dochází k vzniku streamerové koróny (viz. Obr 50 vlevo), která se projevuje jedním pulzem o vysoké amplitudě. Naopak u záporné půlvlny se jedná o trichel korónu (viz. Obr. 50 vpravo) v podobě většího množství pulzů malé amplitudy. Příklad záznamů zdánlivých nábojů vůči fázi streamer a trichel koróny jsou vyobrazeny na Obr. 51. Vrcholové hodnoty zkušební napětí jsou uvedeny v Tab. 4. [24] [27]



Obr. 50 - Streamer (vlevo) a trichel (vpravo) koróna – Převzato z [27]



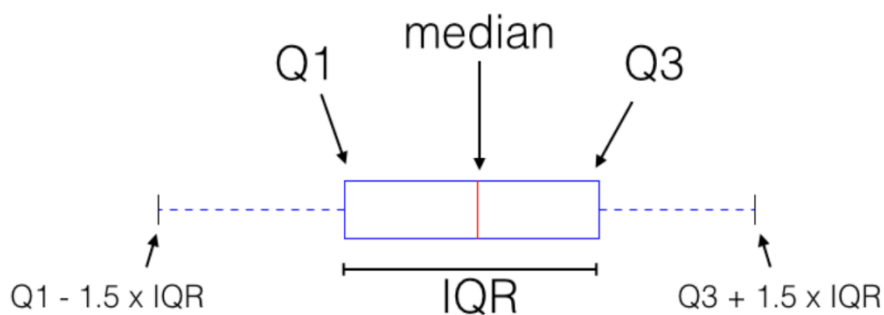
Obr. 51 - Záznam zdánlivých nábojů streamer a trichel koróny – Převzato z [25]

Tab. 4 - Tabulka vrcholových hodnot zkušebního napětí pro jednotlivá měření

Měřená sestava	Druh výboje	Zkušební napětí (kV _{peak})
Hrot – deska	Koróna – trichel	6,36
Hrot – deska	Koróna – Streamer	6,83
Hrot – deska + PMMA	Koróna – Trichel	6,36
Hrot – deska + PMMA	Koróna – Streamer	6,36
Deskové uspořádání – klouzavý výboj	Povrchový (kladná polarita)	4,67
Deskové uspořádání – klouzavý výboj	Povrchový (záporná polarita)	4,67

6.2 Zpracování a vyhodnocení dat

Při samotném měření bylo změřeno minimálně 1000 impulzů. Ty se následně statisticky očistí od extrémních hodnot. Z dat je odstraněn dolní kvartil Q1 (spodních 25 % hodnot) hodnot a horní kvartil Q3 (horních 25 % hodnot). Následně je mezikvartilový rozsah IQR obsahující prostředních 50 % hodnot vynásoben číslem 1,5 a přičten k hodnotě Q3 čímž je získaná horní mez a obdobným odečtením od Q1 dolní mez od kterých nejsou data započítávána. Uprostřed mezikvartilového rozsahu Q1 až Q3 se nachází medián. Takto popsany boxplot je znázorněn na Obr. 52. [24] [25] [26]



Obr. 52 - Znárodnění boxplot se znárodněnými mezemi IQR 1,5 - Převzato z [25]

Následně byly podle tohoto postupu vypočteny hodnoty pro jednotlivé sestavy a měření. V některých případech vyšla hodnota $Q1 - 1.5 \times IQR$ menší jak nula, v těchto případech byla nahrazeny nejmenší nenulovou hodnotou.

Tab. 5 - Hodnoty pro boxplot sestavy hrot-deska koróna trichel

Koróna – Trichel			
	Doba čela (ns)	Doba sestupné hrany (ns)	Amplituda (mV)
$Q1 - 1.5 \times IQR$	94,3	7	170
Q1	98,8	794	212
Medián	100,2	903	224
Q3	101,9	1590	240
$Q3 + 1.5 \times IQR$	106,4	2790	282

Tab. 6 - Hodnoty pro boxplot sestavy hrot-deska koróna streamer

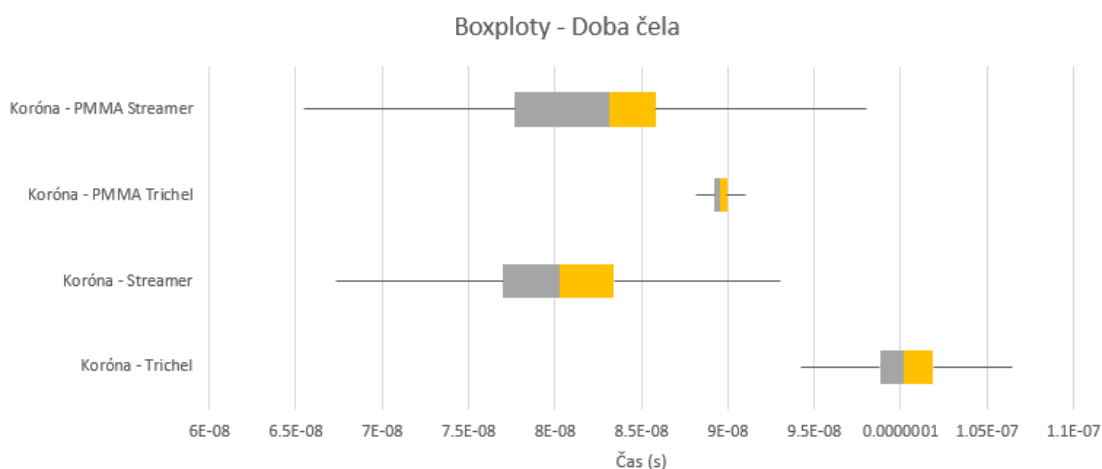
Koróna – Streamer			
	Doba čela (ns)	Doba sestupné hrany (ns)	Amplituda (V)
$Q1 - 1.5 \times IQR$	67,4	713	1.89
Q1	77	816	1.92
Medián	80,2	848	1.92
Q3	83,4	886	1.94
$Q3 + 1.5 \times IQR$	93	989	1.97

Tab. 7 - Hodnoty pro boxplot sestavy hrot-deska + PMMA koróna streamer

Koróna – PMMA Trichel			
	Doba čela (ns)	Doba sestupné hrany (ns)	Amplituda (mV)
$Q1 - 1.5 \times IQR$	88,1	662	173
Q1	89,2	691	182
Medián	89,6	695	186
Q3	89,9	710	188
$Q3 + 1.5 \times IQR$	91	739	197

Tab. 8 - Hodnoty pro boxplot sestavy hrot-deska + PMMA koróna streamer

Koróna – PMMA Streamer			
	Doba čela (ns)	Doba sestupné hrany (ns)	Amplituda (V)
Q1 – 1.5 x IQR	65,5	736	1.84
Q1	77,7	787	1.9
Medián	83,1	803	1.9
Q3	85,8	821	1.9
Q3 + 1.5 x IQR	98	872	1.96



Obr. 53 - Boxploty pro dobu čela pro korónové výboje

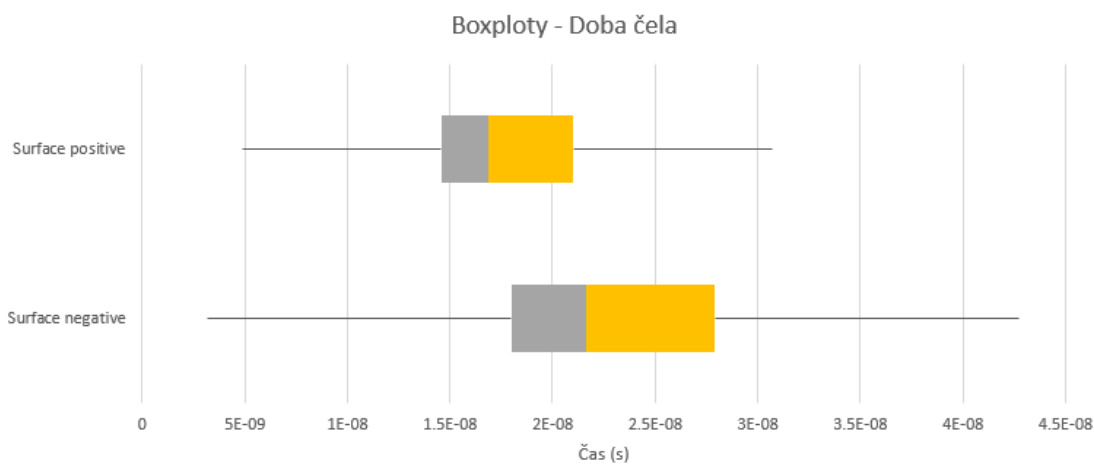
Jak je z tabulek 5,6,7 a 8 a znázorněných boxplotů na Obr. 53 je medián doby čela u streamerové koróny kratší než v případě výbojů typu trichel. Stejně tak je vidět značný časových rozdíl v rozsazích v jakých je doba čela pozorována. V případě výbojové činnosti typu trichel jsou hodnoty doby čela více koncentrovány v oblasti mediánu oproti streamerové koróně. Doba sestupné hrany je ve všech případech přibližně desetinásobná oproti době čela stejně tak jako je přibližně desetinásobná amplitudě pulzu v případě výbojové činnosti typu streamer oproti typu trichel.

