

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv kabelových souborů na výbojovou činnost
v kabelech

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tadeáš KYNČL**

Osobní číslo: **E15N0024P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Vliv kabelových souborů na výbojovou činnost v kabelech**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište konstrukci a technologii výroby kabelů a kabelových souborů pro napětí do 6/10 kV.
2. Vypracujte přehled zkušebních metod pro tyto kabely a kabelové soubory.
3. Popište jednotlivé typy částečných výbojů, jejich vznik a vliv na životnost izolace kabelů.
4. Provedte měření částečných výbojů na samostatných kabelech a kabelech s kabelovými soubory.
5. Provedte analýzu, vyhodnocení a interpretaci získaných výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

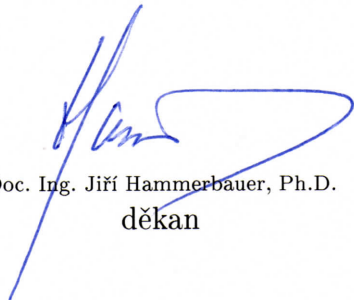
- 1. elektronické informační zdroje sciencedirect, IEEE**
- 2. Buchlovský, E., Houžvička, F., Grešík, P.: Výroba kabelů a vodičů, SNTL ? Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1986;**
- 3. Artbauer, J. a kolektiv: Kabely a vodiče, SNTL ? Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1956**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**


Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou částečných výbojů v kabelech a kabelových souborech. V první části práce je popsána výroba silnoproudých kabelů, typy kabelových souborů a zkušební metody kabelů a kabelových souborů. V druhé části práce jsou uvedeny typy částečných výbojů, jejich dělení a účinky na izolační materiál. Též jsou popsány metody měření částečných výbojů. Třetí část se zabývá praktickými zkouškami na daných vzorcích kabelů. V závěru práce jsou interpretovány výsledky získané měřeními.

Klíčová slova

Částečný výboj, kabel, kabelový soubor, kabelové zakončení, kabelová spojka, napětí, zkouška

Abstract

This thesis deals with cable accessories and its influence on partial discharges of cables. The first part of this paper is focused on the manufacturing process of high voltage cables, types of cable accessories and methods for testing their properties. In the second part the different types of partial discharge and its effects on the insulation material are described. In order to prove the hypotheses stated in the first two parts, several samples have been examined and measured. The results of the measurement are discussed in the conclusion of the thesis.

Key words

Partial discharge, cable, cable accessories, cable termination, cable joint, voltage, test

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5. 5. 2017

Tadeáš Kynčl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Piherovi, Ph.D. za cenné odborné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod	11
1 Kabely a kabelové soubory	12
1.1 Rozdíly mezi izolantem a dielektrikem	12
1.2 Názvosloví	13
1.3 Značení kabelů	14
1.4 Výroba kabelů	15
1.4.1 Stroje ve výrobě	15
1.4.2 Výroba drátů	15
1.4.3 Výroba jader	17
1.4.4 Izolování jader	19
1.4.5 Duše a plášť kabelu	22
1.5 Kabelové soubory	23
1.5.1 Kabelová zakončení	23
1.5.2 Kabelové spojky	27
1.6 Zkušební metody kabelů	29
1.6.1 Kusové zkoušky	29
1.6.2 Výběrové zkoušky	31
1.6.3 Typové zkoušky	32
1.6.4 Elektrické zkoušky po instalaci	33
1.7 Zkušební metody kabelových souborů	34
2 Částečné výboje	35
2.1 Účinky částečných výbojů	36
2.2 Dělení částečných výbojů	37
2.3 Typy částečných výbojů	37
2.4 Veličiny popisující částečné výboje	51
2.5 Napětí popisující částečné výboje	53
2.6 Metody měření částečných výbojů	54
2.6.1 Elektrické metody měření částečných výbojů	55
2.6.2 Neelektrické metody měření částečných výbojů	60

3 Praktické zkoušky kabelů a kabelových souborů	62
3.1 Popis měřených vzorků	62
3.1.1 Kabel 6-CXKFE-R/LOCA 1x240	62
3.1.2 Kabel 10-CXKFE-R/LOCA 3x35	63
3.1.3 Kabel 6-CHKFE-V 3x120 SM	63
3.2 Napěťová zkouška	64
3.3 Měření částečných výbojů	64
3.4 Shrnutí a diskuze výsledků	65
4 Závěr	68
Reference	69
Přílohy	I
Příloha 1: Naměřené diagramy - vzorek 1.1	I
Příloha 2: Naměřené diagramy - vzorek 1.2	III
Příloha 3: Naměřené diagramy - vzorek 1.2	VI
Příloha 4: Naměřené diagramy - vzorek 2.1	IX
Příloha 5: Naměřené diagramy - vzorek 3.1	XIII
Příloha 6: Vybrané fotografie měřených vzorků	XIX
Příloha 7: Fotografie z měření	XXI

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka, symbol	Význam
ČV	částečný výboj
SCT	screen control tube - trubice pro řízení elektrického pole
D	střední kvadratický součet zdánlivých výbojů
E_p	elektrická pevnost
I	střední proud částečných výbojů
n	četnost impulzů
N	opakovací kmitočet impulzů
P	výkon částečných výbojů
q	zdánlivý náboj impulzu částečného výboje
q_p	zdánlivý náboj pozadí během měření
t_i	čas výskytu impulzu částečného výboje
U_0	jmenovité napětí
U_i	zapalovací napětí částečných výbojů
U_e	zhášecí napětí částečných výbojů
U_{Zk}	zkušební napětí
$\operatorname{tg} \delta$	ztrátový činitel
ϵ_0	permitivita vakua
ϵ_r	relativní permitivita
ρ	rezistivita
φ_i	fázový úhel částečného výboje

Úvod

Hlavním cílem této diplomové práce je ověřit vliv kabelových zakončení a spojek na výbojovou činnost v několika typech silnoproudých kabelů. V práci je popsána technologie výroby těchto kabelů a konstrukce jednotlivých typů kabelových souborů. Součástí první kapitoly je také přehled zkušebních metod pro kabely a kabelové soubory.

Dále se práce zabývá problematikou částečných výbojů, jejich účinky, dělením a jednotlivými typy. Uvedeny jsou též charakteristické veličiny popisující částečné výboje a metody jejich měření.

Praktická část práce je zaměřena na popis zkoušených vzorků kabelů, kabelových souborů a prováděných měření. Hlavním přínosem je samotné měření, jehož výsledky jsou vyhodnoceny na konci kapitoly ve spojení s poznatky získanými během montáží kabelových zakončení a spojek.

Závěr shrnuje obsah práce a prováděné zkoušky spolu s jejich výsledky pro jednotlivé vzorky kabelů. Na základě těchto výsledků je uvedeno také doporučení pro další montáže kabelových souborů.

1 Kabely a kabelové soubory

Rozvod elektrické energie je pro každého z nás samozřejmostí, proto je nutné dbát na kvalitu vytvářených vedení již ve stádiu výroby. Obecně platí, že nejnáchylnějšími místy k poruchám celého kabelového vedení jsou konce kabelů a kabelové spoje. Důvodem je především nerovnoměrné rozložení elektrického pole a tím zvýšené namáhání izolace. S tím mimo jiné souvisí také vznik částečných výbojů, které svojí činností způsobují degradaci izolačního materiálu. Pro omezení takto způsobených poruch je potřebné využít vhodných kabelových souborů.

Tato kapitola se zaměřuje na výrobu kabelů již od zpracování samotných drátů přes jednotlivé výrobní operace po konečné nanesení pláště. Dále jsou uvedeny typy kabelových zakončení podle způsobu montáže a kabelové spojky dle využití. Důležitými částmi kapitoly jsou též zkušební metody kabelů a kabelových souborů. Zde jsou popsány kusové, výběrové a typové zkoušky prováděné za účelem dodržení výše zmíněné kvality kabelového vedení.

1.1 Rozdíly mezi izolantem a dielektrikem

Dle [1] jsou izolanty materiály potřebné k zamezení průchodu proudu a dielektrika materiály sloužící k zadržování elektrické energie. Z hlediska fyzikální podstaty věci ale rozdíly mezi izolantem a dielektrikem nejsou. Rozdíly se vyskytují pouze v požadavcích na obě látky při elektrotechnickém použití. Požadavky na izolanty jsou charakteristické vysokým měrným odporem (rezistivitou), minimálně $\rho = 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, a vysokou elektrickou pevností, minimálně $E_p = 10 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Požadavky na dielektrika jsou pak dány vysokou permitivitou při co nejmenších dielektrických ztrátách (kompromis mezi ϵ a $\text{tg } \delta$) a taktéž vysokou elektrickou pevností.

1.2 Názvosloví

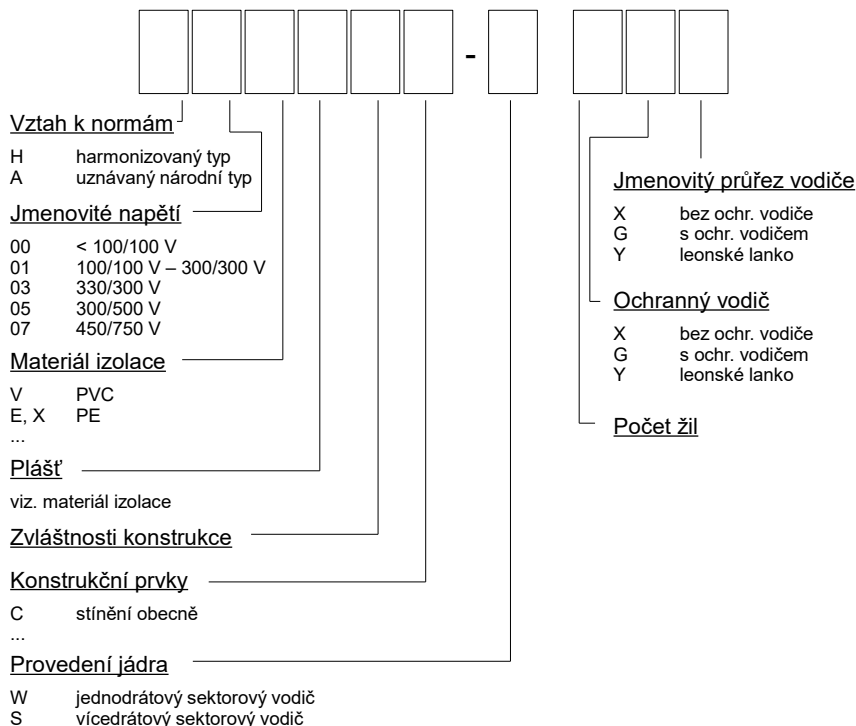
Pro snazší proniknutí do problematiky kabelů je nutné nadefinovat si základní nejdůležitější pojmy z této oblasti. Kabelářským názvoslovím se zabývá norma ČSN 34 5123 [2], podle které je zpracován následující přehled.

Tabulka 1: Základní pojmy z názvosloví

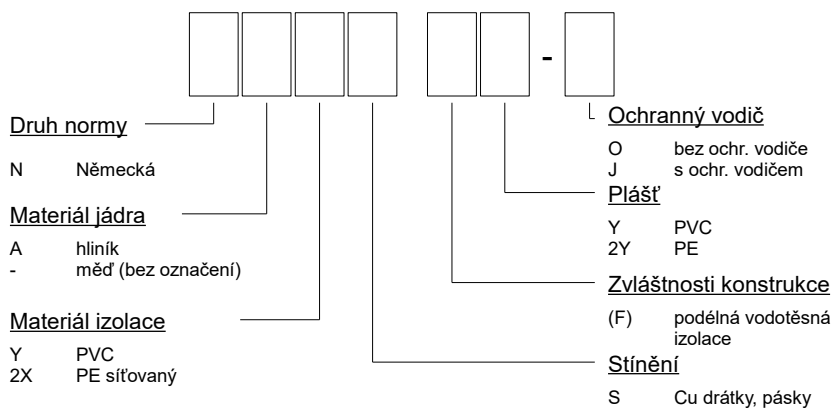
Pojem	Vysvětlivka
jmenovitá hodnota	hodnota veličiny, kterou se označuje nebo charakterizuje výrobek, případně konstrukční prvek
dovolená hodnota	hodnota přípustná technickou normou (specifikací)
vodič	všeobecný termín pro elektrický předmět sloužící k přenosu elektrické energie nebo informace
silový vodič	izolovaný vodič určený pro přenos elektrické energie
drát	jádro kruhového průřezu nebo součást vícedrátového jádra
jádro	konstrukční prvek kabelu, zpravidla kovový pro vedení elektrického proudu
izolace	konstrukční prvek určený na elektrické izolování jádra
žíla	konstrukční prvek kabelu skládající se z jádra a izolace (izolované jádro)
výplň	konstrukční prvek vyplňující prostory mezi žilami a mezi žilami a pláštěm
duše kabelu	soustava veškerých konstrukčních prvků kabelu pod pláštěm
plášť	konstrukční prvek chránící konstrukční prvky pod ním proti vlivu vlhkosti, případně dalším škodlivým vlivům
kabel	je jádro (nebo soustava jader) s izolací nebo ochrannými obaly, případně s dalšími konstrukčními prvky určenými na přenos elektrické energie
silnoproudý kabel	kabel určený pro přenos elektrické energie proudem průmyslové frekvence nebo proudem stejnosměrným

1.3 Značení kabelů

Ač má každý výrobce svůj způsob značení silových kabelů, můžeme se setkat se třemi nejčastěji využívanými způsoby. Jedná se o značení dle norem ČSN 34 7401 (neplatná), ČSN 34 7409 a německé DIN VDE. Níže uvedené obrázky vysvětlují jednotlivé znaky v kódech. Z důvodu rozsáhlosti značení jsou zde pro příklad uvedeny jen některé důležité konkrétní znaky.



Obrázek 1: Označení kabelů dle ČSN 34 7409 [3, 4]



Obrázek 2: Označení silových kabelů dle německé normy DIN VDE [3]

1.4 Výroba kabelů

V dnešní době je téměř celý proces výroby kabelů automatizovaný za pomoci různých strojů. Ruční práce se objevuje jen minimálně, například při seřizování strojů a jejich obsluze nebo při manipulaci s hotovými celky. Výrobní procesy jednotlivých druhů kabelů (silové, sdělovací, optické) se nijak zvlášť neliší, zaměřím se proto jen na kabely silové. V této podkapitole jsou uvedeny základní výrobní operace tak, jak je popisují [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

1.4.1 Stroje ve výrobě

Základními (společnými) stroji při výrobě kabelů jsou odvíjáky, navijáky a odtahy. Odvíják je zařízení, které slouží k upnutí cívky a umožňuje odvíjet daný drát, žílu nebo kabel. Konstrukční řešení musí zohledňovat, že náplň cívky má běžně několik tun. Existuje mnoho typů odvíjáků, například osový, bezosový, stojanový, sloupový nebo portálový. Naviják slouží k rovnoměrnému navinutí výrobku na další cívku nebo buben. Konstrukce je stejná jako u bezosových odvíjáků, jen je zde navíc rozváděcí zařízení a je poháněn elektromotorem. Dalším strojem je odtah. Ten zajišťuje plynulý posuv výrobku strojem určitou předepsanou rychlostí. Využívá se dvou typů odtahových zařízení, a to kolového (kotoučového) odtahu a pásového (houseskového) odtahu.

Dalšími stroji jsou lisy, pece a stroje lanovací, izolační, extruzní, ovíjecí, opřádací a oplétací. Funkce jednotlivých zařízení bude vysvětlena dále v jednotlivých krocích výrobního procesu.

1.4.2 Výroba drátů

Válcování drátů

V prvním kroku výroby drátů se taví katodové desky a odlévají se do takzvaných barníků, což jsou čtverhranné tyče o hmotnosti kolem 100 kg. Odlévají se na stojato, aby se eliminovaly dutinky vznikající v horní vrstvě, které způsobují oxidaci povrchu barníku. Dalším krokem je ohřev tyčí v elektrických pecích na teplotu 800 - 900 °C a následné válcování kalibrovacími válci. Výsledkem tohoto procesu je drát kruhového profilu o průměru 6 - 8 mm.

Moření drátů

Při válcování drátu vzniká na jeho povrchu vrstva oxidu mědi. Tu je nutné před dalším zpracováním odstranit za pomoci moření. Využívá se dvou způsobů, a to moření ve vanách či průběžného moření. V prvním případě se kruhy měděného drátu ponoří na 10 minut do 15% roztoku kyseliny sírové o teplotě 40 °C. Následně se kruhy vyjmou, opláchnou proudem vody a opět ponoří do roztoku pro neutralizaci kyseliny sírové. Při průběžném moření prochází drát lázní kyseliny chlorovodíkové o teplotě 60 - 70 °C. Kyselina se pak odstraňuje vodou v několikastupňové oplachové sekci. Následuje sušení ofukováním parní a vzduchovou tryskou.

Tažení drátů

Při tažení drátu je postupně zmenšován jeho průměr protahováním tažecími průvlaky. Protahování prodlužuje drát zhruba o 20 %, tudíž je nutné proces několikrát opakovat. Z důvodu prodlužování drátu musí být odtahová rychlost každého následujícího tažecího kotouče vyšší. Využívá proto dvou typů tažeček - tandemové a kuželové. Kotouče tandemových tažeček mají shodné průměry, ale každý z nich se otáčí jinou rychlostí. V případě kuželových tažeček je tomu naopak - všechny kotouče mají stejnou rychlost otáčení, ale jsou jiného průměru. Pro dosažení hladkého a lesklého povrchu drátu je nutné jej při procesu tažení intenzivně mazat. K tomu slouží emulze, která současně tažený drát chladí.

Tabulka 3: Rozdělení tažecích strojů podle průměru drátu

Tažecí stroj	Vstupní průměr drátu [mm]	Konečný průměr drátu [mm]
Hrubotah	12,5 - 6,0	4,5 - 1,0
Střední tah	4,5 - 1,4	1,8 - 0,1
Jemný tah	0,8 - 0,5	0,25 - 0,04
Zvlášť jemný tah	0,15 - 0,05	do 0,01

Žihání drátů

Vzhledem k tomu, že dráty během tažení za studena tvrdnou, tudíž nejsou dále prakticky použitelné, je nutné jejich žihání. Používají se dva způsoby - průběžné žihání a žihání v šachtových pecích v ochranné atmosféře. V případě průběžného žihání jsou za hrubotahy nebo středními tahy umístěny kontaktní kladky, pomocí kterých teče drátem velký proud a ohřívá jej na danou žihací teplotu. U elektricky vytápěných pecí se žihají celé svitky drátu při teplotách 200 - 300 °C.

1.4.3 Výroba jader

Jádra kabelů lze rozlišit na jednodrátová a vícedrátová. Výroba jednodrátových jader je prováděna přímo na tažecích strojích a je popsána v předchozí podkapitole. Vícedrátová jádra se vyrábějí lanováním, a to pravidelným nebo nepravidelným. Hlavním důvodem jejich výroby je potřeba získat vodiče méně tuhé a více ohebné, než je tomu v případě jednodrátových jader. Při procesu lanování jsou jednotlivé dráty ukládány ve šroubovicích kolem jednoho nebo více drátů ležících v ose lana. Zmíněnou šroubovici tedy definují dva pohyby - posuv ve směru osy lanování a otáčení kolem osy lanování. Stroje využívané v tomto kroku výroby kabelů se nazývají lanovky (lanovací stroje) a lze je podle konstrukčního řešení rozdělit do tří skupin - košové lanovky, rychlolanovky a zkrucovačky.

