

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Diagnostika VN systémů a zařízení z hlediska
částečných výbojů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David NOVÁK**
Osobní číslo: **E17N0021P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostika VN systémů a zařízení z hlediska částečných výbojů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

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.
4. Vytvořte modely základních druhů defektů částečných výbojů.
5. Proveďte měření částečných výbojů těchto modelů při střídavém a stejnosměrném napětí.
6. Vyhodnoťte provedená měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

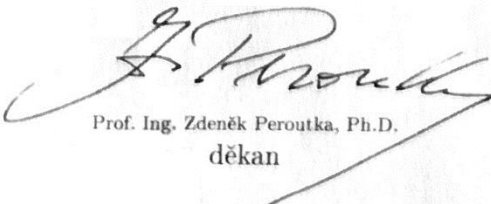
Seznam odborné literatury:

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. Sciencedirect, Wiley Interscience, Ieeexplore

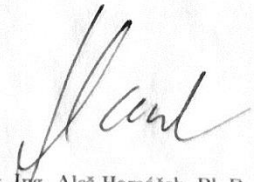
Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Pihera, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


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




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

V Plzni dne 5. října 2018

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá diagnostikou izolačního pod systému vysokonapěťových systémů a zařízení z hlediska částečných výbojů. V práci je sestaven přehled jednotlivých diagnostických přístupů a metod diagnostiky VN zařízení, přičemž je proveden podrobnější rozbor teorie částečných výbojů a jejich diagnostiky. Dále je proveden rozbor typických účinků a možných vad ve VN strojích potenciálně způsobené tímto fenoménem. Experimentální část se věnuje vyhodnocení jednotlivých typů částečných výbojů. Pro korónové a povrchové výboje je provedeno porovnání výstupů měření pomocí pulzně sekvenční analýzy při střídavém a stejnosměrném záporné napětí. Jsou uvedeny i ekvivalentní pulzní diagramy pro jednotlivé hodnoty napětí. Dále jsou vyhodnocena měření na statorovém vinutí a na vzorcích pro vnitřní výboje při střídavém napětí. Záměrem práce je vytvořit typické vzorky pro různé druhy částečných výbojů a posoudit jejich chování při střídavém a stejnosměrném napětí.

Klíčová slova

Částečné výboje, diagnostika, izolační systém, PSA analýza, koróna, vnitřní výboj, povrchový výboj, drážkové výboje, pulzní diagramy

ABSTRACT

This diploma thesis deals with diagnostics of insulating system of high-voltage systems and devices from the partial discharges point of view. In the work there is an overview of individual diagnostic approaches and methods of diagnostics of high-voltage equipment. Furthermore, there is the analysis of typical effects and possible defects in HV machines potentially caused by this phenomena. The experimental part deals with the evaluation of individual types of partial discharges. Comparison of the results of the measurements of corona discharges and surface discharges at AC and DC negative voltage is performed by pulse sequence analysis. Equivalent pulse diagrams for individual voltage values are also given. Furthermore, the measurements on the stator winding and on the samples for internal discharges at AC voltage are evaluated. The aim of this work is to create typical samples for various types of partial discharges and to assess their behavior at AC and DC voltage.

Keywords

Partial discharges, diagnostics, insulation system, PSA analysis, corona, internal discharge, surface discharge, discharges on stator winding, pulse diagrams

Prohlášení

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

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

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za jeho trpělivost, odborné vedení a cenné rady během jednotlivých etap zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Hornakovi, Ph.D. za čas strávený v laboratoři a za cenné rady během samostatných měření, bez čehož by tato práce nemohla vzniknout. Dále děkuji své rodině a všem blízkým za jejich nekonečnou lásku a podporu.

OBSAH

ÚVOD.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A JEJÍ POSLÁNÍ.....	14
1.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA V SYSTÉMECH ÚDRŽBY.....	15
1.2 DIAGNOSTICKÉ SYSTÉMY	17
1.2.1 Systémy off-line – testovací diagnostika	17
1.2.2 Systémy on-line – provozní diagnostika.....	18
1.3 DIAGNOSTICKÉ METODY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	19
2 DIAGNOSTIKA ELEKTROIZOLAČNÍHO SYSTÉMU ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	22
2.1 SMYSLOVÉ KONTROLY	22
2.2 STEJNOSMĚRNÉ METODY	22
2.2.1 Zdánlivý izolační odpor	22
2.2.2 Polarizační index	23
2.3 NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY	24
2.3.1 Zkoušky střídavým napětím.....	24
2.3.2 Zkoušky stejnosměrným napětím.....	24
2.3.3 Zkoušky impulzním napětím.....	25
2.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO Činitele TG δ	25
2.5 MĚŘENÍ NAPĚŤOVÉ ZÁVISLOSTI ELEKTRICKÉ VODIVOSTI.....	26
2.6 MĚŘENÍ KAPACITY IZOLACE.....	26
3 PROBLEMATIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	27
3.1 DRUHY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	27
3.2 PARAMETRY CHARAKTERIZUJÍCÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	28
3.3 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE PŘI STŘÍDAVÉM A STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ	29
3.3.1 Částečné výboje při střídavém napětí.....	30
3.3.2 Částečné výboje při stejnosměrném napětí.....	31
3.4 VLIV ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLAČNÍ SYSTÉM	32
4 VYUŽITÍ MĚŘENÍ ČV PŘI DIAGNOSTICE IZOLAČNÍHO SYSTÉMU ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	35
4.1 PORUCHY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	35
4.1.1 Vnitřní defekty izolačního systému.....	36
4.1.2 Poruchy v drážkách.....	37

4.1.3	Poruchy na koncích vinutí	37
4.1.4	Znečištění vlivem vodivých částic	38
4.1.5	Znečištění transformátorového oleje	39
5	PŘEHLED DIAGNOSTICKÝCH METOD MĚŘENÍ ČV V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH	41
5.1	KONVENČNÍ GALVANICKÉ MĚŘÍCÍ METODY	41
5.2	VYSOKOFREKVENČNÍ NEPŘÍMÉ METODY	42
5.2.1	Ultrafrekvenční měření UHF	43
5.2.2	Další nepřímé VF metody	44
5.3	AKUSTICKÁ METODY	47
5.4	OPTICKÉ METODY	49
5.5	CHEMICKÉ METODY	50
6	VLASTNÍ EXPERIMENT MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	53
6.1	MĚŘÍCÍ METODA	53
6.2	VYHODNOCOVÁNÍ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI	57
6.3	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ KORÓNOVÝCH VÝBOJŮ	58
6.3.1	Vyhodnocení měření při střídavém napětí	58
6.3.2	Vyhodnocení měření při stejnosměrném napětí	60
6.4	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH VÝBOJŮ	63
6.4.1	Vyhodnocení měření při střídavém napětí	63
6.4.2	Vyhodnocení měření při stejnosměrném napětí	64
6.5	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI V DRÁŽCE STATORU PŘI STŘÍDAVÉM NAPĚTÍ.....	66
6.6	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ VNITŘNÍCH VÝBOJŮ PŘI STŘÍDAVÉM NAPĚTÍ.....	69
6.6.1	Vyhodnocení vnitřních výbojů – Relanex.....	69
6.6.2	Vyhodnocení vnitřních výbojů – Transformátorová lepenka.....	71
	ZÁVĚR.....	73
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	75
	PŘÍLOHY	1

ÚVOD

Technická diagnostika u vysokonapěťových systémů (nejenom) v současnosti hraje nezbytnou roli při údržbě systémů. Díky diagnostickým procedurám lze předcházet různým haváriím nebo neplánovaným odstávkám a tím snížit ztráty v nejširším slova smyslu, což vede k zlepšení konkurenceschopnosti firem a závodů. Nejcitlivějším článkem u VN systémů je jednoznačně izolační podsystem, který vlivem mnoha různých degradačních činitelů postupně ztrácí své vlastnosti a může vést až k totální ztrátě izolační vlastnosti. S rostoucím instalovaným výkonem roste důležitost zachování potřebné izolační schopnosti a tudíž i potřeba diagnostikovat působící degradační činitele v dané izolaci v předstihu. Jedním z takových činitelů jsou částečné výboje. Tento jev je předmětem výzkumu již po dlouhá desetiletí, nicméně vzhledem k jeho komplexnosti a postupným technickým změnám ve společnosti nachází své místo ve výzkumu i dnes. I když jsou publikovány mnohé studie ohledně působení ČV při střídavém napětí, pozornost se v současnosti zaměřuje na chování ČV při stejnosměrném napětí, pro které prozatím nejsou pevně stanovené normy a ustálené měřicí techniky. Z tohoto důvodu existují dvě snahy – zjistit dlouhodobé účinky ČV při stejnosměrném napětím na izolační systém a zavést účinnou metodiku pro jejich měření při stejnosměrném napětím.

Úvodní kapitoly se zaměřují na obecné aspekty technické diagnostiky, přičemž jsou popsány různé přístupy TD pro vysokonapěťové zařízení a systémy jako je – tribodiagnostika, vibrodiagnostika, akustická diagnostika, defektoskopie, atd.

Dále je věnována pozornost diagnostice izolačního systému, kde jsou rozebrány různé metody měření a zkoumané parametry pro hodnocení stavu izolačního systému. V rámci této části jsou rozebrány základní aspekty a teorie okolo částečných výbojů, jakožto parametru, který je běžně používán pro hodnocení stavu izolačního podsystemu. Zároveň jsou zahrnuty i jejich účinky a jimi potenciálně způsobené defekty v točivých a netočivých strojích. Následující kapitola se věnuje a rozebírá používané metody detekce a lokace částečných výbojů v izolačním podsystemu vysokonapěťových strojů a zařízení. Z pramenů literatury vyplývá, že nejčastěji používané metody jsou – konvenční galvanické metody, vysokofrekvenční nepřímé metody, akustické metody a v poslední řadě i optické a chemické metody.

V experimentální části diplomové práce je uvedeno vyhodnocení jednotlivých druhů výbojové činnosti pomocí PSA diagramů.

Pro korónové a povrchové výboje jsou naměřené výstupy porovnány při různých napěťových hladinách při střídavém, tak i stejnosměrném záporném napětí. Dále je vyhodnoceno měření výbojové činnosti při střídavém napětí na statorové drážce pro dva případy – drážka obsahující upevňovací klín a drážka bez upevňovacího klínu při různých hodnotách napětí. V závěru jsou demonstrovány vnitřní výboje dvou vzorcích – Relanexová deska, vzorek vyrobený z transformátorové lepenky. Experimentální část rovněž obsahuje popis výroby různých dalších vzorků pro měření vnitřních výbojů.

Cílem práce je vyrobit a demonstrovat měření na různých vzorcích pro různé typy částečných výbojů a porovnat jejich chování při působení střídavého a stejnosměrného napětí.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly konstant		
Symbol	Jednotka	Význam
A	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
C	[F]	Kapacita
cos φ	[-]	Účinitík
E _p	[V/m]	Elektrická pevnost
G	[S]	Elektrická vodivost
I	[A]	Elektrický proud
p _i	[-]	Polarizační index
P _z	[VA]	Zdánlivý výkon
R _{iz}	[MΩ]	Zdánlivý izolační odpor
tg δ	[-]	Ztrátový činitel
T	[°C]	Teplota
T	[s]	Perioda
U	[V]	Elektrické napětí
U _{Zss}	[kV]	Stejnoseměrné zkušební napětí
U _{Zst}	[kV]	Střídavé zkušební napětí
λ	[m]	Vlnová délka
τ	[s]	Časová konstanta
ω	[rad·s ⁻¹]	Úhlová rychlost
Zkratky použité v textu		
Zkratka	Význam	
AC	Střídavý proud	
DC	Stejnoseměrný proud	
DGA	Plynová chromatografie	
ČV	Částečné výboje	
EIS	Elektro-izolační systém	
GIS	Plynem izolovaný systém	
HFCT	Vysokofrekvenční proudový transformátor	
HF/UHF	Vysoké frekvence / Ultra-vysoké frekvence	
PRPD	Fázové rozlišení částečných výbojů	
PZT	Piezoelektrický převodník	
TD	Technická diagnostika	

VN Vysoké napětí

Chemické názvosloví

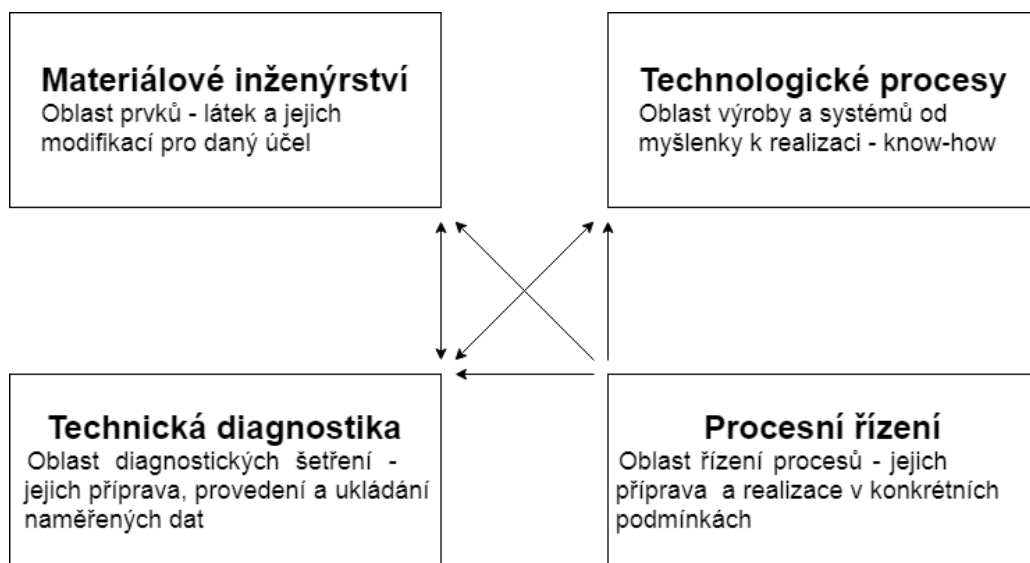
Zkratka	Význam
CH ₄	Metan
C ₂ H ₂	Acetylen
C ₂ H ₄	Etylen
C ₃ H ₆	Propylen
H ₂	Vodík
LDPE	Nízko-hustotní polyethylén
LiNbO ₃	Niobičnan lithný
Pb(ZrTi)O ₃	Zirkonátová piezokeramika
PVDF	Polyvinylidenfluorid
XLPE	Zesítný polyetylén

Symboly spjaté s částečnými výboji

Symbol	Jednotka	Význam
C _v	[F]	Vazební kondenzátor
q	[pC]	Zdánlivý náboj impulzu ČV
q _{kal}	[pC]	Kalibrační náboj
φ _i	[°]	Fázový úhel ČV
t _i	[s]	Čas výskytu impulzu ČV
n	[-/s]	Četnost pulzů ČV
I	[C/s; A]	Střední proud ČV
D	[C ² /s]	Střední kvadratický součet
P	[W]	Výkon částečných výbojů
U _e	[V]	Zhášecí napětí ČV
U _i	[V]	Zapalovací napětí ČV
Z _m	[Ω]	Snímací impedance

1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A JEJÍ POSLÁNÍ

Z důvodu neustálého zvyšování nároků na spolehlivost elektrických systémů je nutné vlastnit relevantní informace o technickém stavu elektrického systému v nejširším slova smyslu. Jednou z cest tohoto poznání je použití různých metod technické diagnostiky, jejíž cílem je zjistit stav zařízení, tj. diagnóza, na jejím základě lze dále odhadnout budoucí stav zařízení, tj. prognóza [1]. Dále nastávají momenty, kdy je nutné znát i informace o vývoji stavu systému do soudobého stavu a jaké degradační účinky na systém působily, tj. geneze [2]. Konečným výstupem diagnostiky je zvýšení životnosti elektrického systému na základě predikce možných havarijních stavů, účelného plánování údržby a oprav nebo předání zpětné vazby oboru materiálového inženýrství [1]. Všechny tyto kroky jsou spjaty s minimalizováním konečných nákladů od samotné výroby až po provoz jednotlivých elektrických systémů, jelikož na základě relevantních dat lze přizpůsobit systém nebo naplánovat vhodný čas odstávky systému a tím zamezit vzniku prostojů a následných ztrát [3]. Na obrázku 1 je zachycena spojitost mezi TD a dalšími inženýrskými obory v širším kontextu, ze kterého vycházejí výše uvedené skutečnosti.



Obrázek 1 - Struktura elektrotechnologie (převzato z [1])

Další důležitou skutečností je také to, že TD má k dispozici vlastní aparát, díky kterému může být při odhalení poruchy navržen postup jejího nejefektivnějšího odstranění [4].

Významné a cenné místo diagnostiky dále nacházíme při sledování života technických zařízení, tj. při provozní diagnostice. Z tohoto pohledu je posuzován vývoj parametrů zařízení, ze kterých jsou tvořeny databáze hodnot popisujících vývoj chování

systémů. Tyto informace jsou dále zpracovány a dávají předpověď chování systému v následném dalším období. Elektrotechnologickou prognostiku lze označit jako završení TD. [1, 4]

Vhodné a účelné nasazení technické diagnostiky a údržby je nedílnou součástí konkurenceschopného a prosperujícího podniku.

1.1 Technická diagnostika v systémech údržby

Jak je uvedeno výše, TD je úzce spjata s plánováním údržby a opravami elektrických systémů. Pojem údržba lze dle zdroje [2] definovat jako: „*Proces realizovaný s cílem udržovat zařízení v provozuschopném stavu, tj. odstraňovat důsledky opotřebení a všech dalších provozních vlivů, stejně jako veškerého negativního působení prostředí a předvídaných i nepředvídaných poruch.*“

Systémy údržby lze dělit do čtyřech kategorií:

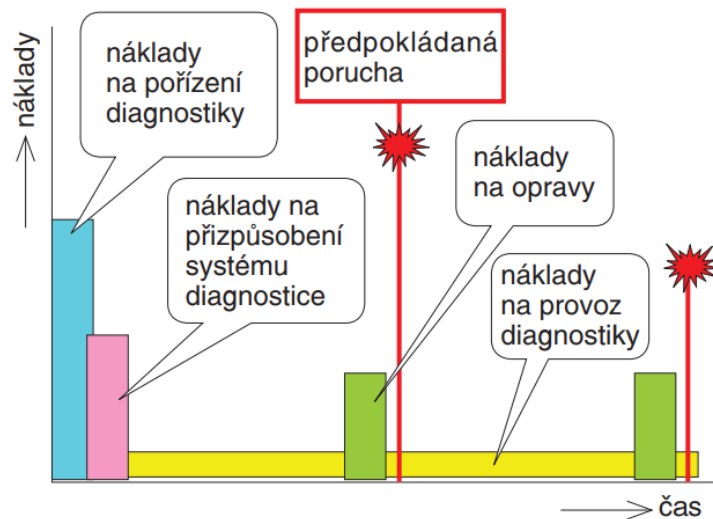
- Údržba po poruše
- Preventivní údržba
- Prediktivní údržba
- Proaktivní údržba

Údržba po poruše je historicky nejstarší typ údržby. Své opodstatnění nachází u objektů s minimálním vlivem na funkčnost systému jako celku. U současných komplexních elektrických systémů se tento typ nepoužívá, jelikož představuje riziko v souvislosti nepředvídaných odstávek. Ty mohou na základě svého charakteru způsobovat nadbytečné náklady. [5]

Preventivní přístup údržby umožňuje, díky teorii spolehlivosti a znalosti určitých rizikových parametrů předem stanovit intervaly údržby. Z tohoto důvodu lze ve většině případů předcházet neplánovaným odstávkám a eliminovat náklady spojené s předchozím typem údržby. Nevýhodou jsou ovšem značné náklady na předem plánované opravy. Ty mohou představovat výměnu článků systému, které zdaleka nemusí dosahovat mezního stavu životnosti. Interval údržby jsou často plánovány pouze orientačně namísto skutečného stavu systému. Vzhledem k této skutečnosti je úspora relativně malá. [2]

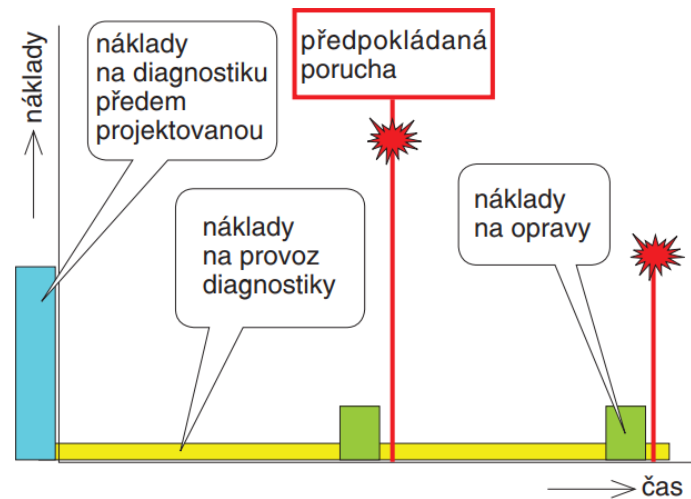
Prediktivní přístup údržby, dle pramene [2, 5] představuje modernější přístup, jelikož zapojuje TD a předpokládá využití všech předchozích výhod systémů údržby. Hlavním kladem toho přístupu je efektivní plánování údržby vycházející z relevantních výstupních dat získaných pomocí TD. Na základě těchto dat lze zefektivnit využitelnost daného

článku či celku systému, který je vyměněn až v době těsně před mezním stavem životnosti. To ovšem podmiňuje trvalé zapojení diagnostiky v systému, simultánní nebo periodické monitorování provozních parametrů systému, resp. jeho kritických částí. Oproti předchozímu přístupu se náklady na údržbu snižují na minimum. Nicméně i tento přístup má nevýhody plynoucích z vysokých pořizovacích nákladů diagnostiky a její složitosti implementování do daného systému. Pro názornost je na obrázku 2 demonstrován časově-ekonomický poměr prediktivního přístupu údržby.



Obrázek 2 - Časově-ekonomická závislost prediktivního přístupu (převzato z [2])

Proaktivní přístup údržby je označován za čtvrtou generaci systémů údržby a je tzv. nadstavbou prediktivního přístupu. V základu využívá všech vlastností předchozího typu, nicméně potenciál využití TD je daleko komplexnější. Jsou implementovány samostatné obory diagnostiky, díky čemuž je optimálně sledován celý systém. Další předností proaktivního přístupu je fakt, že daný systém je projektován již s diagnostickým podsystémem (majoritně u životně důležitých částí), eventuálně s možností snadného zavedení konkrétní diagnostiky na různé části systému. [2] Z obrázku 3 vyplývají ekonomické výhody oproti předchozím přístupům.



Obrázek 3 - Časově-ekonomická závislost proaktivního přístupu (převzato z [2])

Výše uvedené přístupy demonstrují nezastupitelnost TD při snižování finální ceny elektrických systémů a jeho nejrychlejší návratnost. Dalším pozitivním účinkem TD v systému údržby je zvýšení pohotovosti systému. Ta je závislá na pravděpodobnosti bezporuchového chodu a udržitelnosti systému, jakožto pravděpodobnosti uvedení systému do původního stavu za požadovanou dobu [1].

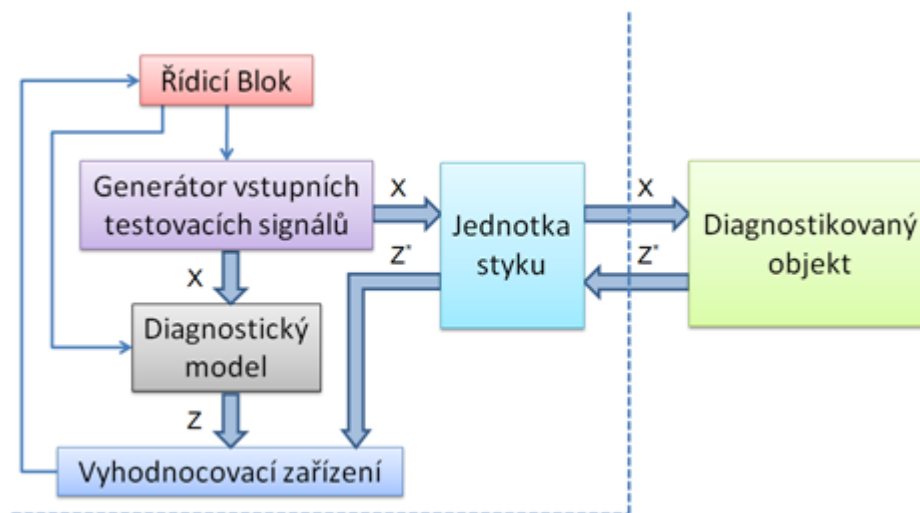
1.2 Diagnostické systémy

Diagnostickým systémem obecně označujeme soubor všech diagnostických prostředků, diagnostického objektu, eventuálně i obsluhu (lidský faktor). Diagnostické prostředky jsou veškeré technické zařízení a pracovní postupy pro analýzu a následné vyhodnocení diagnostikovaného objektu. Ty jsou dále děleny na vnější (samostatné) a vnitřní. Vnější prostředky majoritně tvoří univerzální přístroje, jež lze využít pro samostatnou diagnostiku, provozní měření tak i pro vývojové práce. Vnitřní prostředky představují významnější skupinu, což vyplývá z kapitoly 1.1. Diagnostické prostředky jsou integrovány přímo do diagnostikovaného objektu, přičemž jsou neoddělitelné. Pro diagnostikování daných veličin se používají různé senzory se zabudovanou elektronikou, které mají určitý stupeň inteligence. [6] Diagnostické systémy lze dělit na systémy off-line a on-line. Další podrobnější informace obsahuje publikace: [1].

1.2.1 Systémy off-line – testovací diagnostika

Tento typ diagnostiky se vyznačuje tím, že diagnostikovaný objekt je mimo provoz. Off-line diagnostika může být prováděna dvěma způsoby – testem nebo zvláštním způsobem. Diagnostikou testem pokládáme připojení diagnostického objektu k testovacím signálům, kde jsou dále snímány a vyhodnocovány jeho odezvy. Druhý typ

off-line diagnostiky je rozdělen na dva časové úseky. Nejprve je diagnostický objekt zkoumán za provozu a ve druhé fázi je provedeno vlastní testování. Tyto dva stavy jsou následně porovnávány. [6] Blokové schéma off-line systému demonstruje obrázek 4. Řídicí blok obsahuje diagnostický algoritmus, jehož pomocí generátor vstupních testovacích signálů vysílá přesně dané signály do diagnostikovaného objektu přes jednotku styku nebo do diagnostického modelu. Diagnostický model realizuje výrok o bezporuchovosti nebo poruchovosti objektu. Ty jsou dále porovnávány s odezvy přivedené z diagnostikovaného objektu a jsou dále formulovány výsledky diagnózy. [1]

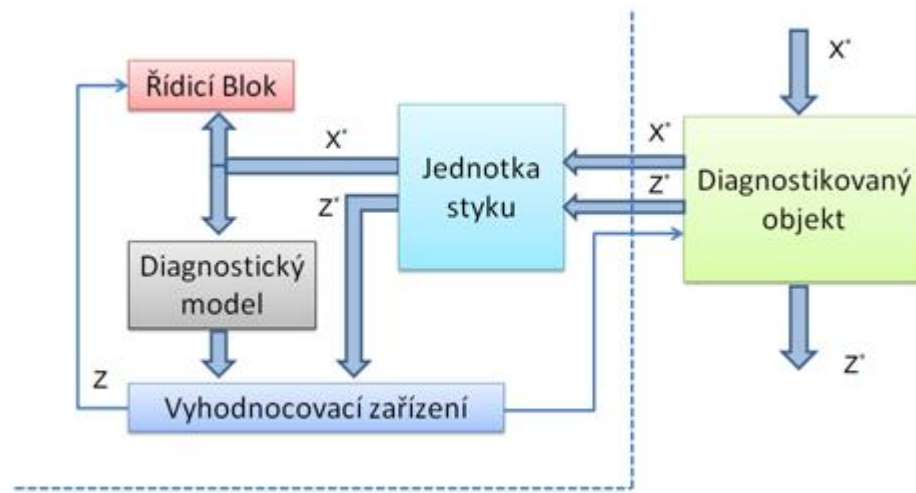


Obrázek 4 - Schéma off-line systému¹ (překresleno z [6])

1.2.2 Systémy on-line – provozní diagnostika

Princip vychází z předchozího systému, avšak zásadní odlišností je způsob generování řídicích signálů. V tomto případě jsou jimi signály, které na diagnostický objekt působí za provozu. Provozní signály vstupují do diagnostického systému jako řídicí signály $\{X^*\}$ a zároveň jako odezvy diagnostikovaného objektu $\{Z^*\}$. [1] Vyhodnocovací zařízení porovnává odezvy objektu s možnými výsledky generované diagnostickým modelem. Tento systém lze používat jako monitorovací systém, díky čemuž může být objekt trvale sledován a výstupy systematicky vyhodnocovány, čím dostáváme přehled o aktuální stavu diagnostikovaného objektu. [6] Blokové schéma provozní diagnostiky je uvedeno na obrázku 5.

¹ X^* , Z^* - vstupní a výstupní veličiny, X , Z - výstupní veličiny generované diag. prostředky [6]

Obrázek 5 - Schéma on-line systému¹ (překresleno z [6])

1.3 Diagnostické metody elektrických strojů

Existuje celá řada diagnostických oborů a metod pro zjišťování stavu elektrických strojů a zařízení. Pro komplexní pohled na jejich aktuální stav musíme využívat jejich kombinaci, která se odvíjí od charakteru diagnostikovaného objektu. V následujícím textu budou uvedeny základní metody diagnostiky a jejich základní charakteristika. Dle [1, 2, 7] lze diagnostické obory využívané pro diagnostiku elektrických strojů a zařízení dělit dle specifických přístupů na:

- Vibrodiagnostika
- Akustická diagnostika
- Termodiagnostika
- Tribodiagnostika
- Defektoskopie
- Elektrodiagnostika

Vibrodiagnostika [2, 6] je založena na snímání mechanického chvění (vibracím), které je způsobeno dynamickým namáháním stroje, ložisek, pohybujících se částí stroje, atd. Fundamentální měřené veličiny vibrodiagnostiky jsou - výchylka, rychlost a zrychlení. Při měření rozeznáváme dva typy snímání vibrací, jsou jimi dotykové a bezdotykové [1]. Dále rozlišujeme dva typy kmitání – absolutní a relativní. Absolutní výchylka je vztažena ke gravitačnímu poli Země, tj. fixní bod. Relativní výchylka je vztažena k reálnému bodu, který může rovněž kmitat. Senzory výchylky mohou pracovat na indukčním, kapacitním,

magnetickém, nebo optickém principu. Pro měření rychlosti se nejčastěji používají senzory zrychlení, tj. akcelerometry.

