



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

MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ U VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELŮ

PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT OF MIDDLE AND HIGH VOLTAGE CABLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Luděk Pelikán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Luděk Pelikán

ID: 161844

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření částečných výbojů u vysokonapěťových kabelů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše literatury, požadavky na zkoušky vyplývající z platných norem, články IEEE a již vypracované závěrečné práce
2. Princip měření částečných výbojů, systém DDX 8003
3. Eliminace vnějších vlivů a zvyšování citlivosti měření především pomocí pulsní diskriminace
4. Vodní koncovky a jejich použití pro měření vysokonapěťových kabelů - výdržné zkoušky, zkoušky do průrazu, můstková měření a měření částečných výbojů
5. Laboratorní měření vysokonapěťových kabelů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Konzultant:

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.

Bibliografická citace práce:

PELIKÁN, L. *Měření částečných výbojů u vysokonapěťových kabelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Krbal, Ph.D..

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Měření částečných výbojů u vysokonapěťových kabelů* 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: 21.5.2018

.....

ABSTRAKT

Hlavním tématem diplomové práce je rozbor měření částečných výbojů na silových kabelech. Práce pojednává i o dalších testováních kabelů, zahrnující měření ztrátového činitele a napěťové výdržné a průrazné zkoušky. Součástí textu je i způsob vzniku částečných výbojů, možnosti jejich měření galvanickou metodou a způsoby eliminace rušivých vlivů, které tuto metodu ovlivňují z pohledu citlivosti a přesnosti naměřených hodnot. V práci je popsána i konstrukce kabelů, jejich značení a zkoušky, kterými se proměřují jejich vlastnosti pro zajištění spolehlivosti. Je zde uveden i popis kabelových koncovek používaných pro měření, především vodních, které jsou konstruovány pro vysoká napětí. Právě s vodními koncovkami jsou v praktické části zkoušky uskutečněny.

V další části jsou pak řešeny problémy před zprovozněním vodních koncovek a jejich příprava pro určité zkoušky, včetně popisu a vyhodnocení výsledků uskutečněných měření.

KLÍČOVÁ SLOVA:

vysokonapěťový kabel; částečný výboj; Hipotronic DDX 8003; eliminace rušení; laboratoř vysokého napětí; pulsní diskriminace; kabelová koncovka; vodní procesní jednotka; CTT; ztrátový činitel; výdržné zkoušky; průrazné zkoušky;

ABSTRACT

The main topic of this work is the analysis of the measurement of partial discharge measurements on high voltage cables. The thesis also deals with other measurements, including the measurement of the loss factor and the voltage retention and breakdown test. Part of the text describes the issue of partial discharge, its measurement by galvanic method and methods of elimination of disturbing influences that affect this method in terms of sensitivity and accuracy of the measured values. Thesis also describes the construction of the cables, their marking and the tests carried out on them. There is also a description of the cable terminals used for measuring, especially water terminals, which are designed for high voltages and which are carried out in the practical part of the thesis.

The next part deals with problems prior to the commissioning of water terminals and their preparation for certain tests, including description and evaluation of the results of the measurements.

KEY WORDS:

high voltage cable; partial discharge; DDX 8003; noise eliminating; high voltage laboratory; pulse discrimination; cable termination; water processing unit; CTT; loss factor, impulse tests, breakdown tests;

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Krbalovi, Ph.D. za podnětné návrhy k práci, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc během vypracovávání diplomové práce.

Dále děkuji pracovníkům z firmy NKT Velké Meziříčí za odborné konzultace a cenné rady v průběhu zpracování diplomové práce.

Děkuji také panu Ing. Igorovi Prestic ze švýcarské firmy Haefely Hipotronics i ostatním, kteří se podíleli na zprovoznování vodních koncovek.

V Brně dne: 21.5.2018

Podpis autora.....

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	14
2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	15
2.1.1 PARAMETRY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	15
2.1.2 PŘILOŽENÁ ZKUŠEBNÍ NAPĚTÍ VZTAŽENÁ K VELIČINÁM IMPULSŮ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	16
2.2 VNITŘNÍ ČÁSTEČNÝ VÝBOJ.....	17
2.2.1 GEMANT-PHILIPPOVŮV (TROJKAPACITNÍ) MODEL	18
2.3 VLIV ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLACI.....	19
3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	21
3.1 ELEKTRICKÁ METODA MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	21
3.2 ZKUŠEBNÍ OBVODY PRO STRÍDAVÁ NAPĚTÍ.....	22
3.2.1 VYSOKONAPĚŤOVÝ ZDROJ.....	23
3.2.2 IMPEDANCE NEBO FILTR	23
3.2.3 VYSOKONAPĚŤOVÉ SPOJENÍ	23
3.2.4 ZKOUŠENÝ OBJEKT	23
3.2.5 VAZEBNÍ (BLOKOVACÍ) KONDENZÁTOR	23
3.2.6 MĚŘICÍ SYSTÉM	24
3.3 CITLIVOST MĚŘICÍHO SYSTÉMU	25
3.4 ZAPOJENÍ ZKUŠEBNÍCH OBVODŮ	25
3.4.1 OBVOD PRO ROZLIŠENÍ POLARITY IMPULSŮ	26
4 RUŠIVÉ VLIVY	27
4.1 DETEKCE RUŠENÍ	27
4.2 SNÍŽENÍ RUŠENÍ.....	27
4.2.1 SYMETRICKÉ OBVODY	28
4.2.2 ELEKTRICKÉ ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ.....	28
4.2.3 PRŮMĚROVÁNÍ IMPULSU.....	29
4.2.4 KMITOČTOVÁ SELEKCE.....	29
4.3 KALIBRACE.....	29
4.4 ODLIŠOVÁNÍ EXTERNÍCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ OD INTERNÍCH	30
4.4.1 INTERNÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	30
4.4.2 EXTERNÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	30
4.5 VZNIK KORONY V MĚŘICÍM OBVODU	32
4.6 MĚŘICÍ SYSTÉM DDX 8003	33
4.6.1 KALIBRACE SYSTÉMU	34
4.6.2 ODČÍTACÍ JEDNOTKA RADIOVÉHO RUŠENÍ	35
4.6.3 HRADLOVÁNÍ NEŽÁDOUCÍHO RUŠENÍ.....	35
4.6.4 PULZNÍ DISKRIMINAČNÍ SYSTÉM	35

4.6.5 BLOKOVÁNÍ ODRAZU	35
5 DIELEKTRIKUM V ELEKTRICKÉM POLI	36
5.1 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	37
5.2 DIELEKTRIKUM VE STŘÍDAVÉM POLI	38
5.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL	38
5.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE	39
5.4.1 DVOJVEKTOROVÁ MĚŘICÍ METODA	40
6 ELEKTRICKÁ PEVNOST PEVNÝCH IZOLANTŮ	41
7 VYSOKONAPĚŤOVÉ KABELY	42
7.1 KONSTRUKCE JADER	42
7.2 ZÁKLADNÍ TYPY SILOVÝCH KABELŮ	42
7.3 KABELY S IZOLACÍ ZE ZESÍTĚNÉHO POLYETYLÉNU	43
7.3.1 VNITŘNÍ A VNĚJŠÍ POLOVODIVÁ VRSTVA	43
7.3.2 IZOLACE	44
7.3.3 STÍNĚNÍ	44
7.3.4 PLÁŠŤ A OCHRANNÝ OBAL	44
7.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL TG Δ U VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELŮ	44
7.5 PŘÍČINY PORUCH NA KABELECH	45
7.5.1 VODNÍ A ELEKTRICKÉ STROMEČKY	45
7.6 ZKOUŠKY VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELŮ	46
7.6.1 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELECH	47
7.6.2 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE NA VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELECH	48
7.6.3 MĚŘENÍ V TERÉNU	49
7.6.4 ZKOUŠENÍ PEVNOSTI IZOLACE XLPE KABELŮ RÁZOVÝM NAPĚTÍM	49
7.6.5 NAPĚŤOVÁ VÝDRŽNÁ ZKOUŠKA	51
7.6.6 MĚŘENÍ DO PRŮRAZU	51
7.6.7 MĚŘENÍ UNIKAJÍCÍHO PROUDU	52
7.7 ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE U VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELŮ	52
8 KABELOVÉ KONCOVKY	54
8.1 PLASTOVÉ KONCOVKY	54
8.2 KONCOVKY S KAPALNÝM IZOLAČNÍM MÉDIEM	55
8.3 OLEJOVÉ KONCOVKY	55
8.4 VODNÍ KONCOVKY	56
8.4.1 OPTIMALIZACE VODIVOSTI VODY V KONCOVCE	59
8.4.2 OPTIMALIZACE PRŮTOKU VODY	60
8.4.3 VODNÍ PROCESNÍ JEDNOTKA	60
9 PRAKTICKÉ PROMĚŘOVÁNÍ SILOVÉHO KABELU	62
9.1 PŘÍPRAVA KABELU A KABELOVÝCH KONCOVEK	62
9.2 OBSLUHA VODNÍ PROCESNÍ JEDNOTKY	66
9.2.1 NASTAVENÍ VODIVOSTI VODY	67
9.3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	68
9.3.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	70

9.4 VÝDRŽNÁ ZKOUŠKA STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM.....	71
9.4.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝDRŽNÁ ZKOUŠKA STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM.....	71
9.5 ZKOUŠKY DO PRŮRAZU STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM	72
9.6 MŮSTKOVÉ MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A KAPACITY KABELU	72
9.6.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A KAPACITY KABELU	75
9.7 IMPULSNÍ ZKOUŠKY	76
10 ZÁVĚR.....	77
POUŽITÁ LITERATURA	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - Porucha v izolaci ($\varphi_0 < \varphi_1$) [4]</i>	17
<i>Obr. 2- Trojkapacitní model [8] - upraveno</i>	18
<i>Obr. 3 - Průběh napětí na dutince s výboji při střídavém napětí [5] - upraveno</i>	19
<i>Obr. 4 - Průběh proudového pulzu částečného výboje [7]</i>	22
<i>Obr. 5 - Možnost zapojení měřicího obvodu</i>	22
<i>Obr. 6 - Znázornění měřicího obvodu a měřicí smyčky částečných výbojů [2]</i>	23
<i>Obr. 7 - Galvanické diferenciální zapojení, vazební zařízení v sérii s vazebním kondenzátorem</i> .	25
<i>Obr. 8 - Galvanické diferenciální zapojení, vazební zařízení v sérii se zkoušeným objektem</i>	26
<i>Obr. 9 - Princip můstkového zapojení [2] - upraveno</i>	26
<i>Obr. 10 - Princip vertikálního hradlování impulsů [24]</i>	28
<i>Obr. 11 - Princip kalibrace</i>	29
<i>Obr. 12 - Vnitřní částečné výboje [2] - upraveno</i>	30
<i>Obr. 13 - Elektrodové uspořádání vnějšího částečného výboje hrot-deska [7]</i>	31
<i>Obr. 14 - Vnější částečný výboj, náhradní schéma [7]</i>	31
<i>Obr. 15 - Vnější výboj, časový průběh napětí [7]</i>	32
<i>Obr. 16 - Princip vzniku korony, hrot na potenciálu zkušební napětí [2]</i>	32
<i>Obr. 17 - Princip vzniku korony, hrot na zemním potenciálu [2]</i>	33
<i>Obr. 18 - Zapojení systému DDX 8003 a vnitřní blokové schéma [9]</i>	34
<i>Obr. 19 - Princip diskriminace impulsů systémem DDX 8003 [28]</i>	35
<i>Obr. 20 - Polarizace polárních látek [44]</i>	36
<i>Obr. 21 - Polarizace nepolárních látek [44]</i>	36
<i>Obr. 22 - Fázový diagram elektrické indukce a intenzity elektrického pole pro dielektrikum ve střídavém poli [5] - upraveno</i>	38
<i>Obr. 23 - Fázový diagram pro reálné dielektrikum. [5] – upraveno.</i>	39
<i>Obr. 24 - Znázornění Scheringova můstku [38] - upraveno</i>	39
<i>Obr. 25 - Dvojvektorová měřicí metoda pro měření ztrátového činitele [33] – upraveno</i>	40
<i>Obr. 26 – Názorná napěťově časová charakteristika [2] – upraveno</i>	41
<i>Obr. 27 - XLPE Kabel, popis vrstev [13]</i>	43
<i>Obr. 28 - Náhradní obvod kabelu, vektorový diagram</i>	44
<i>Obr. 29 - Elektrické stromečky v XLPE kabelové izolaci [23]</i>	46
<i>Obr. 30 - Detekce částečného výboje při vzdáleném volném konci kabelu [15]</i>	48
<i>Obr. 31 – Časový průběh impulsu [55] – upraveno</i>	50

<i>Obr. 32 - Rozložení ekvipotenciál na konci vnější polovodivé vrstvy [30]</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 33 - Plastové koncovky.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 34 - Aplikace plastové koncovky [2]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 35 – Znázornění fyzikálního popisu koncovky s kabelem [58] - upraveno.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 36 - Olejové koncovky [40].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 37 - Popis olejových koncovek [40] - upraveno</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38 - Náhradní schéma obvodu v koncovce [36] – upraveno</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39 – Znázornění fyzikálního popisu zjednodušené vodní koncovky [50] - překresleno</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 40 - Distribuce napětí uvnitř koncovky podle [50] – upraveno.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 41- Rozložení elektrického pole při použití vodních koncovek [26;36].....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 42 – Příklad dvouvrstvé vodní koncovky [26] - upraveno</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43 - Schéma procesní vodní jednotky [26]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 44 - Závislost rosného bodu na teplotě a relativní vlhkosti okolí [42] - upraveno</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 45 – Popis kabelu v kabelové vodní koncovce CTT 350 [41] - upraveno</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 46 – Tvorba silikonového těsnění</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 47 – Silikonové těsnění.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48 – Oblepení jádra kabelu.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 49 – Vložení a připojení kabelu v koncovce.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 50 – Přivedení deionizované vody do koncovky hadicemi.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 51 – Pohled na měřicí obvod v laboratoři</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 52 - Svorky pro připojení hadic [42]</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 53 – Výměna deionizační pryskyřice.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 54 – Diagram pro zvolení vodivosti vody při testování v AC módu pro CTT 350 [41].....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 55 – Galvanická metoda měření v laboratoři</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 56 – Metoda zapojení pro rozlišení polarit impulsů v laboratoři.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 57 – Připojení kabelu nízkonapěťové elektrody koncovky při měření částečných výbojů.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 58 – Závislost citlivosti na velikosti kapacity kabelu [24] – překresleno.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 59 – Měření částečných výbojů systémem DDX 7000 v čase</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 60 – Měření ztrátového činitele kabelu systémem Tettex 2840 [33] – upraveno</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 61 - Připojení normálového kondenzátoru do obvodu</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 62 – Zapojení kabelu u nízkonapěťové elektrody při můstkovém měření</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 63 – Zasunutý konektor na nízkonapěťové elektrodě.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 64 – Úprava dat v programu systému Tettex 2840 [33]</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 65 – Automatická teplotní korekce při měření ztrátového činitele [33]</i>	<i>74</i>

Obr. 66 – Grafická závislost ztrátového činitele a kapacity kabelu na napětí..... 75

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Vlastnosti jednotlivých typů izolace kabelů [57]</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 2 - Faktory stárnutí kabelu [18].....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 3 – Měření ztrátového činitele a kapacity kabelu</i>	<i>75</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

U [V]	elektrické napětí
φ [V]	elektrický potenciál
D [C·m ⁻²]	elektrická indukce
ε [F·m ⁻¹]	permitivita
E [V ·m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
C [F]	kapacita
R [Ω]	rezistivita
σ [S]	vodivost
i [A]	okamžitý proud
q [C]	náboj
f [Hz]	frekvence
ω [s ⁻¹]	úhlová frekvence
T [s]	časový interval
t [s]	čas
ρ [Ω ·m]	rezistivita
ϑ [°C]	teplota
r [m]	poloměr
L [m]	délka
XLPE	kabel s izolací ze zesíťovaného polyetylenu
PVC	polyvinylchlorid
PE	polyethylen
ČV	částečný výboj
ČSN	česká národní norma
IEC	mezinárodní elektrotechnická norma
NN	nízké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
VN	vysoké napětí
RF	radiofrekvence
WPU	vodní procesní jednotka
PC	stolní počítač
HDO	hromadné dálkové ovládání
CC	spojovací kabel
CD	vazební zařízení,
MI	měřicí přístroj
OL	optický kabel

1 ÚVOD

S neustálým nárůstem poptávky po elektrické energii je potřeba řešit také její distribuci. Především v hustě zastavěných městských oblastech může nastat případ, kdy není možné realizovat venkovní vedení. Problém se řeší podzemním kabelovým vedením uloženým přímo v zemině nebo v kabelových kanálech či kolektorech. U kabelů je kvůli jejich přímému styku s okolím velice důležitým aspektem jejich izolace. Především na izolaci závisí celková životnost kabelu, a proto je nutné dbát na její kvalitu. To má za následek velmi přísné požadavky při výrobě, které je nutné kontrolovat. S vývojem kabelových vedení a měřicí techniky bylo nutné přistoupit k metodám zkoušení, které zjistí více o stavu izolace kabelu než pouze napět'ovými výdržnými zkouškami. Tuto funkci plní především měření částečných výbojů, které výrazně ovlivňují životnost kabelu. Měření je nedestruktivní zkouška, kterou lze vyhledat a s určitou přesností i lokalizovat nehomogenity v kabelové izolaci. To umožňuje předejít poruchám, následným výpadkům přenosu elektrické energie a ekonomickým ztrátám.

Při měření na vysokonapět'ových kabelech je většinou vyžadována vysoká hladina zkušebního napětí, což vytváří problém především v řízení elektrického pole na obou koncích kabelu. Řešením je použití kabelových koncovek, které zabraňují tvorbě výbojů mezi jádrem kabelu a jeho stíněním. Podle potřebné hladiny napětí se používají různé typy koncovek. Asi do 50 kV si měřicí obvod vystačí s jednoduchými plastovými izolujícími koncovkami. Při vyšším napětí se používají olejové koncovky s izolačním olejem, což je dostačující asi do 100 kV. Pokud je zkoušecí hladina napětí vyšší, zkušební metody se uskutečňují s vodními koncovkami, které používají jako prostředek pro řízení elektrického pole deionizovanou vodu. Vodní koncovky jsou ale již komplikovanější zařízení, zahrnující vodní procesní jednotku, která má za úkol udržování hodnoty vodivosti vody a její chlazení. Je zde také obtížnější příprava kabelu než u předchozích variant. Odměnou však bývá bezproblémové měření s vysokou citlivostí i při velmi vysokých napětích.

Vodní koncovky nalézají své uplatnění především u zkoušek velmi náchylných na citlivost, jako je měření částečných výbojů nebo měření ztrátového činitele. Při měření ovšem nevzniká rušení pouze výboji na koncích kabelu, ale může být například radiofrekvenční nebo rušení způsobené okolními elektrickými stroji, které mohou velice ovlivňovat výsledek měření především částečných výbojů. Při měření částečných výbojů na vysokonapět'ových kabelech se po jejich výrobě vyžaduje, aby naměřený zdánlivý náboj u zdravého kabelu byl většinou menší než 2 pC, což může hodnota rušení značně přesahovat. Proto nebývá jednoduché rušení snížit a měření se provádí ve stíněné zkušebně s kvalitním zemněním, s filtry zkušebního napětí a měřicí přístroj se kalibruje při každé změně jeho nastavení a změně v měřicím obvodu. To ovšem nemusí být dostačující a provádí se další opatření pro zvýšení citlivosti, především elektrickou úpravou zpracováním naměřeného signálu.

2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Norma ČSN EN 60270 definuje částečný výboj jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. [1] Vyskytují se na zařízeních NN, VN VVN i u zařízení pro stejnosměrný provoz a mohou obecně vznikat v pevných, kapalných i v plynných izolantech. Projevují se jako impulsy s dobou trvání kolem jednotek nanosekund a hodnotou náboje v řádech desítek fC až pC. Ovšem mohou se také vyskytnout i plynulejší formy výbojů, např. tzv. nepulsní výboje v plynném dielektriku. [2;11]

Částečné výboje lze rozdělit podle místa výskytu:

- Vnitřní částečné výboje, což jsou částečné výboje v plynech, jež jsou obklopeny pevným nebo kapalným dielektrikem, jako například výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku.
- Povrchové částečné výboje, které se vyskytují v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, např. klouzavé, nebo drážkové výboje.
- Vnější částečné výboje vznikající v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení. Mezi tyto výboje patří např. doutnavé a korónové výboje. [3]

2.1.1 Parametry částečných výbojů

Pro hodnocení částečných výbojů je nutné určit měřitelné charakteristické veličiny výbojů.

Zdánlivý náboj

Zdánlivý náboj q impulsu částečného výboje je náboj mžikově přiveden na svorky zkoušeného objektu, který způsobí takovou změnu výchylky, jakou by způsobil vlastní proudový impuls částečného výboje. Zdánlivý náboj se nerovná náboji lokálně působícího v místě výboje, který se nedá měřit přímo. Zdánlivý výboj je základní diagnostický parametr pro měření a vyhodnocování částečných výbojů. Udává se v obvykle v pikocoulombech (pC). [1;7]

Četnost impulsů

Četnost impulsů n udává poměr mezi celkovým počtem proudových impulsů vyvolaných výbojovou činností za určitý časový interval a dobou trvání tohoto časového intervalu, zpravidla jedna perioda. Počet detekovaných impulsů ale nic nenapovídá o počtu poruch. [1;2]

Fázový úhel a čas výskytu impulsu

Fázový úhel φ_i popisuje rovnice (2.1), kde t_i je čas mezi předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulsem částečného výboje, T je perioda zkušebního napětí. Je vyjádřen ve stupních ($^\circ$). [1;2]

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

Střední proud částečných výbojů

Střední proud částečných výbojů I je odvozená veličina, které představuje součet hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T_{ref} děleno tímto intervalem. Střední proud částečných výbojů se vypočítá podle vztahu (2.2). Udává v jednotkách ($\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) nebo v ampérech (A). [1]

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i| + \dots + |q_m|) \quad (2.2)$$

Výkon částečných výbojů

Výkon částečných výbojů P je další odvozená veličina. Udává střední výkon impulsů částečných výbojů dodávaný na svorky zkoušeného objektu během referenčního časového intervalu T_{ref} . Výkon částečných výbojů může být měřen přímo, nebo je možné ho vypočítat ze vztahu (2.3) z naměřených hodnot zdánlivých nábojů q_i a okamžitých hodnot zkušební napětí u_i , přičemž musí být sledována znaménka jednotlivých hodnot. Udává se ve wattech (W). [1;7]

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i) \quad (2.3)$$

Střední kvadratický součet

Střední kvadratický součet D je součtem ploch čtverců jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i za určitou délku zvoleného referenčního časového intervalu T_{ref} děleným tímto intervalem. Střední kvadratický součet je možno určit přímo měřením nebo výpočtem podle vztahu (2.4). Udává se v jednotkách ($C^2 \cdot s^{-1}$). [1;7]

$$D = \frac{1}{T_{ref}} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2) \quad (2.4)$$

2.1.2 Přiložená zkušební napětí vztažená k veličinám impulsů částečných výbojů

Počáteční (zapalovací) napětí částečných výbojů

Počáteční napětí U_i je přiložené napětí, při kterém jsou ve zkoušeném objektu poprvé pozorovány opakující se částečné výboje, přičemž toto napětí musí být zvyšováno z nižší hodnoty, při které nejsou pozorovány žádné částečné výboje. V praxi je to nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň veličiny impulsu částečného výboje rovná nebo převyšuje předepsanou hodnotu. [1]

Zhášecí napětí částečných výbojů

Zhášecí napětí částečného výboje U_e je přiložené napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje, přičemž musí být napětí snižováno z hodnoty vyšší, při které jsou částečné výboje pozorovány. V praxi představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém se zvolená veličina impulsu částečného výboje rovná nebo je menší než předepsaná hodnota. [1]

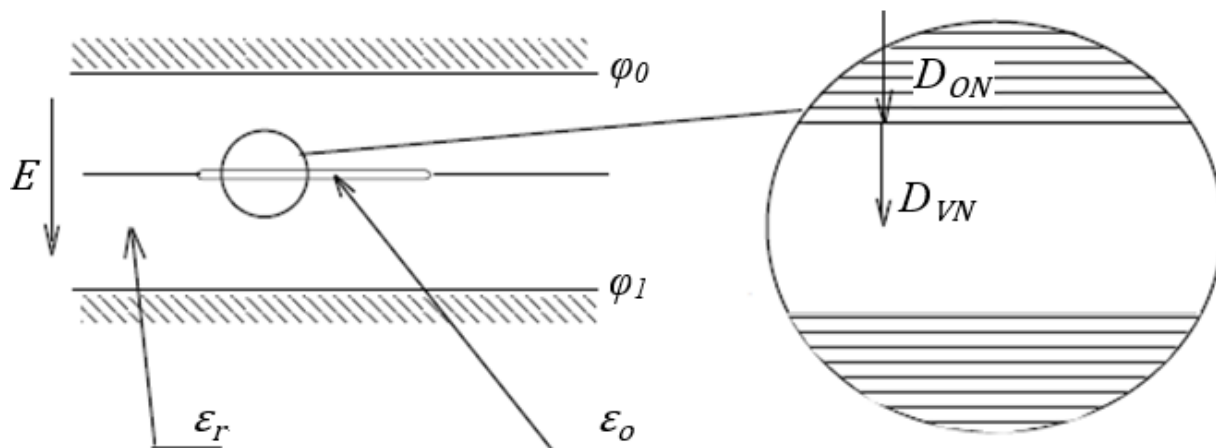
Zkušební napětí částečných výbojů

Přiložené napětí předepsané zkušebním postupem pro měření částečného výboje, během kterého zkoušený objekt nevykazuje částečné výboje překračující předepsanou hodnotu. [1]

Zkušební napětí bývá dáno maximálním provozním napětím zkoušeného zařízení nebo 110 % této hodnoty. U některých zkoušených objektů je zvýšená hystereze, kvůli které je nutné měřit velikost částečných výbojů při zvyšování i snižování napětí. [2]

2.2 Vnitřní částečný výboj

Vnitřní částečný výboj může nastat například v plynu vyplněné dutině uvnitř pevného izolantu, která může vzniknout například špatným provedením, výrobními chybami, mechanickým poškozením, stárnutím atd.:



Obr. 1 - Porucha v izolaci ($\varphi_0 < \varphi_1$) [4]

Z Gaussova zákona elektrostatiky můžeme popsat rovnost hustoty toku elektrického náboje:

$$D_{ON} = D_{VN} \quad (2.5)$$

kde D_{ON} je normálová složka elektrické indukce neporušeného dielektrika bez vlivu nehomogenity, D_{VN} je normálová složka indukce dielektrika ze strany porušení homogenity (vzduchová dutina). Rovnice (2.5) lze potom přepsat na tvar:

$$\varepsilon_o \varepsilon_r E_0 = \varepsilon_o E_v \quad (2.6)$$

$$E_v = \varepsilon_r E_0 \quad (2.7)$$

kde ε_r je relativní elektrická permitivita dielektrika, ε_o je dielektrická konstanta vakua, E_0 je intenzita elektrického pole ze strany neporušeného dielektrika, E_v je intenzita elektrického pole ze strany poruchy dielektrika (vzduch). Násobný nárůst intenzity elektrického pole vzniklé vzduchové mezery (vlivem $\varepsilon_r > 1$) při nastavení vysokých hodnot intenzity elektrického pole v dielektrickém materiálu E_0 způsobí dosažení mezních hodnot elektrické pevnosti vyjádřené intenzitou elektrického pole ve vzduchu E_p . Mezní elektrická intenzita v normálovém směru ve vzduchu, při které dojde k elektrickému průrazu vzduchu, je rovna typicky $E_{np} = 3\,000$ kV/m. Pokud dojde ke stavu:

$$E_v \geq E_{np} \quad (2.8)$$

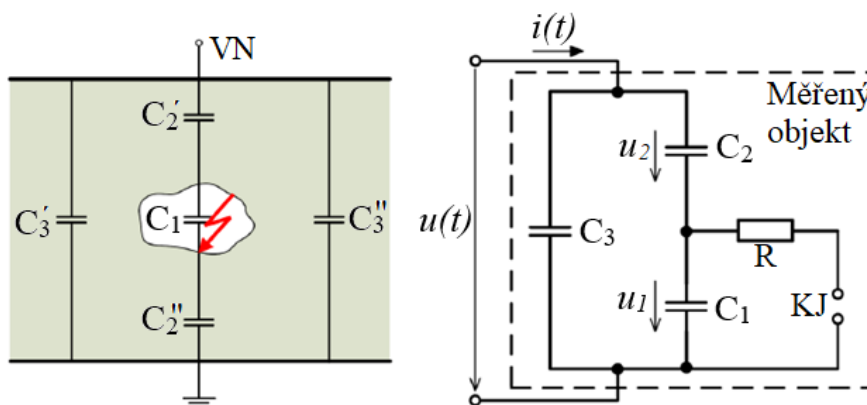
dochází v nehomogenním dielektriku ke stavu, při kterém se vytvoří lokální elektrický výboj. Neutrální molekuly plynu při přeskočení vytváří kladné a záporné ionty. Ty se v elektrickém poli pohybují opačným směrem a hromadí se na stěnách dutinky. Vytváří tak elektrické pole opačné orientace oproti působícímu vnějšímu poli. Vnější elektrické pole v dutince je tímto částečně kompenzováno. Výboj v dutince hoří, dokud se na stěnách nahromadí elektrický náboj, při kterém napětí na dutince klesne pod hodnotu zážecího napětí U_e . Pokud se přiložené napětí i nadále zvyšuje, zvyšuje se i napětí na dutince. Po dosažení hodnoty počátečního napětí U_i se děj

se opakuje. Pokud se přiložené napětí nezvyšuje, odchází nahromaděný náboj ze stěn dutinky a na dutince roste napětí až na hodnotu zápalného napětí a dojde znovu ke vzniku výboje. Povrchový odpor dutinky a vnitřní odpor izolantu určují rychlost, jakou nahromaděný náboj odtéká ze stěn dutinky. Tato rychlost je rozhodující pro délku doby intervalu mezi dvěma po sobě následujícími výboji na jedné dutince. V jednotlivých dutinkách dochází k přeskoku podle Paschenova zákona postupně při různých napětích v závislosti na velikosti dutin. [4;5]

2.2.1 Gemant-Philippovův (trojkapacitní) model

Pro analýzu napěťových a energetických poměrů na dutince a na svorkách při výbojové činnosti se používají modely a náhradní schémata vnitřních částečných výbojů. Analýzou náhradních obvodů pak může být popsán vznik částečných výbojů a jejich základní vztahy. [3]

Obrázek 2 schematicky znázorňuje pevný izolant s vnitřní plynovou dutinou a jeho trojkapacitní náhradní schéma. Kapacita C_1 představuje kapacitu dutinky, C_2 je kapacita části izolace v sérii s kapacitou dutinky, C_3 je kapacita nepoškozené části dielektrika, odpor R představuje odpor výbojového kanálu a KJ je kulové jiskřiště, jehož zapálení představuje částečný výboj. [7]