Košové lanovky

Košové lanovky jsou charakterizovány kruhovým ocelovým rámem (košem), ve kterém jsou uchyceny strojní cívky. Pokud je potřeba stáčet velký počet drátů, jsou jednotlivé koše řazeny za sebou podél osy stroje. Košové lanovky lze rozdělit podle polohy, kterou strojní cívky zachovávají při otáčení koše, na lanovky se zpětným otáčením a bez zpětného otáčení. V případě lanovek se zpětným otáčením zachovává strojní cívka stále stejnou polohu vzhledem k okolnímu prostoru. U lanovek bez zpětného otáčení si strojní cívka zachovává stále stejnou polohu vzhledem ke koši. Odvíjený vodič se tak otočí kolem své vlastní osy o 360° při každé otáčce koše.

Rychlolanovky

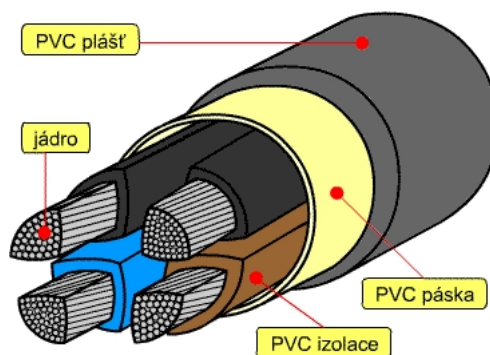
Rychlolanovku, jinými slovy trubkovou či doutníkovou lanovku, lze popsat jako ocelovou trubku s odvalovacími koly, díky kterým se může otáčet mezi otočnými kladkami. Rychlost otáčení může být vysoká, jelikož odstředivé síly jsou velmi malé i při vysokých otáčkách koše. Strojní cívky jsou uchycené v rámech, které se při otáčení trubky neotáčejí. Dráty jsou odtahovány po vnitřním plášti trubky a následně stáčeny v lanovacím průvlaku. Výsledný způsob stáčení je stejný jako v případě košové lanovky se zpětným otáčením cívek.

Zkrucovačky

V případě zkrucovaček jsou strojní cívky s jednotlivými dráty umístěny mimo koš stroje. Uvnitř stroje se nachází pouze jedna cívka, která je určena pro navíjení finálního produktu. Nejvyžívanějším typem je zkrucovačka s dvojitým zkrutem. Na rozdíl od klasického pravidelného lanování nevznikají přesné šroubovice, nýbrž jsou jednotlivé dráty pouze stočeny do pramence. Z toho také plyne, že obvod takto vytvořeného lana není přesně kruhový. Zkrucovačky se používají pro malé průřezy drátů.

Lisování do sektorů

V případě silových kabelů o větším průřezu se jádra lisují do takzvaných sektorů. Sektory mají tvar kruhové výseče a úhel dle počtu žil. U třížilových kabelů je úhel 120° , u čtyřžilových 90° . Důvodem lisování je lepší využití prostoru v kabelu. Pozornost se však musí věnovat i ostrým hranám sektorového jádra, které způsobují nepříznivé elektrické namáhání izolace. Z tohoto důvodu jsou hrany zaobleny.



Obrázek 3: Kabel se sektorovými jádry (převzato z [12])

1.4.4 Izolování jader

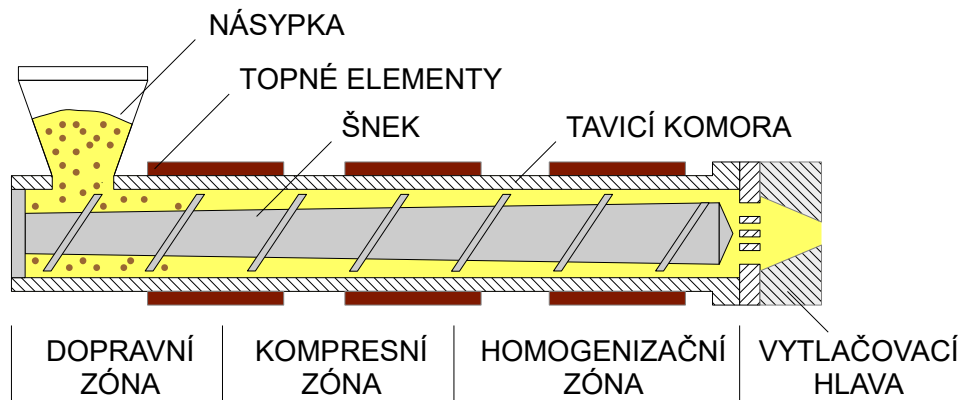
Dalším krokem výroby kabelu je izolování jader. Jelikož právě izolace udává konečné vlastnosti celého kabelu, je nutno věnovat její výrobě zvýšenou pozornost. V zásadě existují dva typy vytváření izolační vrstvy - ovíjení páskovým materiálem a průběžné vytlačování plastu přímo na vodič.

V dřívější době se nejčastěji využívalo papírové pásky, kterou se jádro ovinulo, následně se páska vysušila a důkladně naimpregnovala. Zde je důležitá rovnoměrnost, přesnost a stupeň překrytí papírové pásky a stejně tak absence jakýchkoliv záhybů či vrásek. V případě, že by napětí v tahu nebylo rovnoměrné v celé šířce pásky, byla by více namáhána jedna hrana a docházelo by k jejímu trhání. V současné době se však od papírové izolace kabelů upustilo a používá se spíše v případech izolace vinutí olejových transformátorů nebo točivých strojů. Technologie ovíjení se ale využívá i nadále, například pro izolační mezivrstvy kabelů z plastových pásek.

Majoritní postavení mají již dlouhou dobu izolace z plastových materiálů. Jejich velkou výhodou je především nízká cena a velmi snadná zpracovatelnost. Nejčastějšími materiály jsou polyvinylchlorid (PVC), polyethylen (PE) a zesítený polyethylen (XLPE). Zesítním získává polyethylen lepší vlastnosti z hlediska teplotní, chemické a mechanické odolnosti (rázová houževnatost, odolnost vůči otěru, elastické vlastnosti, odolnost vůči vzniku trhlin), s čímž souvisí také delší životnost. Existuje několik využívaných metod pro síťování PE, a to zejména síťování radiačním zářením, síťování peroxidy, síťování azo sloučeninami a síťování silany, přičemž poslední zmíněná metoda představuje 90 % z celkové výroby v porovnání s ostatními metodami síťování. [13, 14]

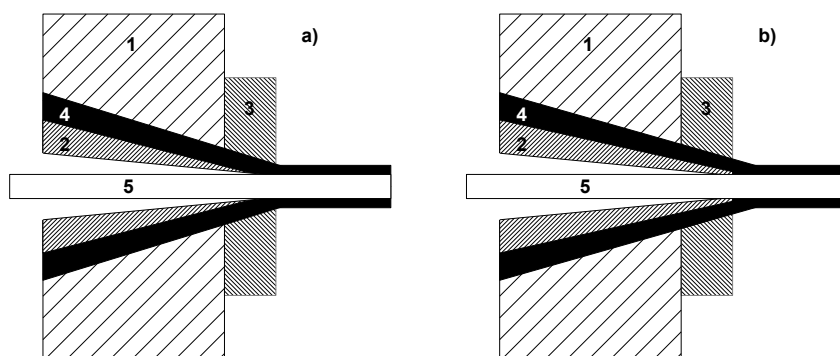
Průběžné vytlačování

Průběžné vytlačování je v současnosti nejvyužívanější metodou vytváření izolace kabelu. Na obrázku 4 můžeme vidět schéma extrudéru, jehož hlavními částmi jsou násypka, tavicí komora, šnek a vytlačovací hlava. Materiál postupuje strojem třemi zónami: dopravní zónou, která zajišťuje plnění komory granulátem a jeho předehřev, kompresní zónou, kde se z granulátu stává plastická hmota, a homogenizační zónou, ve které získává hmota potřebný tlak k průchodu vytlačovací hlavou.



Obrázek 4: Schéma vytačovacího stroje [10]

Vytlačovací hlava se v zásadě skládá z trnu (kuželu), kterým prochází jádro, a matrice. Mezikruží dané trnem a matricí udává výsledný tvar izolace. Z toho vyplývají také rozměry, které jsou dány vnějším průměrem trnu a vnitřním průměrem matrice. Podle vzájemné pozice trnu a matrice lze rozlišit dva druhy vytlačování - tlakové a trubkové. Při tlakovém vytlačování je trn umístěn před matricí a plastický materiál je přes ni takzvaně přetlačován. Výhodou je vyplnění veškerých mezer (například mezery mezi dráty u lanovaného jádra). Při trubkovém způsobu vytlačování lícuje trn s matricí nebo může i přecházet. Izolace ve tvaru trubky tak dosedne na jádro, ale nevyplní mezery. Tohoto způsobu se využívá především u sektorových jader. Na obrázku 5 jsou zobrazeny vytačovací hlavy pro oba způsoby vytlačování.



Obrázek 5: Postavení trnu a matrice: a) tlakové vytlačování, b) trubkové vytlačování; 1 - rozdělovací trn, 2 - trn, 3 - matrice, 4 - vytlačovaný materiál, 5 - jádro [5]

U vysokonapěťových silových kabelů se běžně na jádro nanáší více vrstev (izolační a polovodivé vrstvy), které mají různá složení. Vytlačování se provádí buďto dvěma stroji v tandemu nebo dvojitou vytlačovací hlavou. Ta obsahuje dva trny a jednu matici, jelikož otvor druhého trnu plní funkci matrice.

Pro izolování žil kabelů ze zesíťovaného polyethylenu (XLPE) se využívá řetězovková linka. Během jedné operace jsou průběžně vytlačováním nanесeny tři izolační vrstvy - polovodivá, izolační a polovodivá. Většinou je první polovodivá vrstva nanášena samostatnou hlavou a zbylé dvě vrstvy následně zmíněnou dvojitou vytlačovací hlavou. V případě síťování peroxidy následuje po nanесení výše uvedených vrstev průchod kabelu zesíťovací rourou, která je rozdělena do několika topných zón. Důležitými parametry jsou při této metodě síťování teplota, tlak a doba. Délka roury bývá kolem 85 m a její průměr 200 mm. Během zesíťování se využívá dusíku o tlaku 0,8 - 1,0 MPa pro vyloučení úniku těkavých látek a vzniku dutin v izolaci. Posledním krokem je pak chlazení protiproudem dusíku, který je ochlazován v chladiči. Dříve se jako výhřevné a tlakové médium používala nasycená vodní pára a k chlazení studená voda. V tomto případě však pronikaly do materiálu molekuly vody a snižovaly tím průraznou pevnost izolace.

Polovodivé vrstvy

Jak z výše uvedeného textu vyplývá, využívá se kolem izolační vrstvy dvou polovodivých vrstev. Hlavním účelem použití vnitřní polovodivé vrstvy je ovládnání elektrického pole v izolaci a vyhlazení povrchu na rozhraní s izolací. Právě vyplnění mezer a vyrovnání ostrých hran je důležité z hlediska eliminace vzniku částečných výbojů. Materiál je tvořen zesíťným polymerem s podílem uhlíkových sazí, který vytváří určitou elektrickou vodivost vrstvy [15]. Jelikož má jádro relativní permitivitu blízkou nekonečnu a izolační vrstva z XLPE v řádu jednotek, umožní polovodivá vrstva s relativní permitivitou v řádu tisíců rovnoměrnější rozložení elektrického pole [16]. Zároveň je elektrická vodivost polovodivé vrstvy nesrovnatelně menší, než vodivost jádra, což vylučuje podélné vedení proudu polovodivou vrstvou [17]. Vnější polovodivá vrstva je využívána ke stejnému účelu a nalezneme ji mezi izolační vrstvou a stíněním.

1.4.5 Duše a plášť kabelu

U běžných silových kabelů je tvorba duše spojena do jedné operace s nanášením výplňové směsi a pláště kabelu. Jednotlivé žíly jsou stáčeny těsně před vstupem do extruzní hlavy a zároveň je na ně aplikován separační materiál, nejčastěji mastek, sloužící k lepšímu oddělení jednotlivých vrstev kabelu. Stáčení duše zajišťuje držení tvaru a lepší ohýbání konstrukce kabelu. V případě stáčení žil těsně před vstupem do extrudéru se využívá takzvaná technologie SZ zákrutu, která spočívá v protažení žil skrz kolébku stáčející kabelovou duši střídavě doleva a doprava. Pokud je požadavek na větší počet konstrukčních prvků, využívá se stáčení na lanovacím stroji, přičemž probíhá i ovin duše různými voděodolnými, ohniodolnými nebo stínícími páskami. Výslednou kruhovitost kabelu zajišťují centrální a výplňové prvky. Celková konstrukce kabelové duše je většinou zajištěna ovinem PET páskou nebo fixačním vláknem.

Výplň má za úkol vyplnit prostor mezi žilami a zajistit tak výsledný tvar kabelu. Nemá tedy ve většině případů funkci izolace a lze pro její výrobu využít levnější materiály, jako například EPDM. Jak již bylo zmíněno výše, nanášení probíhá v tandemu s pláštěm.

Před nanesením pláště však může vzniknout potřeba vytvoření stínění nebo další mechanické bariéry. Stínění se vytváří nejčastěji opletem pocínovanými měděnými drátky. K zajištění zmíněné mechanické bariéry se využívá opletu železnými pozinkovanými drátky nebo pancéřem složeným z podélných hliníkových nebo železných pozinkovaných drátů ovinutých železnou pozinkovanou páskou.

Plášť kabelu je pak nanášen vytlačováním a drží celou konstrukci pohromadě. Úkolem pláště je zajištění ochrany před nepříznivými vlivy, jako je mechanické namáhání, vlhkost nebo nežádoucí UV záření.

1.5 Kabelové soubory

Kabelové soubory, někdy též kabelové příslušenství, lze rozdělit na dvě základní skupiny - kabelová zakončení a kabelové spojky. Vzhledem k narušení homogenity kabelového vedení, výskytu ostrých hran a v některých případech i ztenčení izolačního materiálu, představují kabelové soubory nejslabší článek vedení. Z tohoto důvodu je věnována zvýšená pozornost měření částečných výbojů právě tam, kde se tyto kabelové soubory vyskytují. [18, 19]

1.5.1 Kabelová zakončení

Kabelové zakončení neboli kabelová koncovka slouží ke konečnému připojení kabelu ke zdroji, respektive spotřebiči. Důležité je kvalitní provedení tak, aby elektrické pole koncovky neohrožovalo okolní prostředí a zároveň, aby do koncovky nepronikala vlhkost. Právě pronikání vlhkosti by mohlo mít za následek degradaci izolačního materiálu. Vzhledem k technologii montáže lze rozdělit kabelové koncovky na dolévací koncovky, za tepla smrštitelné koncovky a za studena smrštitelné koncovky. [15]

Dolévací koncovky

Dolévací koncovky jsou starší technologií využívanou pro kabely s papírovou izolací (kabely PILC). Mezi kabelovým okem a kovovým pláštěm je umístěna dolévací nádoba naplněná kabelovým olejem. To zajišťuje, že papírová izolace nevysychá a zabraňuje se tím snížení průrazné pevnosti izolace. Dolévací nádoba je na obou koncích utěsněna teplem smrštitelnou trubicí. Pro samotné spojení je využívána lisovací hliníková trubička, případně šroubovací varianta. Spojka je po doplnění chybějící izolace, zaletování do olověné rakvičky a doplnění uzemnění zalita v litinovém loži asfaltem. Pro lepší rozložení elektrického pole se papír prokládá tenkými děrovanými hliníkovými pásky. To však způsobuje přítomnost vzduchových dutin a tím pádem větší náchylnost na vznik částečných výbojů. Nutno říci, že se dnes tento typ koncovek již téměř nevyužívá. [15, 20, 21]



Obrázek 6: Dolévací koncovka (převzato z [20])

Za tepla smrštitelné koncovky

V dnešní době jsou nejvíce využívaným typem koncovky smrštitelné za tepla. Oproti výše uvedeným dolévacím koncovkám je montáž mnohem jednodušší a rychlejší. Výsledné zakončení je zároveň kvalitnější a méně náchylné k poruše. Ve srovnání s koncovkami smrštitelnými za studena jsou koncovky smrštitelné za tepla lépe odolné vůči částečným výbojům, jelikož lépe vyplní vzduchové mezery. [20]

Koncovka smrštitelná za tepla se většinou skládá z kabelového oka, měděné síčky, výplňové pásky, případně silikonové trubice, teplem smrštitelné izolační trubice a dalších těsnících pásek. Kabelové oko je stejně jako v předchozím případě hliníkové nebo měděné a může být v lisovací nebo šroubovací variantě.

Konce polovodivých vrstev a spojení jader jsou ovinuty páskou pro řízení elektrického pole, jejíž sekundárním účelem je vyplnění vzduchových mezer k zabránění vzniku částečných výbojů. Určitou nevýhodou může být různá tloušťka vytvořené vrstvy,

jelikož se páska ovíjí ručně. Alternativou k polovodivé pásce může být zmíněná silikonová trubice (SCT - Screen Control Tube) o velké permitivitě, která se pouze nasune a teplem smrští. Oproti ručně navíjené pásce je montáž SCT snazší a výsledná vrstva má lepší homogenitu. [15, 21]

Páskové stínění kabelu je vyvedeno pomocí nepájeného uzemňovacího vodiče nebo sítě. Montáž je zajištěna ovinem kovovou páskou.

Poslední vnější vrstvou je silnostěnná teplem smrštitelná izolační trubice, která překrývá spoj (kabelové oko), izolaci, polovodivou vrstvu a část stínění. Nahrazuje se jí tak původní plášť kabelu. Ke smrštění se využívá ohřevu horkovzdušnou pistolí nebo plynovým hořákem. Trubice je vyrobena ze zesíťovaného materiálu, stejně jako izolace kabelu. K zabránění pronikání vlhkosti do zakončení je vytvořeno několik vrstev ovinu těsnicí pásky na původním plášti kabelu, což lze pozorovat na obrázku 8 vpravo. Těsnicí páska je samozřejmě navinuta i na kabelovém zakončení zleva, což ale není na fotografii dobře vidět.