Akustická diagnostika [6] má spolu s předchozím typem mnohé společné a často se tyto metody doplňují. Tato diagnostika je založena na uvolňování energie neboli akustické emise, která v diagnostikovaném objektu vzniká na základě dynamických procesů vybuzení vnějšími nebo vnitřními silami. Tato energie je dále transformována na mechanické vlnění, které se materiálem šíří a má charakter elastické napěťové vlny. Po dosažení povrchu materiálu vzniká jeden či více modů vlnění šířící se povrchovým vlněním. Tyto signály jsou snímány piezoelektrickými snímači (např. $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ [6], LiNbO_3 , PVDF [8]), jejichž výstupní elektrické signály jsou přivedeny na vstup diferenciálního zesilovače. Vznikají dva druhy akustické emise – impulzní (nespojité) a spojitě.

Termodiagnostika [9, 10] je další z oborů, která se používá nejenom při diagnostice elektrických strojů, ale i v energetice a dalších jiných oborech. Pravidelné provádění termodiagnostiky má pozitivní vliv na snížení výrobních a provozních ztrát, zvýšení spolehlivosti a životnosti strojů a zařízení. Patří mezi nedestruktivní metody monitorování a vyhodnocování teploty povrchu diagnostikovaného objektu. Rozdělují se dva základní typy měření – dotykové metody a bezdotykové metody. Dotykové metody fungují na základě přímého kontaktu senzoru (majoritně termočlánků) s diagnostikovaným objektem a využívá se schopnosti vedení tepla. Podrobný popis lze najít v publikaci: [10]. Bezdotykové metody taktéž infradiagnostické metody fungují na principu snímání a vyhodnocování elektromagnetického záření, jež vyzařuje diagnostikovaný objekt [6]. Elektromagnetické záření využívané pro tento typ měření se pohybuje v oblasti vlnových délek mezi $0,4 \mu\text{m}$ až $25 \mu\text{m}$, tj. oblasti viditelného spektra a oblasti infračerveného spektra. Hlubší teorii této problematiky poskytuje publikace: [9].

Tribodiagnostika je využívána v problematice zajišťování maziv, analýzy olejů a dalších technických kapalin pro určení technického stavu třecích ploch diagnostikovaného objektu [2]. Dle [1] lze opotřebení dělit na adhezivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Vhodnou analýzou technické kapaliny nebo oleje lze získat diagnostickou informaci o stavu různých částí zařízení a tím poměrně přesně předpovědět blížící se poruchu celého systému. Při analýze maziv se většinou využívá více metod. Lze uvést atomovou spektrometrii, která slouží pro zjištění rozsahu vzniku kovových částic v daném mazivu. Dalším metodou je ferrografie, která umožňuje třídít a separovat kovové

částice v provozním mazivu podle jejich velikosti. Využití tribodiagnostiky nacházíme u všech mechanických systémů obsahující okruh s cirkulujícími technickými kapalinami. [2]

Defektoskopie odhaluje skryté povrchové a vnitřní nedokonalosti materiálů nedestruktivními metodami. Při diagnóze vad se zkoumají především trhliny, různé nehomogenity či strukturální deformace, které dávají prostor pro vznik určitých jevů, jako jsou částečné výboje nebo prostorový náboj. Je využito metod kapilárních, odporových, magnetických, teplotních nebo defektoskopií vířivými proudy. Při zkoumání vnitřních vad je využito ultrazvukových nebo rentgenových metod. Principiální popis jednotlivých metod defektoskopie lze najít v publikaci: [6].

Elektrodiagnostika zahrnuje celou řadu specializovaných metod měření od silové elektrotechniky až po řídicí elektroniku [2]. V silové elektrotechnice je především sledován stav elektroizolačních systémů, jelikož představují nejcitlivější článek z hlediska celkové spolehlivosti VN systémů a zařízení. Tabulka 1 demonstruje typický podíl selhání VN zařízení v důsledku selhání izolačního systému. Podrobnější přehled a popis metod elektrodiagnostiky strojů, které jsou vzhledem k charakteru práce zaměřené na diagnostiku izolačního systému, jsou uvedeny v následující kapitole.

Tabulka 1 – Poruchovost jednotlivých prvků VN soustavy a vyjádření jejich příčin z hlediska poruchovosti EIS [11]

Typ zařízení	Příspěvek k poruše VN systému [%]	Porucha v důsledku poruchy EIS [%]
Izolátory	35	90
Generátory	15	47
Transformátory	12	84
GIS a rozvodny	15	95
Výkonové kabely	10	89

2 DIAGNOSTIKA ELEKTROIZOLAČNÍHO SYSTÉMU ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Jak bylo zmíněno, izolační systém každého VN systému a zařízení je z pohledu celkové spolehlivosti nejcitlivější článkem v celém řetězci. Životnost VN stroje je do jisté míry dáno životností izolačního systému vinutí. Konec funkčnosti izolačního systému končí ve chvíli, kdy napětí na libovolném izolačním prvku stroje překročí průrazné napětí. Z tohoto důvodu jsou dále uveden přehled nejčastěji používaných diagnostických metod a zkoumaných parametrů charakterizujících izolační systém.

2.1 Smyslové kontroly

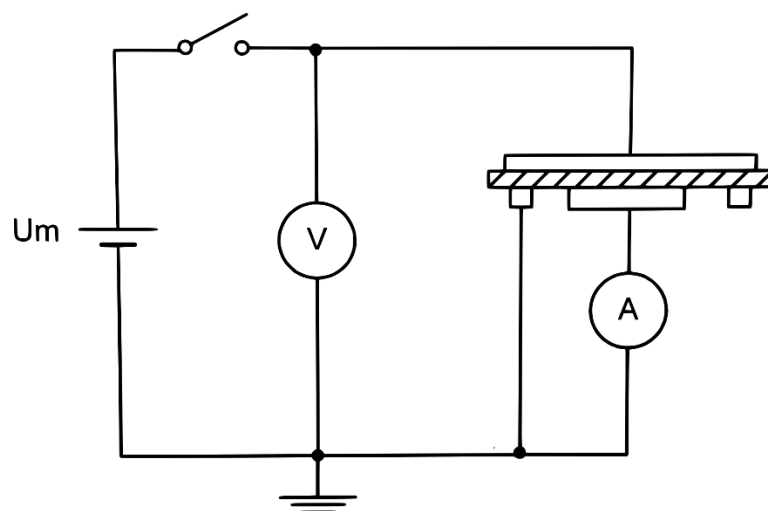
Jedná se především o vizuální kontroly všech částí a prvků elektrického zařízení. Od hodnotících pracovníků se vyžaduje jistá fundovanost a zkušenosti, jelikož je tato kontrola zatížena subjektivitou. Byly provedeny studie, které tuto kontrolu považují za velmi důležitý diagnostický postup. S využitím této metody lze například zjistit uvolnění drážkových klínů, stav úvazků čel vinutí, čistota vinutí, různé praskliny, apod. [7]

2.2 Stejnoseměrné metody

Po přiložení stejnosměrného napětí na izolační systém jím protéká proud skládající se ze tří složek. Je jím kapacitní proud vyvolaný vnitřním odporem zdroje, absorpční proud, jež vzniká z důvodu polarizace a vodivostní proud, který protéká izolací a způsobuje činné ztráty. Z tohoto důvodu se často zjišťují dva parametry – zdánlivý izolační odpor a polarizační indexy [7].

2.2.1 Zdánlivý izolační odpor

Zdánlivý izolační odpor R_{iz} a je definován jako poměr stabilního stejnosměrného napětí připojeného na izolační prvek (bez náboje) a proudu protékajícím v dohodnutém čase. Hodnota R_{iz} je závislá na míře absorbované vlhkosti izolace, znečištění, produktech degradace a také teplotě diagnostikovaného stroje. [3] Nejběžněji se používá přímá voltampérová metoda [1], viz obrázek 6. Další používané metody měření izolačního odporu obsahuje publikace: [12].



Obrázek 6 - Voltampérová metoda pro měření izolačního odporu (překresleno z [1])

Měření izolačního odporu musí být prováděno v co nejstálějším stavu protékajícího proudu. Z tohoto důvodu by měl být měřen minimálně po dobu 60 s. Hodnoty izolačních odporu u generátorů při teplotě 20° C se dle [3] pohybují:

- $R_{iz60} = 600 \text{ M}\Omega$ u termoplastického EIS (v čase $t = 60 \text{ s}$),
- $R_{iz600} = 800 \text{ M}\Omega$ u reaktoplastického EIS (v čase $t = 600 \text{ s}$).

2.2.2 Polarizační index

Dalším zkoumaným parametrem při stejnosměrných měřeních je polarizační index. Pro diagnostiku elektrických strojů, přesněji na jejich vinutí a částech je nejběžněji používán deseti minutový polarizační index p_{i10} . Ten je definován jako poměr zdánlivého izolačního odporu v první R_{iz60} a desáté minutě R_{iz600} po připojení měřícího napětí na diagnostikovanou izolaci. [7] Další používaná je metoda založená na vyhodnocování časových závislostí absorpčních proudů, viz [12]. Polarizační index vypovídá o stavu navlhnutí izolace a o jejím znečištění. Přibližné hodnoty p_{i10} pro termoplastickou izolaci jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2 – Přibližné hodnoty p_{i10} pro hodnocení stavu izolačního systému [3]

p_{i10}	stav izolace
< 1,5	velmi vlhká, znečištěná, zestárnutá
1,5 - 2,5	navlhlá, znečištěná
2,5 - 4,0	suchá, čistá
4,0 <	velmi suchá, čistá

2.3 Napěťové zkoušky

Z historického hlediska se tento typ diagnostiky řadí mezi nejstarší a podávají informaci o elektrické pevnosti E_p dané izolace. Jejich využití lze majoritně spatřit v případech, kdy lze znehodnocenou izolaci okamžitě vyměnit. Všechny tyto zkoušky se provádějí v režimu off-line. Tento způsob diagnostiky lze dělit na zkoušky výdržné nebo na zkoušky přeskokové. [1, 7] Schéma zapojení pro střídavá, resp. stejnosměrná měření na statorovém vinutí demonstruje obrázek 7.

2.3.1 Zkoušky střídavým napětím

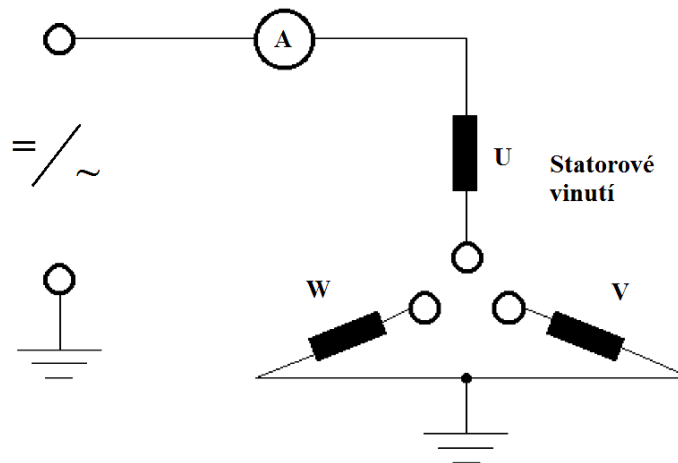
Zkoušky jsou prováděny buď při průmyslovém kmitočtu, nebo při velmi nízkém kmitočtu (0,1 Hz). Napětí se připojí na zkoušený objekt (vývody vinutí), druhý na kostru stroje vodivě spojenou se zemí. Napětí s průmyslovým kmitočtem je následně zvyšováno na hodnotu zkušební napětí a ve standartních situacích udržováno po dobu alespoň 60 s. Napětí s kmitočtem 0,1 Hz je běžně udržováno po dobu 10 minut. Hodnoty zkušební napětí definuje norma ČSN 35 0000. Zkoušený objekt vyhovuje zkoušce přiloženým napětím, pokud nedojde k přeskoku, resp. průrazu a zároveň nedošlo v průběhu zkoušek k zvyšování protékajícího proudu izolací. Nevýhodou zkoušek průmyslového kmitočtu je nutnost velmi výkonného zdroje napětí, což částečně potlačují zkoušky při nízkém kmitočtu. [1, 3]

2.3.2 Zkoušky stejnosměrným napětím

Zkoušky stejnosměrným napětím se provádějí obdobně jako u střídavých zkoušek. Oproti střídavým zkouškám je třeba méně výkonného zdroje napětí. Nicméně zkušební napětí je na izolaci rozloženo v poměru odporů namísto kapacit při střídavých zkouškách. Velikost zkušební napětí rovněž definuje norma ČSN 35 0000. Činitel zvlnění zkušební napětí by neměl přesáhnout hodnotu 3 % [1]. Vztah mezi střídavým a stejnosměrným napětím je definován vztahem:

$$U_{Zss} = 1,7U_{Zst}, \quad (1)$$

kde U_{Zss} [kV] je stejnosměrné zkušební napětí a U_{Zst} [kV] je efektivní hodnota střídavého zkušební napětí.



Obrázek 7 - Schéma zapojení napěťové zkoušky statorového vinutí [3]

2.3.3 Zkoušky impulzním napětím

Tyto zkoušky se provádějí z důvodu přiblížení charakteru napěťových zkoušek s kmitočtem 50 Hz. Používá se především při testování vícenásobných vinutích, přičemž namáhání izolace je omezeno na malou část vinutí v oblasti svorek napájení. Standartní zkušební postupy jsou popsány v publikaci: [1, 12]. Modernější srovnávací zkouška impulzním napětím je popsána v publikaci: [3].

2.4 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$

Ztrátový úhel $\text{tg } \delta$ je definován jako tangens úhlu, o který se liší posun fáze proudu zkoušené izolace od fázového posunu proudu ideálního dielektrika [7]. Ze změn průběhů $\text{tg } \delta$ v závislosti na napětí lze zjistit stav izolačního systému, jelikož je spojen se ztrátovými pochody, jež způsobují zahřívání izolace. Tuto skutečnost popisuje vztah: (2). Pro jeho zjištění se nejčastěji používá Scheringův můstek, jehož pomocí se zjišťuje i kapacita a odpor měřené izolace. Schéma a další metody lze najít v publikaci: [1]. Při hodnocení velikosti ztrátového činitele se vychází ze srovnávání jeho velikosti s velikostí $\text{tg } \delta$ z předchozích měření nebo před uvedením stroje do provozu. Podrobnější informace poskytují prameny: [3, 12].

$$P_z = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_c \cdot \text{tg } \delta = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg } \delta \quad (2)$$

Na základě tohoto měření ztrátového činitele se často vyhodnocuje další parametr, je jím časová konstanta τ (pro stroje většinou desetiminutová konstanta τ_{600}), která je definována jako součin zdánlivého izolačního odporu a kapacity měřené izolace. Doba časová konstanty nezáleží na geometrických rozměrech izolačního systému vinutí stroje, tudíž lze porovnávat kvalitu izolace u různých typů strojů. [3]

2.5 Měření napěťové závislosti elektrické vodivosti

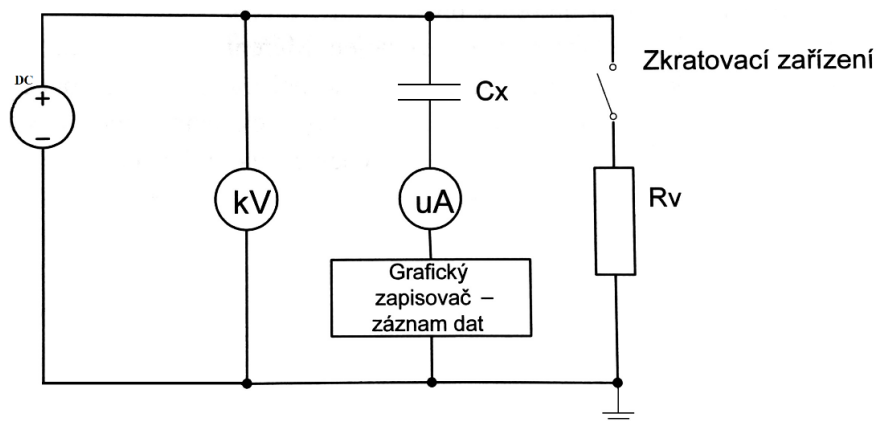
Velikost protékajícího proudu izolací pod napětím je úměrná její kvalitě. Charakter grafického záznamu protékajících proudů izolací systému je dán stavem, ve které se daná izolace nachází, tj. vlhkost, degradace, etc. Tato metoda vychází z teorie tepelného průrazu a bere v potaz mechanismy elektrické vodivosti v izolantech. Pro energetickou rovnováhu mezi teplem v izolantu vznikajícím a teplem odváděným platí vztah:

$$U^2 G = A (T - T_0), \quad (3)$$

kde U je napětí, G je vodivost izolace, T je teplota izolace, T_0 je teplota okolí a A je činitel přestupu tepla do okolí. Vzhledem k závislosti vodivosti na teplotě má závislost:

$$U^2 = f(T) \quad (4)$$

lokální maximum při kritickém napětí U_k a kritické teplotě T_k , při jejíž hodnotě je tepelná rovnováha přípustná. Při vyššího napětí nastává nestabilní stav a teplota izolace plynule roste až do tepelného průrazu. [1, 3] Schéma měření napěťové závislosti je na obrázku 8.



Obrázek 8 - Schéma pro měření napěťové závislosti vodivosti [1]

2.6 Měření kapacity izolace

Tato zkouška vychází z předpokladu, že izolace (např. vinutí transformátoru) má stejné hodnoty kapacity při zkouškách různých hodnot kmitočtu zkušebního napětí při různých teplotách. Při znehodnocení izolace (navlhnutí, opotřebení) vykazují hodnoty kapacit vinutí C_2 a C_{50} různou velikost. Dle [1] jsou používány zkušební napětí o kmitočtech 2 Hz a 50 Hz, při teplotách vinutí 20°C a 80°C . Pro transformátor ponořený v oleji se vyhodnocuje poměr C_2/C_{50} , při vyjmutí z oleje se vyhodnocuje poměr $\Delta C/C$, kde ΔC vyjadřuje rozdíl kapacit C_2 a C_{50} a veličina C představuje přírůstek hodnoty kapacity proti kostře stroje. Tyto poměry dávají informaci o objemovém a povrchovém navlhnutí izolace. [1]

3 PROBLEMATIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Další jev, který lze v izolačních systémech VN strojů a zařízení diagnostikovat je informace o přítomnosti částečných výbojů. Dle normy ČSN EN 602 70 jsou částečné výboje (partial discharges, dale ČV) definovány jako: „*Lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči, a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče.*“ Obecně lze tento jev označit jako důsledek lokálního elektrického namáhání izolace či jejího povrchu, když napětí dosáhne kritické hodnoty, při které nedojde přímo ke ztrátě izolační vlastnosti daného EIS. Impulzy ČV se běžně projevují jako impulz s dobou trvání méně než 1 μ s [1]. Měření aktivity ČV je velmi důležitou diagnostickou procedurou, jelikož nám podává informaci o různých vlastnostech a stavu izolačního systému. V následujících podkapitolách bude uvedena jejich charakteristika a metody diagnostiky točivých strojů a transformátorů z pohledu toho jevu.

3.1 Druhy částečných výbojů

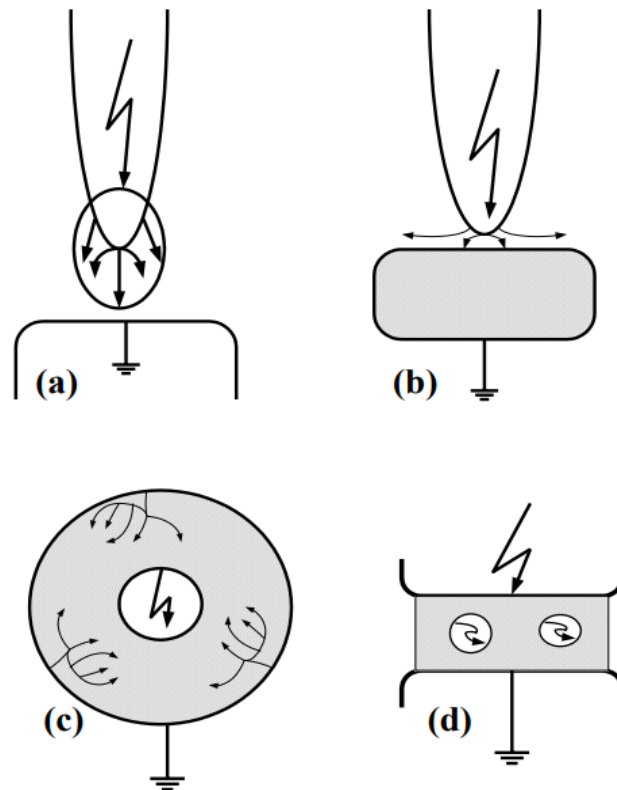
Částečné výboje lze dle místa jejich vzniku obecně dělit na tři základní druhy – vnější, vnitřní, povrchové [1].

Vnější výboje vznikají v plynném prostředí okolo elektrod malých poloměrů či zakřivení. Nejčastěji jimi jsou - korónové výboje, trichelovy impulzy nebo doutnavé výboje [7]. Tyto druhy výbojů vznikají především na energetických vedeních, na různých armaturách VN zařízení, atd.

Vnitřní výboje vznikají nejčastěji v plynném prostředí uzavřeném uvnitř pevného či kapalného dielektriky (např. vzduchové bublinky, vakuoly). Do této kategorie lze zařadit i fenomén elektrického stromečku. Vnitřní výboje vznikají z důvodu technologické nedokonalosti výroby izolací, jelikož každá izolace obsahuje vnitřní nedokonalosti. Tvar, velikost a poloha dutinek v izolaci silně ovlivňuje velikost a počet impulzů vyvolanými částečnými výboji. [11]

Povrchové výboje vznikají u elektrod na rozhraní pevného a plynné izolace [1]. Typickým zástupcem těchto výbojů jsou klouzavé výboje. Nutno dodat, že je nutné splnit podmínku dostatečně velké tangenciální složky intenzity elektrického pole na rozhraní pevné a plynného izolantu [7].

Obrázek 9 demonstruje typické modelové uspořádání pro různé typy ČV v izolačních systémech. Nutno dodat, že existuje celá řada variací modelových uspořádání pro ČV, ty lze dohledat v publikacích: [1, 7].



Obrázek 9 – Různé typy ČV [13] (a) Koróna, (b) Povrchový výboj, (c) Stromečkový kanál, (d) Vnitřní výboj

3.2 Parametry charakterizující částečné výboje

Pro kvantifikaci ČV aktivity je nutné definovat charakteristické parametry výbojů. Následující parametry jsou definovány normou ČSN 60270.

Zdánlivý náboj impulzu q – je takový náboj, který po přivedení na svorky zkoušeného objektu během velmi krátkého času způsobí krátkodobou změnu napětí mezi elektrodami, která by odpovídala změna při působení ČV.

Fázový úhel φ_i a čas výskytu t_i impulzu ČV - je dán rovnicí (3), kde t_i je okamžitá doba výskytu ČV od předešlého kladného průchodu zkušební nulou a T doba periody zkušební napětí.

$$\varphi_i = 360 * \left(\frac{t_i}{T}\right) \quad (3)$$

Četnost impulzů n – vyjadřuje střední hodnotu proudových impulzů vyvolaných výbojovou činností za dobu v určitém časovém intervalu.

Střední proud částečných výbojů I – vyjadřuje střední proud ČV, jako integrální veličinu danou součtem zdánlivých nábojů za jistý časový interval T , viz rovnice (4).

$$I = \frac{1}{T} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i| + \dots + |q_m|] \quad (4)$$

Součtový náboj Q – vyjadřuje součet zdánlivých nábojů za jistý časový interval často za půlperiodu napájecí

ho napětí.

Střední kvadratický součet D – vyjadřuje součet druhých mocnin velikosti zdánlivých nábojů za jistou dobu časového intervalu T , dle rovnice (5).

$$D = \frac{1}{T} [|q_1^2| + |q_2^2| + \dots + |q_i^2| + \dots + |q_m^2|] \quad (5)$$

Výkon částečných výbojů P – vyjadřuje střední hodnotu výkonu impulzů ČV na svorkách testovaného objektu za dobu T výbojové aktivity, dle rovnice (6). Hodnota P může nabývat i záporných hodnot.

$$P = \frac{1}{T} [|q_1 u_{\check{c}v1}| + |q_2 u_{\check{c}v2}| + \dots + |q_i u_{\check{c}vi}| + \dots + |q_m u_{\check{c}vm}|] \quad (6)$$

Zkušební napětí částečných výbojů – je napětí přiložené na zkoušený objekt danými měřicími postupy pro ČV, při kterém by zkoušený objekt neměl vykazovat nadlimitní úroveň předepsaných ČV.

Zapalovací napětí částečných výbojů U_i – vyjadřuje nejnižší hodnotu testovacího napětí, po kterém dojde ke stabilnímu udržení výbojové aktivity ČV za předpokladu plynulého zvyšování napětí z nižší hodnoty, kdy testovaný objekt stabilní ČV nevykazoval.

Zhášecí napětí U_e – vyjadřuje nejnižší hodnotu napětí, při kterém ČV nevykazují stabilní aktivitu za předpokladu, že testovací napětí bylo plynule snižováno z hodnoty, při které testovaný objekt vykazoval stabilní ČV aktivitu.

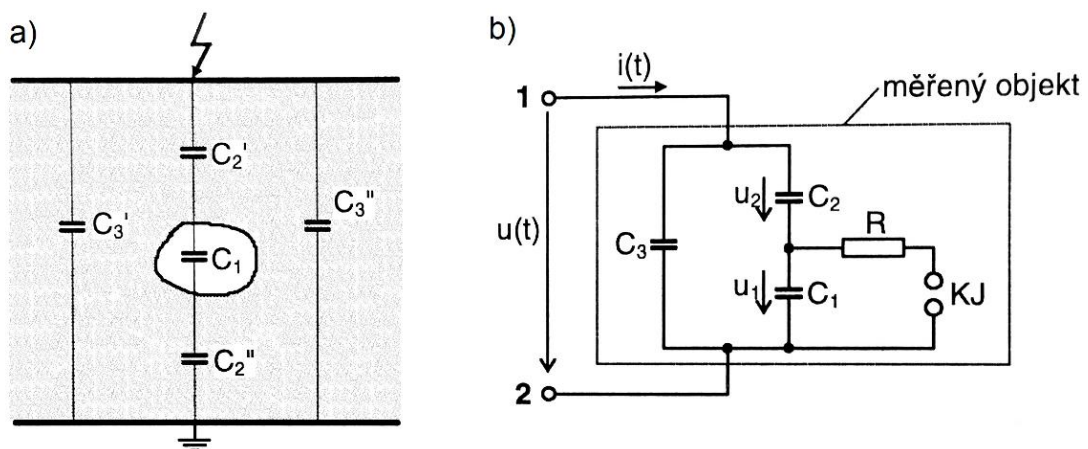
3.3 Částečné výboje při střídavém a stejnosměrném napětí

Střídavá přenosová vedení se potýkají s řadou provozních obtíží, tj. problémy se stabilitou, nutnost kompenzace účinníku a řadou dalších obtíží. Dalším faktorem jsou v současnosti se rozvíjející decentralizovaná distribuční soustava obsahující nespočet obnovitelných zdrojů energie, které vyrábí stejnosměrný proud. Transformace na stejnosměrné přenosové sítě je jednou z možných variant, které by mohli zlepšit

efektivitu přenosu elektrické energie. Již existuje řada projektů, jako jsou plánované propojení stejnosměrných přenosových linek mezi Severní a Jižní Amerikou, střední Evropou a Skandinávií, Evropou a Afrikou, střední Asií s Indonésií atd. Dále je plánována výměna přenosových soustav ultra-vysokého napětí za stejnosměrné soustavy. Tyto změny jsou plánovány ve vysoce urbanizovaných oblastech, kde je nutné navýšení přenášeného výkonu a nejsou zde kapacity pro výstavbu nových střídavých soustav. Z tohoto důvodu je nutné věnovat pozornost chování ČV při stejnosměrném napětí a zkoumat účinky DC na EIS strojů a zařízení. Zkušenosti s provozem stejnosměrných vedení jsou ve srovnání se střídavými linkami nižší a pro diagnostiku ČV při stejnosměrném napětí nejsou zavedeny žádné normy a standardy.

3.3.1 Částečné výboje při střídavém napětí

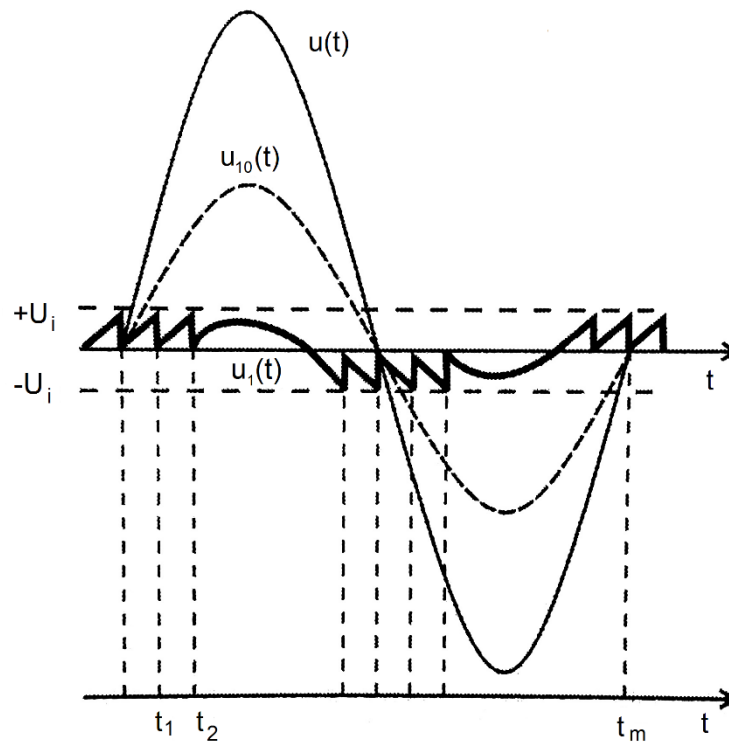
Teorie částečných výbojů při střídavého napětí je v současné době poměrně zvládnutou problematikou. Jednoduchým zidealizovaným modelem může být trojkapacitní model (Obr. 10), kde C_1 představuje kapacitu dutiny, C_2 je kapacita zbytkové části zdravé izolace v sérii s dutinou, C_3 je kapacita neporušené části izolace, R je odpor výbojového kanálu při působení výbojové činnosti na kulovém jiskřišti KJ.



