



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PROBLEMATIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ
V PLYNEM IZOLOVANÝCH VODIČÍCH

THE PARTIAL DISCHARGES DIAGNOSTICS IN GAS-INSULATED CONDUCTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Ficek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Fícek
Ročník: 2

ID: 155161
Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Problematika částečných výbojů v plynu izolovaných vodičích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický základ diagnostiky částečných výbojů
2. Konstrukce a vlastnosti plynu izolovaných komponent vyráběných v ABB
3. Praktické měření na zapouzdřených vodičích ABB
4. Vytvoření knihovny s jednotlivými případy vzniku částečných výbojů v určitých místech zapouzdřených vodičů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 22.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Konzultant:



Petr Toman
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Předkládaná práce je zaměřena na měření částečných výbojů v plynu izolovaných vodičích vyráběných firmou ABB. Teoretická část obsahuje definici částečných výbojů, jejich rozbor a metody detekce. Dále se zabývá obecně popisem plynu izolovaných rozvodů a poté konkrétně vyráběnými komponenty v ABB ve výrobním závodu Brno-Slatina. Praktická část popisuje průběh měření, definování hlavních problémů a jejich vysvětlení. Výstupem z praktické části je knihovna měření s danými charakteristikami, které ukazují místo a charakter problému při detekci částečného výboje v dané zapouzdřené sestavě.

Klíčová slova

Částečný výboj, detekce částečného výboje, plynem izolovaný vodič, plynem izolovaná rozvodna

Abstract

This work is focused on the measurement of partial discharges in gas insulated conductors manufactured by ABB. The theoretical part contains the definition of partial discharges, their analysis and detection methods. It also deals with the general description of gas-insulated substations and then with the concrete components manufactured at ABB in the Brno-Slatina production plant. The practical part describes the course of measurement, definition of the main problems and their explanation. The output from the practical part is a measurement library with given characteristics, which show the location and character of the problem in detecting partial discharge in a given encapsulated assembly.

Keywords

Partial discharge, detection of the partial discharge, gas insulated conductor, gas insulated switchgear

Bibliografická citace:

FICEK, J. *Problematika částečných výbojů v plynem izolovaných vodičích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 61 s. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Problematika částečných výbojů v plynu izolovaných rozvodnách jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady. Dále velice děkuji všem zaměstnancům firmy ABB, kteří se podíleli na realizaci této práce. V poslední řadě děkuji rodině, přátelům, kamarádům ze studentské organizace IAESTE a všem blízkým za podporu a motivaci během celého studia na VUT v Brně.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 ÚVOD.....	14
1.1 MOTIVACE.....	15
1.2 CÍL PRÁCE	15
2 TEORETICKÝ POPIS ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	16
2.1 ČÁSTEČNÝ VÝBOJ PODLE ČSN EN 60270.....	16
2.2 IMPULZ ČÁSTEČNÉHO VÝBOJE A VELIČINY K NĚMU SE VZTAHUJÍCÍ	16
2.3 ČLENĚNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	18
2.4 VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	18
2.5 VNĚJŠÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	20
2.6 ÚČINKY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	21
3 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	22
3.1 ZÁKLADNÍ ZKUŠEBNÍ OBVODY A MĚŘICÍ SYSTÉMY GALVANICKÉ METODY.....	22
3.2 NEJISTOTA A CITLIVOST MĚŘENÍ	25
3.3 CHARAKTERISTIKY MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ	25
3.4 MĚŘICÍ SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ ZDÁNLIVÉHO NÁBOJE	26
3.4.1 VAZEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	26
3.4.2 ODEZVA NA SLED IMPULZŮ PŘÍSTROJŮ PRO MĚŘENÍ ZDÁNLIVÉHO VÝBOJE	26
3.4.3 ÚZKOPÁSMOVÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČV	27
3.4.4 ŠIROKOPÁSMOVÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČV	27
3.4.5 ŠIROKOPÁSMOVÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČV S AKTIVNÍM INTEGRÁTOREM.....	27
3.4.6 ULTRA ŠIROKOPÁSMOVÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČV	28
3.5 KALIBRACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU V KOMPLETNÍM ZKUŠEBNÍM OBVODU	28
3.6 RUŠENÍ	30
3.7 NEELEKTRICKÉ METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	30
3.8 TESTOVACÍ APARATURA ABB.....	31
4 PLYNEM IZOLOVANÉ VODIČE ZVN	34
4.1 OBECNĚ PLYNEM IZOLOVANÉ ROZVODNY.....	34

4.2	PLYNEM IZOLOVANÉ KOMPONENTY ABB.....	37
4.3	VÝROBA A MONTÁŽ SESTAVY PRO PRAKTICKOU ČÁST	40
4.4	KONKRÉTNÍ MĚŘENÁ SESTAVA	42
5	PRAKTICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE	44
5.1	DEFINOVANÉ PODMÍNKY MĚŘENÍ A JEJICH ZHODNOCENÍ	45
5.1.1	MODRÁ PÁSKA	45
5.1.2	PRACHOVÉ ČÁSTICE A NEČISTOTY	46
5.1.3	SILIKON G661	48
5.1.4	VLÁKNA Z ČISTICÍ TEXTILIE	49
5.1.5	KOVOVÉ ČÁSTICE	50
5.2	KNIHOVNA MĚŘENÍ.....	53
5.2.1	DEFINOVANÉ ZKRATKY A MĚŘENÉ VZORKY.....	53
5.2.2	VYSVĚTLIVKY KE KNIHOVNĚ MĚŘENÍ	54
6	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1: Výrobní závod ABB, Brno-Slatina.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.1: Možnosti vzniku vnitřních a povrchových ČV. [13]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2.2: Náhradní schéma pro vnější ČV [4].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2.3: Uspořádání elektrod pro simulaci vnějšího ČV [4]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2.4: Časový průběh napětí při ČV [4]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.1: Vazební zařízení CD v sérii s vazebním kondenzátorem [1]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.2: Vazební zařízení CD v sérii se zkoušeným objektem [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.3: Uspořádání symetrického obvodu [1].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.4: Uspořádání obvodu pro rozlišení polarity [1]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.5: Vazební zařízení CD v sérii s vazebním kondenzátorem [1]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.6: Vazební zařízení CD v sérii se zkoušeným objektem [1].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.7: Blokové schéma testovací aparatury ABB [11]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.8: STEP Compact, ICM Compact</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3.9: HVpilot Software.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.1: Model GIS a použitých komponent vyráběných v ABB [9].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4.2: Izolátor uzavřený a otevřený [9]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4.3: Přetlaková ochrana [9]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4.4: Těsnící kroužky u různých variant příruby [9]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4.5: Montážní prostor [8].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.6: Testování vysokým napětím [8]</i>	<i>37</i>

<i>Obr. 4.7: Prostor balení [8].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4.8: ELK-3/420 C – montážní jednotka [8].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4.9: Příprava vodiče na montáž.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4.10: Detail svaření zapouzďení a příruby</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4.11: Vrypy na vodiči</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4.12: Znečištění zapouzďení</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4.13: Přechištění zapouzďení – viditelné znečištění</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4.14: Fotografie celé testované sestavy typu ELK-3 na 420 kV</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4.15: Náčrt celé měřené sestavy typu ELK-3 na 420 kV.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 5.1: Měření MP umístěné na otevřeném izolátoru</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5.2: Měření MP v odchlípnutém stavu na ZS</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5.3: Prachové částice zachycené na těsnícím kroužku.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5.4: Vzorek prachu a vláken z čistící textilie</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5.5: Silikon G661 aplikovaný na vodič.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 5.6: Vlákná z čistící textilie umístěné na zapouzďení zkušebního adaptéru.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5.7: Vlákná z čistící textilie uchycené na vodiči.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5.8: Kovová špona ve vnitřní části zapouzďení</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5.9: Detail příruby se svorníkem.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5.10: Kovová špona umístěna na zakončovacím stínění</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.11: Vzorek 3 umístěn na vodiči</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.12: Jedna strana knihovny měření s označenými čísly k bližšímu vysvětlení</i>	<i>56</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1: PIV produkované ve výrobním závodu Brno-Slatina [8] 38

Tab. 4.2: Jednotlivé typy sběrnic ABB [9] 39

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

CC	Connection Cable (spojovací kabel)
CC	Control Cabinet (ovládací pult s měřicími panely)
CD	Coupling device (vazební zařízení)
CKS	Coupling Capacitor (vazební kondenzátor)
CR	Compensating Reactor (kompenzační tlumivka)
ČV	Částečný výboj
ČSN	Česká technická norma
DZ	Damping Impedance (tlumivka)
EUT	Equipment Under Test (testovaný objekt)
G	Generátor skokového napětí
GIS	Gas insulated switchgear (plynem izolovaná rozvodna)
LF	Line Filter (síťový filtr)
MI	Measuring instrument (měřicí přístroj)
MP	Modrá páska
OI	Otevřený izolátor
PIR	Plynem izolovaná rozvodna
PIV	Plynem izolovaný vodič
PS	Primary Switch (stykač na primární straně RT)
RT	Regulating Transformer (regulační transformátor)
SAM(L)	Fast Switch-off Module: Disconnecter (rychlodpojovač)
SAM(K)	Fast Switch-off M.: Short Circuit Switch (rychlouzkratovač)
SS	Secondary Switch (stykač na sekundární straně RT)
THD	Harmonic Distortion Filter (filtr vyšších harmonických)
TT	Test Transformer (testovací transformátor TES 1000)
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
VG	Zapouzďřený vodič typu VG (rovný)
VL	Zapouzďřený vodič typu VL (kloub)
VZ	Vazební zařízení
Z	Filtr

ZA	Zkušební adaptér	
ZS	Zakončovací stínění	
ZVN	Zvlášť vysoké napětí	
C_a	Kondenzátor testovaného objektu	
C_k	Vazební kondenzátor	
C_s	Rozptylová kapacita	[F]
D	Střední kvadratický součet	[C ² /s]
f_1	Dolní mezní kmitočet	[Hz]
f_2	Horní mezní kmitočet	[Hz]
f_m	Střední kmitočet pásma	[Hz]
Δf	Šířka pásma	[Hz]
I	Střední proud částečných výbojů	[A]
n	Četnost impulzů	[-]
N	Opakovací kmitočet impulzů	[s ⁻¹]
P	Výkon částečných výbojů	[W]
q	Zdánlivý náboj impulzu	[pC]
T	Perioda zkušebního napětí	[s]
t_i	Čas výskytu impulzu ČV	[s]
T_r	Časové rozlišení impulzu	[s]
T_{ref}	Referenční časový interval	[s]
$U_{\sim}$	Vysokonapěťový zdroj	[V]
U_0	Impulz skokového napětí	[V]
u_i	Okamžitá hodnota zkušebního napětí	[V]
U_i	Počáteční napětí částečných výbojů	[V]
U_e	Zhášecí napětí částečných výbojů	[V]
$Z(f)$	Přenosová impedance	[Ω]
Z_{mi}	Vstupní impedance měřicího systému	[Ω]
φ_i	Fázový úhel impulzu ČV	[°]

1 ÚVOD

V odvětví energetiky se v dnešní době neobejdeme bez transformace napětí na vyšší hodnoty. Přenosová soustava konkrétně v České Republice pracuje na napěťové hladině až 400 kV. Kromě všech kladů spojených s existencí vysokonapěťových soustav se v tomto odvětví nacházejí i zápory a spousta problémů, kterým je potřeba věnovat bližší pozornost. Moderní technologie dokáží částečně nebo úplně eliminovat dané nedostatky, ale oproti tomu roste komplikovanost a cena zařízení.

Budeme-li se zabývat tématem rozvodných zařízení zvlášť vysokého napětí, máme možnost analyzovat problematiku vzduchem izolovaných venkovních rozvoden, nebo vnitřních zapouzďřených rozvoden plněných plynem. Jeden ze společných problémů jsou částečné výboje – u venkovních rozvoden je tento jev nazván koróna, která není tak zajímavá, co se následků vzniku týče, protože se jedná o běžný úkaz. U zapouzďřených rozvoden úkaz částečných výbojů naznačuje, že se ve vnitřním prostoru zapouzďření nachází defekt nebo znečištění.

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou částečných výbojů v plynem izolovaných vodičích zvlášť vysokého napětí vyráběných firmou ABB ve výrobním závodě PGHV Brno-Slatina, který je možné vidět na Obr. 1.1.

Obsah diplomové práce je podle osnovy práce rozdělen do několika hlavních částí. Ve druhé kapitole je pojednáno o teoretickém základu částečných výbojů – charakteristika, rozdělení a podmínky vzniku. Poté je ve třetí kapitole vysvětlena diagnostika a detekce částečných výbojů a problematika spojená s daným tématem. Ve čtvrté části se tato práce zabývá plynem izolovanými rozvodnami – obecně zapouzďřené rozvodny, jejich výhody a nevýhody a poté konkrétní případ plynem izolovaných vodičů vyráběných firmou ABB. Následuje pátá a nejdůležitější kapitola s praktickým měřením na konkrétní testované sestavě. Tato část se skládá z definování podmínek měření, jejich zhodnocení a bližšího vysvětlení knihovny měření. Práce je zakončena závěrečným zhodnocením a přiloženou knihovnou měření.

1.1 Motivace

Plynem izolované vodiče jsou náchylné na jakékoliv vnitřní znečištění či defekty, které vedou k porušení homogenity elektromagnetického pole kolem vodiče a tím ke vzniku částečných výbojů. Tento jev nejen snižuje izolační vlastnosti, ale také snižuje celkovou životnost jednotlivých komponent zapouzdřené rozvodny. V nejhorším případě může dojít k průrazu izolačního média a k výboji v tlakové nádobě.

V okamžiku detekování částečných výbojů při testování zapouzdřených vodičů před expedicí k zákazníkovi, to může znamenat kompletní demontáž a vyhledání problému. Některé jednoduché komponenty mohou dosahovat až 12 metrů a lokalizace defektu či znečištění je obtížné a přesto esenciální. V případě zapouzdřené sestavy složené z více komponent se může jednat o velice zdoluhavý proces.



Obr. 1.1: Výrobní závod ABB, Brno-Slatina

1.2 Cíl práce

Základem této práce je zpracování teoretické části, konkrétně popisu částečných výbojů a diagnostiky měření. Dále se jedná o teoretický popis a vlastnosti plynem izolovaných komponent vyráběných v ABB, protože právě na těchto komponentech probíhala praktická část. Hlavním cílem je knihovna měření s jednotlivými případy vzniku částečných výbojů v určitých místech zapouzdřených vodičů. Tato knihovna byla vytvořena na základě měření, které probíhalo od února 2017 do začátku května 2017 v ABB PGHV v Brně-Slatině.