Obrázek 7: Nalisované kabelové oko a jednotlivé vrstvy kabelu



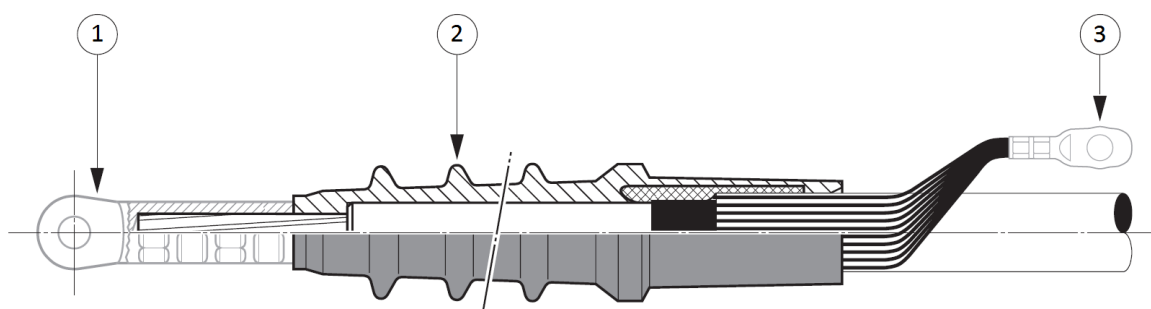
Obrázek 8: Hotové zakončení

Za studena smrštitelné koncovky

Struktura za studena smrštitelné koncovky je téměř stejná jako v případě teplem smrštitelné koncovky. Rozdíl je ve vnější izolační trubici. Ta se navlékne na předpřipravené zakončení a následně je odstraněna její podpůrná trubice, která zajišťuje roztažený stav. Po odstranění podpůrné trubice se izolační trubice smrští. Důvodem je elastická paměť silikonu, ze kterého je vyrobena. Vrstva pro řízení pole může být provedena buďto samostatně nebo jako součást samosmrštitelné trubice. Výhodou je rychlost a snadnost montáže bez použití tepelného zdroje. Nevýhodou je pak relativně nedokonalé přilnutí k povrchu kabelu (ve srovnání s teplem smrštitelnou koncovkou) a tím pádem větší náchylnost k částečným výbojům. [22]

Za studena nasunovací koncovky

Alternativou za studena smrštitelných koncovek je technologie slip-on. Využívá se již od šedesátých let minulého století a její montáž je snadná a velice rychlá. Spočívá v nasunutí silikonové trubice na předem připravený konec kabelu a následném připevnění šroubovacího nebo lisovacího kabelového oka na jádro kabelu. Řízení elektrického pole je zajištěno polovodivou vrstvou, která je součástí nasunovací trubice. Vzhledem k tomu, že je trubice na kabel pouze nasunuta, je tento typ koncovek ve srovnání s výše uvedenými typy méně odolný proti vzniku částečných výbojů. [22, 23]



Obrázek 9: Řez nasunovací koncovkou: 1 - kabelové oko, 2 - flexibilní silikonová trubice s integrovanou polovodivou vrstvou, 3 - zemnicí oko (převzato z [24])

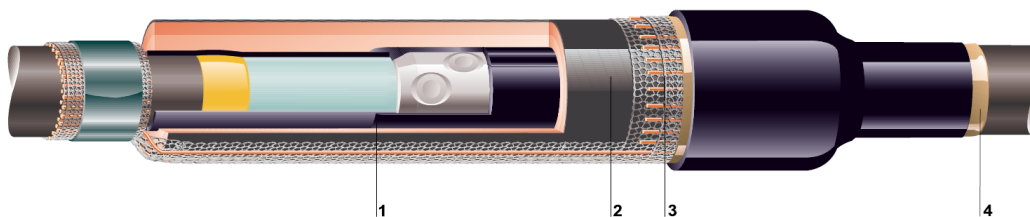
1.5.2 Kabelové spojky

Kabelové spojky jsou si svojí konstrukcí velmi podobné se zmíněnými kabelovými zakončeními. Používají se ke spojení dvou a více kabelů a zajišťují vodivé spojení jader, co nejlepší izolační vlastnosti, odvod tepla, zabraňují pronikání vlhkosti a v neposlední řadě chrání spoj před mechanickým poškozením. Podle využití lze kabelové spojky rozdělit na přímé, přechodové, odbočné a opravné.

Přímé spojky

Přímé spojky jsou využívány pro spojování kabelů stejných typů. Jsou složeny ze šroubovacího nebo lisovacího spojovače, vrstvy pro řízení elektrického pole ve formě pásky nebo trubice, výplňových pásek, silnostěnné izolační trubice, měděné sítky a vnější silnostěnné plášťové trubice.

Montáž spojky je též velmi podobná montáži kabelového zakončení. Jádra obou spojovaných kabelů jsou zasunuta do zmíněného spojovače, ve kterém se uprostřed často nachází zarážka pro dodržení stejnoměrného zasunutí jader. Nedochozí tak k přímému kontaktu jader a vodivý spoj je zajištěn spojovačem. Po nalisování či našroubování spojovače na jádra následuje ovin polovodivou a výplňovou páskou, případně nasunutí polovodivé trubice. Dalším krokem je montáž nejčastěji teplem smrštitelné izolační trubice, přes kterou je následně přetažena pocínovaná měděná síťka. Ta vodivě spojuje přerušené stínění kabelu. V případě, že není původní drátové stínění odstraněno a je taženo přes měděnou síťku, má takový spoj stejnou proudovou zátěžitelnost jako původní stínění. Měděná síťka je upevněna k původnímu stínění nejčastěji prostřednictvím kruhového pera. Posledním krokem je montáž vnější silnostěnné trubice, která zajišťuje odolnost vůči vlhkosti a mechanickou ochranu. [15, 21, 23]



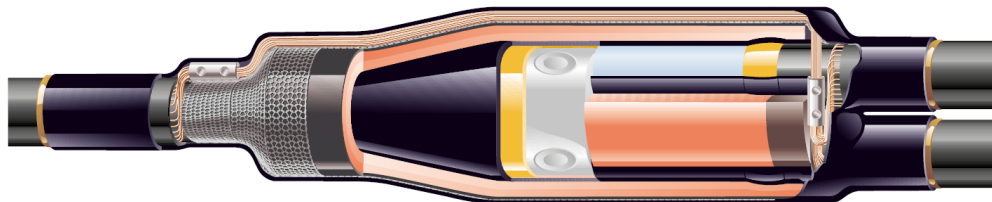
Obrázek 10: Řez přímou spojkou Raychem: 1. Řízení elektrického pole, 2. Izolace a polovodivé stínění, 3. Kovové stínění, 4. Vnější utěsnění a ochrana (převzato z [21])

Přechodové spojky

Přechodové spojky jsou využívány pro přechod vícežilových kabelů s papírovou izolací na více jednožilových kabelů s plastovou izolací a naopak. V prvním kroku je konec kabelu s papírovou izolací utěsněn prostřednictvím teplem smrštitelné trubice a rozdělovací hlavy. Trubice a rozdělovací hlava musejí být odolné vůči impregnační hmotě. Tímto způsobem se stává z kabelu s papírovou izolací kabel s polymerovou izolací a následná montáž je shodná s výše popsanou. [21, 23]

Odbočné spojky

Příprava kabelů pro odbočnou spojku je stejná jako v případě přímé spojky. Též se využívá nanesení pásky vyhlazující elektrické pole na konce polovodivých vrstev kabelu a trubice pro řízení elektrického pole. Jako spojovací element se u odbočných spojek používá nejčastěji šroubovací spojovač s předdefinovaným momentem. K propojení stínění se využívá měděná pocínovaná síťka a případně šroubovací spojovač. Vnitřní teplem smrštitelná izolační trubice a vnější plášťová trubice jsou stejné jako v případě přímé spojky. U odbočných spojek je přes plášťovou trubici aplikována ještě dvouprstá rozdělovací hlava. [21]



Obrázek 11: Řez odbočnou spojkou Raychem (převzato z [21])

Opravné spojky

Konstrukce opravné spojky může mít dvě provedení. První provedení spočívá v nahrazení části poškozené žíly novou žilou a následném propojení spojovačem na každém konci. Druhou variantou je použití dlouhé opravné spojky z pocínovaného hliníku. Další konstrukční prvky jsou shodné s prvky v přímé spojce. Běžná délka opravované části se pohybuje kolem 500 mm. [15, 21]

1.6 Zkušební metody kabelů

Důležitou roli hraje v případě kabelů podélná homogenita jejich elektrických, mechanických, tepelných a dalších vlastností. Stejně jako v jiných odvětvích i zde platí pravidlo, že je kvalita kabelu v celé jeho délce taková, jako je kvalita v jeho nejhorším místě. Z důvodu dodržení úrovně výše uvedených vlastností je nutné provádět pečlivou kontrolu a měření. Zkoušky prováděné na kabelech s výtlačně lisovanou izolací a jejich příslušenství pro jmenovitá napětí od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 30 kV ($U_m = 36$ kV) definuje norma ČSN IEC 60502-2 [25].

Během zkoušení je nutné dodržet určité zkušební podmínky. Jsou jimi teplota okolí, kmitočet a tvar vlny zkušebního napětí a tvar vlny impulzního zkušebního napětí. Obecně se zkoušky provádějí při teplotě okolí (20 ± 15) °C, avšak jiná teplota může být předepsána přímo v podrobnostech jednotlivé zkoušky. Při měřeních střídavým napětím musí být dodržen kmitočet zkušebního napětí v intervalu od 49 Hz do 61 Hz. Vlna zkušebního napětí musí být v podstatě sinusová. Co se týče tvaru vlny impulzního zkušebního napětí, musí mít vlna virtuální dobu náběhu impulsu mezi 1 μ s a 5 μ s a jmenovitou dobu do poloviny vrcholové hodnoty mezi 40 μ s a 60 μ s.

1.6.1 Kusové zkoušky

Kusové zkoušky provádí výrobce, a to na každé vyrobené délce kabelu, za účelem kontroly, zda každá délka vyhovuje předepsaným požadavkům. Při kusových zkouškách se měří elektrický odpor jader, částečné výboje a provádí se napěťové zkoušky.

Měření elektrického odporu jader

Toto měření se provádí na všech jádrech každého zkoušeného kabelu. Pokud kabel obsahuje koncentrické jádro, je nutno jej také změřit. Celková délka kabelu, popřípadě vzorek, se umísťuje do zkušební místnosti, ve které je nutno udržovat předepsanou teplotu na konstantní hodnotě po dobu 12 hodin před zkouškou. Pokud se vyskytnou pochybnosti o tom, zda má jádro stejnou teplotu, jako je teplota ve zkušební místnosti, je nutno měření provést až po 24 hodinách ve zkušební místnosti. Alternativou je měření na vzorku kabelu, který je kondicionován po dobu nejméně 1 hodiny v teplotně řízené kapalinové lázni.

Naměřené hodnoty se následně přepočítávají na teplotu 20 °C a na 1 km délky kabelu podle normy ČSN EN 60228 [26]. Stejnoseměrný elektrický odpor každého jádra při 20 °C nesmí překročit maximální hodnotu udávanou v této normě. V případě koncentrických jader musí odpor vyhovovat národním předpisům, popřípadě normám.

Měření částečného výboje

Měření částečných výbojů se provádí podle norem ČSN EN 60885-2 [27] a ČSN EN 60885-3 [28]. U třížilových kabelů probíhá měření na všech izolovaných žilách. Zkušební napětí se přikládá mezi každé jádro a kovové stínění. Velikost tohoto výboje pak nesmí při $1,73 U_0$ překročit 10 pC. Samotné metody měření částečných výbojů jsou popsány v dalších kapitolách.

Zkouška napětím

Zkouška napětím se provádí za okolní teploty střídavým napětím o síťovém kmitočtu. Požadavkem této zkoušky je, že nesmí dojít k průrazu izolace. V případě jednožilových stíněných kabelů se zkušební napětí přikládá mezi jádro a kovové stínění po dobu 5 minut. U třížilových kabelů se samostatně stíněnými žilami se zkušební napětí přikládá po dobu 5 minut mezi každé jádro a kovovou vrstvu. Podobně je tomu i v případě třížilových kabelů, kdy se přikládá zkušební napětí po stejnou dobu v pořadí mezi každé izolované jádro a všechna ostatní jádra a společnou kovovou vrstvu. Při těchto měřeních třížilových kabelů je možné využít trojfázového transformátoru.

Hodnoty zkušebního napětí jsou 3,5násobkem napětí jmenovitého. Jak již bylo zmíněno, kmitočet zkušebního napětí je síťový. Konkrétní hodnoty zkušebního napětí pro jednotlivá jmenovitá napětí uvádí tabulka 4.

Tabulka 4: Hodnoty napětí při kusových zkouškách [25]

Jmenovité napětí U_0 [kV]	3,6	6	8,7	12	18
Zkušební napětí U_{Zk} [kV]	12,5	21	30,5	42	63

Poznámka: V případě měření třížilových kabelů pomocí trojfázového transformátoru, musí být zkušební napětí mezi fázemi 1,73násobek hodnoty uvedené v tabulce.

1.6.2 Výběrové zkoušky

Stejně jako kusové zkoušky i výběrové zkoušky provádí výrobce kabelu. Na vzorcích hotového kabelu či komponentů odebraných z hotového kabelu se při předepsaném kmitočtu ověřuje, zda konečný výrobek splňuje předepsané parametry. Výběrovými zkouškami jsou prohlídka jádra, kontrola rozměrů, zkouška napětím u kabelů se jmenovitým napětím nad 3,6/6 (7,2) kV a zkouška poměrného prodloužení za tepla pro EPR, HEPR a XLPE izolace a elastomerní pláště.

Prohlídka jádra

Prohlídka jádra se provádí v případě, je-li to možné, a spočívá v kontrole prohlídkou a měřením jádra v souladu s normou ČSN EN 60228 [26], která udává požadavky na konstrukci jádra.

Kontrola rozměrů

Do kontroly rozměrů jsou zahrnuty následující výběrové zkoušky:

- měření tloušťky izolace a nekovových plášťů (včetně výtlačně lisovaného oddělovacího pláště, ale bez vnitřních výtlačně lisovaných obalů);
- měření tloušťky olověného pláště;
- měření drátů a pásků pro pancéřování;
- měření vnějšího průměru.

Zkouška napětím po dobu 4 h

Jak již bylo zmíněno, tato zkouška se provádí pouze na kabelech se jmenovitým napětím 3,6/6 (7,2) kV. Z hotového kabelu se odebere vzorek o délce minimálně 5 metrů, který je následně namáhán zkušebním napětím o síťovém kmitočtu a za teploty okolí po dobu 4 hodin. Napětí se přikládá mezi každé jádro a kovovou vrstvu. Stejně jako při kusové zkoušce napětím, i v tomto případě nesmí dojít k průrazu izolace.

Zkušební napětí je při této zkoušce 4násobkem napětí jmenovitého. Konkrétní hodnoty zkušebních napětí uvádí tabulka 5.

Tabulka 5: Hodnoty napětí při výběrových zkouškách [25]

Jmenovité napětí U_0 [kV]	6	8,7	12	18
Zkušební napětí U_{Zk} [kV]	24	35	48	72

Zkouška poměrného prodloužení za tepla

Poslední z výběrových zkoušek je zkouška poměrného prodloužení za tepla. Ta se provádí pro EPR, HEPR a XLPE izolace a elastomerní pláště. Výběr vzorků a zkušební postup se řídí normou ČSN EN 60811-2-1 [29]. Požadavky a podmínky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Zkušební podmínky a požadavky pro jednotlivé typy izolace [25]

Podmínka / požadavek		EPR	HEPR	XLPE	SE ₁
Teplota vzduchu	[°C]	250	250	200	200
Doba trvání při zatížení	[min]	15	15	15	15
Mechanické namáhání	[N · cm ⁻²]	20	20	20	20
Maximální prodloužení při zatížení	[%]	175	175	175	175
Maximální trvalé prodloužení po ochlazení	[%]	15	15	15	15

1.6.3 Typové zkoušky

Typové zkoušky většinou vyžaduje zákazník. Jsou provedeny před dodáním kabelu a ověřují, že vlastnosti vyhovují určenému použití. Vzhledem k jejich charakteru se nemusí opakovat. Opakované měření by bylo zapotřebí pouze v případě zásadních změn v materiálu kabelu, konstrukci nebo výrobním postupu. Typové zkoušky lze rozdělit do dvou kategorií - elektrické a neelektrické.

Elektrické typové zkoušky

Do kategorie elektrických typových zkoušek patří níže uvedené zkoušky, které se provádějí v tomto pořadí:

1. měření částečných výbojů;
2. zkouška ohybem, po které následuje měření částečným výbojem;
3. měření $\tan \delta$;
4. zkouška teplotním cyklem, po které následuje měření částečným výbojem;
5. rázová zkouška, po které následuje zkouška napětím;
6. zkouška napětím po dobu 4 h.

Neelektrické typové zkoušky

Neelektrickými typovými zkouškami se většinou kontrolují rozměry a mechanické vlastnosti kabelu. Patří mezi ně následující:

- měření tloušťky izolace;
- měření tloušťky izolace a nekovových plášťů;
- zkoušky pro určení mechanických vlastností izolace před a po stárnutí;
- zkoušky pro určení mechanických vlastností nekovových plášťů před a po stárnutí;
- zkouška tlakem při vysoké teplotě izolací a nekovových plášťů;
- zkouška odolnosti vůči ozónu EPR a HEPR izolace;
- zkouška poměrného prodloužení za tepla;
- zkouška nasákavosti izolace;
- zkouška odolnosti vůči požáru;
- měření obsahu sazí černého PE vnějšího pláště;
- zkouška smrštivosti XLPE pláště;
- zkouška tepelné stability PVC izolace;
- zkouška pronikání vody a další zkoušky.

1.6.4 Elektrické zkoušky po instalaci

Elektrické zkoušky po instalaci se provádějí pouze, jsou-li požadovány. Na dokončené instalaci kabelu a jeho příslušenství se ověřuje celistvost (neporušitelnost).

1.7 Zkušební metody kabelových souborů

Zkušební metody pro silnoproudé kabelové soubory definuje norma ČSN EN 61442 [30]. Stejně jako v případě samotných kabelů, je důležité z hlediska dodržení homogenity a kvality spojení provádět několik typů zkoušek. Vzhledem k podobnosti se zkouškami kabelů je uveden přehled zkušebních metod kabelových souborů pouze bodově.

- Zkoušky AC napětím
 - Zkouška za sucha pro všechny soubory
 - Zkouška za deště pro vnější koncovky
 - Zkouška ve vodě pro závěrné koncovky
- Zkoušky DC napětím
- Zkoušky impulzním napětím
- Měření částečných výbojů
- Zkoušky při zvýšené teplotě
- Zkouška teplotními cykly
- Tepelné zkratové zkoušky jádra a stínění
- Dynamická zkratová zkouška
- Zkouška ve vlhku a ve slané mlze
- Zkouška úderem při teplotě okolí
- Měření odporu stínění
- Měření svodového proudu na stínění
- Zkouška iniciace proudu poruchy stínění
- Zkouška ovládací síly
- Zkouška ovládacího oka
- Kapacitní chování zkušebního místa

2 Částečné výboje

Nejen v kabelové technice, ale i v oblasti točivých a netočivých elektrických strojů sledujeme izolační materiály z hlediska vzniku částečných výbojů. Jedná se o jev, který může dlouhodobě nepříznivě ovlivňovat spolehlivost a životnost daného zařízení, například vlivem degradace izolace.

Dle ČSN EN 60270 [31] je částečný výboj lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečný výboj může vzniknout v pevném, plynném i kapalném dielektriku. Výbojovou činností jsou vytvářeny charakteristické proudové impulsy, jejichž doba trvání je mnohem menší než $1\mu\text{s}$ [32]. Tyto proudové impulsy jsou měřeny různými metodami, které jsou popsány v následujících kapitolách.

Částečné výboje v izolaci kabelu mohou být způsobeny například koncentrací lokálního elektrického namáhání. Při výrobě kabelu vznikají při tepelných procesech uvnitř izolace plynové dutinky, které způsobují určitou nehomogenitu materiálu. Plyn v dutinkách má oproti okolnímu materiálu izolace nižší permitivitu, což způsobí rozdělení elektrického pole z větší části na dutinku. Z důvodu nižší elektrické pevnosti plynu dojde v dutince k průrazu - částečnému výboji, a to i při nižším napětí. Hodnota napětí vzniku částečného výboje v dutince není pro všechny dutinky stejná. Záleží na jejich tvaru a velikosti. [33, 34]

Výbojová činnost podporuje již zmíněnou degradaci a stárnutí izolačního materiálu extrémním tepelným zatěžováním, vznikem velmi agresivních sloučenin (například ozónu) a narušováním povrchu materiálu dopadem elektrických částic (elektronů a iontů). Jelikož již několikadenní působení částečných výbojů může způsobit fatální defekt izolačního systému, je kladen důraz na zkoušení elektrických zařízení také z hlediska lokalizace částečných výbojů. [35, 36]

2.1 Účinky částečných výbojů

Částečné výboje mohou v izolantu vyvolávat různé nežádoucí účinky. Dle [37] lze tyto účinky rozdělit na elektrické, erozivní, chemické a tepelné.

Elektrické účinky

Pokud se v dutině objeví elektrický oblouk, je velice pravděpodobné, že se jeho následkem vytvoří vodivá dráha. V případě velmi vysokého napětí může koncentrace elektrického pole na konci již zmíněné vodivé dráhy způsobit čistě elektrický průraz dielektrika a vodivá dráha se může postupně šířit.