Tab. 9 - Hodnoty pro boxplot sestavy klouzavého výboje – záporná polarita

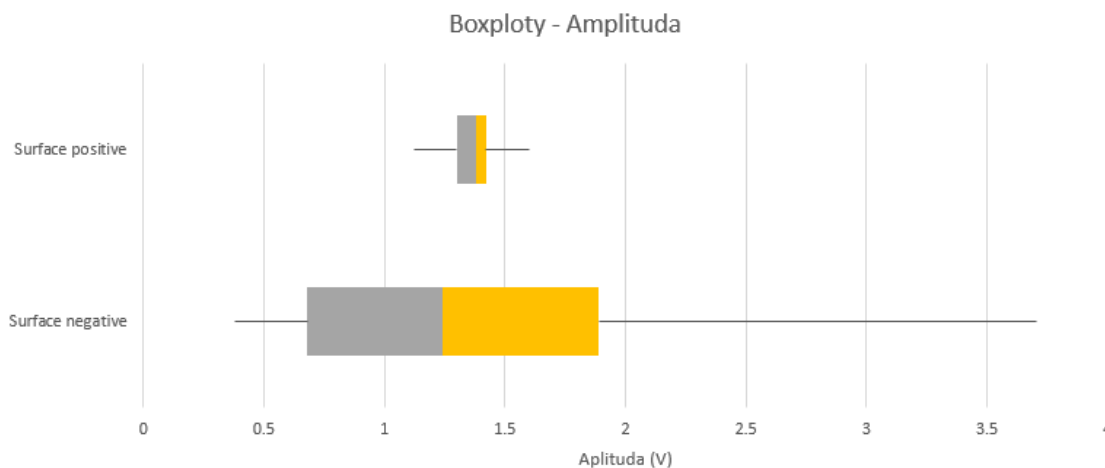
Surface positive		
	Doba čela (ns)	Amplituda (v)
Q1 – 1.5 x IQR	4.9	1.12
Q1	14.6	1.3
Medián	16.9	1.38
Q3	21	1.42
Q3 + 1.5 x IQR	30.7	1.6

Tab. 10 - Hodnoty pro boxplot sestavy klouzavého výboje – záporná polarita

Surface negative		
	Doba čela (ns)	Amplituda (v)
Q1 – 1.5 x IQR	3.2	0.38
Q1	18	0.68
Medián	21.6	1.24
Q3	27.9	1.89
Q3 + 1.5 x IQR	42.7	3.705



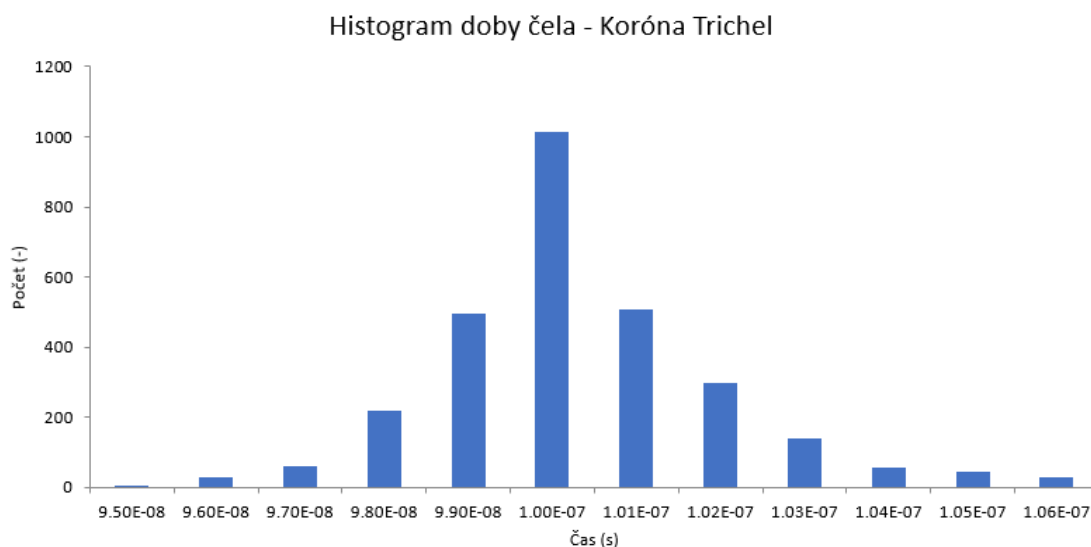
Obr. 54 - Boxploty pro dobu čela klouzavých výbojů



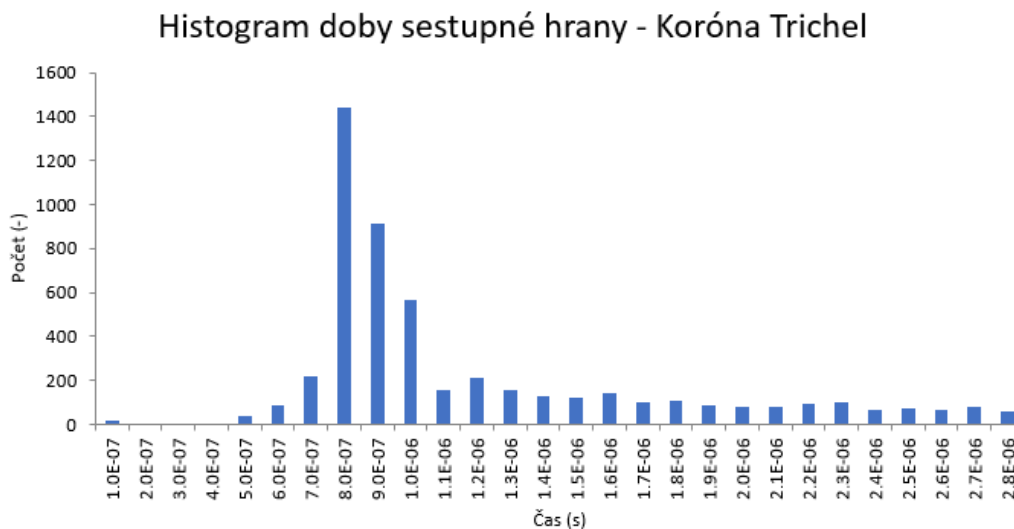
Obr. 55 - Boxploty pro amplitudu klouzavých výbojů

Měření povrchových klouzavých výbojů bylo prováděno bez zaznamenávání doby sestupné hrany. I v tomto případě je rozdíl mezi měřeními pro rozdílné polarity. Výbojová činnost v kladné půlvině měla kratší dobu čela a větší amplitudu impulzu než výbojová činnost v půlvině záporné. Také distribuce hodnot obou sledovaných parametrů byla u kladného napětí více koncentrovaná v okolí mediánu, než tomu bylo u napětí záporného.