Obrázek 10 - Náhradní schéma pro vnitřní ČV [7] (a) Pevný izolant s vnitřní plynnou dutinou (b) Zjednodušené náhradní schéma

Vzhledem k výrobním nedokonalostem obsahují izolační materiály ve své struktuře různé plynné nehomogenity. Tyto strukturální vady a dutiny jsou za provozu zatíženy elektrickým polem. Pokud dojde k překročení maximální elektrické pevnosti dané nehomogenity, dochází k působení ČV, viz obrázek 11. Protože není možné měřit skutečný zdánlivý náboj, jsou pozorovány pouze vnější projevy chování ČV. Napětí $u_1(t)$ představuje velikost intenzity lokálního pole v dutině. Napětí $u(t)$ představuje napájecí napětí a $u_{10}(t)$ je napětí na C_1 v případě, že nedošlo k výboji na dutině. Pokud napětí u_1

dosáhne hodnoty zapalovacího napětí U_i , dochází k působení výboje, který vyrovnává potenciály protilehlých povrchů dutiny. Při působení výbojové činnosti náboje rekombinují, dochází k oslabení vnitřního elektrického pole a dochází ke ztrátě podmínky udržení výboje. S rostoucím vnějším polem se opět zvyšuje intenzita vnitřního elektrického pole, což vytváří podmínku pro opakování výbojové činnosti.



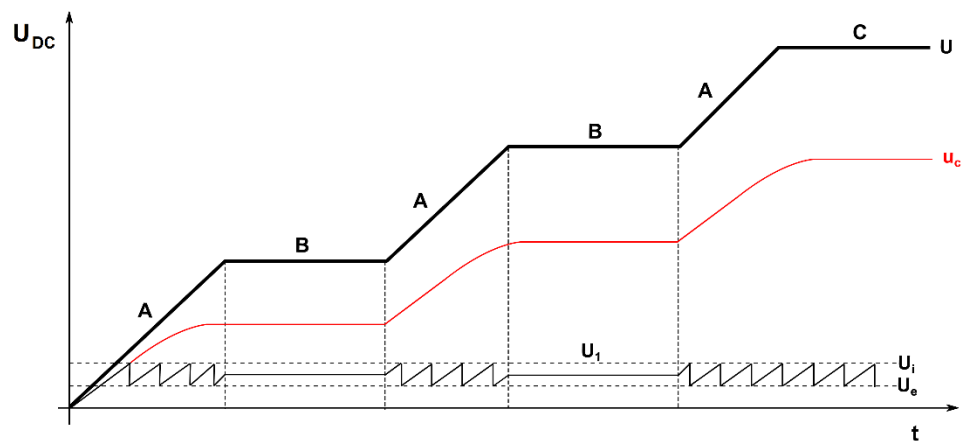
Obrázek 11 - Časový průběh střídavého napětí vnitřního ČV

3.3.2 Částečné výboje při stejnosměrném napětí

Teorie chování ČV při působení stejnosměrného napětí nebyla k dnešnímu dni přesně zpracována. Fyzikální fundament se však neliší od ČV při střídavém napětí. Musí být splněny dvě základní podmínky, tj. musí být dosaženo vyšší intenzity elektrického pole, než je velikost elektrické pevnosti dané dutiny. Druhou podmínkou je přítomnost prvního elektronu, který odstartuje výbojovou činnost.

V případě střídavého napětí se orientace elektrického pole periodicky mění. Výboj vyrovnává potenciály protilehlých dutin a vytváří vnitřní lokální pole působící proti vnějšímu elektrickému poli. Náboj uvolněný výbojem se pohybuje ve směru danou orientací k příslušné elektrodě. Takto je pod střídavým napětím vytvořeno vnitřní elektrické pole způsobené výboji, jež mění polaritu. V případě stejnosměrného napětí má velikost elektrického pole konstantní hodnotu a výbojem uvolněný náboj se pohybuje pouze v jednom směru, což má na následek vznik prostorového náboje.

Při nárůstu stejnosměrného napětí lze pozorovat obdobné chování ČV jako při působení střídavého napětí. Se zvyšujícím se přiloženým napětím se rovněž zvyšuje intenzita elektrického pole na dutině, což je provázáno s výbojovou činností, viz obrázek 12A. Následuje zpoždění, při kterém náboj rekombinuje a dochází k obnově vnitřního elektrického pole. Pokud napětí dále roste, vzniká opět podmínka pro vznik výbojové činnosti. Když dojde k ustálení napětí na konstantní hodnotu a velikost U_1 nepřekročí hodnotu zapalovacího napětí na dutině, nebude probíhat žádná výbojová činnost, viz obrázek 12B. V případě, že hodnota vnějšího elektrického pole dosáhne úrovně, kdy velikost intenzity pole dutiny bude vždy vyšší, než hodnota intenzity pole způsobující překročení U_i pro zapálení ČV, vznikne výbojová činnost, jež udrží svoji aktivitu v podobě např. jiskření, viz obrázek 12C. [14]

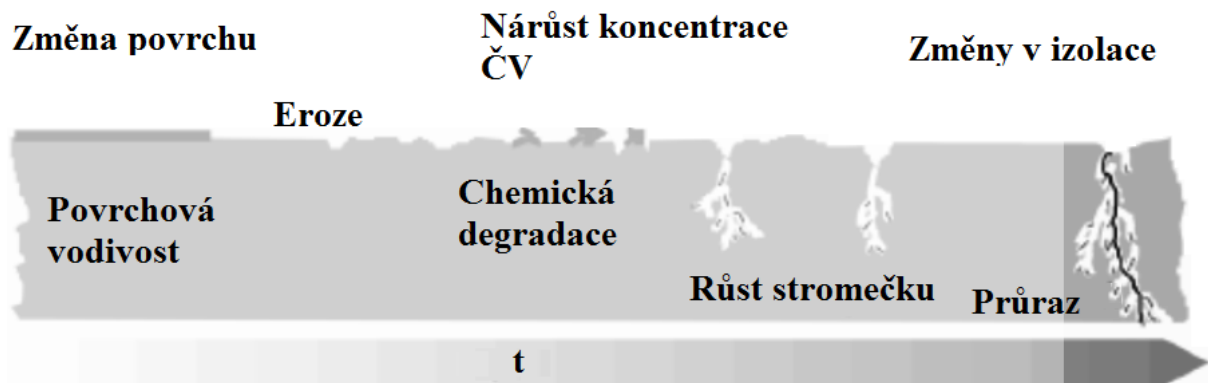


Obrázek 12 - Průběh stejnosměrného napětí vnitřního ČV (převzato z [14])

3.4 Vliv částečných výbojů na izolační systém

ČV je možné sledovat v celé izolaci strojů jako je - vinutí statoru, průchodky, transformátorové lepenky, statorové drážky, apod. Všechny tyto izolační prvky nedosahují plně ideálních požadavků na svoji funkci a v důsledku různých technologických procesů, výrobních vad, provozního či přirozeného stárnutí vznikají podmínky pro vznik ČV. Dále platí, že všechny ČV mají destruktivní charakter na izolační systém, což dále ovlivňuje dobu životnosti izolace a snižuje jeho elektrickou pevnost, což může vést k totálnímu průrazu. Pro různé elektrické stroje lze identifikovat a diagnostikovat celou škálu typů ČV. Obecně lze účinky ČV na EIS dělit dle charakteru na elektro-erozivní, chemické nebo tepelné. Nutno dodat, že v reálných podmínkách působí všechny degradační účinky společně, přičemž nemusí být všechny výlučně spjaty s výbojovou činností.

Elektro-erozivní účinky vznikají pokud v dutině působí elektrický oblouk, jež je podmíněn vytvořením vodivé dráhy. Při vysokých koncentracích elektrického pole může dojít až k čistě elektrickému průrazu a vodivá dráha se následně rozšíří napříč izolací. Dalším negativním aspektem mohou být elektrony a ionty bombardující stěny dutiny, což způsobuje erozi stěn. Velikost dutiny se takto může zvětšovat, dokud nedojde k průrazu celého izolantu. Průběh postupného poškození izolantu demonstruje obrázek 13.



Obrázek 13 - Vývoj degradace izolantu do průrazu [15]

Chemické účinky jsou důsledkem chemických reakcí plynu a výbojů. V dutinkách může vznikat ozon, který společně s oxidy dusíku může za jistých podmínek vytvářet různé kyseliny dusičnou. Studie [15] uvádí, že vystavením materiálů LDPE a XLPE aktivitě ČV byl zjištěn vznik velkého množství oxidu uhelnatého a uhlíkatého společně s vodíkem. Tuto skutečnost potvrzují i další experimenty zanesené v této studii. Dále bylo zjištěno, že působení ČV má přímý vliv na zvýšení povrchové vodivosti stěn dutin. To je údajně způsobeno vznikem kapalných produktů, které mají povětšinou kyselý charakter. Tyto produkty poté vytvářejí elektrolytovou vrstvu. Je dokázáno, že povrchová vodivost může vzrůst až o sedm řádů.

Tepelné účinky mají především za následek tepelnou nestabilitu izolantu. Ačkoli dosahují ČV relativně nízkých energetických hodnot, jejich četným opakováním se izolant zahřívá a může pravděpodobně snížit hodnotu napětí tepelného průrazu. [7] Ve studii [15] bylo jedním z hlavních důsledků zvýšené teploty urychlení oxidace povrchu materiálu XLPE, kdy navíc docházelo k pronikání vzniklých oxidačních látek do objemu polyethylenu. Dalším zjištěním byla změna povahy vznikajících vedlejších produktů při působení ČV oproti produktům vzniklých za pokojové teploty. Z jiné studie vyplynulo, že epoxidová pryskyřice má tendenci při 80°C silně snížit působení ČV. Tento fakt je připisován „změkčení“ pryskyřice, jelikož část energie výbojů byla utlumena vlivem pohybu polymerních řetězců. Dále bylo dokázáno ve studii [16], že teplota má při vyšších

teplotách značný vliv na růst elektrických stromečků u již narušených materiálů. Vyplynulo, že s rostoucí teplotou je jejich růst urychlen a doba do poruchy je velmi snížena.

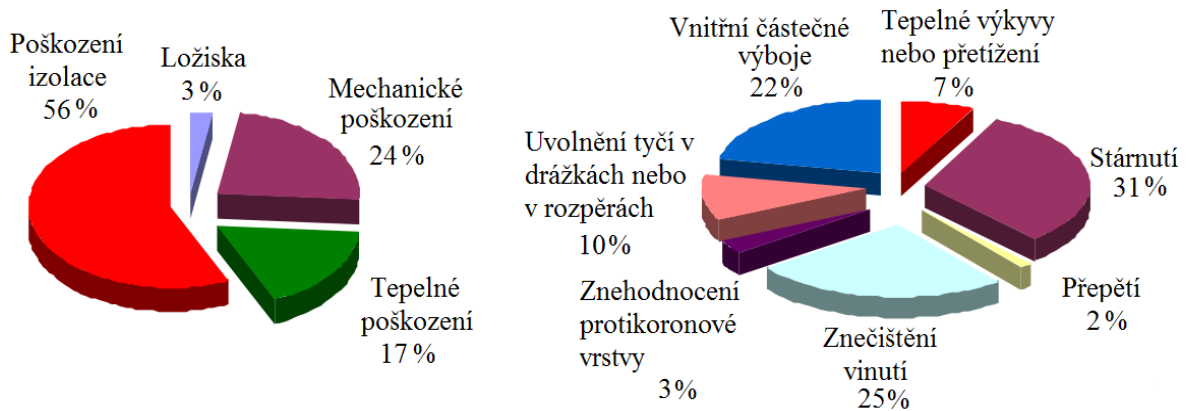
4 VYUŽITÍ MĚŘENÍ ČV PŘI DIAGNOSTICE IZOLAČNÍHO SYSTÉMU ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Měření ČV je již dlouhou dobu používáno jako účinný prostředek pro posouzení stavu vinutí statoru a jiných izolačních prvků. V posledním desetiletí došlo k nárůstu využívání on-line měřicích systémů, jelikož byly zlepšeny detekční a vyhodnocovací techniky, což je důvodem zvýšené pozornosti k tomuto přístupu. Kromě toho dochází k rychlému pokroku z pohledu klasifikace jednotlivých zdrojů částečných výbojů. Stále však existují některé faktory, které brání širšímu použití systému jako je komplexnost mechanismu ČV a šíření pulzu ve vinutí statoru, přítomnost šumů a rušení nebo problematika vyhodnocování více zdrojů ČV současně. V následující kapitole budou popsány typické závady elektrických strojů a jejich možná detekce pomocí ČV.

4.1 Poruchy izolačního systému elektrických strojů

Bylo provedeno několik statistických analýz týkajících se elektrických generátorů, ale většinou byly prováděny s malým množstvím vzorků nebo byly specifikovány pouze v určité části strojů, kde došlo k poruše. Nicméně nebylo provedeno hlubší zkoumání příčin poruch. Užitečnou statistiku přinesla publikace CIGRE [17], pracovní skupinou A1.10 v brožuře číslo 392. Publikace se zabývá hydrogenerátory, nicméně výsledky lze vztahovat na všechny typy točivých strojů. Celkový počet pozorovaných generátorů byl 1199 kusů. Bylo zaznamenáno a analyzováno 69 poruchových stavů.

Z obrázku 14 vyplývá, že 56% závad točivých strojů bylo důsledkem poškození izolačního systému stroje. Další poruchy vznikly v důsledku mechanického, tepelného a ložiskové poškození. Vnitřní ČV způsobují téměř jednu čtvrtinu závad. ČV mohou být vyvolány v důsledku nesprávného technologického procesu, nicméně není v současné době možné vytvořit naprosto homogenní izolaci, zejména v dnešní době, kdy se k výrobě EIS rotačních strojů používají i tříšložkové kompozitní materiály. Struktura tohoto izolačního materiálu může způsobit působení ČV, protože kombinace skleněných tkanin s pryskyřicí dávají prostor pro tvorbu malých dutin převážně naplněných vzduchem nebo i jinými plyny.



Obrázek 14 - a) Příčiny poškození hydrogenerátorů; b) Příčiny poškození izolačního systému [18]

Druhým nejčastějším problémem bylo způsobeno znečištěním vinutí. K tomuto problému také mohou přispívat částečné výboje, které působí erozivní účinky ve vinutí a nakonec vedou k selhání izolace. Provozní stárnutí je způsobeno mnoha vlivy, částečné výboje mohou být jedním z těchto parametrů.

Dle publikací [19–21] lze kategorizovat různé druhy ČV v důsledku různých vad a příčin dle tabulky 3. Specifikace těchto vad je popsána dále.

4.1.1 Vnitřní defekty izolačního systému

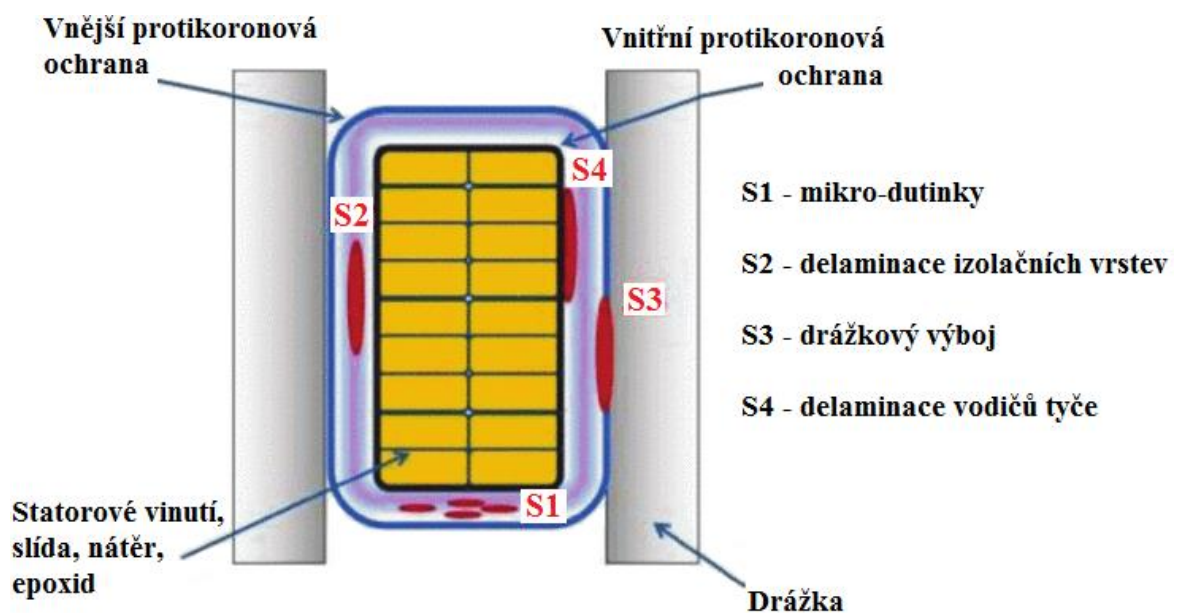
Vnitřní dutiny (S1 na Obr. 15): Výroba EIS je navržena tak, aby se minimalizovala tvorba vnitřní dutin v izolačním systému. Avšak každá izolace obsahuje řadu dutin, které jsou u rotačních strojů tvořeny především systémem slída-pryskyřice a u transformátorů olej-papír.

Vnitřní delaminace (S2 na Obr. 15): V hlavní části izolace vinutí mohou vznikat delaminace izolačních vrstev vlivem nedodržení technologických postupů při výrobě nebo během provozu vlivem mechanického či tepelného namáhání. Velké dutiny se mohou rozšiřovat podél velké plochy a vedou k působení vnitřních ČV s relativně vysoké energií, což výrazně snižuje životnost izolačního systému stroje. Tyto delaminace dále snižují tepelnou vodivost izolace a urychlují tak stárnutí nebo způsobují tepelnou nestabilitu. Z tohoto hlediska je měření aktivity ČV důležitým aspektem při hodnocení kvality této části izolace.

Rozhraní vodič/izolace (S4 na Obr. 15) – Vznik prostoru mezi vodičem a hlavní izolací je obvykle výsledkem přílišného tepelného namáhání. Tento jev velmi nebezpečný, protože může být vážně poškozena mezizávitová izolace nebo izolace svazku vodičů.

4.1.2 Poruchy v drážkách

Znehodnocení izolace může být způsobeno pohybem tyčí v drážce popřípadě v části, kde vinutí vystupuje z drážky. Vůle v drážce může vznikat z různých důvodů, tj. eroze materiálu vlivem ČV, obroušení, napadení chemikáliemi nebo technologickými nedostatky ve výrobě. Tyče uložené v drážce jsou navíc vystaveny silným elektromagnetickým silám během ustálených a přechodových stavů. Pokud nejsou řádně upevněny, může docházet k relativně velkému pohybu statorového vinutí vůči jádru a vést k odření izolace a ochranných vrstev v drážce. Tyto vůle mohou vést ke vzniku vibračního drážkového výboje nebo mohou zmenšit vzdálenost mezi tyčemi v čelech vinutí, což vede k přeskoku mezi fázemi. Vlivem provozních vibrací stroje mohou být generovány silné výboje, které dále vytváří další poruchy na hlavní izolaci vinutí. Nutno dodat, že v počátečním stádiu tohoto jevu tvoří drážkové výboje buď vibrační jiskření, nebo v nižším měřítku klasické ČV. Ačkoliv není známa přesná doba mezi začátkem tohoto jevu a finální poruchou izolace, studie prokazují, že může být velmi krátká. Z tohoto důvodu je vhodná diagnóza nezbytným krokem pro zavedení vhodné prediktivní údržby.



Obrázek 15 - ČV uvnitř drážky a izolační části [19]

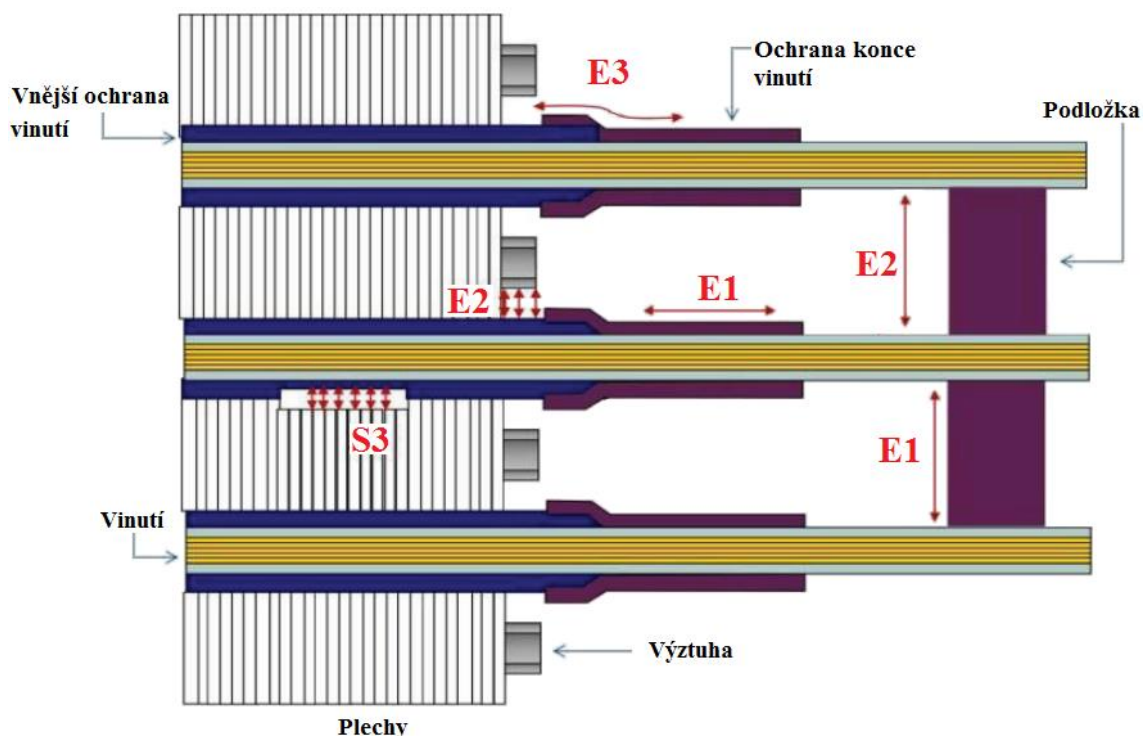
4.1.3 Poruchy na koncích vinutí

ČV mohou dále působit na různých místech konců vinutí (Obr. 16) vlivem působení silného elektrického pole. Pokud dochází k postupné degradaci vodivého či polovodivého povlaku pro řízení pole na konci vinutí (v důsledku slabé přilnavosti,

nevhodně použitých materiálů, znečištění, pórovitosti nebo tepelným účinkům) mohou vznikat klouzavé výboje, viz E3 na obrázku 16. Tyto klouzavé výboje způsobují postupné erozivní deformace izolačního materiálu a urychlují jejich stárnutí. Tento typ je za normálních okolností velmi pomalým degradačním mechanismem. Dále mohou povrchové ČV působit mezi fázemi nebo mezi fází a zemí na povrchu čel vinutí, viz E1 na obrázku 16.

4.1.4 Znečištění vlivem vodivých částic

Malé vodivé částice se mohou ve statoru objevit již z výroby, nedodržením pracovních postupů při údržbě nebo vlivem uvolnění komponent generátoru za provozu. Jak bylo zmíněno výše, možným zdrojem mohou být i erozivní procesy vlivem působení ČV, avšak nutno dodat, že tento příspěvek je tvořen až v pozdějších fázích degradace izolace. Vodivé částičky mohou ulpět na citlivých částech statoru nebo vedou ke znečištění statorového vinutí. To přispívá k lokálním částečným výbojům konkrétně mezifázové výboje nebo koróně na koncích vinutí. Dále mohou být strůjcem vzniku částečných výbojů stromečkového typu uvnitř izolace.



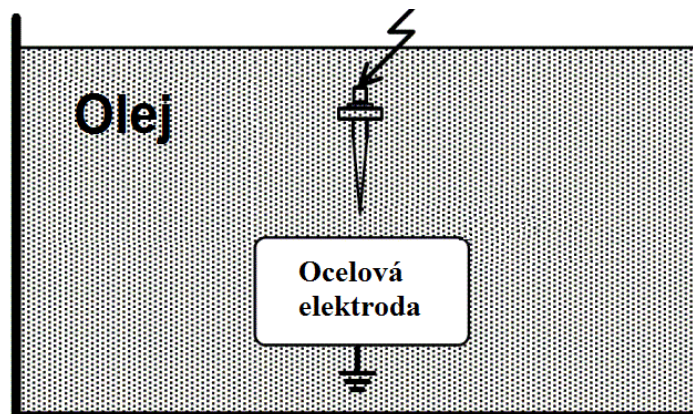
Obrázek 16 - ČV vznikající kolem drážky statoru [19] - E1: Povrchový výboj vlivem znečištění, E2: Korónový výboj - nedostatečná rozteč, E3 - Povrchový výboj vlivem špatného spojení

Kromě výše uvedených případů může docházet ke vzniku korónového výboje (E2 na Obr. 16) uvnitř stroje, avšak tento typ se u rotačních strojů většinou považuje za rušení

během měření ČV. Další typ výboje může vzniknout mezi dvěma statorovými tyčemi nebo mezi svorkovnicí a lisovaným prstencovým jádrem. Tento typ se nazývá mezerový výboj [19].

4.1.5 Znečištění transformátorového oleje

Na hranách konstrukce transformátoru, zejména ve vysokonapěťové části, vznikají korónové. Ty jsou jednou z příčin znečištění transformátorového oleje, který je takto kontaminován vodivými částicemi. Znečištění snižují elektrickou pevnost daného média. Pro potřeby výzkumu vyplynulo, že nejvhodnějším uspořádáním pro simulaci korónového výboje je uspořádání hrot – deska (Obr. 17), nicméně v reálných transformátorech je toto uspořádání často ve formě vodivé částice přichycené na stěně nádrže, nebo volně se pohybující se ve sloupci oleje. Částice nemusejí být v přímém kontaktu s elektrodou, aby se mohly projevovat strimérové výboje a z nichž plynoucí průrazy izolace. K průrazům izolace může docházet i bez přítomnosti vodivých částic. To je přičítáno nárůstu lokálního pole, které vzniká např. delaminací papírové izolace vinutí, existence dutin a zvýšené vodivosti v důsledku přítomnosti vody v oleji [22, 23].



Obrázek 17 - Uspořádání hrot-deska ponořené v oleji

Tabulka 3 - Charakteristika ČV a jejich příčiny v generátorech [24]

Typy ČV	Příčina	Místo vzniku	Frekvence [MHz]	Doba do selhání [roky]	Stupeň ohrožení
Vnitřní ČV	Vnitřní dutiny	VN vinutí	50	>30	Nízké
	Vnitřní delaminace			<10	Vysoké
	Delaminace mezi vodiči a izolací			<10	Vysoké
Drážkové ČV	Vibrační	Vinutí v drážkách	100	<2	Vysoké
	Čistě elektrické			>30	
	Vysokoenergetické			<1	
ČV na konci vinutí	Korona na konci vinutí	V čelech vinutí	500	>20	Normální
	Povrchové výboje			>10	
	Výboje mezi fázemi			>5	
Obloukový výboj	Zlomený vodič	Drážkové vinutí	>30	<1	Velmi vysoké
	Ve svárech				
Vibrační jiskření	Nevhodný návrh		>6,7	<4	Vysoké

5 PŘEHLED DIAGNOSTICKÝCH METOD MĚŘENÍ ČV V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

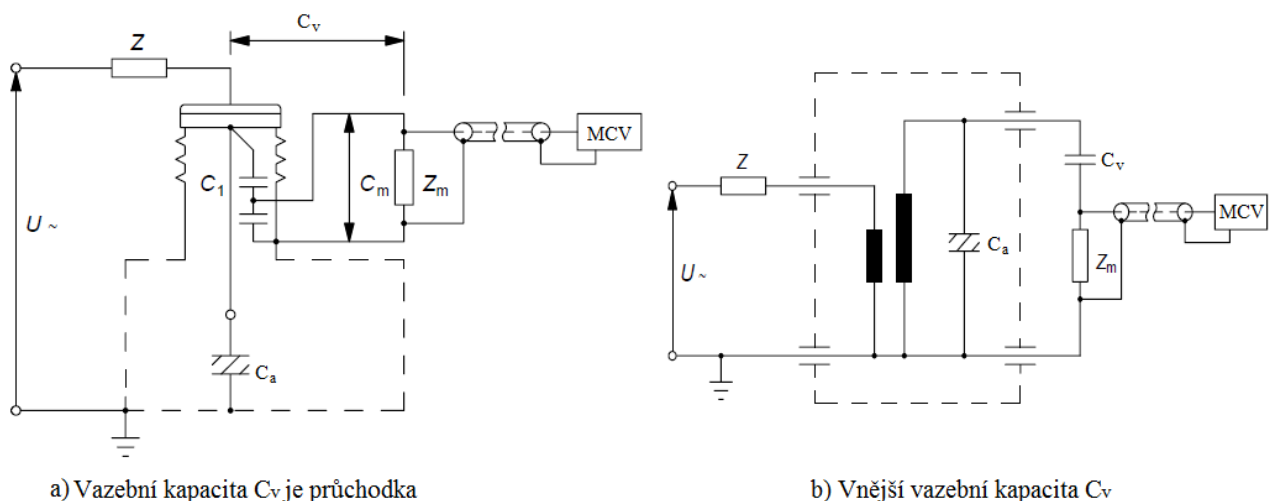
Pro analýzu chování ČV se používají různé metody měření v závislosti na charakteru elektrickém zařízení (GIS, transformátor, kabel, průchodka atd.). V této kapitole je uveden přehled metod diagnostikování ČV v elektrických strojích.

Metody měření ČV lze dělit dle [20, 25] na:

- Konvenční galvanické měřicí metody – úzkopásmová integrace ve frekvenční oblasti, širokopásmová integrace v časové oblasti
- Elektrické vysokofrekvenční metody HF/VHF (20 MHz až 300 MHz), UHF (300 MHz až 3 GHz)
- Akustické metody (10 Hz až 300 kHz)
- Optické metody
- Chemické metody

5.1 Konvenční galvanické měřicí metody

Tato detekční metoda je založena na snímání proudových impulzů $i(t)$ v paralelně zapojených kapacitách C_v a C_a přes snímací impedanci Z_m , viz obrázek 18. Na obrázku 18a je jako vazební kondenzátor využito vlastní kapacity průchodky ($C_v = C_1$) společně s kapacitou polepu průchodky C_m , která je paralelně připojena ke snímací impedanci Z_m . Jako měřicí impedance Z_m je používán RLC obvod (frekvenční rozsah do 10 MHz) nebo také vysokofrekvenční proudový transformátor (HFCT, frekvenční rozsah až 30 MHz). [7, 20] V případě, že kapacitní průchodka není k vyvedena (např. u starých transformátorů), je připojena vnější vazební kapacita paralelně k průchodce, viz obrázek 18b.