2 TEORETICKÝ POPIS ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

2.1 Částečný výboj podle ČSN EN 60270

Podle normy ČSN EN 60270 je to lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. V kapitole 2.1 a 2.2 bylo čerpáno z [1].

ČV jsou často důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace. Obecně mají tyto výboje charakter impulzů s dobou trvání mnohem menší než 1 μ s. Dalším případem jsou nepulzní výboje v plynném dielektriku, které mají plynulejší formu. ČV jsou doprovázeny vyzařováním světla, tepla, zvuku, a také chemickými reakcemi.

Velice známou formou ČV je koróna – objevuje se v plynném prostředí kolem vodičů, které jsou vzdálené od pevné nebo kapalné izolace.

2.2 Impulz částečného výboje a veličiny k němu se vztahující

Impulz částečného výboje – napěťový nebo proudový impulz, který je výsledkem přítomnosti ČV objevujícího se ve zkoušeném objektu. Impulz je detekován pomocí vhodných detekčních obvodů, které byly do zkušebního obvodu připojeny pro účel zkoušky. Detektor produkuje na svém výstupu napěťový nebo proudový signál úměrný náboji impulzu proudu na jeho vstupu.

Zdánlivý náboj q impulzu ČV – jde o unipolární náboj, který by měl, je-li injektován mezi svorky zkoušeného objektu v daném zkušebním obvodu ve velmi krátkém čase, na měřicím zařízení způsobit stejnou výchylku jako vlastní proudový impulz ČV. Nejčastěji je tento náboj vyjádřen v pikocoulombech (pC). Zdánlivý náboj není roven množství náboje lokálně působícího v místě výboje, který nemůže být měřen přímo.

Četnost impulzů n – poměr mezi celkovým počtem impulzů ČV detekovaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu.

Opakovací kmitočet impulzů N – počet impulzů ČV za sekundu v případě impulzů, které jsou stejně vzdáleny. Tato veličina je spojena s kalibrací.

Čas t_i výskytu ČV impulzu – doba měřená mezi předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem ČV.

Fázový úhel φ_i výskytu ČV impulzu – vyjádřen ve stupních ($^\circ$).

$$\varphi_i = 360 \cdot \frac{t_i}{T} \quad 2.1$$

- T je perioda zkušebního napětí.

Střední proud částečných výbojů I – odvozená veličina představující součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého výboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T_{ref} děleno tímto intervalem. Obecně je vyjádřen v coulombech za sekundu (C/s) nebo v ampérech (A).

$$I = \frac{1}{T_{ref}} \cdot \sum |q_i| \quad 2.2$$

Výkon částečných výbojů P – jde o odvozenou veličinu, která představuje střední výkon impulzu dodávaný na svorky testovaného objektu způsobený hodnotami zdánlivého výboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T_{ref} . Je obecně vyjádřen ve wattech (W).

$$P = \frac{1}{T_{ref}} \cdot \sum q_i \cdot u_i \quad 2.3$$

- u_i je okamžitá hodnota zkušebního napětí v okamžicích výskytu t_i jednotlivých úrovní q_i .

Střední kvadratický součet D – jedná se o odvozenou veličinu, která je součtem ploch jednotlivých úrovní q_i během zvoleného T_{ref} děleným tímto intervalem. Obecně je vyjádřen jednotkou (C²/s).

$$D = \frac{1}{T_{ref}} \cdot \sum q_i^2 \quad 2.4$$

Počáteční napětí částečných výbojů U_i – charakterizované jako přiložené napětí, při kterém se začnou objevovat opakující se ČV v daném testovaném objektu, je-li napětí přiložené k testovanému objektu postupně navyšováno z nižší hodnoty, při které žádné ČV nebyly zpozorovány. V praxi představuje U_i nejnížší

přiložené napětí, při kterém se úroveň veličiny impulzu ČV rovná nebo převyšuje předepsanou nízkou hodnotu.

Zhásecí napětí částečných výbojů U_e – jedná se o přiložené napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se ČV, je-li napětí přiložené ke zkušebnímu objektu postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které jsou ČV pozorovány. Toto napětí v praxi představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň zvolené veličiny impulzu ČV rovná nebo je menší než předepsaná nízká hodnota.

Zkušební napětí částečných výbojů – předepsané napětí přiložené předepsaným zkušebním postupem pro měření ČV, během kterého by neměl zkoušený objekt vykazovat ČV překračující předepsanou úroveň.

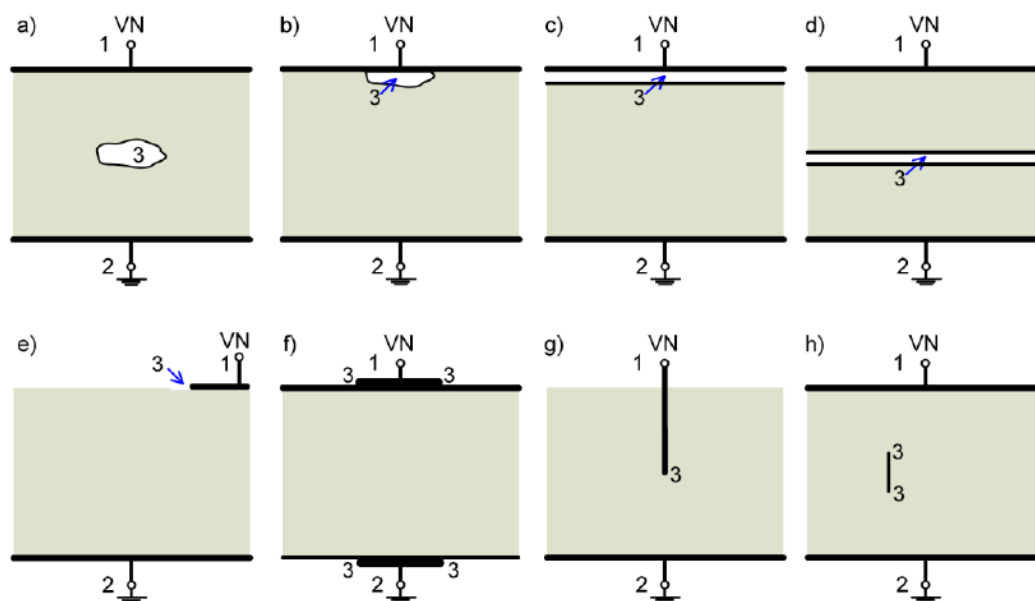
2.3 Členění částečných výbojů

Částečné výboje se člení dle místa výskytu na:

- Vnitřní – výboje v plynech obklopených pevným nebo kapalným dielektrikem. Jedná se například o plynné dutinky v pevném dielektriku.
- Povrchové – výboje v okolí elektrod na rozhraní plynného a pevného dielektrika. Mezi tyto výboje patří klouzavé, nebo drážkové výboje.
- Vnější – výboje v plynném médiu v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení. Může jít o doutnavé výboje nebo korónu. [10]

2.4 Vnitřní a povrchové částečné výboje

Vznikají v dutinách vyplněných plynem uvnitř pevného tělesa nebo v dutinách kapalného izolantu. Jedná se o defekty způsobené při výrobě materiálu, ale také o dutiny objevující se při provozních podmínkách. Může jít také o nehomogenitu mezi izolantem a elektrodou. Případy vzniku těchto ČV jsou zobrazeny na Obr. 2.1. [10]



Obr. 2.1: Možnosti vzniku vnitřních a povrchových ČV. [13]

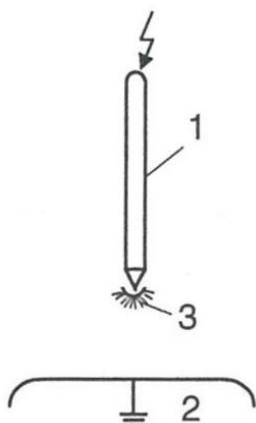
- | | |
|--|--------------------|
| a) Plynová dutina v pevném izolantu | |
| b) Povrchová dutina pod elektrodou | |
| c) Štěrbina mezi elektrodou a pevným izolantem | |
| d) Štěrbina uvnitř izolantu | 1 – elektroda č. 1 |
| e), f) Klouzavé výboje | 2 – elektroda č. 2 |
| g), h) Rozhraní jehlová elektroda-izolant | 3 – místo vniku ČV |

Vznik ČV je podmíněn rozdílem elektrického namáhání mezi plynem v dutině a okolním materiálem. Elektrická pevnost plynu je vždy menší než elektrická pevnost okolního materiálu – dochází tedy k průrazu prostředí v dutině v okamžiku dosažení průrazného napětí – jedná se o zapalovací napětí ČV. Toto napětí je různé pro jiné velikosti dutin a závisí na typu plynu v tomto prostoru. Molekuly plynu se při průrazu rozkládají na záporné a kladné ionty, které se v elektrickém poli pohybují opačným směrem. Tyto ionty se hromadí na stěnách dutiny a dochází tak k vytvoření elektrického pole opačné orientace vůči vnějšímu poli – nastává částečná kompenzace. ČV v dutině hoří po dobu nahromadění tak velkého el. náboje, který způsobí pokles napětí na zhasací napětí ČV. Navyšuje-li se přiložené napětí až do hodnoty počátečního napětí, vznikají opět ČV a děj se opakuje. Jestliže se přiložené napětí nezvyšuje, nahromaděný náboj odchází a na dutince roste napětí až na hodnotu zápalného napětí. Dochází opět ke vzniku ČV. Rychlost přesunu náboje závisí na povrchovém odporu dutiny a vnitřním odporu materiálu. Poté lze určit interval mezi dvěma po sobě následujícími výboji. [10]

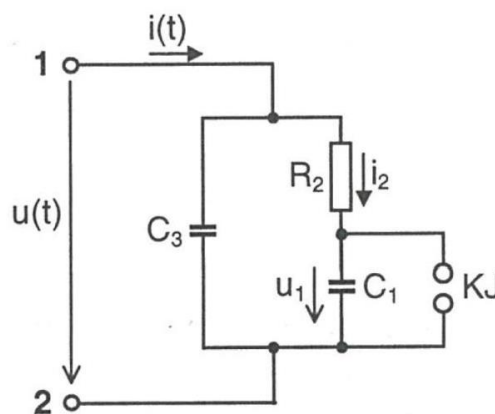
2.5 Vnější částečné výboje

Jde o výboje objevující se na ostrých hranách nebo na elektrodách o malých poloměrech nacházejících se v plynném prostředí – charakteristické je uspořádání hrot-deska. ČV se v tomto případě vyskytují na ostrém zakončení hrotové diody znázorněné na Obr. 2.3. Náhradní schéma simulující ČV je na Obr. 2.2. Kondenzátor C_1 představuje kapacitu vzduchové mezery – pokud dojde k ČV, tato kapacita je zkratována. Odpor R_2 lze vysvětlit jako vodivost náboje akumulovaného na hrotové elektrodě putujícího k deskové elektrodě. C_3 představuje paralelní kapacitu elektrodového uspořádání. [4]

- 1 – hrotová elektroda
- 2 – desková elektroda
- 3 – místo výskytu ČV



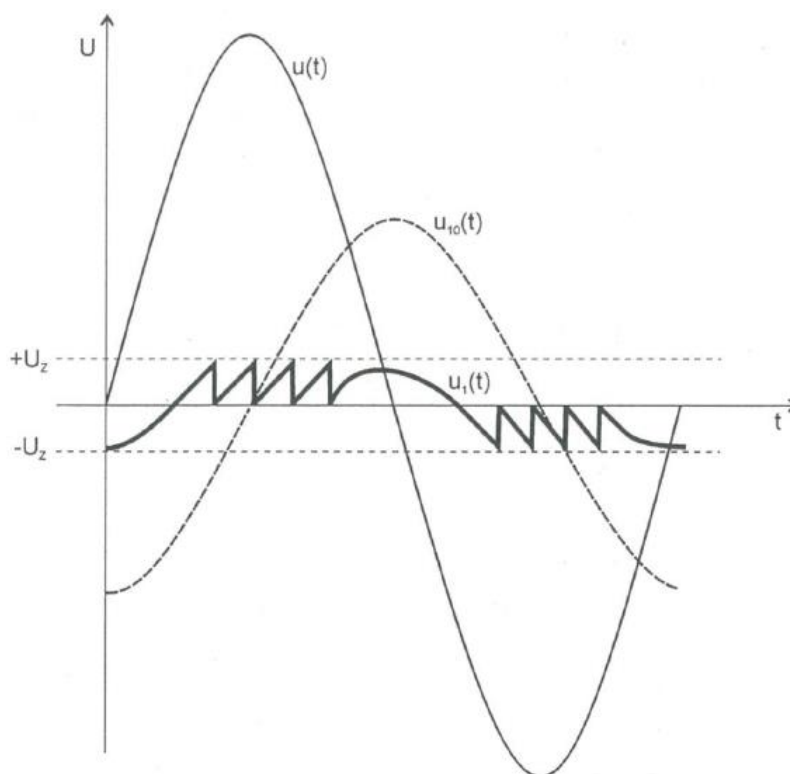
Obr. 2.3: Uspořádání elektrod pro simulaci vnějšího ČV [4]



Obr. 2.2: Náhradní schéma pro vnější ČV [4]

Na Obr. 2.4 je znázorněn časový průběh napětí při ČV. Ty vznikají v okamžiku dosažení napětí na C_1 hodnoty počátečního napětí ČV. [4]

$u(t)$	Napájecí napětí
$u_{10}(t)$	Fiktivní napětí na C_1
$u_1(t)$	Skutečné napětí ČV



Obr. 2.4: Časový průběh napětí při ČV [4]

2.6 Účinky částečných výbojů

Vnitřní ČV v dielektriku mohou mít různé účinky, konkrétně:

- Elektrické účinky – jestliže se v dutině s postupem času vyvine elektrický oblouk, je jeho pravděpodobným následkem vytvoření vodivé dráhy. V případě vyššího napětí může koncentrace elektrického pole na zakončení vodivé dráhy způsobit čistě elektrický průraz v daném místě a vodivá dráha se může postupně šířit dielektrikem.
- Erozivní účinky – výboje v dielektriku mohou erodovat stěny dutinky – dochází k namáhání a stárnutí materiálu. V případě pokročilé eroze může vzniknout čistě elektrický nebo mechanický průraz.
- Chemické účinky – objevují se při déle trvajícím elektrickém namáhání. Dochází k nepatrnému rozkladu izolantu a velice záleží na médiu dutinky a materiálu izolace.
- Tepelné účinky – částečnými výboji dochází k tepelné nestabilitě, protože dochází vlivem těchto výbojů k oteplování dielektrika dutinky a tím klesá napětí tepelného průrazu. [2]

3 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Detekce a měření ČV je jednou z moderních diagnostických metod používaných ve vysokonapěťové technice. Aplikuje se u elektrických vysokonapěťových zařízení pro určení jejich stavu, nebo u vyhodnocení kvality při výrobě. Je použita pro případ diagnostiky GIS systémů, transformátorů, kabelů či točivých strojů. V této době je oblast měření a vyhodnocování ČV dána víceméně hodnocením zdánlivého náboje vzhledem k daným normám – ČSN EN 60270. [4]. V kapitole 3.1–3.6 bylo čerpáno z [1].