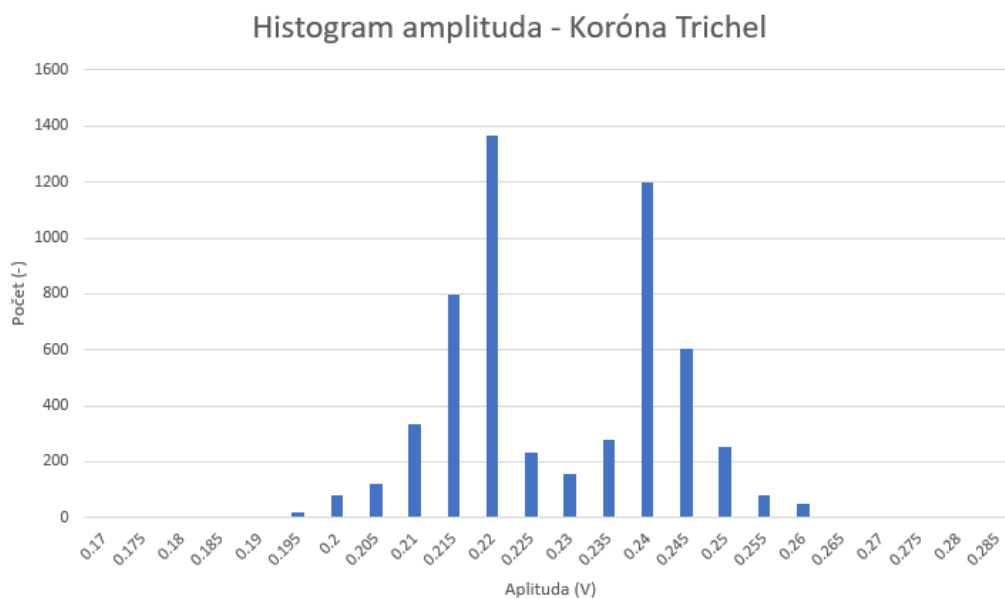
Na základě dat očištěných byly vytvořeny histogramy pro dobu čela, amplitudu a dobu sestupné hrany (s výjimkou povrchových klouzavých výbojů).



Obr. 56 - Histogram doby čela impulzů sestavy hrot-deska s korónovým výbojem typu trichel

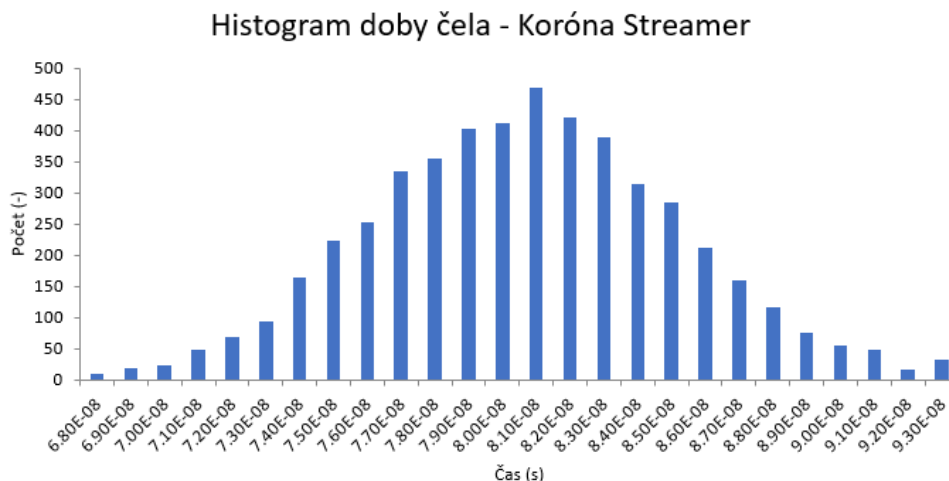


Obr. 57 - Histogram doby sestupné hrany impulzů sestavy hrot-deska s korónovým výbojem typu trichel

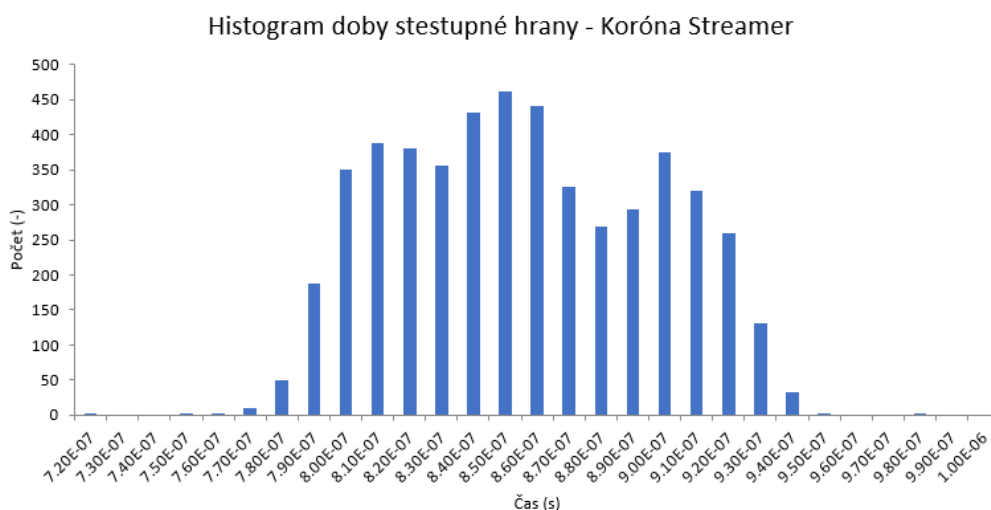


Obr. 58 - Histogram amplitudy impulzů sestavy hrot-deska s korónovým výbojem typu trichel

U korónového výboje typu trichel lze u doby čela pozorovat na úzký histogram zvonovitého tvaru s výrazným vrcholem v oblasti mediánu. V případě sestupné hrany na je histogram asymetrický s pozitivní šikmostí a vrcholem před samotným mediánem. Histogram amplitudy na je překvapivě dvouvrcholový s mediánem nacházejícím se mezi vrcholy. [28]

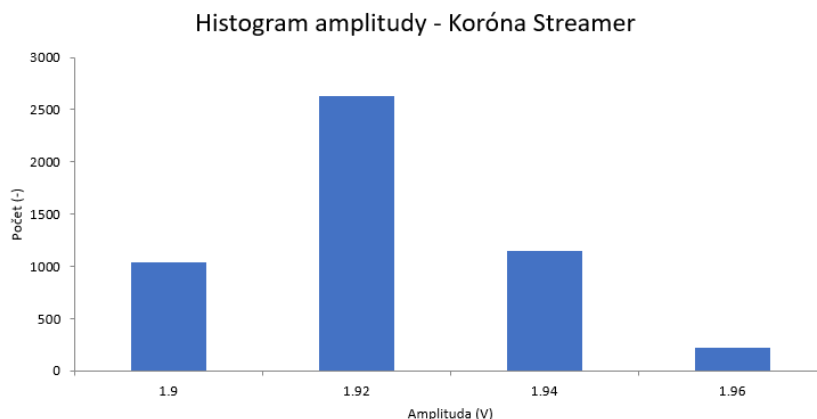


Obr. 59 - Histogram doby čela impulzů sestavy hrot-deska s korónovým výbojem typu streamer

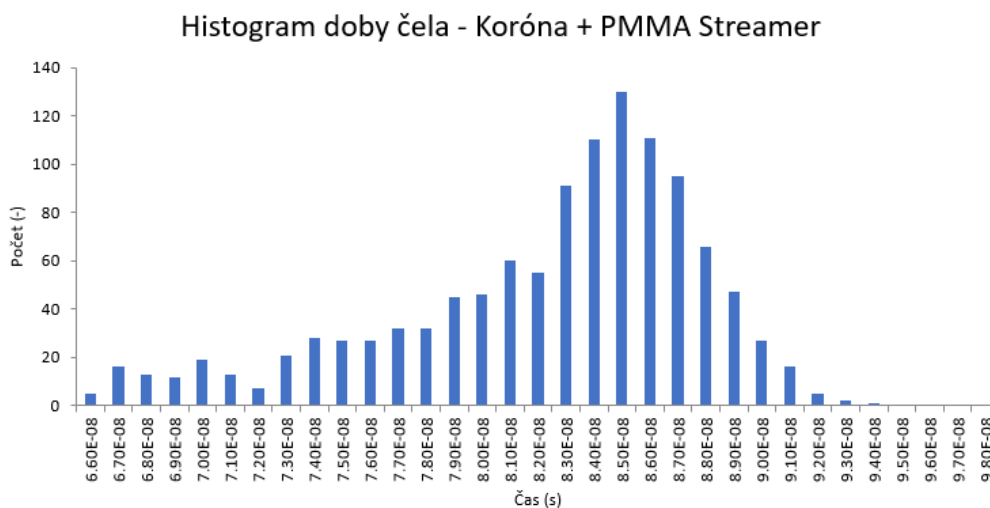


Obr. 60 - Histogram doby sestupné hrany impulzů sestavy hrot-deska s korónovým výbojem typu streamer