Erozivní účinky

Částečné výboje mohou narušovat (erodovat) stěny mezer (dutin). Bude-li toto narušování pokračovat, může vzniknout čistě elektrický nebo mechanický průraz.

Chemické účinky

Tento typ účinku částečných výbojů vzniká při déle trvajícím elektrickém namáhání dielektrika. Chemické účinky jsou způsobeny produkty částečných výbojů, jako jsou ozón, oxidy dusíku, vodík ve stavu zrodu a další. Z tohoto důvodu je pravděpodobné, že se bude určité množství dielektrika rozkládat. Ve většině případů a zejména u organických izolantů můžeme pozorovat rozklad materiálu v okolí dutin. Chemické účinky mají vliv také na možnost vzniku tepelného průrazu. Výše zmíněné produkty rozkladu totiž mohou pronikat do pevného dielektrika a vytvářet v něm vodivější oblasti, jejichž velikost není zanedbatelná.

Tepelné účinky

V tomto případě mohou částečné výboje způsobit tepelnou nestabilitu, jelikož je jimi dielektrikum oteplováno. To má za následek zmenšení napětí tepelného průrazu.

2.2 Dělení částečných výbojů

Za nejobecnější dělení částečných výbojů lze považovat rozdělení dle [38] podle místa jejich výskytu:

Vnější částečné výboje

Jedná se o částečné výboje v plynech v okolí elektrod o malých poloměrech nebo velkých zakřiveních. Mohou to být například doutnavé a korónové výboje.

Vnitřní částečné výboje

Vnitřní částečné výboje vznikají v plynech, obklopených pevným nebo kapalným dielektrikem. Příkladem tohoto případu mohou být výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku, například plynné dutinky v kabelech.

Povrchové částečné výboje

V tomto případě se částečné výboje nacházejí v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Mohou to být například klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky v točivých strojích, průchodkách apod.

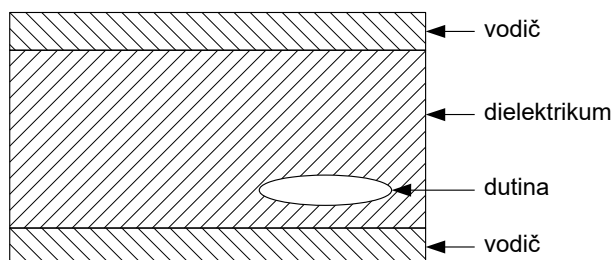
2.3 Typy částečných výbojů

Výše uvedené obecné rozdělení částečných výbojů podle místa jejich výskytu lze ještě zkonkretizovat na jednotlivé případy. V této podkapitole uvádím rozdělení jednotlivých typů částečných výbojů dle [38, 39].

Druhy částečných výbojů lze rozlišit za pomoci měření. Umístění výbojů na křivce napájecího napětí svým způsobem udává povahu a místo (lokalitu) výskytu výbojů. Při těchto měřeních se zaměřujeme na fázový úhel částečných výbojů. U analogových měřicích přístrojů je pozice tohoto fázového úhlu většinou zobrazována jako superpozice proudových impulzů na sinusovém průběhu napájecího napětí ve formě Lissajousových obrazců. V současnosti se však více využívá zobrazení výbojové činnosti na rozvinuté periodě sinusového zkušebního napětí, což umožňují moderní digitální přístroje.

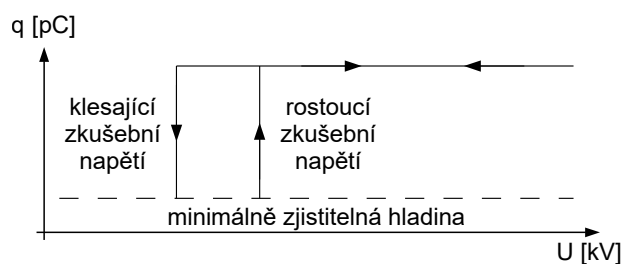
Typ A

Částečné výboje typu A vznikají ve vnitřní vzduchové nehomogenitě dielektrika po přiložení vnějšího napětí na zkoumaný objekt (obrázek 12).



Obrázek 12: Výboje typu A v dutině uvnitř dielektrika [38]

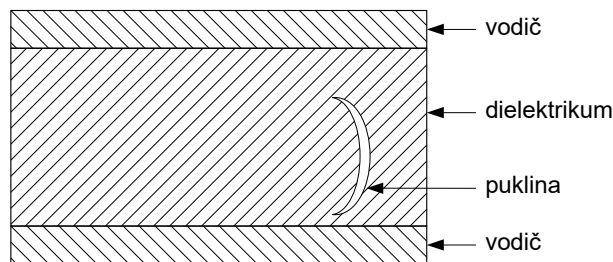
Vyskytují se v přibližně stejném počtu, rozmístění a velikosti jak v kladné, tak v záporné půlčísle na fázi mezi nulou a maximem zkušebního napětí. Ve všech po sobě jdoucích cyklech sinusového průběhu zkušebního napětí se tyto částečné výboje vyskytují v náhodných polohách a o různých velikostech. Při zvyšování zkušebního napětí na hodnotu zapalovacího napětí dochází ke strmému nárůstu výbojové činnosti, která je ale následně relativně stálá i přes další zvyšování zkušebního napětí (obrázek 13).



Obrázek 13: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ A [38]

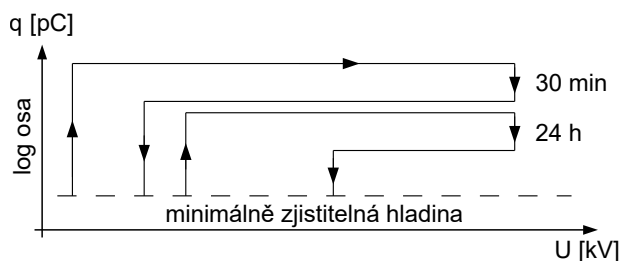
Typ B

V tomto případě obsahuje izolant dutinu či jinou nehomogenitu ve směru elektrického pole (obrázek 14). Velmi častým prostředím pro vznik výboje tohoto typu jsou elastomery a termoplastické izolanty.



Obrázek 14: Elastomer obsahující puklinu - typ B [38]

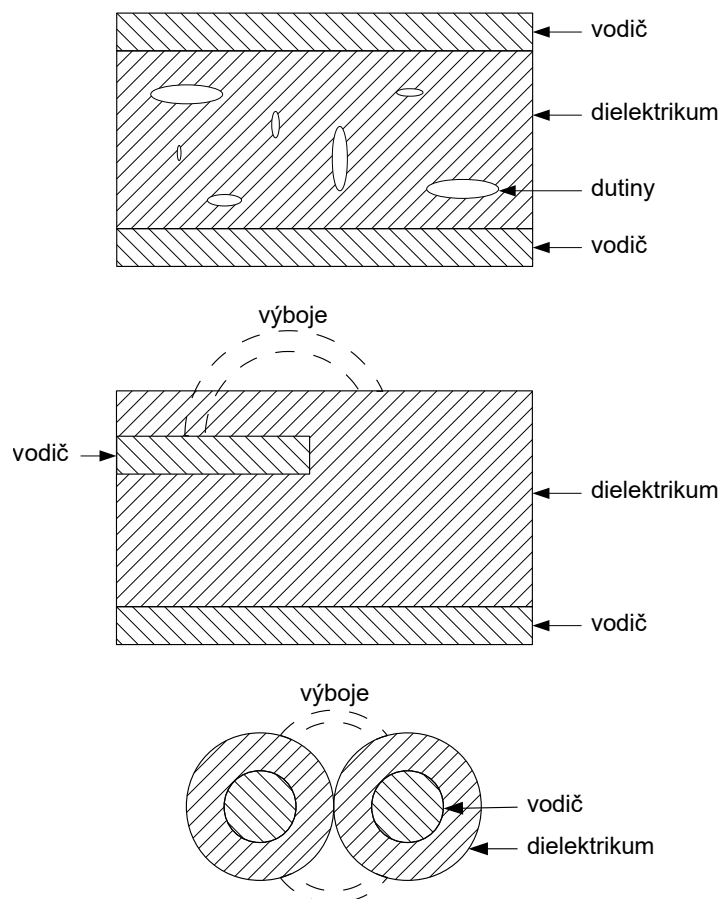
Při zvýšení zkušebního napětí a jeho následném snížení je průběh napěťové závislosti výbojové činnosti téměř shodný s předešlým typem A. Pokud ale zvýšíme napětí na nejvyšší možnou hodnotu, při které nedojde k celkovému průrazu dielektrika, a necháme jej působit určitou dobu (30 minut), bude hodnota zdánlivého náboje klesat (samozhášecí jev). Toto zhášecí napětí je v tomto případě podstatně vyšší než zapalovací. Pokud bychom tento postup zopakovali, přičemž bychom dobu působení prodloužili na delší dobu (24 hodin), pokles velikosti výbojů by pokračoval a hodnota zhášecího napětí by mohla být ještě vyšší (obrázek 15).



Obrázek 15: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ B [38]

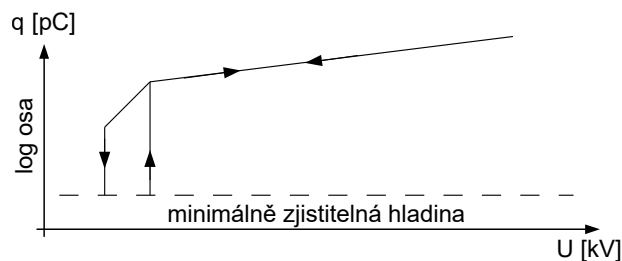
Typ C

Částečné výboje typu C vznikají ve větším množství různě velkých dutin. Jedná se také o výboje na povrchu dielektrik v místech vysokého gradientu napětí a vnější výboje mezi izolací dotýkajících se vodičů (obrázek 16).



Obrázek 16: Uspořádání při výbojích typu C [38]

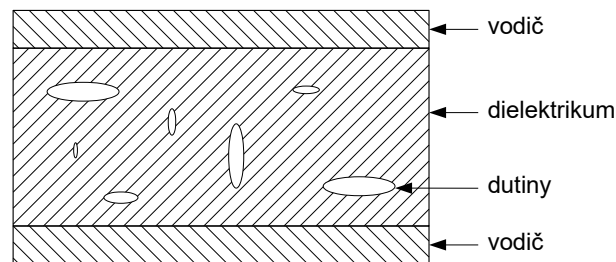
Výboje typu C se projevují podobně jako předcházející. Odezvy je možno sledovat ihned po zapálení. Počet výbojů úměrně roste se zvyšujícím se zkušebním napětím. Při vyšším zkušebním napětí není možné z tohoto důvodu rozlišit jednotlivé výboje. Zhášecí napětí je pak stejně velké jako zapalovací nebo nepatrně nižší (obrázek 17).



Obrázek 17: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ C [38]

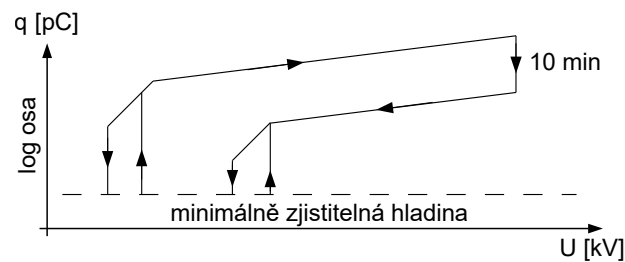
Typ D

Výboje typu D vznikají v pryskyřičných izolacích, které obsahují množství dutinek o různé velikosti (obrázek 18). Zmíněné dutinky vznikají při výrobním procesu a jejich výskyt je v případě izolantů na bázi pryskyřice jistý.



Obrázek 18: Dutinky v izolantu na bázi pryskyřice [38]

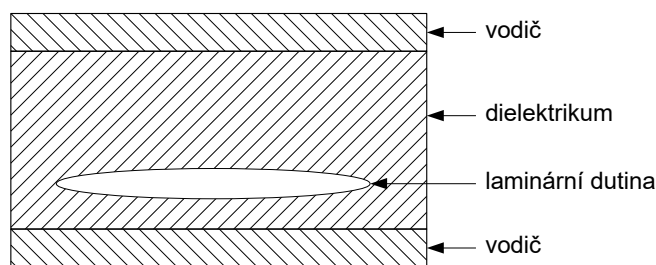
Po zapálení výbojů typu D dochází ke strmému nárůstu jejich velikosti. Kdybychom udržovali zkušební napětí na konstantní hodnotě, klesala by velikost částečných výbojů vlivem samozhášecího jevu. Hodnoty zhášecího a zapalovacího napětí jsou po dalším zvýšení zkušebního napětí podstatně vyšší než původní hodnoty (obrázek 19).



Obrázek 19: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ D [38]

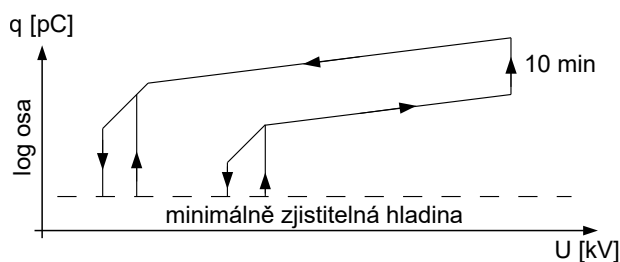
Typ E

V izolantech s laminárními nehomogenitami vznikají částečné výboje typu E (obrázek 20). Stejně jako v předešlých případech není možné vzájemně rozlišit jednotlivé výboje nad určitou hodnotou velikosti zkušebního napětí.



Obrázek 20: Izolant s laminární dutinou [38]

Při lineárním zvyšování zkušební napětí a jeho následném okamžitém snižování, je zhášecí napětí stejné (případně o málo nižší) než zapalovací. Pokud bychom udržovali zkušební napětí na konstantní hodnotě (nad hladinou zapalovacího napětí), velikost nábojů by rostla. Následně by se asi po deseti minutách ustálila. Pokud bychom dále zkušební napětí snižovali, byla by hodnota zhášecího napětí částečných výbojů podstatně nižší než u původního zapalovacího napětí (obrázek 21).

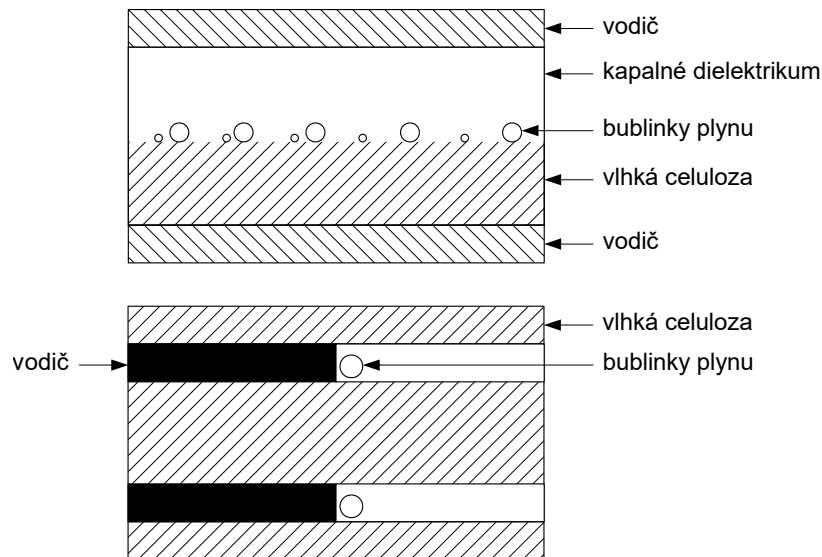


Obrázek 21: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ E [38]

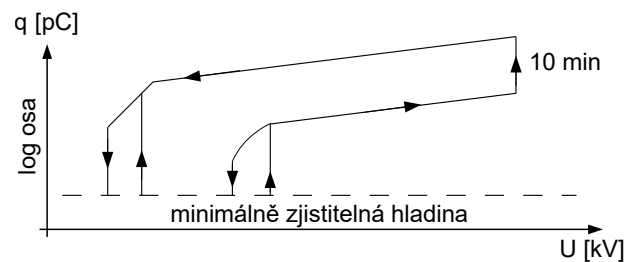
Typ F

Částečné výboje typu F vznikají v případě plyných nehomogenit v kapalném izolantu (například kapalně dielektrikum dotýkající se vlhké celulózy - obrázek 22).

Spolu se zvyšováním hodnoty zkušební napětí dochází ke strmému nárůstu velikosti nábojů. V případě, že by napětí působilo jen několik málo sekund, byla by hodnota zhášecího napětí stejně velká nebo o trochu menší než hodnota zapalovacího napětí. Naopak v případě udržování zkušební napětí na konstantní úrovni (nad hodnotou zapalovacího napětí) velikost částečných výbojů vzroste až stonásobně, a to za několik málo minut. Při následném snížení hodnoty zkušební napětí je velikost zhášecího napětí až třikrát nižší než jeho původní hodnota (obrázek 23).



Obrázek 22: Příklad prostředí pro vznik výbojů typu F [38]

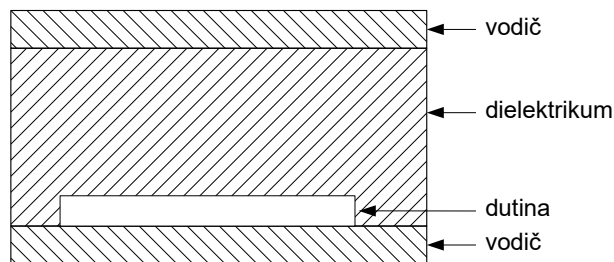


Obrázek 23: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ F [38]

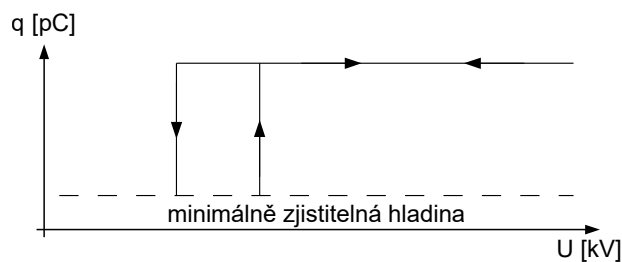
Typ G

Částečné výboje typu G vznikají v dutině mezi vodičem a dielektrikem (obrázek 24). Tyto dutiny také mohou obsahovat malé uhlíkové částičky nebo mohou mít nehomogenní povrchovou vodivost, a právě proto je obtížné určit, jedná-li se opravdu o částečné výboje v dutině mezi vodičem a dielektrikem.

Hodnoty zdánlivého náboje q jsou nezávislé na velikosti zkušebního napětí. Hodnota zhášecího napětí je pak stejná nebo nepatrně nižší než hodnota zapalovacího napětí (obrázek 25).



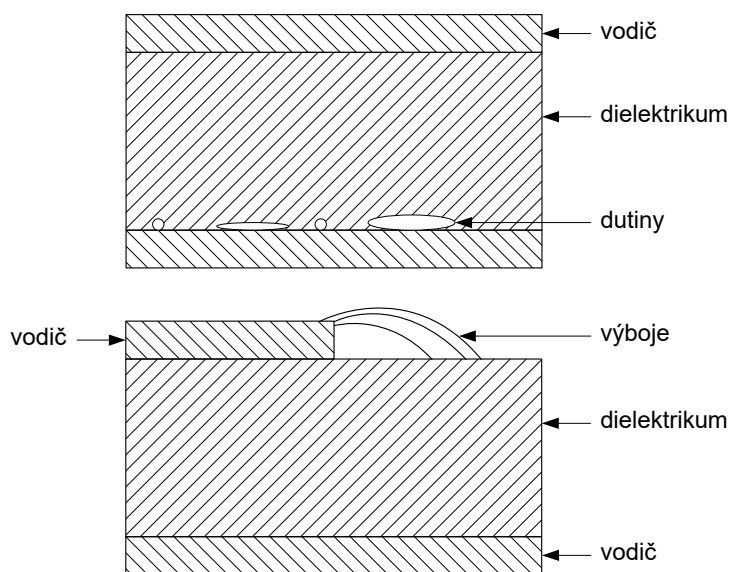
Obrázek 24: Příklad dutiny mezi vodičem a dielektrikem [38]



Obrázek 25: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ G [38]

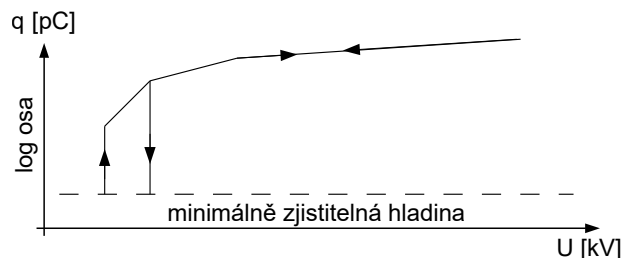
Typ H

Výboje typu H se vyskytují v dutinách mezi vodičem a dielektrikem nebo jako vnější výboje mezi vodičem a povrchem dielektrika (obrázek 26).