3.1 Základní zkušební obvody a měřicí systémy galvanické metody

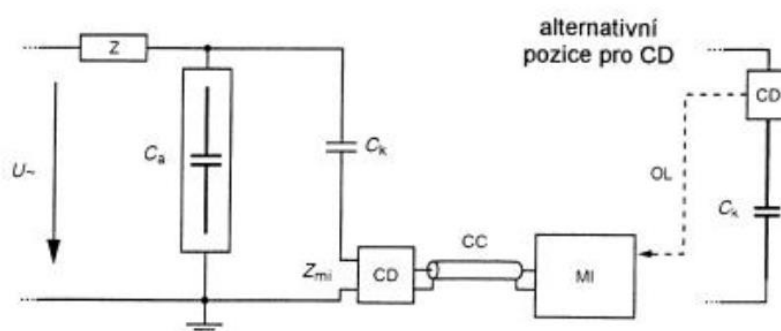
Galvanická metoda je zařazena mezi globální a přímé metody měření – jedná se o přímé snímání proudových impulzů ČV s pomocí vazebního zařízení. Většinu obvodů pro měření ČV je možné odvodit od základních zkušebních obvodů uvedených níže. Každý z těchto obvodů obsahuje:

- Testovaný objekt, který je ve schématu nahrazen kondenzátorem C_a .
- Vazební kondenzátor C_k , který musí být v provedení s nízkou indukčností, nebo druhého zkoušeného objektu C_{a1} , který musí být podobný testovanému objektu C_a . Vazební kondenzátor by měl vykazovat dostatečně nízkou úroveň ČV při daném zkušebním napětí, aby mohlo být provedeno měření předepsané úrovně ČV. Vyšší úroveň ČV může být tolerována, jestliže je měřicí systém schopný rozlišit výboje z testovaného objektu a vazebního kondenzátoru a měřit je odděleně.
- Měřicí systém s jeho vstupní impedancí (se symetrickým obvodem s druhou vstupní impedancí).
- Zdroj VVN s dostatečně nízkou hladinou šumu okolí (Background noise), která umožní měření předepsané úrovně ČV při daném zkušebním napětí.
- Vysokonapěťové pospojování s dostatečně nízkou hladinou šumu okolí.
- Filtř nebo impedance, umístěné v obvodu z důvodu snížení hladiny šumu okolí pocházejícího ze zdroje VVN.

Hlavním úkolem zkušebního obvodu je zajistit odpovídající podmínky pro detekci ČV uvnitř zkoušeného objektu při jmenovitém zkušebním napětí ČV.

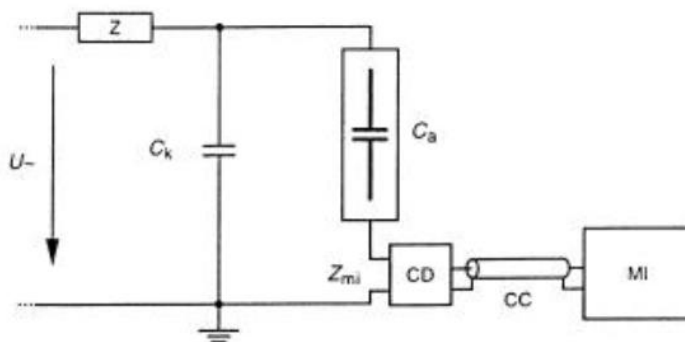
Existují čtyři základní uspořádání, od kterých se odvozují ostatní zkušební obvody pro měření ČV:

- a) Vazební zařízení CD v sérii s vazebním kondenzátorem – kladem uspořádání tohoto zkušebního obvodu na Obr. 3.1 je možnost použití pro měření zkoušeného objektu přímo připojeného mezi vysokonapěťový zdroj a zem. Filtr (impedance) Z je určen k tlumení rušení z VN zdroje a blokování impulzů ČV zevnitř zkoušeného objektu, který by byl jinak částečně překlenut impedancí zdroje – zvýší se tím citlivost měření.



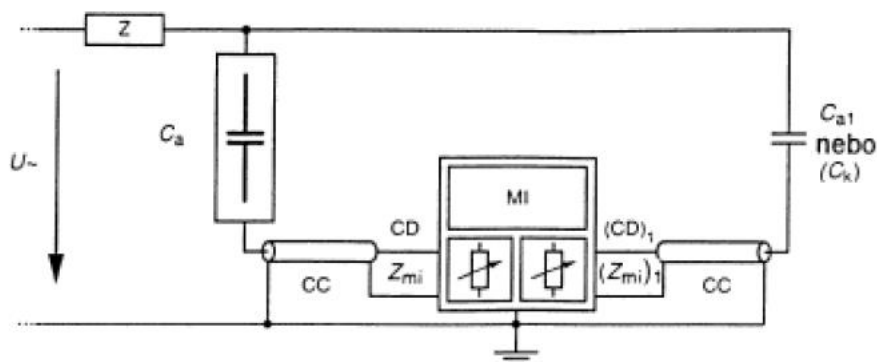
Obr. 3.1: Vazební zařízení CD v sérii s vazebním kondenzátorem [1]

- b) Vazební zařízení CD v sérii se zkoušeným objektem – v tomto uspořádání zobrazeném na Obr. 3.2 musí být nízkonapěťová strana zkoušeného objektu izolovaná od země. Vazební zařízení je kombinováno s ochranným obvodem, který je dimenzovaný tak, aby vydržel poruchový proud při selhání zkoušky. Dané uspořádání s nízkokapacitními komponenty může přinést lepší citlivost, oproti uspořádání a). V některých případech je obvod použit bez samostatného vazebního kondenzátoru.



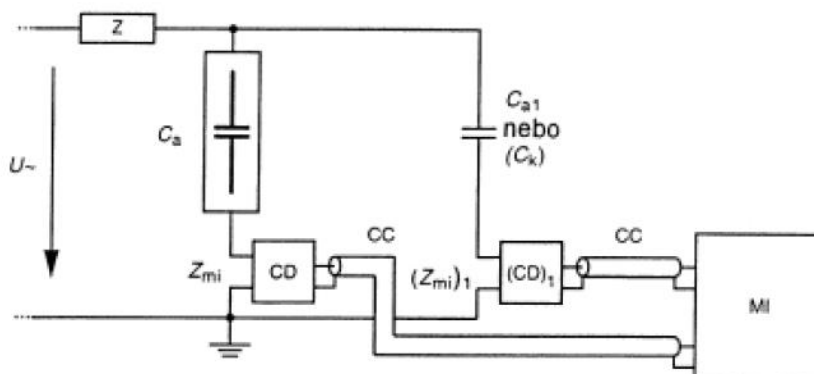
Obr. 3.2: Vazební zařízení CD v sérii se zkoušeným objektem [1]

- c) Symetrický zkušební obvod – je sestavený tak, že měřicí přístroj je připojen mezi dvě vazební zařízení, viz Obr. 3.3. Nízkonapěťové strany musí být opět izolovány od země a hodnoty jejich kapacit by se měly minimálně pohybovat ve stejném řádu. Obvod je založen na potlačování soufázových proudů protékajících přes C_a a C_{a1} , které ale zesilují proudy ČV objevujících se ve zkoušeném objektu, a tím částečně potlačují vnější rušení. Pro identické a dobře stíněné zkoušené objekty může činitel potlačení nabývat vysoké hodnoty.



Obr. 3.3: Uspořádání symetrického obvodu [1]

- d) Uspořádání obvodu pro rozlišení polarity viz Obr. 3.4 – jde o kombinaci dvou základních obvodu a) a b), tedy se musí počítat se stejnými podmínkami jednotlivých obvodů. Princip je založen na porovnání směru toku detekovaných signálů ve dvou vazebních zařízeních – soufázové signály detekovány se stejnou polaritou, signály ČV z ostatních částí s polaritou opačnou. ČV a rušení mohou být rozlišeny hradlovým systémem.



Obr. 3.4: Uspořádání obvodu pro rozlišení polarity [1]

3.2 Nejistota a citlivost měření

Měřené veličiny mohou být ovlivněny dobou, po kterou je napětí vysokonapěťového zdroje přiloženo. Pro tyto veličiny jsou také při měření ČV definovány větší nejistoty, než při běžných vysokonapěťových zkouškách. V praxi je proto obtížné dosáhnout stejného výsledku při opakování zkoušek ČV – tato skutečnost by se měla brát v úvahu při specifikaci přejímacích zkoušek ČV.

Nejistota měření při měření zdánlivého náboje je $\pm 10\%$ nebo ± 1 pC podle toho, která hodnota je větší. U veškerých přístrojů a měřicích systémů se předpokládá nastavení a kalibrace v souladu s normou ČSN EN 60270.

Nejnižší úroveň měřené veličiny je závislá na dvou hlavních faktorech:

- Poměr C_k/C_a – největší citlivosti by mělo být dosaženo, jestliže platí $C_k \gg C_a$. Avšak z důvodu dodatečného zatížení vysokonapěťového zdroje je tato podmínka obtížně splnitelná. V praxi je přijatelná citlivost dosažena s C_k přibližně 1 nF nebo více.
- Rušení nebo šum pozadí – pro danou citlivost měření předepsané úrovně ČV by mělo být rušení dostatečně nízké

3.3 Charakteristiky měřicích systémů

Přenosová impedance $Z(f)$ – poměr amplitudy výstupního napětí k amplitudě konstantního vstupního proudu sinusového průběhu, jako funkce frekvence f .

Dolní a horní mezní kmitočet f_1 a f_2 – jde o frekvence, při kterých dojde k poklesu přenosové impedance o 6 dB od nejvyšší hodnoty v propustném pásmu.

Střední kmitočet pásma

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad 3.1$$

Šířka pásma

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad 3.2$$

Časové rozlišení impulzu T_r – jde o nejkratší časový interval mezi dvěma následujícími vstupními impulzy velmi krátké doby trvání o stejném tvaru, polaritě a velikosti náboje, při kterém se vrcholová hodnota finální odezvy

nezmění o více než 10 % hodnoty jednotlivého impulzu. T_r je obecně nepřímo úměrné šířce pásma měřicího systému.

3.4 Měřicí systémy pro měření zdánlivého náboje

3.4.1 Vazební zařízení

Jde o prvek, který je nezbytný pro korektní funkčnost měřicího systému a zkušebního obvodu. V praxi může být použito více typů vazebních zařízení (VZ) pro optimální citlivost daného testovaného obvodu. VZ je většinou aktivní nebo pasivní čtyřpól, který přeměňuje vstupní proud na výstupní napěťový signál. Tento signál je přenesen prostřednictvím přenosového systému (propojovací kabely) do měřicího zařízení. Propojení VZ s testovaným obvodem by mělo být co nejkratší, jak to je jen prakticky možné – tím jsou minimalizovány vlivy na detekční šířku pásma. Zapojení VZ v měřicím obvodu je zobrazené na Obr. 3.5a na Obr. 3.6.

Kmitočtová odezva VZ je definována poměrem výstupního napětí ke vstupnímu proudu – v praxi je zvolena tak, aby efektivně zabránila frekvenci zkušebního napětí a jeho harmonickým ve vstupu do měřicího přístroje.

3.4.2 Odezva na sled impulzů přístrojů pro měření zdánlivého výboje

Jestliže je amplitudové kmitočtové spektrum vstupních impulzů konstantní v rozsahu šířky pásma měřicího systému, odezva přístroje reprezentuje napěťový impulz s vrcholovou hodnotou úměrnou náboji impulzu vstupního. Vrcholová hodnota, tvar a doba trvání výstupního impulzu jsou stanoveny přenosovou impedancí $Z(f)$ měřicího systému. Tvar a doba trvání impulzu výstupního mohou být tedy rozdílné od parametrů impulzu vstupního.

Napěťové impulzy se zobrazují s lineární časovou základnou (spouštěna od testovacího napětí), nebo se sinusovou časovou základnou (synchronizována s frekvencí testovacího napětí). Často se používá indikační přístroj pro kvantitativní určení největší opakovaně se vyskytující úrovně ČV.

3.4.3 Úzkopásmové přístroje pro měření ČV

Přístroje jsou vyznačovány menší šířkou pásma Δf a středním kmitočtem pásma f_m . Při konstantní hodnotě amplitudového frekvenčního spektra proudového impulsu ČV se může f_m pohybovat v širokém frekvenčním rozsahu. Přenosová impedance by měla být při $f_m \pm \Delta f$ o 20 dB pod maximální hodnotou propustného pásma. Odezva daných přístrojů na proudový impuls ČV má charakter přechodné oscilace s kladnými a zápornými vrcholovými hodnotami její obálky a je úměrná zdánlivému náboji, nezávisle na polaritě tohoto náboje. Hodnota časového rozlišení impulsu T_r bývá typicky větší než 80 μ s.

Doporučené hodnoty:

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz};$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}.$$

3.4.4 Širokopásmové přístroje pro měření ČV

Tento typ přístrojů se skládá z širokopásmového měřicího systému ČV v kombinaci s VZ a je definován přenosovou impedancí $Z(f)$, která má dané hodnoty dolní a horní mezní frekvence f_1 a f_2 a dostatečné zeslabení pod f_1 a nad f_2 . Kombinace různých VZ s měřicím přístrojem vede ke změně přenosové impedance – hledí se na splnění doporučených hodnot. Odezva přístrojů na proudový impuls ČV má většinou charakter utlumené oscilace a určuje zdánlivý náboj q a polaritu impulsu. Hodnota časového rozlišení impulsu T_r je v rozmezí 5 – 20 μ s.

Doporučené hodnoty:

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

$$f_2 \leq 1 \text{ MHz};$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz}.$$

3.4.5 Širokopásmové přístroje pro měření ČV s aktivním integrátorem

Daný druh přístroje obsahuje zesilovač s velmi širokým pásmem, za nímž je zařazen elektronický integrátor definovaný časovou konstantou jeho integrující odporové a kondenzátorové sítě (v praxi v rozsahu 1 μ s). Odezva na impuls ČV představuje napěťový signál zvyšující se s okamžitým součtem náboje. Jestliže je splněn předpoklad, že časová konstanta integrátoru je mnohem delší než doba

impulzu ČV, je výsledná amplituda signálu úměrná celkovému náboji. Časové rozlišení impulzu T_r po následujících impulzech ČV bývá menší než 10 μ s.