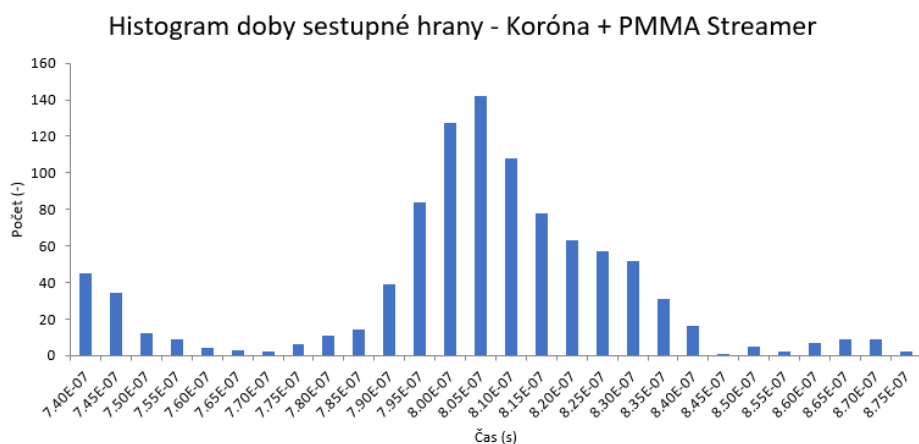
U výboje typu streamer je histogram doby čela z na rozdíl od typu trichel výrazně širší bez výrazného středu v oblasti mediánu a jeho zvonovitý tvar přechází částečně až do tvaru hřebenovitého. Histogram sestupné hrany nemá příliš výraznou oblast mediánu a má plochý tvar. Tvar histogramu amplitudy je obtížné určit z důvodu malého rozlišení zaznamenaných dat a tím způsobeného malého odstupů hodnot, nicméně i zde lze vypořadovat náznak asymetrického histogramu s pozitivní křivostí. [28]



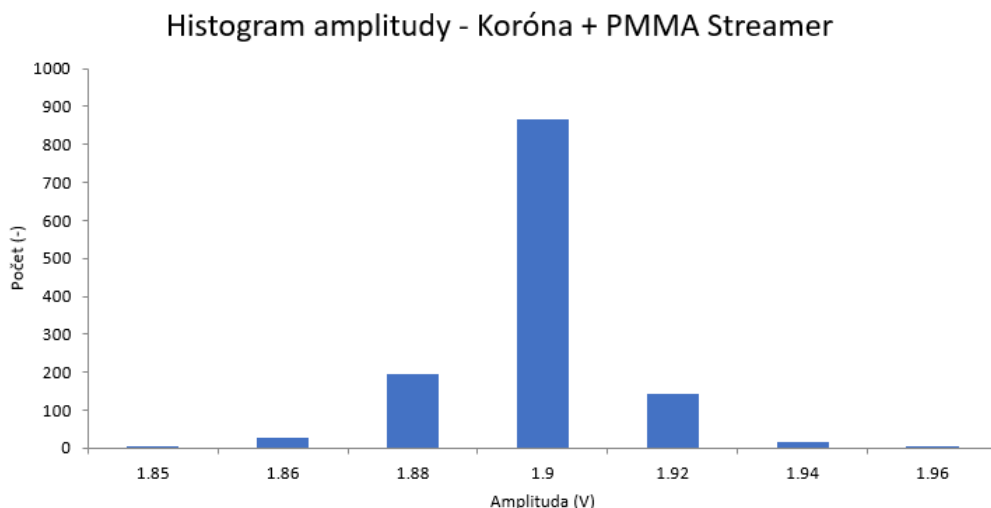
Obr. 61 - Histogram amplitudy impulzů sestavy hrot-deska s korónovým výbojem typu streamer



Obr. 62 - Histogram doby čela impulzů sestavy hrot-deska + PMMA s korónovým výbojem typu streamer

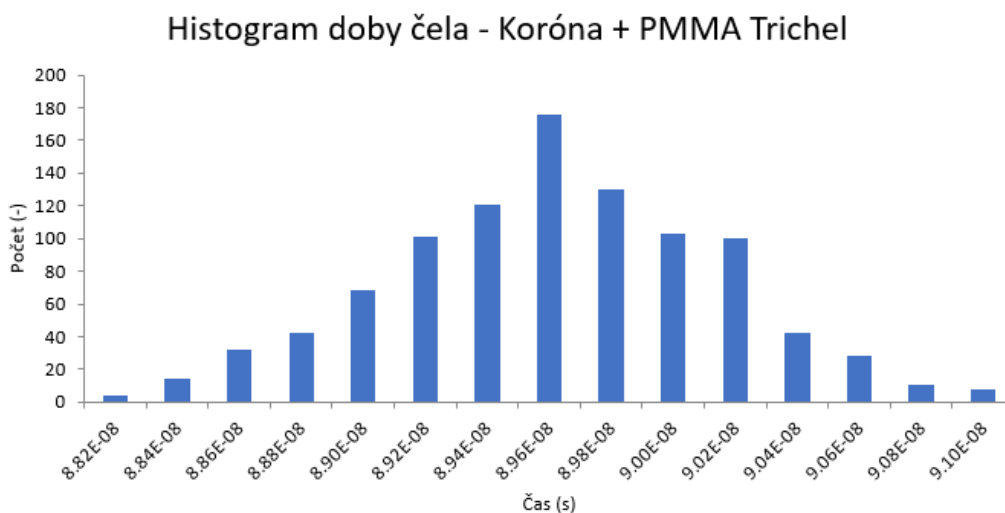


Obr. 63 - Histogram doby sestupné hrany impulzů sestavy hrot-deska + PMMA s korónovým výbojem typu streamer

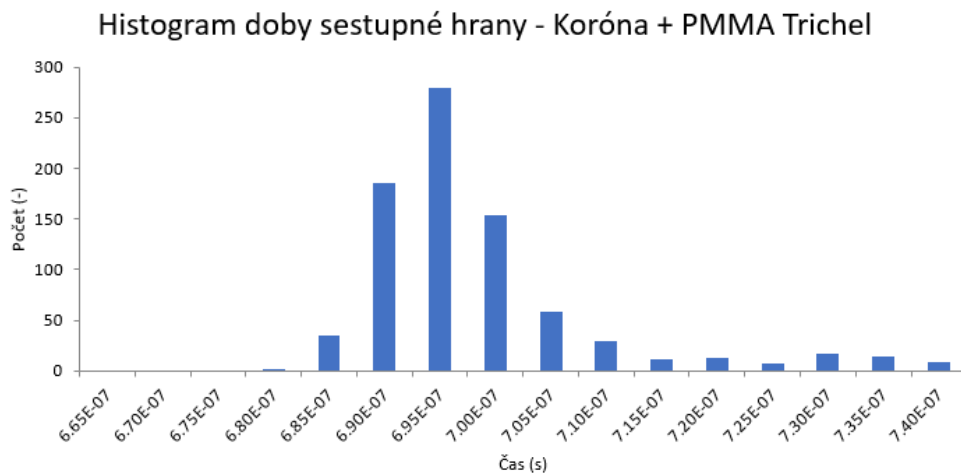


Obr. 64 - Histogram amplitudy impulzů sestavy hrot-deska + PMMA s korónovým výbojem typu streamer