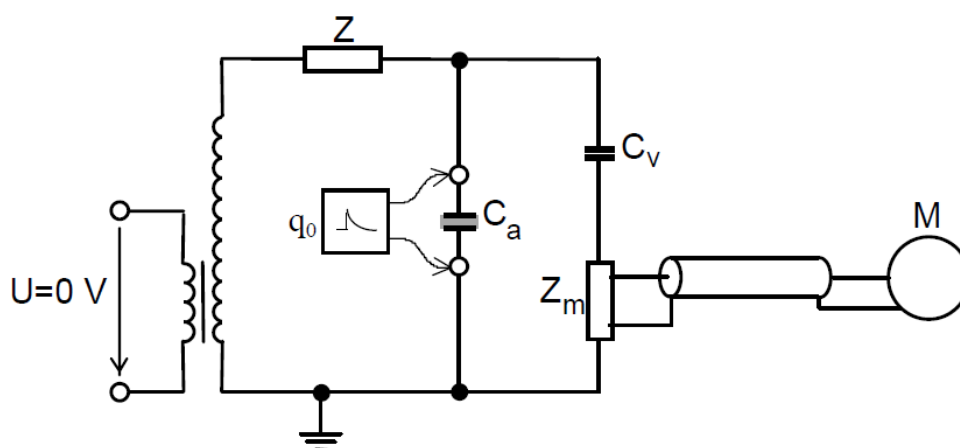
Obrázek 18 - Zapojení pro měření ČV konvenční galvanickou metodou [20]

Podle norem (IEC, IEEE) je měřeným parametrem velikost zdánlivého náboje q . Velikost zdánlivého náboje je udávána v pC a je integrálem proudového impulsu ČV detekovatelného např. v průchodkách transformátoru, fáze statoru stroje velkého výkonu. Integraci proudových impulsů ČV lze provádět buď v časové oblasti pomocí digitální osciloskopu nebo ve frekvenční oblasti (kvaziintegrací pásmovou propustí). Většina ČV systémů dostupných na trhu dle IEC 60270 používá dva typy pásmových systémů.

- Širokopásmový systém (šířka pásma 900 kHz, horní frekvence: 1 MHz)
- Úzkopásmový systém (Δf : 9kHz až 30kHz, střední frekvence: $50\text{kHz} \leq 1\text{MHz}$)

Odezvou úzkopásmového systému na impulsy ČV je přechodná oscilace s kladnými a zápornými špičkovými hodnotami. Širokopásmové měřicí systémy mají šířku pásma okolo 100 kHz, tudíž je jejich odezva na impulsy ČV dobře tlumená. Lze následně určit zdánlivý náboj a polaritu ČV. [25]

Před samotným měřením je nutné provést kalibraci měřicího obvodu. Schéma zapojení je na obrázku 19. V závislosti na velikosti kapacit měřicího obvodu (včetně parazitních) dochází při cestě od měřicích svorek na objektu ke vstupu do měřiče částečných výbojů ke zkreslení (změně tvaru) pulzů částečných výbojů a díky ztrátám i ke zmenšení přeneseného náboje [3]. Celý měřicí obvod je proto nutno kalibrovat známým nábojem a vlastní měření pak vztahovat na kalibrační hodnoty. Kalibrace měřicího obvodu se provádí při každém měření částečných výbojů, kromě rutinních testů, kdy se kapacita objektů nemění o více než $\pm 10\%$. [7]



Obrázek 19 - Kalibrace měřicího obvodu [7]

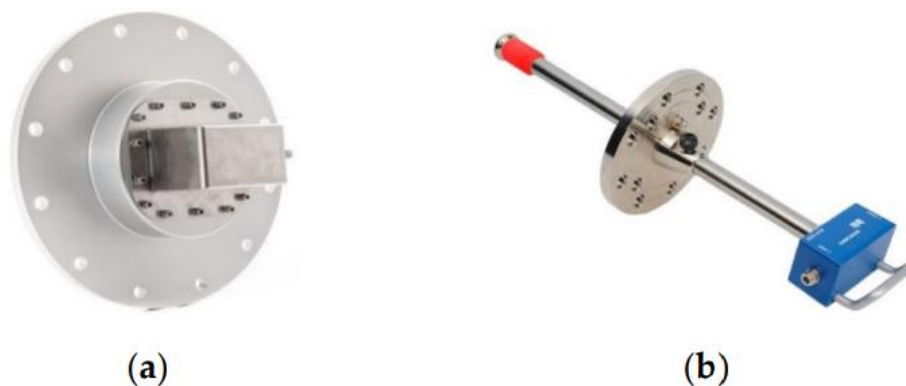
5.2 Vysokofrekvenční nepřímé metody

Vysokofrekvenční nepřímé metody jsou děleny podle velikosti kmitočtu signálu vyzářeného zdrojem ČV na ultrafrekvenční (UHF) a celou řadu vysokofrekvenčních

(HF/VHF) metod. ČV jsou spjaty s vyzařováním elektromagnetického vlnění a na jeho vyhodnocení jsou tyto metody založeny.

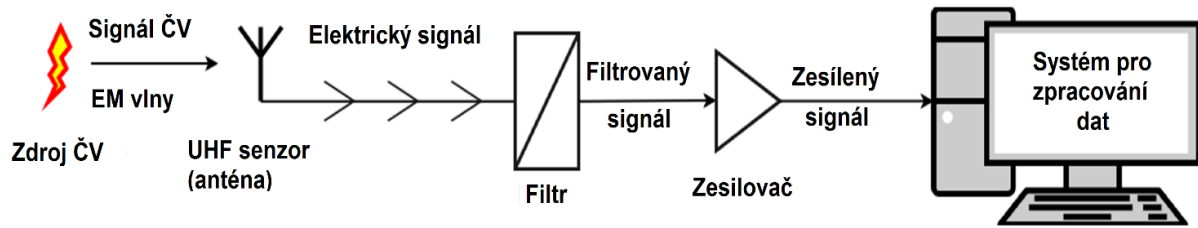
5.2.1 Ultrafrekvenční měření UHF

Ultrafrekvenční měření (UHF) je v současné době jedna z nejpokročilejších metod detekce částečných výbojů, která umožňuje i prostorovou lokalizaci zdroje signálu ČV. V nedávné době byly rozvinuty možnosti využití této metody i u výkonových transformátorů, kabelů, rozváděčů a zapouzdřených rozvodů. UHF měření je založeno na snímání vysokofrekvenčních signálů generovaných v případě působení výbojů. ČV impulzy jsou velmi rychlé ($<ns$), přičemž generují elektromagnetické vlny, jejichž spektrum dosahuje řádu 300 MHz až 3000 GHz. Z tohoto důvodu byly vyvinuty různé senzory, díky nimž jsou tyto signály detekovány (Obr. 20). Základním prvkem UHF senzoru je anténa. Typ a rozměry antény jsou dány možnostmi při samotné realizaci systému, tj. rozměry dielektrického okna a konstrukčním řešením transformátoru v daném místě. [26]



Obrázek 20 - Senzory UHF pro výkonové transformátory - (a) vnitřní snímač UHF; (b) čidlo Omicron UVS 610 UHF [26]

Jako systém zpracování signálu (Obr. 21) je běžně používán širokopásmový, čtyřkanálový (nebo více) osciloskop o vysoké vzorkovací frekvenci. V některých situacích, kde je potřeba on-line měření nebo analýzy ČV signálů se používá speciální monitorovací zařízení typu UHF, který je používán u například u GIS. Takové systémy přímo nedigitalizují „syrový“ UHF signál (kvůli vysoké vzorkovací frekvenci), ale používají se radiofrekvenční přijímače k zjištění amplitudy každé sady UHF signálu, jež odpovídá jednotlivým pulzům ČV.



Obrázek 21 - Obecný řetězec ultrafrekvenčních UHF metody [26]

Pro spolehlivou detekci ČV u velkých výkonových transformátorů při vysokých frekvencích UHF je nezbytné, aby signály emitované ČV byly co nejméně tlumeny. Z tohoto důvodu se UHF senzory vyrábějí v provedení senzorů pro olejové nádrže. Olejová nádrž transformátorů poskytuje vysoké elektromagnetické stínění proti vnějšímu rušení na frekvencích UHF (např. koróna, mobilní síť, radary atd.) Uvnitř nádrže dochází pouze k mírnému útlumu.

Velkou výhodou techniky UHF je vysoký poměr signál / šum. Pokud je signál generovaný zdrojem ČV měřen spektrálním analyzátozem, může být velmi dobře odlišen od šumu.

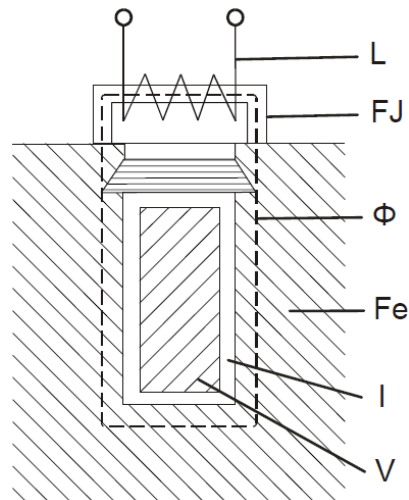
Citlivost měření je srovnatelná nebo spíše vyšší než u konvenčního galvanické metody měření ČV. Je nutné dodat, že neexistuje přímá korelace mezi intenzitou působících ČV detekovanou v pásmu UHF a zdánlivým nábojem. Nelze, tudíž určit velikost zdánlivého náboje podle standardů zanesených v IEC 60270. [26]

5.2.2 Další nepřímé VF metody

Metoda induktivně vázané sondy

Tato metoda patří mezi lokalizační metody, tudíž s ní lze do jisté míry detekovat místo ve statorovém vinutí točivého stroje, kde dochází k částečným výbojům. Snímač je tvořen feritovým jádrem C s navinutou cívkou, viz obrázek 22, kde L je vinutí cívky snímače, FJ je feritové jádro snímače, Fe jsou plechy statoru, I je izolační systém, V je statorové vinutí a Φ je uzavřený magnetický obvod jako induktivní vazba.

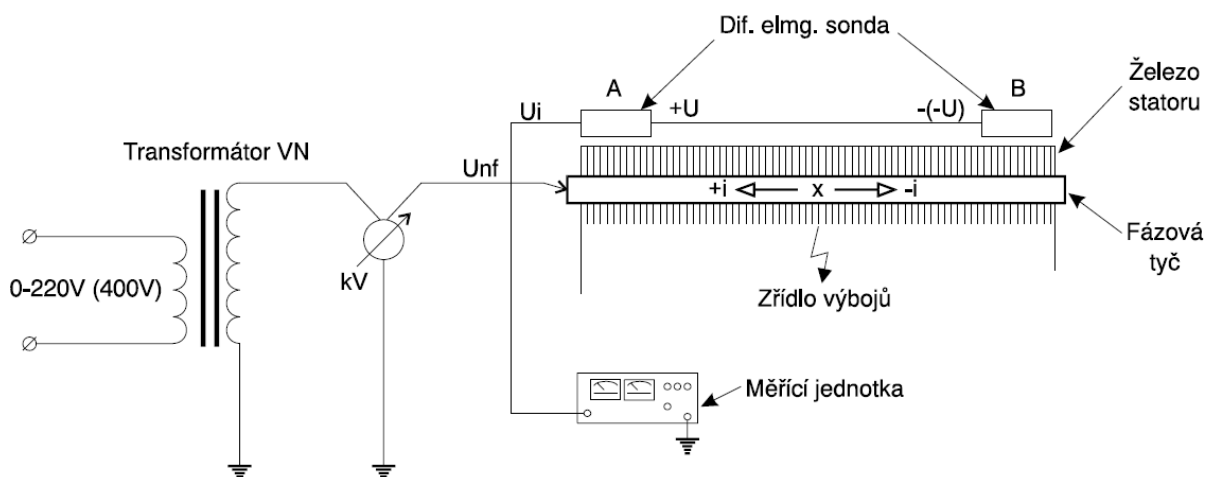
Přiložením snímače na drážku vznikne proudový transformátor, na jehož vinutí se indukuje VF signál o velikosti, která je úměrná vybíjecímu proudu částečného výboje. Nevýhodou této metody je jisté míry fakt, že měření je prováděno standardně, když je rotor vyjmutý. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodná pouze pro off-line diagnostiku. Zařízení pro přesné vedení sondy se zavádí do středu vrtání turboalternátoru.



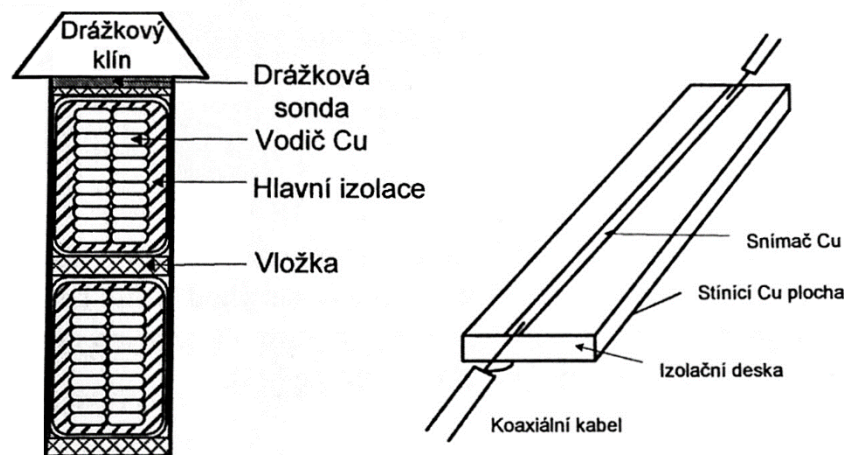
Obrázek 22 - Schéma zapojení induktivně vázané sondy ke drážce [3]

Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

Tato sonda je především využívána k měření ČV na jednotlivých drážkách daného statorového vinutí. Opět se jedná o lokalizační metodu, která se používá v off-line režimu měření, tj. při demontovaném rotoru stroje. Průduy ČV vyvolávají elektromagnetické pole a jejich impulzy se šíří danou fází vinutí oběma směry. Sondu tvoří dvě induktivní sondy elektricky zapojených proti sobě. Sonda se zapojuje na jednotlivé konce vinutí, viz sonda A a B na obrázku 23. Na obou sondách je indukováno stejné napětí úměrné velikosti náboje vybíjeného ve zřídle ČV. Pokud se zdroj ČV nachází mezi sondami, napětí jsou sečteny, jelikož mají stejnou polaritu. V opačném případě jsou signály odečteny vlivem jiné polarity napětí. Takto je potlačen vnější šum a signály ČV jiných drážek. [1, 3]

Obrázek 23 - Zapojení diferenciální elektromagnetické sondy [3]
Kapacitní drážková sonda

Tato sonda odstraňuje nevýhodu předchozích dvou metod, které jsou určeny pro diagnostiku v off-line režimu. Kapacitní sonda je již při výrobě zavedena do drážky pod drážkový klín a umožňuje snímat HF signály částečných výbojů za provozu. Sonda obsahuje izolační desku se stínící měděnou vrstvou, která je orientovaná směrem do vzduchové mezery a snímač tvořící měděný pásek na druhé straně. Sonda je konstruována s ohledem na velikost drážky. Názorný pohled umístění sondy poskytuje obrázek 24. Sonda rozpoznává aktivitu ČV v čelech vinutí nebo přímo z vnitřka drážky. Rozsah kmitočtu snímaných signálů se pohybuje mezi 10 MHz až 1000 MHz. Výhodou této sondy je odolnost vůči vnějšímu rušení. [1]

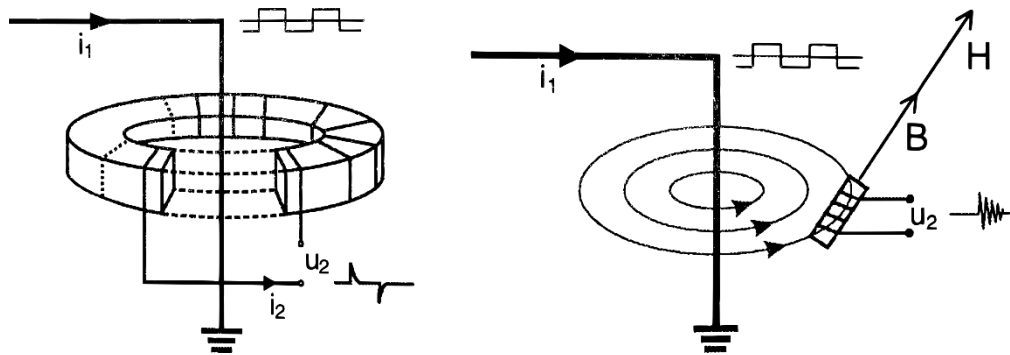


Obrázek 24 – Kapacitní drážková sonda [1]

Induktivní sondy

Induktivní sondy obecně vyhodnocují magnetickou složku elektromagnetického pole vyzářeného částečnými výboji. Podle typu dělíme toroidní a lineární sondy.

Toroidní sonda (Obrázek 25a) někdy také označována jako Rogowského cívka, byla vyvinuta pro diagnostiku běžných točivých strojů. Sensor obsahuje cívku navinutou na jádru z nemagnetického popřípadě magneticky měkkého materiálu. Jádro není syceno vlivem procházejícího proudu statorovou tyčí během on-line měření. Snímač má tloušťku 2–3 mm, šířku 30–40 mm a délku závislou na rozměrech statorové tyče, na kterou je senzor instalován. Počet závitů se odvíjí od očekávané hodnoty indukčnosti. Aby se zabránilo rušení, senzor je stíněn kovovou fólií spojenou se stíněním koaxiálního kabelu. Použitím feritového prstence na vstupu předzesilovače je dalším způsobem pro snížení vlivu šumů před samotným zesílením signálu snímače. [27]



Obrázek 25 - Induktivní sondy [7] (a) toroidní; (b) lineární

Lineární sonda se od toroidní liší, jakým způsobem je sonda umístěna do vyzařovaného pole, což demonstruje obrázek 25b. Výhodou je, že není třeba přerušovat chod zkušence, a proto je tato sonda vhodná pro provozní diagnostiku. [1]

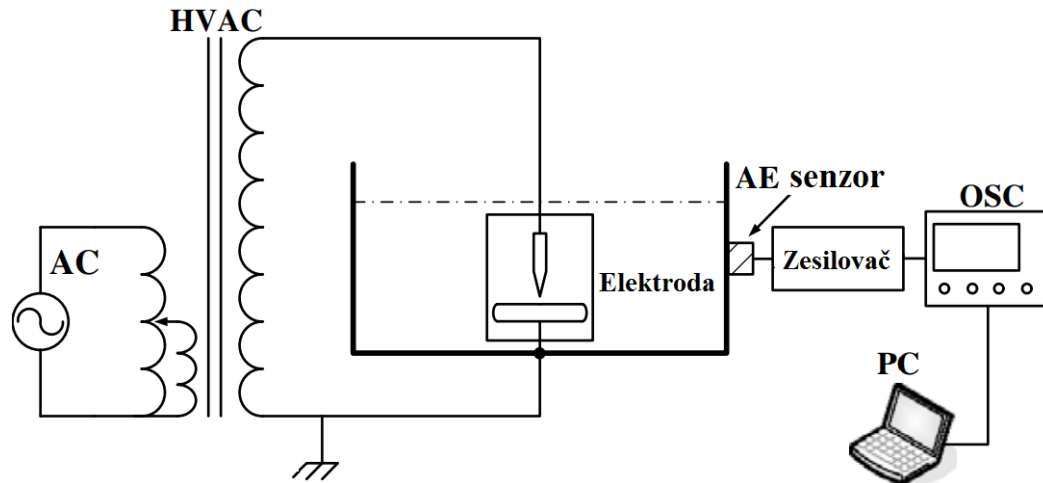
5.3 Akustická metody

Akustická metoda je především využitelná v GIS a v transformátorech (ČV v olejových nádržích), kde jsou již dlouhou dobu využívány jako on-line diagnostická metoda. Pomocí akustické metody lze ČV detekovat, ale i lokalizovat aktivitu ČV na základě změn amplitudy nebo fázového posunu akustických vln generovaných částečnými výboji. V transformátorovém oleji mají ČV frekvenční spektrum v rozsahu 10 Hz – 500 Hz. ČV se projevují jistými mechanickými impulzy, které dále tvoří akustické vlny šířící se daným prostředím. V transformátorech je tento mechanismus způsoben odpařováním obsahu nádrže transformátoru a vytváří se tak forma tlakového pole. Kapacitní povaha ČV v tomto případě nemá vliv, protože citlivost metody se nemění s kapacitancí zkušebního objektu. [28]

Akustické vlny v transformátorovém oleji lze snímat pomocí akustických senzorů (Piezoelektrických Převodníků - PZT). Pokud je PZT nainstalován vně nádrže, je vystaven i vnějšímu rušení a šumům, což omezuje jejich využitelnost. Z tohoto důvodu se PZT instalují uvnitř olejové nádrže transformátoru. Aktivita ČV je zjišťována měřením přichozích akustických vln v čase a informace o poloze je zjištěna umístěním více senzorů na různých místech. Lokalizace aktivity ČV je zjišťována z časových rozdílů akustických signálů na více než třech instalovaných senzorech. Z toho vyplývá využitelnost této metody jako on-line diagnostiky. Výhodou této metody je především odolnost proti vnějšímu rušení pro on-line aplikace. Nicméně tato metoda skýtá nevýhodu v podobě přesné lokalizace aktivity ČV. To je způsobeno akustickou „nejednotou“ prostředí, v níž se akustická vlna šíří, přičemž může být velmi zeslabena vlivem rozptylu, absorpce a

odrazu. Akustická metoda má obecně nižší citlivost měření ve srovnání s elektrickými metodami. [28]

Principiální schéma akustické metody měření ČV olejem chlazeného transformátoru poskytuje obrázek 26.



Obrázek 26 - Zapojení akustické metody [28]

Na vnějším povrchu nádrže je instalován senzor snímající akustické emise. Tento senzor detekuje akustické signály generované částečnými výboji a přenáší je do osciloskopu pomocí nízkošumového zesilovače, který získá 3 dB při střední frekvenci pásma od 1,6 KHz do 1,6 MHz.

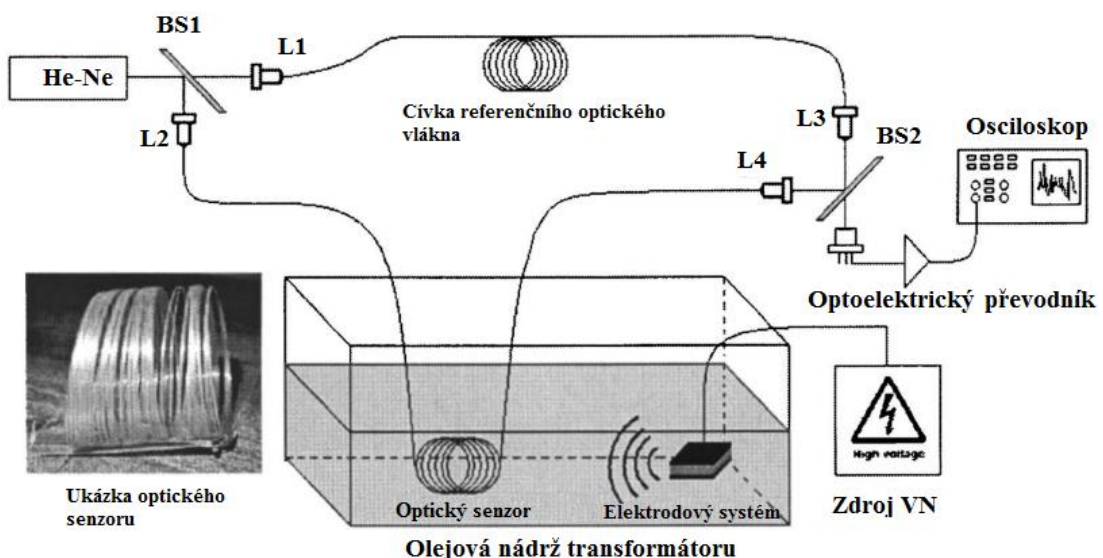
Publikace [29] prezentuje optimalizovaný typ senzoru pro detekci ČV v olejových transformátorech. Laboratorní testy potvrdily, že prototypový snímač je charakterizován velmi vysokou citlivostí detekce částečného výboje. Ve srovnání s komerčními senzory byl zaznamenán průměrný zisk signálu amplitudy minimálně o 5,2 dB a maximální hodnota byla 19,8 dB.

V publikaci [30] byl představen alternativní přístup k akustické metodě, je jím metoda aktivního dielektrického okna. Metoda byla navržena tak, aby současně vykonával dvě funkce. Prvním je funkce snímače akustických emisí generovaných částečnými výboji a funkcí dielektrického okna, které je připraveno pro instalaci UHF antény. Možnost současného použití dvou různých diagnostických metod (tj. akustická metoda a elektromagnetická metoda UHF) umožňuje zvýšení spolehlivosti detekce aktivity ČV a celkové účinnosti při identifikaci poruch. Navržené řešení má i další výhody. Vzhledem k tomu, že je akustický snímač instalován přímo do ocelové stěny nádrže, ocelová stěna netvoří bariéru pro akustické vlny, jako standardních AE senzorů

instalovaných vně nádrže. Výsledkem je vyšší citlivost detekce akustických pulzů než u kontaktních piezoelektrických převodníků.

5.4 Optické metody

Optické vlákna jsou využívána jako senzory již dlouhou dobu vzhledem k výhodám, které poskytují tj. stálost v prostředích výbojové aktivity, odolnost proti chemickým vlivům, schopnost odezvy na širokou škálu měření, tepelná odolnost, rozměrová kompaktnost, velká šířka pásma a vysoká citlivost. Optická detekce je založena na frakčních změnách optických parametrů, jako je např. vlnová délka, intenzita, polarizace nebo fáze. Lze tedy odvodit čtyři typy optických senzorů - spektrální analyzátor, senzor intenzity světla, senzor založený na stavu polarizace a interferenční senzor. Opto-akustický senzor obsahuje vnitřní optický senzor jako je Michelsonův interferometr, Mach-Zehnderův interferometr, vícevidové vlákno nebo vnější interferometrické senzory Fabry-Perot. Opto-akustický senzor kombinuje akustickou a optickou metodu. Proces detekce u této metody je založen na fotoelastickém efektu křemičitých vláken. Akustická vlna, která je na optickém vlákně, způsobuje změnu struktury optických vláken. Částečné změny rozměrů vlákna a indexu lomu má za následek modulační efekt laserového paprsku, který prochází vláknem. Nicméně nízký elastický efekt křemičitého vlákna je pro tuto metodu značnou hrozbou. [28, 31]



Obrázek 27 – Experimentální zapojení měření ČV pomocí Mach-Zehnderova interferometru [31]

Optická metoda se používá pro testování kabelů a transformátorů. Z tohoto důvodu se používají optické cívky jako opto-akustický senzor pro lokalizaci, ale i detekci ČV.