Obrázek 26: Uspořádání při výbojích typu H [38]

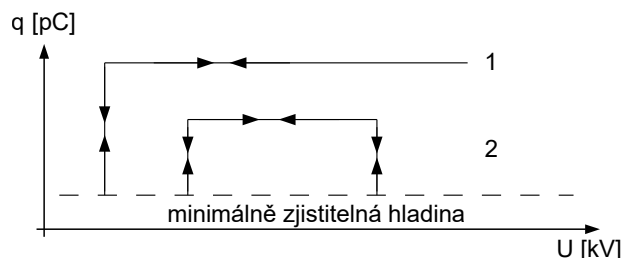
Počet těchto částečných výbojů je úměrný velikosti zkušebnímu napětí. Hodnota zhášecího napětí je pak stejná nebo o málo nižší než hodnota zapalovacího napětí (obrázek 27).



Obrázek 27: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ H [38]

Typ I

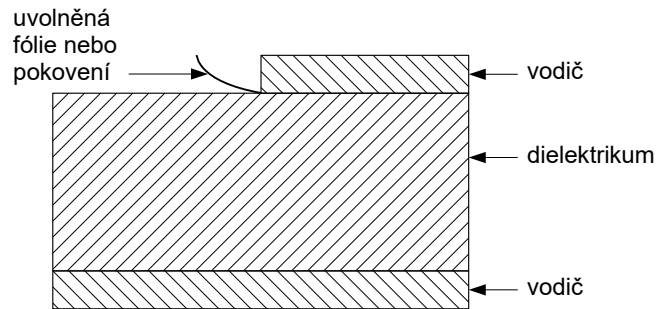
Tento typ částečných výbojů zahrnuje výboje a rušení vznikající na takzvaných "plovoucích objektech" a výboje v malé vzduchové mezeře mezi dvěma vodiči uvnitř zkoumaného objektu či testovacího obvodu. Pokud bychom zvětšovali hodnotu zkušebnímu napětí, velikost částečných výbojů by byla konstantní. To platí i pro případ následného snižování napětí až na úroveň zhášecího napětí, které je většinou stejně velké jako zapalovací. Jen v některých případech mohou částečné výboje při zvyšování zkušebnímu napětí zanikat. Tyto výboje se při následném snížení zkušebnímu napětí opět objeví a to ve stejné míře (obrázek 28). Částečné výboje tohoto typu nejsou závislé na době působení zkušebnímu napětí.



Obrázek 28: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ I [38]

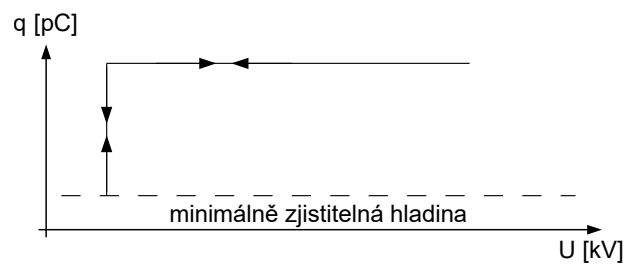
Typ J

Typickým příkladem prostředí pro vznik částečného výboje typu J je uvolněná část elektrody (obrázek 29). Tato část se častokrát vlivem elektrického pole ještě pohybuje.



Obrázek 29: Příklad uvolněné části elektrody [38]

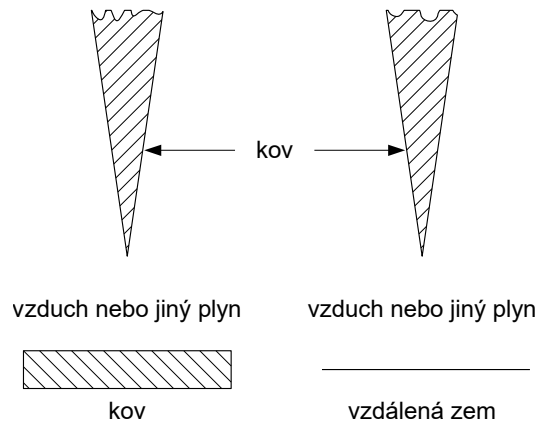
Pokud bychom zvyšovali hodnotu zkušebního napětí, velikost částečných výbojů by byla konstantní. Zhášecí napětí je pak stejné jako zapalovací a výboje nejsou nijak závislé na době připojení zkušebního napětí (obrázek 30).



Obrázek 30: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ J [38]

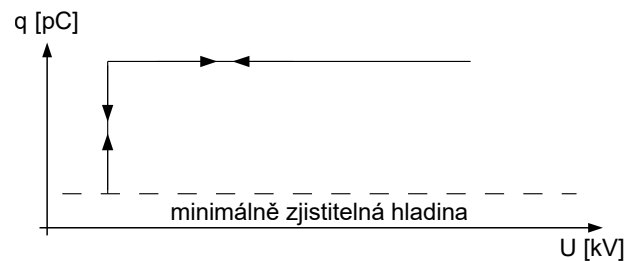
Typ K

Částečné výboje typu K vznikají za přítomnosti vnější koróny v okolí ostrých kovových hrotů nebo hran (obrázek 31).



Obrázek 31: Uspořádání způsobující částečné výboje typu K [38]

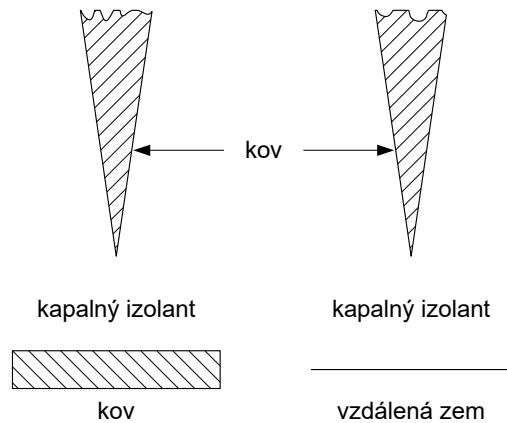
Při zvyšování hodnoty zkušebního napětí se strmě zvětšuje počet částečných výbojů, dále je pak tento počet konstantní. Při následném snižování hodnoty zkušebního napětí je křivka totožná, zhášecí napětí je tedy stejně velké jako zapalovací (obrázek 32). Doba působení zkušebního napětí nemá většinou na odezvu těchto částečných výbojů vliv.



Obrázek 32: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ K [38]

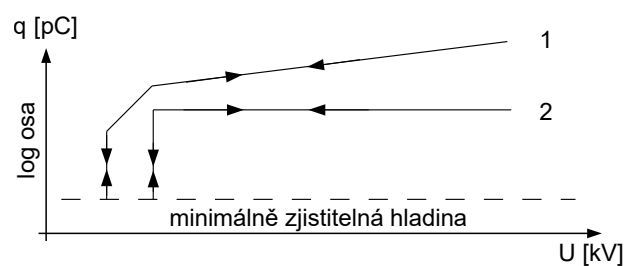
Typ L

Pro částečné výboje typu L je charakteristická koróna, která vzniká na ostrém kovovém hrotu nebo hraně umístěné v kapalném izolantu (obrázek 33).



Obrázek 33: Uspořádání způsobující částečné výboje typu L [38]

Pokud bychom zvyšovali hodnotu zkušební napětí, začaly by se objevovat nejprve částečné výboje s větší hodnotou zdánlivého náboje, přičemž by tato hodnota rostla při dalším zvyšování napětí. Náboje s menší hodnotou zdánlivého náboje se zapalují později a mají následně konstantní hodnotu. Pokud bychom napětí následně snižovali, nedošlo by ke změně poměrů těchto dvou skupin. Zhášecí napětí je pak stejně velké jako zapalovací (obrázek 34). Stejně jako v předešlých případech nemá obvykle doba měření na odezvu částečných výbojů téměř žádný vliv.

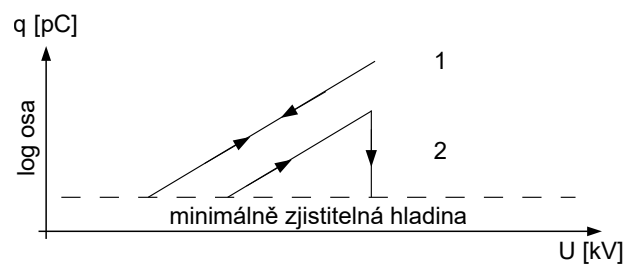


Obrázek 34: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ L [38]

Typ M

Výboje typu M vznikají v prostředí nedokonalého spojení kovů s kovy. Tyto spoje se mohou vyskytovat uvnitř testovaného objektu nebo v kterémkoliv místě testovacího obvodu. Důležité je těmto vnějším nedokonalým spojům zamezit a udržet tím přesnost měření.

Velikost částečných výbojů roste úměrně v závislosti na hodnotě zkušebního napětí. V některých případech výboje při určité hodnotě zkušebního napětí zcela ustanou a dále se neobjeví (obrázek 35). Tento jev se může objevit například při natavení zmíněných nedokonalých spojů a jejich spojení. Při udržování konstantní hodnoty zkušebního napětí nemá doba jeho působení na velikost částečných výbojů vliv.

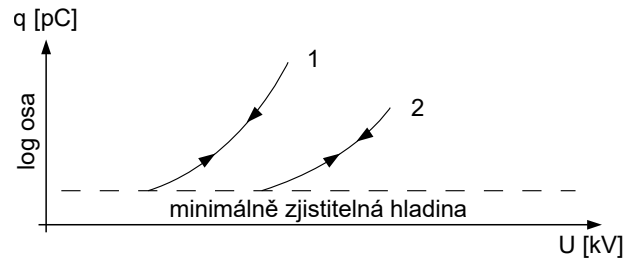


Obrázek 35: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ M [38]

Typ N

Částečné výboje typu N lze charakterizovat jako rušení. Jsou způsobeny harmonickými generovanými magnetickým nasycením jader transformátorů nebo reaktorů v testovacím obvodu. To je spojeno s příliš vysokou hustotou proudu způsobenou nedostatečným tlumením frekvencí pod horním limitem kmitočtového pásma detektoru.

Nejedná se tedy o částečné výboje jako takové, ale spíše o odezvu měřicího obvodu detekovanou právě jako částečné výboje. Velikost zdánlivého náboje částečných výbojů roste spolu s velikostí zkušebního napětí a není závislá na době jeho působení (obrázek 36).



Obrázek 36: Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí - typ N [38]

Typ O

Stejně jako v předcházejícím případě se jedná o rušení. Jde o detekci venkovního rušení se širokým rozsahem různých odezev měřicího systému. Zdroji mohou být například vysokofrekvenční signál modulovaný v klíčovém poměru (rádiový přenos signálu), vysokofrekvenční signál modulovaný amplitudově (radiotelefony a rozhlasové stanice) a nijak nemodulované signály (průmyslová zařízení - například indukční pece).

Zdroje těchto rušení jsou ve většině případů detekovatelné i při vypnutém zkušebním napětí. Lze je potlačovat použitím přesných frekvenčních filtrů připojených ke vstupnímu obvodu detektoru částečných výbojů.

2.4 Veličiny popisující částečné výboje

Abychom mohli hodnotit činnost částečných výbojů, je nutné nadefinovat určité veličiny charakterizující jejich parametry. Níže uvedené veličiny definuje norma ČSN EN 60270 [31].

Zdánlivý náboj q impulzu částečného výboje

Jedná se o unipolární náboj, který způsobí ve velmi krátkém čase po připojení na svorky zkoušeného objektu takovou výchylku na měřicím přístroji (změnu napětí), jakou by způsobil samotný částečný výboj. Velikost tohoto zdánlivého náboje se nejčastěji vyjadřuje v pikocoulombech [pC]. Důležité je také podotknout, že se zdánlivý náboj q nerovná skutečnému množství náboje v místě výboje, který nemůže být měřen přímo.

Četnost impulzů n

Četnost impulzů n udává poměr mezi celkovým počtem impulzů částečných výbojů zaznamenaných v určitém časovém intervalu a dobou jeho trvání. Výpočtem je také dána jednotka veličiny, tedy impulzy za sekundu. Pro použití tohoto parametru v praxi jsou uvažovány pouze ty impulzy, jejichž velikost je větší než daná úroveň nebo jejichž velikost je v předepsaném rozsahu.

Opakovací kmitočet impulzů N

Opakovací kmitočet impulzů N je využíván při kalibraci a vyjadřuje počet impulzů částečných výbojů za sekundu v případě, že jsou jednotlivé impulzy od sebe stejně vzdálené.

Fázový úhel Φ_i a čas t_i výskytu impulzu částečného výboje

Fázový úhel Φ_i a čas t_i výskytu impulzu částečného výboje je dán vztahem

$$\Phi_i = 360 \frac{t_i}{T} [^\circ], \quad (1)$$

kde t_i je čas měřený mezi předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem částečného výboje a T je perioda zkušebního napětí. Jednotkou jsou stupně.

Střední proud částečných výbojů I

Jedná se o odvozenou veličinu stanovenou jako součet absolutních hodnot jednotlivých zdánlivých nábojů za daný časový interval T_{ref} , dělený délkou tohoto časového intervalu.

$$I = \frac{1}{T_{ref}} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|] \quad (2)$$

Střední proud částečných výbojů je vyjadřován buďto v coulombech za sekundu [$C \cdot s^{-1}$], nebo v ampérech [A].

Výkon částečných výbojů P

Výkon částečných výbojů je stejně jako předchozí případ veličinou odvozenou. Vyjadřuje střední výkon impulzů částečných výbojů přivedených na svorky zkoušeného objektu po danou dobu T_{ref} .

$$P = \frac{1}{T_{ref}} [q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i] [\text{W}], \quad (3)$$

kde u_1, u_2, \dots, u_i jsou okamžité hodnoty zkušebního napětí, při kterých se vyskytly částečné výboje o hodnotách zdánlivých nábojů q_1, q_2, \dots, q_i . Při střídavých měřeních je nutné dbát na znaménka jednotlivých hodnot. Může se totiž stát, že hodnoty q_i a u_i budou opačné polarity.

Střední kvadratický součet D

Střední kvadratický součet je další odvozenou veličinou, která je dána součtem druhých mocnin zdánlivých výbojů za daný časový interval T_{ref} , děleným tímto časovým intervalem.

$$D = \frac{1}{T} [q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2] [C^2 \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

2.5 Napětí popisující částečné výboje

Velmi důležitou veličinou charakterizující chování částečných výbojů je elektrické napětí. Jedná se o jeden ze základních parametrů částečných výbojů. Stejně jako předcházející veličiny definuje níže uvedená napětí norma ČSN EN 60270 [31].

Zkušební napětí částečných výbojů

Zkušební napětí částečných výbojů je takové napětí, které po přiložení předepsaným zkušebním postupem ke zkoušenému objektu nevyvolá v tomto objektu částečné výboje překračující předepsanou úroveň. Tato předepsaná úroveň může být charakterizována například nejvyšším možným zdánlivým nábojem q .

Zapalovací (počáteční) napětí částečných výbojů U_i

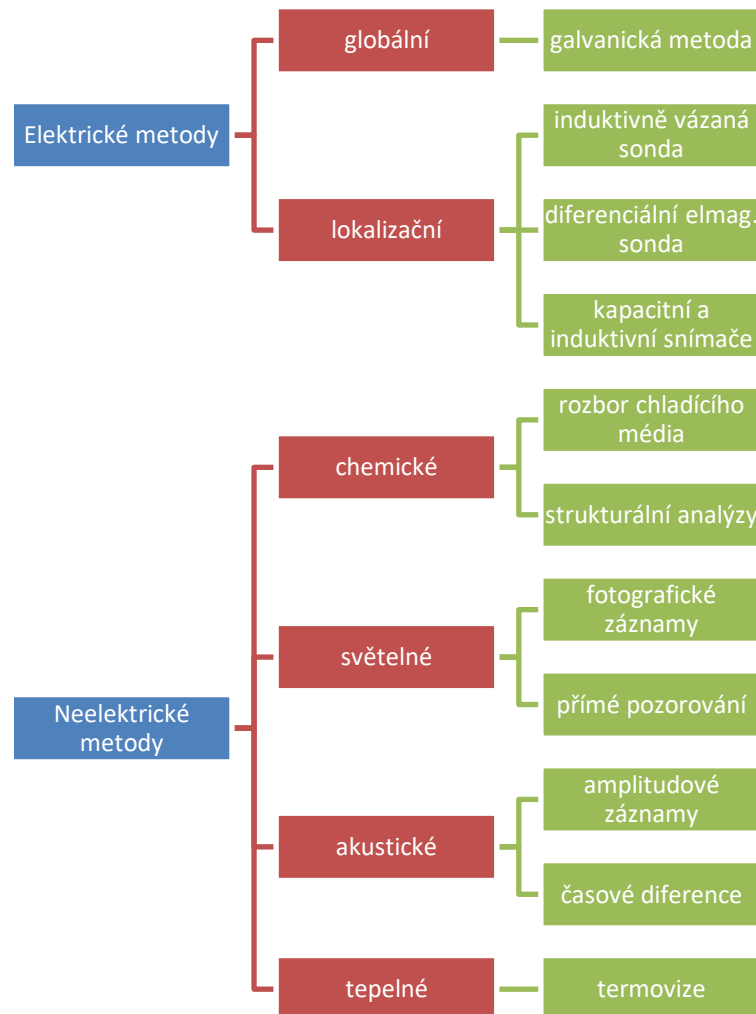
Zapalovací napětí částečných výbojů představuje nejnižší elektrické napětí, při kterém jsou poprvé ve zkoušeném objektu pozorovány opakující se částečné výboje, je-li toto napětí postupně zvyšováno z nižší hodnoty, při které se částečné výboje neobjevují. V běžné praxi vyjadřuje nejnižší napětí, při kterém se úroveň impulzu částečného výboje rovná nebo převyšuje určitou hodnotu. Zapalovací napětí je udáváno ve voltech, respektive v kilovoltech.

Zhášecí napětí částečných výbojů U_e

Zhášecí napětí částečných výbojů je takové elektrické napětí, při kterém se přestávají ve zkoušeném objektu objevovat částečné výboje, je-li toto napětí postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které se částečné výboje objevují. Podobně jako v předchozím případě se v praxi jedná o nejnižší hodnotu elektrického napětí, při kterém se však úroveň impulzu částečného výboje rovná nebo je menší než předepsaná hodnota. Stejně tak je zhášecí napětí udáváno ve voltech, respektive kilovoltech.