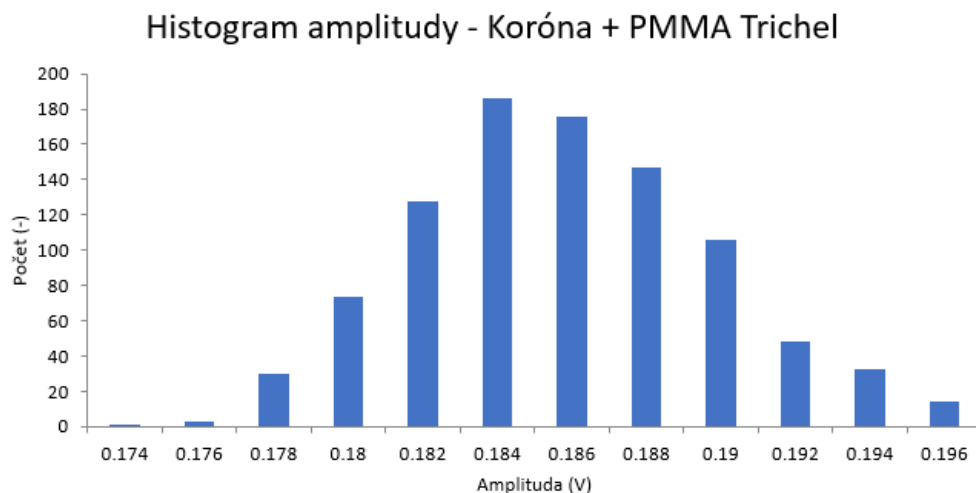
U sestavy s izolační deskou z plexiskla (PMMA) se streamer korónou má u doby čela histogram asymetrický tvar s negativní křivostí s mediánem nacházejícím se před vrcholem. U sestupné hrany pozorujeme zvonovitý tvar s odlehlými hodnotami u spodního konce očištěného rozsahu dat. Histogram amplitudy má úzký zvonovitý tvar s výrazným vrcholem v oblasti mediánu. [28]



Obr. 65 - Histogram doby čela impulzů sestavy hrot-deska + PMMA s korónovým výbojem typu trichel

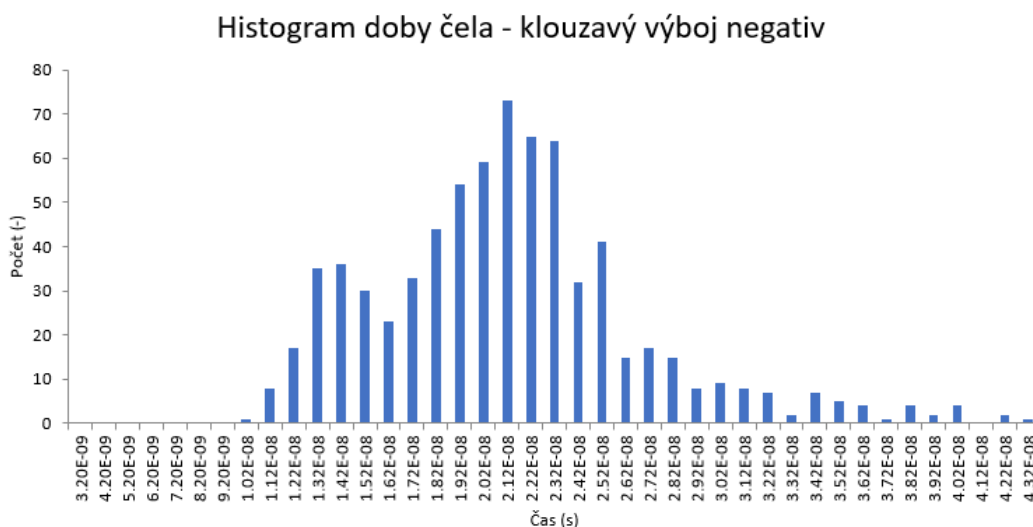


Obr. 66 - Histogram doby sestupné hrany impulzů sestavy hrot-deska + PMMA s korónovým výbojem typu trichel

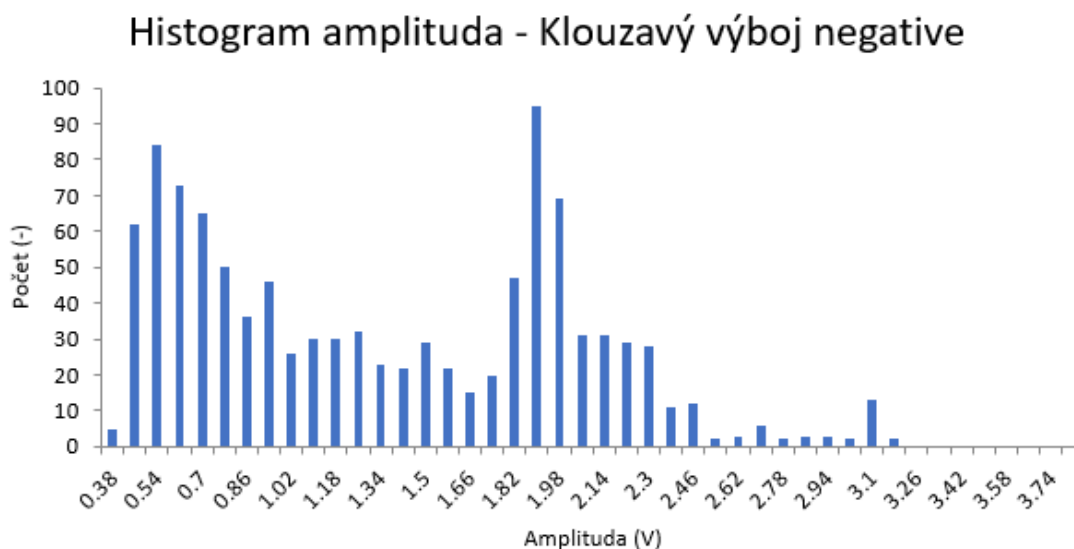


Obr. 67 - Histogram amplitudy impulzů sestavy hrot-deska + PMMA s korónovým výbojem typu trichel

V případě sestavy s PMMA bariérou a korónou typu trichel má histogram doby čela opět zvonovitý tvar obdobný jako v případě sestavy bez izolační bariéry. V případě sestupné hrany se opět jako u sestavy bez PMMA bariéry jedná o asymetrický histogram s pozitivní šikmostí. U histogramu amplitudy se již jedná o zvonovitý, a nikoliv o dvourcholový jako v případě sestavy bez izolační destičky. [28]

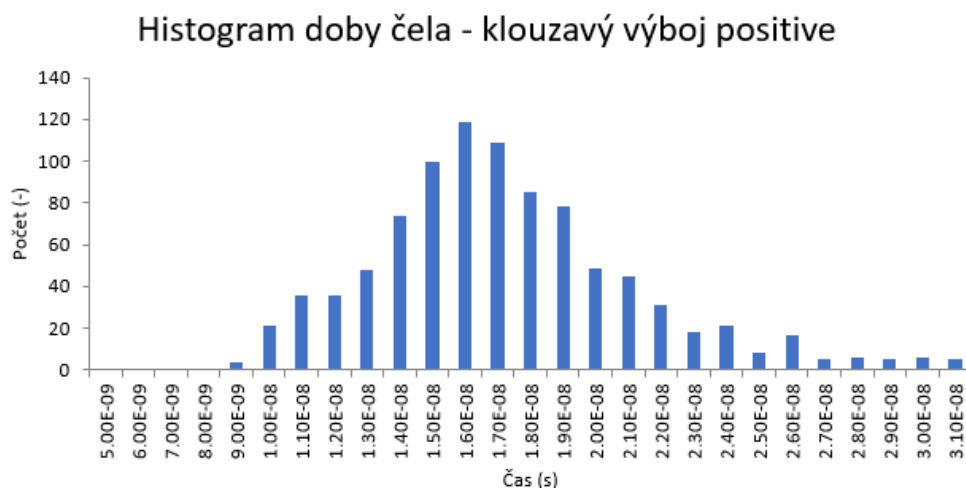


Obr. 68 - Histogram doby čela impulzů sestavy pro klouzavý výboj v záporné polaritě