Obr. 2- Trojkapacitní model [8] - upraveno

V případě, kdy přiložené napětí zdroje nebo napětí na dutince dosáhne hodnoty zapalovacího napětí U_i , dochází na dutině k výboji a dojde k uvolnění lokálního náboje, který ale nelze přímo měřit:

$$\Delta q_1 = \Delta u_1 C_1 \quad (2.9)$$

Napětí na dutince je přerozděleno podle kapacit:

$$u_1(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \quad (2.10)$$

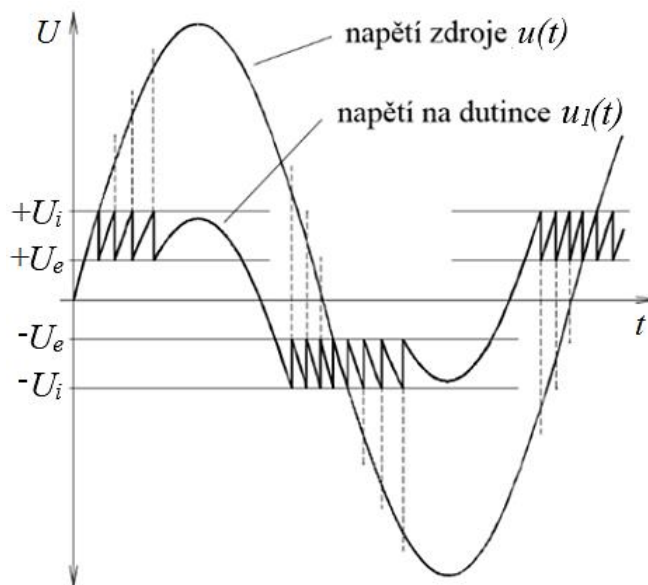
Výboj způsobí pokles napětí o Δu_1 na dutince C_1 a Δu na svorkách popsáný: [27]

$$\Delta u_1 C_1 = \Delta u (C_3 + C_2) - C_2 \Delta u_1 \quad (2.11)$$

Protože kapacita C_2 je mnohem větší než kapacita C_1 , můžeme psát, že pro napěťový pokles $\Delta u(t)$ přibližně platí: [16]

$$\Delta u(t) = \frac{C_2}{C_3 + C_2} \Delta u_1(t) \quad (2.12)$$

Po vytvoření výboje ve vzduchové kapse dále dojde k vyrovnání potenciálu na protějších stranách a napětí na poruše je nulové. Stále ale dochází ke zvyšování přiloženého napětí na testovaném objektu, až do jeho vrcholové hodnoty. Proces průrazu se tedy může opakovat. Výsledkem je vytvoření několika odebíraných proudových impulsů z napájecího zdroje. Při poklesu hodnoty napětí zdroje na napětí zhašecí U_e výboj zaniká. Stejný proces s opačnou polaritou napětí a impulsů probíhá při snižování přiloženého napětí na testovaném objektu. Tento děj je zobrazen na Obrázku 3. [2]



Obr. 3 - Průběh napětí na dutince s výboji při střídavém napětí [5] - upraveno

Pro přesnější popis vývojové činnosti slouží Böningův (pětikapacitní) model, který respektuje při procesu vybíjení kromě plochy dutinky i určitá část okolního materiálu obklopujícího tuto dutinku. Při průrazu dochází k odsávání nábojů nejen ze stěn dutinky, ale i z materiálu v okolí dutinky. Nedochází tedy k poklesu napětí jen na dutince ale i v jejím okolí. [6]

2.3 Vliv částečných výbojů na izolaci

Při výboji vzniklé excitované a zionizované molekuly plynu uvnitř dutiny setrvávají určitý čas do navrácení k původnímu neutrálnímu stavu. Během této doby chemicky, tepelně a působením ultrafialového záření narušují okolní pevnou část izolačního materiálu zkoušeného objektu. Postupně tak dochází k dalšímu narušování a zvětšování poruchového místa, které vede k vytvoření vodivého kanálu mezi elektrodami a ve výsledku až k vnitřnímu průrazu testovaného objektu. [2]

Elektro-erozivní účinky

Dojde-li v dutince k vývinu oblouku, je jeho následkem vytvoření vodivé dráhy. Je-li hodnota intenzity elektrického pole dostatečně vysoká, může koncentrace elektrického pole vyvolat čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může šířit dále izolantem. Další vliv na degradaci pevného izolantu mají elektrony a ionty bombardující stěny dutinky, čímž způsobují erozi materiálu a dochází tak ke ztenčování izolační vrstvy. Tato eroze může být rovnoměrná, nebo se soustředí do několika míst, v nichž se tvoří jamky. Úbytek materiálu je způsoben chemickou přeměnou původního izolantu. Dochází tedy ke zvětšování původní dutinky a při pokračující erozi může dojít k průrazu celého izolantu. [5;7]

Účinky záření vznikajícího při výbojích

Při výbojích vzniká kromě viditelného světelného záření také ultrafialové záření. To má větší energii na vyvolání chemických reakcí. [5]

Chemické účinky

Částečné výboje mění chemické vlastnosti plynů obsažených uvnitř dutinek. Ve vzduchu jde především o kyslík a dusík. Obsahuje-li dutinka kyslík, vzniká výbojovou činností ozon, který má intenzivní oxidační účinky. Také vzniká jednoatomový dusík, který se snadno váže s jednoatomovým kyslíkem za vzniku oxidů dusíku. Ozon a oxidy dusíku mohou při vysokých teplotách vytvářet kyselinu dusičitou, který je velmi agresivní. Výsledkem chemických reakcí jsou pevné, plynné a kapalné vedlejší produkty. Tyto produkty rozkladu mohou dále prostupovat do pevného izolantu a vytváří tak vodivé oblasti. [3;5;7]

Tepelné účinky

Pokud je výbojová činnost velmi intenzivní, oteplení může být srovnatelné s oteplením způsobeným dielektrickými ztrátami a může tak klesnout hodnota napětí tepelného průrazu. Vysoká teplota výbojového kanálu může způsobit zuhelnatění izolantu. [5]

Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu.

U konce výbojového kanálu má elektrické pole podobné vlastnosti jako elektrické pole v okolí hrotu jehly. To znamená, že jeho intenzita dosahuje lokálně vysokých hodnot. Jedná se tedy o šíření vodivých drah, které ovšem neprobíhají pravidelně, výbojové kanály se postupně rozvětvují a vzniká tak stromečkový útvar. Kanály postupně pronikají materiálem, dokud nepřeklenou celou vzdálenost mezi elektrodami a dojde tak k průrazu izolantu. Elektrický stromeček se vyskytuje především v silně namáhaných jednovrstvých izolantech, např. kondenzátorech a kabelech. [7]

Mechanické namáhání

Vlivem mechanického namáhání izolačních materiálů a působením vnějšího elektrického pole vznikají nosiče náboje, které se postupně seskupují v izolantu. Nosiče stejné polarity se vzájemně odpuzují a náboje různé polarity se navzájem přitahují, těmito reakcemi nábojů se dále zvyšuje mechanické namáhání, které je závislé na počtech dopadajících částic a rychlosti jejich srážek. Celý proces vede ke zvětšování dutinky a následnému možnému průrazu. [3;7]

3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

K detekci vzniku částečných výbojů je nutné jejich náležité zaznamenání. Obecně všechny použité detekční metody závisí na několika základních jevech, které vznik ČV doprovází a jsou z nich odvozeny veškeré metody detekce, které mohou být aplikovány i na sobě nezávisle či kombinovaně: [11]

- Pohyb náboje, tedy vznik elektrického proudu
- Emise světla
- Vznik chemických reakcí
- Vznik mechanického vlnění, tedy zvuku
- Vznik elektromagnetického vlnění
- Dielektrické ztráty

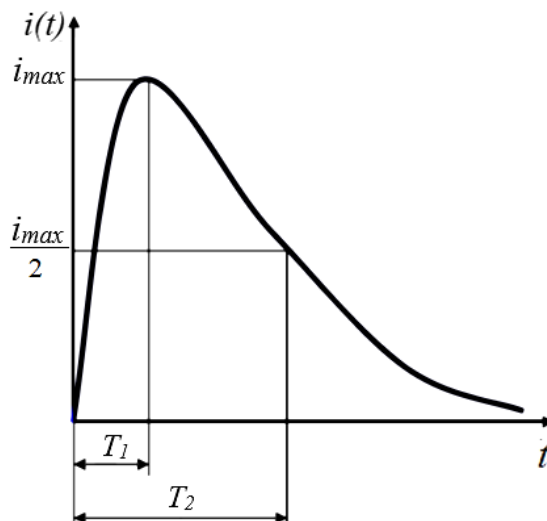
Měření částečných výbojů můžeme rozdělit na metody globální a lokalizační. Globální metodou zjistíme celkový přehled o stavu izolace zkoumaného objektu. Lokalizační metodou můžeme přesně určit místo působení částečných výbojů. Metody můžeme také rozdělit podle toho, jestli je nutné při měření odstavit zařízení z provozu, tedy off-line měření, nebo on-line, kde metoda umožňuje měřit za provozu. [3;7]

Způsobům měření jednotlivým metodám je již věnováno mnoho publikací s jejich popisem, navíc by jejich další popis převyšoval kritéria této práce. Proto bude dále popsána pouze elektrická metoda, která se očekává i v praktické části práce, a která je většinou citlivější a lépe kvantifikovatelná a dominuje v oblasti měření přesné velikosti zdánlivého náboje q , který zdroj ČV přenáší, protože měření nelze korektně provádět žádnou jinou měřicí metodou, ale pouze jen přibližně odhadnout. [7;11]

3.1 Elektrická metoda měření částečných výbojů

Elektrické metody využívají měření proudových impulsů, které vznikají působením částečných výbojů. Ty mají charakteristickou velikost, dobu čela T_1 a dobu půltýlu T_2 podle druhu izolantu, ve kterém k částečným výbojům dochází. Pevné izolanty mají doby několik ns pro čelo impulsu a desítky ns pro dobu půltýlu. U kapalných izolantů jsou tyto doby delší přibližně 1 μ s pro čelo impulsu a několik μ s pro dobu půltýlu. Velikost náboje tohoto impulsu je dána plochou pod křivkou $i(t)$ podle vztahu (3.1). Ideální tvar proudového impulsu je na Obrázku 4. [3;7]

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (3.1)$$



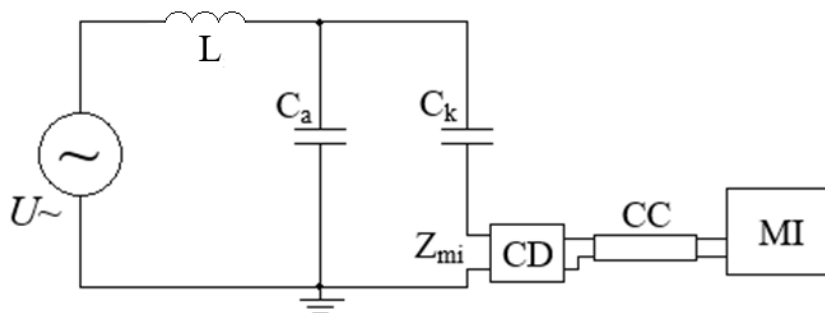
Obr. 4 - Průběh proudového pulzu částečného výboje [7]

3.2 Zkušební obvody pro střídavá napětí

Základním úkolem zkušebního obvodu pro měření částečných výbojů je umožnit podmínky pro detekci částečných výbojů uvnitř zkoušeného objektu při jmenovitém zkušebním napětí částečných výbojů. Postupně bylo vyvíjeno několik základních zkušebních metod. Nejrozšířenější se stala galvanická diferenciální metoda, která má největší univerzálnost použití a nejvyšší citlivost. Elektrické metody jsou standardizovány mezinárodní normou IEC 60270:2000 a tomu odpovídající normou ČSN EN 60270. [1;2]

Zkušební obvody se dimenzují podle potřebné hladiny napětí a délky kabelu. Měřicí obvod pro střídavá napětí je např. znázorněn na Obrázku 5 a skládá se především ze:

- Zkoušeného objektu, většinou považovaným za kondenzátor C_a
- Vazebního kondenzátoru C_k
- Měřicího přístroje
- Vazebního zařízení CD
- Vysokonapětového zdroje U_{\sim}
- Vysokonapětových spojení
- Impedance nebo filtr, zpravidla indukčnost L



Obr. 5 - Možnost zapojení měřicího obvodu

Součásti: U_{\sim} Vysokonapětový zdroj, Z_{mi} vstupní impedance měřicího systému, CC spojovací kabel, C_a zkoušený objekt, C_k vazební kondenzátor, CD vazební zařízení, MI měřicí přístroj, L filtr.

3.2.1 Vysokonapětový zdroj

Vysokonapětový zdroj musí být schopný dodávaným napětím pokrýt všechny testované části i vazební kapacitu. Používají se vysokonapětové zdroje se zkušebním kmitočtem v rozsahu 45 až 65 Hz přibližně sinusového tvaru s poměrem vrcholové hodnoty ku efektivní rovným $\sqrt{2}$ s tolerancí 5 %. Většinou se jedná o vysokonapětový transformátor. Na straně vysokého napětí bývá umístěno jeho měření, většinou pomocí kapacitního děliče. [24]

3.2.2 Impedance nebo filtr

Oddělovací impedance, zpravidla cívka s jádrem nebo bez jádra a případně další filtry oddělují vysokofrekvenční měřicí smyčky od vysokonapětového napájecího zdroje a slouží k utlumení jeho rušení, přičemž zabraňuje průchodu impulsních proudů, které jsou poté omezeny jen kapacitami C_k a C_a . [1;2]

3.2.3 Vysokonapětové spojení

Vysokonapětové spojení by mělo být, pokud možno, bez výskytu korony a provádějí se v co možná nejkratších délkách. Nezbytné je také nízkoimpedanční zemní spojení zapojované do hvězdy, ideálně menší než 1Ω , a mělo by být izolováno od ostatních uzemněných obvodů pro snížení rušení. Ochranný obvod musí být navržený tak, aby vydržel poruchový proud ve zkoušených objektech, které mohou selhat a měl by být kombinován s vazebním zařízením. [1;24]

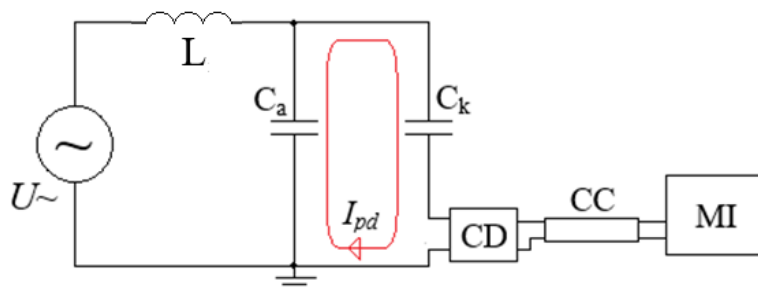
3.2.4 Zkoušený objekt

Povrch vnější izolace zkoušeného objektu musí být suchý, čistý a měl by mít teplotu okolí. Vlhkost nebo znečištění na izolačním povrchu by mohlo způsobit částečné výboje. [1]

3.2.5 Vazební (blokovací) kondenzátor

Vazební kondenzátor C_k je připojen k měřenému objektu tak, aby vytvořil obvodovou smyčku společně s měřeným objektem a měřicí impedancí, ve které cirkulují proudové impulsy. Pokles napětí Δu při částečném výboji je pak kompenzován energií z této kapacity, což zabraňuje poklesu napětí na svorkách. Měl by mít nízkou indukčnost a vykazovat dostatečně nízkou hladinu částečných výbojů. Jeho hodnota kapacity je zvolena tak, aby byla zajištěna dobrá citlivost pro měření částečných výbojů, většinou se jedná řádově okolo jednotek až desítek nF.

Propojení mezi komponenty této smyčky by mělo být co nejkratší a neměly by přes tuto smyčku vést žádné jiné kabely kvůli rušení indukovaným do smyčky. Na Obrázku 6 je znázornění měřicí smyčky, kde I_{pd} značí impulsní proud způsobený částečnými výboji. [1;2;9;24]



Obr. 6 - Znázornění měřicího obvodu a měřicí smyčky částečných výbojů [2]

Kapacitu měřeného objektu C_a , popsanou v kapitole 2.2.1, lze při zanedbání kapacity C_1 kvůli její relativně velmi nízké hodnotě, vyjádřit jako součet kapacit C_2 a C_3 . Pokud budeme předpokládat, že:

$$C_k \gg C_a \quad (3.2)$$

Pro náboj, který dodá vazební kondenzátor pak platí:

$$q = (C_2 + C_3)\Delta u \quad (3.3)$$

odtud pak lze vyjádřit pokles napětí:

$$\Delta u(t) = \frac{q}{C_2 + C_3} \quad (3.4)$$

Pokud rovnici (2.12) dosadíme do rovnice (3.4), pro náboj q platí:

$$q = C_2 \Delta u_1(t) \quad (3.5)$$

což je právě měřený zdánlivý náboj.

Při skutečném měření ale nebývá podmínka rovnice 3.2 splněna a naměřený náboj bude mít hodnotu v poměru se zdánlivým nábojem podle rovnice:

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_k + C_a} \quad (3.6)$$

proto by měla být vazební kapacita co nejvyšší s ohledem ke kapacitě měřeného objektu. [16]

3.2.6 Měřicí systém

Měřicí systém musí být schopen změřit celkový náboj odebíraný zkoušeným objektem. Může být rozdělen na podsystémy:

- vazební zařízení CD někdy označované jako přizpůsobovací jednotka nebo coupling box
- přenosový systém (propojovací nebo optické kabely)
- měřicí přístroj

Ve spodní části obvodu vazebního kondenzátoru C_k je umístěno vazební zařízení, které má za úkol propustit signály o frekvenci zkušební napětí a jeho harmonické složky. Zároveň má odfiltrovat vysokofrekvenční složku, jež je přiváděna do měřicího systému a ihned vyhodnocena.

Vazební zařízení obsahuje prvky pro dosažení optimální citlivosti zkušební obvodu. Obvykle se jedná o čtyř-svorkovou síť, která slouží k přeměně vstupních proudů na výstupní vysokofrekvenční napěťové signály. Ty jsou přeneseny do měřicího zařízení pomocí přenosového systému. [1;2]

Signály částečných výbojů mívají velice rychlou dobu náběhu, jejich šířka frekvenčního pásma může být poměrně široká a také dochází k útlumům signálu při cestě k vazebnímu zařízení. Především tyto faktory rozhodují při návrhu šířky měřicího pásma zesilovače měřicího přístroje. Podle toho je pak definován dolní a horní mezní kmitočet, při kterém dochází k poklesu přenosové impedance o 6 dB od největší hodnoty v přípustném pásmu. Šířka pásma je pak popsána jako rozdíl dolního mezního kmitočtu od horního.

Frekvenční měřicí pásmo měřicího systému by mělo splňovat doporučené hodnoty normy IEC 60270, která udává požadavky pro spodní mezní kmitočet f_1 , horní mezní kmitočet f_2 a šířku pásma Δf pro širokopásmové měřicí přístroje: [1;24;9]

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz} \quad (3.7)$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz} \quad (3.8)$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz} \quad (3.9)$$

Podle novějších specifikací by horní mezní kmitočet f_2 měl splňovat podmínku měření až do 1 MHz.

Měřicí systémy pracují s diskretními signály. Jejich logika tedy musí definovat, kdy impuls začíná a kdy skončí. Mezi impulsy tedy musí být určitá časová prodleva, aby je přístroj detekoval. Tato prodleva bývá okolo 10 μs .

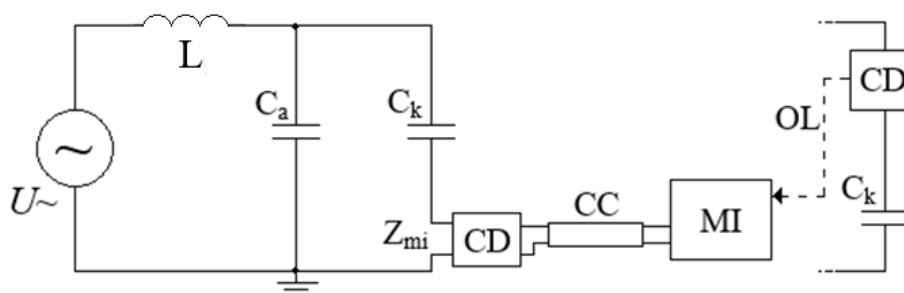
Digitální měřicí systémy bývají často doplněny o PC, které pomáhají při ukládání a vyhodnocování veličin vztahujících se k impulsům částečných výbojů. [1;24;9]

3.3 Citlivost měřicího systému

Citlivost měřicího systému představuje minimální detekovaný impuls q_{min} , který je možné zpozorovat na měřicím přístroji při přítomnosti šumu pozadí, z jehož úrovně se vyhodnocuje, přičemž musí být větší než dvojnásobek zdánlivého šumu, přičteného na měřicím přístroji. Pro jednotlivé objekty se určují maximální hodnoty citlivosti v souladu s požadavky uvedenými v normách pro různé měřené objekty. [15]

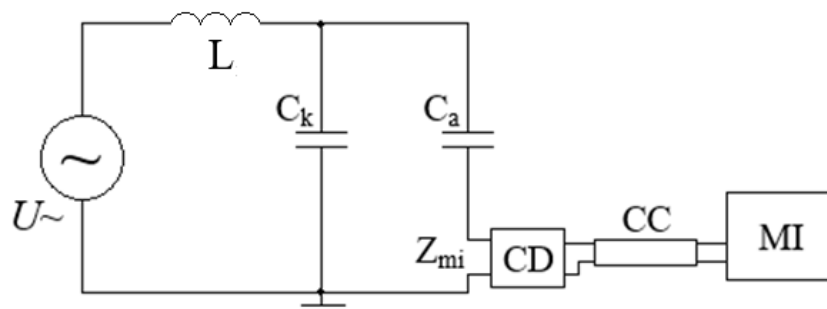
3.4 Zapojení zkušebních obvodů

Pokud je objekt uzemněný nebo vykazuje hodnoty velkých kapacit, používá zapojení se snímací impedancí zapojenou do větve vazebního kondenzátoru (Obrázek 7), kde je i příklad alternativní pozice vazebního zařízení, OL značí optický kabel. [3]



Obr. 7 - Galvanické diferenciální zapojení, vazební zařízení v sérii s vazebním kondenzátorem

Při měření objektů s možností rozpojení zemního přívodu se používá zapojení se sériovou snímací impedancí. Vlivem rozptylových kapacit, které jsou k vazebnímu kondenzátoru řazeny paralelně, se docílí vyšší citlivosti. Pokud je rozptylová kapacita obvodu k zemi větší než kapacita měřeného objektu, může se vazební kapacita C_k vynechat. [3;7]



Obr. 8 - Galvanické diferenciální zapojení, vazební zařízení v sérii se zkoušeným objektem

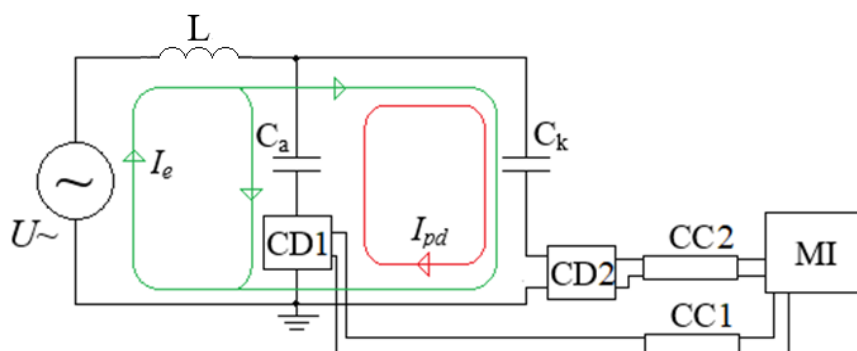
Zkušební obvody na Obrázcích 7 a 8 mohou mít také vazební zařízení měřicího systému umístěno na straně vysokonapěťové svorky tak, že je umístění C_k nebo C_a s vazebním zařízením prohozeno. Potom se ale pro propojení vazebního zařízení použijí optické kabely, jak znázorňuje například Obrázek 7. [1]

Metody také dovolují měření více veličin, ale obecně jsou všechny odvozeny ze základní veličiny zdánlivého náboje q . [1;11]

3.4.1 Obvod pro rozlišení polarit impulsů

Princip zapojení obvodu pro rozlišení polarit spočívá v měření impulsů detekovaných ve dvou vazebních zařízeních, kde se porovnává směr toku impulsních signálů. Tento způsob zapojení bývá někdy označen také jako diferenciální můstkové. První jednotka je zapojena ve větvi vazebního kondenzátoru C_k , druhá ve větvi měřeného objektu C_a . Pokud impuls vznikne v měřeném objektu C_a , polarita naměřených impulsů bude v měřené smyčce odlišná. Pokud signál pochází z vnějšího rušivého zdroje, naměřené polaritě signálu budou totožné a signál se nezapočítává do konečného výsledku. Princip znázorňuje Obrázek 9. Kapacity by pokud možno měly být stejného řádu.

Zapojení pro rozlišení polarit se využívá, pokud je potřeba při měření zvýšit citlivost měření. Tento způsob měření umožňuje více možností, jak provést eliminaci vnějších rušení, ale je složitější na obsluhu. [1;2]



Obr. 9 - Princip můstkového zapojení [2] - upraveno

I_e značí proudové impulsy z externích rušivých zdrojů a I_{pd} proudové impulsy částečných výbojů uvnitř měřené smyčky.

4 RUŠIVÉ VLIVY

Měřicí metody, uvedené v kapitole 3, doprovází mnoho druhů rušení, které pak omezuje citlivost měření. Toto rušení lze rozdělit do dvou kategorií:

- Rušení, které se objeví i v případě, kdy není obvod pod napětím.

Toto rušení může vznikat například díky spínacím operacím, komutačními stroji v blízkosti prováděnými vysokonapětovými zkouškami, rozhlasovým vysíláním atd., zahrnuje se sem i vnitřní šum měřicího přístroje i rušení, které se může objevit při připojení vysokonapětového zdroje s nulovým napětím.

- Rušení, které se objevují jen pokud je zkušební obvod pod napětím.

Mezi toto rušení nepatří proudové impulsy ze zkoušeného objektu. Obvykle se intenzita tohoto rušení zvětšuje s napětím a může být způsobeno například částečnými náboji ve zkušebním transformátoru, na vysokonapětových vodičích, v průchodkách, jiskřením nedokonale uzemněných objektů v okolí nebo nedokonalým spojením ve VN části, například jiskřením mezi stíněním a ostatními VN vodiči, které jsou spojeny se stíněním. Další zdroje rušení můžou být vyšší harmonické složky napětí ve zkušebním napětí, které jsou často přítomny v NN napájení s polovodičovými spínacími zařízeními a přenáší se například společně se šumem jiskřivých kontaktů přes zkušební transformátor do zkušebního obvodu. [1]

Opatření pro snížení hladiny by se měla provést, pokud hladina rušení přesahuje 50 % maximální přípustné úrovně částečných výbojů předepsané pro zkoušený objekt. [1]

Konečná mez citlivosti měření bývá dána mezí vlastního měřicího systému nebo malými nedostatky ve stínění, uzemnění či filtrování. Tato citlivost měření zdánlivého náboje bývá dosažitelná okolo 1 pC, což jsou výsledky srovnatelné s dnešními modernějšími metodami. [1;11]

4.1 Detekce rušení

Pokud se jedná o napětově nezávislé zdroje rušení, mohou být sledovány pomocí výchytky na přístroji, kdy zkoušený obvod není pod napětím.

Napětově závislé rušení se mohou detekovat pomocí kalibrace. Zkoušený objekt je buď odstraněn, nebo nahrazen ekvivalentním kondenzátorem bez významných částečných výbojů při předepsaném zkušebním napětím. Kalibrace je podrobněji popsána v kapitole 4.3.

Je možné také použít některé z neelektrických detekčních metod, například k lokalizaci koróny na přívodech VN.

Pokud se použije osciloskop jako vyhodnocení získaných veličin ČV, může pomoci pozorovateli rozlišit částečné výboje od rušení, jak popisuje kapitola 4.4 a 4.5.

Odečítat hladinu rušení od měřené velikosti částečných výbojů není korektní. [1]

4.2 Snížení rušení

Snížit rušení je možné pomocí vhodného uzemnění veškerých vodivých konstrukcí, které se vyskytují v blízkosti zkoušek a měly by být zbaveny také ostrých výčnělků. Dalšího snížení lze dosáhnout pomocí filtrování silových zdrojů a měřicích obvodů a také díky stíněné místnosti, do které jsou všechna elektrická připojení provedena prostřednictvím filtrů potlačujících rušení. [1]

Rušení přicházející do měřicího obvodu v podobě rádiových vln je možné eliminovat pomocí externí antény. [2]

4.2.1 Symetrické obvody

Pokud je potřebné další snížení rušení v řádu okolo jednotek až desetin pC, zapojují se pracoviště jako symetrické obvody obsahující dvě vazební zařízení, které umožňují pozorovateli rozlišit částečné výboje ve zkoušeném objektu od výbojů v jiných částech zkušebního obvodu. Toto zapojení se označuje jako diferenciální můstkové a je popsáno v kapitole 3.4.1. Porovnání relativní polaritý impulsů provádí logický systém, který ovládá hradlo měřicího přístroje tak, že reaguje jen na impulsy správné polaritý. Nevýhoda těchto systémů je kalibrace, při které nelze použít injektážní kondenzátor. Kalibrace se tedy provádí ručním kalibrátorem, což znesnadňuje a prodlužuje měření. Přetrvává zde ale rušení, které jsou elektromagneticky indukované ve smyčce vytvořené C_a a C_k . [1;2]

4.2.2 Elektrické zpracování signálů

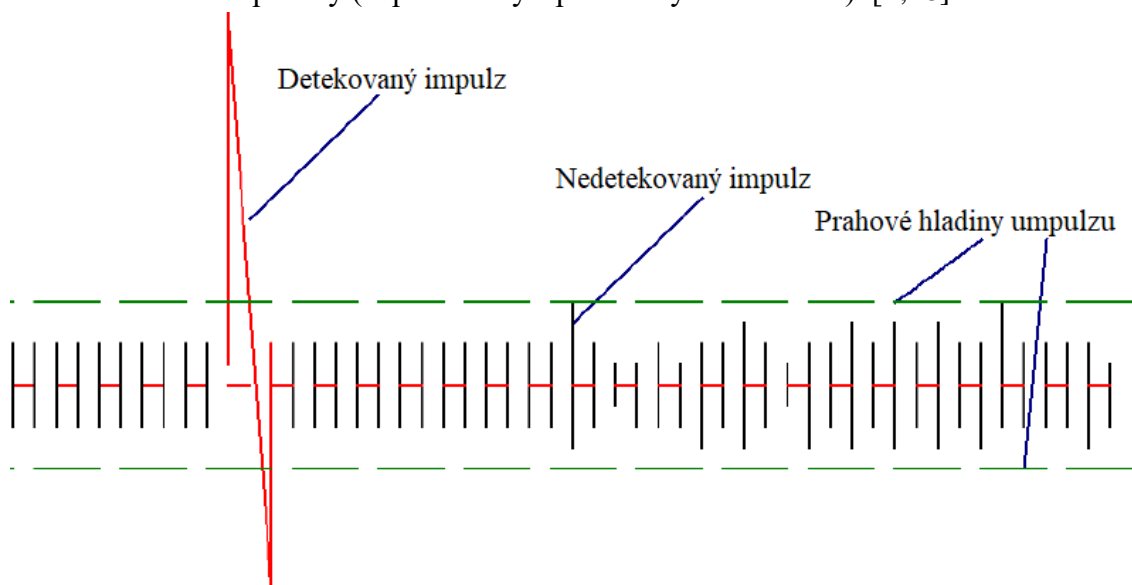
Existují také různé elektronické metody, které oddělují skutečné částečné výboje od rušení. U těchto metod je potřeba dbát na to, aby nikdy neeliminovaly nebo nezakrývaly vlastní signály částečných výbojů. [1]

4.2.2.1 Metoda časového okna – horizontální hradlování

Měřicí přístroj vybavený hradlem může uzavírat předem vybrané časové okamžiky. Tím pak může blokovat rušení, které se objevují v periodicky. Eliminuje se tím například šum regulátoru. [1;28]

4.2.2.2 Vertikální pulzní diskriminační systém

Blokovat lze také vertikální úroveň signálu vertikálním diskriminačním systémem, především pro eliminaci šumu pozadí, kde nejvíce přispívá zesilovač a samotný testovací obvod a do výpočtu jsou zahrnuty pouze impulsy přesahující nastavenou hodnotu. Hradlovány mohou být i impulsy přesahující nastavenou hodnotu, což je vhodné například při rušení neperiodických signálů s vysokou hodnotou amplitudy (např. motory s proměnnými otáčkami). [2;28]



Obr. 10 - Princip vertikálního hradlování impulsů [24]

4.2.3 Průměrování impulsu

Techniky průměrování impulsu mohou redukovat relativní hladinu rušení, které se objevují náhodně. [1]

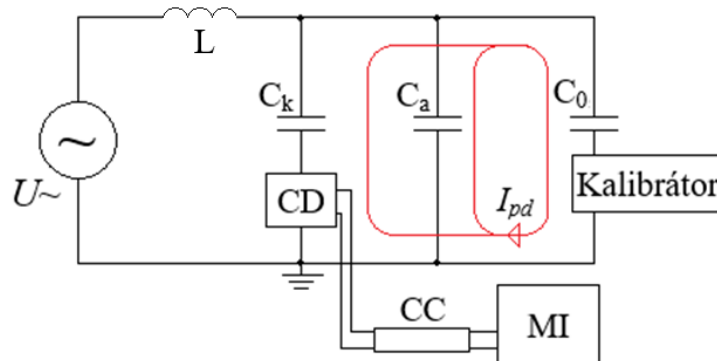
4.2.4 Kmitočtová selekce

Hradlo přístrojového zesilovače může být omezeno pásmovými zadržemi na kmitočet, při kterých se objevuje rušení například z rozhlasového vysílání, jehož kmitočet se nachází uvnitř citového kmitočtového pásma měřicího přístroje. [1]

4.3 Kalibrace

Kalibrace se používá kvůli eliminaci rušení, které vzniká periodicky, stanovením konstanty převodu K_0 , což spěje k dosažení přípustných úrovní naměřených hodnot. Provádí se při každé změně zapojení, změně měřeného obvodu nebo i nastavení měřicí jednotky. Při kalibraci se zapojuje do měřicího obvodu kalibrační kondenzátor C_0 , který by měl být o hodnotě kapacity menší než $0,1 C_a$. Do něj jsou z kalibrátoru, který obsahuje generátor produkující impulsy a zapojuje se sériově ke kalibračnímu kondenzátoru, přiváděny skrz stíněné a příslušně zakončené propojovací kabely impulsy známých vrcholových hodnot U_0 , přičemž napájecí napětí je nulové.