3.4.6 Ultra širokopásmové přístroje pro měření ČV

Pro detekci a měření ČV mohou být použity osciloskopy s velmi širokou šířkou pásma nebo frekvenčně selektivní přístroje používané s vhodným VZ (spektrální analyzátoři). Význam mají pro měření zařízení s rozloženými parametry – kabely, točivé stroje nebo plynem izolované rozvodné zařízení – výsledkem je kmitočtové spektrum proudových impulzů nebo informace o fyzikálním původu výboje. Tyto přístroje obvykle neměří přímo zdánlivý náboj proudových impulzů ČV.

3.5 Kalibrace měřicího systému v kompletním zkušebním obvodu

Kalibrace kompletního zkušebního obvodu se provádí za účelem ověření schopnosti měřicího systému korektně měřit předepsanou úroveň částečných výbojů a za účelem stanovení konstanty převodu pro měření zdánlivého výboje. Kalibrace se provádí pro každý zkoušený objekt, protože kapacita zkoušeného objektu C_a ovlivňuje charakteristiky obvodu. Nemusí to tak být u série podobných objektů s kapacitou v rozmezí $\pm 10\%$ z průměrných hodnot. Kalibrace je vykonána kalibrátorem injektováním krátkých proudových impulzů o známém náboji q_0 do svorek zkoušeného objektu při jedné hladině v odpovídajícím rozsahu očekávané úrovně ČV (50 % – 200 % předepsané úrovně ČV) za účelem zaručit dobrou přesnost měření jmenovité amplitudy.

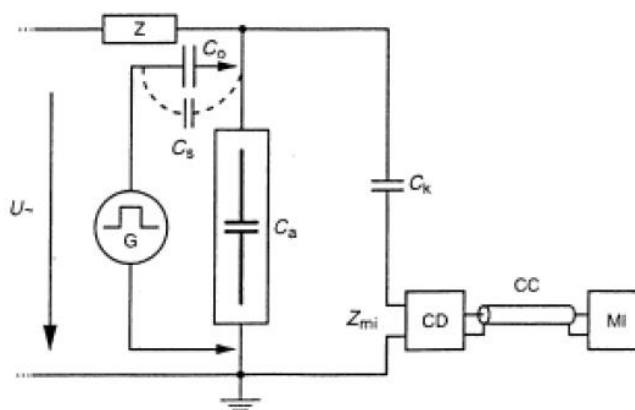
- Kalibrátor s nízkonapěťovým kondenzátorem C_0 – kalibrace kompletního zkušebního uspořádání se zkušebním obvodem bez napětí. Před přivedením napětí musí být kalibrátor z tohoto obvodu odstraněn. Jestliže platí $C_0 < 0,1C_a$, potom je kalibrační impuls ekvivalentní jednorázovému opakujícímu se výboji:

$$q_0 = U_0 \cdot C_0 \quad 3.3$$

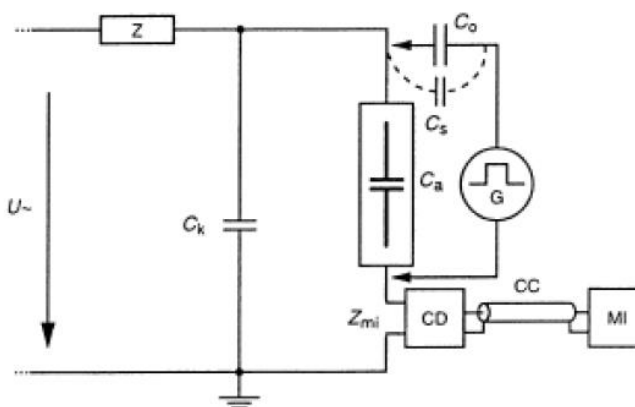
Kde U_0 je hodnota amplitudy impulzu skokového napětí produkovaná generátorem kalibrátoru.

- Kalibrátor s vysokonapěťovým kondenzátorem C_0 a dostatečně nízkou úrovní šumu pozadí – umožňuje kalibraci kompletního zkušebního uspořádání se zkušebním obvodem při předepsaném napětí.

U rozměrnějších testovaných objektů by měl být C_0 umístěn blízko VN svorky – snížíme tím vliv rozptylové kapacity C_s . Aby nedocházelo k deformaci impulzů skokového napětí, musí být propojovací kabely mezi kondenzátorem C_0 a generátorem skokového napětí stíněné a příslušně zakončené.



Obr. 3.5: Vazební zařízení CD v sérii s vazebním kondenzátorem [1]



Obr. 3.6: Vazební zařízení CD v sérii se zkoušeným objektem [1]

$U\sim$	Vysokonapěťový zdroj	C_k	Vazební kondenzátor
G	Generátor skok. napětí	CD	Vazební zařízení
C_0	Kalib. kondenzátor	C_s	Rozptylová kapacita
Z_{mi}	Vstupní Z pro měř. s.	MI	Měřicí přístroj
CC	Spojovací kabel	Z	Filtr
C_a	Zkoušený objekt		

3.6 Rušení

Většina měření je ovlivněna okolním rušením, které by mělo být dostatečně nízké, aby byla zajištěna daná přesnost a citlivost měření při VN zkouškách pro sledování ČV. Problém je v tom, že impulzy ČV mohou splývat s okolním šumem pozadí. A protože je rušení často superponováno na měřené veličiny, hladina šumu pozadí by měla být, pokud možno nižší než 50 % předepsané přípustné úrovně ČV. V případě přejímacích a typových zkoušek VN zařízení musí být zaznamenána hladina šumu pozadí. Výrazné výchylky při měření, které jsou s jistotou způsobeny vnějším rušením mohou být zanedbány. Jedná se především o vysokofrekvenční rušení v řádu stovek MHz od poskytovatelů mobilních sítí. Toto rušení lze filtrovat zařazenými filtry v měřicím obvodu, případně v měřicím systému.

3.7 Neelektrické metody měření částečných výbojů

Při zvolení vhodných metod měření je možné detekovat projevy ČV neelektrického charakteru. Jedná se o:

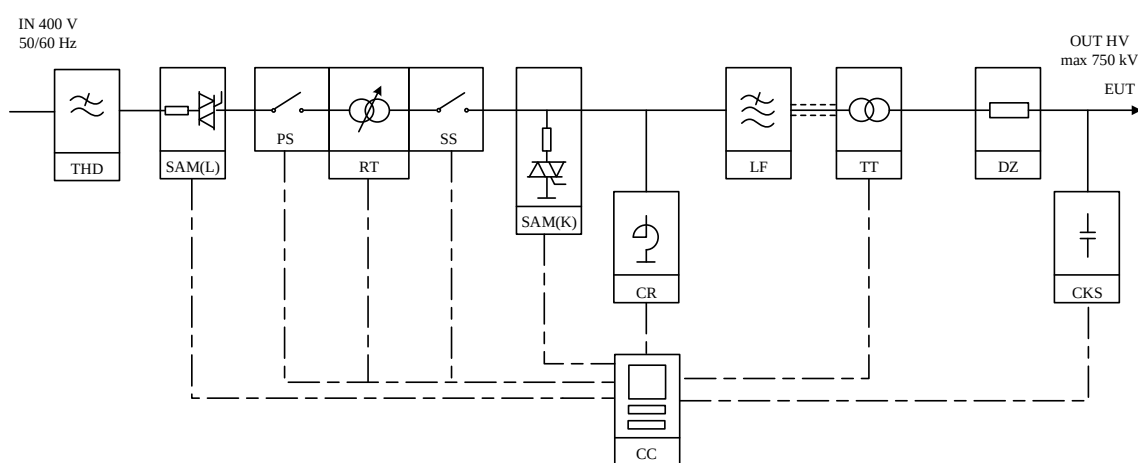
- Detekci optického projevu ČV – při výbojové činnosti se objevuje záření ve viditelném, ultrafialovém a infračerveném spektru. Ve viditelném spektru lze použít optické přístroje jako vysokorychlostní kameru nebo fotoaparát. Při působení ČV je zanecháváno určité poškození, které se pozoruje přímo, nebo speciálními kamerami s filtry na ultrafialové záření. Charakteristickým je lokální ohřev v okolí zdroje ČV – tyto teplotní výkyvy se snímají termokamerami s vysokou citlivostí.
- Detekci akustického projevu ČV – doprovodným znakem jsou akustické vlny, které se šíří od místa vzniku do okolí. Toto mechanické vlnění se zaznamenává pomocí mikrofónů a dalších akustických snímačů. Pro ČV jsou charakteristické vlnění v ultrazvukovém pásmu, kde mají větší směrovost. Prakticky se dá pro lokalizaci výboje použít jedno čidlo pro hledání místa s nejsilnějším signálem, nebo více čidel rozmístěných po testovaném objektu.
- Detekci chemického projevu ČV – provádí se chemická analýza produktů v plynu nebo oleji izolovaných zařízení, vznikajících při výbojové činnosti za celou dobu provozu – podle jejich obsahu lze odhadnout degradaci způsobenou ČV. Používá se plynová chromatografie, která patří mezi přesné metody měření a není ovlivňována elektromagnetickým

rušením při provozu. Analyzuje se pět základních plynů – vodík, metan, etylen, acetylen a propylen. [10]

3.8 Testovací aparatura ABB

Ve výrobním závodě Brno-Slatina se nacházejí dvě pracoviště určené pro zkoušky ZVN – hlavní pracoviště testuje sestavy ihned po montáži a po zkoušce plynotěsnosti a je také rozsáhlejší. Vedlejší pracoviště je vymezeno pro sestavy po opravách, to znamená zapouzdřené vodiče, které neprošly první zkouškou ZVN a musely být demontovány a opraveny. Na vedlejším pracovišti proběhla i praktická část této diplomové práce.

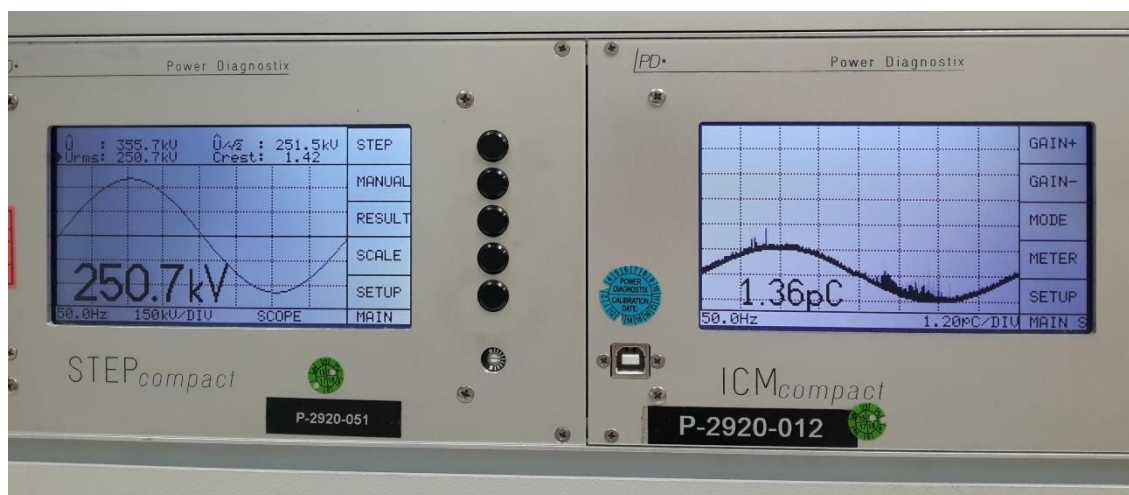
Testovací aparatura se skládá z několika hlavních prvků, viz blokové schéma na Obr. 3.7. Energie se odebírá ze sítě 400 V přes filtr vyšších harmonických (THD) a rychloodpojovač (SAM(L)). Následuje regulační transformátor (RT) se stykačem na primární i sekundární straně transformátoru (PS, SS). Dále se v měřicím obvodu nachází rychlozkratovač (SAM(K)), kompenzační tlumivka (CR), síťový filtr (LF) a testovací transformátor TES 1000 (TT) – na výstupu z transformátoru se nachází tlumivka (DZ) a vazební kondenzátor (CKS) o hodnotě 500 pF. Výstupní napětí transformátoru může být až 750 kV. Celý testovací obvod je řízen z ovládacího pultu s měřicími panely (CC). Vazební zařízení je umístěno v sérii s vazebním kondenzátorem, viz kapitola Základní zkušební obvody a měřicí systémy galvanické metody. Názorné uspořádání tohoto zapojení je na Obr. 3.1. Kalibrace testovacího obvodu se provádí podle Obr. 3.5.



Obr. 3.7: Blokové schéma testovací aparatury ABB [11]

THD	Filtr vyšších harmonických složek
SAM(L)	Rychlodojovač
PS	Stykač na primární straně regulačního transformátoru
RT	Regulační transformátor
SS	Stykač na sekundární straně regulačního transformátoru
SAM(K)	Rychlozkratovač
CC	Ovládací pult s měřicími panely
CR	Kompenzační tlumivka
LF	Síťový filtr
TT	Testovací transformátor TES 1000
DZ	Tlumivka
CKS	Vazební kondenzátor CKS 750 (500 pF)
EUT	Testovaný objekt

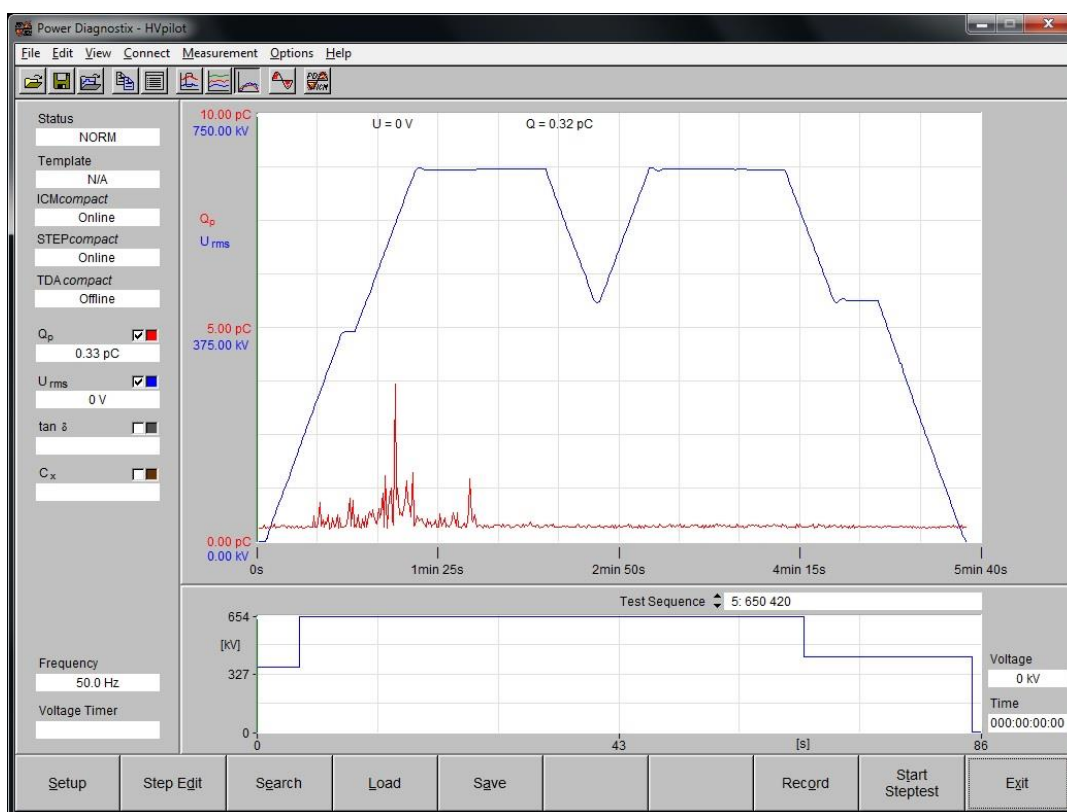
K měření ČV se využívají systémy z Obr. 3.8, které jsou propojeny s PC na pracovišti s příslušným software od Power Diagnostix, který umí ukládat data ze zkoušek ZVN.