Dřívější způsob akustické detekce je založen na základních interferometrech z optických vláken, jako jsou Michelson a Mach-Zehnder. Zapojení, které poskytuje obrázek 27, se skládá z jednovláknového vlákna a laseru. Od zdroje se paprsek rozděluje do dvou vláken se stejnou intenzitou do optické spojky. První vlákno se označuje jako referenční, zatímco druhé vlákno jako snímací vlákno. Pro generování interferenčních signálů se signály v obou vláknech rekombinují, buď šířením v případě Mach-Zehnderova interferometru, nebo odrazem v případě Michelsonova interferometru. Referenční vlákno vede původní světelný impuls. U snímacího vlákna může být impuls rušen akustickou vlnou generovanou ČV. Obrázek 27 ukazuje experimentální sestavu pro měření ČV s použitím cívky z optického vlákna v transformátorovém oleji. Systém se skládá z koherentního světelného zdroje He-Ne laseru ($\lambda = 633 \text{ nm}$), jednovláknového optického vlákna, optoelektronického převodníku, zdroje vysokého napětí a dvou elektrod pro generování ČV. Pokud dopadá akustická vlna na cívku optického senzoru, změní se fáze optického signálu v cívkce snímače. Optický signál v cívkce snímače bude modulován v důsledku postupných fázových změn. Světelný signál z cívky snímače bude poté převeden na elektrický signál, který je dále zesílen před je zobrazením (např. pomocí digitálního osciloskopu). [28, 31]

5.5 Chemické metody

Aktivitu ČV lze odhadnout za určitých podmínek pomocí chemické analýzy. Během provozu zařízení jsou produkovány látky, které se během dlouhého provozu hromadí v izolačním médiu a jeho následnou analýzou může být odhadnut, jaký degradační činitel během provozu působil. Pro odhad přítomnosti částečných výbojů v transformátorech se používá metoda DGA neboli metoda obsahu plynů rozpuštěných v oleji. Metoda je založena na skutečnosti, že různé degradační vlivy mají na následek uvolňování určitých plynů v izolačním médiu. Metodou DGA se analyzuje obsah rozpuštěných plynů v izolačním médiu. Jsou jimi - vodík H_2 , metan CH_4 , etylen C_2H_4 , acetylen C_2H_2 a propylen C_3H_6 , popřípadě etan C_2H_6 , oxid uhelnatý CO a oxid uhličitý CO_2 . Relativní množství těchto plynů může být korelováno s typem poruchy, viz tabulka 4. Z rychlosti produkce plynu lze predikovat závažnost dané poruchy. Nutno dodat, že tyto plyny nejsou pouze produktem výbojové činnosti, ale i vlivem tepelného namáhání. [7]

Stávající normy (IEEE nebo IEC) zahrnují několik interpretačních metod pro hodnocení různých typů poruch na základě metody DGA. Jsou jimi metody - Key Gases, metoda Rogers Ratio, metoda IEC, metoda Nomograph, metoda Duvalova Trojúhelníku

a metoda Doernenburg Ratio. Uvedené metody lze dělit na metody využívající poměry výše uvedených plynů nebo jejich přímé hodnoty. [32]

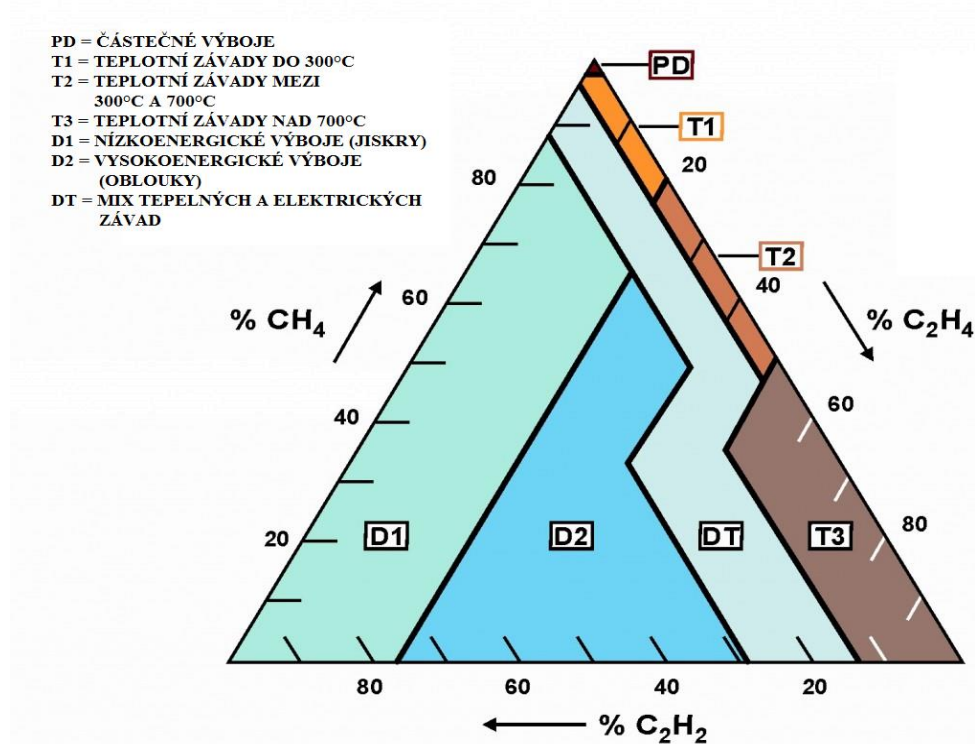
Tabulka 4 - Vyhodnocení výbojové činnosti metody DGA (převzato z [7])

Druh plynu	Druh výbojové činnosti		
	elektrický oblouk	jiskrový výboj	částečné výboje
vodík H ₂	základní plyn charakterizující elektrický oblouk	základní plyn charakterizující jiskrový výboj	základní plyn charakterizující částečné výboje
metan CH ₄	přítomný při el. oblouku ve velkých objemech	přítomný při jiskrovém výboji ve velkých objemech	přítomný při el. oblouku ve velkých objemech
etylen C ₂ H ₄	přítomný při el. oblouku v malých objemech	přítomný při jiskrovém výboji ve velkých objemech	nepřítomný
acetylen C ₂ H ₂	základní plyn charakterizující elektrický oblouk	základní plyn charakterizující jiskrový výboj	přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
propylen C ₃ H ₆	přítomný při el. oblouku ve velkých objemech	nepřítomný	nepřítomný

Příkladem interpretační metody je Duvalův trojúhelník, který zastupuje kategorii kde je využito přímého množství obsaženého plynu v kapalném médiu. Vychází se z procentuálního zastoupení tří plynů obsaženém v oleji. Procentuální zastoupení plynů se poté vynáší do trojúhelníku, viz obrázek 28, odkud se následně určuje diagnóza. Podle této metody se předpokládá, že částečné výboje v transformátoru působily, pokud je procento CH₄ > 99%, C₂H₂ a C₂H₄ < 1%.

U některých interpretačních metod se množství obsažených plynů nejprve porovnává s prahovou hodnotou L1. Z hodnoty L1 vyplývá, zda skutečně došlo k poruše. Dále

určuje, zda je koncentrace plynu dostatečná pro použití poměrových metod. Tato hodnota se udává v jednotkách ppm a nabývá pro různé metody charakteristických hodnot. [32]



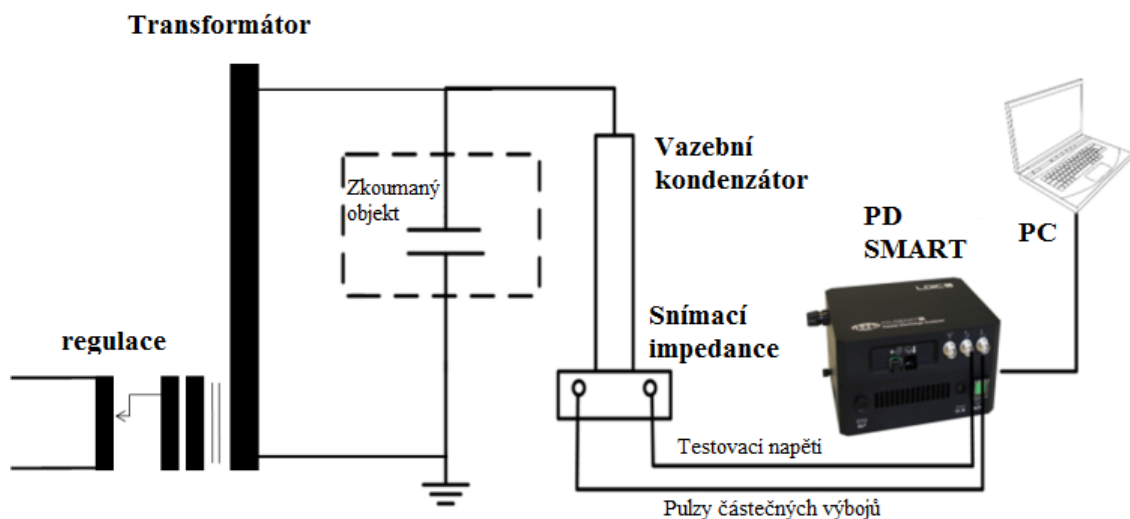
Obrázek 28 - Duvalův trojúhelník [32]

6 VLASTNÍ EXPERIMENT MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Následující část diplomové práce se věnuje vlastnímu měření částečných výbojů při střídavém a stejnosměrném napětí. Zkoumány byly čtyři typy výbojů – korónové výboje, klouzavé výboje, vnitřní výboje a drážkové výboje.

6.1 Měřicí metoda

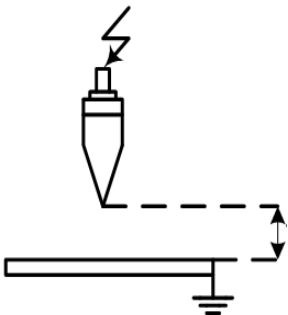
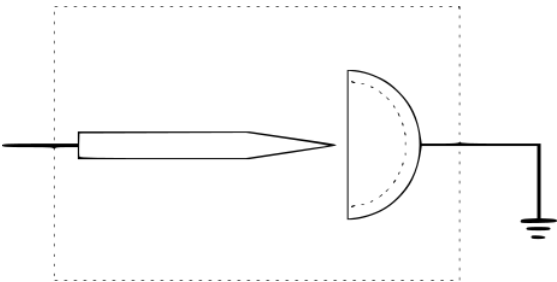
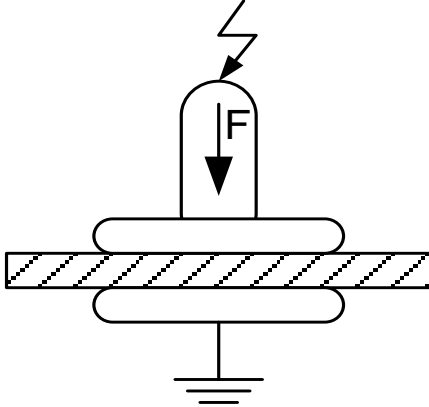
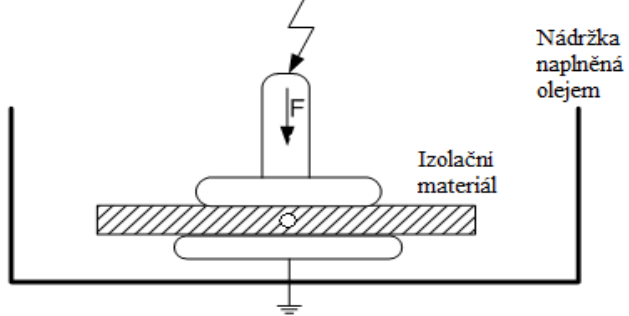
Experiment proběhnul v laboratoři dielektrických prvků na ZČU FEL a bylo provedeno pomocí standardizovaného testovacího obvodu dle schéma zapojení na obrázku 29. Obvod sestával ze zdroje (≤ 200 kV (AC) resp. ≤ 135 kV (DC)), vazebního kondenzátoru ($C = 1000\text{pF} \pm 10\%$), snímací impedance (LDM-5/U, $Z = 50 \Omega$) a analyzátoru částečných výbojů PD SMART. Za daných podmínek byla dosažena citlivost měření ≤ 3 pC. Pro lepší srovnání výstupu měření pod střídavým napětím byly měřeny veličiny doporučené normou IEC 60270. Každému měření předcházela kalibrace měřicího obvodu dle standardizovaného postupu, která byla provedena pomocí kalibračního zařízení LDC-5 / S-3. Hodnota náboje, na kterou byl obvod kalibrován, byl u všech měření stejný tj. $q_{\text{kal}} = 50$ pC.



Obrázek 29 - Zapojení měřicího obvodu [33]

Měření byly základní typy uspořádání pro různé částečné výboje, tj. koróna, povrchový výboj, vnitřní výboj a výbojová činnost v drážce statorového vinutí (neizolovaná část - s upevňovacím klínem a bez upevňovacího klínu). Jednotlivé uspořádání pro částečné výboje prezentuje tabulka 5.

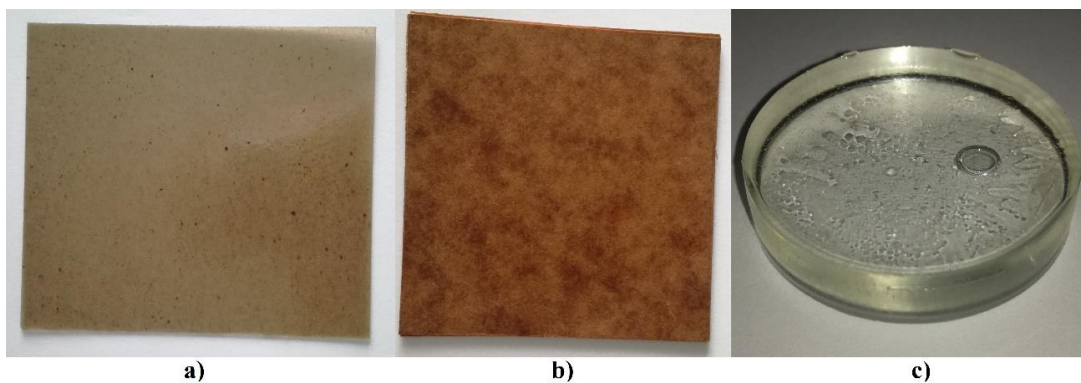
Tabulka 5 - Typy zkoumaných uspořádání [33]

<p>Koróna</p>	
<p>Hrot – deska</p>	
<p>Hrot - miska</p>	
<p>Povrchový výboj Deskové uspořádání</p>	
<p>Vnitřní výboj Materiál obsahující dutiny plynu</p>	

Pro měření korónového výboje byly použity dva laboratorní přípravky, prvním bylo uspořádání „hrot-deska“, druhým bylo uspořádání „hrot-miska“. Pro první typ byla měřena vzdálenost hrotu od desky ve vzdálenosti 10mm, uspořádání s miskou byla vzdálenost hrotu ve vzdálenosti 10 mm a 20 mm. Výstup měření pro uspořádání hrot-miska se nachází příloze.

Testovací souprava pro měření povrchových výbojů se skládala z dvou plochých elektrod, mezi které byl vložen izolační materiál. Jako izolační desky byly použity dva materiály - plexisklo (PMMA) a tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí FR-4.

Pro měření vnitřních výbojů bylo provedeno měření na více vzorcích. Všechny měření byly provedeny v olejové lázni, aby se zabránilo vzniku povrchových výbojů. První měření bylo provedeno na relanexové destičce (Obr. 30a), která svým charakterem a obsahem dutin dává prostor pro vznik vnitřní výbojové činnosti. Dále byly vytvořeny tři vlastní vzorky pro demonstraci vnitřních částečných výbojů. První vzorek se skládal ze tří PMMA desek, které byly pevně spojeny epoxidovou pryskyřicí, přičemž vnitřní deska byla perforována. Vytvořené perforace byly změřeny mikroskopem, viz příloha. Další vzorek byl vyroben z transformátorové lepenky (Obr.30b), kdy byl použit totožný postup výroby vzorku jako u předchozího vzorku z PMMA, vnitřní dutina měla opět průměr 1 mm. Poslední vzorek byl odlit z epoxidové pryskyřice (Obr. 30c), vnitřní dutina byla vytvořena injekční stříkačkou v pokročilé fázi tvrdnutí pryskyřice, což mělo zabránit úniku vzduchové dutiny z objemu pryskyřice. Vnitřní výboje se bohužel podařilo zachytit pouze u dvou vzorků, tj. relanexová deska a transformátorová lepenka. Transformátorová lepenka byla vlivem měření v olejové lázni znehodnocena, a tudíž nebylo možné další měření na tomto vzorku reprodukovat.

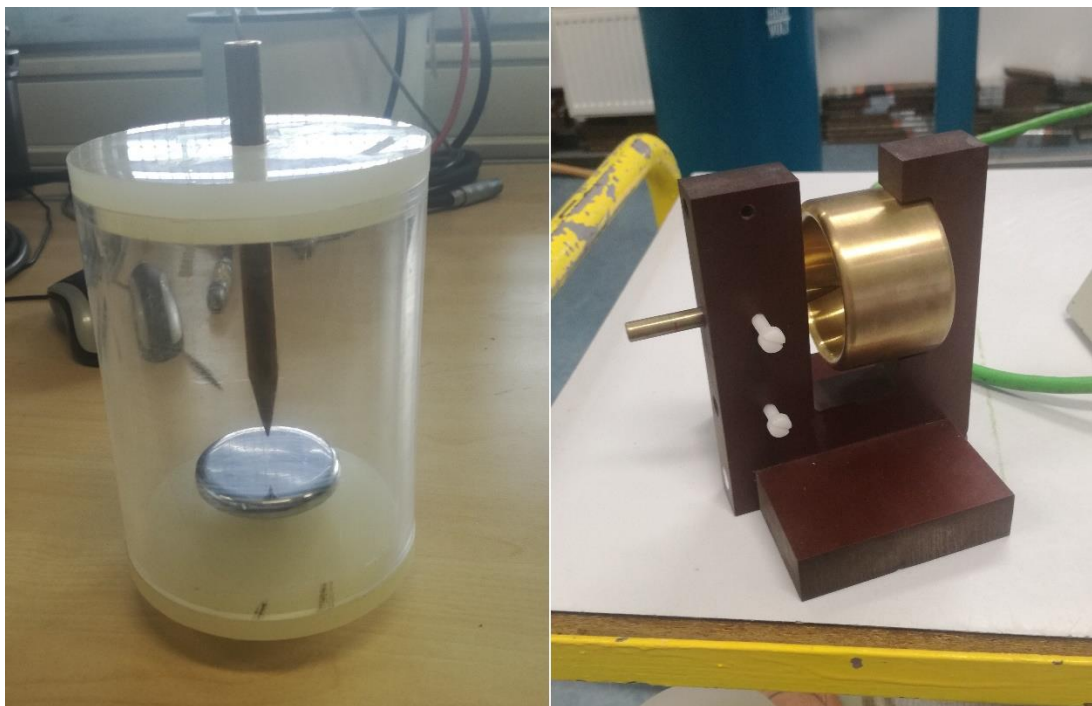


Obrázek 30 – Ukázky vzorků - (a) Relanex; (b) Transformátorová lepenka (lesklá); (c) Epoxidová pryskyřice obsahující vnitřní plynou dutinou

Posledním měřeným vzorkem byla statorová tyč na výstupu z drážky, přičemž byly měřeny dva případy – drážka zajištěná upevňovacím klínem a drážka bez upevňovacího klínu, viz obrázek 31.



Obrázek 31 – Měřený vzorek - statorové vinutí



a)

b)

Obrázek 32 - Korónové uspořádání; (a) hrot-deska; (b) hrot-miska

6.2 Vyhodnocování výbojové činnosti

Vzhledem k zadání diplomové práce bylo pro vyhodnocení výbojové činnosti použito pulzně sekvenční analýzy, resp. PSA diagramů. Tento přístup hodnocení výbojové činnosti je vzhledem ke zvyšujícímu se zájmu měření ČV při stejnosměrném napětím stále relevantnější a vznikají i jeho modifikace, viz [34]. PSA analýza bere v úvahu jednotlivé změny lokálního pole a jeho prostorového náboje. Standardní zkoumané parametry pro hodnocení aktivity ČV při střídavém napětí jsou - zdánlivý náboj q , počet pulzů a rozsah fázového úhlu mezi 0° a 360° . Nejznámějšími interpretačním prostředkem jsou dobře známé PRPD diagramy. PSA analýza oproti ostatním interpretačním metodám vychází z předpokladu, že jednotlivé pulzy jsou provázány mezi sebou a změna lokálního pole v místě výboje vytváří podmínky zapálení výboje následujícího. To dává prostor pro porovnávání výsledků měření při střídavé ale i při stejnosměrném napětí, jelikož nezávisí na fázi daného výbojového impulsu.

Při tvorbě PSA diagramů se vychází z následujících rovnic:

$$\Delta Q_n = |Q_{n+1}| - |Q_n| \quad (7)$$

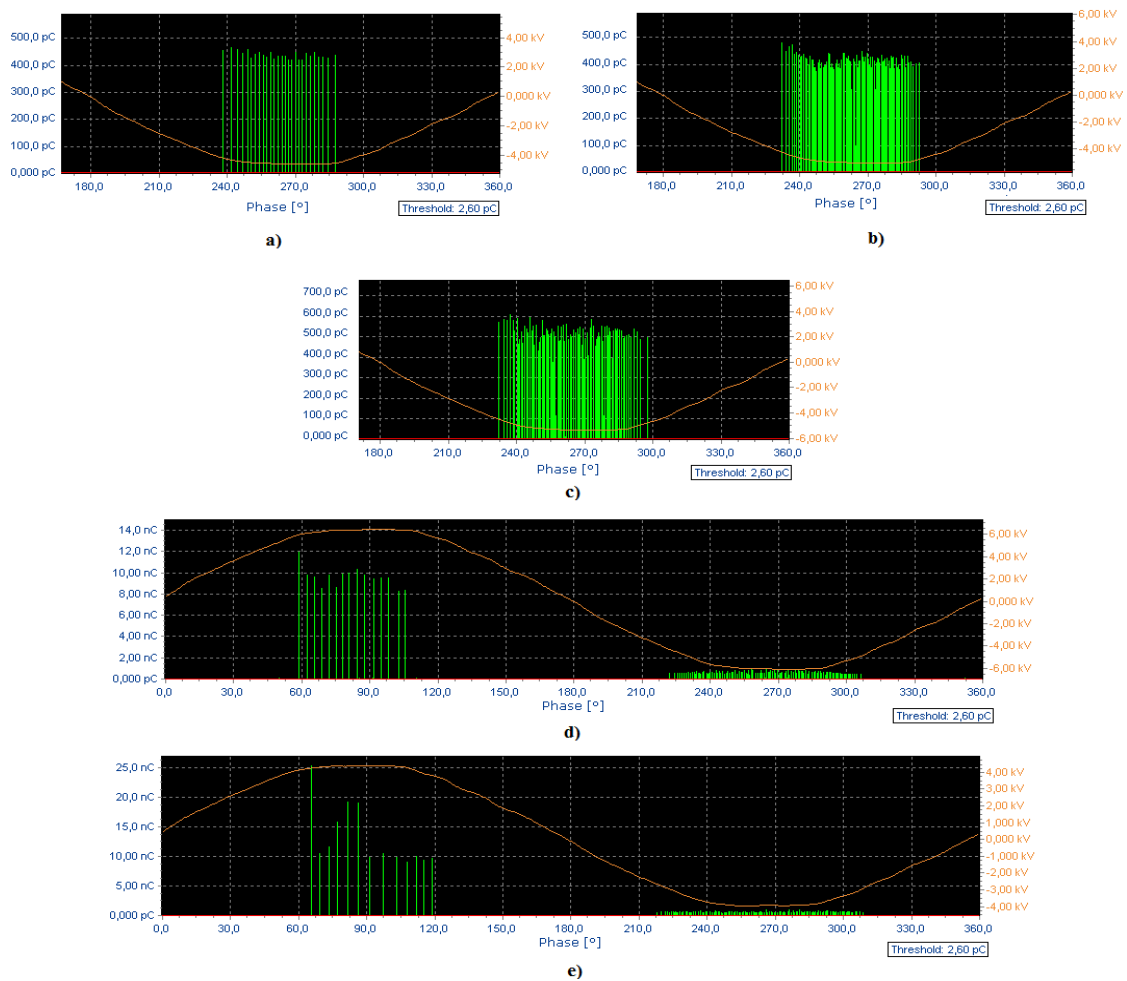
$$\Delta Q_{n-1} = |Q_n| - |Q_{n-1}| \quad (8)$$

Veškeré následující PSA diagramy jsou vypočteny z hodnot velikosti náboje po sobě působících výbojů v absolutní hodnotě. Všechny střídavé hodnoty jsou přepočítány na maximální hodnoty z důvodu možnosti porovnání střídavých a stejnosměrných výstupů měření.

6.3 Vyhodnocení měření korónových výbojů

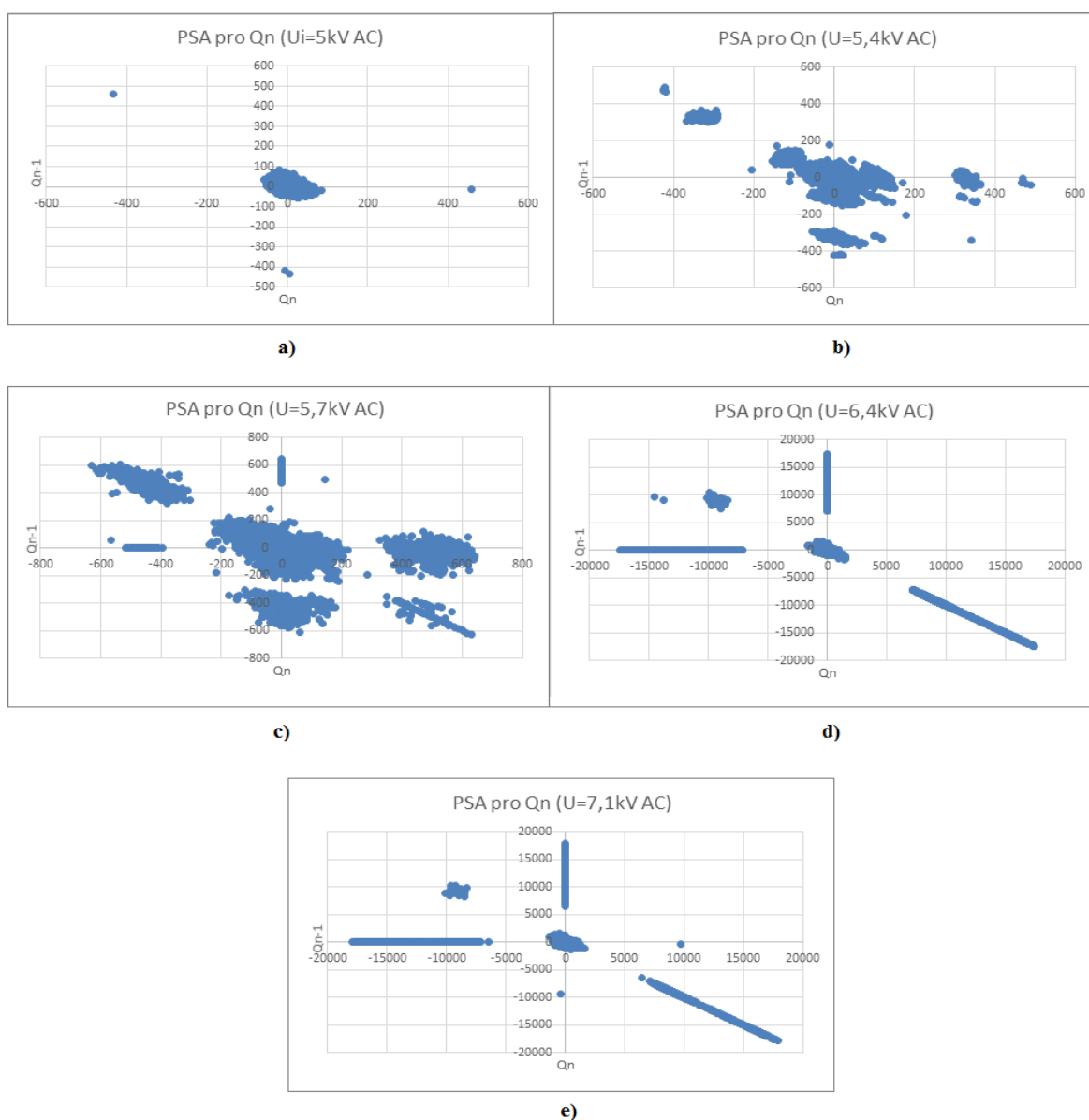
6.3.1 Vyhodnocení měření při střídavém napětí

Na obrázku 33 zachyceny jednotlivé pulzní diagramy pro každou hodnotu napětí, ze kterých vychází PSA diagramy, viz obrázek 33. Při dosažení zapalovacího napětí ČV se vytvořil shluk trichelovo impulzů v záporné půlperiodě, viz obrázky 33a – 33e. Velikost zdánlivého náboje a četnost impulzů rostla postupně se zvyšujícím se napětím. Impulzy při U_i objevovaly přibližně mezi 240° a 285° . Rozsah trichelovo impulzů se postupně rozšiřoval společně s rostoucím napětím mezi 235° a 300° . Při napětí 6,4 kV se začaly projevovat strimérové výboje v kladné půlperiodě, viz obrázky 33d a 33e. Tyto výboje se projevovaly diametrálně vyššími hodnotami náboje oproti impulzům v záporné půlperiodě. Je rovněž patrné, že hodnota zdánlivého náboje těchto impulzů opět rostla společně s napětím až na hodnotu kolem $Q_{ie} = 15 \text{ nC}$. Filtrovací úroveň byla nastavena na hodnotu 2,6 pC, nebyly tudíž snímány impulzy nižších hodnot.



Obrázek 33 - Pulzní diagramy pro uspořádání „hrot-deska“ při střídavém napětí (a) 5kV; (b) 5,4kV; (c) 5,7kV; (d) 6,4kV; (e) 7,1kV

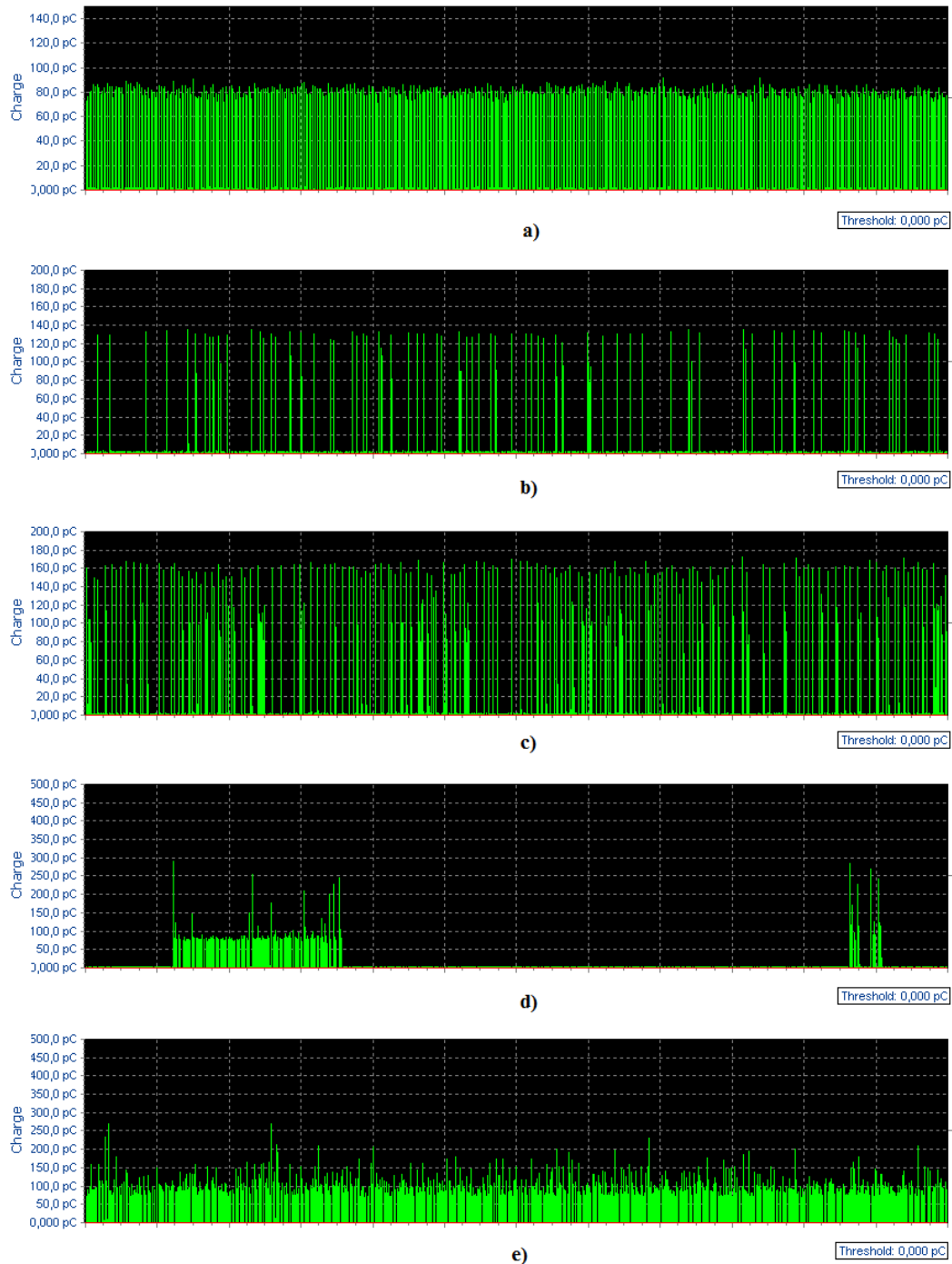
Obrázek 34 ukazuje vývoj PSA diagramů při ekvivalentních hodnotách napětí, přičemž data pro tvorbu diagramů jsou brána pro každou hodnotu napětí v časovém intervalu 5 s. Na prvních třech grafech se projevují především výboje trichelova typu. Nejprve se vytvořil obrazec při počátku grafu, ve kterém se zřejmě projevuje i vliv rušení. Se zvyšujícím se napětím se postupně začaly vytvářet nové obrazce vzdálenější od počátku a postupně se zvyšoval jejich rozptyl. To bylo zřejmě způsobeno nárůstem hodnoty zdánlivého náboje a nárůstem četnosti pulzů společně s napětím. Od hodnoty 6,4 kV se začaly projevovat strimérové výboje v kladné půlvlně (Obr. 34d, 34e). Tento jev vedl k výraznému rozšíření rozsahu grafu až mezi hodnoty -20000 a +20000. To bylo způsobeno vysokými rozdíly mezi po sobě působícími pulzy v čase.