Ze známé velikosti kapacity injektážního kondenzátoru je možné těmto impulsům přiřadit měřicím systém konkrétní hodnotu náboje, čímž jsou simulovány poruchové stavy o známé velikosti. Hodnoty kalibračních impulsů by měly být řádově stejné, jako očekávaná hodnota částečných výbojů u zkoušeného objektu, podle [1] se jedná od 50 % do 200 % předepsané úrovně ČV. Také by měly mít dobu nárůstu menší, než 60 ns. Schéma zapojení obvodu s kalibračním kondenzátorem C_0 je uvedeno na Obrázku 11. [1;2;16]



Obr. 11 - Princip kalibrace

Kalibrátor produkuje impulsy do svorek zkušebnímu objektu o skokovém napětí U_0 zapojeného v sérii s kondenzátorem C_0 , takže opakující se impulsy dávají náboj: [1]

$$q_0 = U_0 \cdot C_0 \quad (4.1)$$

Z přivedeného náboje q_0 a údaje měřicího přístroje A se určí kalibrační převodní součinitel:

$$K_0 = \frac{q_0}{A} \quad (4.2)$$

Výsledkem měření ČV tedy bude nejvyšší výsledek součinu naměřeného náboje a kalibračního převodního součinitele. [16]

Před přivedením napětí do zkušebního obvodu musí být kalibrační kondenzátor s kalibrátorem odstraněn z obvodu, jinak hrozí jeho zničení.

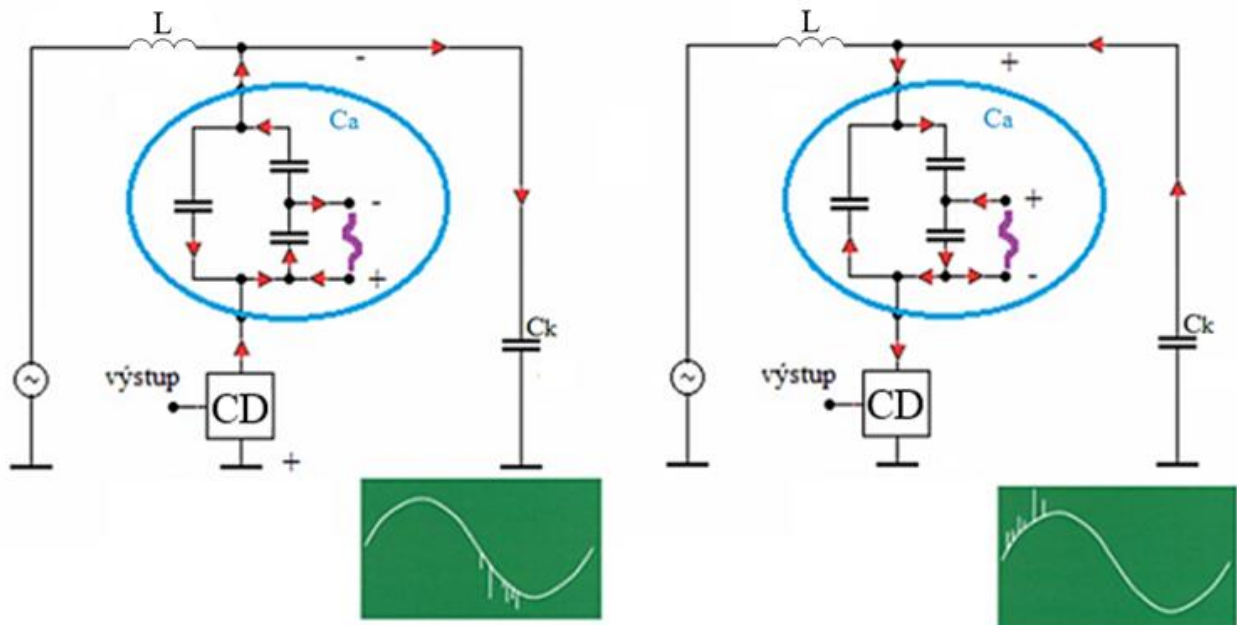
Pokud je ale kalibrační kondenzátor proveden jako vysokonapěťový s nízkou hladinou šumu pozadí, může být ponechán zapojený ve zkušebním obvodu a nemusí mít hodnotu menší, než 0,1 C_a .

4.4 Odlišování externích částečných výbojů od interních

Externí a interní částečné se od sebe liší místem vzniku a při měření jejich průběhu s napětím mají různou fázi výskytu. Podle určitých záznamů jde tedy zjistit, zda se jedná o částečný výboj interní nebo externí. [11]

4.4.1 Interní částečné výboje

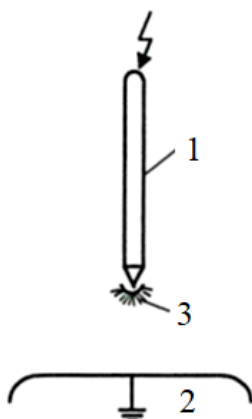
Pokud se jedná o interní částečné výboje, tedy výboje v měřeném objektu, jeho proudové impulsy dominují ve fázi, kdy aplikované střídavé napětí prochází nulou, což znázorňuje Obrázek 3 a celkový děj je popsán v kapitole 2.2. K vytvoření těchto částečných výbojů s kladnou polaritou dochází především mezi počátkem kladné polarity periody a vrcholovým zkušebním napětím. V záporné části periody se děj opakuje a ČV se zápornou polaritou vznikají od průchodu zkušebního napětí nulou při dosažení záporné vrcholové hodnoty. Principiálně tento děj znázorňuje Obrázek 12. [2]



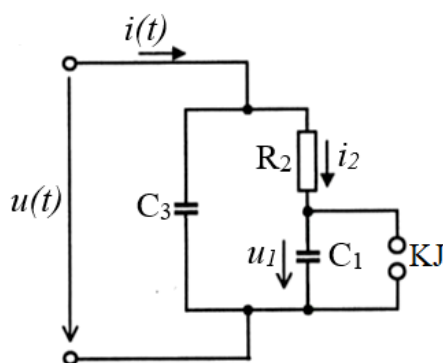
Obr. 12 - Vnitřní částečné výboje [2] - upraveno

4.4.2 Externí částečné výboje

Jedná-li se o externí ČV, jeho výskyt je převážně okolo doby maxima aplikovaného střídavého napětí zařízení. Externí částečné výboje se nejčastěji vyskytují v plynném prostředí na hranách či malých poloměrech elektrod a nemají destruktivní vliv na izolant. Typické uspořádání pro tento typ částečných výbojů je hrot-deska, znázorněno na Obrázku 13. Elektrody jsou označeny čísly 1 a 2, oblast částečných výbojů číslem 3.



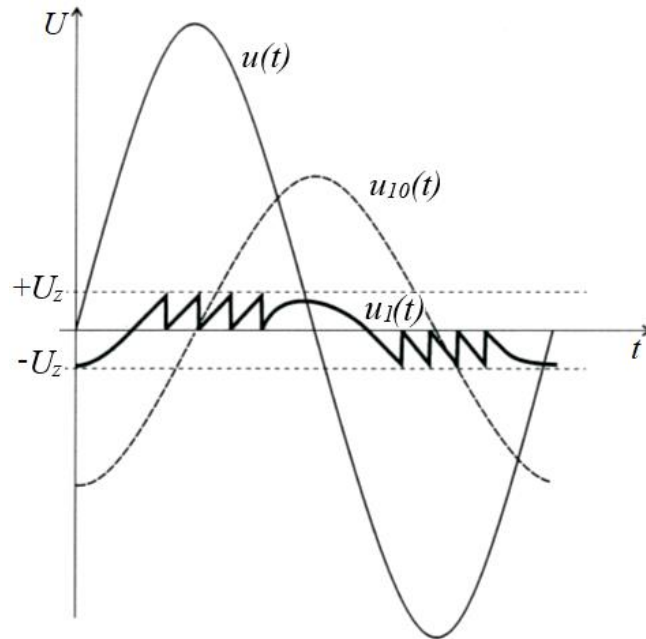
Obr. 13 - Elektrodové uspořádání vnějšího částečného výboje hrot-deska [7]



Obr. 14 - Vnější částečný výboj, náhradní schéma [7]

Na Obrázku 14 je zjednodušené náhradní schéma externího částečného výboje při uspořádání hrot-deska. Kondenzátor C_1 znázorňuje kapacitu vzduchového prostoru, který pokud dojde k částečnému výboji bude zkratován. Rezistenci náboje vytvořeného na hrotu výboje, který dále putuje vlivem elektrického pole k elektrodě 2 s opačnou polaritou reprezentuje odpor R_2 a určuje velikost vybíjecího proudu. Kondenzátor C_3 ve schématu reprezentuje paralelní kapacitu elektrodového uspořádání.

Časový průběh napětí pro vnější částečné výboje je na Obrázku 15, kde $u(t)$ je napájecí napětí, $u_{10}(t)$ je napětí na kondenzátoru C_1 v případě že by nedošlo k částečnému výboji a $u_1(t)$ průběh napětí při vzniku částečných výbojů. [7;11]

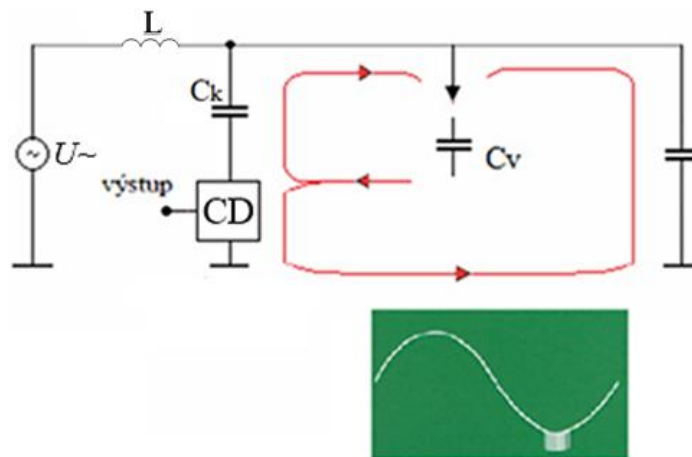


Obr. 15 - Vnější výboj, časový průběh napětí [7]

4.5 Vznik korony v měřicím obvodu

Vznik korony a částečných výbojů je principiálně stejný děj a je obtížné tyto děje odlišit. Korona nejčastěji nastává u přívodních elektrod, na hrotech, nerovnostech a tenkých vodičích ve vzduchu.

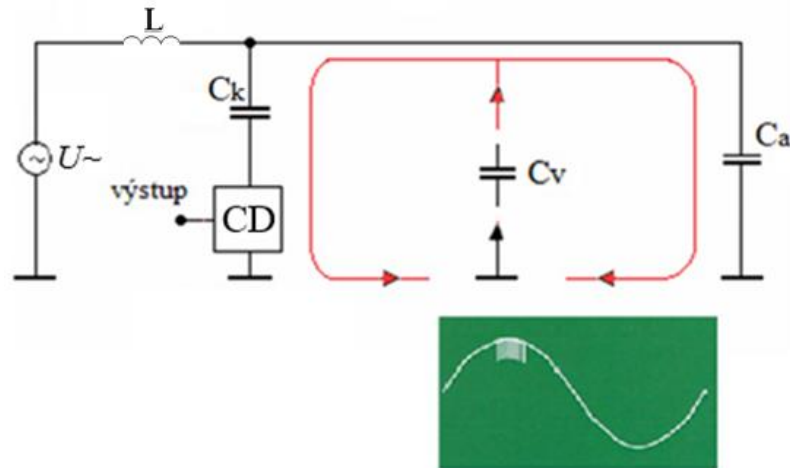
Pokud je část obvodu produkující koronu umístěna na potenciálu zkušebního napětí, dochází ke vzniku proudových impulsů pouze v záporné části polarity okolo vrcholové hodnoty. Právě při záporné polaritě totiž v okolí hrotu na straně vysokého napětí dochází k ionizaci okolního plynu a vzniklé lehké elektrony postupují směrem ke kladné zemi. Tento princip je popsán na Obrázku 16. [2]



Obr. 16 - Princip vzniku korony, hrot na potenciálu zkušebního napětí [2]

Nachází-li se část obvodu produkující koronu na potenciálu zemi, dochází ke vzniku proudových impulsů pouze v části vrcholové hodnoty kladné polarity.

Při záporném potenciálu zemi proti vysokonapět'ovému napájecímu odvodu jsou v okolí hrotu ionizovány molekuly vzduchu a lehké elektrony postupují směrem k potenciálu zkušebního napětí. Princip je zobrazen a popsán na Obrázku 17, kde kapacita C_v znázorňuje kapacitní svod. [2]



Obr. 17 - Princip vzniku korony, hrot na zemním potenciálu [2]

4.6 Měřicí systém DDX 8003

Pro měření částečných výbojů na vysokonapěťových kabelech může být použit například měřicí systém DDX 8003, což je digitální detektor, který umožňuje měřit částečné výboje při střídavém i stejnosměrném napětí a také určit místo poruchy v kabelu. Systém shromažďuje informace z několika zdrojů. V měřicí smyčce jsou dvě vstupní jednotky, které detekují částečné výboje. Součástí přístroje je také anténa. [9]

Jsou v něm zahrnuty tři techniky pro potlačení nežádoucích rušivých impulsů:

1. Porovnání polarity impulsů

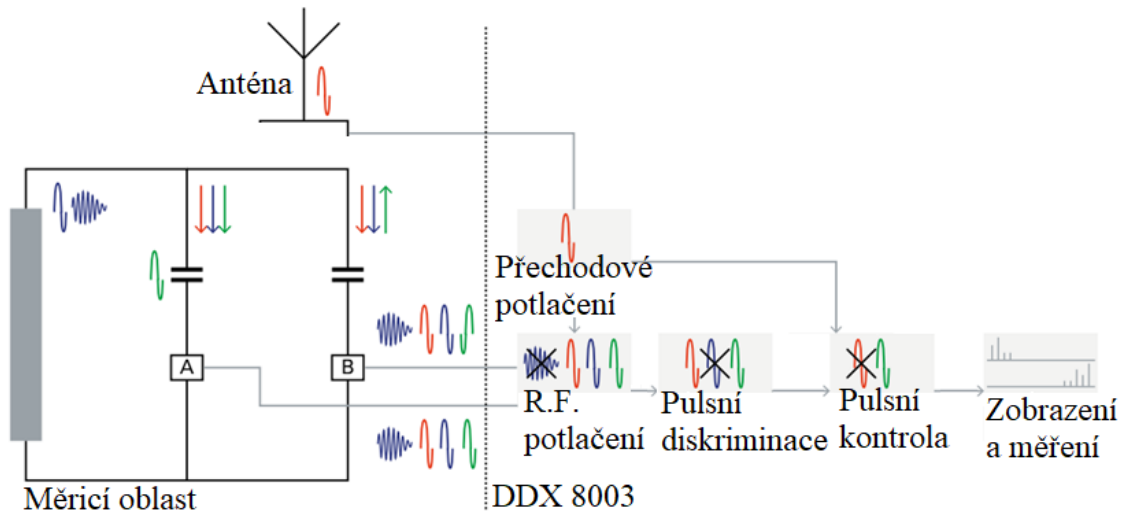
Detektor přijímá dva impulsy na přizpůsobovacích jednotkách z obou větví a porovnává jejich polarity, podle které rozpozná externí výboj od interního. Pokud jsou pulzní polarity v kanálech stejné, pak je impuls definován jako vnější rušení. Pokud impulsy mají opačné polarity, zdroj impulsu je vyhodnocen jako z testovacího obvodu, tj. z C_a nebo C_k . Typ DDX 8003 je také schopen rozlišit ty vnitřní pulsy, které jsou způsobeny částečným výbojem v C_a od impulsů pocházejících z C_k , což umožňuje současně testovat dva objekty.

2. Zařízení pro potlačení rádiových rušení

Pokud některé vysokofrekvenční rádiových vysílání spadají do měřicí šířky pásma detekčního systému, zařízení potlačuje vysokofrekvenční kmitočty. Rádiové signály jsou připojeny k vysokonapěťovému vedení a tečou do země skrz měřicí jednotky. Detekované rádiové signály v jednotkách A i B budou vznikat ve stejné fázi periody a analogový odčítač tyto signály utlumí.

3. Potlačení přechodových rušení pomocí antény

Impulsy rušení, které jsou způsobeny například přepínáním těžkých strojů v blízkosti zkušebního prostoru jsou pomocí antény umístěné poblíž zkušebního obvodu detekovány a vyřazovány z vyhodnocení. Při testování kabelů se může stát, že signály z externí události jsou diskriminovány, ale energie rušivého signálu v kabelu zůstává. Signál se pak odráží od vzdáleného konce kabelu a objeví se v testovacím obvodu o chvíli později. Tomu lze zabránit ignorováním všech signálů z testu až do konce nebezpečí zachycení odraženého signálu. [9;10;28]



Obr. 18 - Zapojení systému DDX 8003 a vnitřní blokové schéma [9]

System má dva režimy měření velikosti zdánlivého výboje podle toho, zda bylo zvoleno normální měření nebo měření vyhovující normě IEC-270.

V normálním provozním režimu systém monitoruje impulsy odečítané ze snímací desky každý interval při každé aktualizaci displeje a zaznamenává největší hodnotu pozitivního i negativního impulsu, které prošly přes hradlování. Aktualizace displeje probíhá přibližně 10krát za sekundu. Normální provozní režim poskytuje oproti měření kompatibilním s IEC-270 přesnější měření velikosti výboje.

Při režimu kompatibilním s normou IEC-270 používá přístroj analogový špičkový měřicí systém, kdy se snižuje odečet při nízkých frekvencích opakovaní impulsů. Zabývá se tedy spíše individuální pulzní aktivitou. [28]

4.6.1 Kalibrace systému

System DDX-8003 je navržen tak, aby četl skutečné hodnoty zdánlivého náboje v pC ve všech oblastech systému. Aktuální kalibrace závisí na konfiguraci testovacího obvodu a systému vstupní jednotky. Proto je nezbytné kalibrovat systém vždy, když je konfigurace zkušební obvodu změněna.

DDX-8003 umožňuje dva kalibrační režimy, automatický a ruční. Automatický režim kalibrace vyžaduje minimální zásah uživatele a ve většině případů poskytuje nejlepší kalibraci systému. Ale tam, kde je vysoké rušení v pozadí, nebo rušení související s fází, je vhodné kalibrovat systém manuálně.

Kalibrací systému se nastavují tři parametry: citlivost měření výbojů, příspěvek rušení systému a příspěvek rušení testovacího obvodu. Injektováním známé úrovně náboje do zkušební obvodu se nastaví citlivost měření, buď přímou injekcí pomocí známého injekčního kondenzátoru nebo nepřímou injekcí za použití externí reference, kdy musí být k dispozici externí zdroj. Generátor kalibračních impulsů je součástí systému.

Aby nedocházelo k digitalizaci rušivých impulsů, systém vypočítává prahovou úroveň rušení. Tato prahová úroveň šumu je vypočtena ze dvou příspěvků rušení, a to z příspěvku rušení systému a příspěvku rušení testovacího obvodu. Systémové rušení je způsobeno zesilovačem, kdy je normálně minimální s výjimkou při jeho nejvyšším rozsahu. Při výpočtu úrovně šumu je tedy příspěvek rušení zesilovače nastaveno tak, aby byl úměrný nastavení jeho rozsahu.

Příspěvek z rušení obvodu bývá obvykle dominantní. Podíl příspěvku je způsobený rušením vnějšími vlivy a když systém příspěvek měří, musí brát v úvahu jak správný přírůstek, tak nastavení atenuátoru. Při každé změně nastavení zesilovače se úroveň prahového rušení upraví. [28]

4.6.2 Odčítací jednotka radiového rušení

Do této jednotky vstupují dva kanály signálu systému DDX 8003 a zpracovávají se k zamezení radiového rušení. Teoreticky jednotka pracuje tak, že se snaží porovnat fáze a amplitudy RF signálu v obou kanálech a pokud jsou stejné, tak je odečíst. Jednotka odečítání RF by měla být použita pouze v případě, kdyby RF rušení bránilo měření PD. [28]

4.6.3 Hradlování nežádoucího rušení

DDX-8003 umožňuje následující způsoby hradlování:

1) Horizontální hradlování

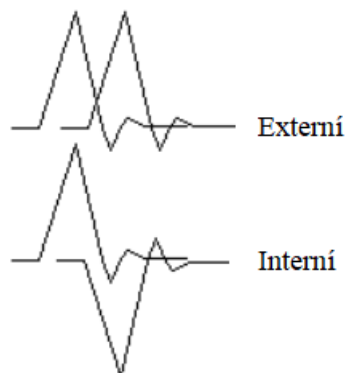
Systém vyřazuje jednu nebo dvě části periody podle zvoleného jednotlivého nebo dvojitého hradlování. Při dvojitém hradlování jsou tyto odebrané sekce posunuté vždy o 180°.

2) Vertikální hradlování

Systém umožňuje vertikální hradlování nízkých i špičkových hodnot. Nízké hodnoty jsou blokovány automaticky automatickým kalibračním systémem. [28]

4.6.4 Pulzní diskriminační systém

Princip principu diskriminace pulsu vyžaduje, aby obě vstupní jednotky reagovaly na částečné výboje zhruba ve stejném okamžiku. Pokud je známá i polarita napájení a signálu v době detekce, dá se odvodit u které vstupní jednotky vznikají částečné výboje. Přístroj provádí funkci tak, že po prvním impulsu dovoluje krátký definovaný interval, během kterého lze detekovat impuls i druhou vstupní jednotkou a dojde k porovnání a vyhodnocení.



Obr. 19 - Princip diskriminace impulsů systémem DDX 8003 [28]

4.6.5 Blokování odrazu

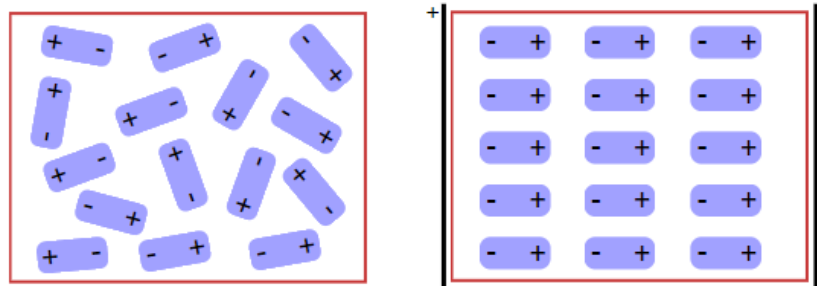
Tato funkce umožňuje povolit nebo zakázat blokování odrazu. Pokud je blokování odrazu povoleno, je také možné zvolit blokování okamžité nebo po pulzu. Blokování odrazu se používají se při testování kabelů. Lze ho opakovaně spouštět a může být použito pro blokování měření všech impulsů. Je-li vybrána možnost blokování po pulzu, spustí se po impulsním vstupu. Změří se tedy puls, ale následující impulsy se blokují.

5 DIELEKTRIKUM V ELEKTRICKÉM POLI

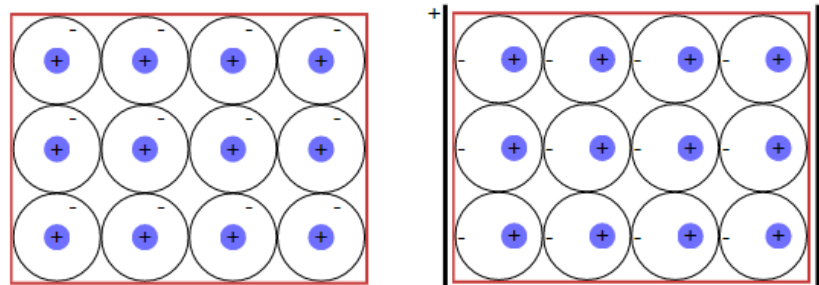
Pokud se elektroizolační materiál vloží do vnějšího elektrického pole, dojde ke strukturálním změnám v celém materiálu, které mají vliv na jeho funkčnost. Dochází k narušení uspořádání elektrických nábojů, tedy k jevu, kterému se říká polarizace. Při polarizaci se v dielektriku vytvářejí dipóly, které mají svůj tzv. dipólový moment. Podle toho, jak polarizace vzniká, dělí se dielektrikum na polární a nepolární. Polárnost látky pak velice ovlivňuje relativní permitivitu materiálu a velikost dielektrických ztrát. [5]

Polární látky jsou takové, které obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole a jejich směr je chaotický. Při polarizaci vnějším elektrickým polem dochází k uspořádání dipólů. Tyto látky mívají vyšší relativní permitivitu, než látky nepolární (ϵ_r nad 2,5).

Látky nepolární mají takovou vlastnost, že při vložení do elektrického pole dojde pouze k narušení symetrického rozložení částic s elektrickým nábojem. [5]



Obr. 20 - Polarizace polárních látek [44]



Obr. 21 - Polarizace nepolárních látek [44]

Polarizace může nastat bez vnějšího elektrického pole a jedná se buď o polarizaci piezoelektrickou, pyroelektrickou nebo spontánní. Pokud je polarizace možná pouze s působením vnějšího elektrického pole, rozlišuje se polarizace s volnými a vázanými náboji. Volné náboje mohou vznikat zelektrizováním dielektrika a vzniká s nimi migrační polarizace. Vázané polarizační náboje v dielektriku se na rozdíl od nábojů ve vodičích nemohou pohybovat a dělí se na silně a slabě vázané. U silně vázaných nosičů vzniká deformační polarizace, do které se zahrnuje elektronová, iontová a pružná dipólová. U slabě vázaných nábojů vzniká dipólová relaxační, iontová relaxační polarizace. [5]

Při deformační polarizaci dochází v molekule či atomu k malému posunu nosiče náboje. Přitom ale dochází z důvodu velkého množství nosičů k výrazné změně relativní permitivity. Deformační polarizace má velkou rychlost ustálení, je bezztrátová a není proměnlivá s vnějšími podmínkami jako je tlak či teplota. [5]

Relaxační polarizace má na rozdíl od deformační delší dobu ustálení (relaxační dobu v rozmezí 10^{-12} až 10^{-8} s) a silnou teplotní závislost díky většímu posuvu nábojů. Bez přítomnosti elektrického pole chaotickým pohybem částic v dielektriku nedochází k polarizaci a slabě vázané částice mohou bez obtíží překonávat potenciálové bariéry mezi jednotlivými polohami. Po přiložení elektrického pole se změní výška potenciálové bariéry, některé polohy se pro nosiče náboje stanou energeticky výhodnější a dojde k nerovnoměrnému rozložení nosičů náboje v materiálu, dielektrikum tím získá dipólový moment. U kapalných a plyných dielektrik se na relaxační polarizaci podílejí slabě vázané částice a u pevných se na nich podílejí ionty a elektrony nacházející se v místech narušení látky nebo v nečistotách. Závislost relaxační doby na teplotě určuje ztrátový charakter těchto polarizací. Ztráty v elektroizolačních materiálech jsou popsány ztrátovým činitelem, na jehož měření je zaměřena i tato práce. [5]

Iontová relaxační polarizace se vyskytuje u látek složených z iontů nebo z atomů či molekul (např. volné ionty příměsí a nečistot) slabě vázaných k sousedním stavebním částicím látky. Elektrické pole vychyluje nečistotu ze stabilní polohy a naruší tak nábojové rozložení materiálu, čímž vzniká dipólový moment. Látky podléhající této polarizaci jsou anorganická skla, keramiky se skelnou fází atd. Tento typ polarizace je závislý na frekvenci a teplotě. [5;45]

Dipólová relaxační polarizace se vyskytuje u polárních látek se slabou vazbou dipólových molekul. Bez přítomnosti vnějšího elektrického pole jsou orientace jednotlivých dipólů zcela náhodné. Při působení vnějšího elektrického pole se jednotlivé dipóly přeskupí s orientací podle směru působení elektrického pole. Polarizace je frekvenčně závislá. [5;45]

Migrační polarizace se účastní volné nosiče, ale i silně či slabě vázané. Vzniká u nehomogenních dielektrik, které se skládají ze dvou nebo více materiálů s rozdílnou vodivostí a také rozdílnou permitivitou. V elektrickém poli se na rozhraní dvou prostředí s různou pohyblivostí volných nábojů náboje hromadí a tím se stávají nepohyblivými, tedy vázanými a ve vnějším obvodu se tento děj jeví jako polarizace. Jako speciální druh migrační polarizace bývá uváděna vysokonapěťová polarizace, u které se stává izolační materiál nehomogenní až při účinku elektrického pole. [5]

5.1 Dielektrické ztráty

Vlivem působení elektrického pole v dielektriku vznikají dielektrické ztráty, které jsou zapříčiněny především pohyby volných i vázaných elektrických nábojů v dielektriku účinkem elektrického pole. Tyto pohyby se projevují jednak elektrickou vodivostí a jednak polarizací dielektrika. Z hlediska funkčnosti se jedná o nežádoucí jev spojený se vnikem tepelné energie, která se nazývá dielektrickými ztrátami. Majoritní podíl na ztrátách mají ztrátové polarizace a částečné výboje v dielektriku kvůli nehomogenitám ve struktuře látky. Jednotlivé polarizační složky, které přispívají ke ztrátám mají různé závislosti na elektrickém poli. Po vložení dielektrika do elektrického pole se nosiče elektrického náboje budou natáčet či posouvat do směru působení elektrického pole. Z počátku vzniká přechodná složka proudu vyvolaná spotřebou energie při polarizaci. V již zpolarizovaném dielektriku v elektrickém poli bude protékat pouze malý svodový proud. [5;45]