Obr. 3.8: STEP Compact, ICM Compact

- ICM Compact – Jedná se o součást digitální ICM série od Power Diagnostix k měření ČV a vyhodnocení izolačního stavu v sítích vysokého napětí. Tento panel je zabudovaný do měřicího pracoviště a lze na něm zobrazit fázovou charakteristiku – pulsy ČV superponovány na sinusový průběh zkušebního napětí. [12]
- STEP Compact – Jde o nástroj k automatizaci zkoušky ZVN – lze krokově zvyšovat napětí podle nastavené rampy, ale také je možné použít manuální mód. Panel je programovatelný na různé režimy, které si můžeme zvolit. Jednotka přijímá vstupní signál z napěťového děliče o 100 V_{RMS}, který dále zpracovává a zobrazuje aktuální hodnotu napětí ZVN zkoušky. [12]

HVpilot Software umí získávat data jak z ICM Compact, tak ze STEP Compact. To znamená, že zobrazuje průběh napětí zkoušky ZVN, ale také hodnotu ČV v jednom grafickém průběhu. Na Obr. 3.9 je možné vidět jeden z prvních průběhů měření na dané zapouzdřené sestavě. ČV nebyly detekovány, pouze okolní šum a rušení měřicího systému o hodnotě kolem 0,33 pC.

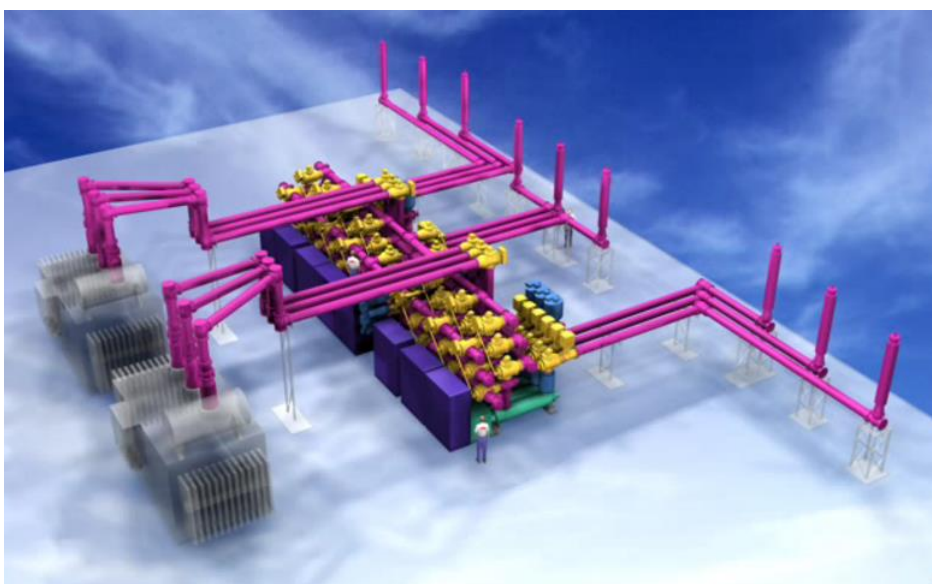


Obr. 3.9: HVpilot Software

4 PLYNEM IZOLOVANÉ VODIČE ZVN

4.1 Obecně plynem izolované rozvodny

Výroba zapouzďřených rozvodn sahá až do počátku 60. let. Od této doby se sortiment zapouzďřených rozvodn značně rozšířil a v této době nejznámějšími evropskými výrobci jsou ABB, Alstom a Siemens. Momentálně se vyrábějí jak v jednofázovém provedení pro hladiny velmi vysokého napětí, tak v třífázovém provedení zapouzďření pro nižší napěťové hladiny. [6]



Obr. 4.1: Model GIS a použitých komponent vyráběných v ABB [9]

- ◀ Výkonové vypínače
- ◀ Odpojovače, uzemňovače
- ◀ Proudové a napěťové měřicí transformátory
- ◀ Přípojnice, plynem izolované vodiče

Zapouzďřením částí pod napětím je možné minimalizovat vzdálenost mezi fázemi na několik centimetrů. Proto se GIS umisťují tam, kde jsou požadavky na minimalizaci rozměrů rozvodny – např.: města, hustě osídlené oblasti, oblasti s důrazem na estetické provedení, prostředí s náročnějšími podmínkami (prašné prostředí, velmi nízké teploty nebo agresivní prostředí) apod. Klasická vzduchem izolovaná venkovní rozvodna s lanovými přípojnici má šířku pole

25–33 metrů podle použité technologie, zatímco u GIS může být šířka pole 4 metry. To znamená, že zastavěná plocha samotné haly se zapouzdřenou rozvodnou je několikanásobně menší oproti klasické rozvodně s lanovými nebo trubkovými přípojnici. Tím jsou zaručeny menší požadavky na stavební plochu. [6], [7]

Další výhody zapouzdřených rozvodů [6]:

- Vysoká spolehlivost – poruchovost, výpadkovost
- Vysoká provozní bezpečnost
- Vysoká bezpečnost obsluhujících osob
- Malé požadavky na údržbu
- Dlouhá doba bez revizního chodu
- Dlouhá životnost
- Kratší doba montáže
- Jednoduchá kontrola plynu
- Modulární provedení – montáž a zkoušky některých sekcí přímo u výrobce
- Moderní přístroje řeší jednoduše a hospodárně složité spínací aplikace

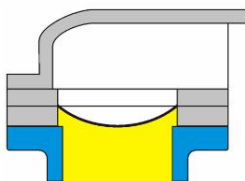
Oproti kladům je potřeba uvést i zápory zapouzdřených rozvodů [6]:

- Vyšší náklady
- Při údržbě či poruchách mohou vyvolat vypnutí neúměrně velké části rozvodny
- Plyn SF₆ – zařazen mezi plyny ohrožující ozónovou vrstvu atmosféry
- Vysoké požadavky na přesnost a technologické postupy při výrobě a montáži

U PIV v jednofázovém provedení je proudová dráha tvořena měděnými trubkovými vodiči s postříbřením na kontaktních místech. Upevnění a přesné vystředění vodičů v tlakové nádobě je zajištěno díky diskovým nosným izolátorům, viz Obr. 4.2. Celá rozvodna je rozdělena na plynotěsné úseky, ve kterých jsou umístěny pojistné ventily (Obr. 4.3) pro zajištění bezpečného uvolnění přetlaku v situaci, kdy dojde k enormnímu navýšení tlaku nad určitou mez v daném úseku. [6]



Obr. 4.3: Přetlaková ochrana [9]

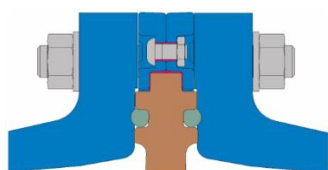


Obr. 4.2: Izolátor uzavřený a otevřený [9]

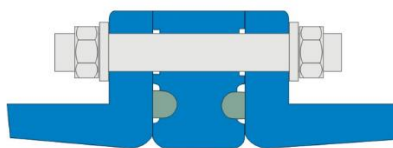
Plynotěsné přepážky mezi jednotlivými úseky jsou dimenzovány na namáhání způsobené maximálně předepsaným tlakem plynu SF₆ z jedné strany a vakuem ze strany druhé. [6]

Plyn SF₆ – fluorid sírový, je izolačním a zhášecím médiem, které má mimořádné elektrické vlastnosti a zhášecí schopnosti. Momentálně neexistuje v oblasti zařízení ZVN žádná jiná používaná alternativa. Jde o bezbarvou, nehořlavou, nejedovatou, chemicky velice stálou látku bez zápachu či chuti, která je při standardním tlaku a teplotě plynná. Plyn je nedýchatelný a přibližně pětikrát těžší než vzduch, tudíž se hromadí v níže položených místech. Z pohledu legislativy se jedná o fluorovaný skleníkový plyn, a proto je potřeba zajistit dokonale plynotěsné spoje komponent. [5]

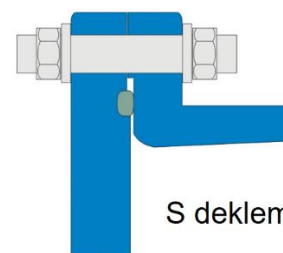
Výrobce rozvodny garantuje při běžných provozních podmínkách maximální roční únik SF₆ do 0,5 %. Provozeroschopnost zařízení tak může být až 15 let bez potřeby doplňování. Těsnost přírub je zabezpečena systémem gumových těsnicích kroužků, které je možné vidět na Obr. 4.4. [6]



S izolátorem



S mezikroužkem



S deklem

Obr. 4.4: Těsnící kroužky u různých variant příruby [9]

Celá soustava GIS je ukotvena do podlahy objektu. Rozvodna je vyrobena v montážních celcích o definovaných rozměrech a váze. Jednotlivé celky podstoupí po vyrobení předepsané zkoušky, a poté jsou exportovány na místo

stavby. Během transportu je potřeba snížit tlak plynu přibližně na 20 % tlaku jmenovitého, protože jednotlivé úseky jsou při jmenovitém tlaku považovány za tlakové nádoby. [6]

4.2 Plynem izolované komponenty ABB

Zapouzdřené vodiče ZVN jsou klíčovými prvky pro plynem izolované rozvodny (GIS) používané hlavně pro vnitřní nebo venkovní propojení plynem izolovaných rozveden s nadzemním vedením přenosové nebo distribuční soustavy s transformátory či kabely.

ABB výrobní závod na výrobu zapouzdřených vodičů v Brně-Slatině produkuje zapouzdřené vodiče pro rozsah napětí od 72,5 kV až do 550 kV. Jednotlivé produkty jsou rozepsány v Tab. 4.1 a v Tab. 4.2. Výroba je rozdělena na jednotlivé takty – svařování komponent, rentgenová zkouška svarů, prášková lakovací linka, montáž (Obr. 4.5), zkušebna (Obr. 4.6) a balírna (Obr. 4.7) – všechny takty jsou optimalizovány tak, aby bylo dosaženo standardů nejvyšší jakosti, efektivity a bezpečnosti. [8]



Obr. 4.5: Montážní prostor [8]



Obr. 4.6: Testování vysokým napětím [8]



Obr. 4.7: Prostor balení [8]



Obr. 4.8: ELK-3/420 C – montážní jednotka [8]

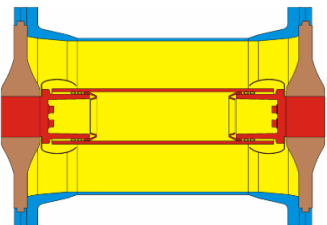
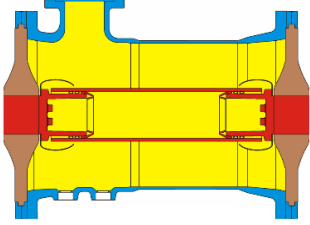
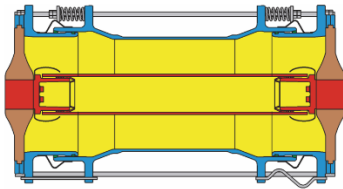
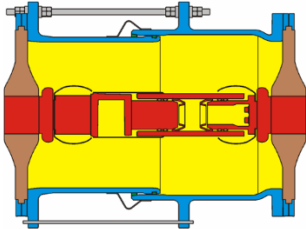
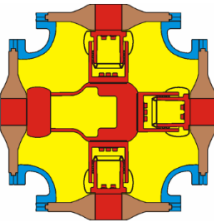
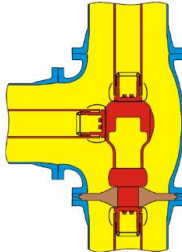
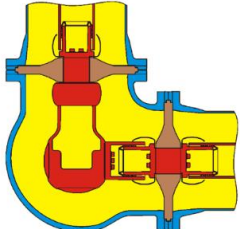
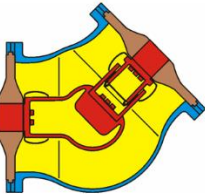
Závod produkuje také další důležité komponenty pro GIS [8]:

- Spojovací prvky různých tvarů a velikostí – prvky ve tvaru kříže, tvaru T či jednoduché přímé úseky.
- Kompenzátory – využívají se v místech s tepelnou expanzí, vibracemi během provozu a pro kompenzaci délkové tolerance některých dílů.
- Laterální rozebíratelné prvky – umožňují snadnější montáž a demontáž.