Obrázek 34 - PSA diagramy pro uspořádání „hrot-deska“ při střídavém napětí ($t=5\text{s}$)

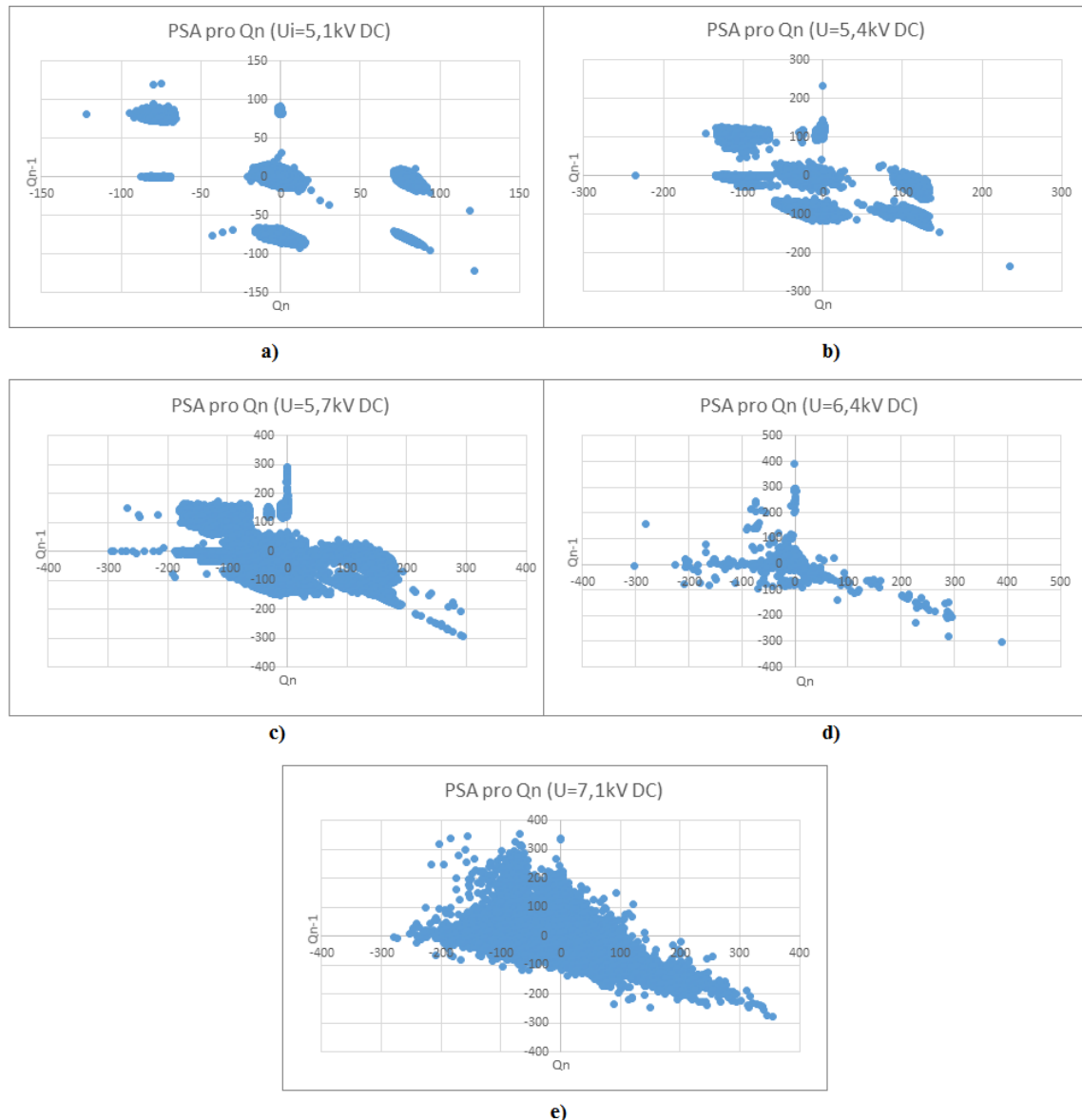
6.3.2 Vyhodnocení měření při stejnosměrném napětí

Na obrázku 35 se nacházejí pulzní diagramy pro jednotlivé hodnoty stejnosměrného záporného napětí pro totožné zapojení. Pulzy se v tomto případě projevují v celém rozsahu diagramu, což je dáno charakterem stejnosměrného napětí. Při zapalovacím napětí působící impulzy dosahovaly amplitudy okolo 90 pC. S rostoucím napětím (tj. -5,4 kV a -5,7kV) došlo ke snížení četnosti pulzů, avšak jejich amplituda se zvýšila až na hodnotu okolo 160 pC.



Obrázek 35 - Pulzní diagramy pro uspořádání „hrot-deska“ při záporném stejnosměrném napětí - (a) 5kV; (b) 5,4kV; (c) 5,7kV; (d) 6,4kV; (e) 7,1kV

Při napětí $-6,4$ kV lze pozorovat, že pulzy nepůsobily v celém zachyceném časovém intervalu. Tento jev se zřejmě odrazil i na ekvivalentního PSA diagramu (Obr. 35d), kdy došlo k změně trendu oproti předchozímu vývoji segmentů na předchozích diagramech. Při dalším navýšení napětí (Obr. 35e) se pulzy objevily opět v celém rozsahu osy. Amplitudy jednotlivých pulzů se oproti prvním třem hodnotám napětí rozkolísaly a část pulzů dosahovala téměř dvojnásobných hodnot oproti více četnějším pulzům, jejichž hodnota dosahovala velikosti okolo 130 pC.



Obrázek 36 - PSA diagramy pro uspořádání „hrot-deska“ při záporném stejnosměrném napětí ($t=5$ s)

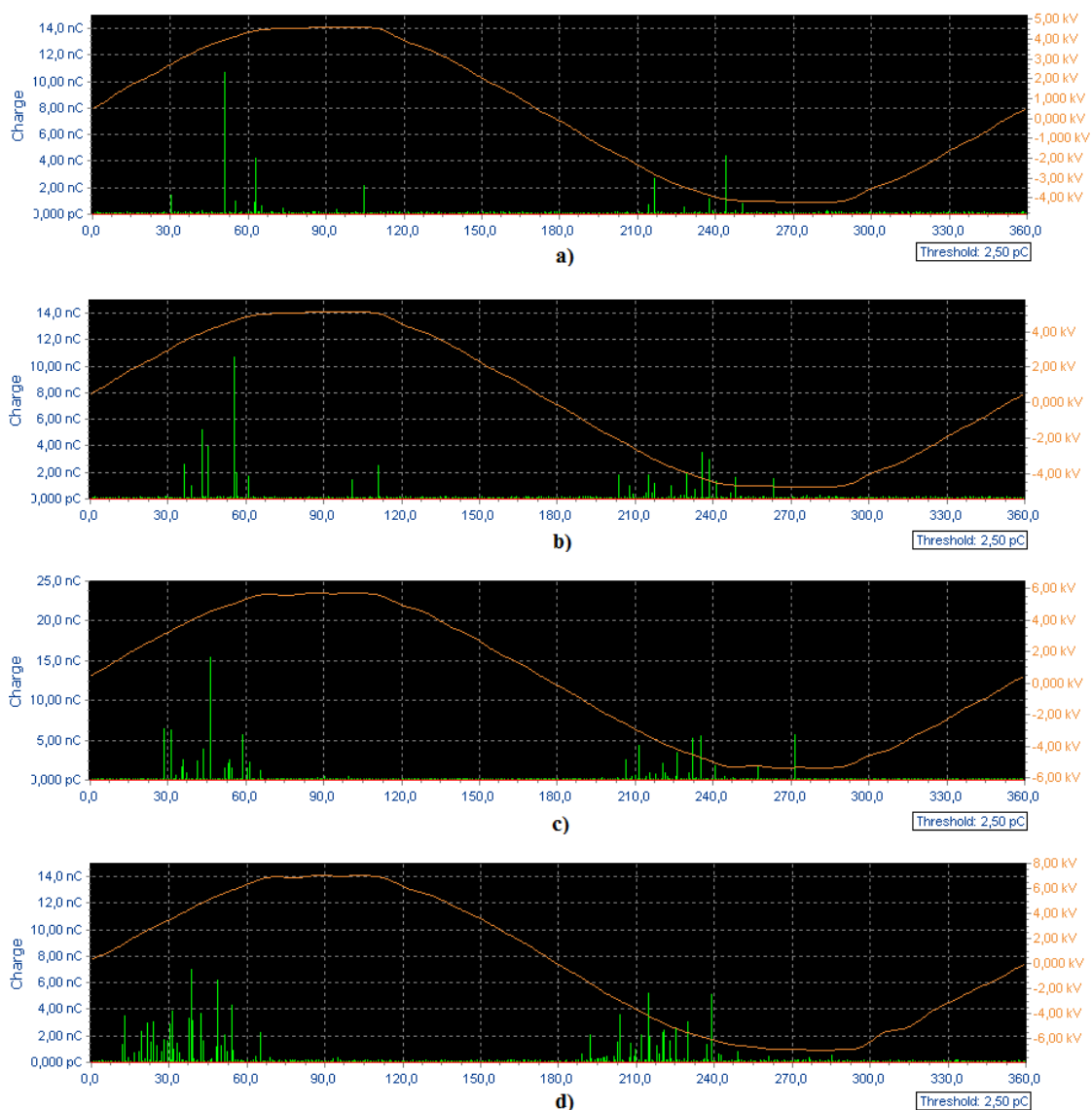
Obrázek 36 ukazuje PSA diagramy pro totožné uspořádání při záporném stejnosměrném napětí. Zapalovací napětí ČV nepatrně vzrostlo na hodnotu $-5,1$ kV. Z grafů je patrná jistá spojitost mezi výstupními diagramy získané při střídavém napětí,

avšak je patrný rozdíl v umístění segmentů, které se oproti střídavým PSA diagramům pohybují v rozmezí -100 až +100 pro zapalovací napětí. To zřejmě svědčí o vyšší vyrovnanosti amplitud jednotlivých pulzů při stejnosměrném napětí. Segment nacházející se v počátku grafu (Obr. 36a) je pravděpodobně způsoben vlivem rušení a šumů z okolí. S rostoucím napětím docházelo k postupnému rozšíření segmentů až do rozsahu mezi -200 a +200. Při napětí -6,4 kV se tyto segmenty přestaly vytvářet a koncentrovaly se opět v rozmezí -100 a +100 avšak při dalším zvýšení napětí na hodnotu -7,1 kV se segment rozšířil mezi -300 a +300 s výrazným rozptylem. Oproti střídavým výsledkům patrně nedošlo k zapálení vysokoenergetický strimérových výbojů, jelikož nedošlo k žádnému výraznému rozšíření hodnot PSA diagramu.

6.4 Vyhodnocení měření povrchových výbojů

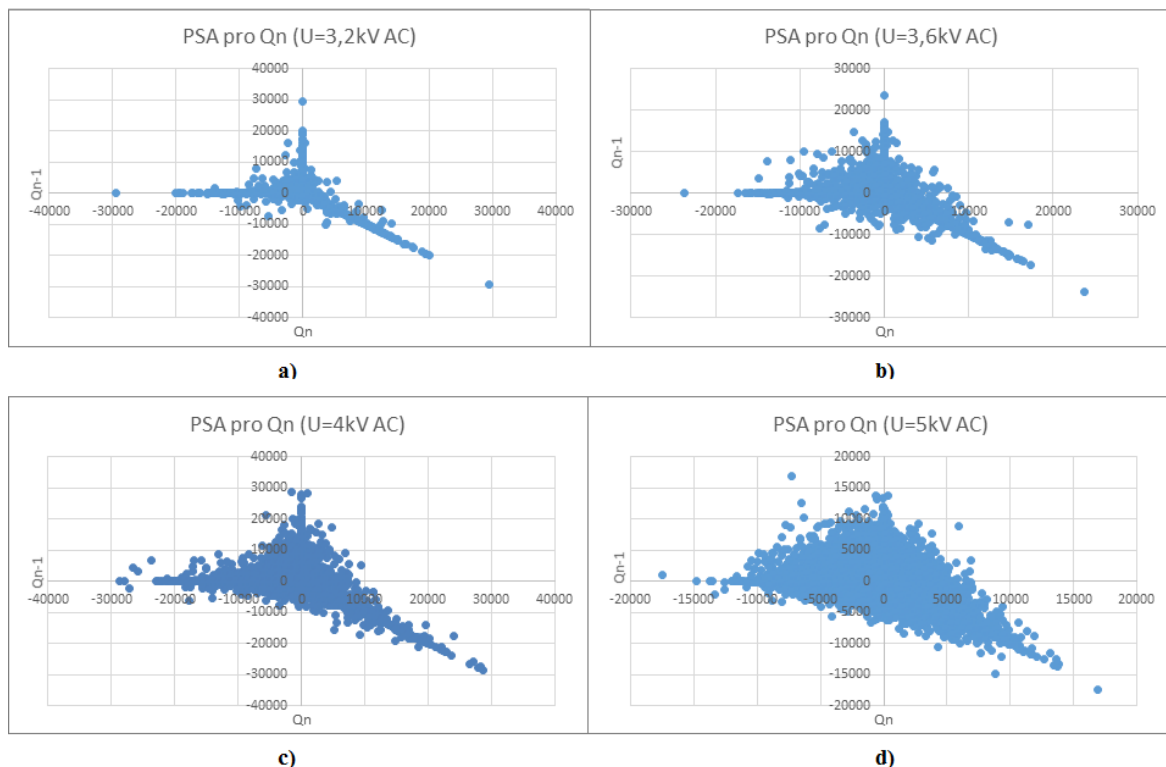
6.4.1 Vyhodnocení měření při střídavém napětí

Obrázku 37 jsou zachyceny pulzní diagramy při různých hodnotách střídavého napětí. Ihned po dosažení zapalovacího napětí pulzy dosahovaly vysokých amplitud v řádu nC. Dle předpokladu se pulzy objevovaly v obou polaritách. Pulzy se cyklicky vytvářely mezi 30° a 120° , přičemž pulzy s největší amplitudou se pohybovaly od 120° směrem ke 30° . Pulzy v kladné půlperiodě soustavně působily mezi 200° a 275° . Působící pulzy vykazovaly mezi sebou značné rozdíly, což se projevilo i na ekvivalentních PSA diagramech. Četnost a amplituda pulzů se zvyšujícím napětí postupně zvyšovala. Filtrovací úroveň byla nastavena na hodnotu 2,5 pC.



Obrázek 37 -Pulzní diagramy pro deskové uspořádání při střídavém napětí
(a) 3,2kV; (b) 3,6kV; (c) 4kV; (d) 5kV

Na obrázku 38 je zachycen vývoj změn PSA diagramů pro deskové uspořádání měření klouzavých výbojů při střídavém napětí. Při zapalovacím napětí (tj. 3,2 kV) se vytvořil obrazec grafu, jehož trend se udržel po celou dobu zvyšování napětí. Rozpětí hodnot grafu se pohybovaly v minimech mezi -15000 a +15000 a v maximech mezi -30000 a +30000. To je dáno velkými rozdíly mezi po sobě působícími impulzy, o čemž vypovídají i pulzní diagramy na obrázku 37.



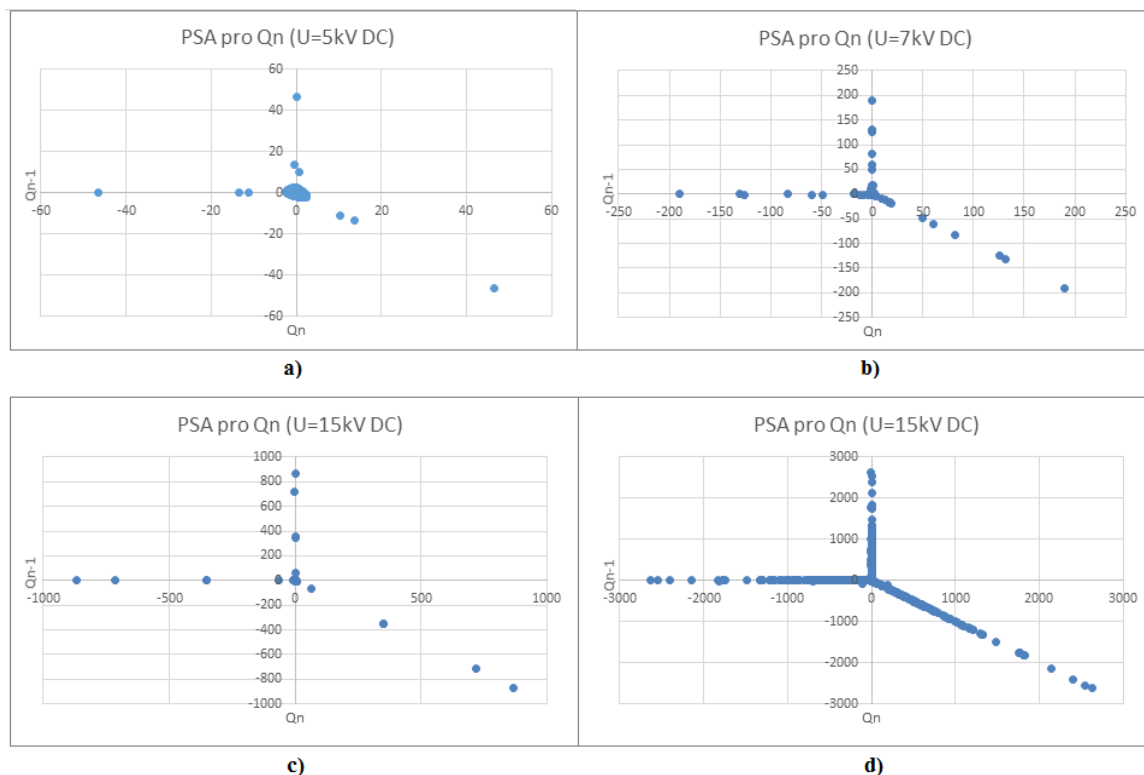
Obrázek 38 - PSA diagramy pro deskové uspořádání při střídavém napětí ($t = 5s$)

6.4.2 Vyhodnocení měření při stejnosměrném napětí

Při měření stejné konfigurace při stejnosměrném napětí se dle předpokladu nepodařilo zachytit zapalovací napětí klouzavých výbojů. Z tohoto důvodu byly nastaveny různé hodnoty stejnosměrného záporného napětí, přičemž první nastavená hodnota odpovídala hodnotě -5kV, kvůli možnosti porovnání diagramu, viz obrázek 38d. Data pro diagramy (Obr. 39a, 39b a 39c) byla snímána po dobu 5s. Pro diagram na obrázku 39d byla data snímána po dobu 30s.

Fragment nacházející se okolo počátku diagramu (Obr. 38a) je způsoben okolním rušením, jelikož nebyla nastavena žádná filtrovací úroveň. Je patrné, že za dobu 5s proběhlo pouze pár impulzů, jež lze zřejmě zanedbat a pokládat je za rušení během měření. Nízká četnost pulzů se projevila i při dalších hodnotách, avšak nutno zmínit, že

rozdíly mezi jednotlivými impulzy se začaly zvětšovat a lze předpokládat, že s nárůstem napětí impulzy dosahovaly vyšších intenzit. U diagramu na obrázku 38d je patrný výrazné zhuštění grafu a lze předpokládat, že s při stejnosměrném záporném napětí se pouze prodloužila doba mezi po sobě působícími pulzy. Dále je patrný nárůst četnosti pulzů a hodnoty diagramu se pohybují v mezích mezi -1500 a +1500, přičemž část změn pulzů se objevuje v rozmezí mezi -3000 a +3000.



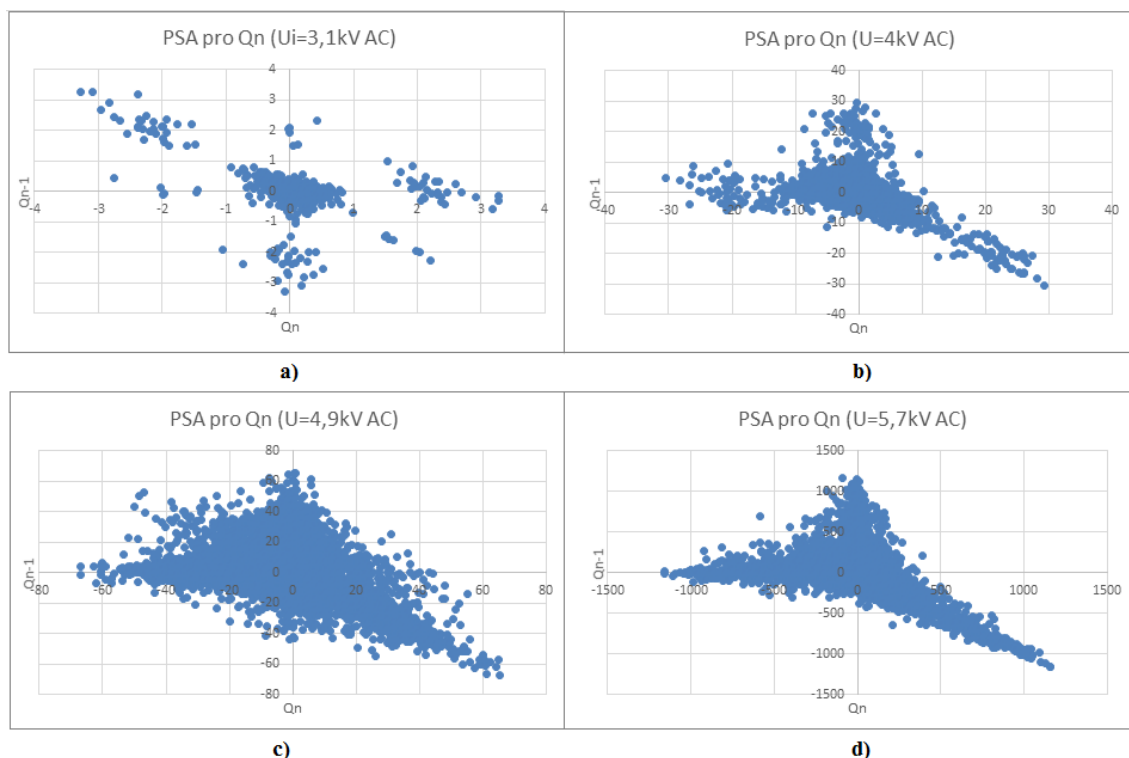
Obrázek 39 - PSA diagramy pro deskové uspořádání při záporném stejnosměrném napětí t=5s pro a), b), c); t=30s pro d)

Pulzní diagramy nebylo v tomto případě možné zachytit. Vzhledem k nízké době opakování jednotlivých pulzů a skutečnosti, že použité snímací zařízení a software je navržen prioritně pro měření při střídavém napětí, nebylo možné pulzy zachytit jako v předchozích případech.

6.5 Vyhodnocení měření výbojové činnosti v drážce statoru při střídavém napětí

V rámci experimentální práce bylo provedeno měření na statorové drážce, přičemž byly měřeny dva případy – drážka zajištěná upevňovacím klínem a drážka bez upevňovacího klínu. I v tomto případě byly výstupy měření vyneseny do PSA diagramů, přičemž zachycená data jsou brána z časového intervalu 5 s.

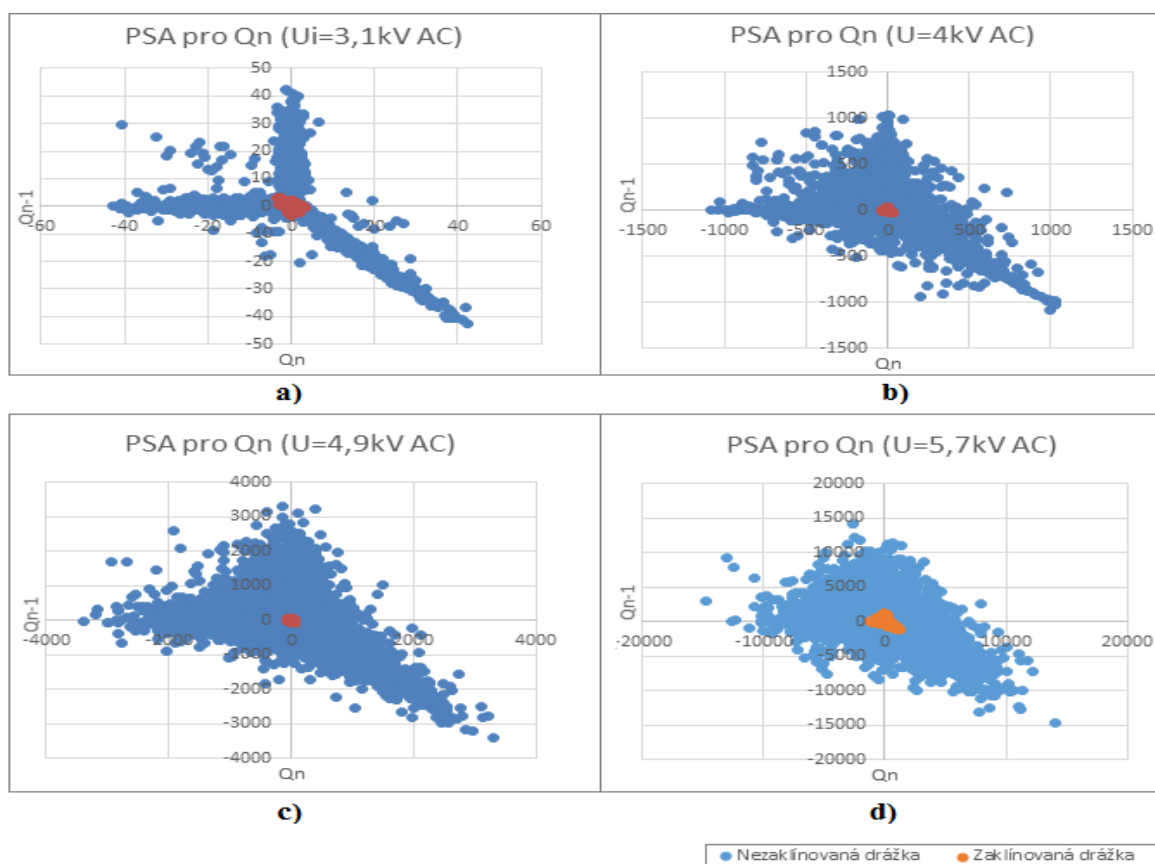
Diagramy na obrázku 40 ukazují vývoj diagramů se zvyšujícím se napětím. Při zapalovacím napětí působilo pouze zanedbatelné množství pulzů o nízkých hodnotách zdánlivého náboje. Obrazec při počátku grafu je zapříčiněn vlivem okolního rušení. Při zvýšení napětí (Obr. 40b, 40c) došlo výraznějšímu působení výbojové činnosti oproti U_i . Na diagramu se začal vytvářet obrazec, který dále určil trend vývoje diagramů při zvyšujícím se napětí. Při dosažení hodnoty 5,7kV došlo k další výrazné změně, jelikož došlo k rozšíření rozložení hodnot v diagramu, jež měl rozptyl mezi -1100 a +1100. Lze uvažovat, že v drážce započaly nové výbojové mechanismy.