V tuhých izolantech se vytváří dielektrické ztráty vodivostní, které se vyskytují ve všech izolantech. Dále pak ztráty, polarizační a ionizační, které se vyskytují jen v těch izolantech,

ve kterých jsou polarizace spojené s dielektrickými ztrátami. Ionizační dielektrické ztráty se vyskytují jen v tuhých izolantech, které obsahují plynové, nejčastěji vzduchové bublinky. [5]

5.2 Dielektrikum ve střídavém poli

Při střídavém elektrickém poli v dielektriku platí pro elektrickou indukci, intenzitu elektrického pole a permitivitu látky následující vztahy: [16]

$$\vec{D}(t) = \vec{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (5.1)$$

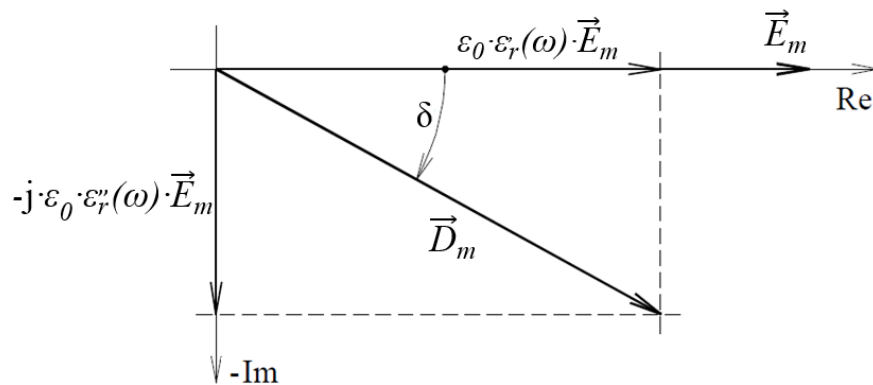
$$\vec{E}(t) = \vec{E}_m \cdot e^{j(\omega t)} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_r(j\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) \quad (5.3)$$

Pro okamžitý vztah mezi elektrickou indukci a intenzitou elektrického pole pak platí:

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r(j\omega) \cdot \vec{E}_m \quad (5.4)$$

Při působení střídavého pole sinusového průběhu dochází vlivem kinetické energie polarizovaných částic k posunu vektoru elektrické indukce za vektorem intenzity elektrického pole, což vytváří urychlení proudu za napětím. [5]



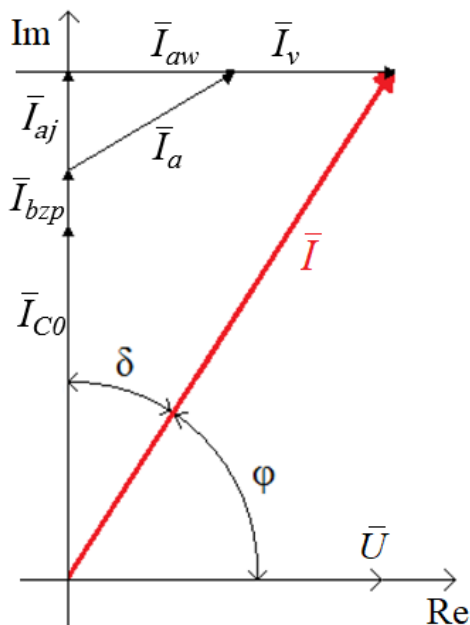
Obr. 22 - Fázový diagram elektrické indukce a intenzity elektrického pole pro dielektrikum ve střídavém poli [5] - upraveno

Z fázového diagramu lze pak vidět, že pro tangentu úhlu δ platí: [5]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (5.5)$$

5.3 Ztrátový činitel

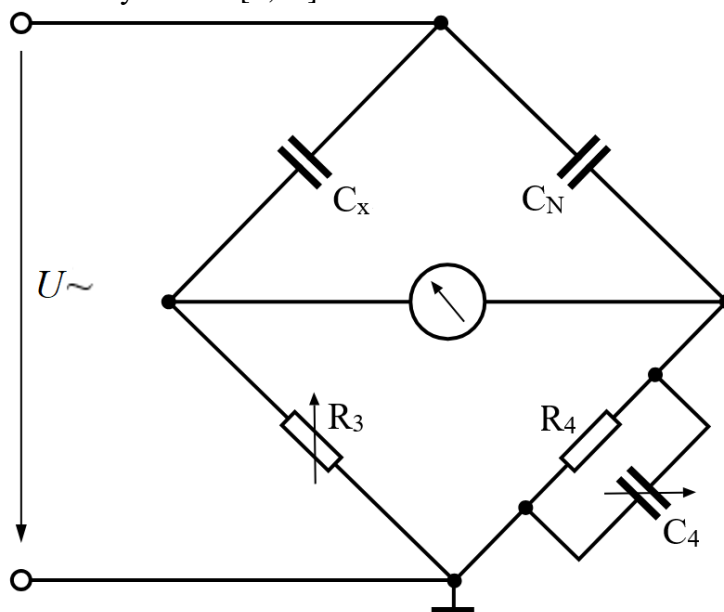
Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je parametr, který nejčastěji popisuje dielektrické ztráty ve střídavém poli a tím popisuje velikostní rozdíl reálného dielektrika od ideálního. Pokud by se jednalo o bezztrátové prostředí, úhel posunutí napětí a proudu by byl roven 90° . V reálném dielektriku je ovšem tento úhel zmenšen právě o ztrátový úhel δ . V praxi slouží ztrátový činitel k posouzení stavu izolace. Fázový diagram na Obrázku 23 poukazuje na jednotlivé složky proudu, které mají na ztrátový činitel vliv, přičemž \bar{I}_{CO} značí nabíjení geometrické kapacity dielektrika, \bar{I}_{bzp} bezztrátové polarizace, \bar{I}_a absorpční proud symbolizující pomalé polarizace s činnou složkou \bar{I}_{aw} a jalovou složkou \bar{I}_{aj} , vodivostní proud \bar{I}_v , který je způsoben vodivostí materiálu. [5]



Obr. 23 - Fázový diagram pro reálné dielektrikum. [5] – upraveno.

5.4 Měření ztrátového činitele

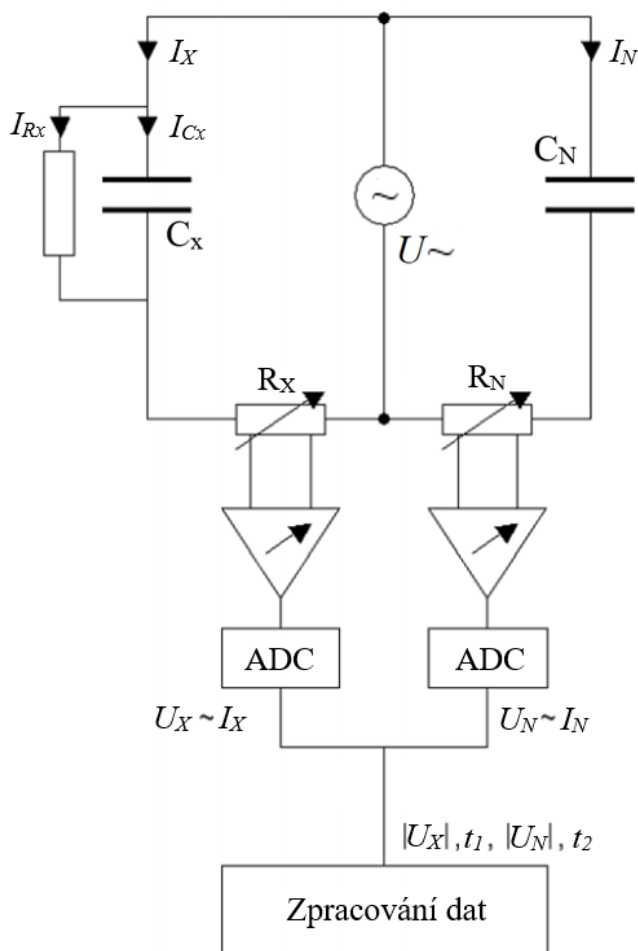
Pro měření ztrátového činitele se většinou používá můstkových zapojení, nejčastěji provedených podle principu tzv. Scheringova můstku patentovaným v roce 1920 německým profesorem fyziky Haraldem Scheringem. Ve vysokonapěťové části můstku se v jedné větvi nachází měřený vzorek C_x a ve druhé kapacitní normál C_N , který by měl mít zanedbatelnou hodnotu ztrátového činitele. Můstek se vyrovnává odporovou dekádou R_3 a kapacitní dekádou C_4 , přičemž vyrovnání značí indikátor. Výsledná hodnota kapacity vzorku a ztrátového činitele se pak dopočítá. Výrobci přístrojů se většinou snaží metodu měření co nejvíce automatizovat kvůli eliminaci chyb, které mohou vzniknout lidským faktorem a rychlosti a jednoduchosti měření. Výsledkem může být například automatizovaný Scheringův můstek, který používá v nízkonapěťové větvi kondenzátory, které se zcela nevyvažují, protože se mezi nimi měří fázový úhel napětí, díky kterému se pak určí ztrátový činitel. [3;46]



Obr. 24 - Znárodnění Scheringova můstku [38] - upraveno

5.4.1 Dvojvektorová měřicí metoda

Dvojvektorovou měřicí metodu využívá například výrobek firmy HAEFELY s označením Tettex 2840. Princip spočívá v měření proudu I_N v čase přes známou normálovou kapacitu C_N a na měření proudu I_X v čase přes neznámou kapacitu C_X zkoušeného vzorku a jeho parazitní odpor. Protékající proudy jsou měřeny na bočnicích R_X a R_N , které se automaticky regulují k vybalancování obvodu a následně se proudy digitalizují v analogově digitálních převodnicích ADC. Pomocí datové sběrnice se všechna digitální data zaznamenají v čase. Způsob měření umožňuje rychle a přesně měřit patřičné veličiny, a také získat informaci o fázovém posunu mezi proudy I_X a I_N . Digitalizovaná a označená data se přivádějí do počítače, kde se vyhodnocují a mohou být zaznamenána online. [33;34]



Obr. 25 - Dvojvektorová měřicí metoda pro měření ztrátového činitele [33] – upraveno

6 ELEKTRICKÁ PEVNOST PEVNÝCH IZOLANTŮ

Elektrická pevnost je základním parametrem izolačních materiálů a udává napětí, které při určité tloušťce izolantu způsobí jeho průraz. Jednotkou elektrické pevnosti je V/m, ale používanější jednotkou bývá kV/mm a lze ji určit ze vztahu (6.1), kde U_p je přiložené napětí, d je tloušťka izolantu.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (6.1)$$

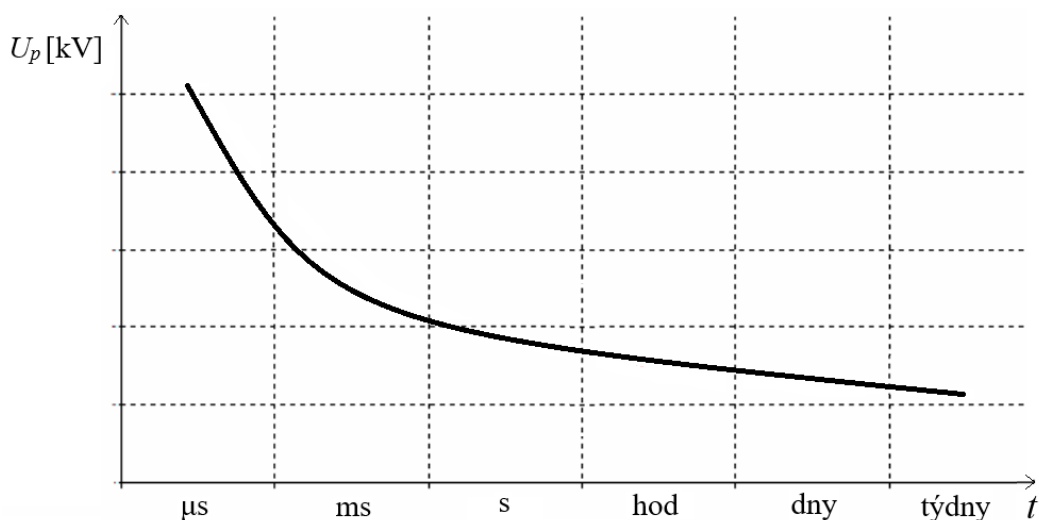
Elektrická pevnost je závislá na časovém průběhu namáhání, tvaru elektrod formujících elektrického pole, ale i na teplotě, vlhkosti a jiných činitelích.

Elektrickou pevnost je možné rozdělit podle časového průběhu namáhání na rázovou, danou impulsním namáháním izolantu, krátkodobou, která se způsobuje postupným zvyšováním napětí a trvalou, způsobenou dlouhodobým působením zkušebního napětí. [2;5]

Průraz u pevných izolantů nastává při překročení určité meze, pokud síly působící na nabitě částice atomů izolace jsou větší, než síly udržující částice v hranicích atomu. Toho se docílí přiložením silného elektrického pole. Izolantu pak prudce klesá elektrická rezistivita a stává se trvale elektricky vodivým. Průrazy se pak rozdělují podle typu vzniku.

Elektrický průraz nastává, pokud v nejslabších místech izolace vzniká při vysoké energii elektrického pole okamžitý průraz. Příkladem může být dielektrikum vystavené atmosférickému impulsu. Pokud průraz nastává v místech nejvyšší teploty izolace po jejím ohřevu, jedná se o tepelný průraz. Při tomto průrazu dochází vlivem teploty ke zvýšené vodivosti izolantu a k velkým dielektrickým ztrátám. Tyto průrazy bývají způsobeny vystavením izolantu dlouhodobým zvýšeným napětím, kdy se pak izolační systém není schopen uchladiť. Další možností je elektrochemický průraz, kdy je izolant vystaven dlouhodobě elektrickému poli, při kterém probíhají v izolaci elektrochemické procesy narušující strukturu materiálu, které snižují jeho elektrickou pevnost. Především při stárnutí izolantu dochází k větší pravděpodobnosti tohoto průrazu. [5]

Závislost velikosti průrazného napětí na době namáhání do průrazu pak udává takzvaná napěťově časová charakteristika, kde při kratších časech nastává čistě elektrický průraz a při delším časovém působení nastávají průrazy způsobené tepelnými a elektrochemickými jevy. Napěťově časová charakteristika je znázorněna na Obrázku 26 s názorným časovým odstupňováním. [2]



Obr. 26 – Názorná napěťově časová charakteristika [2] – upraveno

7 VYSOKONAPĚŤOVÉ KABELY

Tato část práce se věnuje VN kabelům, tedy soustavě dvou nebo více elektrických vodičů které jsou spojeny společným pláštěm a slouží především k podzemnímu přenosu elektrické energie. Jejich značení určuje norma ČSN 34 7409 a dělí se podle hodnot napětí uvedených ve tvaru $U_0/U (U_m)$, kde U_0 udává hodnotu efektivního střídavého napětí mezi vodičem a zemí, U reprezentuje efektivní hodnotu sdruženého napětí mezi dvěma vodiči a U_m vyjadřuje maximální efektivní hodnotu sdruženého napětí, na kterou je kabel dimenzován. Podle jmenovitého napětí je dále stanovena jejich konstrukce, tedy především tloušťka izolace a jmenovitý průřez. [12;29]

7.1 Konstrukce jader

Jádra vodičů mohou být zhotovena buď jako jádra plná, tedy tvořená jedním vodičem, ale vodiče silnoproudých kabelů bývají již od 25 mm² složené z jednotlivých tenkých drátků, především kvůli lepší ohebnosti. Profil jader může být kruhový, sektorový, nebo ve zvláštních případech jiný. Kruhový profil je běžný pro jednožilové izolované vodiče a kabely všech průřezů i vícežilové kabely menších průřezů. Sektorová jádra jsou méně častá, používají se u třížilových nebo čtyřžilových kabelů větších průřezů kvůli lepšímu využití prostoru. Průřez jader se vybírá z normalizované řady v rozsahu 0,35 až 800 mm². [12;13]

7.2 Základní typy silových kabelů

Do 70. let se v ČR pokládaly kabely s ovinutím jádra papírovými pásky impregnovanými kabelovou hmotou s minerálním olejem. Tento typ se již nevyrábí a byly nahrazeny novými druhy, se kterými nevzniká nebezpečí úniku oleje do okolí a které se mohou rozdělit podle druhu výtlačné izolace.

- Celoplastový kabel s izolací z PVC se používá na napěťových hladinách 1 a 6 kV.
- Kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu (XLPE)
- Kabely s izolací z kaučukového vulkanizátu se používají u ohebných vodičů – šňůr, přičemž guma (pryž) bývá nahrazována termoplasty obzvláště tam, kde nevádí menší odolnost proti nízkým a vysokým teplotám.

Tab. 1 – Vlastnosti jednotlivých typů izolace kabelů [57]

Materiál izolace	Impreg. papír	PVC	XLPE
E_p [kV/mm]	80	40 ÷ 50	22
ϵ_r [-]	2,7 ÷ 3,7	3,4	2,3
$\text{tg } \delta$ [-] při 50 Hz	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-4}$
ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$]	10^{18}	10^{15}	10^{18}
ϑ_T [°C]	85	70	90
ϑ_P [°C]	120	90	130
ϑ_Z [°C]	160-220	135	250

Legenda k tabulce 1:

ϑ_T - teplota při trvalém zatížení typu kabelu,

ϑ_P - teplota při přetížení typu kabelu,

ϑ_Z - teplota při zkratu.

7.3 Kabely s izolací ze zesíťného polyetylénu

Zesíťný polyetylén (XLPE) se vykazuje dobrou tvarovou stálostí a při působení tepla se netaví. Při jeho vysoké čistotě jsou zaručené vynikající elektrické, tepelné i mechanické vlastnosti. Výhodami tohoto materiálu je vysoký izolační odpor, vysoká zkratová zatížitelnost, nízká kapacita a malé dielektrické ztráty, nízká úroveň částečných výbojů, malá permitivita, tedy i nízký nabíjecí proud.

Základní provedení kabelů ze zesíťného polyetylénu je s označením CXKCE znázorněno na Obrázku 27.



Obr. 27 - XLPE Kabel, popis vrstev [13]

Běžná konstrukce obsahuje polovodivou vrstvu (2) na lanovém jádře (1), která vyhlazuje el. pole na jeho povrchu a je spojena do celku s izolací ze zesíťného polyetylénu (3). Dále je nanášena vnější polovodivá vrstva (4), na které jsou pásky (5) – spodní polovodivá, vrchní

nevodivá, stínění je provedeno měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky (6), na povrchu je vrchní plášť z PVC nebo polyetylenu (7). [13]

Do mokrého prostředí se používají kabely CVXEKVCE, kde V značí voděvzdornou vrstvu. Jsou zde navíc použity dvě polovodivé vodu blokuující pásky nanášené na vnější polovodivou vrstvu (4) a na stínění (6).

Do stojaté vody se používá vodotěsné kabely AVXEKVOY s olověným pláštěm pod PVC obalem.

7.3.1 Vnitřní a vnější polovodivá vrstva

Polovodivou vrstvu definuje norma ČSN IEC 60050-461 jako izolační stínící mezivrstvu, vyrobenou z výtlačně lisovaného materiálu, kterou lze úplně odstranit. Tato mezivrstva se používá především k ovládnutí elektrického pole v izolaci a z technologického hlediska pomáhá také s vyplňováním mezer na rozhraních s izolací. Vrstva je tvořena zesíťným polymerem s přísadou uhlíkových sazí, které jí poskytují elektrickou vodivost a relativní permitivitu v řádech tisíců. S vyšší relativní permitivitou bude mít vrstva větší vliv na rozložení elektrického pole.

Vnitřní polovodivou vrstvou se vyplní nerovnosti na povrchu jádra a eliminují se vzduchové mezery a ostré hrany, čímž se eliminují částečné výboje. Elektrické pole je touto vrstvou řízeno tak, aby siločáry vystupující z polovodivé vrstvy vstupovaly kolmo do izolace, čímž je zajištěno rovnoměrnější elektrické namáhání izolace. Požadavky při výrobě na tuto vrstvu jsou, aby měla minimální tloušťku 0,3 mm a měla by být snadno oddělitelná od jádra. Její vnější povrch musí být hladký, s výstupky menšími než 0,08 mm a prohlubeninami menšími než 0,2 mm.

Na vnější polovodivou vrstvu se kladou podobné požadavky jako na vnitřní a její vlastnosti jsou obdobné, přičemž zajišťuje kvalitní styk se stíněním kabelu. Mohou nad ní být navíc umístěny i další obalové vrstvy jako polštář omezující mechanické poškození nebo vodu blokuující páska. [14;29]

7.3.2 Izolace

Izolací je dosaženo nevodivé oddělení jádra od stínění. Tloušťka izolace bývá okolo 3,4 mm pro napětí U 10 kV, 5,5 mm pro 22 kV a 9 mm pro 35 kV a musí odolat danému napět'ovému namáhání. Požadavky norem udávají, že v izolaci kabelu nesmí být jakékoliv dutinky větší než 0,075 mm. Nesmí zde být ani jakékoli nečistoty větší než 0,125 mm ve svém největším rozměru. Povolen není ani jakýkoli průsvitný materiál, který je ve svém největším rozměru větší než 1,25 mm. [13;14;29]

7.3.3 Stínění

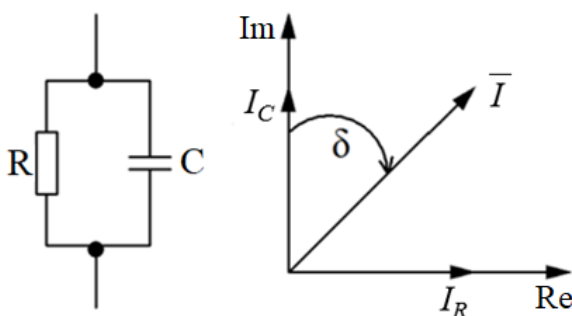
Stínění u silových kabelů eliminuje průchod elektromagnetického pole generovaným střídavým proudem do okolí kabelu a umožňuje vedení kapacitních proudů. Stínění je tvořeno měděnou páskou ovinutou ve spirále po povrchu polovodivé vrstvy ve vodivém spojení s vnější polovodivou vrstvou. Časté uspořádání stínění je vytvořené z měděných drátů a jedné nebo dvou páskových spirál, což poskytuje větší ohebnost, ale ztrácí na mechanické ochraně a voděodolnosti. Při provozu je stínění na koncích uzemněno. [29]

7.3.4 Plášť a ochranný obal

Plášť slouží jako ochrana před mechanickým poškozením, udržuje konstrukci kabelu pohromadě a zabraňuje pronikání vlhkosti, některé typy zabraňují i ohoření. Většinou se používají PE a PVC materiály. Pod pláštěm může být ještě vložen pancíř, tvořený podélnými ocelovými páskami nebo stočenými dráty z oceli či hliníku, kvůli lepší mechanické ochraně. [29]

7.4 Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ u vysokonapět'ových kabelů

Mechanismy stárnutí mají vliv na izolační schopnost kabelu, tedy na snižování izolačního odporu R a na zvýšení ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, který udává rozdíl reálného dielektrika od ideálního. V případě kabelů XLPE tomuto jevu nejčastěji napomáhají tzv. vodní stromečky. Kabel lze nahradit paralelními prvky izolačním odporem R , který vytváří reálnou, ztrátovou složku proudu I_R a kapacitou kabelu C , která je příčinou imaginární složky proudu I_C .



Obr. 28 - Náhradní obvod kabelu, vektorový diagram

Z fázového diagramu lze odvodit následující rovnici:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{2\pi fCR} \quad (7.1)$$

Z rovnice (7.1) jde odvodit, že při snižování frekvence zkušebního napětí se ztrátový činitel zvyšuje. Obvykle se k měření $\text{tg } \delta$ využívá vysokonapět'ový zdroj s frekvencí 50 Hz, ale čím dál více se uplatňují zdroje s nízkou frekvencí kvůli citlivosti měření a větší komerční

přístupnosti zdroje. Díky měření můžeme posoudit stav izolace, omezenou měrou reaguje i na vznik částečných výbojů. Kvalitní XLPE kabely mívají hodnotu ztrátového činitele nižší než $1,2 \cdot 10^{-3}$. [16;21;51]

7.5 Příčiny poruch na kabelech

Vysokonapětové kabely bývají základní prvky energetických sítí a predikce jejich poruch může předejít negativním dopadům na ekonomiku a bezpečnost provozu kabelových vedení. Počátek poruchy vedení je dán zhoršenou izolací. Nejčastější příčiny poruch jsou stárnutím, mechanickým poškozením, poškozením způsobeným při přepravě a pokládce kabelu, nadměrným tepelným namáháním a korozi.

Faktory stárnutí kabelu jsou uvedeny tabulce 1:

Tab. 2 - Faktory stárnutí kabelu [18]

Faktor stárnutí		Mechanismus stárnutí
Tepelný	Vysoká teplota	Chemická reakce Teplotní roztažnost Difúze Tavení izolace
	Nízká teplota	Praskání Tepelné smrštění
Elektrický	Napětí	Částečné výboje Elektrické stromečky Vodní stromečky Dielektrické ztráty
	Proud	Přehřívání
Mechanický	Opakované ohýbání, vibrace, únava, pevnost v tlaku a tahu a smykové napětí	Praskání Roztržení Ohýbání materiálu
Ekologický	Voda, vlhkost, kontaminace, plyny a kapaliny	Vodní stromečky Koroze Dielektrické ztráty
	Radiace	Zrychlené chemické reakce

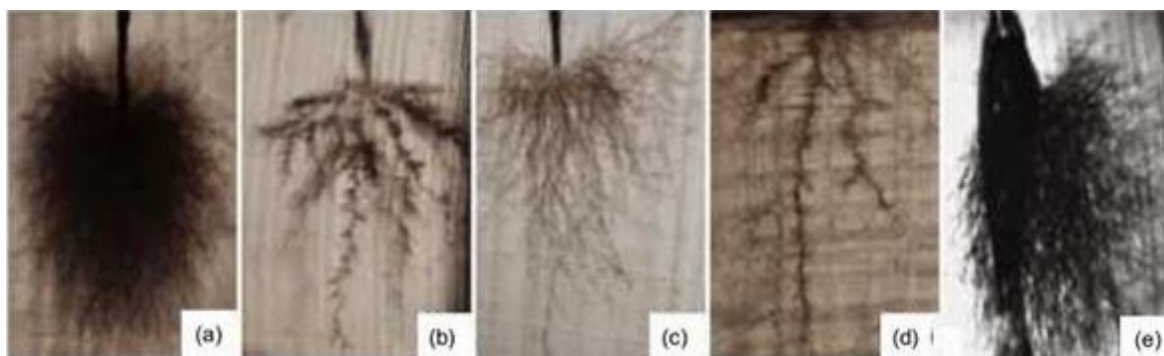
7.5.1 Vodní a elektrické stromečky

Vodní stromečky mohou vzniknout při působení vlhkosti na izolaci kabelu. Pro podzemní kabely s izolací ze zesíťového polyethylenu bývá jejich vznik limitujícím faktorem izolace, a tedy i životnosti. Je pro ně typický četný výskyt a poměrně malá rychlost prorůstání izolací. Sestávají z vodou naplněných mikro dutinek, propojenými velmi jemnými kanálky o délce řádově pm do mm, a proto jsou pozorovatelné až při optickém zvětšení a obarvení vzorku. Vodní stromečky vznikají v blízkosti defektu kabelového pláště při působení elektrického napětí, teploty a mechanického namáhání a vody. Růst vodních stromečků může způsobit až zkratování kabelu.

Elektrické stromečky se na rozdíl od vodních vytvářejí bez přítomnosti vody a jsou větší. Některé vodní stromečky se mohou vyvinout do elektrických. Jejich vznik podporují povrchové vady, vysoké elektrické namáhání a jejich zvětšování způsobují částečné výboje při rychlých změnách elektrického napětí. Stromečkovité kanálky mohou být vyplněné plynem nebo vyplněny degradačními zplodinami vznikajícími rozkladem materiálu elektrické izolace, které bývají často elektricky vodivé. Tyto produkty se objevují po stovkách hodin působení částečných výbojů. Degradace dielektrika způsobená částečnými výboji je následkem hlavně chemické degradace a fyzického ničení vlivem bombardování částicemi především ionty dusíku. Obecný proces stárnutí a vytvoření elektrických stromečků bývá:

1. Vodivost povrchu dutinky se začne zvyšovat kvůli probíhajícím reakčním mechanismům, působením vlhkosti a disociovaných produktů ze vzduchu. Po začátku děje výbojové činnosti se povrchová vodivost rychle zvyšuje.
2. Nastává pozorovatelná povrchová hrubost kvůli bombardování nosiči náboje a ukládáním produktů vzniklých působením částečných výbojů.
3. Aktivita částečných výbojů vede k formování lokálních pevných produktů, jako jsou krystaly hydrátu kyseliny šťavelové.
4. Prostor zvětšený o konečky krystalů vede k dalšímu zesílení lokálních částečných výbojů, které často tvoří prohlubně a kde začíná růst stromečku.
5. Postupný růst stromečku vede až k průrazu.

Jejich detekce může být provedena měřením částečných výbojů. [17;18;19;22]



Obr. 29 - Elektrické stromečky v XLPE kabelové izolaci [23]

- a) Keřový typ
- b) Stromečkový typ
- c) Vlákňitý typ
- d) Vnitřní typ
- e) Stromeček s následným zkratem

7.6 Zkoušky vysokonapět'ových kabelů

Kabely jsou po jejich výrobě vystavovány zkouškám, které zjišťují jejich kvalitu a zda jsou jejich parametry v limitách norem a požadavcích zákazníka. Zkoušky lze rozdělit do tří kategorií, tedy kusové, výběrové a typové. Další revizní měření pro ověření funkčnosti a kvality kabelu se provádí i v terénu.

Kusovými zkouškami musí projít veškeré expediční délky kabelů, kde například již při výrobě pomocí speciálních měřicích přístrojů se kontroluje průměr a centricita izolace. Z elektrických zkoušek sem patří zkoušky vysokým střídavým napětím většinou o hodnotě $4 U_0$, při kterých nesmí

dojít k průrazu a měření částečných výbojů při napětí $2 U_0$, při kterém nesmí hodnota zdánlivého náboje překročit hodnotu 2 pC . Podmínky si ovšem může zákazník upravovat. Někdy se provádí i měření ztrátového činitele a kapacity kabelu.

Výběrové zkoušky se provádějí na 10 % výrobních délek kabelu, minimálně však na jedné výrobní délce kabelu nebo na procentu délek určeném zákazníkem. Při těchto zkouškách se měří především rozměry prvků kabelu, které jsou důležité především pro konstantní rozložení elektrického pole. Další zkoušky v této kategorii jsou například prodloužení za tepla či měření elektrického odporu stínění.