Tab. 4.1: PIV produkováné ve výrobním závodu Brno-Slatina [8]

Portfolio	Produkt	Úroveň napětí [kV]	Jmenovitý proud [A]
Rozvodné distribuční síť	ENK-3	72,5	2500
	ELK-04	145	2500
	ELK-04	170	4000
Rozvodné přenosové síť	ELK-14 C	245	3150
	ELK-14	300	4000
	ELK-3 C	420	5000
	ELK-3	420	5000
	ELK-3	550	6300

Tab. 4.2: Jednotlivé typy sběrnic ABB [9]

		
VG	VI	VP
		
VQ	VX	VT
		
VL	VW	

- ◀ Vodič pod napětím
- ▶ Tlaková nádoba (zapouzdrazení)
- ◀ Plyn SF₆
- ◀ Izolátor

4.3 Výroba a montáž sestavy pro praktickou část

Pro účel praktického měření ABB vyčlenilo komponenty pro vytvoření experimentální sestavy typu ELK-3 na napěťové hladině 420 kV. Zapouzdřené vodiče typu VG a VL prošly daným procesem výroby:

- Svařování – zapouzdření a příruby
- Broušení – odstranění nerovností
- Tlakové mytí vodou
- Navěšení do lakovací linky a průjezd dezoxidační stanicí s oplachem
- Proces lakování



Obr. 4.10: Detail svaření zapouzdření a příruby



Obr. 4.9: Příprava vodiče na montáž

Dále před montáží sestavy byla provedena kontrola:

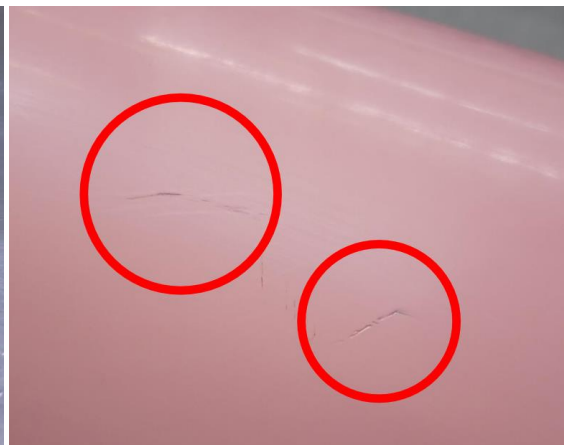
- Tloušťky barvy – zvenku
- Tloušťky barvy – zevnitř
- Fyzického poškození
- Závitů
- Špiček barvy
- Těsnicích ploch
- Čistoty komponenty

I přes tuto kontrolu bylo před montáží objeveno několik nežádoucích faktorů, které by mohly ovlivnit budoucí měření na dané sestavě, viz Obr. 4.11 a Obr. 4.12. Konkrétně se jednalo o defekt na vodiči – dva výrazné vrypy na laku, které však byly vyhodnoceny jako irelevantní (nebyly hluboké, povrch se jevil

jako hladký). Dále se jednalo o prachové znečištění dílu VG a výjimečně o špičky (miniaturní hliníkové špony, viz kapitolu Praktická část diplomové práce).

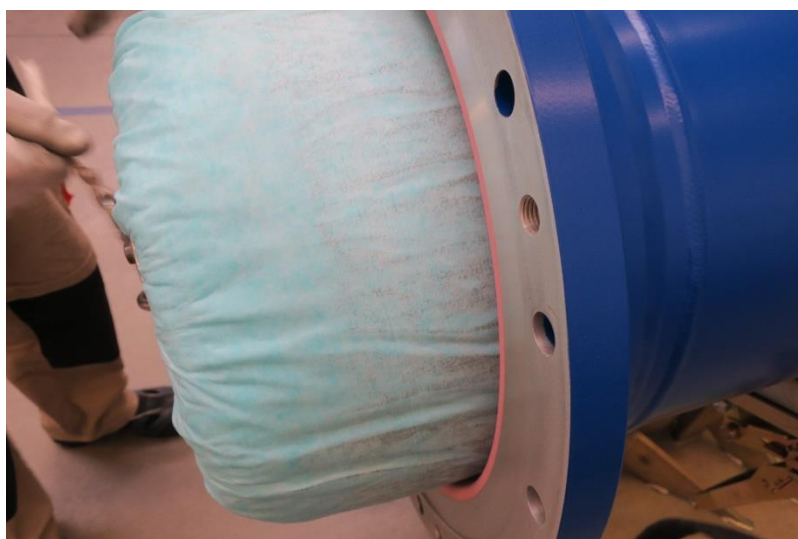


Obr. 4.12: Znečištění zapouzdření



Obr. 4.11: Vrypy na vodiči

Běžný postup přechištění před montáží se skládá z protažení zapouzdření válcovitým dílcem s uchycenými čistícími textiliemi napuštěnými isopropyl alkoholem – na Obr. 4.13 je viditelné, v jaké míře bylo zapouzdření znečištěno. Dále následuje protažení zapouzdření speciálním kartáčem napojeným na vysavač, který odstraní zbylé nečistoty a případně vlákna z čistící textilie.



Obr. 4.13: Přechištění zapouzdření – viditelné znečištění

4.4 Konkrétní měřená sestava

Konkrétní měřená sestava je na Obr. 4.14 a skládá se z několika klíčových komponent:

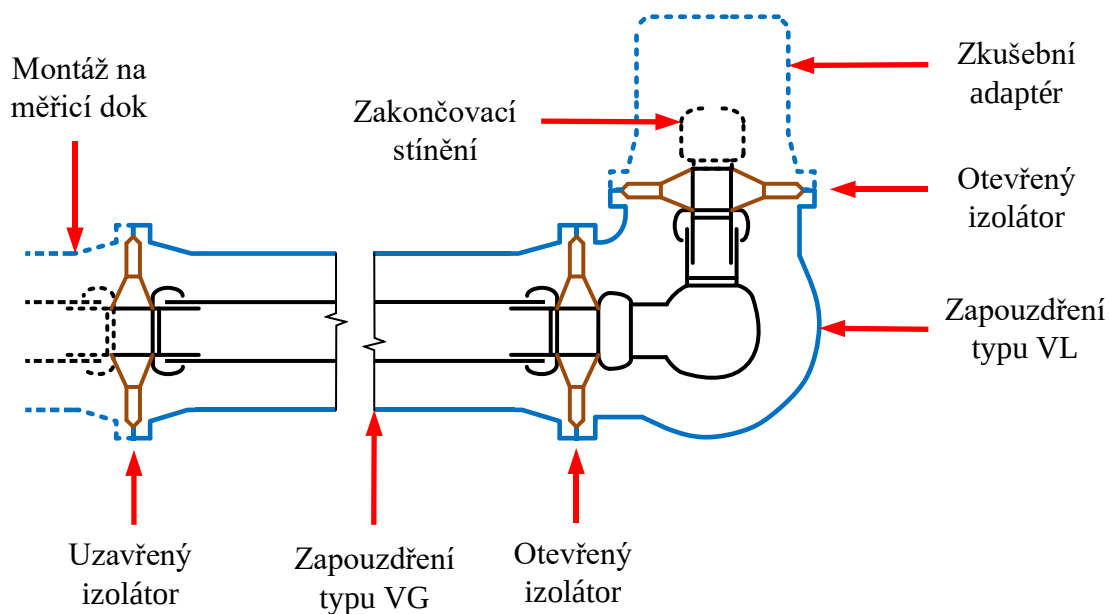
- Zapouzdřený vodič typu VG
- Zapouzdřený vodič typu VL
- Uzavřený izolátor
- Otevřený izolátor 2x
- Zakončovací stínění pro účel zkoušky VN
- Zkušební adaptér pro účel zkoušky VN

Tento typ sestavy byl zvolen na základě nejčastěji vyráběných komponent v ABB (až 90 % veškeré výroby) – dlouhé zapouzdřené vodiče s případným zakončením kolenem pro změnu směru dalšího vodiče o 90 ° na napěťové hladině 420 kV. Otevřené izolátory zde byly umístěny především z důvodu možného dosažení vnitřku zapouzdření bez nutnosti demontáže těchto izolátorů – bylo možné upravovat podmínky měření a přečišťovat díl VL po každé demontáži zkušebního adaptéru. Otevřený izolátor mezi dílcem VG a VL je bázový – to znamená, že je na něm napevno usazen vodič uvnitř VL, který je vystředěn na správné umístění a montáž druhého otevřeného izolátoru. Ze strany doku (spoj testovacího zařízení s testovaným objektem) byl použit uzavřený izolátor, který plynutěsně izoloval měřenou soustavu od měřicího doku. Náskres celé měřené sestavy je na Obr. 4.15.



Obr. 4.14: Fotografie celé testované sestavy typu ELK-3 na 420 kV

Obecně uzavřený izolátor odděluje jednotlivé plynotěsné prostory, otevřený izolátor má pouze podpěrnou funkci. Důležitá informace je, že celá sestava byla montována bez použití lepidla a silikonu G661 mezi jednotlivými komponenty k docílení čisté sestavy – silikon G661 byl poté použit v praktické části měření, jako jedna z podmínek simulování nečistoty v zapouzdření.



Obr. 4.15: Náskres celé měřené sestavy typu ELK-3 na 420 kV

5 PRAKTICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

Na základě teoretické části diplomové práce proběhla praktická část v PGHV ABB v Brně-Slatině, a to od února 2017 do května 2017. Nejprve bylo potřeba stanovit cíle a plán na několik měsíců dopředu. Poté se muselo vyčlenit pracoviště, testovaná sestava a pracovníci odpovědní za zkoušku ZVN, manipulaci s plynem SF₆, manipulaci s jeřábem a montáž testované sestavy. Moje pozice u daných zkoušek, jakožto člověka bez pracovního úvazku u ABB, byla „pozorovatel“.

První tři zkoušky proběhly bez žádné podmínky měření – pouze k otestování vnitřní čistoty sestavy. Zkouška 1.1–1.3 byla OK, tudíž se mohlo začít na dané sestavě experimentálně zkoušet. Obecně je manipulace se zapouzďřenými vodiči časově velice náročná a hodně záleží na rozsahu oprav (přečištění) při detekci ČV, případně při přeskoku – níže je uvedeno přibližné trvání jedné zkoušky ZVN dané testované sestavy.

Přibližná doba trvání úkonů ZVN zkoušky celé sestavy:

- 10–25 min – zavzdušnění, demontáž, konfigurace měření, přečištění, montáž – jen zkušební adaptér (bez přeskoku a nutnosti pečlivějšího přečištění sestavy)
- 20–25 min – odsávání vzduchu (vakuování)
- 10–12 min – plnění SF₆
- 3–10 min – samotná zkouška ZVN
- 30–35 min – odsávání SF₆ (vakuování)

Dále je potřeba zmínit, že přednost zkoušky ZVN měly ve většině případů zapouzďřené vodiče aktuální zakázky ABB pro zahraničního komerčního zákazníka. To znamená, že průměrně byly denně provedeny 2–3 zkoušky. Největší počet měření proběhl v období celozávodní dovolené, kdy nebylo zasahováno do výroby a měření zapouzďřených vodičů určených k expedici zákazníkovi. V tomto období byla zvolena nová strategie, a to úprava testovací sestavy – demontáž a odebrání komponenty VG a pokračování ve zkouškách ZVN pouze na VL. Tento krok zkrátil dobu plnění a odsávání plynu několikanásobně. Díky tomu jsme se dostali na konečné číslo měření 45.80. Tj. 45krát otevřena sestava a definována nová podmínka měření a 80krát provedena 60sekundová zkouška ZVN. Reálně zkoušek bylo více a některé trvaly až 3

minuty – nebylo vždy jednoduché odhadnout chování ČV při nastavené podmínce měření a najít správné optimum měření.

V následující kapitole jsou popsány jednotlivě definované podmínky měření, které byly prodiskutovány se zaměstnanci ABB, kteří mají s danou problematikou několikaleté zkušenosti. Na základě získaných informací byly provedeny měření ČV a sepsáno zhodnocení ke každé podmínce měření.

5.1 Definované podmínky měření a jejich zhodnocení

5.1.1 Modrá páska

Modrá páska byla zvolena jako první možnost při vyšetřování možného vzniku částečných výbojů při zkouškách zapouzďřených vodičů. Hlavním důvodem byla jednoduchost přípravy podmínky měření (nejedná se o nečistotu), a také zažití celého procesu zkoušky ZVN sestavy.

MP se umísťuje vždy na otevřený izolátor u koncového dílu sestavy, aby se nečistoty a prachové částice nedostaly do vnitřní části zapouzďření. Při montáži dalšího nebo konečného dílu testované sestavy musí být modrá páska sejmuta z izolátoru a viditelně umístěna na vnější část zapouzďření, aby pak odpovědná osoba věděla o jejím odstranění (střídají se tři směny během dne a sestava může být testovaná mimo danou směnu). Velice výjimečná situace nastává při zanechání pásky na izolátoru a následné manipulaci s plynem v uzavřené sestavě. Při zkoušce ZVN mohou nastat tři případy:

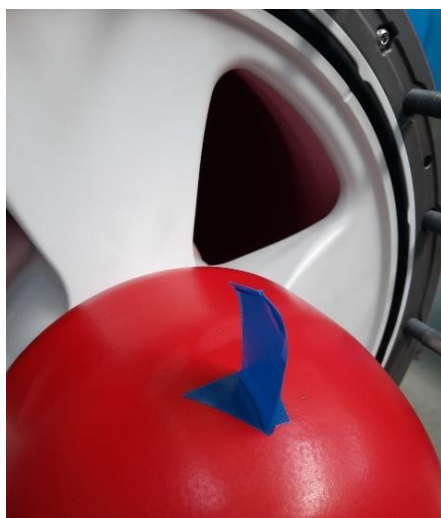
- 1) Při vakuování se páska z části odlepí a zůstane na izolátoru v odchlípnutém stavu.
- 2) Při vakuování se páska poruší, ale zůstává kompletně přilepená – plyn proudí skrz trhlinu.
- 3) Páska je dokonale přilepena a při vakuování se kompletně roztrhne a jednotlivé části se roznesou po vnitřní části zapouzďření.

Všechny tyto případy mohou znamenat vznik částečných výbojů, ale z výsledků měření a ze zkušeností zkušebních techniků se nejedná o významný zdroj ČV. Bylo provedeno několik měření s MP umístěnou na zapouzďření a poté také přímo na vodiči – tak aby MP byla odchlípnutá do prostoru zapouzďření, viz Obr. 5.2. Tato konfigurace neprojevila žádný výskyt ČV. Dále bylo provedeno měření s MP přilepenou na otevřeném izolátoru (Obr. 5.1) – v prvním případě

došlo k přeskoku přímo na MP, v druhém případě byly zaznamenány ČV, viz měření 44.77–44.79. Výjimečný problém způsobí situace, kdy sestava projde testem ZVN, ale je expedována na stavbu rozvodny nevědomě i s uvnitř se nacházející modrou páskou, která se může projevit až po pár letech provozu rozvodny.

Jedná se o izolant, tudíž výskyt ČV může být vysvětlen periodickým se nabíjením materiálu elektrickým nábojem (chování jako kondenzátor) a zároveň vybíjením do prostoru ve formě vyzáření ČV. MP při nalepení může vytvořit dutinky, ve kterých mohou mít ČV podmínky ke vzniku. V případě, kdy MP překrývala otevřený izolátor – přeskok je zde opodstatněný, protože tato páska snížila elektrickou pevnost izolátoru mimo přípustnou mez.