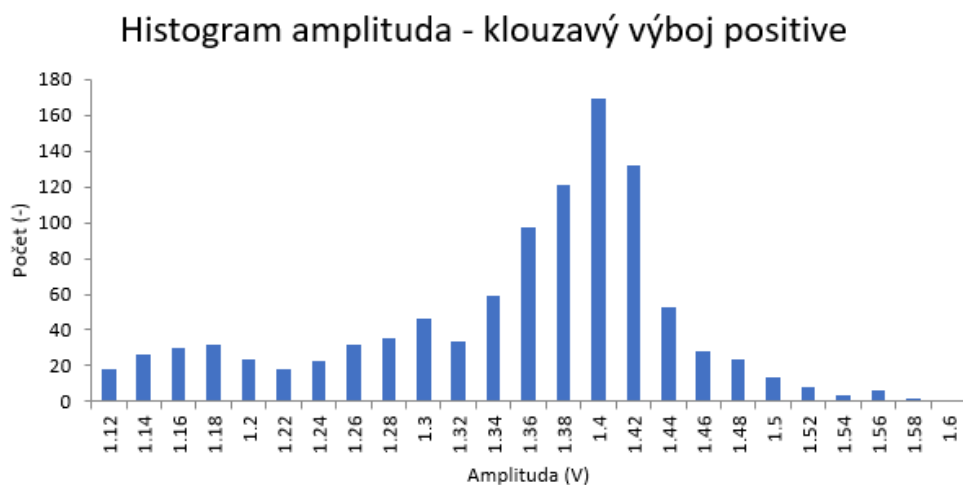


Obr. 69 - Histogram amplitudy impulzů sestavy pro klouzavý výboj v záporné polaritě

U sestavy pro klouzavý výboj v záporné polaritě byly zpracovány pouze dva histogramy na dobu čela (Obr. 68) a amplitudu (Obr. 69) z důvodu absence dat pro sestupnou hranu. U doby čela má histogram zvonovitý, lehce asymetrický tvar s pozitivní šikmostí s maximálním výskytem v oblasti mediánu. Histogram pro amplitudu je dvouvrcholový s výraznou četností v krajních třídách u spodní hranice vykreslovaného rozsahu. [28]



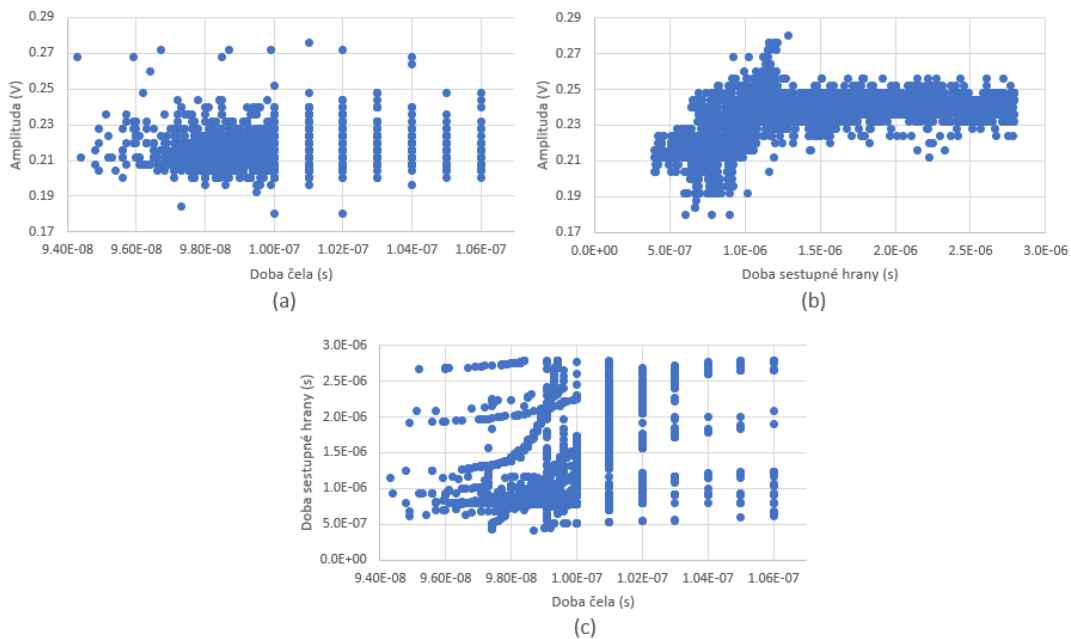
Obr. 70 - Histogram doby čela impulzů sestavy pro klouzavý výboj v kladné polaritě



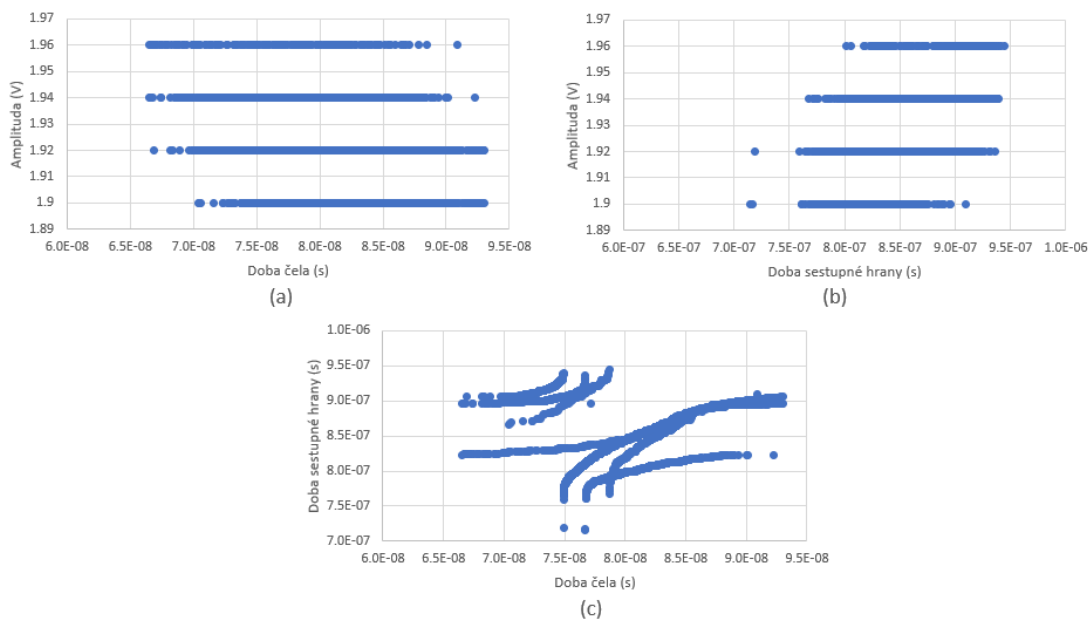
Obr. 71 - Histogram amplitudy impulzů sestavy pro klouzavý výboj v kladné polaritě

U polarity kladné má histogram doby čela zvonovitá tvar a v případě graficky znázorněného rozdělení pro amplitudu můžeme mluvit o asymetrickém histogramu s negativní šikmostí. [28]