Na kabelových prototypch, nebo při změně materiálu, konstrukce či technologii výroby se provádí typové zkoušky. Kromě neelektrických zkoušek se sem řadí sekvence šesti až osmi elektrických zkoušek s danou posloupností, které se provádí na vzorcích o délce 10 až 15 m. Typové zkoušky bývají rozšířené i o další čtyři životnostní, které se vyznačují především dlouhou dobou trvání či destruktivitou. Typové elektrické zkoušky většinou zahrnují měření částečných výbojů, zkoušku ohybem následovanou měřením částečných výbojů, měření ztrátového činitele jako funkci teploty, zkoušku tepelnými cykly následovanou měřením částečných výbojů, impulsní výdržný test a napět'ovou zkoušku. Dále se pro kontrolu trvalého udržení životnosti zjištěné životnostními zkouškami provádí průběžné výrobní zkoušky kvality. [48]

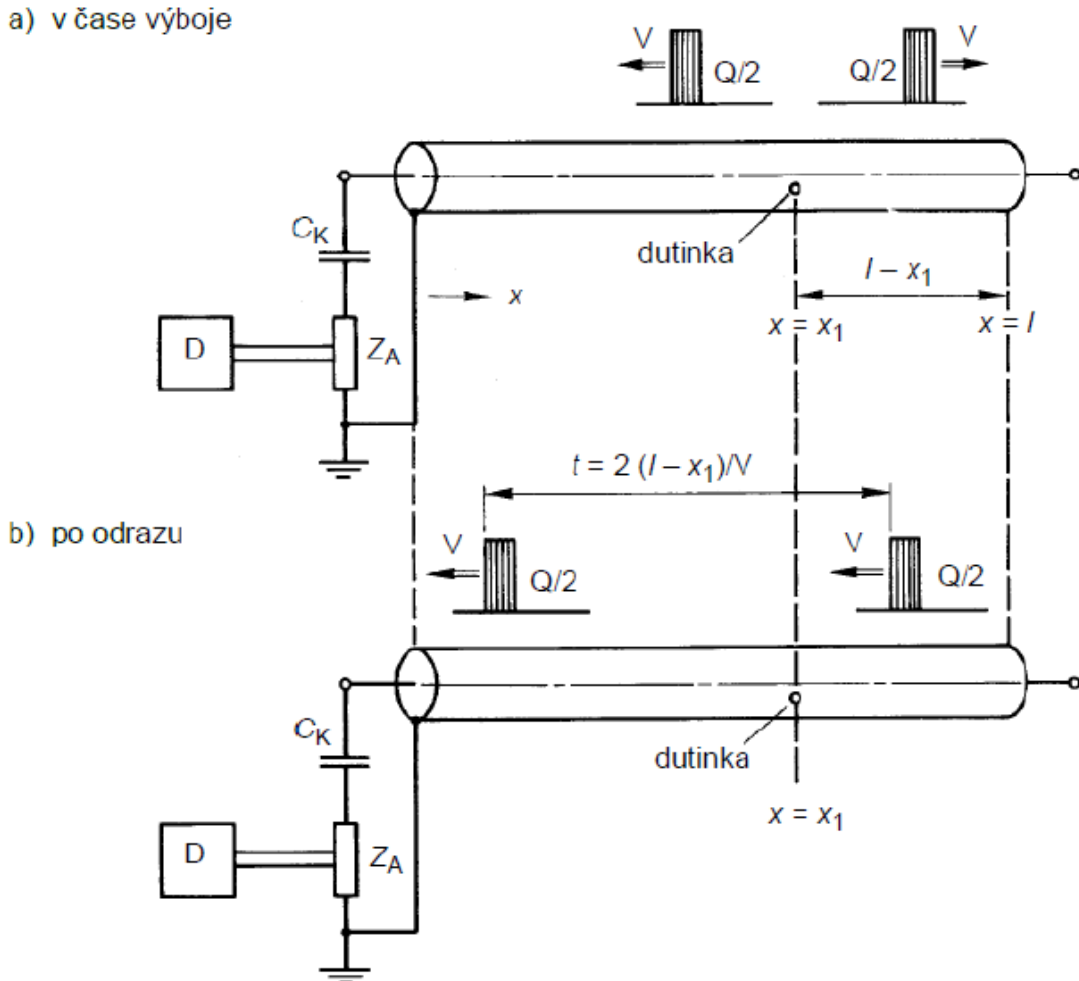
Typické podmínky při elektrickém měření na vysokonapět'ových kabelech jsou teplota $20 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ a měření se provádí na kabelech, které jsou po montáži nejméně 24 hodin, pokud ovšem zkouška nevyžaduje jiné podmínky. [16]

7.6.1 Měření částečných výbojů na vysokonapět'ových kabelech

Cílem měření je nepřímé prověření celistvosti, homogenity izolace, polovodivých vrstev a odolnosti izolace vůči elektrickému namáhání. Zkoušený prvek je izolační systém kabelu, který je namáhán střídavým napětím. Částečné výboje vznikají v dutinkách nebo v nehomogenitách. Při zkoušce se zaznamenává maximální hodnota velikosti zdánlivého náboje, velikost zapalovacího napětí, velikost zhášecího napětí a případně i jiná veličina charakterizující intenzitu částečných výbojů.

Napětí se přikládá mezi jádro kabelu a jeho stínění. Zvýší se a udržuje po dobu ne delší než jedna minuta na hodnotě $2,3 U_0$ a potom se postupně sníží na hodnotu $2 U_0$, při které se provede měření částečného výboje. Maximální zdánlivý náboj při měřicím napětí nesmí přesáhnout úroveň uvedenou v příslušných specifikacích. Citlivost obvodu by neměla přesahovat 3 pC , podle příslušných norem. Měření se doporučuje provádět nejdříve 7 dní po vyrobení izolované žíly. [14;15;31]

Při měření částečných výbojů na kabelech se musí dbát na jejich délku. Krátké kabelové délky se chovají stejně jako kondenzátor a velikost výboje může být měřena přímo. Problém nastává při delších kabelech, které se chovají jako přenosové linky. Impulsy částečných výbojů se pak přenášejí v obou směrech podél kabelu v podobě vlny a pokud je vzdálený konec kabelu volný, pulz se při jeho dosažení odrazí se stejnou polaritou. Tento odražený impuls pak cestuje kabelem zpět a do detektoru dorazí se zpožděním proti impulsu přijatým přímo. Tento děj je zobrazen na Obrázku 30. Pokud je čas mezi příchodem dvou impulsů krátký, může měřicí přístroj detekovat chybně vyšší, nebo nižší velikost náboje, než je tomu ve skutečnosti. Pro zabránění této chyby se používají například koncové impedance, tlumiče odrazů. V praxi se často kabel vykazující částečné výboje jen změří z obou stran a místo vzniku výboje se určí výpočtem, pokud se k měření využívá potřebný software. [15]



Obr. 30 - Detekce částečného výboje při vzdáleném volném konci kabelu [15]

Za krátké kabelové délky lze považovat délky do 50 m, nebo 100 m, pokud jsou oba konce spojené dohromady. Za soustředěnou kapacitu se mohou považovat i větší kabelové délky, což se ale musí stanovit za použití dvojitého impulsního diagramu podle ČSN 60885-3 ed. 2 [15]. Toto délkové omezení pak záleží na konkrétním použitém měřicím systému a může být i delší než 1000 m. Tyto objekty se pak mohou považovat za soustředěnou kapacitu a není nutné brát v úvahu superpozici odražených vln. [15]

Při typových zkouškách se měření provádí na vzorcích hotových kabelů s délkou minimálně 10 m po zkoušce ohýbání a po zkoušce tepelnými cykly zkoušce podle norem ČSN 34 7010-82 [14] a ČSN 60885-3 ed. 2 [15].

Úroveň částečných výbojů se proměřuje i při kusových zkouškách pro celé délky kabelů většinou navinutých na bubnech po vyhovující zkoušce výdržným napětím. Hladina zkušebního napětí, citlivost a meze částečných výbojů se stanoví v souladu s požadavky normy pro daný typ kabelu. Měření probíhá při pokojové teplotě na všech žilách kabelu.

7.6.2 Měření ztrátového činitele na vysokonapětových kabelech

U kabelů se měří závislost $\text{tg } \delta$ na teplotě nebo na napětí.

Případná změna teploty kabelu se vytváří ponořením kabelu do vody nebo vložení do sušárny a následným ohříváním či chlazením nebo průchodem proudem jádrem, stíněním nebo obojím. Měření se provádí při teplotě jádra 95 až 100 °C a teplota se určí buď měřením jeho rezistence nebo vhodným měřicím přístrojem. Ztrátový činitel s teplotou obvykle roste.

Při měření závislosti na napětí se měří při konstantní okolní teplotě a výsledek se násobí tabulkovým teplotním korekčním koeficientem.

Měřicí napětí se přikládá mezi jádro a stínění nebo plášť, mělo by být větší, než 2 kV. Většinou se tg δ měří při $0,5 U_0$, U_0 , $2U_0$.

Naměřená hodnota ztrátového činitele nesmí být větší, než je požadavek zákazníka, nebo než udává příslušná norma.

Měření ztrátového činitele se obvykle nevyžaduje u kabelů s jmenovitým napětím pod 6/10 (12) kV.

Při měření na dlouhých kabelových délkách je potřeba si uvědomit, že naměřený ztrátový činitel je vlastně průměrná hodnota pro jednotlivé úseky kabelu, což může úsek kabelu s abnormálně vysokým ztrátovým činitelem maskovat. [16;47]

7.6.3 Měření v terénu

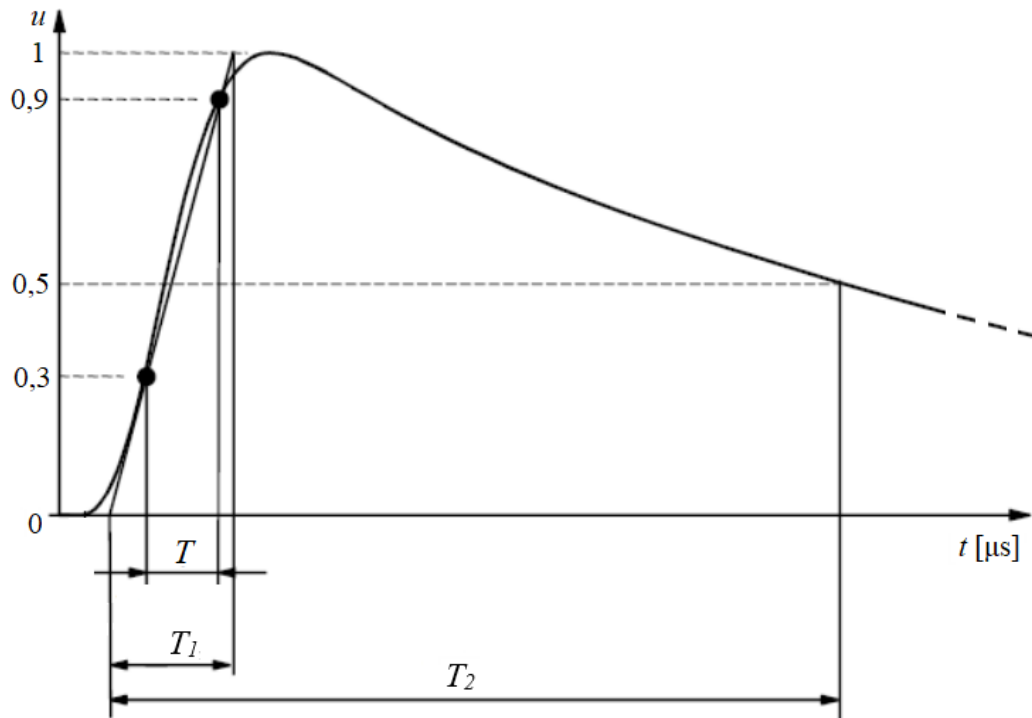
Pokud se jedná o diagnostickou zkoušku v terénu, dbá se především na lokalizaci částečného výboje a úroveň výbojů stačí většinou definovat s řádovou přesností. Před měřením je nutné kabel odstavit z provozu, tedy odpojit z obou stran a oboustranně ho zkratovat kvůli zbytkovému náboji. Na neměřený konec se nasazují polokulovité koncovky k eliminaci rušení vznikajícím na ostrých hranách kabelových ok. Nejčastěji se výboje vyskytují v kabelových souborech, tedy ve spojkách a koncovkách, výboje přímo v kabelu XLPE bývají vzácné. V kabelech izolovaných impregnovaným papírem z důvodů vrstvení kabelu dochází k částečným výbojům do izolace a v některých případech bývá zjištěno rozprostření výbojů po celé délce kabelu. To je způsobeno vznikáním a zanikáním dutin v izolaci, které vznikají kvůli teplotní roztažnosti a viskozitě impregnace papíru a pro zjištění případného defektu výboje, kdy vzniká vyšší úroveň než výboje na pozadí, je nutné zaznamenat mnoho impulsů.

Při lokalizaci defektu se využívá toho, že impulsy částečných výbojů vznikající v kabelové trase se šíří jako vlny a mohou být zaměřeny na koncích kabelové trasy. Kabel se proměřuje po jednotlivých fázích po provedení kalibrace. Používají se většinou zdroje se sinusovým napětím s pokrytím hodnoty $2 U_0$ a s frekvencí 0,1 nebo 0,2 Hz, především kvůli možnosti využití zdroje k měření s menším výkonem. S přístroji s nízkou frekvencí se měří také ztrátový činitel, přičemž naměřená hodnota je pak podle vzorce (7.1) nebo 250 až 500násobkem hodnoty naměřené při 50 Hz, což umožňuje měřit s lepší přesností. [25;51]

7.6.4 Zkoušení pevnosti izolace XLPE kabelů rázovým napětím

Na silových kabelech mohou při jejich provozu vznikat bleskové nebo spínací přepětí, které se mohou značně lišit tvarem vlny, velikostí a frekvencí výskytu. Při testování kabelu rázovým napětím je snaha o zjištění, zda je elektrická pevnost izolace při těchto jevech dostačující.

Napětové impulsy se vytváří pomocí rázového generátoru, které vzhledem k potřebě velikosti napětí bývají provedeny jako vícestupňové. Napětové testovací impulsy pro zkoušky jsou definovány dobou čela T_1 , což je 1,667násobek mezi dobami odpovídajícím mezi 30 až 90 % vrcholové hodnoty (na Obrázku 31 doba T) a dobou půltýlu T_2 , což je doba od počátku impulsu po jeho pokles na polovinu vrcholové hodnoty.



Obr. 31 – Časový průběh impulsu [55] – upraveno

Rázové impulsy se pak značí ve tvaru T_1/T_2 . Typické normalizované impulsy jsou atmosférický impuls 1,2/50 μs , nebo spínací impuls 250/2500 μs , případně 10/350 μs . Dalším parametrem impulsu je jeho vrcholová hodnota. [2;56]

Přesný tvar impulsu je z praktického hlediska velmi obtížné vytvořit, proto jsou dány určité tolerance pro normalizované impulsy: [56]

Tolerance pro atmosférický impuls:

- Doba čela T_1 : $1,2 \pm 0,36 \mu s$,
- doba půltýlu T_2 : $50 \pm 10 \mu s$,
- špičková hodnota napětí: $\pm 3 \%$ požadované hodnoty.

Tolerance pro spínací impuls:

- Doba čela T_1 : $250 \pm 50 \mu s$,
- doba půltýlu T_2 : $2500 \pm 1500 \mu s$,
- špičková hodnota napětí: $\pm 3 \%$ požadované hodnoty.

Mezi tyto zkoušky patří metoda měření TU Graz. Jedná se o rakouskou zkoušku vyvinutou a vědecky podloženou prof. Woschitzem na technické univerzitě v Grazu. Zkouška slouží pro posouzení izolace kabelů ze zesíťovaného polyetylénu. Pomocí této zkoušky lze odhalit cizí tělíska v izolaci, nehomogenity a prostruze v izolaci, a tedy sníženou schopnost kabelu proti přepětí. Tato zkouška se provádí na kabelech s jmenovitým mezifázovým napětím od 10 kV do 30 kV. Zkouší se celkem pět vzorků pomocí rázového napětí. Vzorky by měly být před zkouškou navinuty na bubnu s minimálním průměrem 1,3 m, aby bylo zajištěno to, že úroveň zakřivení kabelu nebude nad maximální přípustnou úroveň.

Hodnota rázového napětí se liší od napětíové hladiny kabelu. Používá se pět atmosférických rázových impulsů 1,2/50 μs záporné polarity. Při zkoušení kabelu s $U = 10$ kV se začíná na hladině 150 kV a stupňovitě se přidává 50 kV. Pokud všech pět vzorků kabelu vydrží všech pět impulsů, tedy až 400 kV, zkoušený kabel je hodnocen jako vyhovující, v opačném případě je nevyhovující.

U kabelu se jmenovitým mezifázovým napětím 20 kV a 30 kV mají podobný průběh, liší se pouze v hodnotě napětí, kdy se začíná u 20 kV kabelu na 350 kV impulsu a končí se u 600 kV impulsu. Impulsy pro 30 kV kabel jsou o hodnotě 350 kV až do 800 kV. [54]

Nejčastěji používá klasický impulsní výdržný test patřící do sekvence typových zkoušek silových kabelů, předcházející napětovou výdržnou zkoušku střídavým napětím. Při této zkoušce se provádí ohřátí vzorku na 95 až 100 °C a poté se zkouší deseti pozitivními a deseti negativními impulsy. Vzorek je vyhovující, pokud nedojde k jeho průrazu. Hodnota impulsního napětí je pro dána jmenovitou napětovou hladinou kabelu. Pro kabel s jmenovitým fázovým napětím 10 kV se volí hodnota impulsu 75 kV, pro kabel 20 kV je hodnota impulsu 125 kV, pro kabel 30 kV je hodnota impulsu 170 kV. [48]

7.6.5 Napětová výdržná zkouška

Při výdržných zkouškách střídavým napětím se testuje odolnost kabelu proti napětím vyšším, než na které jsou dimenzované. Zkoušky se od sebe liší velikostí aplikovaného napětí a dobou testování. Kabely se většinou proměřují dlouhodobými napětovými výdržnými zkouškami, kterými se simulují dlouhodobé přepětí, které se objevují především právě v kabelových sítích. Napětí se do obvodu nepřivádí skokově, ale zvyšuje se postupně tak, aby maximální hodnoty bylo docíleno mezi 10 až 30 sekund po začátku najíždění.

Dříve se silové kabely zkoušely i stejnosměrným napětím, ale jelikož bylo zjištěno, že stejnosměrné napětí namáhající XLPE izolaci kabelů ovlivňuje nepříznivě jejich životnost, bylo stejnosměrné testování nahrazeno testováním střídavým napětím o nízké frekvenci.

Například po typové zkoušce impulsním výdržném testu probíhá napětová výdržná zkouška, kdy se kabel připojí ke střídavému zdroji vysokého napětí o hodnotě $3 U_0$, kterému je vzorek vystavován po dobu čtyř hodin, při kterém nesmí dojít k průrazu izolace.

Podobné zkoušení se provádí i u kusových zkoušek před měřením částečných výbojů, kdy se celé expediční délky kabelu testují střídavým napětím většinou o hodnotě $4 U_0$ po dobu 5 minut a při kterých nesmí dojít k průrazu izolace kabelu.

Dalším způsobem tohoto testování je životnostní typová zkouška, která trvá celý jeden rok pod vodou při teplotě okolo 40 °C, což simuluje podmínky urychleného stárnutí. [48;2]

7.6.6 Měření do průrazu

Měření kabelů do průrazu se většinou provádí střídavým napětím, jedná se o statistické metody. Cílem měření je postupné zvyšování napětí na jádru kabelu vůči jeho stínění, až do překročení elektrické pevnosti izolace. Ta u XLPE izolace bývá okolo 22 kV/mm. U kabelů do 35 kV mezi tyto zkoušky patří typová životnostní zkouška stupňovitě zvyšovaným napětím zbytkové elektrické pevnosti, která se provádí po životnostní zkoušce urychleným stárnutím, přičemž se z měřeného kabelu nařeže 6 vzorků po 10 metrech s přidanou délkou potřebnou pro koncovku. Při této zkoušce se po počátečním napětí 38,1 kV stupňovitě zvyšuje napětí o 12,7 kV každých 5 minut, dokud nedojde k průrazu. Průrazná hodnota se pak zaznamená, pokud dojde k průrazu v intervalu zvyšování napětí mezi dvěma stupni, bude jako průrazné napětí zaznamenána vyšší hodnota. Pro možné vyhodnocení při různých tloušťkách izolace se pak z průrazného napětí počítá takzvaný průrazný gradient, jehož jednotka je kV/mm a který se vypočítá podle vztahu:

$$E_d = \frac{2U_d}{d_i \cdot \ln \frac{d_a}{d_i}} \quad (7.1)$$

d_i je průměr jádra, d_a je průměr stínění (katalogové údaje) a U_d je průrazné napětí.

Vyhovění měřeného kabelu se pak určuje statisticky. Vzorek vyhoví, pokud:

- Všech 6 vzorků má hodnotu E_d větší než 26 kV/mm,
- přičemž alespoň 4 vzorky mají E_d větší, než 32 kV/mm,
- přičemž alespoň 2 vzorky mají E_d větší, než 38 kV/mm.
- Nebo když každá z hodnot E_d bude stejná nebo větší 32 kV/mm. [48]

7.6.7 Měření unikajícího proudu

Další elektrickou typovou zkouškou může být měření unikajícího proudu. Zkouška se provádí na vzorku odebraném nejméně 5 m od konce výrobní délky a o délce 1 m s tolerancí 1 cm. Před zkouškou je potřeba očistit povrch vzorku od nečistot například etanolem a ponořit ho do vody o teplotě 15 až 25 °C. Vzorek se poté osuší, aby se zajistilo, že nejsou vlhká spojení mezi měřicí elektrodou a vodičem. Z jednoho konce vzorku se odstraní izolace v délce asi 0,5 cm a vyčistí se povrch vodiče. Na střed kabelu, tedy 0,45 m od konce vzorku se navine na izolaci měděný drát o průměru 2 mm, který slouží jako měřicí elektroda. Navinutí se musí provést tak, aby nedošlo k narušení a deformaci izolace. Napětí o hodnotě 0,7 U se přikládá mezi vodič a zkušební elektrodu a po jedné minutě se ampérmetrem změří efektivní hodnota proudu. Vzorek není vadný, pokud proud nepřesáhne 1 mA. [53]

7.7 Rozložení elektrického pole u vysokonapětových kabelů

U kabelu v provozu střídavý charakter napětí a proudu způsobí, že izolace kabelového vedení je vystavena proměnlivému elektromagnetickému poli. Pokud zanedbáme vzduchové mezery v proplétání jádra, můžeme uvažovat jednoduchý válcový průřez vodiče a podle Gaussovy věty můžeme vyjádřit velikost intenzity elektrického pole. Celkový náboj můžeme vyjádřit součinem lineárního náboje τ a délkou jádra l :

$$\oint_S E \cdot dS = E(r) \cdot 2\pi r \cdot l = \frac{\tau \cdot l}{\epsilon_0} \quad (7.2)$$

Uvnitř jádra bude díky jeho vysoké permitivitě intenzita E téměř nulová. Na povrchu pak bude intenzita klesat se vzdáleností r podle vztahu:

$$E = \frac{\tau}{\epsilon_0 2\pi \cdot r} \quad (7.3)$$

Kabelům se přiřazuje jejich poměrná kapacita tvořená izolačním dielektrikem mezi jádrem a stíněním, kterou lze popsat jako u válcového kondenzátoru rovnicí 7.4, kde a značí vnitřní poloměr a b vnější poloměr dielektrika. Je přímo úměrná velikosti relativní permitivity izolace ϵ_r , proto je snahou používat materiál s její nízkou hodnotou, kvůli zamezení vysokých nabíjecích proudů. Její jednotka je F/m, v praxi převážně nF/m.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{b}{a}} \quad (7.4)$$

Velikost produkovaného náboje při aplikaci napětí U na jádro kabelu je pak násobkem tohoto napětí s velikostí kapacity. Pokud pak uvažujeme válcový vodič s izolací a překrytou stíněním, tak podle Gaussova zákona je pak možné vyjádřit intenzitu elektrického pole v izolaci ve vzdálenosti r od středu kabelu:

$$E = \frac{C \cdot U}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot r} = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{b}{a}} \quad (7.5)$$

Nejsou-li narušeny rozměry a je-li neporušené stínění a vnější polovodivá vrstva, rozloží se elektrické pole v izolaci kabelu rovnoměrně v radiálním i axiálním směru.

Elektrický potenciál, který se v případě kabelů vztahuje k uzemněnému stínění lze popsat rovnicí:

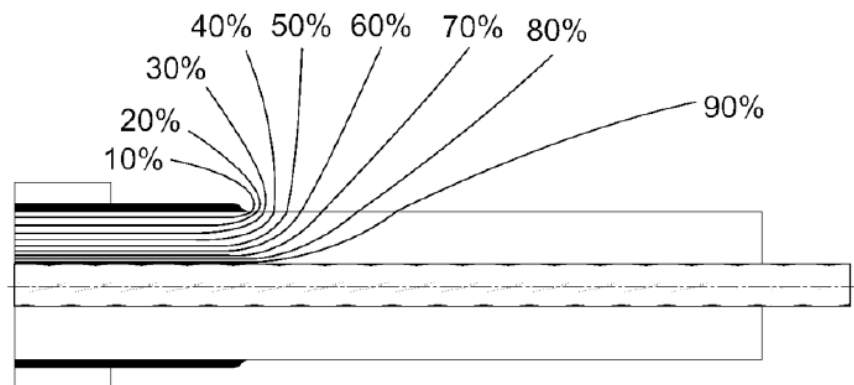
$$\varphi(r) = \int -E(r)dr = - \int \frac{\tau}{\epsilon_0 2\pi \cdot r} dr = \frac{\tau}{\epsilon_0 2\pi} \cdot \ln \frac{1}{r} + K \quad (7.6)$$

V jednotlivých vzdálenostech poloměru r od povrchu vodiče je potenciál ve všech směrech konstantní a myšlenou hladinu pak nazýváme ekvipotenciálou. Tyto ekvipotenciály jsou vždy kolmé k siločárám elektrického pole a při zachování válcové symetrie všech vrstev kabelu dojde k jejich rovnoměrnému rozložení.

Pokud dochází k průchodu siločar intenzity elektrického pole skrz rozhraní dvou materiálů s různou permitivitou pod úhlem jiným než 90° , tak na rozhraní dojde k lomu siločar podle vztahu 7.7, kde například při relativní permitivitě izolace nižší, než řídicí vrstvy bude docházet k lomu siločar intenzity elektrického pole směrem od kolmice a ekvipotenciál směrem ke kolmici:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (7.7)$$

Při měření, nebo z jiných důvodů je nutné konce kabelu určitým způsobem zakončit. Pokud má kabel s jádrem pod napětím na koncích částečně odstraněné stínění, bude při nezabezpečeném ošetření v místě konce stínění docházet k zahuštění ekvipotenciál. To může vést ke zvýšení elektrického namáhání izolace natolik, že bude docházet k částečným výbojům nebo průrazům. [29;30]



Obr. 32 - Rozložení ekvipotenciál na konci vnější polovodivé vrstvy [30]

8 KABELOVÉ KONCOVKY

Použije-li se na jádro při testování vysoké napětí, může docházet mezi jádrem a stíněním, které jsou k sobě relativně blízko, k nežádoucím výbojům. Proto se stínění a polovodiivá vrstva na konci do určité délky odstraňují, což ale podél konce kabelu vytvoří elektrické pole znázorněné na Obrázku 32, které je do určité délky odstranění kabelu při nutnosti zamezení vnějších výbojů potřeba řídit. Při měření na vysokonapěťových kabelech se u kabelových konců využívají kabelové koncovky, kterými se řídí elektrické pole, především kvůli zamezení vzniku korony v místě připojení obou konců kabelů, které může měření narušovat.

8.1 Plastové koncovky

Při nižších jmenovitých napětích se pro řízení elektrického pole používají plastové koncovky, které jsou se svými vlastnostmi dostačující. Jejich použití je vhodné asi do 50 kV a principiálně jen prodlužují výbojovou dráhu mezi elektrodami pomocí žebrování. Velikostně se vybírají podle průměru kabelu, kde musí jít těsně nasunout. Navlékají se na ořezané konce zkoušeného kabelu, které se doporučují nejprve namazat olejem nebo vazelínou. Na konci jader se upevní kulové zakončení z hliníku pro lepší rozložení elektrického pole s průměrem zvoleným podle průměru jádra. Výhodou plastových koncovek je velmi rychlá příprava provedení konce kabelu k měření a jejich prakticky žádná údržba. Při tomto použití ale nastává při nedostatečně dlouhém oholení kabelu již při relativně nízké hodnotě napětí k vysokému rušení vnějšími částečnými výboji. [31]



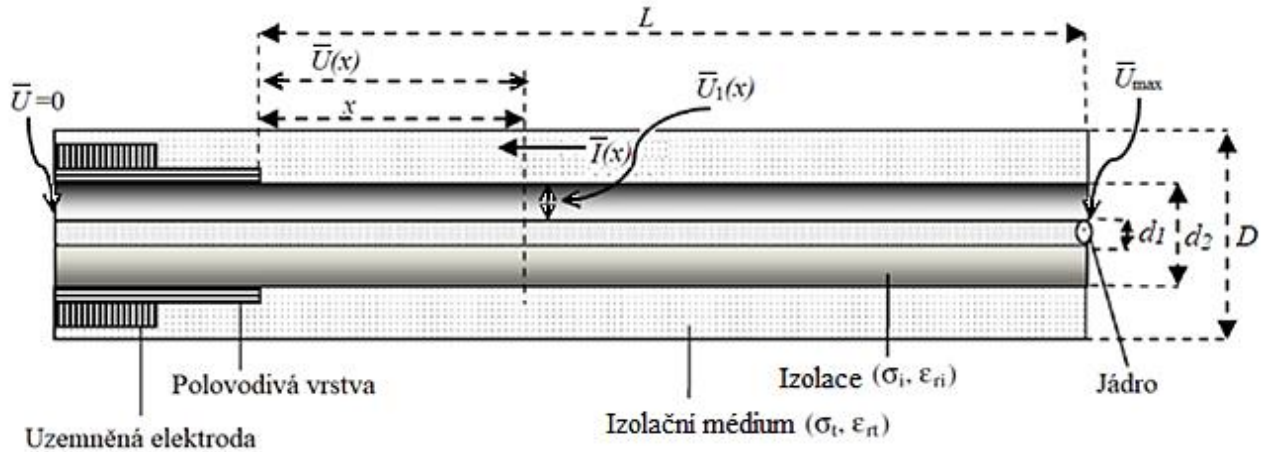
Obr. 33 - Plastové koncovky



Obr. 34 - Aplikace plastové koncovky [2]

8.2 Koncovky s kapalným izolačním médiem

Další možností je využití koncovek s kapalným izolačním médiem, do kterého se vkládá oholený konec měřeného kabelu, a kterým se řídí elektrické pole. Obrázek 35 ukazuje zjednodušenou koncovku s kabelem, který má odstraněné stínění po délku L a je obklopen izolačním médiem s vodivostí σ_i a relativní permitivitou ϵ_{ri} o celkovém průřezu A_i . Izolace kabelu má vodivost σ_i a relativní permitivitou ϵ_{ri} .