MP byla použita u více měření, konkrétně u měření s kovovou tyčkou, kterou bylo zapotřebí přichytit na vodič nebo zapouzdrazení.



*Obr. 5.2: Měření MP
v odchlípnutém stavu na ZS*



*Obr. 5.1: Měření MP umístěné na otevřeném
izolátoru*

5.1.2 Prachové částice a nečistoty

Jedním z nejčastějších problémů jsou nekovové nečistoty – jedná se především o prachové částice, které se uvnitř sestavy usadí během jednotlivých procesů její výroby, montáže a uskladnění. Tak malé částice nelze okem jednoduše zaznamenat, avšak po manuálním otření vnitřní části zapouzdrazení čistící textilií jsou tyto nečistoty jasně viditelné. Obecně se v ABB dbá na vysokou

úroveň čistoty na pracovišti, avšak dosáhnout prostředí ve stavu absolutně bez nečistot za daných podmínek není možné – rychlost výroby by poklesla, a naopak cena produktů vzrostla. Aktuální kompromis mezi těmito faktory je dostačující a pro firmu výhodný. Komponenty jsou udržovány v čistotě díky psaným výrobním předpisům, které jsou dodržovány zaměstnanci ABB.

Při čištění a manipulaci (přejetí povrchu rukavicí, holou rukou či čisticí textilií) dojde k nabití vodiče nebo zapouzďení určitým nábojem – to způsobuje přitahování prachových částic, které se následně na vodič přichytí. Po přečištění se tomu zamezuje uzavřením celé sestavy, případně jestliže jde o zakončení otevřeným izolátorem, přes průduchy se přelepí modrá páska.

Bylo provedeno měření sestavy, ve které se nacházel vzorek prachových částic s vlákny čisticí textilie (nebylo možné prachové částice jednoduše separovat z textilie bez těchto vláken, viz Obr. 5.4). Výsledek zkoušky ZVN při 700 kV byl pozitivní, žádné známky ČV. Po demontáži zkušebního adaptéru zaznamenáno značné prachové znečištění na těsnicím kroužku na otevřeném izolátoru, viz Obr. 5.3. Uvnitř zapouzďení ve spodní části se nacházely vlákna z čisticí textilie bez prachových částic. Povrch vodiče se jevil jako čistý.

Obecně představit si chování prachové částice při zkoušce ZVN v uzavřené sestavě je velice náročné. Mohou nastat tyto čtyři případy:

- 1) Přilnutí na vodič
- 2) Volný pohyb v prostoru mezi vodičem a zapouzďením
- 3) Přilnutí na zapouzďení
- 4) Zachycení do prostoru mezi dvě komponenty

Došlo se k závěru, že pokud prachové částice nejsou přilnuté na vodič (vlivem náboje nebo elektromagnetického pole), částice se při plnění sestavy plynem roznesou po celé vnitřní části zapouzďení nebo se zachytí do prostoru příruby komponenty na těsnicím kroužek. V tomto místě nezpůsobují žádné ČV. Problém může nastat po uvolnění těchto částic do prostoru a případném přilnutí na vodič – zde se může jednat o nehomogenitu, a také zdroj ČV. Volně se pohybující částice představuje snížení elektrické pevnosti, a také důvod k přeskoku při zkoušce ZVN. Prachové částice se nemusí projevit okamžitě, ale například po pár letech provozu rozvodny.



Obr. 5.4: Vzorek prachu a vláken z čistící textilie

Obr. 5.3: Prachové částice zachycené na těsnícím kroužku

Do této kapitoly by se daly zařadit i volné částice barvy, které se v zapouzdření nacházejí po procesu lakování. Tato nečistota je však odstraněna před montáží sestavy. Volné částice barvy se v zapouzdření mohou objevit i při odstraňování určitého povrchového defektu brusnými nástroji.

5.1.3 Silikon G661

Silikon G661 se používá pro mazání styčných ploch mezi jednotlivými komponenty, aby postupným procesem stárnutí rozvodny nedocházelo ke korozi. Během montáže sestavy může dojít k aplikaci nadměrného množství látky a při kontaktu dvou ploch se toto mazivo vytlačí do vnitřního prostoru zapouzdření. Jedná se o nežádoucí znečištění zapouzdřeného vodiče, které může znamenat zdroj ČV.

Bylo uskutečněno několik měření se samostatně aplikovaným větším množstvím silikonu na vodiči ve VL, viz Obr. 5.5. Daná podmínka měření ani v jednom případě nevykazovala ČV – všechny zkoušky ZVN byly úspěšné. Silikon G661 byl použit u dalších měření, jako způsob uchycení zvolené nečistoty, aby nedošlo k posunu, nebo úplnému odfouknutí plněným plynem. Ani v těchto případech (pokud to nebyla kovová částice) nedošlo k výskytu ČV.



Obr. 5.5: Silikon G661 aplikovaný na vodič

5.1.4 Vlákna z čisticí textilie

Čisticí textilie v kombinaci s isopropyl alkoholem je nejdůležitějším nástrojem k čištění zapouzdřených komponent na pracovišti ABB. Jedním z negativních faktorů používání těchto textilií je občasné zanechávání krátkých vláken uvnitř zapouzdření. Jde o nežádoucí nečistotu, která je avšak jednoduše detekovatelná a odstraňuje se odsátím speciálním vysavačem.

Bylo provedeno několik zkoušek s vlákny uchycenými silikonem jak na vodiči, tak na zapouzdření v různých částech sestavy. Umístění podmínky měření je viditelné na Obr. 5.6 a Obr. 5.7. Všechny zkoušky ZVN byly pozitivní, nedocházelo k žádným trvalým ČV.

Nicméně u měření č. 13.16 s kovovým vzorkem 1 došlo k neočekávaným výsledkům zkoušky ZVN při 650 kV. Prvních 25 sekund nebyly žádné známky ČV. Avšak po 25 sekundách se objevily vysoké hodnoty ČV mimo rozsah měření a následoval přeskok na vodiči ve VG. Po otevření sestavy bylo zaznamenáno značné znečištění dílu VG, konkrétně vlákny z čisticí textilie z předešlých zkoušek – vlákna byla fixována silikonem v ZA, ale pravděpodobně došlo k uvolnění některých vláken a roznesení po celé sestavě. Přeskok byl identifikován ve VG přibližně 50 centimetrů od okraje zapouzdření na vodiči blíže k měřicímu doku.

Důvod výskytu ČV až po 25 sekundách může souviset jak s kovovým vzorkem 1 v ZA (popsáno v kapitole kovové částice), tak s vlákny ve VG. Je potřeba se na danou situaci podívat z hlediska pravděpodobnosti, která hraje u měření ČV vysokou roli a celkově řešit měření ČV statisticky. Bylo provedeno

celkem šest po sobě jdoucích zkoušek ZVN s podobným charakterem podmínky měření – vlákna z čisticí textilie umístěné uvnitř testované sestavy. Tyto vlákna se mohla uvolnit kdykoliv, kdy byl do sestavy vháněn plyn SF₆. Vlákna se vlivem akumulovaného náboje mohla nepatrně pohybovat až do polohy, která znamenala určitou nehomogenitu a možný zdroj ČV. K přeskoku výboje došlo z důvodu snížení elektrické pevnosti mezi vodičem a zapouzďřením.



Obr. 5.7: Vlákna z čisticí textilie uchycené na vodiči



Obr. 5.6: Vlákna z čisticí textilie umístěné na zapouzďření zkušebního adaptéru

5.1.5 Kovové částice

Kovové částice jsou největším problémem v zapouzďřených vodičích, protože téměř vždy vedou k částečným výbojům nebo k přeskoku při zkoušce ZVN. Jedná se o nežádoucí znečištění z procesu výroby vodiče stejně jako u prachových částic s tím, že je toto znečištění lépe detekovatelné. Nejlépe lze zaznamenat tzv. „špičky“ – výrazně větší kovové částice přilehlé na vodiči či zapouzďření. Toto znečištění z výroby komponenty se odstraní ještě před montáží dalších dílců procesem čištění. Nejčastější případ zdroje kovových částic uvnitř zapouzďření je proces montáže, kdy se dvě jednotky montují k sobě – v případě nepozornosti montéra může dojít k odření svorníku o zapouzďření a tím k odloupení kovové špony, která automaticky zapadne do vnitřní části zapouzďření (Obr. 5.8 a Obr. 5.9). Nemusí se jednat o dvě montážní jednotky, ale



Obr. 5.8: Kovová špona ve vnitřní části
zapouzďení



Obr. 5.9: Detail příruby se svorníkem

často se to stává se zkušebním adaptérem montovaném na kompletní sestavu. Tomu lze předejít dodržováním psaných výrobních předpisů.

První zkoušky kovových částic byly provedeny s kovovou tyčkou (vzorek 1, vzorek 2) – část obyčejné pozinkované kancelářské sponky, která měla zajistit stejné podmínky měření, kdy se mohla měnit pouze pozice umístění a sledovat změna charakteru vznikajících ČV. Výsledky byly různorodé a z bližšího vyšetřování se dospělo k závěru, že jakákoliv nepatrnost může vést k jinému výsledku měření. Jeden z detailů mohl být způsob uchycení této tyčky – určitý výsledek měření ukázal vzorek přichycený širokým pruhem MP, a jiný výsledek vzorek přichycený jen velice úzkým pruhem MP. Šlo jednak o míru akumulace náboje na MP, ale také o rozsah překrytí vodivé části tyčky. Dále mohlo jít o velikost přitlačné síly vyvíjené MP na tyčku (dokonalost styku). Také konce tyčky nejsou ideálně symetricky zakončeny (použity obyčejné štípačky) – to znamená, že záleželo i na geometrickém natočení tyčky – v jaké poloze se vodič choval nejlépe jako zdroj ČV.

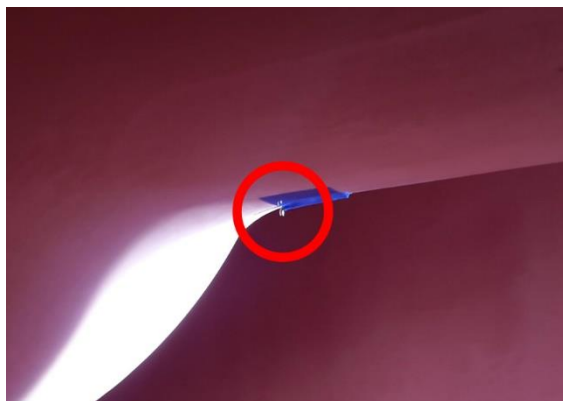
Relevantní výsledky zkoušek jsou v knihovně měření – jedná se hned o prvních osm stran (měření 13.16–19.30). Některá z těchto měření byla nevyzpytatelná z hlediska charakteru, míry a stálosti výskytu ČV – při počátečním napětí stálých ČV byla započata zkouška ZVN, ale po určité době došlo k prudkému navýšení intenzity ČV (i mimo měřený rozsah), a poté k přeskoku na umístěnou tyčku. Jedno z dalších vysvětlení může být fakt, že vodič a zakončovací stínění nemají rovnou plochu – jedná se o válcovitý tvar.

Tudíž při umístění tyčky kolmo na tuto plochu byl způsoben dokonalý styk pouze v prostřední části tyčky a konce sloužily jako vodivé „vysílače“ pro ČV. Při zkoušce ZVN, kdy je sestava pod napětím, může vlivem elektromagnetického pole a vlivem periodického nabíjení tyčky uchycené MP dojít k nepatrnému pohybu – nová poloha, která může znamenat velkou nehomogenitu elektromagnetického pole vodiče a tím i významný zdroj ČV.

Podobným experimentem bylo měření se vzorkem 3 – drátek s hrotem o délce 1 mm vyčnívajícím do prostoru sloužící jako jistý zdroj ČV i při nižších hodnotách zkušebního napětí (Obr. 5.11). Výsledky zkoušek jsou shrnuty v knihovně měření (23.41–29.57). Obecně je závěr z těchto měření takový, že jestliže byl vzorek umístěn na vodiči ve VL, ČV se objevovaly v první půlperiodě na cca 90 stupních fázové charakteristiky. Pokud byl vzorek umístěn na zakončovacím stínění ve zkušebním adaptéru, na FCH byly zaznamenány ČV ve dvou maximech a to na 90 a 260 stupních. Na měření 24.46 je možné zaznamenat i třetí maximum a to na 220 stupních FCH. V průběhu zkoušek sestavy se vzorkem 3 byl objeven problém s přesností natočení hrotu vůči vodiči – v jednom případě se podařilo vyvrátit podobnost charakteru výsledných FCH série měření ve VL, ale opakováním této zkoušky se opět došlo k podobnosti zkoušky předešlé série měření, viz 27.52 a 29.56.

Posledním typem měření kovových částic bylo testování sestavy s uvnitř umístěnou kovovou šponou. Důležité bylo přichycení kovové částice vždy silikonem, aby umístěná špona nebyla od fouknuta proudícím plynem při plnění SF₆, a aby bylo možné měření opakovat ve vzpříčené poloze špony, viz Obr. 5.10. V této poloze šlo totiž o nejvýznamnější zdroj ČV a v případě, kdy špona byla vlivem plnění SF₆ umístěna do ležaté polohy, opět šlo o nekontrolovatelné měření, kdy v jednom okamžiku docházelo k rychlému nárůstu ČV a k okamžitému přeskočení. Tento charakter zkoušky byl nechtěný a vysvětlení je podobné, jako u měření s kovovým drátkem – jestliže je špona přilnuta celou plochou k vodiči, nevykazuje ČV při nižších hodnotách napětí, a proto bylo možné provést zkoušku při vyšších napětích k dosažení relevantního snímku s ČV. Při tomto napětí se však špona mohla vlivem elektromagnetického pole a vlivem akumulovaného náboje nepatrně natočit a tím vytvořit nehomogenitu vedoucí k přeskočení, viz 30.58–34.66. Obecně lze říci, že kovové špony zapadnuté v zapouzdření můžou mít jakýkoliv tvar a jestliže se přichytí přímo na vodiči, je téměř stoprocentní, že zkouškou ZVN daná sestava neprojde. Další situací může

být kovová částice zapadlá do prostoru mezi izolátor a zapouzďení – v tomto případě se částice vůbec nemusí projevit, protože nenarušuje elektrickou pevnost uvnitř zapouzďeného vodiče, a také se ani nejedná o živou část.