2.6 Metody měření částečných výbojů

Z obecného hlediska bychom mohli rozdělit metody měření částečných výbojů na elektrické a neelektrické. Neelektrické metody měření využívají faktu, že výbojová činnost v izolantu produkuje různé fyzikální jevy. Mohou jimi být například vznik chemických zplodin, světelné záření, produkce tepla, zvukové vlny nebo generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. [38, 40]



Obrázek 37: Přehled rozdělení měřicích metod [40]

Z dalšího hlediska lze rozdělit metody měření částečných výbojů na globální a lokalizační. V případě globálních metod se jedná o celkové měření, při kterém se nehledí na místo vzniku částečných výbojů. Výsledky vypovídají o celkovém stavu izolace. Právě stárnutí izolace z organických materiálů je vlivem částečných výbojů nejvýznamnější. V druhém případě, metod lokalizačních, se primárně hledí na zjištění lokality výbo-

kové činnosti. Vhodné je tyto metody kombinovat. Jako první se určí úroveň výbojové činnosti globální metodou a následně místo působení částečných výbojů metodou lokalizační. [38, 40]

2.6.1 Elektrické metody měření částečných výbojů

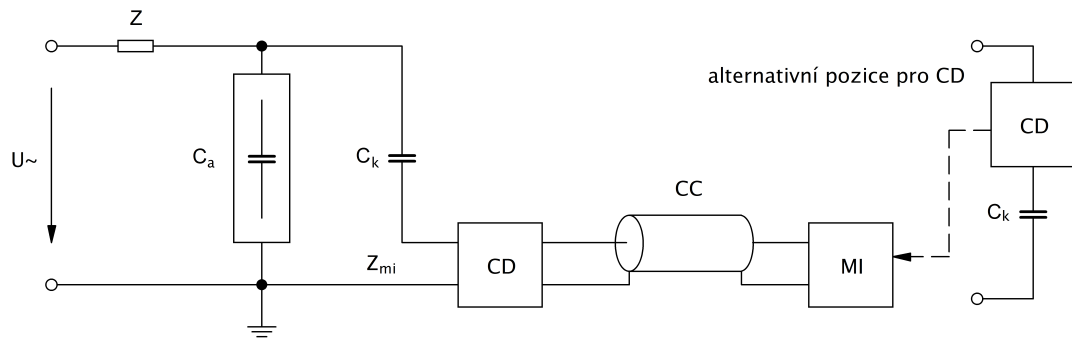
Většina elektrických metod měření částečných výbojů je založena na měření proudových impulzů, které odrážejí výbojovou činnost. Výboj v dutině izolantu způsobí úbytek elektrické energie a tím pokles napětí na svorkách zkoušeného objektu. Tento pokles napětí je úměrný náboji proudového impulsu výboje. Vyrovnávací proud vyvolaný výbojem vytvoří na vhodně zvolené měřicí impedanci odpovídající napěťovou odezvu. Při střídavých měřeních je však tato napěťová odezva (impulz) superponována na průběh střídavého napětí zdroje a je žádoucí filtrovat síťovou frekvenci pomocí frekvenčního filtru. [35]

Galvanická metoda měření částečných výbojů

Galvanická metoda měření částečných výbojů je metodou globální, což znamená, že sleduje celkový stav izolace a využívá výše zmíněné sledování impulzů částečných výbojů za pomoci vhodné měřicí impedance. Tato měřicí impedance je většinou realizována jako RLC prvek, který je zároveň schopen filtrovat impulzy od síťové frekvence. Součástí měřicí impedance bývá i ochrana proti přepětí. V současné době se jedná o jednu z nejmodernějších metod používaných pro sledování stavu izolačních systémů. Mezi velké výhody patří vysoká citlivost, velká výpovědischopnost a zajištění bezpečnosti pro zkoušený objekt. Nevýhodou může být citlivost na vnější rušivé vlivy, jako jsou například elektromagnetické vlny rádiových vysílačů. [38, 40]

Norma ČSN EN 60270 [31] udává tři základní zapojení pro měření částečných výbojů touto metodou. Schémata zapojení jsou uvedena na obrázcích 38, 39 a 40.

Zapojení na obrázku 38 je vhodné pro měření uzemněných objektů nebo objektů o velkých kapacitách. V tomto případě je měřicí impedance zapojena do větve s vazebním kondenzátorem pro bezpečné snímání impulzů (nehrozí velké nebezpečí při průrazu zkoušeného objektu).

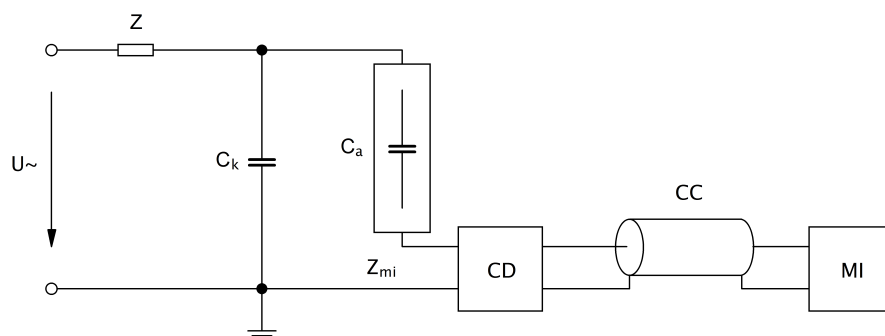


Obrázek 38: Zkušební obvod s paralelní snímací impedancí [31]

Součásti

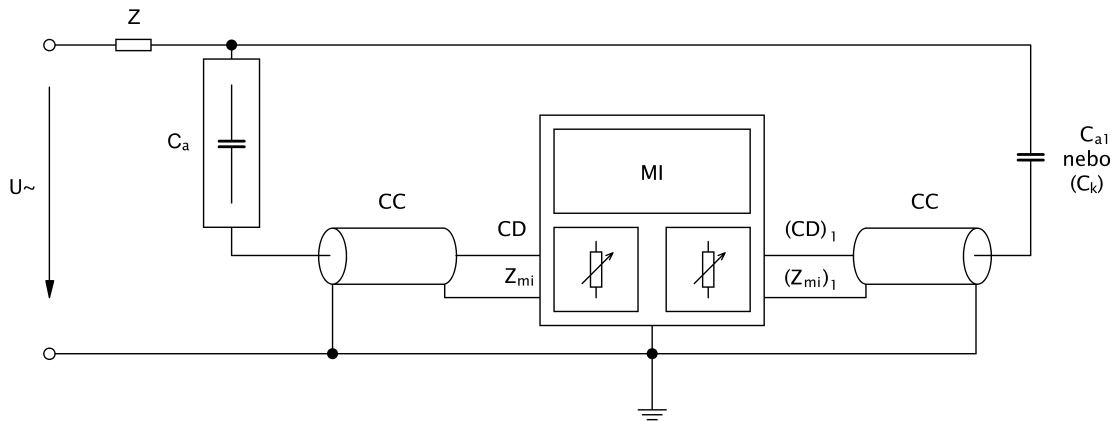
- U_{\sim} vysokonapěťový zdroj
- Z_{mi} vstupní impedance měřicího systému
- CC spojovací kabel
- C_a zkoušený objekt
- C_k vazební kondenzátor
- CD vazební zařízení
- MI měřicí přístroj
- Z filtr

Další zapojení dle obrázku 39 se používá pro měření objektů, u kterých je možno rozpojit zemní přívod. Při tomto zapojení je dosahováno vyšší citlivosti. To je dáno rozptylovými kapacitami, které jsou k vazebnímu kondenzátoru řazeny paralelně. V případě, že je rozptylová kapacita obvodu k zemi větší než kapacita zkoušeného objektu, můžeme vazební kondenzátor vynechat.



Obrázek 39: Zkušební obvod se sériovou snímací impedancí [31]

Poslední zapojení (můstkové) se využívá pro měření v místě instalace zkoušeného objektu. Výhodou je potlačení vlivu vnějšího rušení. Na měřicích impedancích jsou snímány rozdílové proudové impulzy. Je-li kapacita vazebního kondenzátoru relativně stejná jako kapacita zkoušeného objektu, je možné jej nahradit jiným zkoušeným objektem se známou úrovní částečných výbojů.



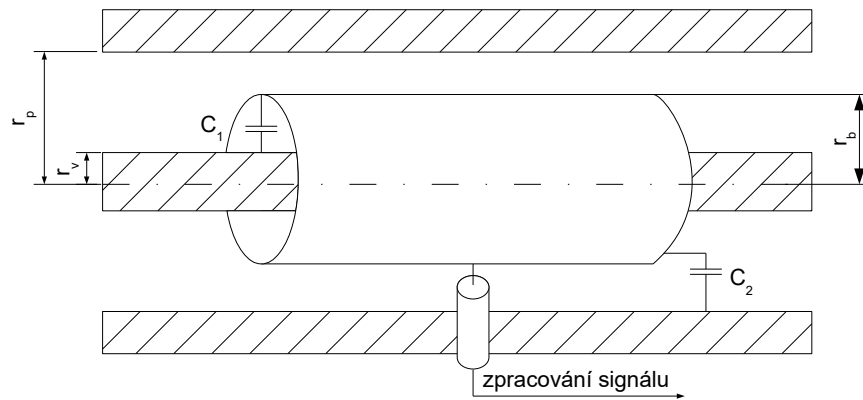
Obrázek 40: Zkušební obvod v můstkovém zapojení [31]

Kapacitní snímače

Dalším často využívaným prostředkem pro detekci částečných výbojů v kabelech, kabelových souborech a koncovkách jsou kapacitní snímače koaxiálního tvaru. Na rozdíl od galvanické metody se nyní jedná o nepřímou elektrickou metodu. Je využíváno toho, že je v lokalitě výskytu částečných výbojů vyzařováno elektromagnetické pole do okolního prostředí a je možné jej právě za pomoci vhodného snímače detekovat. Výhodou této metody je bezpečnost z hlediska ochrany měřicího systému před přepětím v případě průrazu dielektrika. Nevýhodou je pak nemožnost detekovat částečné výboje v elektricky odstíněných zdrojích. Délka sondy obvykle bývá 10 - 20 cm a udává její citlivost. [32, 38, 40]

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\frac{r_b}{r_v}}, C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\frac{r_p}{r_b}}, \quad (5)$$

kde l je délka sondy, r_v je poloměr vodiče, r_b je poloměr snímače a r_p je poloměr vnějšího pláště kabelu.

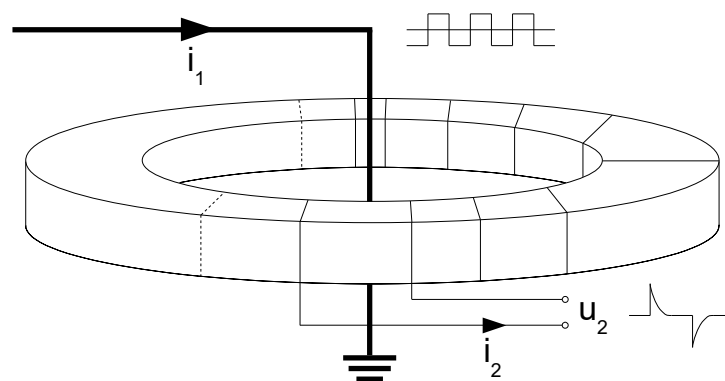


Obrázek 41: Schéma kapacitní sondy [32]

Induktivní snímače

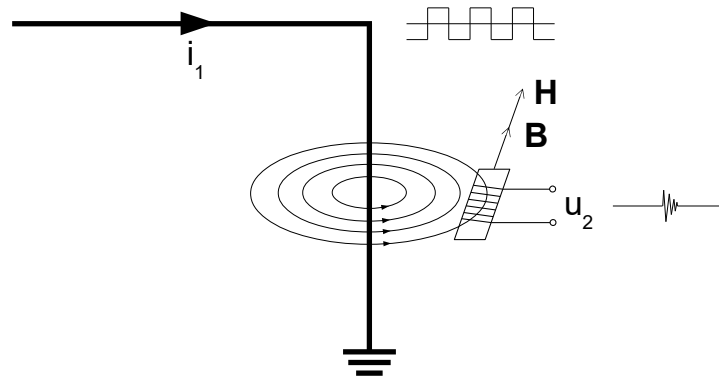
Induktivní snímače se využívají pro detekci impulzních dobíjecích proudů částečných výbojů v přívodu uzemnění měřicího elektrického obvodu. Existují dva typy induktivních snímačů - toroidní a lineární. Stejně jako v případě kapacitních snímačů i zde je velkou výhodou ochrana měřicího systému před přepětím při průrazu izolace.

Na obrázku 42 je uveden toroidní snímač, jehož středem prochází přívod uzemnění, který tak tvoří primární vinutí. Na jádře nejčastěji z magneticky měkkého materiálu je navinuto sekundární vinutí, pomocí kterého je snímán již zmíněný impulzní dobíjecí proud.



Obrázek 42: Schéma toroidní induktivní sondy [32]

Lineární induktivní sondu je nutno umístit tak, aby podélná osa snímače byla orientována souhlasně s vektory magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Výhodou lineární sondy je fakt, že se nemusí rozpojovat obvod zkoušeného objektu, což toroidní snímač nedovoluje. Schéma lineární induktivní sondy je zobrazeno na obrázku 43. [38]



Obrázek 43: Schéma lineární induktivní sondy [32]

LEMKE sonda

Diferenciální sonda LEMKE PROBE LDP-5 (obrázek 44) je využívána pro detekci i lokalizaci částečných výbojů v různých zařízeních vysokého napětí. Jedná se o rychlou a levnou metodu měření, která umožňuje sledování výbojové činnosti za chodu zařízení. Vzhledem k mobilitě měřicího systému je možné i měření v terénu. [41]



Obrázek 44: LEMKE sonda (převzato z [42])

Zařízení využívá snímání elektromagnetického pole částečných výbojů plošnými kapacitními nebo lineárními induktivními sondami. Principem je širokopásmové zesílení impulzů částečných výbojů a elektronická integrace pro detekci zdánlivého náboje. Kapacitní vazba se využívá, je-li výbojová činnost pro senzor "viditelná", tedy pokud není izolace úplně elektromagneticky stíněna. Induktivní vazba je využívána, pokud lze snímat kovovou cestu pro přenos částečných výbojů. [43, 44]

2.6.2 Neelektrické metody měření částečných výbojů

Neelektrické metody měření mohou být nazývány též metodami nekonvenčními. Při měření se využívá neelektrických nepřímých projevů výbojové činnosti, kterými jsou například vznik chemických zplodin, světelného záření, tepelný ohřev a zvukové vlny. Pomocí těchto metod není možné zjistit zdánlivý náboj, avšak je možné je využít k detekci, lokalizaci a kvantifikaci míry výbojové činnosti. Z předchozího textu vyplývá, že se při těchto měřeních používají různé speciální měřicí přístroje, jako jsou směrové mikrofony, přístroje pro noční vidění, termovize či plynová chromatografie. [33, 38] Neelektrickými metodami měření ČV se zabývá norma IEC TS 62478:2016 [45].

Chemická detekce

Jak již bylo zmíněno, výbojová činnost v izolačním systému může vyvolat vznik chemických zplodin. Izolačním systémem nemusí být jen izolace kabelů, ale například i olejová nebo plynná izolace elektrických strojů, využívaná popřípadě i jako chladiivo.

Metodami používanými pro chemickou detekci jsou plynová chromatografie (chromatografická analýza) a indikace ozónu v chladicím vzduchu. Výhodou chemických metod je neovlivnitelnost výsledků elektromagnetickým rušením při provozu stroje. Chemická detekce se využívá téměř výhradně pro diagnostiku izolačních systémů elektrických strojů, které jsou dlouhodobě vystaveny částečným výbojům (vodíkové chlazení, transformátorový olej apod.). [38, 40]

Akustická detekce

Metody akustické detekce využívají měření akustických signálů vytvořených rychlou změnou tlaku způsobenou částečnými výboji. Výhodou je stejně jako u chemické detekce odolnost vůči elektromagnetickému rušení a možnost on-line měření během provozu zařízení. Akustická detekce se používá především pro lokalizaci výbojové činnosti, a to dvěma možnými způsoby. Jedním způsobem je použití jedné zvukové sondy a postupné hledání lokality nejsilnějšího projevu částečných výbojů. Druhým způsobem je užití několika pevných sond ve spojení se softwarovým zpracováním. Zařízení používaná pro tyto metody jsou mimo jiné mikrofony, zesilovače a zobrazovací jednotky. [33, 38, 40]

Optická detekce

Jedním z projevů částečných výbojů je světelné záření ve viditelném, infračerveném i ultrafialovém spektru. V případě viditelného spektra můžeme výbojovou činnost sledovat pouhým okem, popřípadě kamerou nebo fotoaparátem. Stejně jako akustická detekce je i optická detekce využívána pro lokalizaci místa působení částečných výbojů. Za optické metody lze považovat metodu vizuální detekce, metodu sledování emise světelného záření, hledání stop po výbojové činnosti, snímání ultrafialového záření nebo snímání infračerveného záření. Zajímavým případem využití optické detekce může být například sledování výbojů na venkovním vedení za pomoci vrtulníku. [33, 38, 40]

Tepelná detekce

Dalším způsobem zjišťování výbojové činnosti je tepelná detekce. Částečné výboje v nehomogenitách dielektrika způsobují lokální ohřev. Ke snímání tohoto projevu lze využít soustavu termočlánků, která dává informaci o rozložení teploty na povrchu zkoušeného objektu. Modernějším a lepším způsobem je pak použití termovize. [40]

3 Praktické zkoušky kabelů a kabelových souborů

Účelem praktické části diplomové práce je provedení napěťové zkoušky dle ČSN IEC 60502-2 [25] a měření částečných výbojů dle ČSN EN 60885-3 [28] ve třech typech kabelů ve variantě s namontovaným zakončením a následně ve variantě se zakončením a spojkou.

3.1 Popis měřených vzorků

Ještě před samotným měřením a analýzou naměřených hodnot je vhodné popsat měřené vzorky. Následující rozbor vzorků kabelů vychází z jejich kódového označení.

3.1.1 Kabel 6-CXKFE-R/LOCA 1x240

Tabulka 7: Popis kabelu 6-CXKFE-R/LOCA 1x240

Znak	Vysvětlení
6	jmenovité napětí 3,6/6 kV
C	měděné vodivé jádro třídy 2 dle ČSN EN 60228
X	izolace na bázi XLPE
KF	kabel s koncentrickým vodičem provedeným ovinem Cu páskou
E	plášť z termoplastického materiálu typu HFFR
-R	kabel oheň nešířící dle ČSN EN 60332-3-22
LOCA	kabel pro jadernou energetiku a prostředí s výskytem ionizujícího záření
1x240	jednožilový kabel o průřezu jádra 240 mm ²

Kabelové zakončení

Kabelové zakončení se skládá z lisovacího kabelového oka, výplňové a elektrické pole vyhlazující pásky, teplem smrštitelné trubice pro řízení elektrického pole, teplem smrštitelné izolační trubice odolné svodovým proudům, těsnicí sady zabraňující pronikání vlhkosti a sady pro vyvedení koncentrického vodiče (stínění). Fotografie hotového kabelového zakončení je zobrazena na obrázku 8.

Kabelová spojka

Konstrukce kabelové spojky je podobná konstrukci kabelového zakončení. Skládá se z lisovacího spojovače, výplňové a elektrické pole vyhlazující pásky, teplem smrštitelné

trubice pro řízení elektrického pole, teplem smrštitelné izolační trubice, polovodivé pásy, CuSn sítky pro zachování připojení koncentrického vodiče, sklotextilní pásy pro zachování protipožárních vlastností, těsnicí sady zabraňující pronikání vlhkosti a vnější teplem smrštitelné plášťové trubice.

Poznámka: Měření bylo prováděno na třech vzorcích daného kabelu (vzorek 1.1, vzorek 1.2, vzorek 1.3) nejprve ve variantě se zakončeními a následně se zakončeními a spojkou.