Obr. 35 – Znárodnění fyzikálního popisu koncovky s kabelem [58] - upraveno

Podle Obrázku 35 a s ohledem na materiálové parametry lze psát tyto rovnice:

Průřez izolačního média:

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_2^2) \quad (8.1)$$

Změna napětí za úsek od nízkonapěťové elektrody:

$$\frac{d\bar{U}(x)}{dx} = \frac{\bar{I}(x)}{A_t(\sigma_t + j\omega\epsilon_0\epsilon_{ri})} \quad (8.2)$$

Změna proudu tekoucího v izolačním médiu za úsek od nízkonapěťové elektrody:

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} = -\frac{2\pi}{\ln(d_2/d_1)} (\sigma_i + j\omega\epsilon_0\epsilon_{ri}) \cdot \bar{U}_1(x) \quad (8.3)$$

Napětí na izolaci kabelu ve vzdálenosti x :

$$\bar{U}_1(x) = \bar{U}_{max} - \bar{U}(x) \quad (8.4)$$

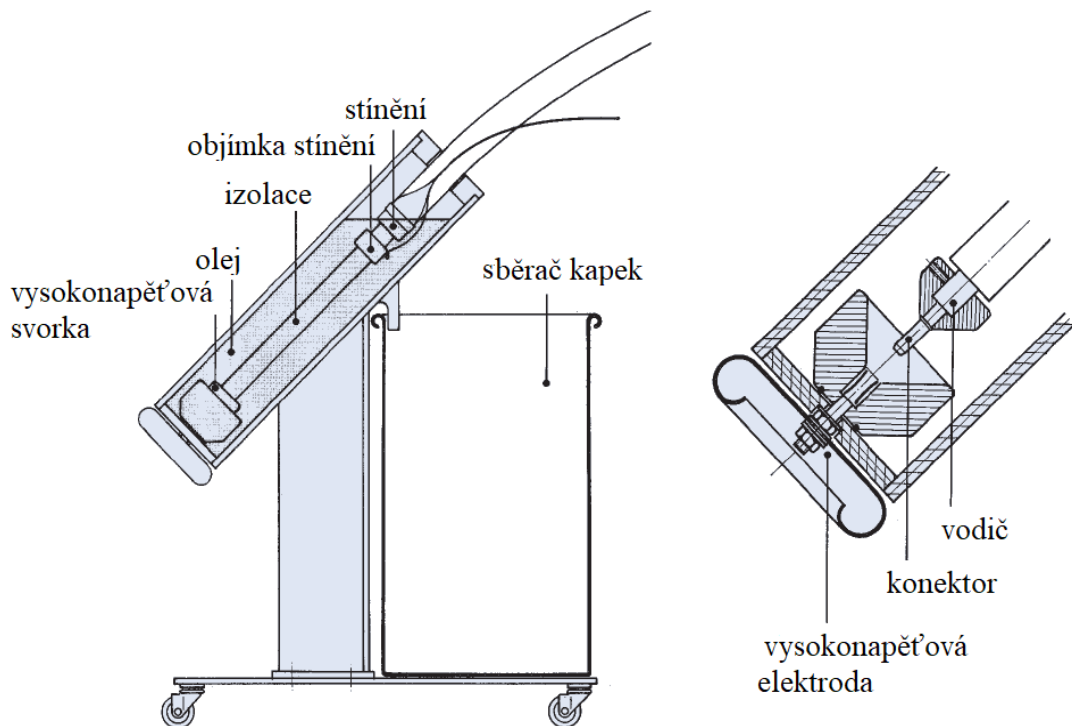
Tyto rovnice jsou použitelné u izolačního média s konstantní vodivostí a permitivitou. U nelineárních materiálu bude řešení komplikovanější. [58]

8.3 Olejové koncovky

Asi do 100 kV se využívá olejových koncovek. Jedná se o plastové válce s minerálním izolačním olejem, do kterého se vkládají konce kabelů. Výhodou oproti vodním koncovkám je rychlá a jednoduchá příprava kabelu a koncovek k měření, oproti plastovým koncovkám se lépe zamezí vzniku korony na kocích kabelu.



Obr. 36 - Olejové koncovky [40]



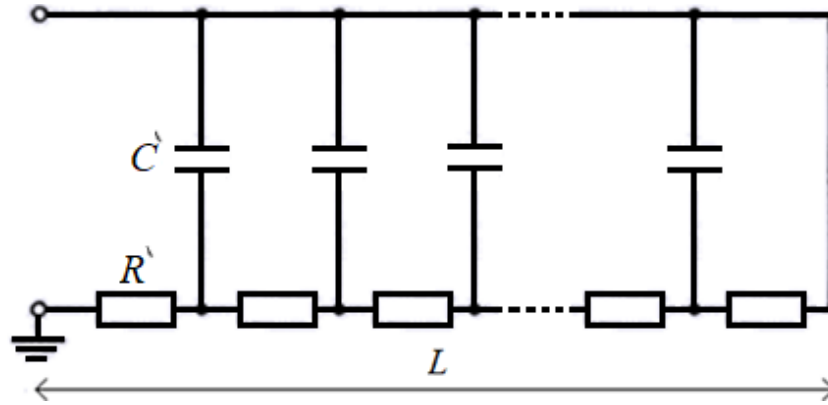
Obr. 37 - Popis olejových koncovek [40] - upraveno

8.4 Vodní koncovky

Při napětích nad 100 kV se využívají vodní kabelové koncovky. Funkcí této koncovky je vytvořit lineární rozdělení napětí podél koncovky tak, aby nedocházelo k povrchovým částečným výbojům. Toho se dosahuje vodou s nízkou vodivostí. Při tomto druhu testování je tedy potřeba zavést do laboratoře vodní hospodářství, které zahrnuje vodní procesní jednotku (WPU). Koncovky obsahují vnitřní a vnější izolační trubky, elektrody na koncích vysokého a nízkého napětí. Kvůli jejich váze a manipulaci bývají konstruované na rámu s koly. Trubky koncovek bývají co možná nejkratší, aby nedocházelo k zbytečně dlouhému odřezávání izolace kabelu a jeho zbytečně obtížné přípravě k měření, ale dostatečně dlouhé k tomu, aby zabránily vzniku korony.

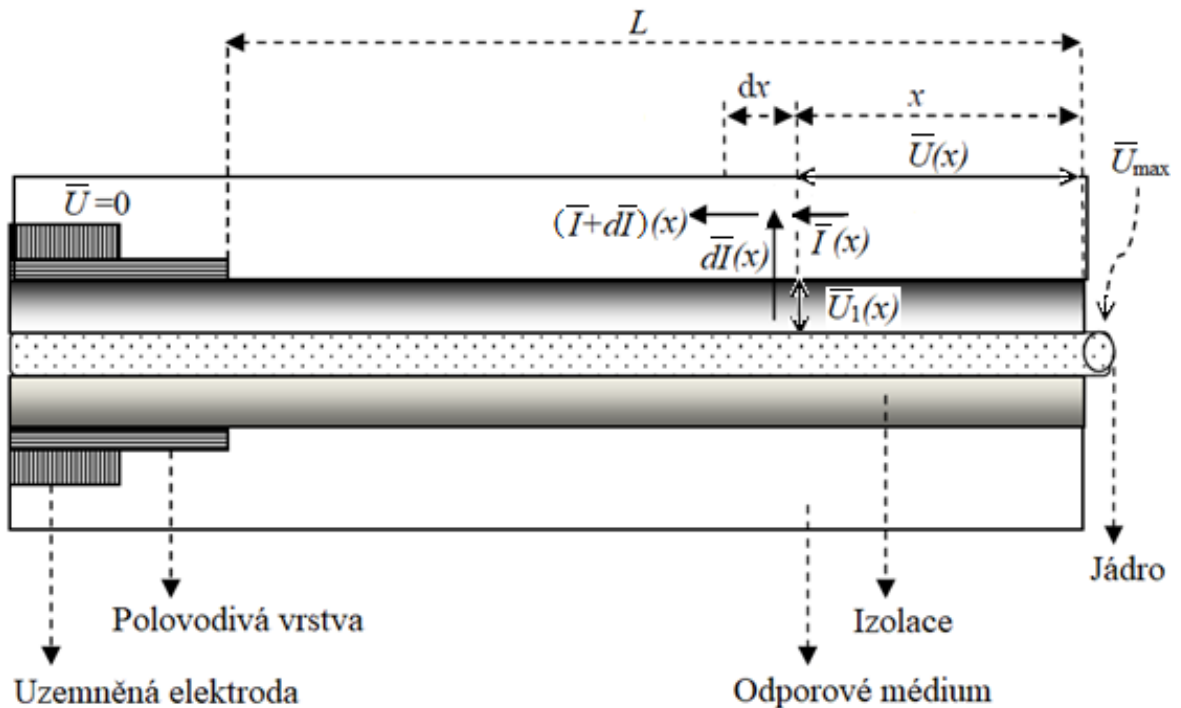
Voda v koncovce se rozprostírá od uzemnění až k vysokonapět'ovému konci a obklopuje kabelové dielektrikum. Poskytuje tak odporové stupňování, jehož linearita je při provozu

se střídavým napětím ohrožena kapacitním proudem způsobeným dielektrikem kabelu. Obrázek 38 znázorňuje zjednodušené náhradní schéma elektrického obvodu v koncovce, kde L značí délku trubky vodní koncovky, R' značí rezistivitu vody na element délky a C' značí kapacitu kabelu na element délky.



Obr. 38 - Náhradní schéma obvodu v koncovce [36] – upraveno

Obrázek 39 ukazuje jednoduchou vodní koncovku, kde deionizovaná voda s odporem R , ve které teče proud I , obklopuje kabel s kapacitou C .



Obr. 39 – Znárodnění fyzikálního popisu zjednodušené vodní koncovky [50] - překresleno

Pokud odpor izolace kabelu je velmi vysoký, můžeme psát následující rovnice pro změnu napětí a proudu se vzdáleností od vysokonapěťové elektrody:

$$\frac{d\bar{U}(x)}{dx} = -R \cdot \bar{I}(x) \quad (8.5)$$

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} = j\omega C \cdot [\bar{U}_{max} - \bar{U}(x)] \quad (8.6)$$

Po úpravě a řešení diferenciálních rovnic podle [50] pro proud a napětí v místě x platí:

$$\bar{I}(x) = \frac{\bar{\gamma} \cdot \bar{U}_{max} \cdot \cosh \bar{\gamma} x}{R \cdot \sinh \bar{\gamma} L} \quad (8.7)$$

$$\bar{U}(x) = \bar{U}_{max} - \frac{\bar{U}_{max} \cdot \sinh \bar{\gamma} x}{\sinh \bar{\gamma} L} \quad (8.8)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{j\omega CR} \quad (8.9)$$

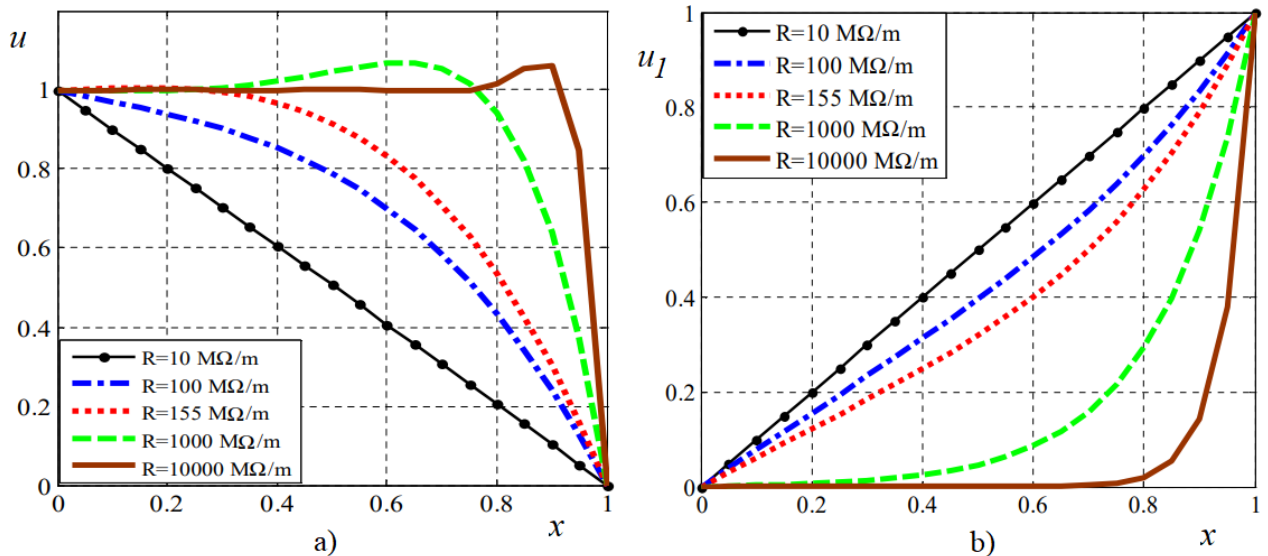
Intenzita elektrického pole podél izolace kabelu:

$$\bar{E}(x) = -\frac{d\bar{U}(x)}{dx} = \frac{\bar{\gamma} \cdot \bar{U}_{max} \cdot \cosh \bar{\gamma} x}{\sinh \bar{\gamma} L} = R \cdot \bar{I}(x) \quad (8.10)$$

Napětí na izolaci kabelu:

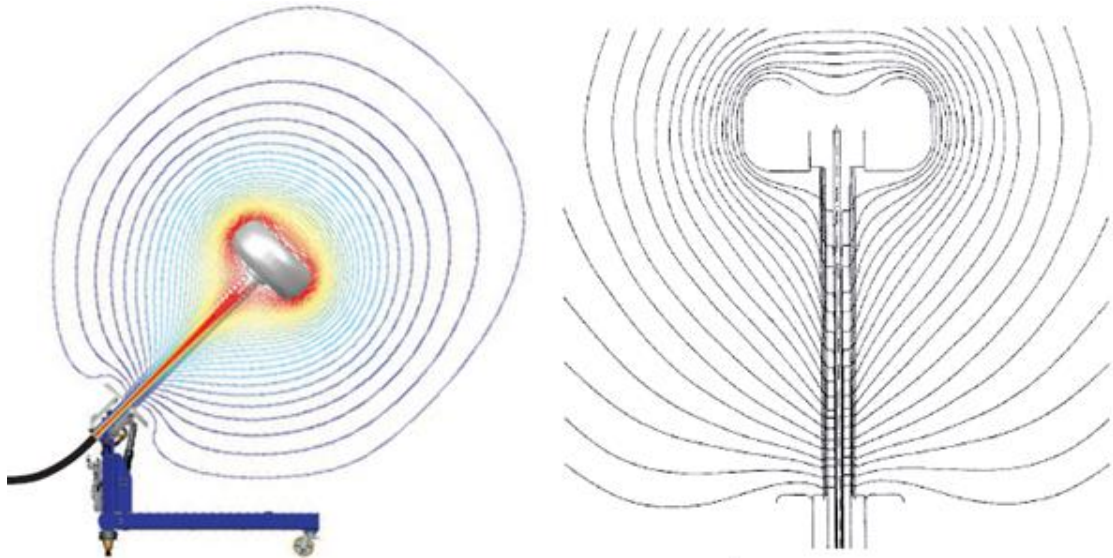
$$\bar{U}_I(x) = \bar{U}_{max} - \bar{U}(x) = \frac{\bar{U}_{max} \cdot \sinh \bar{\gamma} x}{\sinh \bar{\gamma} L} \quad (8.11)$$

Na Obrázku 40 je pak graf, který znázorňuje změnu napětí se vzdáleností od vysokonapěťového konce a) ve vodním sloupci, b) v izolaci kabelu v závislosti na odporu vody, kde u značí poměrné napětí ku napětí na vysokonapěťovém konci a x vzdálenost od vysokonapěťového konce. Možné zvýšení poměrného napětí nad hodnotu 1 vytváří účinek kapacity kabelu. [50]

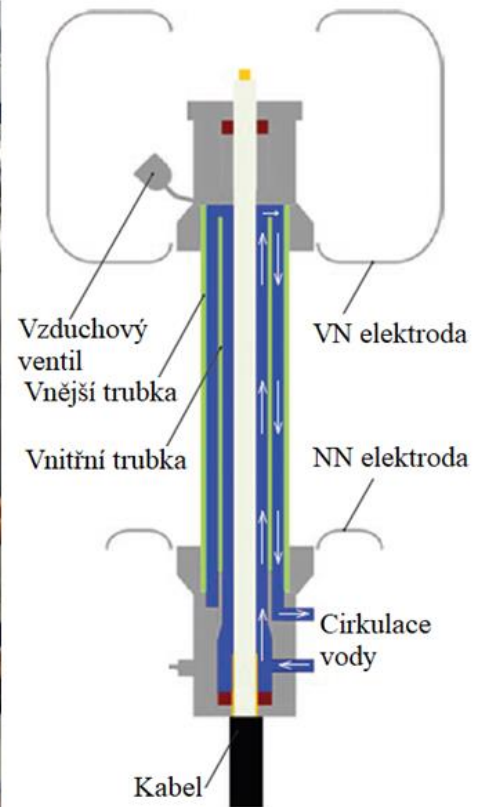


Obr. 40 - Distribuce napětí uvnitř koncovky podle [50] – upraveno

Při provozu koncovky je podstatné, aby distribuce elektrického pole podél koncovky byla co nejvíce lineární. Ta je závislá mimo jiné i na geometrii systému a na typu testovaného kabelu. Obrázek 41 zobrazuje typické rozložení elektrického pole okolo vodní kabelové koncovky. [36]



Obr. 41- Rozložení elektrického pole při použití vodních koncovek [26;36]



Obr. 42 – Příklad dvouvrstvé vodní koncovky [26] - upraveno

8.4.1 Optimalizace vodivosti vody v koncovce

Elektrický proud, tekoucí skrz vodu, způsobuje ztrátu energie a tím ohřívá vodu v koncovce. Voda s iontovými nečistotami má teplotní koeficient vodivosti, který procentuálně zvyšuje její vodivost asi o 1,5 až 5 % při zvýšení teploty vody o 1 °C, v průměru se jedná asi o 2 % na 1 °C. Pokud se ale jedná o vodu deionizovanou, dochází při určitých teplotách ke změnám i o 10 % konduktivity na 1 °C. Konduktivitu vody totiž ovlivňuje nejen počet, ale i pohyblivost iontů, která je na teplotě výrazně závislá. Koeficient vody obvykle není znám, protože závisí

na povaze nečistot ve vodě, ale je možné ho určit, pokud je vodivost a teplota vody měřena na vstupu a výstupu konce.

Podle [35] se používá kvadratický výraz pro vodivost jako funkci teploty. Na základě této funkce a funkce pro model výměníku tepla ochlazujícího vodu, se řeší omezení pro maximální vodivost, nad kterou již bude systém tepelně nestabilní.

Spodní hranice vodivosti vody je určena potřebou omezit elektrické pole podél trubky, což je nemožné při příliš vysoké rezistivitě vody, kdy pokles napětí je koncentrován pouze jen několik centimetrů od nízkonapěťové elektrody.

Nastavovaná poměrná vodivost bývá od 0,05 do 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ v závislosti na velikosti zkušebního napětí a průřezu kabelu.

Jiná situace nastává při impulsních zkouškách, při kterých odpadá problém tepelné stability a kvůli vysokému impulsnímu napětí je nutné, aby voda měla mnohem vyšší vodivost o hodnotě větší, než 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, jinak může dojít k výbojovému přeskoku mezi elektrodami. [39;49;50]

U větších kabelových koncovek se provedení provádí jako dvouvrstvé, analýza těchto typů koncovek je však velmi komplexní a řešení jednoduchých a přesných analytických výpočtů k předpovědi optimálních provozních parametrů je velice obtížné. [35]

8.4.2 Optimalizace průtoku vody

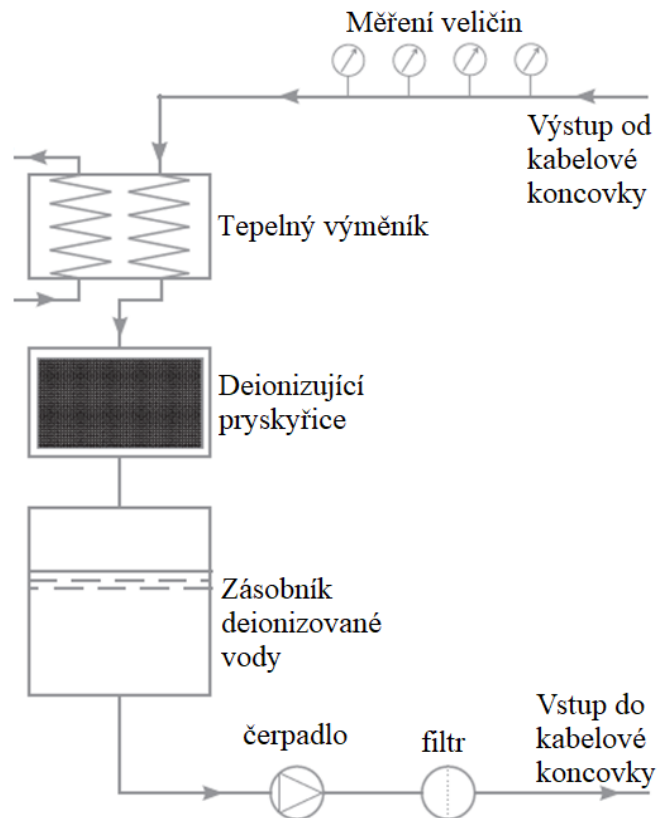
Obvykle se voda zavádí zesponu koncovky s prouděním vzhůru a vrací se pod vnější trubkou. Pokud se tedy do spodní části sloupce zavede ochlazená voda, vodivost vody je nejnižší v nejnižším bodu koncovky a zvyšuje se tím, jak se voda ohřívá při prouděním vzhůru. Nicméně kapacitní proud na jednotku délky vodního sloupce mezi vodičem kabelu a vodním sloupcem je v horní části trubky téměř nulový, protože potenciál kabelového vodiče a potenciál vody jsou téměř stejné. Zvyšuje se na maximum na dně, což znamená, že proud ve vodním sloupci je největší, kde je nejmenší vodivost a teplota vody. Při zvyšujícím se průtoku vody, bude klesat nárůst teploty podél koncovky, což zaručuje lepší odstupňování potenciálu a lepší distribuci elektrického pole. Průtok bývá ovšem omezen z praktických důvodů a kvůli optimalizaci vodivosti vody, která se s průtokem snižuje. Většinou bývá průtok okolo 15 až 30 l/min. [37]

8.4.3 Vodní procesní jednotka

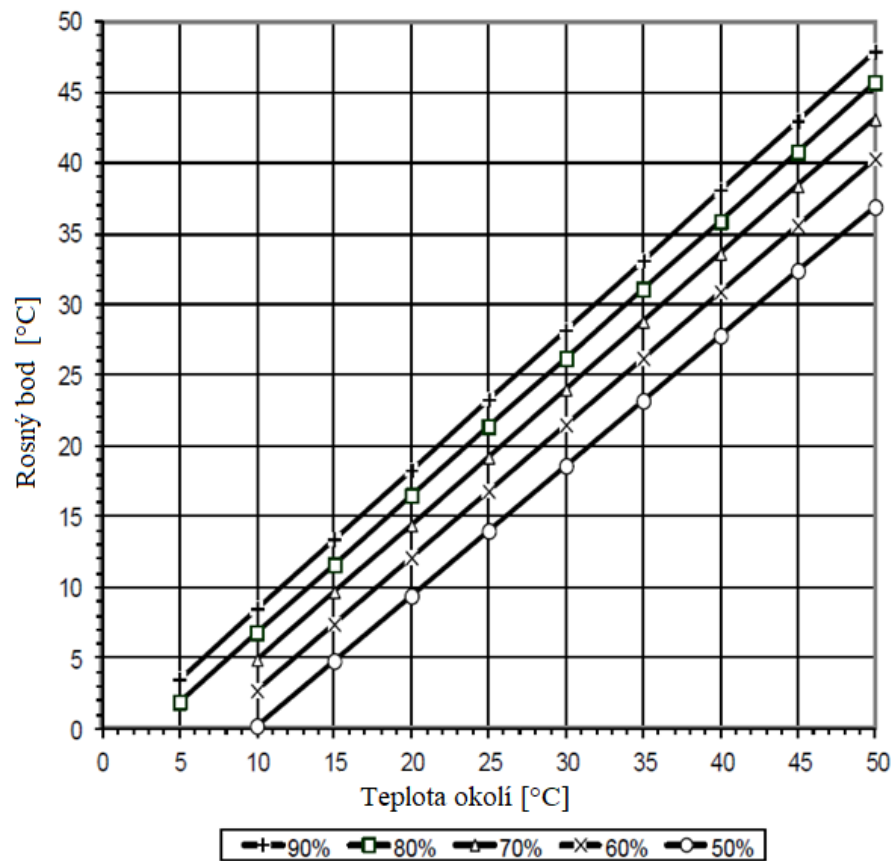
Vodní procesní jednotka plynule reguluje vodivost cirkulující vody, aby zůstala na nastavené hodnotě, přičemž obsahuje také chladicí okruh k regulaci teploty vody. Regulace vodivosti, jak vyplývá z textu výše, slouží také k zajištění tepelné stability systému při dlouhodobém testování, čemuž dopomáhá i dostatečně veliký zásobník deionizované vody. [26]

Úprava vodivosti probíhá většinou deionizací, tedy pomocí iontové výměny, při které iontoměniče zachycují ionty solí a vyměňují je za vodíkové a hydroxidové ionty. V nádrži se syntetickou deionizační pryskyřicí, tedy se směsí katexů, které z vody odstraňují kationty především sodné, vápenaté, hořečnaté, železnaté a jiné. Dále pryskyřice obsahuje směsi anexů, které odstraňují anionty, převážně chloridy a sírany. [41;49]

Udržování teploty má za úkol chladicí okruh vedoucí do výměníku tepla a slouží především k zamezení přehřátí vody, ale musí se dbát také na to, aby teplota vody neklesla pod rosný bod, který určuje prahovou hodnotu, při které může vlhkost kondenzovat na povrchu koncovek, což může vést k výboji mezi elektrodami. Rosný bod v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti okolí ukazuje graf na Obrázku 44.



Obr. 43 - Schéma procesní vodní jednotky [26]



Obr. 44 - Závislost rosného bodu na teplotě a relativní vlhkosti okolí [42] - upraveno

9 PRAKTICKÉ PROMĚŘOVÁNÍ SILOVÉHO KABELU

Praktické měření probíhalo s koncovkami CTT 350-115, které jsou dimenzované pro jmenovité střídavé napětí do 350 kV, jmenovité impulsní napětí do 750 kV a kabely s maximálním průměrem 115 mm. Jedná se o dvouvrstvé řešení vodních koncovek s vodou zaváděnou zespod. Dalším prvkem byla vodní procesní jednotkou od Heafely Hipotronics. Místem měření byla vysokonapěťová laboratoř ve Vědecko-technickém parku Profesora Lista v Brně, což je stíněná místnost s uzemněním izolovaným od ostatních uzemněných obvodů, v místnosti provedeným především zemními páskami, vhodnými především kvůli manipulaci s těžkými předměty v laboratoři. Laboratoř je vybavena zemnicí tyčí, kvůli ujištění při manipulaci s objekty v laboratoři, zda je testovaný obvod bez napětí před jeho úpravami. Personál je při měření v odděleně místnosti velínu z důvodu bezpečnosti, včetně měřících přístrojů, ke kterým jsou data přenášeny koaxiálními kabely oddělenými od samotné laboratoře filtry, kvůli snížení rušení.

Měřeným objektem byl silový kabel s izolací ze zesíťového polyetyleny a průřezem 150 mm² hliníkového pleteného jádra (N)A2XS(F)2Y 20,8/36, dlouhý 20 m, který byl dodaný firmou NKT z Velkého Meziříčí. Celkový průměr kabelu přes veškeré jeho vrstvy byl okolo 36 mm. Hodnota kapacity kabelu udávaná výrobcem je 0,17 nF/m, což je pro jeho délku 20 m přesně 3,4 nF. Podrobné informace o kabelu jsou v [52].

Žádné z měření neprobíhalo přímo podle určitých předpisů či norem, jednalo se spíše o experimentální způsoby testování kabelu.

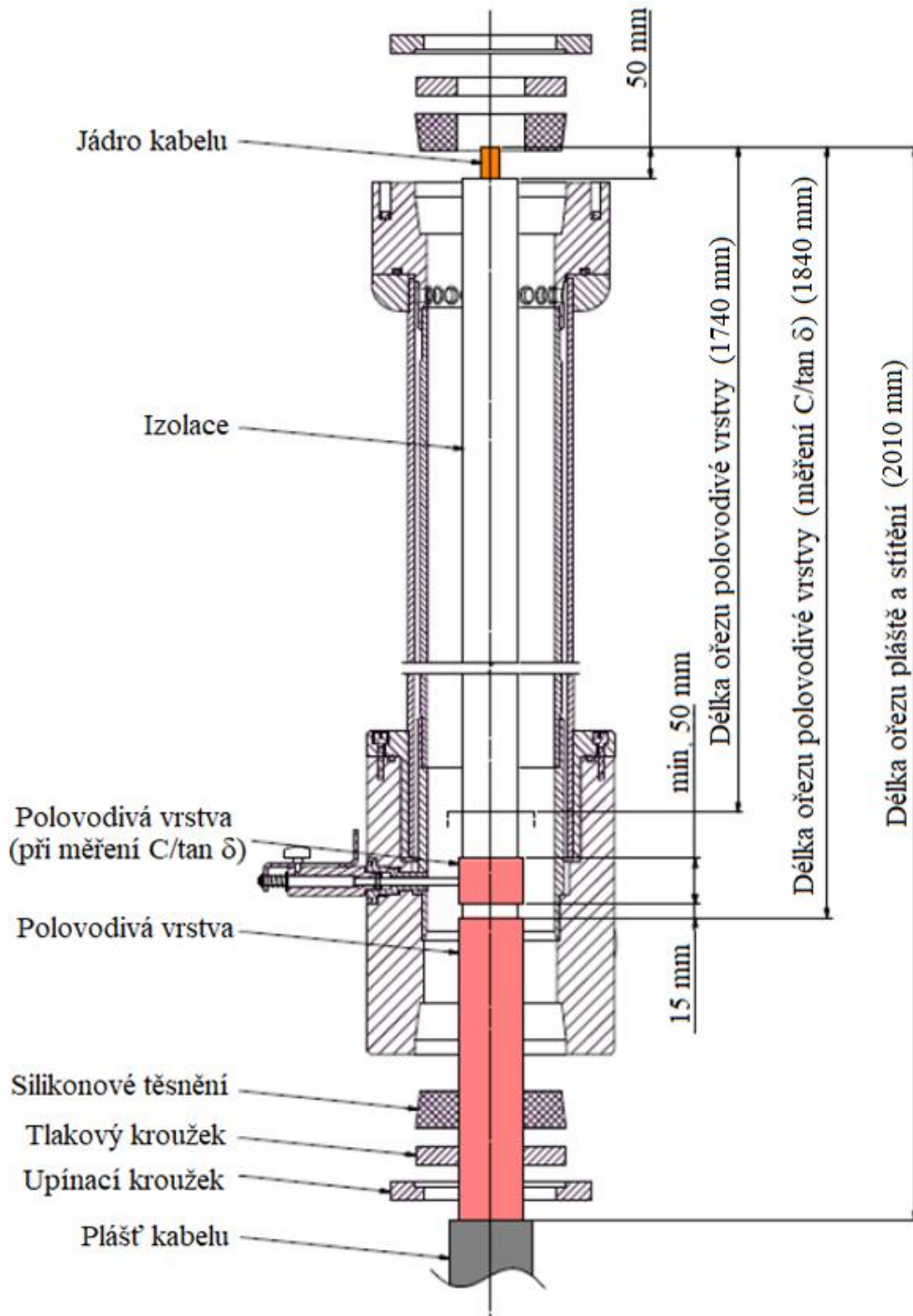
9.1 Příprava kabelu a kabelových koncovek

Před vlastní zkouškou je nezbytná úprava konců zkoušeného kabelu, aby ho bylo možné připojit ke zkušebnímu zařízení. Celý postup přípravy by se měl provádět se zvýšenou opatrností, aby nedošlo k poškození dalších konstrukčních částí kabelu. Vhodné je také požití neprořezných rukavic k zamezení řezných zranění. Přípravu je nutné provádět za čistých podmínek.

Kabel se připravuje tak, že se z něj nejprve odstraní plášť, což se provádí podélným řezem kabelářským nožem a příčným krouživým řezem na maximální délce pro odstranění pláště. Plášť se pak ručně rozevře a odstraní. Ručně se pak odehne stínění kabelu tak, aby nesměrovalo svými hroty k zakončení jádra. Pomocí takzvaného "ořezávátka" se odřízne asi o 17 cm méně vnější polovodivé vrstvy než plášť, přičemž se musí se dbát na to, aby nedošlo k poškození izolace kabelu. Nakonec se pomocí speciálních odizolovacích kleští nebo nožem odstraní izolace jádra v délce asi 5 cm od konce a poté se nožem seřízne hrana na obvodu izolace. Ořezaná část kabelu se pak očistí lihem.