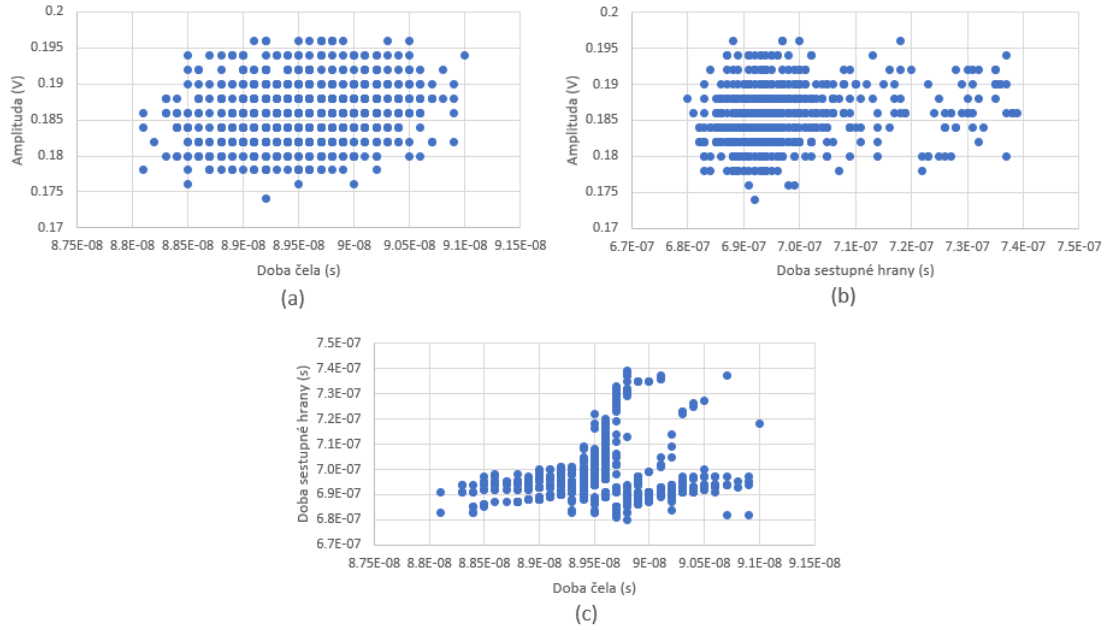
Kromě histogramů byly vyneseny závislosti pro každou sestavu amplitudy na době čela, amplitudy na době sestupné hrany a době sestupné hrany na době čela. Jedinou výjimkou byly měření s klouzavými výboji, kde nebyly zaznamenávány doby sestupné hrany a z tohoto důvodu byly vyneseny pouze závislost amplitudy na době čela.



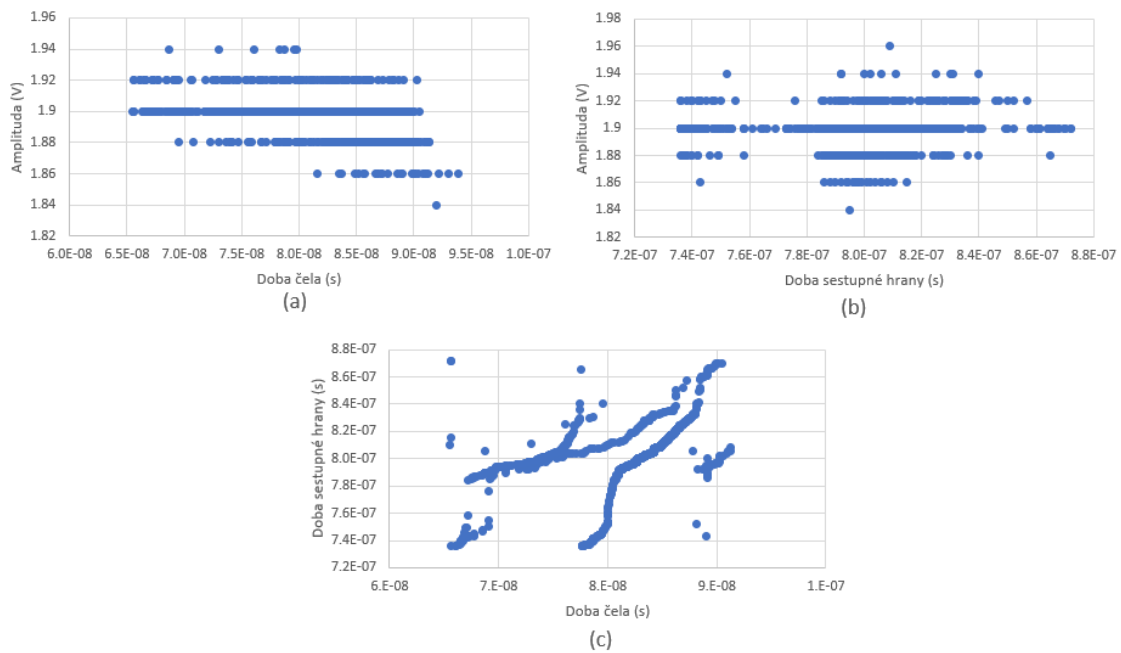
Obr. 72 - Hrot-deska trichel s vyneseními závislostmi (a) amplitudy na době čela, (b) amplitudy na době sestupné hrany, (c) doby sestupné hrany na době čela



Obr. 73 - Hrot-deska streamer s vyneseními závislostmi (a) amplitudy na době čela, (b) amplitudy na době sestupné hrany, (c) doby sestupné hrany na době čela

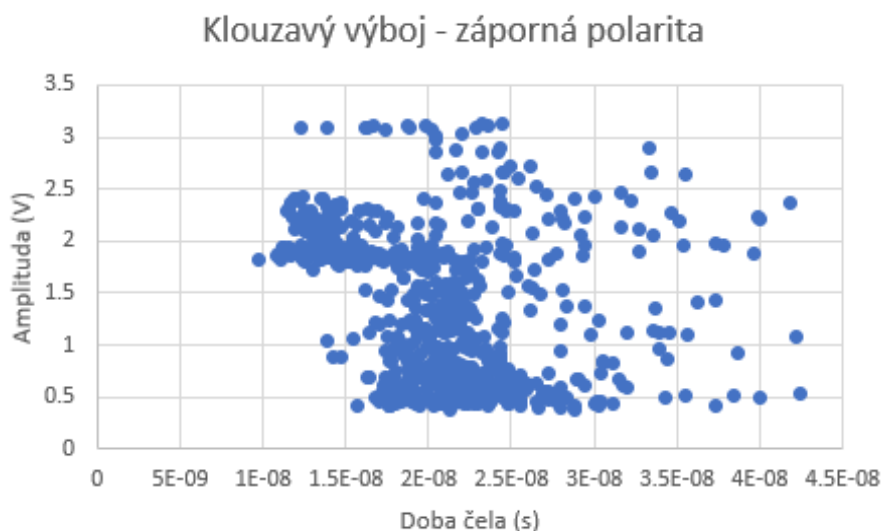


Obr. 74 - Hrot-deska + PMMA trichel s vyneseními závislostmi (a) amplitudy na době čela, (b) amplitudy na době sestupné hrany, (c) doby sestupné hrany na době čela

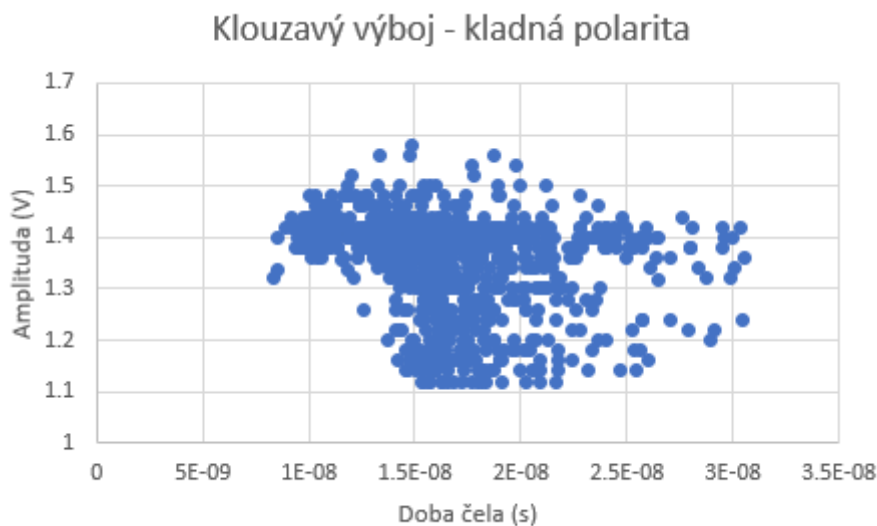


Obr. 75 - Hrot-deska + PMMA streamer s vyneseními závislostmi (a) amplitudy na době čela, (b) amplitudy na době sestupné hrany, (c) doby sestupné hrany na době čela

Ve vynesných závislostech pro sestavu hrot-deska s trichel výboji na Obr. 72 je patrné, že u hodnot doby čela po překročení hodnoty 100 ns se hodnoty zaznamenávají v jednotlivých úrovních po 1 ns z důvodu změny rozdílných kvantizačních hladin. Obdobně je tomu v případě hodnot amplitud zvláště u záznamů výbojů typu streamer na Obr. 73 a 74, kdy jsou hodnoty zaznamenávány v úrovních s rozestupy 20 mV, což značně ztěžuje vyhodnocení příslušných grafů závislostí.