Obrázek 40 – PSA diagramy pro drážku zajištěnou upevňovacím klínem

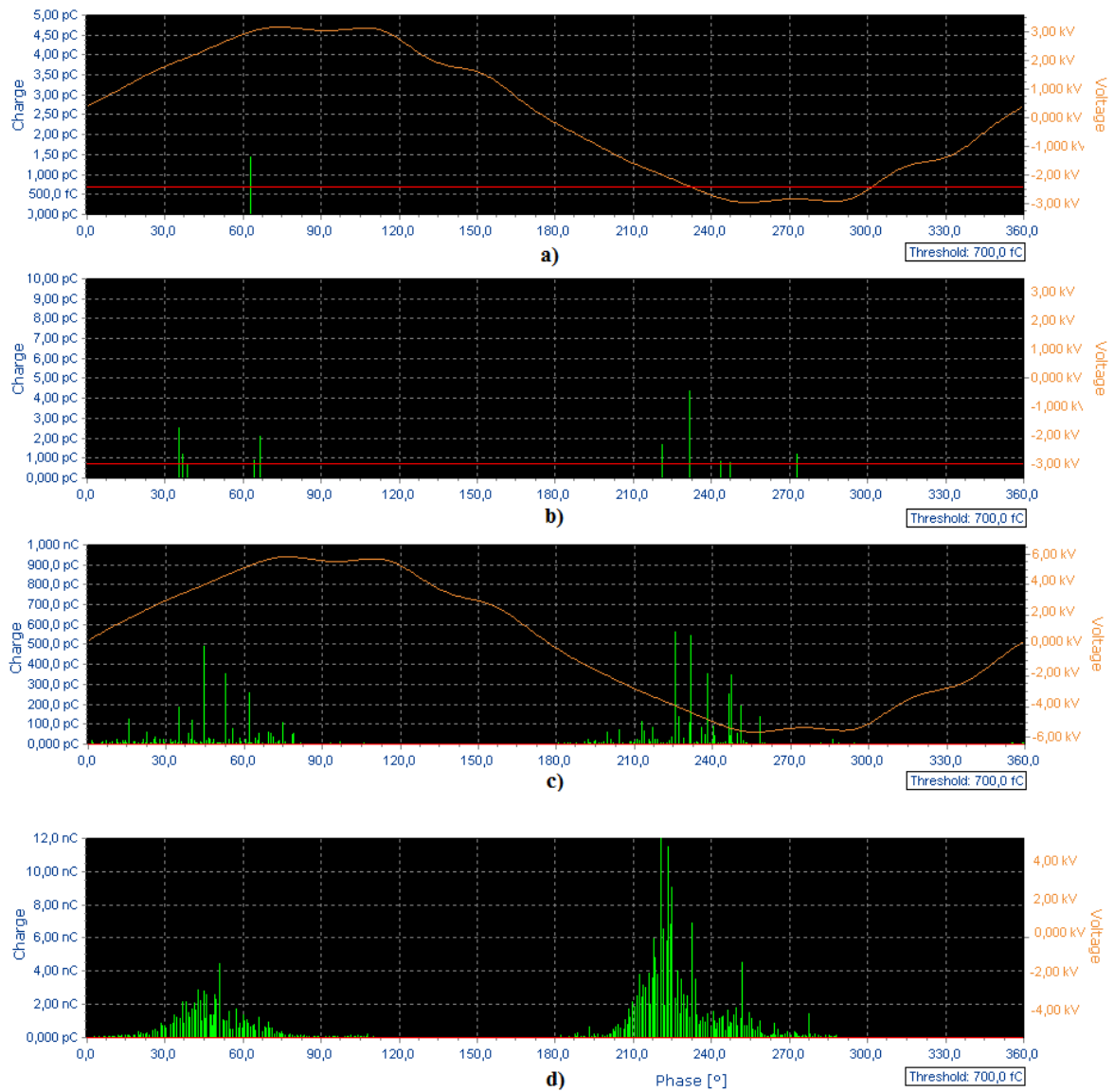
Na obrázku 41 jsou vyneseny ekvivalentní PSA diagramy pro drážku bez upevňovacího klínu. Pro názornost jsou zaneseny i hodnoty pro drážku obsahující upevňovací klín. Při zapalovacím napětí se vytvořil obrazec, který vykazuje odlišný charakter chování výbojové činnosti v drážce bez a s upevňovacím klínem. Při vyšším

napětí jsou vzniklé obrazce tvarově shodné s obrazci na diagramech, viz obrázek 40, nicméně rozsah hodnot diagramu je značně vyšší, tj. -1000 do +1000 pro 4kV až -10000 do +10000 pro 5,7kV. Tento jev svědčí o značných rozdílech v amplitudách mezi jednotlivými pulzy, což zachycují pulzní diagramey na obrázku 42. V drážce, jejíž tyče nejsou upevněny, působí výbojové mechanismy, které se v zaklínované drážce projevují až při vyšších hodnotách napětí. O možných typech, které v drážce působí, pojednává kapitola 4. Toto měření potvrdilo, že upevňovací klín je nezbytnou částí drážky statoru, která má velký podíl při ochraně vinutí před dynamickými účinky proudu. Dále chrání drážku před mechanickými vibracemi, které mohou být příčinou poškození vnitřních ochranných vrstev, což značně přispívá ke vzniku podmínek pro výbojovou činnost.



Obrázek 41 - PSA diagramey pro drážku bez upevňovacího klínu a jejich porovnání

Na pulzních diagramech, viz obrázek 42, je znázorněno chování činnosti pulzů pro drážku obsahující drážkový klín a drážku bez upevňovacího klínu pro zapalovací napětí a pro maximální testovací napětí. Je patrné, že drážka s upevňovacím klínem vykazovala poměrně nižší aktivitu impulzů v obou případech. Amplitudy i četnost pulzů dosahují v obou případech oproti drážce bez upevňovacího klínu patřičně nižších hodnot.



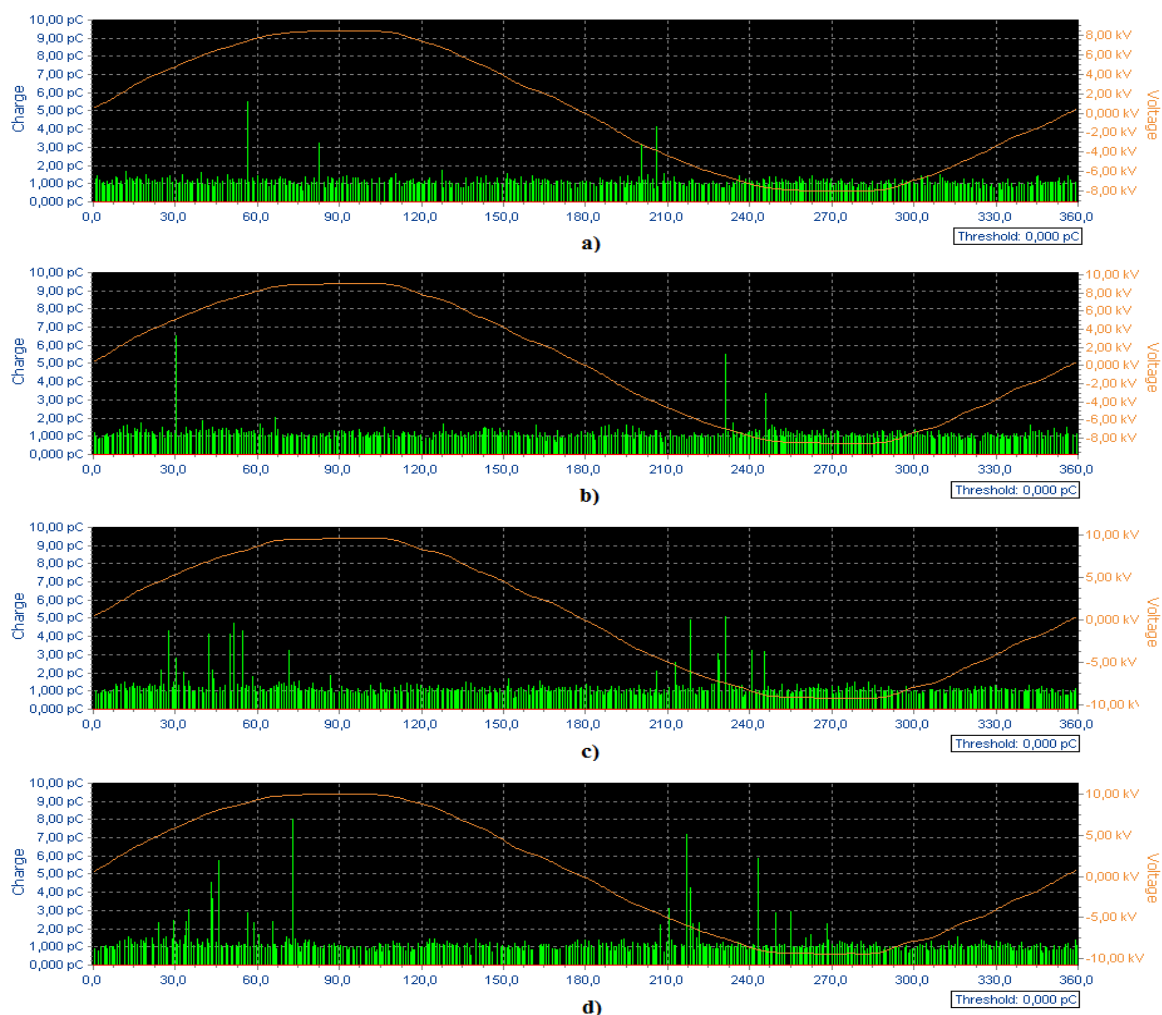
Obrázek 42 - Pulzní diagramy měření na drážce statoru při AC
 (a) s upevňovacím klínem (3,1 kV); (b) bez upevňovacího klínu (3,1 kV);
 (c) s upevňovacím klínem (5,7 kV); (d) bez upevňovacího klínu (5,7 kV).

6.6 Vyhodnocení měření vnitřních výbojů při střídavém napětí

Jak bylo uvedeno, úspěšné měření vnitřních výbojů proběhlo pouze u dvou vzorků, tj. relanexová deska a transformátorová lepenka (lesklá). Během měření byly oba vzorky testovány ponořené v olejové lázni, aby se zamezilo vniku povrchových výbojů.

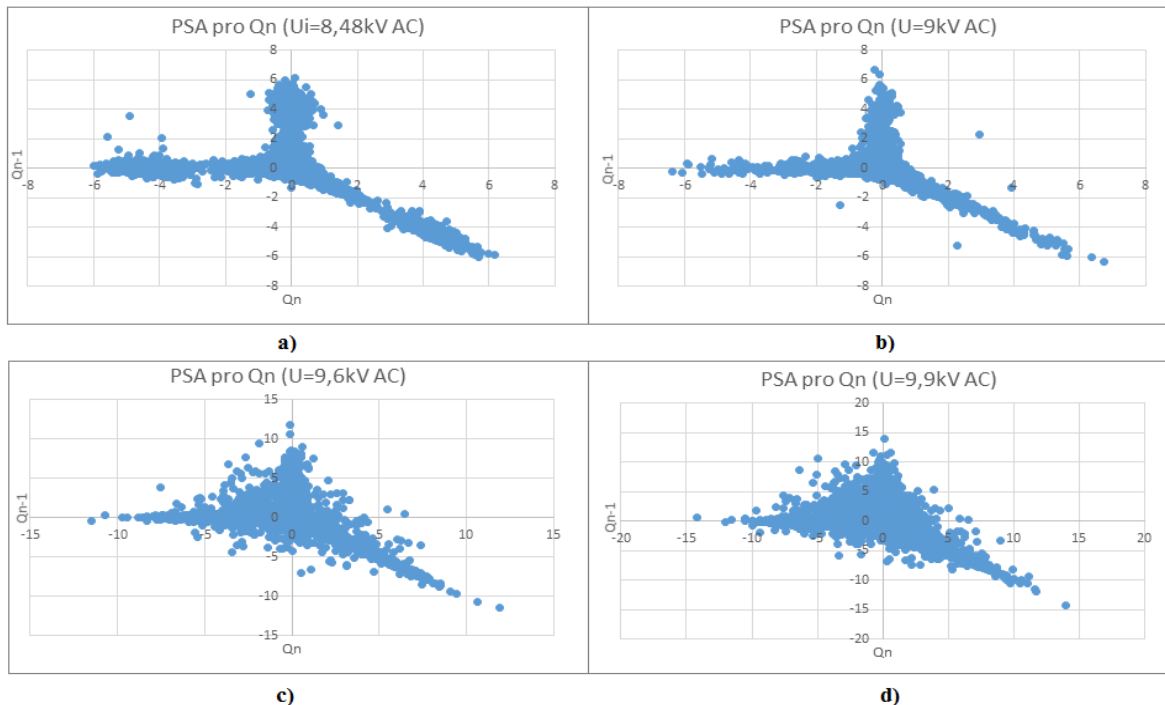
6.6.1 Vyhodnocení vnitřních výbojů – Relanex

Z pulzních diagramů na obrázku 43 je pro všechny hodnoty napětí patrná výbojová činnost v kladné i záporné půlperiodě. Hodnoty náboje, které dosahují hodnot do 2 pC, jsou následky vnějšího rušení. Filtrovací úroveň nebyla při tomto měření nastavena, což se projevilo i na ekvivalentních PSA diagramech. Při zapalovacím napětí (Obr. 43a) působící pulzy dosahovaly hodnot maximálně do 6 pC, což se výrazně nezměnilo ani po navýšení hodnoty napětí na 9 kV. Při hodnotě 9,6 kV se začala projevovat vyšší četnost pulzů a navýšení jejich amplitudy, která dosahovala hodnot okolo 10 pC.



Obrázek 43 - Pulzní diagramy pro uspořádání měření vnitřních výbojů – Relanex
(a) 8,48kV; (b) 9kV; (c) 9,6kV; (d) 9,9kV

Na obrázku 44 je uveden vývoj PSA diagramů pro čtyři různé hodnoty střídavého napětí. Při dosažení zapalovacího napětí se vytvořil obrazec, u kterého lze předpokládat značný vliv rušení. Vliv rušení nutno uvažovat i ostatních diagramů. Oproti všem předchozím diagramům je patný nejnižší rozsah hodnot, který se při nejvyšší hodnotě napětí pohybuje v rozmezí -15 a +15. To je způsobeno nízkými hodnotami náboje působících pulzů, což ukazují pulzní diagramy na obrázku 43. Nízkoenergetické vnitřní výboje jsou dány charakterem relanexového materiálu. Dutiny, které daný materiál obsahuje, jsou řádek mikrometrů. Dutiny v materiálu jsou způsobeny epoxidovým pojivem. Od hodnoty napětí 9,6 kV diagramy změnil tvar a rozsah hodnot se proti předchozím diagramům začal měnit. To může být způsobeno nárůstem amplitud působících výbojů a rovněž jejich četnosti.

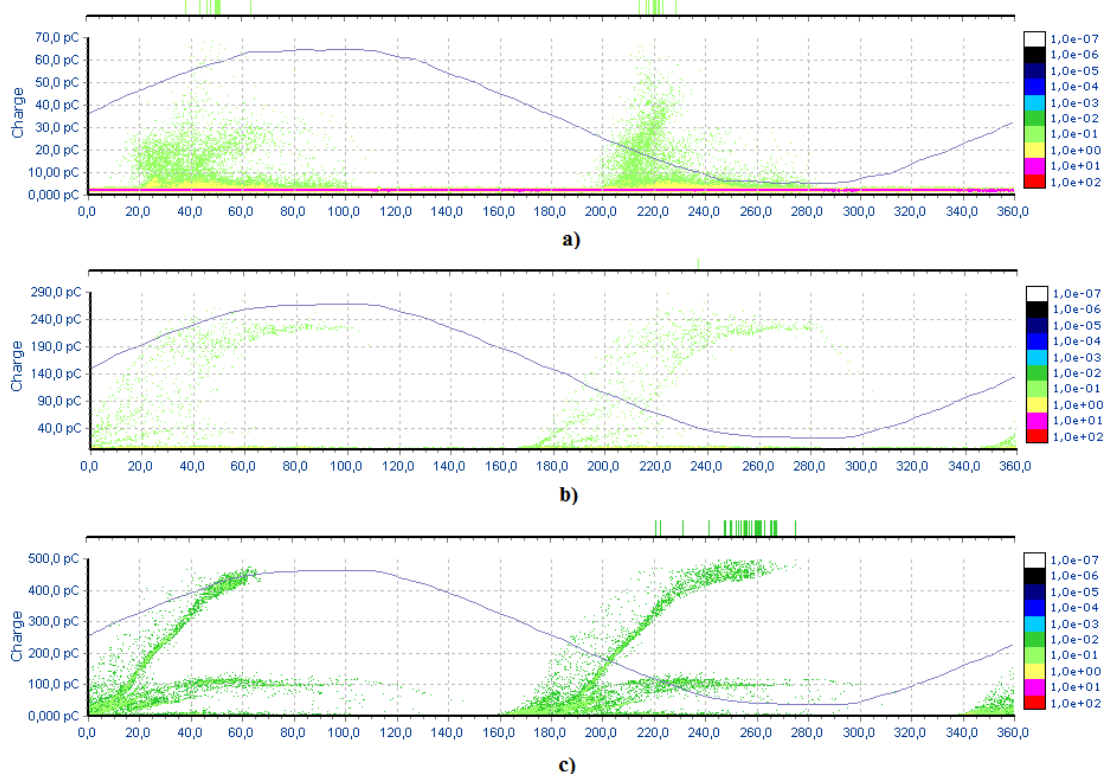


Obrázek 44 - PSA diagramy pro uspořádání měření vnitřních výbojů – Relanex

6.6.2 Vyhodnocení vnitřních výbojů – Transformátorová lepenka

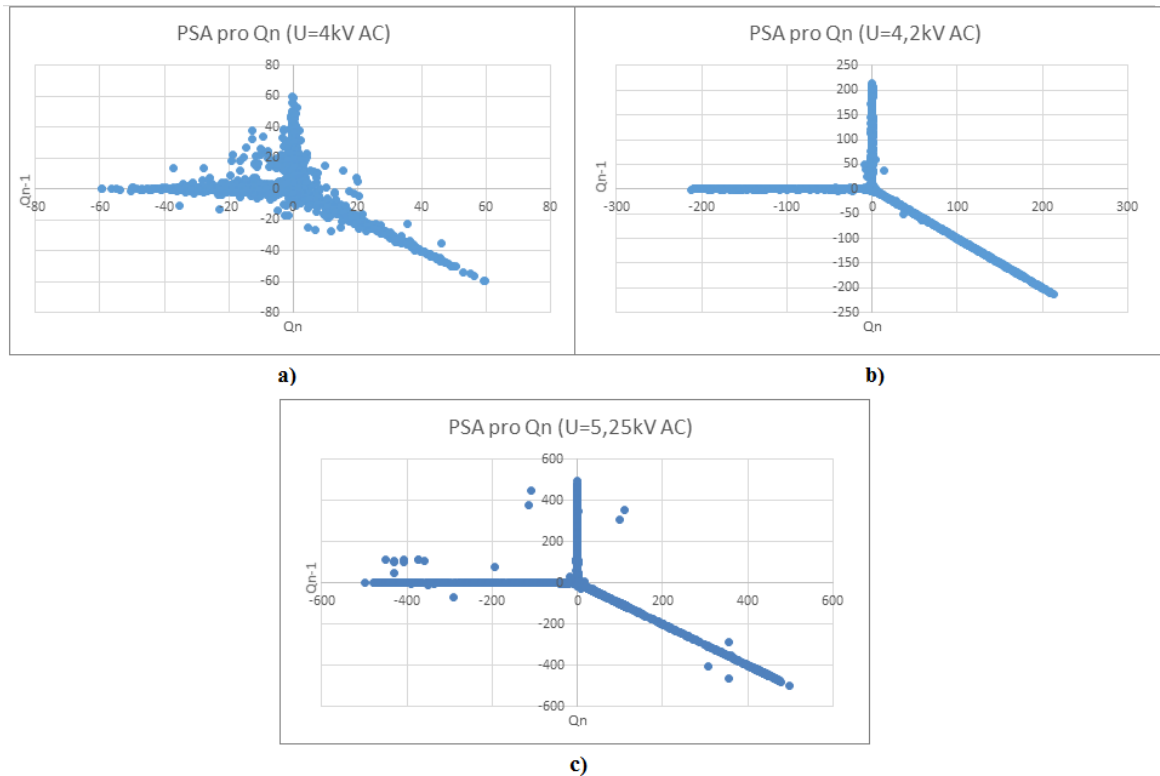
Poslední vyhodnocené měření bylo provedeno se vzorkem z transformátorové lepenky, která se skládá ze tří vrstev spojených epoxidovou pryskyřicí, přičemž vnitřní vrstva je perforovaná.

PRPD diagramy na obrázku 45 demonstrují vnitřní výbojovou činnost. Při hodnotě napětí 4kV (Obr. 45a) se vytvořil vzor, který je značně nečitelný a poskytuje pouze náznak typického diagramu pro vnitřní výbojovou činnost. Hodnoty náboje se v tomto případě pohybovaly v okolo 45 pC. Po zvýšení napětí (Obr. 45b) se vytvořily dva totožné obrazce, které naznačují vnitřní výbojovou činnost způsobenou vnitřní delaminací. Vrcholové hodnoty náboje dosahovaly hodnoty do 240 pC. Delaminace mohla být ve vzorku způsobena nedokonalým rozlitím pryskyřice po celém povrchu lepenky během spojování jednotlivých vrstev. Při napětí 5,25 kV se na diagramu vytvořily nové vzory, které byly vzhledem k předchozímu vzoru intenzivnější. Hodnota náboje dosahovala v maximech 550 pC. Je rovněž patrné, že v tomto případě působilo více zdrojů výbojové činnosti, jelikož vykazuje víc než jeden obrazce v PRPD vzoru. Vzhledem ke tvaru vzoru se patrně mohlo jednat o prostorově větší delaminaci, jež vykazovala vyšší elektrickou pevnost a výbojová aktivita se začala projevovat až po dosažení vyšší hodnoty napětí.



Obrázek 45 - PRPD diagramy pro uspořádání měření vnitřních výbojů – transformátorová lepenka – (a) 4kV; (b) 4,2kV; (c) 5,25kV

Na obrázku 46 jsou zobrazeny PSA diagramy pro tři hodnoty napětí, při kterých byl zachycena vnitřní výbojová činnost. Z diagramů je patrné, že rozsah, ve kterých se hodnoty pohybují, jsou prakticky totožné s hodnotami náboje na ekvivalentních PRPD diagramech.



Obrázek 46 - PSA diagramy pro uspořádání měření vnitřních výbojů transformátorová lepenka (lesklá)

ZÁVĚR

Záměrem diplomové práce bylo demonstrovat a zhodnotit chování jednotlivých typů částečných výbojů při střídavém a stejnosměrném napětí. Z důvodu možnosti porovnání jednotlivých typů ČV byla použita pulzně sekvenční analýza, která umožnila porovnat jednotlivé výstupy měření při odlišném charakteru napájení. PSA analýza částečných výbojů je vzhledem ke stoupajícímu zájmu zkoumání ČV při stejnosměrném napětí jedním z možných způsobů hodnocení toho jevu. Z tohoto důvodu bylo cílem práce demonstrovat výstupy měření pro jednotlivé typy výbojů na PSA diagramech.

V úvodní části práce byly obecně charakterizovány aspekty diagnostiky a zároveň rozebrány jednotlivé přístupy k diagnostice elektrických strojů a systémů, tj. vibro-diagnostika, akustická diagnostika, termo-diagnostika, tribo-diagnostika, defektoskopie, elektro-diagnostika. Z hlediska zaměření práce byly nejrelevantnější přístupy akustická diagnostika a elektro-diagnostika. Následující kapitola se věnovala diagnostice izolačního podsystemu, jež je nejcitlivějším článkem v řetězci provozuschopnosti VN systémů a zařízení. Byl proveden rozbor jednotlivých metod a parametrů, které dávají informaci o stavu izolace.

Předmětem následujících kapitol byl rozbor teorie okolo částečných výbojů a možných účinků na izolační podsystem. Částečné výboje jsou obecně degradační činitel, který v izolačním systému zrychluje proces stárnutí, a tudíž dobu do totálního průrazu. Z tohoto důvodu byl proveden i rozbor možných defektů způsobené tímto fenoménem majoritně pro točivé a netočivé stroje v kapitole 4. Obecně lze říct, že u všech elektrických strojů mohou působit všechny typy částečných výbojů.

Předmětem poslední rešeršní kapitoly bylo sestavit přehled detekčních a lokalizačních metod odhalování ČV. Za nejběžnější metodu lze považovat galvanickou konvenční metodu, která je obsažena i v normě ČSN EN 60270. Za další velmi perspektivní metody lze považovat akustické a nepřímé vysoko-frekvenční metody, které jsou předmětem dalších výzkumů a nových inovací. Nutno dodat, že v literatuře existuje celá řada modifikací uvedených metod.

Experimentální část se věnovala měření částečných výbojů na konkrétních vzorcích. V úvodu kapitoly byla představena použitá měřicí technika společně s popisem přípravy jednotlivých vzorků.

Z výstupů měření korónových výbojů vyplynuly rozdíly mezi chováním ČV při střídavém a záporném stejnosměrném napětí. Při střídavém napětí se mimo trichelova impulzů od jisté hodnoty napětí začaly působit strimérové výboje, což se projevilo změnou charakteru diagramu. Z diagramů pro stejnosměrné napětí bylo patrné, že při obdobných hodnotách napětí se strimérové výboje neprojevovaly.

Rozdíly mezi střídavým a stejnosměrným výstupem se projevily i při měření povrchových výbojů. Při střídavém napájení výboje vykazovaly hodnoty náboje v řádech nC, přičemž s rostoucím napětím rostla intenzita i četnost impulzů. Při stejnosměrném záporném napětí výboje vykazovaly odlišný mechanismus. Nebylo možné zachytit zapalovací napětí, jelikož výboje vykazovaly velmi nízkou četnost impulzů, což se projevilo i na PSA diagramech.

Měření na drážce statoru bylo provedeno pouze při střídavém napětí, přičemž byly použity dvě konfigurace - drážka zajištěná upevňovacím klínem a drážka bez upevňovacího klínu. Z výstupů měření bylo patrné, že drážka bez upevňovacího klínu vykazovala podstatně vyšší hodnoty náboje pro všechny testované hodnoty napětí. Potvrdilo se tak, že v drážce bez upevňovacího klínu probíhaly výbojové mechanismy způsobené dynamickými účinky proudu, které vedou k pohybu statorové tyče, vibracím, degradaci ochranných vnitřních vrstev, atd. Pokud je drážka správně zajištěna, lze diametrálně snížit výbojovou aktivitu.

Závěr práce se věnoval vyhodnocení vnitřních výbojů při střídavém napětí. Byla použita relanexová destička a vzorek vyrobený z transformátorové lepenky. U prvního vzorku se projevila velmi nízká výbojová činnost, což bylo způsobeno charakterem vzorku. U druhého vzorku se projevily značně silnější výboje. Na základě PRPD diagramů bylo možné usoudit, že výbojová činnost byla způsobena prostorovou delaminací uvnitř vzorku.

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] VDOLEČEK, František. Technická diagnostika v systémech údržby. *Automa* [online]. 2008, 30–32. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/37313.pdf
- [3] MIŠÁK, Stanislav a kol. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA NA ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH*. B.m., 2008. VŠB-TUO.
- [4] MENTLÍK, Václav a Radek POLANSKÝ. Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky. *Elektro* [online]. nedatováno, 6–11. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/aspekty-strukturalni-elektrotechnologicke-diagnostiky--11917>
- [5] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. B.m.: Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.
- [6] TŮMOVÁ, O., PIRICH, D. *Nástroje řízení jakosti a základy technické diagnostiky*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7043-247-0.
- [7] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [8] IMBURGIA, Antonino, Rosario MICELI, Eleonora Riva SANSEVERINO, Pietro ROMANO a Fabio VIOLA. Review of space charge measurement systems: acoustic, thermal and optical methods. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2016, **23**(5), 3126–3142. ISSN 1070-9878. [cit. 15.1. 2019], Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2016.7736878
- [9] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0158-6.
- [10] BERAN, Vlastimil, Josef GIRG a Olga TŮMOVÁ. *Měření neelektrických veličin*. 1. vyd. Plzeň: ZČU Plzeň, 1994. ISBN 80-7082-158-2.
- [11] HARJO, Suwarno. *Partial Discharge in High Voltage Insulating Materials* [online]. 2016. [cit. 20.1. 2019], Dostupné z: doi:10.15676/ijeei.2016.8.1.11

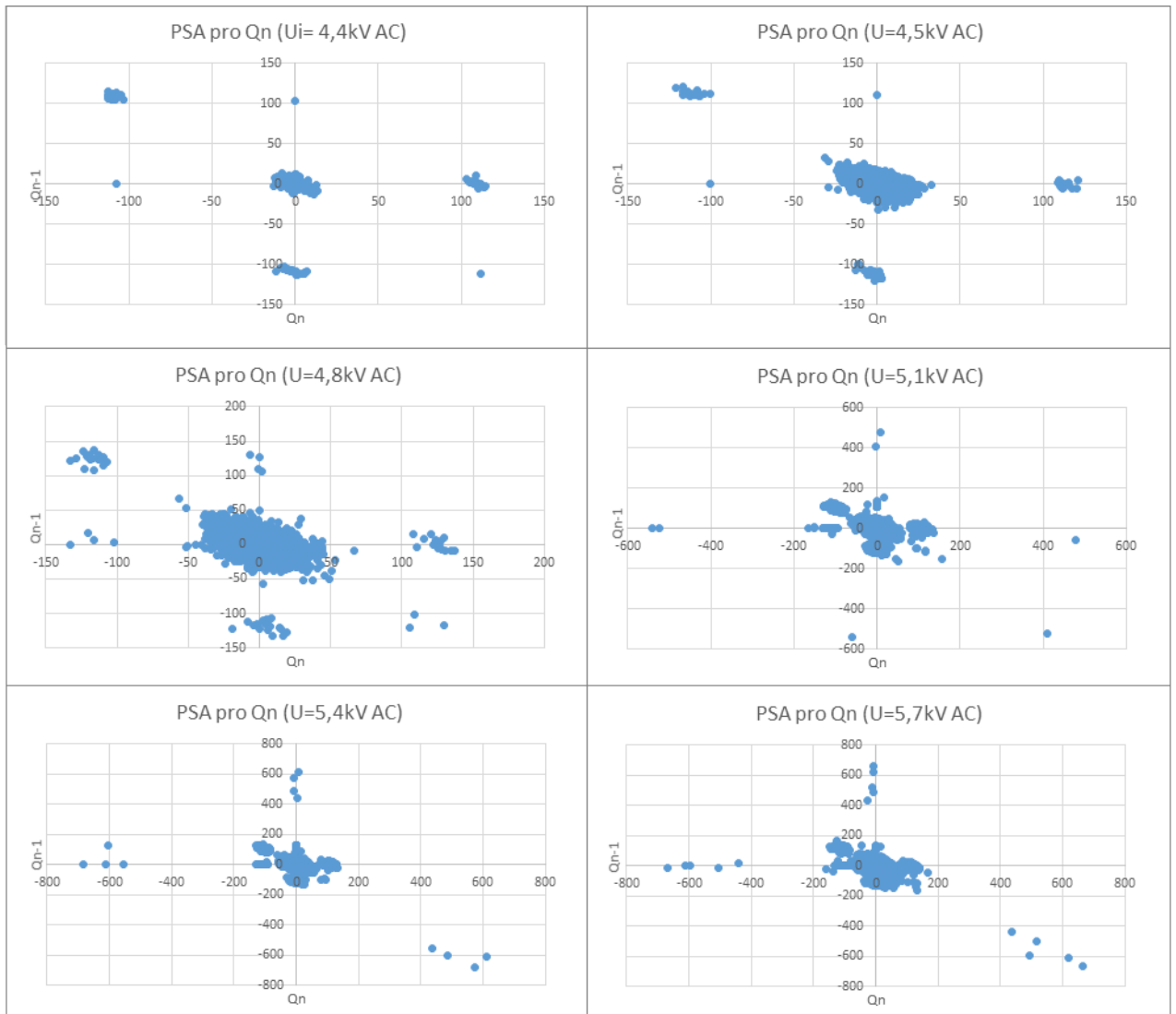
- [12] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [13] KÜCHLER, Andreas. *High Voltage Engineering* [online]. Schweinfurt: Springer Vieweg, 2018. [cit. 25. 1. 2019], Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-11993-4
- [14] TRNKA, P, J PIHERA, M SVOBODA a J SOUČEK. New challenges in partial discharge measurements. In: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)* [online]. 2013, s. 75–78. ISBN 2159-168. [cit. 1.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/ICSD.2013.6619815
- [15] MORSHUIS, P H F. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2005, **12**(5), 905–913. ISSN 1070-9878-12. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2005.1522185
- [16] CHAMPION, J V, S J DODD, A S VAUGHAN, Y ZHAO a S J SUTTON. The effect of voltage, temperature and morphology on electrical treeing in polyethylene blends. In: *2000 Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications (IEE Conf. Publ. No. 473)* [online]. 2000, s. 35–40. [cit. 2.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1049/cp:20000473
- [17] CIGRE - WORKING GROUP - A1.10. Survey of Hydrogenerator Failures. 2009, (October).
- [18] BRÜTSCH, R, M TARI, K FRÖHLICH, T WEIERS a R VOGELSANG. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators [Feature Article]. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2008, **24**(4), 17–25. ISSN 0883-7554. [cit. 4.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/MEI.2008.4581636
- [19] SADEGHI, I, H EHYA, R N ZARANDI, J FAIZ a A A S AKMAL. Condition Monitoring of Large Electrical Machine under Partial Discharge Fault - A review. In: *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)* [online]. 2018, s. 216–223. [cit. 7.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/SPEEDAM.2018.8445261
- [20] KRAETGE, A. *PARTIAL DISCHARGES IN TRANSFORMERS*. B.m.: CIGRE, 2017. ISBN 978-2-85873-379-8.