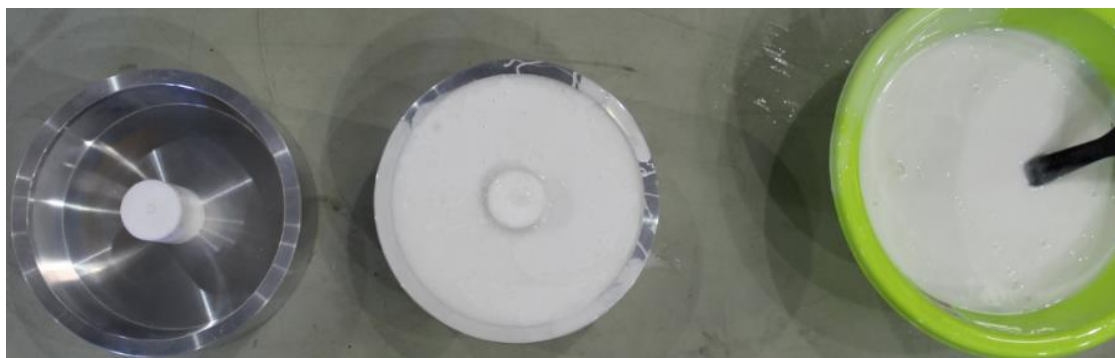
Pokud je plánované měření kapacity či ztrátového činitele kabelu, nechává se na kabelu proužek polovodivé vrstvy o šířce okolo 50 mm v místě kde se nachází konektor pro připojení při měření těchto veličin, znázorněno na Obrázku 45.

Celková manuální příprava obou konců kabelů pro měření s vodními koncovkami je relativně časově náročná, pro nezkušeného pracovníka může tento proces trvat až několik hodin. [26;41]



Obr. 45 – Popis kabelu v kabelové vodní koncovce CTT 350 [41] - upraveno

Takto upravené konce se pak vkládají do koncovek, přičemž je nutné pro zajištění vodotěsnosti koncovek vytvořit silikonové těsnění. Pro každý různý průřez kabelu je tedy potřeba vytvořit soubor čtyř těsnění z tekutého silikonu a tužidla, které si míchají v poměru podle nutnosti rychlosti tuhnutí a formují se ve speciálních formách dodaných s kabelovými koncovkami podle návodu v manuálu pro koncovku [41]. Těsnění se pak nechává tuhnout minimálně 1,5 až 6 hodin podle manuálu. K tvorbě těchto těsnění je zapotřebí vytvořit válce s průměrem podle průměru izolace kabelu. Dvě těsnění musí být vytvořena pro průřez kabelu s izolací, dvě pro průřez s polovodivou vrstvou, ale tyto rozměry bývají téměř totožné, proto většinou postačí vytvořit jeden nebo dva tyto válce, v závislosti potřeby rychlosti vytvoření těsnění. Válce se upínají šroubem do formy, aby byly připevněny přímo v jejím středu.



Obr. 46 – Tvorba silikonového těsnění



Obr. 47 – Silikonové těsnění

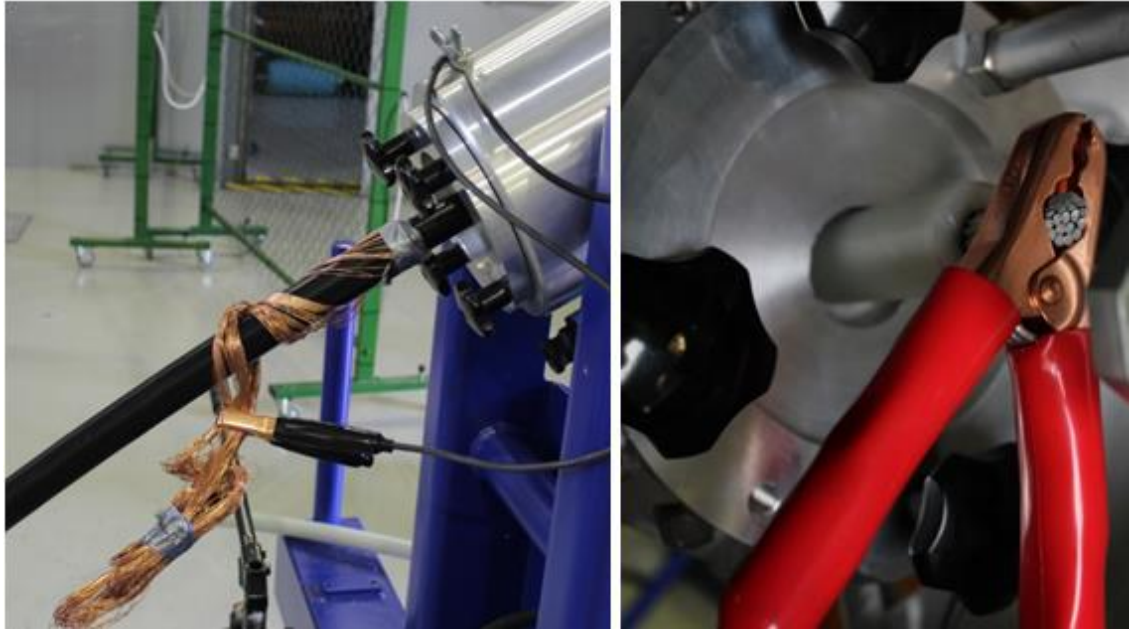
Při vkládání kabelu do koncovky se doporučuje oblepit jádro kabelu izolační páskou kvůli zabránění poškrábání vnitřku trubky. Při zasouvání kabelu by měla být koncovka uvedena do vodorovné polohy a podepřena podpěrou tyčí.

Těsnění v koncovce se pak upne tlakovým a upínacím kroužkem staženým šrouby podle Obrázku 45. Tlakový kroužek je dodáván bez díry, tu je nutné vytvořit podle průměru měřeného kabelu, přičemž by podle manuálu neměla mít průměr větší než o centimetr průměru díry těsnění.



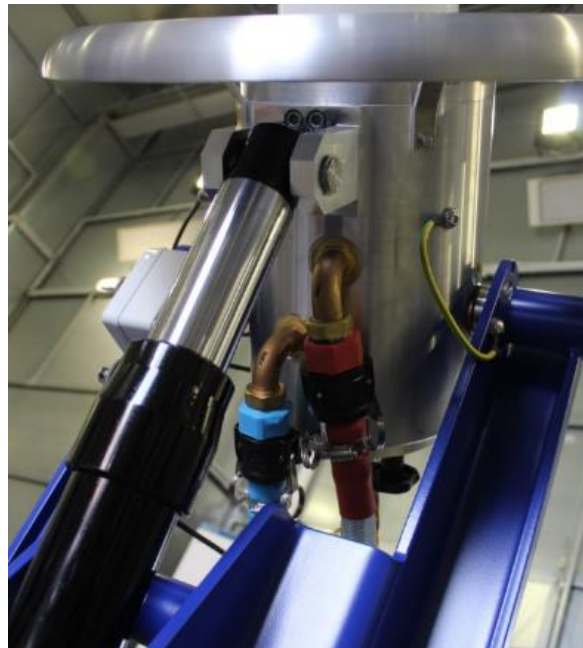
Obr. 48 – Oblepení jádra kabelu

Jádro kabelu se pak kleštěmi galvanicky spojí s vysokonapětovou elektrodou.



Obr. 49 – Vložení a připojení kabelu v koncovce

Dalším krokem je propojení jednotky s vodními koncovkami hadicemi pro přivedení deionizované vody. Hadice jsou barevně odlišeny, přičemž pro správnou funkci jednotky musí barvy při propojování odpovídat svorkám.



Obr. 50 – Přivedení deionizované vody do koncovky hadicemi

Při plnění koncovky vodou a při vysokonapětových zkouškách by měl být úhel sklonu koncovky přibližně 45° pro kvalitní odvětrání vzduchovým ventilem. Koncovky se naklání pomocí hydraulické pumpy. Během plnění koncovky jde slyšet vzduch unikající vzduchovými ventily, které se zavřou, jakmile je koncovka plná. Po spuštění plnění koncovky by se měly zkontrolovat spoje u hadic, jestli jsou hadice kvalitně přivedeny ke koncovce a jestli správně těsní a nedochází k úniku vody ani u silikonového těsnění. Vysokonapětová elektroda se připojí ke zdroji bezkoronovým vodičem. Během testování se musí být odebrána podporná tyč. Při měření musí být oba konce kabelů dostatečně vzdáleny od stěn kabiny a ostatního vybavení v laboratoři,

čemuž by mělo odpovídat správné umístění koncovek. Obě koncovky se uzemní měděnými páskovými vodiči do jednoho bodu.



Obr. 51 – Pohled na měřicí obvod v laboratoři

9.2 Obsluha vodní procesní jednotky

Vodní procesní jednotka obsahuje nádrž pro deionizovanou vodu s objemem pro 500 litrů. Celkový objem vody může mít různé účinky na průběh testování. Při nižší hladině vody nastane rychlejší přizpůsobení požadované hodnoty vodivosti, ale zhoršuje se teplotní vyrovnávání. Doporučuje se nejméně 100 litrů deionizované vody v nádrži při plných kabelových koncovkách. Jednotka dokáže kontrolovat úpravu vodivosti vody v rozsahu 0,05 až 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pro kontrolu vyšší vodivosti je nutné nainstalovat do jednotky čidlo s potřebným rozsahem. Průtok deionizované vody je cca 35 l/s, v případě jedné koncovky tedy až 70 l/s.

Chladicí okruh se při výchozím nastavení aktivuje při teplotě zpětného toku z koncovek nad 30 °C. K chladicí smyčce je přivedena voda z řádu s vodivostí okolo 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o průtoku okolo 45 l/s, přičemž by chladicí voda měla být čistá, protože ji jednotka využívá pro zvýšení vodivosti procesní vody injektováním vstříkovačem.

Ventily a uzávěry jsou jednotkou ovládány pomocí pneumatiky, kde stlačený vzduch dodává do vzduchového zásobníku interní kompresor s možností využití i vnějšího pneumatického konektoru, pokud interní kompresor vydává příliš vysoké rušení částečnými výboji. Pneumatický okruh obsahuje regulátor nastavovaný na 6 barů.

Jednotka obsahuje software, který má dva módy, a to pro měření při střídavém a impulsním napětí. Před výběrem módu je nutné, aby byly koncovky vyprázdněné a software se musí z bezpečnostních důvodů restartovat, protože při impulsním módu se při testování používá voda s vysokou vodivostí odebíraná z chladicí smyčky.

Jednotku lze napájet jednofázově ze sítě 230 V, 50 Hz a umožňuje zapojení do bezpečnostní vypínací smyčky pro nouzová vypnutí v případě poruchy.

Jednotka má šest svorek pro připojení hadic, dvě pro každou z koncovek a dvě pro připojení vnějšího chladicího okruhu, přičemž všechny svorky a hadice jsou rozlišenými barevně.



Obr. 52 - Svorky pro připojení hadic [42]

Před měřením by měla být jednotka v režimu upravování vody “conditioning mode” spuštěná nejméně 1 hodinu pro eliminaci všech vzduchových bublin a pro úpravu vody na požadovanou hodnotu vodivosti. [42]

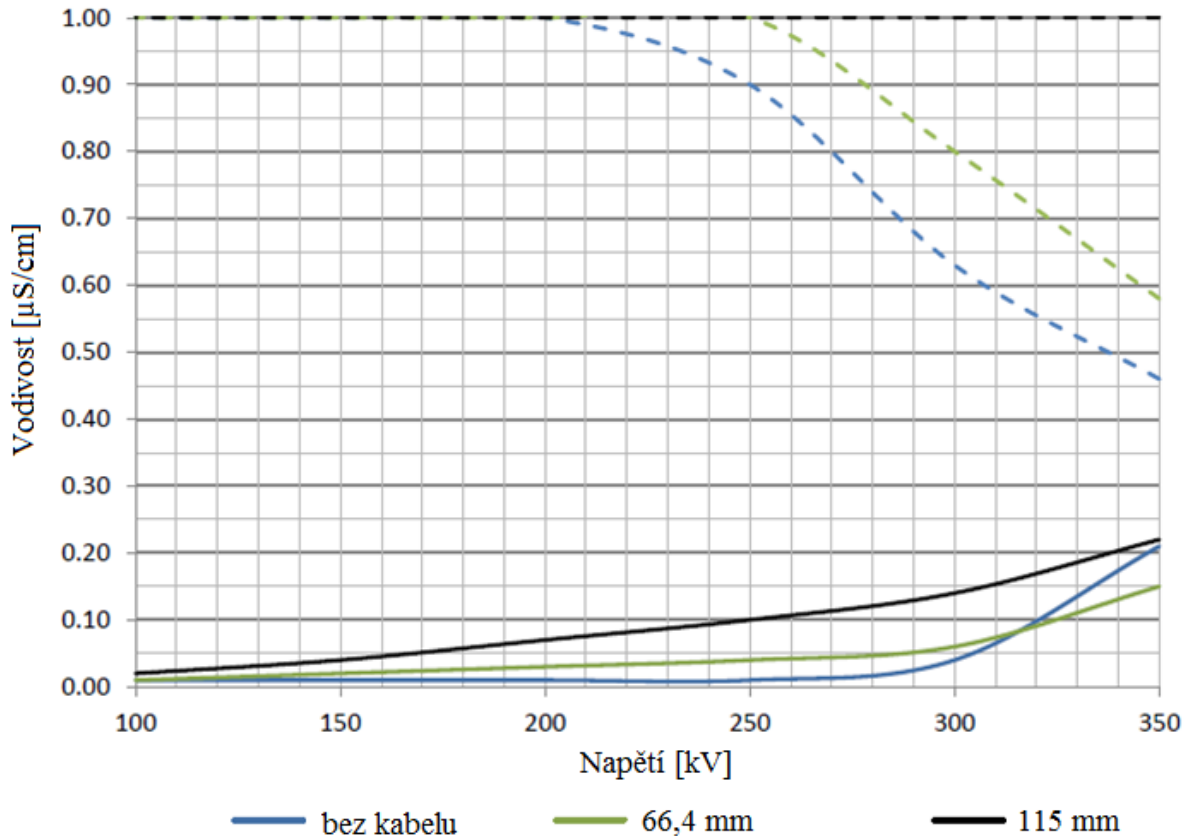
Pokud deionizace vody při tomto módu neprobíhá, nebo probíhá velice pomalu, je možné, že je nutné vyměnit deionizační pryskyřici. Ta se vkládá do speciálního pytle, který zamezuje její únik do cirkulačního obvodu a který se vloží do skladovací nádrže a zabezpečí se sítím. Nádrž musí být před výměnou vypuštěna. Výměna je podrobně popsána v manuálu.



Obr. 53 – Výměna deionizační pryskyřice

9.2.1 Nastavení vodivosti vody

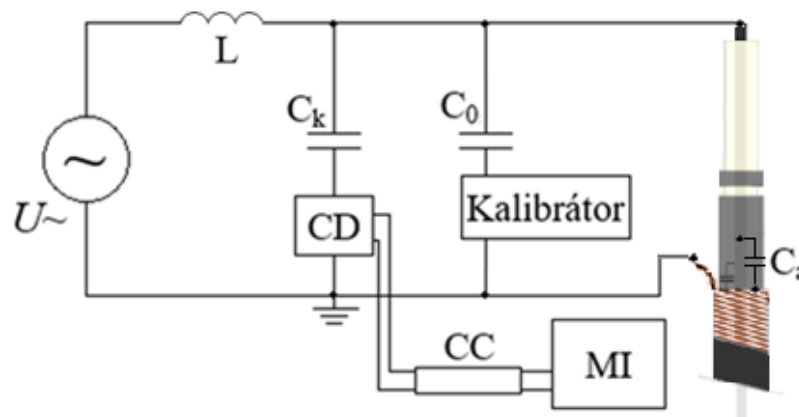
Jak již bylo zmíněno, pro zajištění maximální síly elektrického pole podél trubek koncovky pod kritickou hodnotou, musí být zvolena minimální vodivost na regulátoru vodivosti, jinak by mohlo nastat vysoké rušení korunou. Naopak kvůli tepelné stabilitě, musí být vodivost pod určitou maximální hodnotou. Vodivost se nastavuje podle diagramů obsažených v návodu k vodním koncovkám. V diagramech jsou zobrazené závislosti vodivosti vody na zkušebním napětí pro jednotlivé průřezy kabelu. Průřezy jsou barevně rozlišeny a každý jmenovitý průřez kabelu zahrnuje dvě křivky v diagramu. Nepřerušovaná křivka ukazuje minimální vodivost a přerušovaná vodivost maximální, přičemž se doporučuje zvolit vodivost poblíž křivky s minimální konduktivitou.



Obr. 54 – Diagram pro zvolení vodivosti vody při testování v AC módu pro CTT 350 [41]

9.3 Měření částečných výbojů

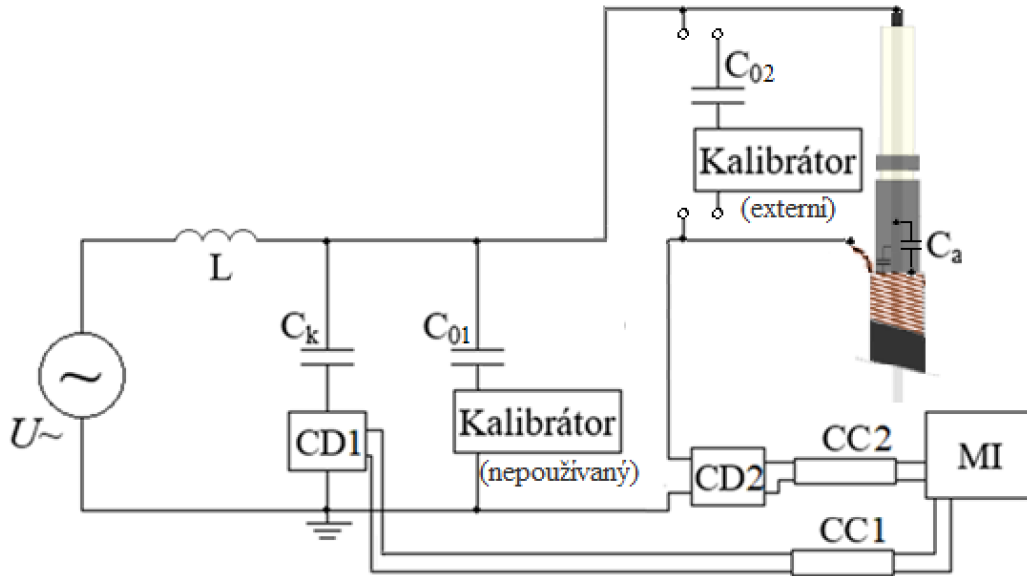
Pokud při měření v laboratoři není nutné zvyšovat citlivost měření zapojením pro rozlišení polarity impulsů, zapojuje se obvod jako pro galvanickou metodu měření pro měření částečných výbojů podle Obrázku 55, kde lze kalibrátor a kalibrační kondenzátor o hodnotě 0,1 nF, díky jeho vysokonapěťovému provedení, ponechat v obvodu i při měření. Výhodou je rychlá a jednoduchá kalibrace, kterou je možné provádět automaticky. Galvanické schéma s jednou vazební jednotkou se používá při softwarovém systému DDX 7000.



Obr. 55 – Galvanická metoda měření v laboratoři

Při nutnosti zvýšení citlivosti měření se v laboratoři zapojuje obvod podle Obrázku 56, který obsahuje dvě vazební jednotky, princip funkce tohoto zapojení je popsán v kapitole 3.4.1. Nevýhoda je nemožnost použití kalibrace větví s vysokonapěťovým kalibračním kondenzátorem,

protože větev není zapojena paralelně pouze s kabelem, ale i s měřicí jednotkou. Používá se tedy externí kalibrátor, který se do obvodu vkládá při kalibraci a před vysokonapěťovým zkoušením je ho potřeba z obvodu odstranit, protože v opačném případě by byl zničen. Proces kalibrace je vcelku složitý, je při něm nutné správně nastavovat zesílení obou vazebních jednotek a většinou se kalibrace povede až po více pokusech, což zabírá hodně času, protože je nutné kalibrátor ručně zapínat.



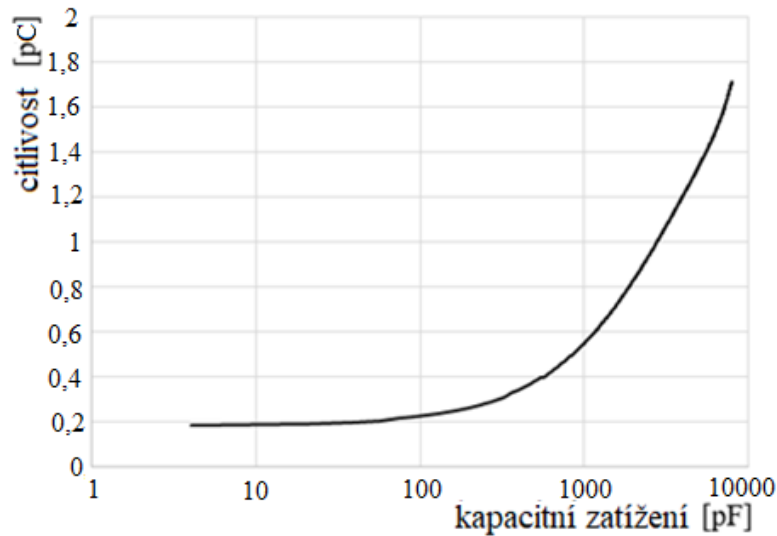
Obr. 56 – Metoda zapojení pro rozlišení polarity impulsů v laboratoři

Pro měření se u jednoho konce kabelu kleštěmi spojí nízkonapěťová elektroda koncovky se stíněním, jak ukazuje Obrázek 57, u druhého konce kabelu se nízkonapěťová elektroda se stíněním nepropojuje, pouze se uzemní.



Obr. 57 – Připojení kabelu nízkonapěťové elektrody koncovky při měření částečných výbojů

V měřicím obvodu v laboratoři je jako vazební kondenzátor C_k používán vysokonapěťový kondenzátor Hipotronics s hodnotou kapacity 1 nF. Hodnota vazebního kondenzátoru udává mimo jiné i velikost citlivosti měření. Závislost citlivosti na velikosti kapacity kabelu při hodnotě kapacity vazebního kondenzátoru 1 nF je zobrazena na Obrázku 58. [24]



Obr. 58 – Závislost citlivosti na velikosti kapacity kabelu [24] – překresleno

9.3.1 Experimentální měření částečných výbojů

Měření probíhalo při teplotě 19 °C, relativní vlhkosti 42,5 %, tlaku 990 hPa. Nastavená vodivost deionizované vody byla 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Při měření se vyskytly problémy přílišného rušení, které byly částečně eliminovány po úpravě stínění jednoho z koaxiálních kabelu, přičemž jeho stínění bylo ke konektoru namísto slabého krimpovacího spoje připájeno.

Další rušení vznikalo při osvětlení, kde byl vadný jeden z výbojových světelných zdrojů, což bylo vyřešeno vypnutím tohoto světelného okruhu.

Další snížení rušení odeznělo při rozpojení přívodu napětí k elektrickému ovládní vrat laboratoře a napájení rázového generátoru.

Nejproblematictější bylo rušení způsobené hromadným dálkovým ovládním, které nebylo dokonale odfiltrováno a přicházelo náhodně, cca každých 15 až 40 s. Rušení by mohlo být odstraněno vložením silnějšího filtru k přívodu zdroje, nebo sníženo, pokud by měření bylo prováděno v časové období, kdy je HDO méně aktivní.

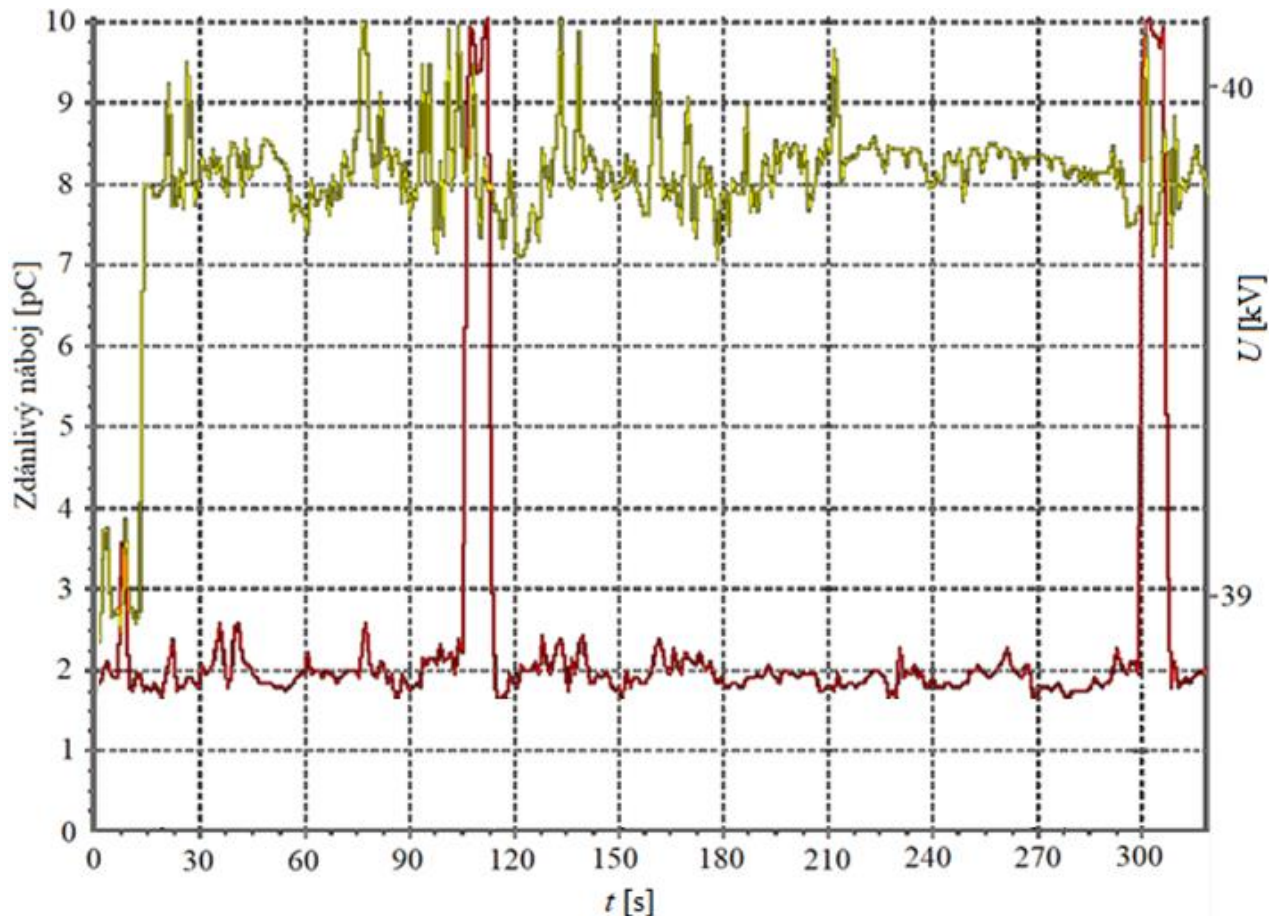
Další rušení bylo způsobeno kompresorem ve vodní procesní jednotce, který se spouštěl s intervalem cca 200 s na dobu okolo 10 s. Toto rušení by bylo možné eliminovat externím přívodem tlakového vzduchu, který ovšem bohužel nebyl v laboratoři k dispozici. Při rozběhu kompresoru docházelo k nárůstu měřené hodnoty zdánlivého výboje až o 28 pC.

Při pokusu o měření s obvodem obsahujícím dvě vazební jednotky podle Obrázku 56, a tedy systémem DDX 8003, provádějícím pulzní diskriminaci na základě polarit impulsů, nastaly komplikace při diskriminaci, kterou měřicí přístroj prováděl příliš citlivě a diskriminoval i pulzní signály generované kalibrátorem. Problém mohl být v nastavení časové prodlevy pro diskriminaci, ve které ovšem výrobce nedoporučoval provádět změny. Možná příčina mohla být ovšem i poruchovost v přidané měřicí jednotce CD2, nebo v kartě měřicího přístroje, která již musela být jednou vyměněna, nebo mohla být jiného neznámého původu.

Jelikož měření se systémem DDX 8003 nebylo možné, přistoupilo se k měření se systémem DDX 7000 galvanickou metodou, se zapojením obvodu podle Obrázku 55.

Při měření ale nebyla dosažena ideální citlivost obvodu, především kvůli vysoké kapacitě kabelu. Po nastavení filtru na 80 až 100 kHz a kalibraci systému nastavené na 5 pC byl stále detekován šum pozadí o hodnotě zdánlivého náboje okolo 1,6 pC.

Na Obrázku 59 lze vidět naměřený průběh zdánlivého náboje (červený průběh) při hodnotě $2 U_0$. Pomocí tohoto grafu je pak možné dojít k závěru, že kabel splňuje podmínku zdánlivého náboje do 2 pC, přičemž ale při měření hodnoty vzrůstají i nad tuto hodnotu, především z důvodu rušení HDO, které navyšuje zdánlivý náboj až o 1 pC a při spuštění kompresoru, kdy se hodnota navýší až o 9 pC. Skokové změny byly nejspíš i větší, ale při měření byla zvolena funkce průměrování za určitý časový úsek.



Obr. 59 – Měření částečných výbojů systémem DDX 7000 v čase

9.4 Výdržná zkouška střídavým napětím

Výdržnou zkoušku střídavým napětím je možné provádět při stejném zapojení jako u galvanické metody měření částečných výbojů, proto tato zkouška také většinou předchází tomuto měření. Měření probíhá podle kapitoly 7.6.5. Při použití vodních koncovek se opět použije voda s nízkou vodivostí podle Obrázku 54.

9.4.1 Experimentální výdržná zkouška střídavým napětím

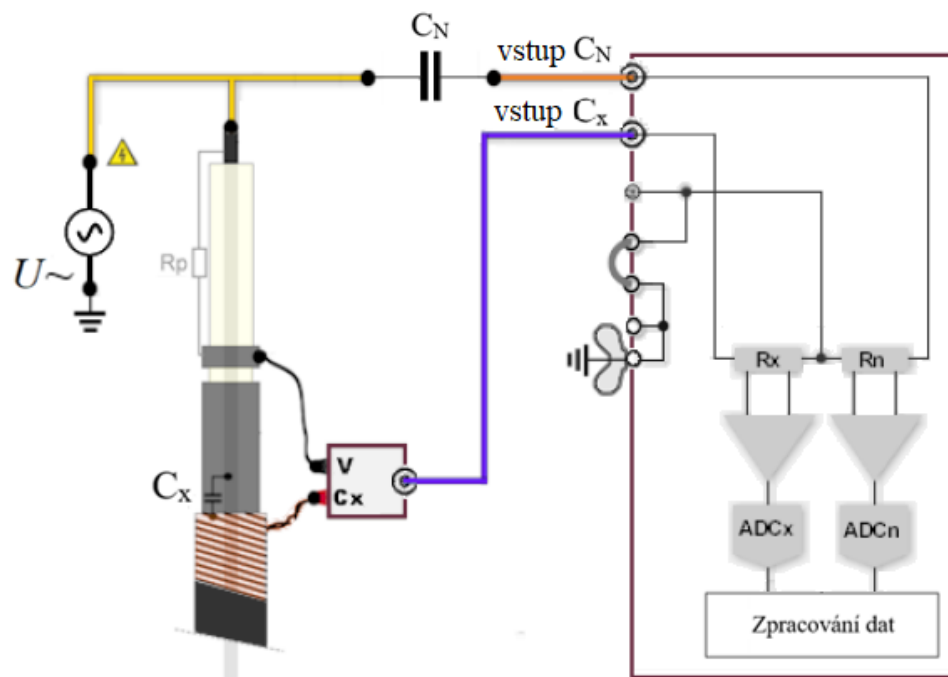
Při experimentálním měření byl kabel v laboratoři proměřen minutovou zkouškou při napětí 73 kV (3,5násobek jeho jmenovité hodnoty U_0), což je testovací hodnota napětí udávaná výrobcem. Při zkoušce nenastal žádný průraz ani poškození kabelu, čímž byla zjištěna jeho odolnost vůči krátkodobému přepětí.