Obr. 76 - Závislost amplitudy a doby čela u klouzavého výboje – záporná polarita



Obr. 77 - Závislost amplitudy a doby čela u klouzavého výboje – kladná polarita

Závěr

Diplomová práce se zabývala diagnostikou izolačních systémů z hlediska částečných výbojů. Z důvodů vládních restriktivních protiepidemických opatření byla její původně zamýšlený experimentální část prováděná v laboratoři nahrazena analýzou poskytnutých dat získaných měření na modelových uspořádáních.

V úvodní části byly popsány základy elektrotechnické diagnostiky a následně některé druhy diagnostiky izolačních systémů u transformátorů a točivých strojů. Dále se diplomová práce věnovala částečným výbojům, způsobu jejich vzniku, jejich rozdělení, charakterizujícím parametrům, způsobům měření a typickým závadám na transformátorech a točivých strojích a jejich charakteristickým projevům při měření částečných výbojů.

V poslední části diplomové práce byla provedena analýza poskytnutých dat získaných měření částečných výbojů na třech základních modelových uspořádání v obou polaritách. Zaznamenávanými daty u každého výboje byla doba čela, amplituda a doba sestupné hrany. Výjimkou byla sestava pro klouzavý výboj, kde v měření pro obě polarity nebyla zaznamenána doba sestupné hrany.

U analyzovaných dat bylo provedeno očištění, vypočtení hodnot hranic pro první a třetí kvartil, mediánu a vynesení příslušných boxplotů. Z těchto získaných dat vyplynulo, že výbojová činnost typu trichel má delší dobu čela než typ streamer, a také, že v případě typu trichel je distribuce hodnot doby čela oproti streameru více koncentrována v blízkosti mediánu. V případě amplitudy jsou hodnoty měřené u výbojů typu streamer přibližně desetkrát větší, než je tomu u typu trichel. U naměřených dat v případě sestavy pro klouzavé výboje je patrné, že v kladné polaritě mají výboje kratší dobu čela a hodnoty amplitudy více koncentrovány v okolí mediánu. Následně byly vyneseny příslušné histogramy pro sledované veličiny, kde nebyly pozorovány žádné další významné souvislosti charakterizující danou konfiguraci nebo druh výbojové činnosti. Na závěr byly vyneseny závislosti mezi těmito jednotlivými sledovanými veličinami. Zde stojí za povšimnutí, že v závislosti doby sestupné hrany na době čela byly pozorovány obrazce připomínající křivky konvexního a konkávního tvaru. Z analyzovaných dat lze usoudit, že některé sledované veličiny lze potenciálně využít pro určování druhu výbojové činnosti.

Seznam použité literatury:

- [1] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] Materiály pro elektrotechniku. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02232-3.
- [3] KÜCHLER, Andreas. High Voltage Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-642-11992-7.
- [4] HAUSCHILD, Wolfgang a Eberhard LEMKE. High-Voltage Test and Measuring Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-45351-9.
- [5] STONE, Greg C., Ian CULBERT, Edward A. BOULTER a Hussein DHIRANI. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. 2nd edition. Hoboken: John Wiley, 2014. IEEE Press series on power engineering. ISBN 978-1-118-05706-3.7. WG D1.33
- [8] MUTAKAMIHIGASHI, Tatsuya, Sho OKADA a Hideki UENO. Basic study on applying a new partial discharge diagnosis method to capacitor voltage transformer. The 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017.
- [9] GULSKI, E., W. KOLTUNOWICZ, T. ARIAANS, et al. Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods. CIGRE. CIGRE, 2016. ISBN 978-2-85873-365-1.
- [10] ČSN EN 60270. Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů. Český normalizační institut, 2001.
- [11] FUHR, J., S. MARKALOUS, S. COENEN, et al. Partial discharges in transformers. CIGRE, 2017. ISBN 978-2-85873-379-8.
- [12] PEPPER, Daniel, Ronald PLATH a E. LEMKE. Partial discharges in typical defects of power cable systems at variable test voltage frequency – Fundamental and practical considerations. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015.

- [13] Damião, L.; Guimarães, J.; Ferraz, G.; Bortoni, E.; Rossi, R.; Capelini, R.; Salustiano, R.; Tavares, E. Online Monitoring of Partial Discharges in Power Transformers Using Capacitive Coupling in the Tap of Condenser Bushings. *Energies* 2020, 13, 4351. <https://doi.org/10.3390/en13174351>
- [14] PIHERA, J., P. TRNKA a P. MARTÍNEK. Analýza pulzů částečných výbojů. Pilsen, Czech Republic.
- [15] A. Rodrigo Mor, L.C. Castro Heredia, D.A. Harmsen, F.A. Muñoz, A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 94, 2018, Pages 374-384, ISSN 0142-0615,
- [16] AGUIAR DO NASCIMENTO, Douglas, Yuzo IANO, Hermes José LOSCHI, Luiz Antonio DE SOUSA FERREIRA, José Antônio Donizete ROSSI a Clayton DUARTE PESSOA. Evaluation of Partial Discharge Signatures Using Inductive Coupling at On-Site Measuring for Instrument Transformers. *International Journal of Emerging Electric Power Systems* [online]. 2018, 19(1) [cit. 2021-5-23]. ISSN 1553-779X. Dostupné z: [doi:10.1515/ijeeps-2017-0160](https://doi.org/10.1515/ijeeps-2017-0160)
- [17] ČSN EN 60034-27-1. Točivé elektrické stroje – Část 27-1: Offline měření částečných výbojů na izolaci statorových vinutí točivých elektrických strojů. Český normalizační institut, 2018.
- [18] ČSN EN 60034-27-2. Točivé elektrické stroje – Část 27-2: Online měření částečných výbojů na izolaci statorových vinutí točivých elektrických strojů. Český normalizační institut, 2014.
- [19] HUDON, Claude a Mario BELEC. Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015.
- [20] Cigre Brochure WG A1.01.06: Application of On-Line Partial Discharge Tests to Rotating Machines, CIGRE, 2004.
- [21] Kalkner, W., et al. Synchronous 3-phase partial discharge detection on rotating machines, CIGRE, Paper D1-105, 2006.

- [22] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, "Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 328-340, April 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430401.
- [23] Florkowski, M., & Florkowska, B. (2009). Phase-resolved rise-time-based discrimination of partial discharges. *IEE Proceedings. Generation, Transmission, and Distribution.*, 3(1), 115-124.
- [24] PIHERA, Josef, Jaroslav HORNAK, Ales VOBORNIK, Lukas KUPKA, Svatoslav CHLADEK a Rainer HALLER. *Partial Discharges Pulse Shape Analysis at AC and DC*. Pilsen, Czech Republic.
- [25] ISH 2019, prezentace, autoři, J. Pihera, A. Vobornik, J. Hornak, L. Kupka, S. Chladek, T. Dzugan, R. Haller. *Partial Discharges Pulse Shape Analysis at AC and DC*. Přednesena na ISH 2019 v Budapešti
- [26] FRIGGE, Michael, David C. HOAGLIN a Boris IGLEWICZ. Some Implementations of the Boxplot. *The American Statistician* [online]. 1989, 43(1) [cit. 2021-5-23]. ISSN 00031305. Dostupné z: doi:10.2307/2685173
- [27] Galit Levitin, Karen Reinhardt, Dennis W. Hess, Chapter 2 - Plasma Cleaning for Electronic, Photonic, Biological, and Archeological Applications, Editor(s): Rajiv Kohli, K.L. Mittal, *Developments in Surface Contamination and Cleaning*, William Andrew Publishing, 2013, Pages 55-121, ISBN 9781437778816
- [28] TŮMOVÁ, Olga a Dušan PIRICH. *Nástroje řízení jakosti a základy technické diagnostiky*. V Plzni: Západočeská univerzita v Plzni, 2003. ISBN 80-7043-247-0.