- [21] BARTNIKAS, R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2002, **9**(5), 763–808. ISSN 1070-9878, [cit. 14.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2002.1038663
- [22] BERG, G a L E LUNDGAARD. Discharges in combined transformer oil/paper insulation. In: *Proceedings of 1999 IEEE 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99) (Cat. No.99CH36213)* [online]. 1999, s. 144–147. [cit. 18.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/ICDL.1999.798890
- [23] REFAAT, S S, M SAYED, M A SHAMS a A MOHAMED. A Review of Partial Discharge Detection Techniques in Power Transformers. In: *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)* [online]. 2018, s. 1020–1025. [cit. 1.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/MEPCON.2018.8635126
- [24] LUO, Yuanlin, Zhaohui LI a Hong WANG. *A review of online partial discharge measurement of large generators* [online]. 2017. ISBN 8618007177889. [cit. 1.3. 2019], Dostupné z: doi:10.3390/en10111694
- [25] MUHR, M a R SCHWARZ. Partial discharge measurement as a Diagnostic Tool for HV-Equipments. In: *2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials* [online]. 2006, s. 195–198. ISBN 2160-9225. [cit. 1.4. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/ICPADM.2006.284151
- [26] CHAI, Hua, B. T. PHUNG a Steve MITCHELL. Application of UHF Sensors in Power System Equipment for Partial Discharge Detection: A Review. *Sensors (Basel, Switzerland)* [online]. 2019, **19**(5). ISSN 14248220. [cit. 1.4. 2019] Dostupné z: doi:10.3390/s19051029
- [27] KHEIRMAND, A, M LEIJON a S M GUBANSKI. New practices for partial discharge detection and localization in large rotating machines. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2003, **10**(6), 1042–1052. ISSN 1070-9878. [cit. 1.2. 2019] Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2003.1255782
- [28] AL SAEDI, Malik Abdul Razzaq a Mohd Muhridza YAACOB. Partial Discharge Detection Using Acoustic and Optical Methods in High Voltage Power Equipments: A Review. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **845**, 283–286. [cit. 1.4. 2019] Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/amr.845.283
- [29] SIKORSKI, Wojciech. Development of Acoustic Emission Sensor Optimized for

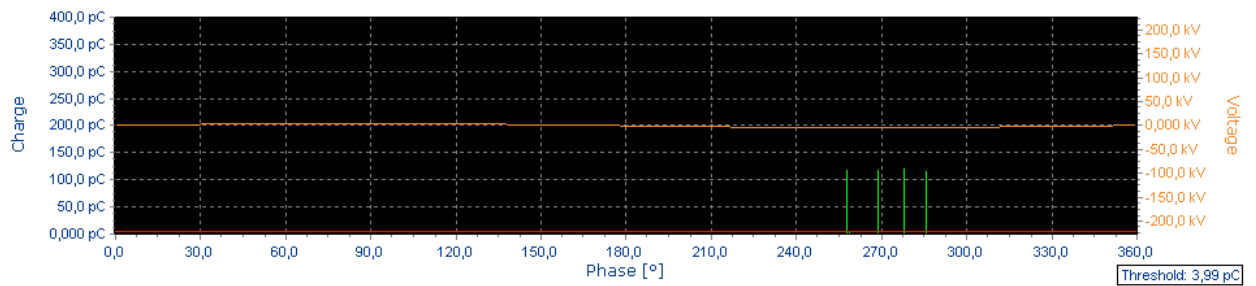
- Partial Discharge Monitoring in Power Transformers [online]. 2019. [cit. 15.4. 2019] Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/s19081865>
- [30] SIKORSKI, Wojciech. Active dielectric window: A new concept of combined acoustic emission and electromagnetic partial discharge detector for power transformers. *Energies* [online]. 2019, **12**(1). ISSN 19961073. [cit. 15.4. 2019] Dostupné z: doi:[10.3390/en12010115](https://doi.org/10.3390/en12010115)
- [31] YAACOB, M. M., M. A. ALSAEDI, J. R. RASHED, A. M. DAKHIL a S. F. ATYAH. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors. *Photonic Sensors* [online]. 2014, **4**(4), 325–337. ISSN 21907439. [cit. 1.4. 2019] Dostupné z: doi:[10.1007/s13320-014-0146-7](https://doi.org/10.1007/s13320-014-0146-7)
- [32] MUHAMAD, N A, B T PHUNG a T R BLACKBURN. Dissolved gas analysis (DGA) of partial discharge fault in bio-degradable transformer insulation oil. In: *2007 Australasian Universities Power Engineering Conference* [online]. 2007, s. 1–6. [cit. 1.5. 2019] -. Dostupné z: doi:[10.1109/AUPEC.2007.4548072](https://doi.org/10.1109/AUPEC.2007.4548072)
- [33] PIHERA, J, R HALLER a P MRÁZ. Partial discharges evaluation at DC voltage. In: *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. 2014, s. 441–445. [cit. 15.4. 2019]. Dostupné z: doi:[10.1109/EPE.2014.6839436](https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839436)
- [34] PIHERA, J, J HORNAK, L KUPKA, E MĚLLEROVÁ a R HALLER. Modified Pulse Sequence Analysis for PD measurement at DC. In: *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)* [online]. 2018, s. 1–4. [cit. 17.4. 2019], Dostupné z: doi:[10.1109/ICD.2018.8514785](https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514785)

PŘÍLOHY

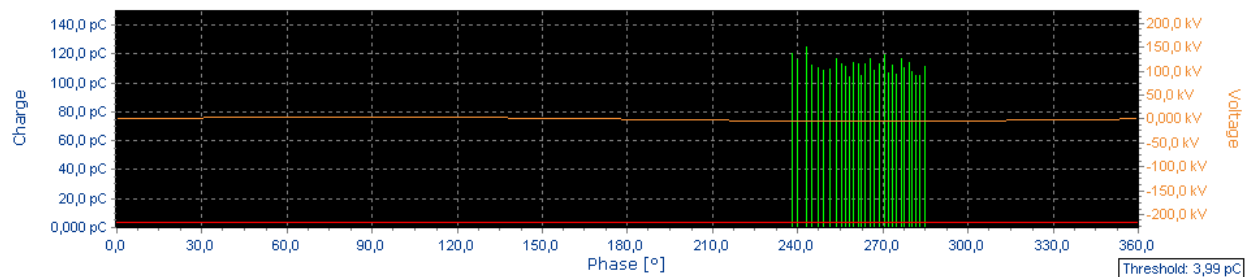
Příloha A - PSA diagramy pro uspořádání „hrot-miska 1cm“ při střídavém napětí ($t=5s$)



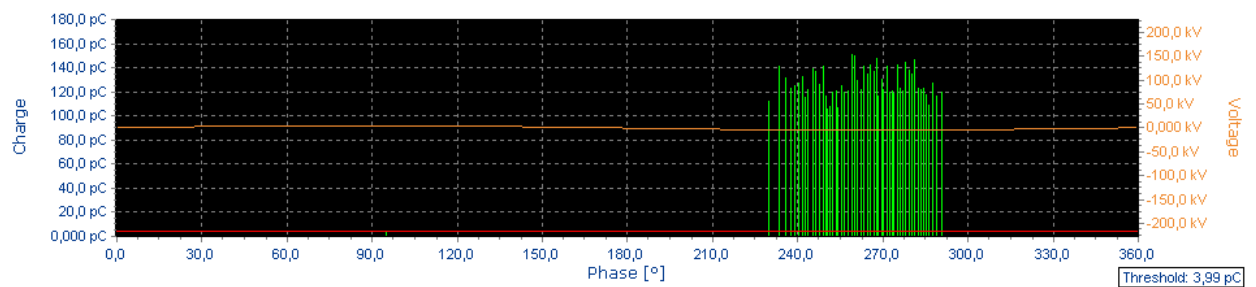
**Příloha B - Pulzní diagramy pro uspořádání „hrot-miska 1cm“ při střídavém napětí -
(a) 4,4kV; (b) 4,8kV; (c) 5,1kV; (d) 5,4kV; (e) 5,7kV**



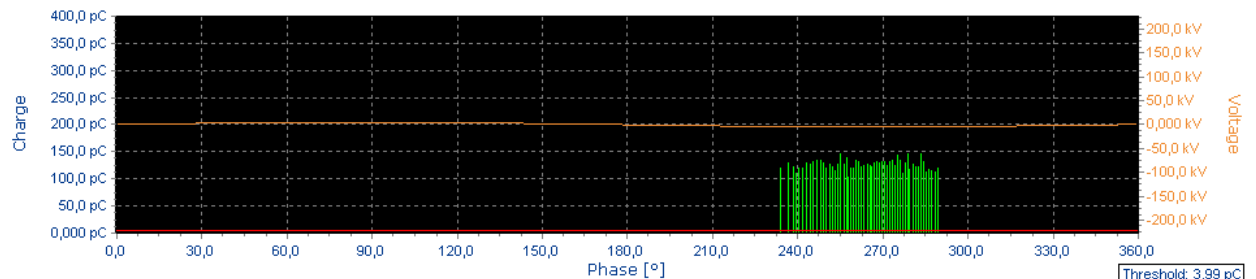
a)



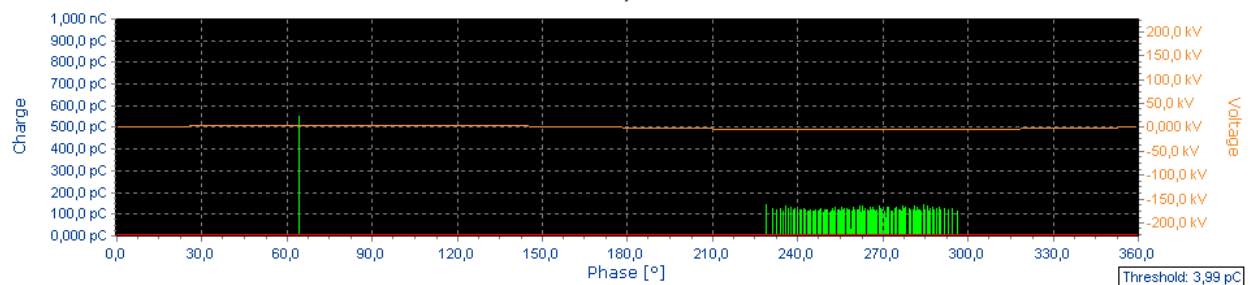
b)



c)

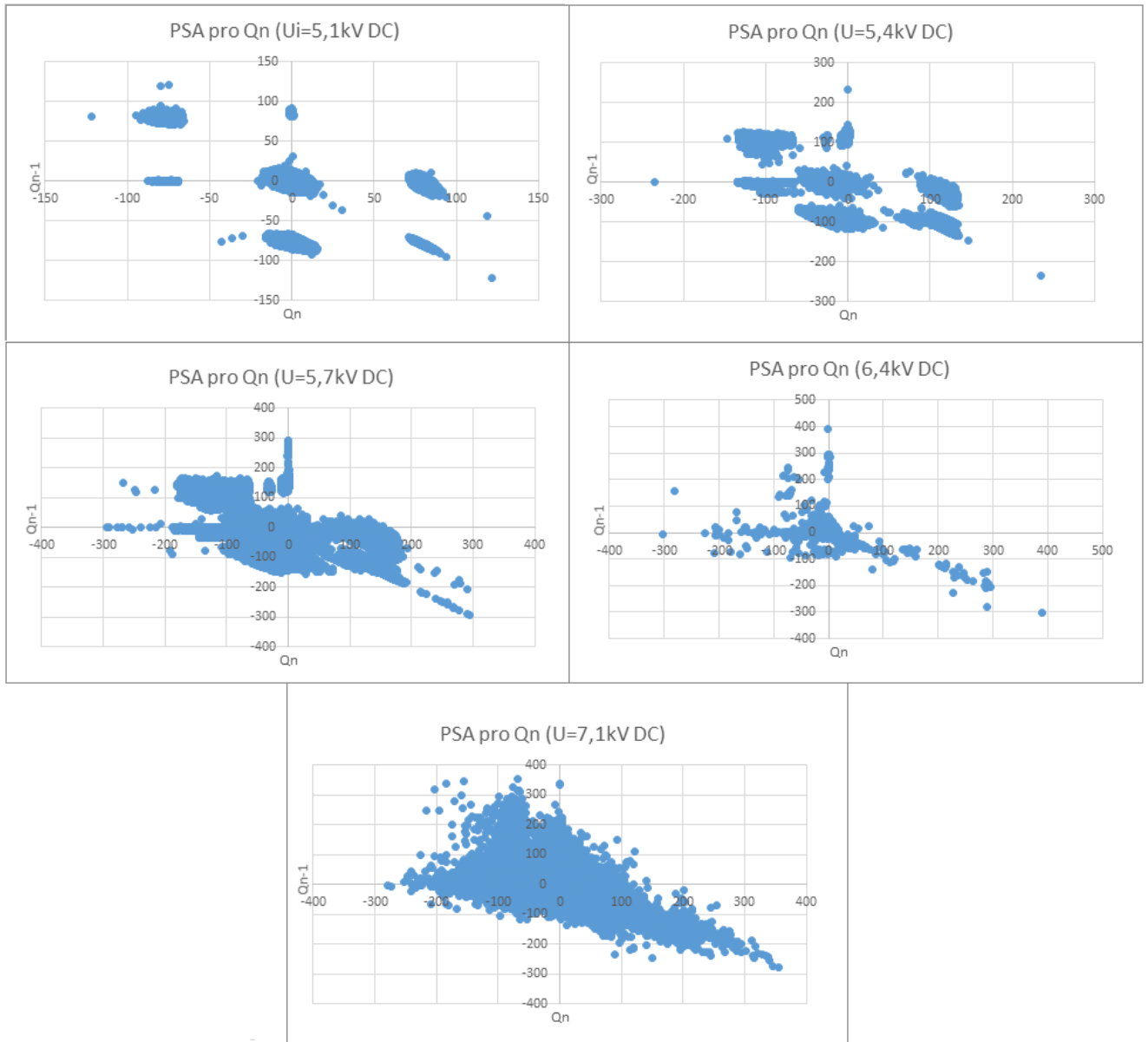


d)

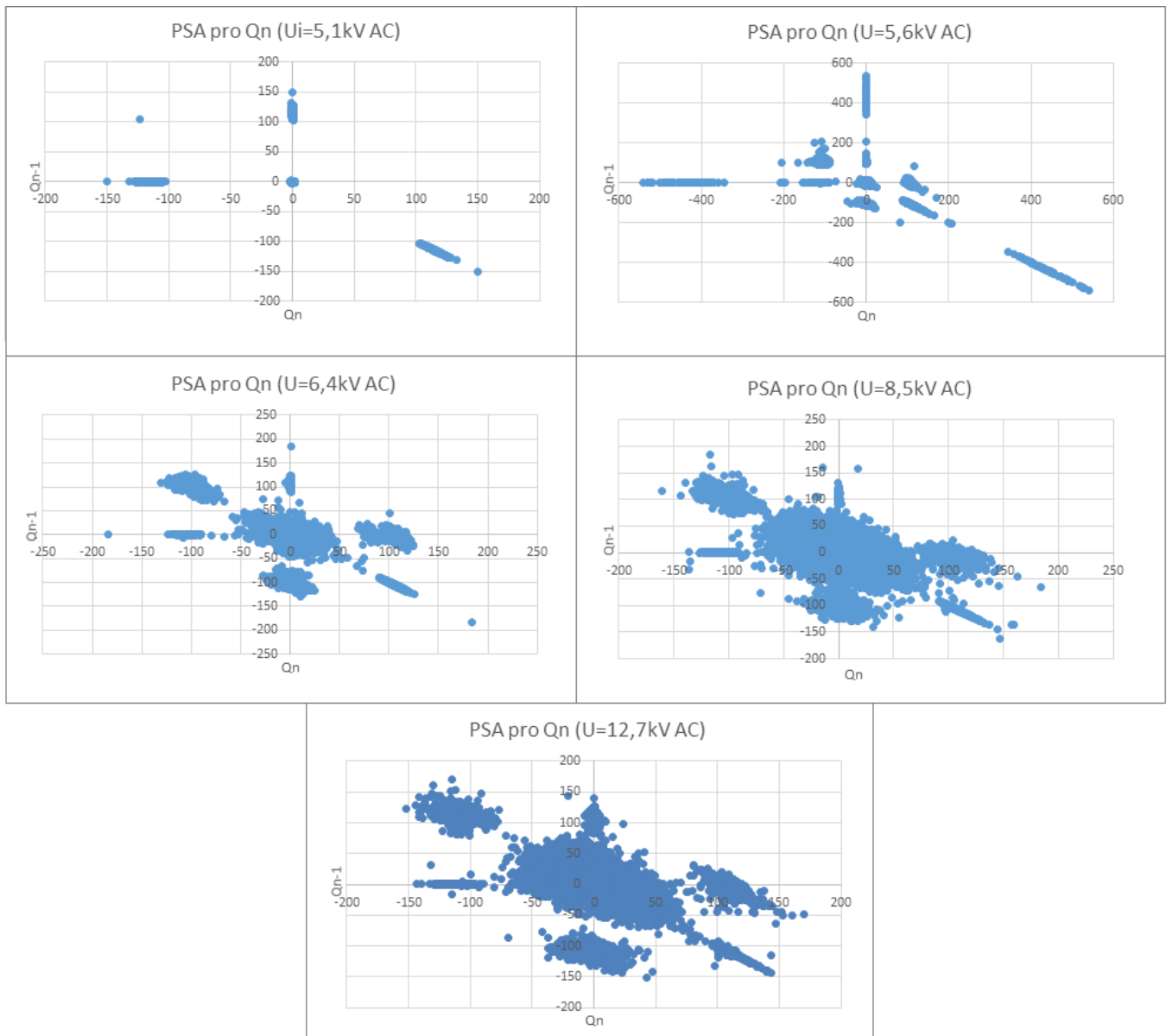


e)

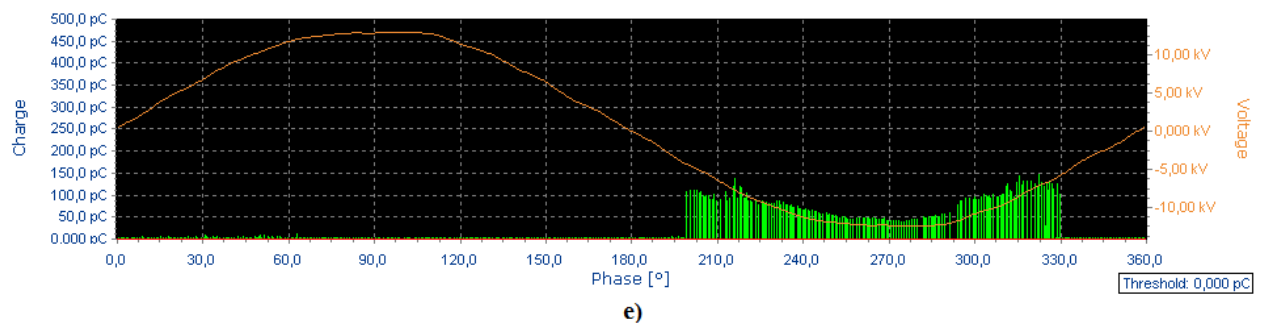
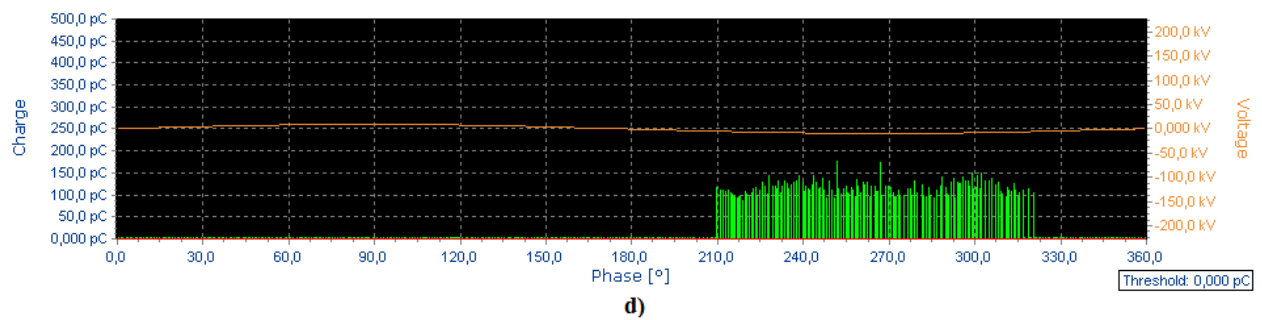
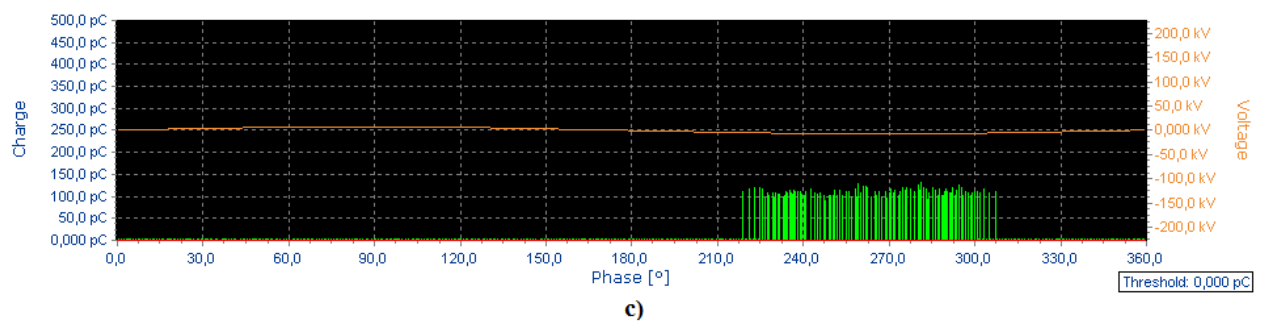
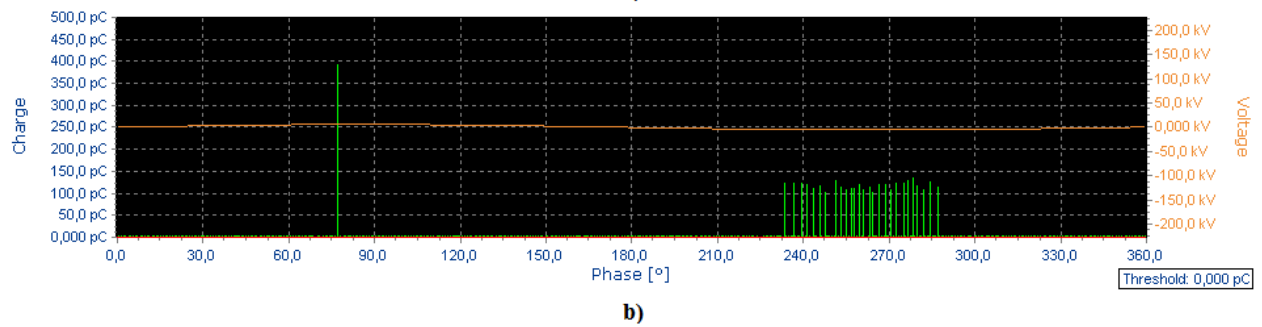
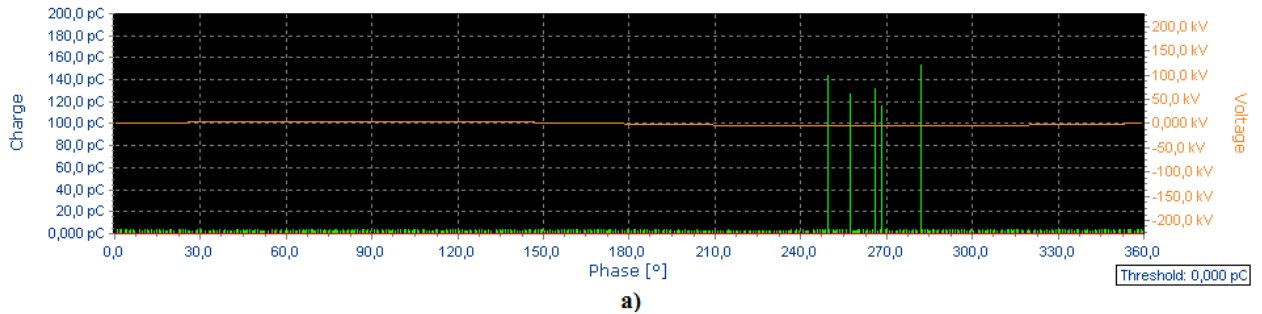
Příloha C - PSA diagramy pro uspořádání „hrot-miska 1cm“ při stejnosměrném záporném napětí (t=5s)



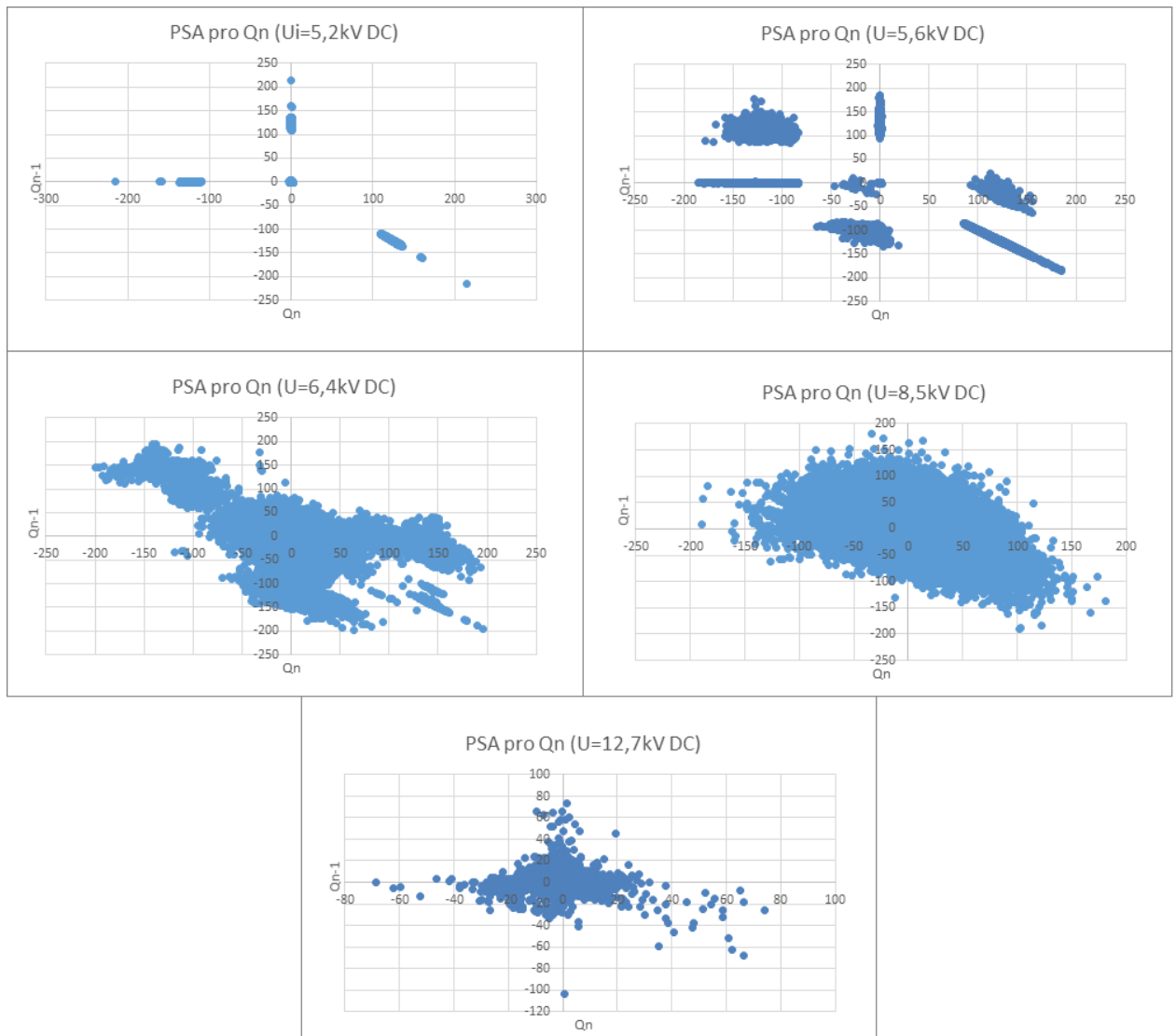
**Příloha D - PSA diagramy pro uspořádání „hrot-miska 2cm“ při střídavém napětí
(t=5s)**



**Příloha E - Pulzní diagramy pro uspořádání „hrot-miska 2cm“ při střídavém napětí -
(a) 5,1kV; (b) 5,6kV; (c) 6,4kV; (d) 8,5kV; (e) 12,7kV**



Příloha F - PSA diagramy pro uspořádání „hrot-miska 2cm“ při stejnosměrném záporném napětí ($t=5s$)



Příloha G - Pulzní diagramy pro uspořádání „hrot-miska 2cm“ při stejnosměrném záporném napětí - (a) 5,2kV; (b) 5,6kV; (c) 6,4kV; (d) 8,5kV; (e) 12,7kV