3.1.2 Kabel 10-CXKFE-R/LOCA 3x35

V tomto případě se jedná o třížilový kabel o průřezu jádra 35 mm² a hodnotě jmenovitého napětí 6/10 kV. Ostatní vlastnosti jsou shodné s předcházejícím typem.

Kabelové zakončení a spojka

Konstrukce kabelového zakončení a spojky jsou totožné s předcházejícím typem. Fotografie kabelového zakončení je zobrazena v příloze 6 na obrázku 38.

Poznámka: Jelikož se jedná o třížilový kabel, bylo měření prováděno na jednom vzorku daného kabelu (vzorek 2.1) nejprve ve variantě se zakončeními a následně se zakončeními a spojkou.

3.1.3 Kabel 6-CHKFE-V 3x120 SM

Tabulka 8: Popis kabelu 6-CHKFE-V 3x120 SM

Znak	Vysvětlení
6	jmenovité napětí 3,6/6 kV
C	měděné vodivé jádro třídy 2 dle ČSN EN 60228
H	izolace na bázi HEPR
KF	kabel s koncentrickým vodičem provedeným ovinem Cu páskou
E	plášť z termoplastického materiálu typu HFFR
-V	oheň nešířící (ČSN EN 60332-3-22) a ohniodolný (ČSN EN 60331-21)
3x120	třížilový kabel o průřezu jádra 120 mm ²
SM	sektorové jádro

Kabelové zakončení

V tomto případě je konstrukce kabelového zakončení mírně odlišná. Skládá se z lisovacího kabelového oka, teplem smrštitelné izolační trubice odolné svodovým proudům, těsnicí sady k zabránění pronikání vlhkosti a sady pro vyvedení koncentrického vodiče. Fotografie daného kabelového zakončení je uvedena v příloze 6 na obrázku 39.

Kabelová spojka

Konstrukce kabelové spojky je též odlišná od předchozích vzorků. Sestává z lisovacího spojovače, polovodivé pásky, skloslídové pásky, teplem smrštitelné izolační trubice, CuSn sítky pro zachování připojení koncentrického vodiče, sklotextilní pásky pro zachování protipožárních vlastností, těsnicí sady pro zamezení vniku vlhkosti a vnější teplem smrštitelné plášťové trubice.

Poznámka: Jelikož se jedná o třížilový kabel, bylo měření prováděno na jednom vzorku daného kabelu (vzorek 3.1) nejprve ve variantě se zakončeními a následně se zakončeními a spojkou.

3.2 Napěťová zkouška

Měření částečných výbojů předcházela po montáži kabelového zakončení, respektive kabelové spojky, napěťová zkouška. Jak je popsáno v kapitole 1.6.1, provádí se střídavým zkušební napětím o hodnotě 3,5násobku napětí jmenovitého (viz. tabulka 4) po dobu 5 minut. Zkušební napětí bylo přiváděno vždy mezi žílu a kovové uzemněné stínění. U třížilových kabelů bylo měření provedeno postupně pro každou žílu, přičemž ostatní žíly byly spolu s kovovým stíněním společně uzemněny.

3.3 Měření částečných výbojů

Měření částečných výbojů bylo prováděno galvanickou globální metodou v zapojení s paralelní snímací impedancí dle obrázku 38 v kapitole 2.6.1. Fotografie reálného zapojení obvodu je uvedeno v příloze 7 na obrázku 42. Dle normy ČSN EN 60885-3 [28] je zkušební napětí rovno 1,73násobku napětí jmenovitého. Zkušební napětí bylo přikládáno stejným postupem jako v případě napěťové zkoušky.

Mimo měření výbojové činnosti byla provedena i její lokalizace pomocí diferenciální sondy LEMKE PROBE LDP-5 (kapitola 2.6.1). S různými snímači bylo zjišťováno, zda dochází k částečným výbojům v kabelu, zakončeních nebo ve spojce. Fotografie zachycující měření LEMKE sondou je uvedena v příloze 7 na obrázku 43.

3.4 Shrnutí a diskuze výsledků

První zkouškou v pořadí po montáži kabelového příslušenství byla napěťová zkouška. Kabely s nižším jmenovitým napětím 3,6/6 kV (vzorky 1.1, 1.2, 1.3, 3.1) byly zkoušeny napětím 12,5 kV a kabel s vyšším jmenovitým napětím 6/10 kV (vzorek 2.1) byl zkoušen napětím 21 kV. Veškeré vzorky zkoušku obstály, to znamená, že nedošlo k průrazu jejich izolace.

Při měření částečných výbojů na vzorcích 1.1, 1.2 a 1.3 jednožilového kabelu v konfiguraci pouze se zakončeními bylo dle tabulky 9 zjištěno, že při zkušebním napětí 6,3 kV vyhovují požadavku danému výrobcem (zdánlivý výboj menší než 5 pC). Tento požadavek byl splněn i pro vyšší hodnotu zkušebního napětí 10,4 kV, ač je tento kabel a příslušenství konstruováno pro nižší napěťovou hladinu. V konfiguraci se spojkou byly vyhovující vzorky 1.1 a 1.3, kdy se výboje opět neprojeví. V případě vzorku 1.2 bylo zapalovací napětí částečných výbojů těsně na hranici napětí zkušebního, tedy 6,3 kV, a hodnota zdánlivého náboje se pohybovala v rozmezí $10 \div 250$ pC. Dle diagramů v příloze 2 lze usuzovat, že se jedná o klouzavý výboj například v mezeře vytvořené nedokonalým smrštěním izolační trubice, případně nedostatečným ovínem výplňovou páskou. Nedokonalé smrštění vnější plášťové trubice je uvedeno na obrázku 41 v příloze 6. Dále bylo provedeno informativní měření na napěťové hladině 10,4 kV, přičemž byly zjištěny výboje o hodnotách v řádu stovek pC (tabulka 9). Zároveň byla lokalizována výbojová činnost pomocí LEMKE sondy a ověřen fakt, že se částečné výboje vyskytují ve spojce a nikoliv v zakončeních.

V případě vzorku 2.1 třížilového kabelu byl výsledek měření v konfiguraci pouze se zakončeními vyhovující. Při zkušebním napětí 10,4 kV se částečné výboje nijak neprojeví ani na jedné z žil. Po montáži spojky vyhovovala požadavku pouze žíla s označením L3 s naměřeným zdánlivým výbojem 1,2 pC. Měření na L1 vykazovalo zdánlivý náboj o

hodnotě 1,7 nC a zapalovací napětí 8 kV, což bylo způsobeno nedodržením správného technologického postupu, přičemž nebyl vhodně zvolen průměr smršťitelné trubice a vznikla tak mezivrstevná mezera. Vzhledem k takto vysoké hodnotě náboje lze říci, že se jedná o klouzavý výboj ve zmíněných mezivrstevných mezerách. Hodnoty pro L2 byly pozitivnější, avšak stejně nevyhovující, zdánlivý náboj v rozmezí $20 \div 80$ pC při zapalovacím napětí 10,1 kV. Vzhledem k diagramům v příloze 4 lze usuzovat, že se jedná stejně jako v případě žíly L1 o klouzavé výboje, avšak daná vzduchová mezera může být větší, proto nedošlo k zapálení dominantních částečných výbojů.

Poslední vzorek 3.1 třížilového kabelu byl mírně odlišné konstrukce. Hlavním rozdílem oproti výše uvedeným kabelům bylo jádro lisované do sektorů a ovin jádra skloslídovou páskou. V obou modifikacích vzorku (zakončení, zakončení + spojka) byla naměřena výbojová činnost o hodnotách zdánlivého náboje v řádu jednotek nC (tabulka 9). Zapalovací napětí částečných výbojů se ve většině případů pohybovalo na hodnotě 3 kV. Tento vzorek tedy nevyhověl ani ve variantě pouze se zakončením. Na vině je s největší pravděpodobností zmíněná tvrdá skloslídová páska, která potřebně nevyplní mezery mezi jednotlivými dráty na okraji sektorového jádra. Tyto vzduchové mezery jsou dobře patrné na obrázku 45.



Obrázek 45: Konstrukce kabelu 6-CHKFE-V 3x120 SM (vzorek 3.1)

Tabulka 9: Naměřené hodnoty

Vzorek	Varianta	U_{zk} [kV]	q_p [pC]	q [pC]	U_i [kV]	U_e [kV]
1.1	zakončení	6,3	2,0	-	-	-
1.1	zakončení	10,4	2,0	-	-	-
1.1	zakončení + spojka	6,3	1,3	-	-	-
1.1	zakončení + spojka	10,4	1,4	250	8,0	8,0
1.2	zakončení	6,3	1,7	-	-	-
1.2	zakončení	10,4	1,7	-	-	-
1.2	zakončení + spojka	6,3	6,0	10 ÷ 250	6,3	6,3
1.2	zakončení + spojka	10,4	6,0	1250	6,3	6,3
1.3	zakončení	6,3	1,7	-	-	-
1.3	zakončení	10,4	1,7	-	-	-
1.3	zakončení + spojka	6,3	1,5	-	-	-
1.3	zakončení + spojka	10,4	1,5	400	7,0	7,0
2.1	zakončení	10,4 (L1)	0,4	-	-	-
2.1	zakončení	10,4 (L2)	0,4	-	-	-
2.1	zakončení	10,4 (L3)	0,4	-	-	-
2.1	zakončení + spojka	10,4 (L1)	0,8	1700	8,0	8,0
2.1	zakončení + spojka	10,4 (L2)	0,8	20 ÷ 80	10,1	10,1
2.1	zakončení + spojka	10,4 (L3)	0,8	1,2	-	-
3.1	zakončení	6,3 (L1)	0,3	1000	6,0	4,6
3.1	zakončení	6,3 (L2)	0,3	3300	3,0	2,9
3.1	zakončení	6,3 (L3)	0,3	2900	3,1	3,1
3.1	zakončení + spojka	6,3 (L1)	0,4	1700	3,0	3,0
3.1	zakončení + spojka	6,3 (L2)	0,4	1000	3,0	3,0
3.1	zakončení + spojka	6,3 (L3)	0,4	1900	3,0	3,0

Poznámka: Pokud je v tabulce uveden pro hodnotu zdánlivého náboje q znak "-", byla tato hodnota menší než hodnota zdánlivého náboje pozadí q_p .

4 Závěr

V úvodní teoretické části práce byla popsána konstrukce a technologie výroby silnoprůdných kabelů a kabelových souborů včetně přehledu zkušebních metod. Další část se zabývala typy, dělením a účinky částečných výbojů spolu s jejich měřením.

V praktické části práce byl ověřen vliv kabelových souborů na výbojovou činnost ve třech typech výtlačně lisovaných kabelů. Zkoušení sestávalo z provedení napěťové zkoušky a měření částečných výbojů ve variantách kabelů se zakončeními a následně se zakončeními a spojkou. Kritérium napěťové zkoušky bylo splněno, pokud nedošlo k průrazu izolace zkoušeného vzorku. Požadavkem při měření částečných výbojů pak byla hodnota zdánlivého náboje menší než 5 pC při daném zkušebním napětí. Dále byla také u vybraných vzorků provedena informativní lokalizace výbojové činnosti LEMKE sondou.

Na základě výše uvedených zkoušek bylo zjištěno, že dané požadavky byly splněny u vzorků jednožilového kabelu 1.1, 1.2 a 1.3 se zakončeními a vzorku třížilového kabelu 2.1 v téže konfiguraci. Vzorek třížilového kabelu 3.1 se zakončeními sice vyhověl napěťové zkoušce, ale jak uvádí tabulka 9, naměřená výbojová činnost byla zcela nepřijatelná. V případě kabelů se zakončeními a spojkou byly vyhovující pouze vzorky 1.1 a 1.3. U ostatních vzorků nebyl splněn požadavek na hodnotu zdánlivého náboje částečných výbojů. Na závěr nutno podotknout, že napěťové zkoušce vyhověly všechny testované vzorky.

Vzhledem k naměřeným hodnotám a diagramům lze říci, že výbojová činnost u většiny nevyhovujících vzorků byla důsledkem nedodržení správného technologického postupu. Doporučením pro další montáže kabelových souborů tak může být použití vhodnějších průměrů smrštitelných trubic a důkladnější provedení ovinu výplňovými páskami.

Reference

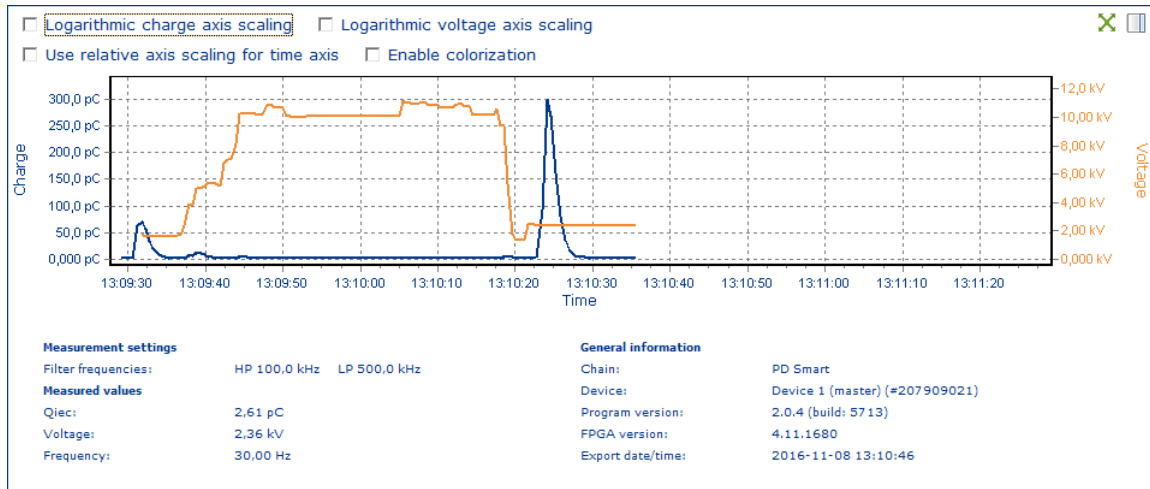
- [1] WASYLUK, Rostislav. *Elektrotechnologie pro školu a praxi* Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-306-1.
- [2] *Kabelárske názvoslovie: ČSN 34 5123*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1979. 44 s.
- [3] Značení kabelů a vodičů. *Knötig: telekomunikační materiál* [online]. Brno, [cit. 2016-10-25]. Dostupné z: <http://info.knotig.cz/tipy/znaceni/znacenkabelu.htm>
- [4] *Systém značení kabelů a vodičů: ČSN 34 7409*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 12 s.
- [5] BUCHLOVSKÝ, Emil, HOUŽVIČKA, František a GREŠÍK, Pavel. *Výroba kabelů a vodičů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986.
- [6] OKÁLI, Daniel. *Technologie výroby kabelů*. 1. vyd. Praha: ROH, 1963.
- [7] SCHENK, Ferdinand. Jak se dělá kabel. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. 2011, (7), s. 49-51.
- [8] MORAVEC, Jan. Úprava drátů a výroba pásů v kabelové technice. *OEnergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/uprava-dratu-a-vyroba-pasu-v-kabelove-technice/>
- [9] MORAVEC, Jan. Výroba vodivých jader v kabelové technice. *OEnergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/vyroba-vodivych-jader-v-kabelove-technice/>
- [10] MORAVEC, Jan. Izolování vodivých jader v kabelové technice. *OEnergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/izolovani-vodivych-jader-v-kabelove-technice/>
- [11] ARTBAUER, Ján a kol. *Kabely a vodiče*. 1 vyd. Praha: SNTL, 1956, 523 s.
- [12] Spojování silových kabelů. *Interactive Laboratory* [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://k313.feld.cvut.cz/enpacked/laboratory/kabel/kabely.html>
- [13] ČERMÁK, Michal. *Analýza úrovně síťování kabelové izolace* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2017-03-27]. Diplomová práce. Vedoucí práce Radek Polanský.
- [14] MORSHEDIAN, Jalil a Pegah Mohammad HOSEINPOUR. Polyethylene Cross-linking by Two-step Silane Method: A Review. *Iranian Polymer Journal* [online]. 2009, 18(2) [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228349540_Polyethylene_Cross-linking_by_Two-step_Silane_Method_A_Review

- [15] ZEIFART, Tomáš. *Rozložení elektrického pole ve vysokonapěťových kabelových koncovkách a spojkách* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64664/F3-BP-2016-Zeifart-Tomas-Zaverecna%20prace.pdf>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [16] GUAN, Huanmei, Hang QIAN, Haiyang KONG, Xuan WANG, Fuxin FANG a Guanying HU. Simulation calculation for total electric field of three-phase power cable. In: *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-4 [cit. 2017-02-17]. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800883. ISBN 978-1-5090-0496-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7800883/>
- [17] GUSTAVSEN, B. Panel session on data for modeling system transients insulated cables. In: *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)* [online]. IEEE, 2001, s. 718-723 [cit. 2017-02-17]. DOI: 10.1109/PESW.2001.916943. ISBN 0-7803-6672-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/916943/>
- [18] RUSSWUM, Dirk. On-site Combination of Withstand Voltage Testing and Partial Discharge Measurement for XLPE Power Cable Accessories. In: *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic* [online]. 2015 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.e-cigre.org/Order/select.asp?ID=1706196>
- [19] *Katalog výrobků společnosti Kabex* [online]. Holýšov: Kabelovna Kabex, 2014 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://data.kabex.quonia.cz/kestazeni/KATALOG.pdf>
- [20] PLAČEK, Ivo. *Diagnostika kabelů vysokého napětí*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Eva Müllerová.
- [21] *Katalog silových kabelových souborů společnosti TE Connectivity* [online]. Praha: Tyco Electronics Czech s.r.o., 2015 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.te.com/content/dam/te-com/documents/energy/global/productdocuments/Miscellaneous%20Locations/energy-epp0500-SiloveKabeloveSoubory-czech.pdf>
- [22] *6-36kV Medium Voltage Underground Power Cables: XLPE insulated cables* [online]. Nexans, 2009 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.nexans.co.uk/UK/files/Underground%20Power%20Cables%20Catalogue%2003-2010.pdf>
- [23] *Medium Voltage: kabelové soubory pro střední napětí* [online]. Cellpack, 2015 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.eltechcz.cz/download.php?idx=650&di=3>
- [24] *Slip-On Indoor Termination Datasheet* [online]. Nexans, 2014 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: http://www.nexans.be/eservice/Belgium-en/documentDownload_73462/AIN%20catalogue%20page