9.5 Zkoušky do průrazu střídavým napětím

U zkoušek do průrazu střídavým napětím při použití vodních koncovek platí podobná pravidla, jako u výdržných zkoušek. U vodních koncovek však může dojít k případu, kdy průraz nastane v koncovce, což může způsobit proražení trubky vodní koncovky. V tomto případě je možné děravou trubku zalepit například epoxidem, ale nezaručuje se, že již nebudou vykazovat žádné rušení při měření částečných výbojů. [41]

9.6 Můstkové měření ztrátového činitele a kapacity kabelu

Po měření částečných výbojů bylo provedeno měření ztrátového činitele a kapacity kabelu můstkovým měřením. Při měření v laboratoři měřicím systémem Tettex 2840 se zapojuje obvod podle Obrázku 60.



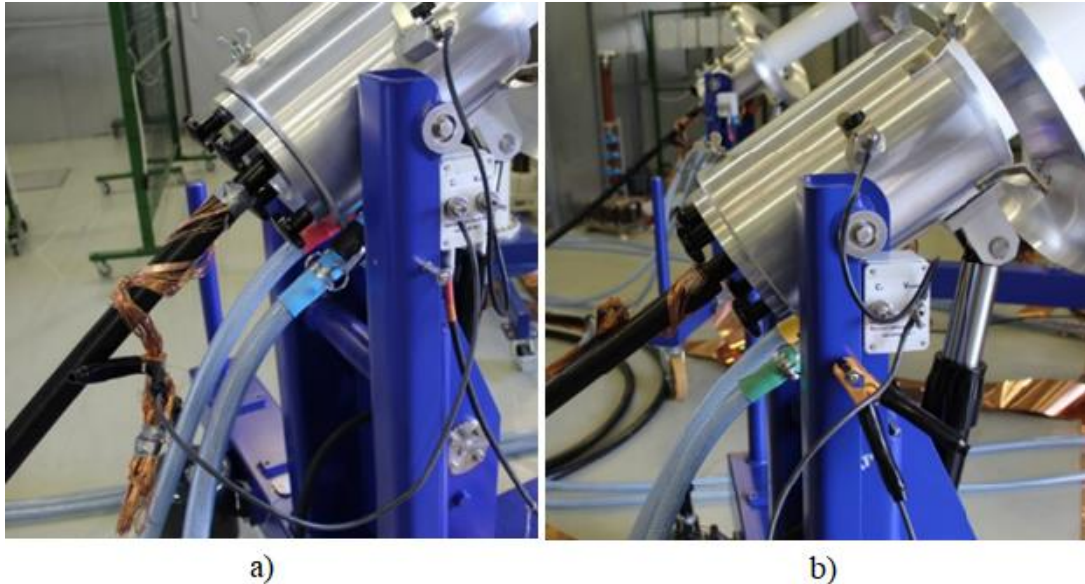
Obr. 60 – Měření ztrátového činitele kabelu systémem Tettex 2840 [33] – upraveno

Jako normálový kondenzátor C_N byl do obvodu připojen vysokonapěťový kondenzátor s kapacitou 119,19 pF, plněný oxidem uhličitým, se ztrátovým činitelem v řádu 10^{-6} .



Obr. 61 - Připojení normálového kondenzátoru do obvodu

Zapojení kabelu u nízkonapětových elektrod koncovek se provede podle Obrázku 62, kde je zobrazeno a) zapojení připojeného konce k měřicímu systému, kde stínění měřeného kabelu je propojeno s propojovací krabičkou i elektrody ke svorce C_x a odtud přes koaxiální kabel do měřicí jednotky. Na Obrázku u b) je možné zapojení volného konce kabelu. Obě koncovky jsou uzemněné zemnicím měděným páskem.



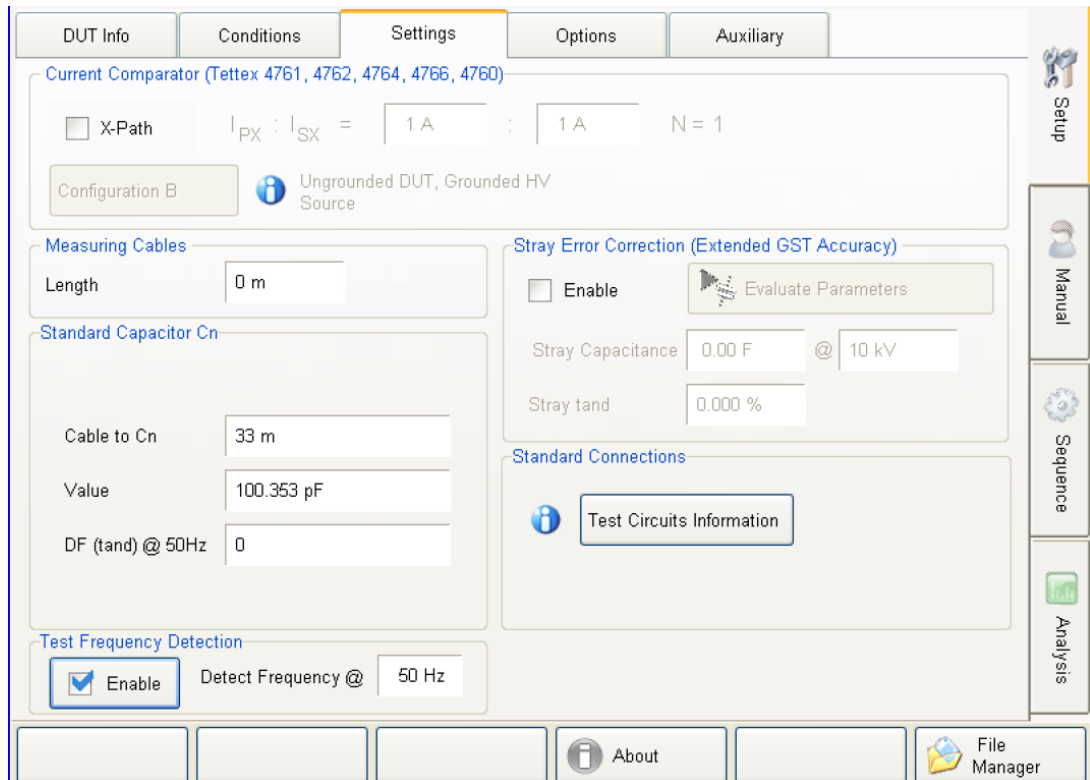
Obr. 62 – Zapojení kabelu u nízkonapětové elektrody při můstkovém měření

Při tomto měření se zasouvá konektor připevněný na nízkonapětové elektrodě do styku s polovodivým proužkem kabelu, jehož potenciál se přivádí do krabičky na svorku V_{common} . Tento konektor je izolovaný od nízkonapětové elektrody a slouží nejspíš k redukcí paralelního proudu tekoucího povrchově v koncovce přes izolační médium, který se svádí do země přes stínění koaxiálního kabelu. Při zasouvání konektoru je zapotřebí provádět operaci při plných koncovkách s opatrností, protože při úplném povolení upínacího šroubu může dojít k uvolnění celé konektorové tyčinky a k úniku deionizované vody do okolí v laboratoři.



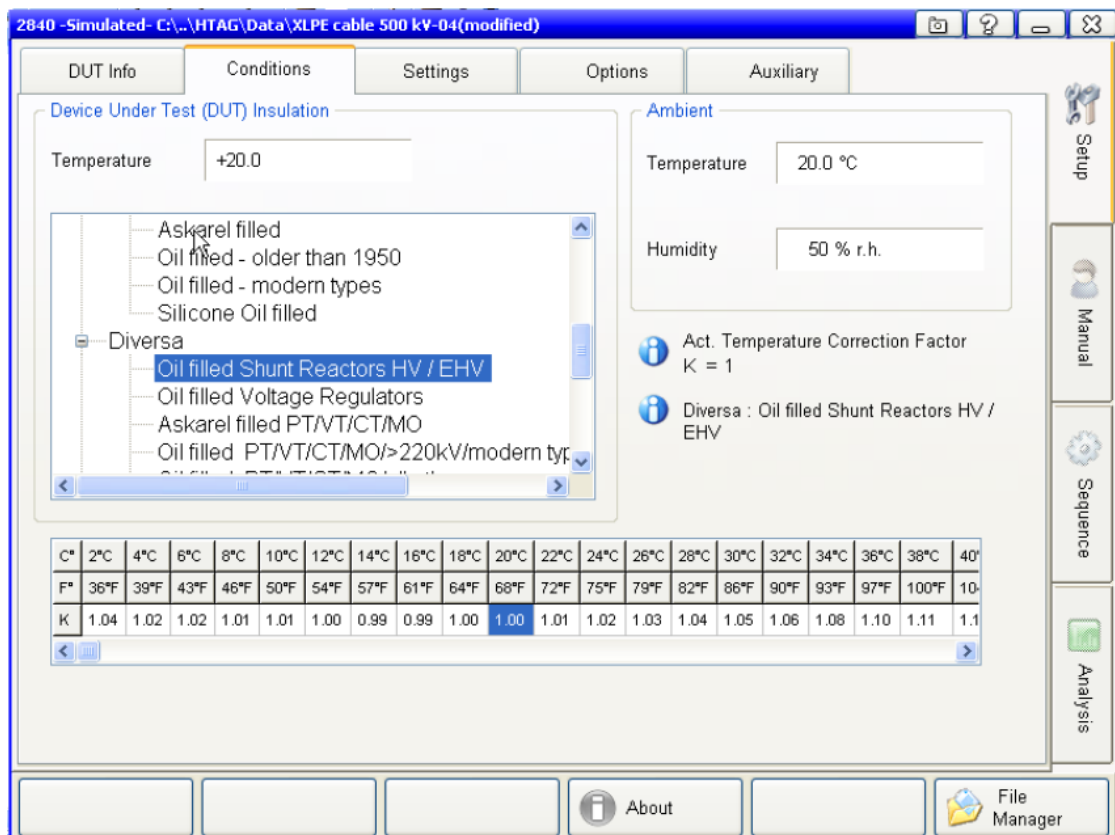
Obr. 63 – Zasunutý konektor na nízkonapětové elektrodě

Před měřením se programu systému Tettex 2840 v záložce Settings se vypíše správná délka měřicích kabelů, hodnota kapacity normálového kondenzátoru a také délka měřicích kabelů k normálovému kondenzátoru pro eliminaci chyby, vznikající při činných ztrátách ve vodičích měřicích kabelů.



Obr. 64 – Úprava dat v programu systému Tettex 2840 [33]

V záložce Conditions se v Ambient vypíší laboratorní podmínky a vybere se typ měřeného kabelu pro teplotní automatickou korekci. Naměřená hodnota ztrátového činitele se pak automaticky dělí konstantou K, což je přepočet výsledku pro hodnotu při referenční teplotě 20 °C.



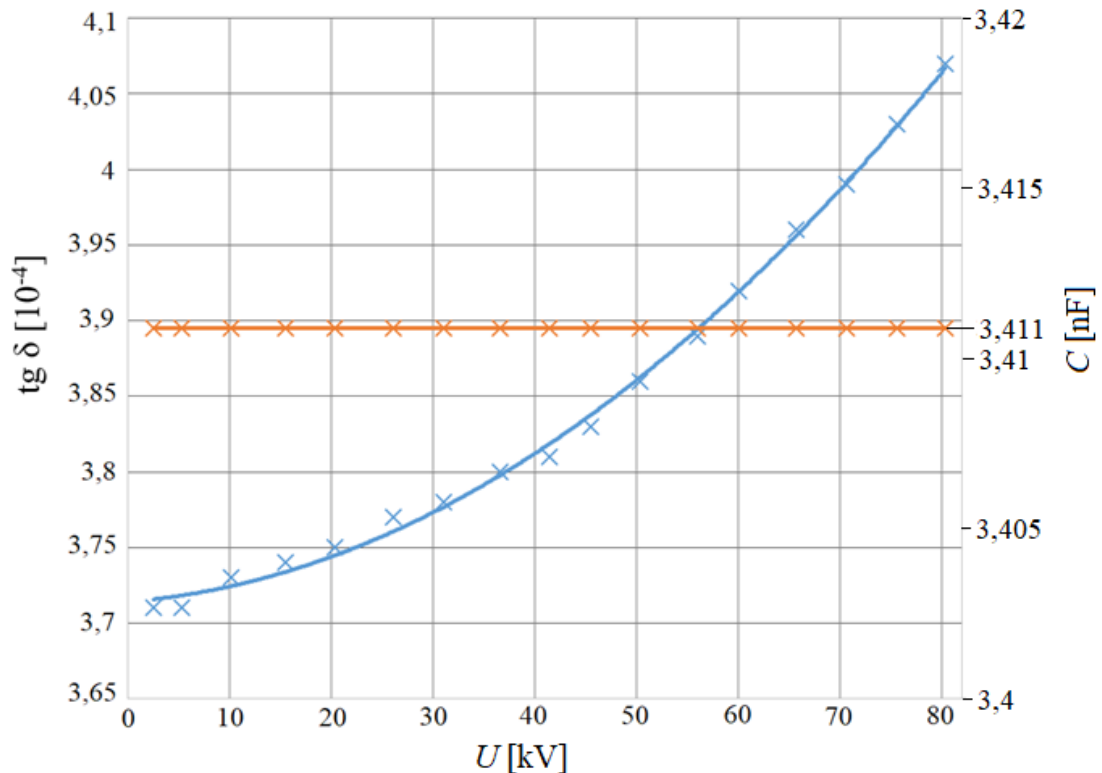
Obr. 65 – Automatická teplotní korekce při měření ztrátového činitele [33]

9.6.1 Experimentální měření ztrátového činitele a kapacity kabelu

Po zapojení obvodu a nastavení měřicího přístroje bylo provedeno experimentální měření. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 2 a graficky zobrazeny na Obrázku 66.

Tab. 3 – Měření ztrátového činitele a kapacity kabelu

U [kV]	$\tan \delta$ [10^{-4}]	C [nF]
2,51	3,71	3,4109
5,33	3,71	3,4109
10,12	3,73	3,4109
15,52	3,74	3,4109
20,39	3,75	3,4109
26,12	3,77	3,4109
31,01	3,78	3,4109
36,61	3,80	3,4109
41,47	3,81	3,4109
45,53	3,83	3,4109
50,35	3,86	3,4109
55,96	3,89	3,4109
60,03	3,92	3,4109
65,68	3,96	3,4109
70,65	3,99	3,4109
75,55	4,03	3,4109
80,36	4,07	3,4109



Obr. 66 – Grafická závislost ztrátového činitele a kapacity kabelu na napětí

Z naměřené závislosti ztrátového činitele (modrý průběh) na napětí lze vypočítat, že se jedná o rostoucí funkci. Je tomu tak především zvyšováním činné složky proudu ztrátovou polarizací v izolaci kabelu při navyšování proměnlivého elektrického pole. Velikost ztrátového činitele také splňuje normové hodnoty, kde se většinou požaduje ztrátový činitel do $40 \cdot 10^{-4}$.

Při pohledu na naměřené hodnoty kapacity kabelu (červený průběh) lze usoudit, že u 20 m kabelu s kapacitou udávanou výrobcem 0,17 nF je tato naměřená hodnota velmi blízká hodnotě předpokládané. Z průběhu jde vidět, že má kabel výbornou stálost kapacity s napětím.

9.7 Impulsní zkoušky

Při impulsních zkouškách na silových kabelech se kabel připojuje mezi jádro a stínění k rázovému generátoru a zkoušky pak probíhají podle kapitol 7.6.4, přičemž je zapotřebí připojit do obvodu příslušný měřicí systém pro tyto zkoušky, který již bývá většinou součástí rázového generátoru. Při použití vodních koncovek se vodní procesní jednotka přepíná do impulsního módu, což zahrnuje plnění koncovek vodou s vysokou vodivostí většinou přivedenou z řádu, kvůli lepšímu řízení elektrického pole podél koncovky a k zabránění výboji mezi elektrodami při aplikaci impulsního napětí do obvodu. Zkoušky mohou být jak výdržného, tak průrazného typu.

10 ZÁVĚR

Elektrické silové kabely podstupují obzvlášť po jejich výrobě mnoha různým elektrickým i neelektrickým zkouškám. Jedná se zpravidla o zkoušky, které mají ujistit výrobce i zákazníka o kabelové spolehlivosti a neporuchovosti. Při provádění těchto elektrických měření na vysokonapěťových kabelech je možné střetnutí s mnoha technicky komplikovanými záležitostmi. Především při proměřování kabelů tak vysokým napětím, že je obtížné kontrolovat elektrické pole na jejich koncích. Na kabelových koncích totiž při určité velikosti intenzity elektrického pole můžou vznikat vnější částečné výboje, což velice ovlivňuje výsledky citlivých měření, jako je například měření částečných výbojů. Proto je zapotřebí toto elektrické pole určitým způsobem řídit. Při napětích nad 100 kV hrají při těchto měřeních důležitou roli vodní kabelové koncovky, které elektrické pole řídí pomocí vody s nízkou vodivostí.

Právě s těmito novými vodními koncovkami, dodanými pro VUT FEKT v Brně od švýcarské firmy Haefely Hipotronics probíhalo experimentální a informativní měření na 20,8/36 kV kabelu, dlouhém 20 m. Součástí vodních koncovek je i jednotka pro úpravu a chlazení vody. Úprava vody probíhá pomocí deionizace, která je schopná vodu uvést do vodivosti až 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Konstrukce koncovek je zdánlivě jednoduchá, v základu se jedná vlastně jen o systém dvou elektrod oddělených izolačními trubkami, kterými pak proudí voda. Nejednoduché je ovšem zavádění kabelu do koncovky, kdy je potřeba pro každou velikost průměru kabelu vytvářet nové soubory těsnění, přičemž je nutné pro velké rozdíly průměrů kabelů obstarat i nové hliníkové tlakové kroužky, což může být pro institut s novými koncovkami bez dlouhodobé měřicí rutiny s možností spíše občasným testováním a s různými kabely zpočátku pro první měření komplikace. Volný čas při tuhnutí těsnění je však možné, pokud tak již neučinila například dodávací kabelovna, vyplnit přípravou konců kabelů, protože při použití pouze základních pomůcek se jedná pro nezkušeného pracovníka o poměrně dlouhodobou záležitost. Především odstranění polovodivé vrstvy jednoduchým kabelovým "ořezávátkem" může zabírat okolo 80 % času přípravy konce kabelu.

Vodní procesní jednotka je zařízení komplikovanější. Obsahuje několik pneumaticky ovládaných ventilů, které upravují deionizovanou vodu proháněním skrz deionizační pryskyřici či vsřikováním do okruhu vodu z řádu, také například spouští okruh chlazení. Hadicemi se pak propojí s kabelovými koncovkami, kterým pak dodává vodu s určitou vodivostí a průtokem. Jednotka obsahuje uživatelsky vcelku jednoduchý a přehledný software, ve kterém se pak upravují parametry vody. Zajímavý byl proces deionizace, který probíhal poměrně rychle. Například při prvním spuštění byla již předčištěná voda reverzní osmózou o vodivosti okolo 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ upravena na hodnotu vodivosti pod 0,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ za cca půlhodinu, čemuž jistě dopomohl fakt, že deionizační pryskyřice byla zcela nová. Ovšem při častější úpravě vody bude nutná výměna pryskyřice jejíž cena je nyní okolo 5 000 Kč.

Při provozu u vodních koncovek nenastaly žádné závažné problémy, soubory těsnění správně plnily svou funkci. Malé úniky vody vznikaly pouze ze vzdušných ventilů, ty ovšem nezpůsobily žádné komplikace.

Jako první zkouška byla provedena minutová výdržná zkouška kabelu střídavým napětím. Při tomto testování byla především ověřena funkčnost celého systému. Zkouška proběhla úspěšně, žádný prvek v systému neselhal, kabel nebyl proražen. Při aplikovaných 73 kV po dobu jedné minuty také nedošlo téměř k žádnému vzrůstu teploty vody, což svědčí o tom, že koncovky jsou dimenzované i pro mnohem vyšší hladiny napětí.

Další prováděnou zkouškou bylo měření částečných výbojů. Toto měření je již velice komplexní a je při něm nutné dodržet mnoho pravidel. Velikou komplikací jsou právě rušivé vlivy, které mohou mít zdroj přímo v měřicím obvodu nebo mimo něj, a které při měření mohou znehodnocovat jeho výsledek. Tyto vlivy lze eliminovat několika způsoby, které mohou být jak elektronického diskriminačního původu, tak i samotným provedením měřicího obvodu a přizpůsobením okolí k měření. Nemalou součástí při měření je i provádění nastavení a kalibrace měřicí jednotky. Při tomto měření byl pokus o provedení s diskriminačním systémem DDX 8003. Z technických důvodů se však nepodařilo systém nastavit, tak měření proběhlo pouze galvanickou metodou se systémem DDX 7000. Toto měření pro vysokonapěťové kabely je opravdu velice náročné na citlivost, protože pro kabely se nyní vyžaduje velice nízká hodnota zdánlivého náboje. Po kalibraci, vcelku úzkému nastavení frekvenčního filtru a různému zamezování rušení se podařilo dosáhnout velikosti šumu pozadí okolo 1,6 pC. Při dosažení napětí hodnoty $2 U_0$ byla pak velikost zdánlivého náboje v nejnižších hodnotách okolo 1,8 pC, což je pod hodnotou, kterou pro kabely předepisuje norma, tudíž se může dojít k závěru, že kabel nevykazuje žádné významné zdroje částečných výbojů. Průběh měření, zobrazen na Obrázku 59 byl po celou dobu doprovázen rušením HDO. Další rušení způsoboval periodicky kompresor, který v dané okamžiky měření extrémně narušoval. Ideální by proto bylo, kdyby se celá jednotka nacházela mimo stíněnou místnost, nebo do ní byl alespoň zaveden externí přívod vzduchu.

Posledním provedeným měřením bylo můstkové měření ztrátového činitele a kapacity kabelu, konkrétně jejich závislost na přiloženém napětí měřicím systémem Tettex 2840. Hodnota ztrátového činitele s napětím rostla, což bylo dáno především zvyšováním činné složky proudu ztrátovou polarizací v izolaci s napětím a velikostně byla pro daný kabel vyhovující. Naopak na velikost kapacity kabelu neměla změna napětí naprosto žádný vliv, přičemž odpovídala velikosti udávané výrobcem.

Diplomová práce posloužila především k přípravě a následnému prozkoušení nových kabelových vodních koncovek. Dále by mohla posloužit jako návod nebo inspirace při dalším proměřování kabelů s koncovkami. Je v ní uveden také podrobný popis částečných výbojů a jejich měření, včetně způsobů eliminace rušivých vlivů.

Téma této práce jsem si vybral v souladu se svým osobním zájmem a se snahou rozšířit si vědomosti v této problematice. Práce mi umožnila doplnění znalostí z předmětu Technika vysokých napětí a беру ji jako cennou zkušenost pro moji další elektrotechnickou praxi.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 60270:2001. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů.*
- [2] KRBAL, *Technika vysokých napětí.* Skripta, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015
- [3] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení.* Praha: BEN - Technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] ČÁP, *Detekce a prostorová lokalizace částečných výbojů ve vysokonapěťových transformátorech metodou,* Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy.* Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s.. ISBN 80-7300-189-6.
- [6] MACEK, V. Částečné výboje: Diplomová práce. Brno, 2014.
- [7] ZÁLIŠ, K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů.* PRAHA, 2005, 139 s.
- [8] HAVLÍČEK, Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech.* Brno: 2009. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] Heafely Hipotronics [online]. 2016 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: http://www.haefely-hipotronics.com/em-sset/Low_LL_Partial_discharge_0114_SG_DEF.pdf
- [10] Hiptronics, DDX 7000 and 8009 [online]. 2012 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Hipotronics-DDX7000-8003_Series_Brochure.pdf
- [11] MACHALA, P. *Metody lokalizace polohy zdroje impulsního širokospektrého signálu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 99 s.
- [12] Kabel, [online]. [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kabel>
- [13] ORSÁGOVÁ, *Rozvodná zařízení,* Skripta, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015
- [14] ČSN 34 7010-82. *Elektrické kabely – Doplnující zkušební metody.*
- [15] ČSN 60885-3 ed. 2. *Elektrické zkušební metody pro elektrické kabely – Část 3: Zkušební metody pro měření částečných výbojů na výrobních délkách výtlačně lisovaných silových kabelů.*
- [16] Diagnostika výkonových transformátorů a kabelů [online]. [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/VNZ/VNZ_6-Diagnostika_vykonovych_transformatoru_a%20kabelu.pdf
- [17] Wikipedia.org: Electrical treeing [online]. 2014 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_treeing
- [18] STRAKA, TMV SS spol. s r. o., Diagnostika a testování silových kabelů, [online]. [cit. 2017-11-05]. Dostupné z:

- <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/diagnostika-a-testovani-silovych-kabelu--13542>
- [19] KASZTENNY, Bogdan, Iliia VOLOH a Christopher G. JONES. Detection of incipient faults in underground medium voltage cables. 2009 Power Systems Conference [online]. IEEE, 2009, č. 1, s. 1-12 [cit. 2017-11-05]. DOI: 10.1109/PSAMP.2009.5262402. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5262402>
- [20] TOLAR, Možnosti detekce poruch na kabelových trasách. [online]. 2014 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/15273/1/Bakalarska_prace_Tolar_Lukas.pdf
- [21] FCC Public s. r. o.: Měření ztrátového činitele izolace silových kabelů [online]. 2014 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23877
- [22] Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech [online]. 2010 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricke-stromecky-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech--10217>
- [23] Understanding electrical treeing [online]. 2014 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://indianwiresandcables.blogspot.com/2014/09/understanding-electrical-treeing.html>
- [24] HIDLER, A. *Partial discharge measurement*. BRNO, 2014.
- [25] PLAČEK, *Diagnostika kabelů vysokého napětí*, Bakalářská práce, 2012
- [26] Haefely Hipotronics, *CABLE TEST TERMINATIONS & WATER PROCESSING UNIT*, 2013
- [27] Kannan M, Prof. P. Sreejaya - Partial-Discharge-Detection-in-Solid-Dielectrics [online]. 2013 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <https://www.ijser.org/researchpaper/Partial-Discharge-Detection-in-Solid-Dielectrics.pdf>
- [28] HIPOTRONICS, INC. *USER'S GUIDE Model Number: DDX8003*
- [29] ZEIFART, *Rozložení elektrického pole ve vysokonapětových kabelových koncovkách a spojkách*, Bakalářská práce, ČVUT, 2016.
- [30] KUFFEL, E. ZAENGL, W.S. a KUFFEL, J. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Vyd. 2. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0-7506-3634-3.
- [31] TYCO ELECTRONICS. *Silové kabelové soubory*. Produkrový katalog. 2002.
- [32] GAJDOŠ, *Měření částečných výbojů na VN kabelech*, Zkušební postup, 2006
- [33] Operating Instructions: 2840/2840a, *High-Precision C, L and tan δ Measuring Bridge*, Version 1.6. In: HAEFELY HIPOTRONICS [online]. Basel: -, 2016 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://update.haefely.com/Ct2840/_private/Instructions%20Manual%202840.pdf.
- [34] MITTAL, M. K., L. SRIDHAR, Manish TAMRAKAR, SHRIKISHAN, R. P. AGARWAL a S. S. RAJPUT. *Innovative system for precision measurement of high voltage capacitance & tan δ* . In: International Journals of Multi-Dimensional Research [online]. Haryana (India): -, 2014 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://ijmr.net.in/download.php?filename=PuXXI2Wc51dGP3N.pdf&new=IJPA2462Feb5.pdf>.
- [35] R. Gleyvod and P. Mohaupt, "Operation of Water Terminations for Testing Power Cables", nt'l. Sympos. High Voltage Eng. (ISH), Yokohama, Japan, paper 697, 1993.

- [36] Heafely Test AG, High Voltage Test Division, www.heafely.com, Switzerland
- [37] A. Sayah et al.: Optimization of Water Terminations for Testing of Solid Dielectric Cable, 2016
- [38] Wikipedia.org: Scheringův můstek [online]. 2014 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Scheringbr.svg>
- [39] Myron L Company. [Online] 2009. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: http://www.myronl.com/PDF/application_bulletins/di_ab.pdf
- [40] Haefely, *Cable Test Terminations KEV Series*, [cit. 2018-03-20], www.haefely.com, Switzerland
- [41] Haefely, *Operating Instruction CTT manual*, [cit. 2018-03-20], www.haefely.com, Switzerland
- [42] Haefely, *WPU Water Processing Unit manual*, [cit. 2018-03-20], www.haefely.com, Switzerland
- [43] HURTA, *Porovnávání náročnosti přípravy destilované vody v laboratoři*, bakalářská práce, Univerzita Palackého, 2011 v Olomouci
- [44] Wikipedia.org: Dielektrikum [online]. 2017 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>
- [45] *32 Elektroizolační materiály a dielektrika* [online]. In: - [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/32%20%20Elektroizola%ED%20materi%E1ly%20a%20dielektrika.doc>.
- [46] Wikipedia.org: *Scheringbrücke*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Scheringbr%C3%BCcke>
- [47] ČSN IEC 60502-2, *Kabely s výtlačně lisovanou izolací a jejich příslušenství pro jmenovitá napětí od 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) do 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Část 2: Kabely pro jmenovitá napětí od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 30 kV ($U_m = 36$ kV)*
- [48] PNE 34 7625, *VN kabely se zesítěnou PE izolací pro distribuční sítě do 35 kV*, 4. vydání ČEZ Distribuce, Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, 2011
- [49] GRILL, J. *Izolační a dielektrické vlastnosti vody: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Špínka.
- [50] MALIK, *Calculation of Electric Field Distribution at High Voltage Cable Terminations*. [online]. [cit. 2018-03-20], King Saud University, Saudi Arabia. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/ab77/b3e195c0bde5e20f5631d6d4d3c19bb6c30e.pdf>
- [51] STRAKA, *Přehled dielektrické spektroskopie a diagnostiky 0,1 Hz*, Měřicí a testovací přístroje pro energetiku a průmysl, Studánková 375, Praha 4, www.tmvss.cz.
- [52] DIN VDE 0276-620, (N)A2XS(F)2Y 20.8/36, *Mittelspannungskabel mit VPE-Isolierung*, NKT cables. [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: http://www.nkt.com/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/_N_A2XS_F_2Y_20.8_3_kV_DS_DE_EN.pdf
- [53] ČSN EN 50397-1, *Izolované vodiče pro venkovní vedení a příslušné armatury pro jmenovité napětí nad AC 1 kV*

-
- [54] WOSCHITZ, Richtlinie zur Qualitätsuntersuchung, *Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit an VPE-isolierten Energiekabeln*, Nennspannungen U₀/U 6/10 kV, 12/20 kV bzw. 18/30 kV, 2004
- [55] VYSOKONAPĚŤOVÉ ZKUŠEBNICTVÍ - Napěťové zkoušky [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/VNZ/VNZ_3-Napetove_zkousky.pdf
- [56] IEEE, *Standard Test Procedure for Impulse Voltage Tests on Insulated Conductors*, IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 2003
- [57] DRÁPALA, Jaromír. KURSA, Miroslav. Elektrotechnické materiály: učební text [online]. [cit. 2018-04-12]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné z: www.person.vsb.cz/archived/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf
- [58] MALIK, *Analytical Calculation of AC and DC Electric Field Distribution at High Voltage Cable Terminations*, Arab J Sci Eng (2014), [online]. [cit. 2018-03-20], Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-013-0939-9>