Obr. 5.11: Vzorek 3 umístěn na vodiči



Obr. 5.10: Kovová špona umístěna na zakončovacím stínění

5.2 Knihovna měření

Hlavním výstupem z praktické části této diplomové práce je knihovna měření, viz přílohu. Je důležité zmínit, že knihovna obsahuje relevantní snímky z měření – to znamená snímky zobrazující částečné výboje nikoliv snímky, kdy výsledek zkoušky sestavy byl pozitivní (nebyly zaznamenány žádné ČV). Těchto měření bylo přibližně 37 z celkových 80 měření.

5.2.1 Definované zkratky a měřené vzorky

Jedna strana knihovny je ve formátu jednoduché tabulky, která je rozdělena na několik částí, viz Obr. 5.12 i s vysvětlivkami. Bylo potřeba definovat některé zkratky a měřené vzorky, které se neustále opakovaly:

VG	Zapouzďený vodič typu VG – přímý vodič
VL	Zapouzďený vodič typu VL – koleno
ZA	Zkušební adaptér – uzavření VL
ZS	Zakončovací stínění umístěné na otevřený izolátor
MP	Modrá páska
OI	Otevřený izolátor

Vzorek 1 – rovný drátek o parametrech $l = 8 \text{ mm}$, $d = 0,5 \text{ mm}$ (část obyčejné pozinkované kancelářské sponky)

Vzorek 2 – rovný drátek o parametrech $l = 11 \text{ mm}$, $d = 0,5 \text{ mm}$ (část obyčejné pozinkované kancelářské sponky)

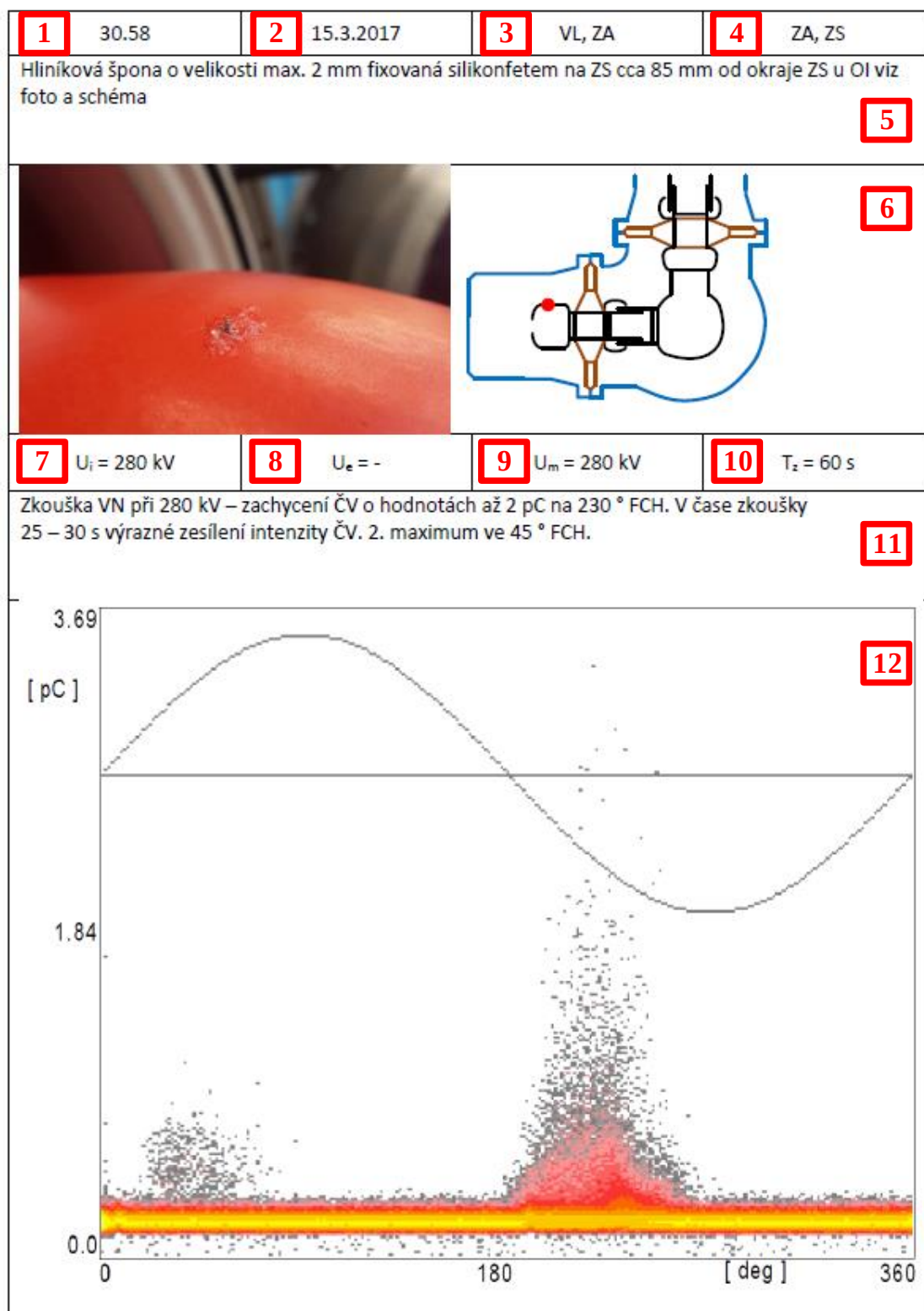
Vzorek 3 – drátek o parametrech $l = 11 \text{ mm}$, $d = 0,5 \text{ mm}$ (část obyčejné pozinkované kancelářské sponky) s hrotem o délce 1 mm vyčnívajícím do prostoru

5.2.2 Vysvětlivky ke knihovně měření

Každé měření je potřeba důkladně zaznamenat, aby vytvořená knihovna obsahovala relevantní data pro budoucí využití a nechyběly žádné informace. Byly sepsány vysvětlivky ke knihovně měření s případným komentářem, který rozlišuje praktické měření diplomové práce a reálné zakázkové zkoušky ABB:

- 1) Číslo měření – první číslo udává kolikrát byla sestava otevřena a definována nová podmínka měření. Druhé číslo udává pořadí zkoušky.
- 2) Datum měření – reálně pořízené snímky obsahují mnohem více informací jako např. datum, čas a jméno zkušebního technika
- 3) V jaké konfiguraci byla sestava při zkoušce ZVN – sestavy ABB se mohou skládat z více zapouzďřených komponent. Při vyhodnocení zkoušky je důležité znát jednotlivé sekce při případné demontáži a zkoušení daných sekcí zvlášť k objevení konkrétního problému.
- 4) V jaké části sestavy byla upravena podmínka měření – šlo o praktickou část diplomové práce, ale reálně je potřeba zaznamenat přesné místo nalezeného defektu nebo znečištění uvnitř zapouzďření.
- 5) Popis dané podmínky měření – stejný případ jako u bodu 4) – v případě nalezení určitého defektu či znečištění po demontáži sestavy, je nezbytné tento problém důkladně popsat.

- 6) Fotografie a schéma umístění podmínky měření – reálně při zkouškách sestav určité zakázky není čas na zpracování fotografií a schémat. Fotografie se pořizují v případě neobvyklých situací.
- 7) Počáteční napětí částečných výbojů U_i
- 8) Zhášecí napětí částečných výbojů U_e
- 9) Zkušební napětí – je důležité zaznamenávat nejen hodnotu zkušebního napětí, ale také počáteční a zhášecí napětí ČV, pokud to daná situace umožňuje. Jedná se o data charakterizující průběh zkoušky a při vytváření knihovny jde o významná data.
- 10) Délka zkoušky ZVN – v praxi 60 sekund, ale v případě přeskočení se zaznamenával aktuální kratší čas, při kterém došlo k odpojení napájení.
- 11) Popis průběhu zkoušky ZVN – chování ČV v průběhu zkoušky – trvání, pravidelnost, maximální hodnoty a případně detailnější charakteristika.
- 12) Snímek z měření částečných výbojů – fázová charakteristika vyjmuta ze snímku měření pořízeného z HVpilot software.



Obr. 5.12: Jedna strana knihovny měření s označenými čísly k bližšímu vysvětlení

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce má sama o sobě přinést povědomí o tom, co to jsou částečné výboje, a jak by se podle dané normy měly detekovat a měřit. Metod detekce částečných výbojů je více, ale důraz je kladen na elektrické metody, které jsou využívány i ve firmě ABB. Dále tato práce přináší znalosti o plynem izolovaných rozvodnách a konkrétně o zapouzduřených vodičích, kterými se zabývá praktická část.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, hlavní přínos je obsažen v praktické části diplomové práce – měření probíhalo od února 2017 v ABB v Brně-Slatině. Šlo o měření na zapouzduřených vodičích ABB a následné vytvoření knihovny s jednotlivými případy vzniku částečných výbojů a jejich kombinace v určitých místech zapouzduřených vodičů. V diplomové práci jsou dále doplněny kapitoly týkající se konkrétní testovací aparatury ABB a problematika již zpracovaná v semestrálním projektu je zde dále rozšířena.

Hlavní myšlenkou praktické části diplomové práce je vyšetření jednotlivých možných případů znečištění vnitřní části zapouzduření, vytvoření podmínek měření simulující tyto případy a otestování zkouškou ZVN na částečné výboje. Z výsledku je sestavena knihovna měření, díky které by mělo být usnadněno lokalizování daného problému dohledatelného v této knihovně v případě detekování ČV a určit, zdali jde o defekt či o znečištění. Tím by měl být ušetřen čas, který musí být investován do opětovné manipulace se zapouzduřeným vodičem a několikanásobného testování. Ke knihovně měření je zpracovaná kapitola definující data a informace zapisované do této knihovny.

Měření bylo časově velice náročné a po ukončení praktické části se došlo k závěru, že z daných 80 měření byla pouze polovina relevantní k vytvoření knihovny měření – snímek bez výskytu ČV nám nic neřekne, a z této poloviny bylo skoro 30 snímků vytvořeno díky kovovým vzorkům z drátku. Je pravdou, že z těchto snímků se získaly také zajímavé informace hlavně o charakteru ČV při změně polohy vzorku v sestavě a například při použití různého přichycení k vodiči. Jedná se však o nereálný případ kovové nečistoty v zapouzduření.

Jestliže se budeme bavit o reálném případě vnitřního znečištění zapouzdřených vodičů, nejčastěji zaslechneme pojem částice (particle). Běžně se jedná o prachové částice, které lze jednoduše odstranit čistícími procesy, avšak jsou obtížněji identifikovatelné. Největším problémem jsou kovové částice uvnitř zapouzdření, konkrétně špony ze svorníku – téměř vždy vedou k vytváření částečných výbojů a velice často i k přeskoku. Lze je jednoduše identifikovat a opět se odstraní čistícími procesy. Méně často se vyskytující znečištění jsou vlákna z čistících textilií, nebo silikon G661 – při zkouškách ZVN se ale neprojevily žádné částečné výboje. Dalšími možnými faktory ovlivňující zkoušku ZVN zapouzdřených vodičů mohou být například nedotažené šrouby při montáži zakončovacího stínění, nevystředěný vodič (kloub) v dílci VL, špatně kalibrovaný měřicí systém nebo plyn SF₆ o nižší koncentraci nacházející se v testované sestavě. Všechny podmínky měření a jejich zhodnocení se nachází v kapitole Praktická část diplomové práce.

Obecně platí, že u plynem izolovaných komponent se klade důraz na vysokou kvalitu při výrobě. Kdyby zapouzdřený vodič s určitou nečistotou nebo defektem prošel zkouškou ZVN a neukázaly se žádné známky částečných výbojů, šlo by o velký problém, který by se mohl projevit až po několika letech provozu rozvodny. Na druhou stranu při jmenovitém napětí rozvodny by se daná částice vůbec nemusela projevit po celou dobu životnosti.

Do budoucna je potřeba detailněji rozepisovat jednotlivá měření na zapouzdřených sestavách aktuální zakázky, viz kapitola Knihovna měření a data ukládat do specializovaného programu, který se v ABB začne v nejbližší době využívat. Důležité bude vytvoření metodiky zapisování a třídění výsledků zkoušek do tohoto programu pro vytvoření relevantní knihovny měření. Bude se jednat o dlouhodobé sbírání dat, díky kterým se budou moct vyvodit konečné závěry, protože ČV podléhají statistice a z deseti snímků jednoho problému není možné dělat závěry.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 60270:2001. Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů
- [2] VEVERKA, Antonín. Technika vysokých napětí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Řada elektrotechnické literatury. Dostupné také z: <http://kramerus.mzk.cz/search/handle/uuid:4129e140-ca7b-11e5-bef4-005056827e51>
- [3] KUBÍN, Miroslav. Energetika: perspektivy - strategie - inovace v kontextu evropského vývoje. Brno: Jihomoravská energetika, 2002. ISBN 80-239-0587-2.
- [4] Záliš, Karel. Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005. 140 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [5] *Greenswitching: Vacuum technology and solid insulation* [online]. , 4 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://archiv.eatonelektrotechnika.cz/files/120111__Green_Switching_CZ.pdf
- [6] RIEDL, Lukáš. Plynem izolovaná zapouzďřená rozvodna transformovny Chotějovice [online]. 2011 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/Zapouzdzrena_rozvodna_chotejovice.pdf
- [7] Orságová, J. Rozvodná zařízení. Brno: 2015. s. 1-179. . Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [8] Profil závodu Brno, Česká republika: Dodavatel zapouzďřených vodičů pro plynem izolované rozvodny velmi vysokého napětí VVN (GIS). ABB [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/4fd631aed5ec26b9c1257d0e00407965/Factory_portrait_brno_2GPH000045AA_CZ_A4.pdf
- [9] KŘENEK, Michal. ABB, PPHV, GIS: Interní prezentace pro školení zaměstnanců. 2011.

Seznam použité literatury

- [10] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [11] *Function Diagram - 1xTES1000: ABB Test Setup*. 28.05.2015. Germany.
- [12] *Diagnosis Monitoring Quality Control Research and Development*. Power Diagnostix Systems GmbH. Aachen, Germany. Dostupné také z: www.pdix.com
- [13] Havlíček T., *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 120 s. Vedoucí doktorské práce doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

SEZNAM PŘÍLOH

Pořadí	Číslo měření
1	13.16
2	14.18
3	17.23
4	17.24
5	17.25
6	19.28
7	19.29
8	19.30
9	20.32
10	20.33
11	20.35
12	21.37
13	21.38
14	23.41
15	23.42
16	23.43
17	24.44
18	24.45
19	24.46

Pořadí	Číslo měření
20	25.47
21	25.48
22	25.49
23	26.50
24	27.52
25	27.53
26	28.54
27	28.55
28	29.56
29	29.57
30	30.58
31	30.59
32	33.64
33	33.65
34	34.66
35	44.77
36	44.78
37	44.79