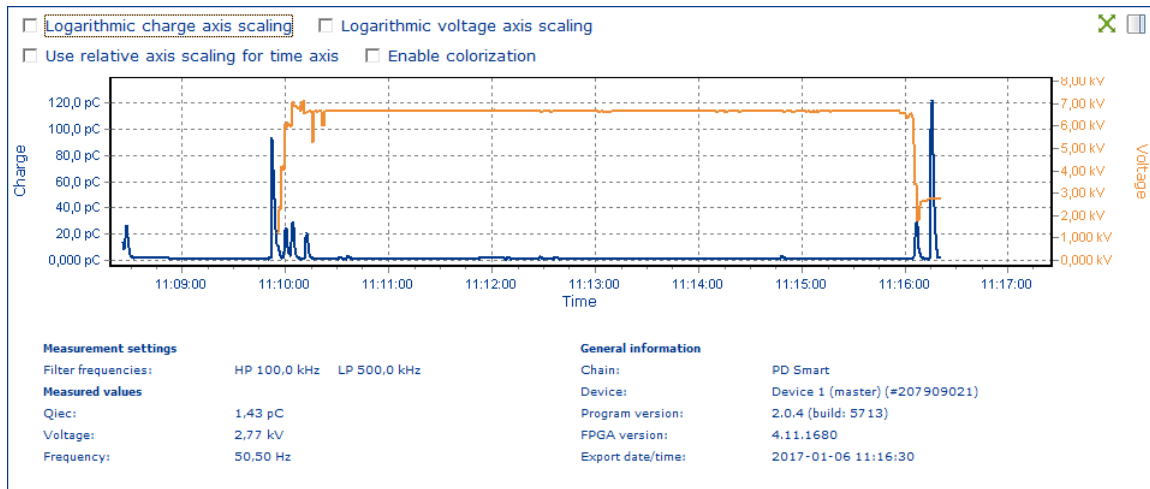
- [25] *Kabely s výtlačně lisovanou izolací a jejich příslušenství pro jmenovitá napětí od 1 kV ($U_m=1,2$ kV) do 30 kV ($U_m=36$ kV) - Část 2: Kabely pro jmenovitá napětí od 6 kV ($U_m=7,2$ kV) do 30 kV ($U_m=36$ kV): ČSN IEC 60502-2.* Praha: Český normalizační institut, 2004. 52 s.
- [26] *Jádra izolovaných kabelů: ČSN EN 60228.* Praha: Český normalizační institut, 2005. 24 s.
- [27] *Elektrické zkušební metody pro elektrické kabely - Část 2: Měření částečných výbojů: ČSN EN 60885-2.* Praha: Český normalizační institut, 2004. 8 s.
- [28] *Elektrické zkušební metody pro elektrické kabely - Část 3: Zkušební metody pro měření částečných výbojů na výrobních délkách výtlačně lisovaných silových kabelů: ČSN EN 60885-3 ed. 2.* Praha: Český normalizační institut, 2004. 28 s.
- [29] *Všeobecné zkušební metody izolačních a plášťových materiálů elektrických a optických kabelů - Část 2-1: Specifické metody pro elastomerové směsi - Zkouška odolnosti vůči ozónu, poměrné prodloužení při tepelném a mechanickém zatížení a zkouška ponořením do minerálního oleje: ČSN EN 60811-2-1.* Praha: Český normalizační institut, 1999. 12 s.
- [30] *Zkušební metody pro silnoproudé kabelové soubory se jmenovitým napětím od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 36 kV ($U_m = 42$ kV): ČSN EN 61442.* Praha: Český normalizační institut, 2005. 32 s.
- [31] *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů: ČSN EN 60270.* Praha: Český normalizační institut, 2001. 48 s.
- [32] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů.* Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [33] HUBÁČEK, Jaroslav. *Nekonvenční metody měření částečných výbojů.* 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Eva Müllerová.
- [34] VOSTRACKÝ, Zdeněk, VAJNAR, Vladimír a SEDLÁČEK, Jan. *Částečné výboje a jejich vliv na životnost energetických zařízení vysokého napětí.* In: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 53-60. ISBN 978-80-261-0522-0.
- [35] MARTÍNEK, Petr. *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů.* Disertační práce ZČU, Plzeň 2005.
- [36] AHMED, Zeeshan, Ghulam Amjad HUSSAIN, Matti LEHTONEN, Lukas VARACKA a Jozef KUDELICIK. *Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering* [online]. 2016 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7521817/>
- [37] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1978.
- [38] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení.* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.

- [39] *Recognition of Discharges* [online]. 1. vyd. Paříž, 1969 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://e-cigre.org/Order/select.asp?ID=766>
- [40] PASLAVSKÝ, Bohumil. *Měřicí metody částečných výbojů*. In: *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 3*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. s. 59-62. ISBN 978-80-7043-703-2.
- [41] RUSSWUM, Dirk. *On-Site Partial Discharge Monitoring using the differential LEMKE PROBE LDP-5 and its accessories. HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop* [online]. 2000 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: http://www.aba2net.com/ldic.de/publications/papers/08-Russwurm-Dirk-On-Site_Partial.pdf
- [42] *Partial Discharge Detector, LDP-5* [online]. 2013 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.hvtechnologies.com/HVSolutions/MeasurementSystems/PartialDischargeDetector,LDP-5/tabid/149/Default.aspx>
- [43] *Diferenciální sonda ČV LDP-5 pro detekci a lokalizaci částečných výbojů: Uživatelská příručka*. Volkersdorf: LEMKE DIAGNOSTICS, 1994.
- [44] PIHERA, Josef a ŠAVEL, Václav. *Měřicí systémy částečných výbojů*. In *Diagnostika 03*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. s. 55-58. ISBN: 80-7082-952-4.
- [45] *High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods: IEC TS 62478:2016*. International Electrotechnical Commission, 2016. 68 s.

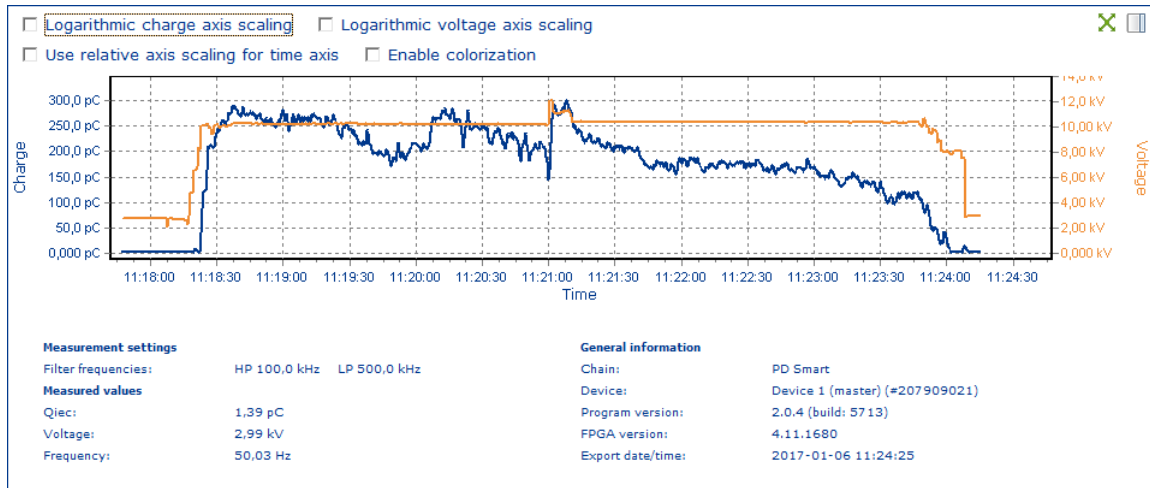
Příloha 1: Naměřené diagramy - vzorek 1.1



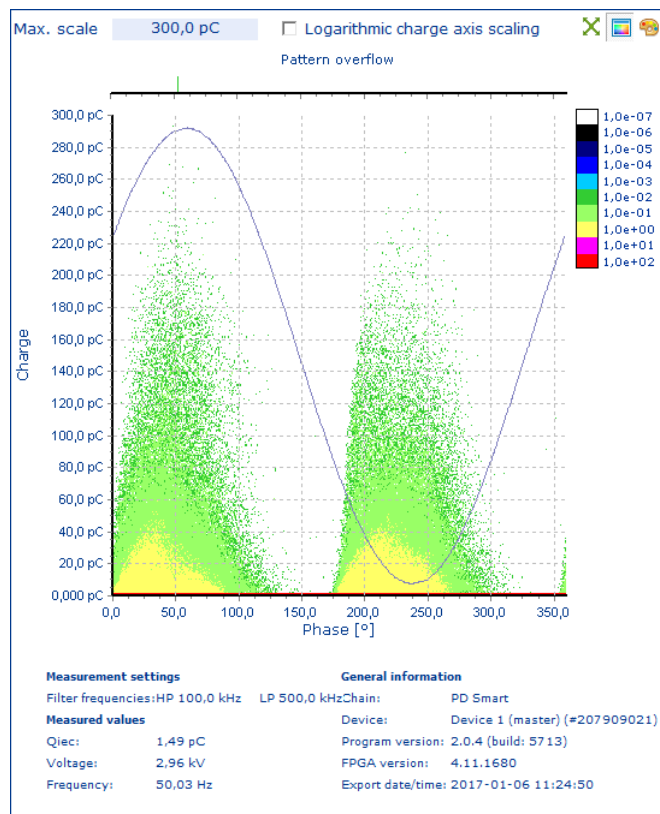
Obrázek 1: QtUt diagram: vzorek 1.1 se zakončeními ($U_{Zk} = 10,4$ kV)



Obrázek 2: QtUt diagram: vzorek 1.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 6,3$ kV)

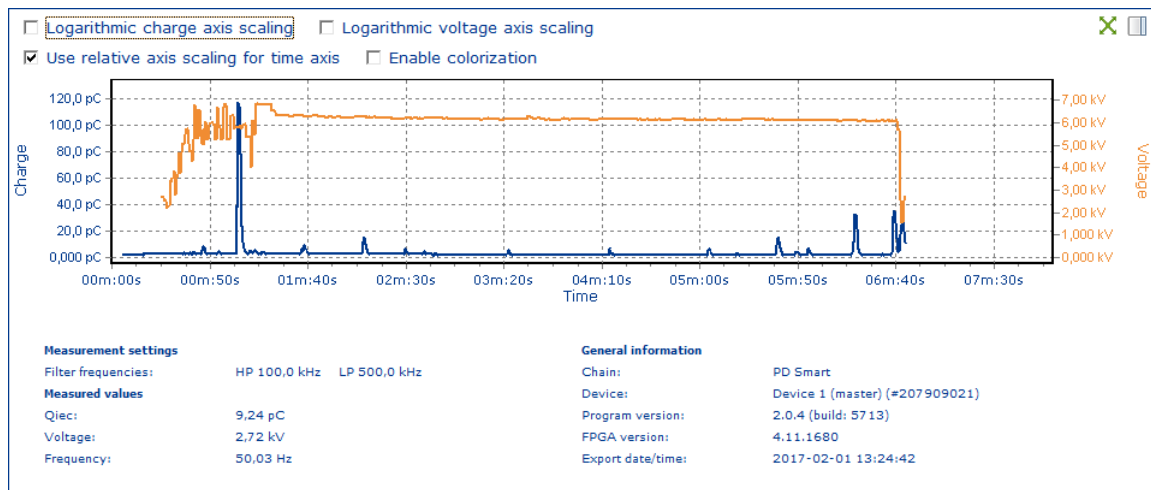
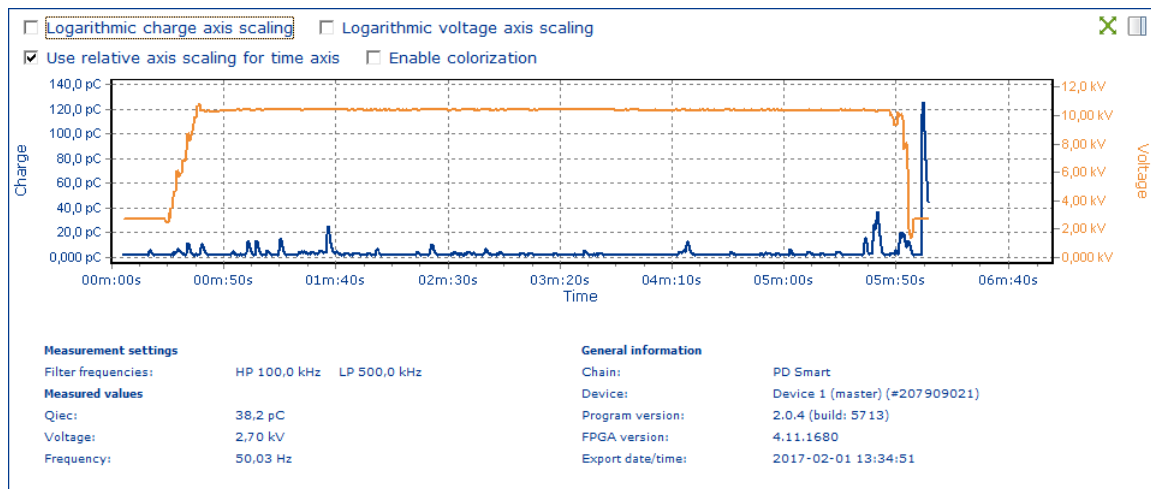


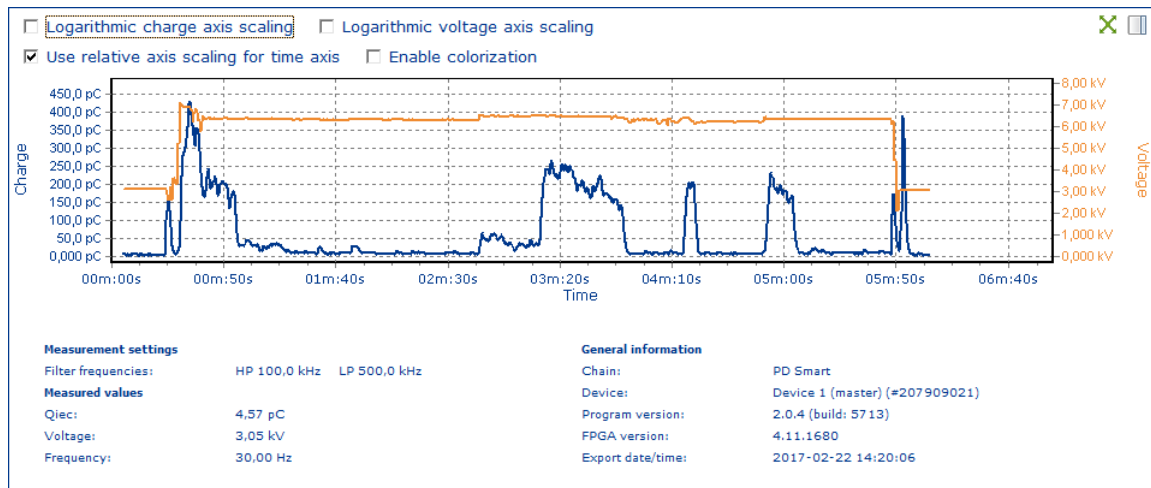
Obrázek 3: QtUt diagram: vzorek 1.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 10,4$ kV)



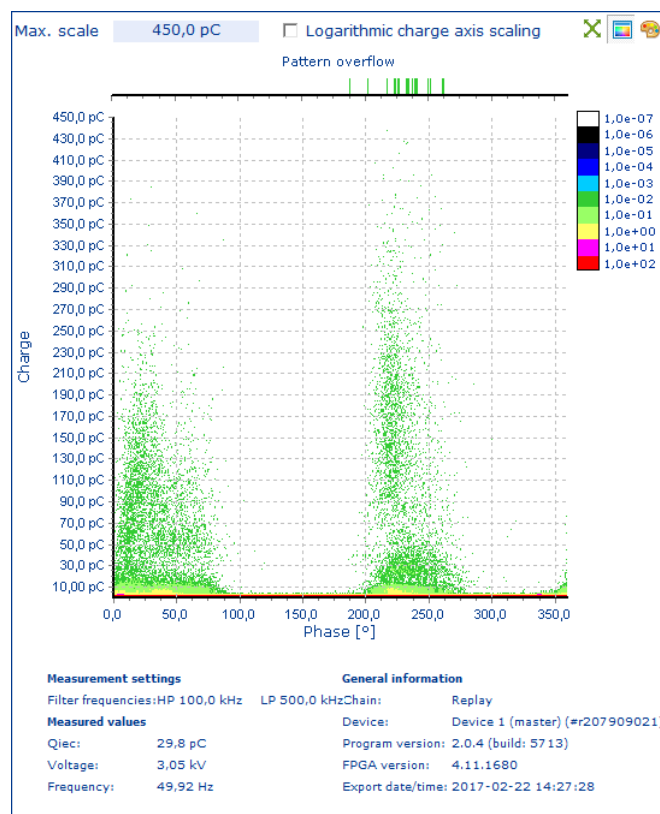
Obrázek 4: PRPD diagram: vzorek 1.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 10,4$ kV)

Příloha 2: Naměřené diagramy - vzorek 1.2

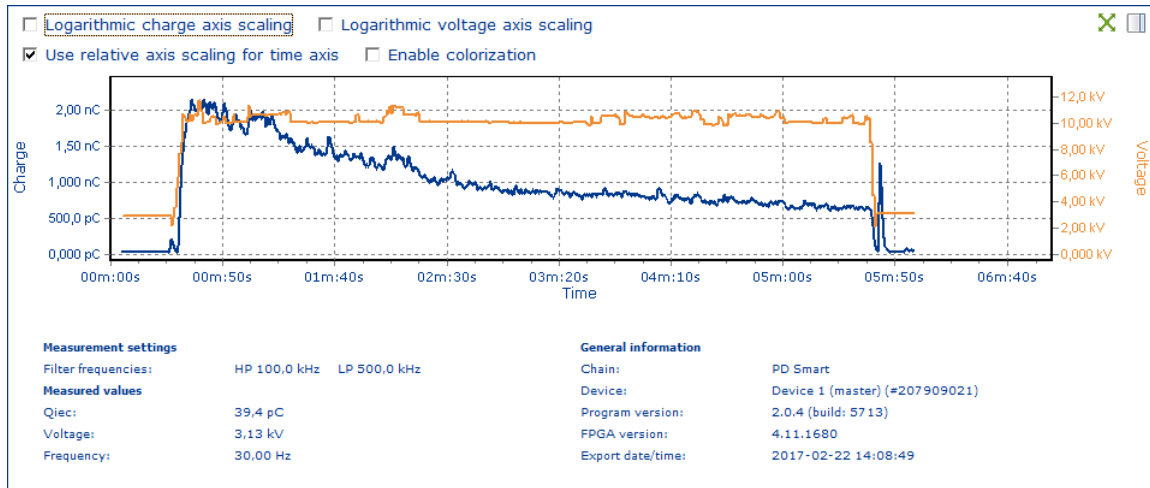
Obrázek 5: QtUt diagram: vzorek 1.2 se zakončeními ($U_{Zk} = 6,3$ kV)Obrázek 6: QtUt diagram: vzorek 1.2 se zakončeními ($U_{Zk} = 10,4$ kV)



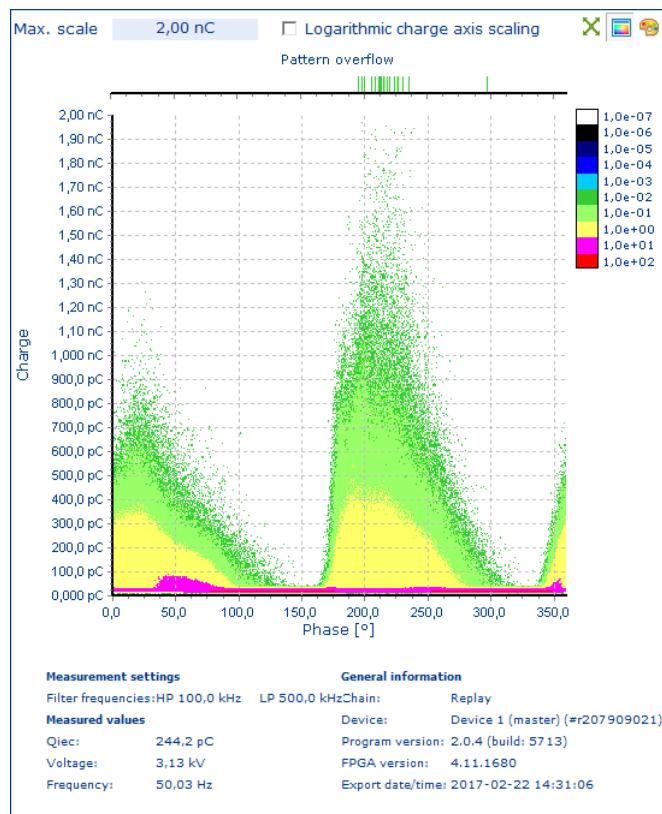
Obrázek 7: QtUt diagram: vzorek 1.2 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 6,3$ kV)



Obrázek 8: PRPD diagram: vzorek 1.2 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 6,3$ kV)

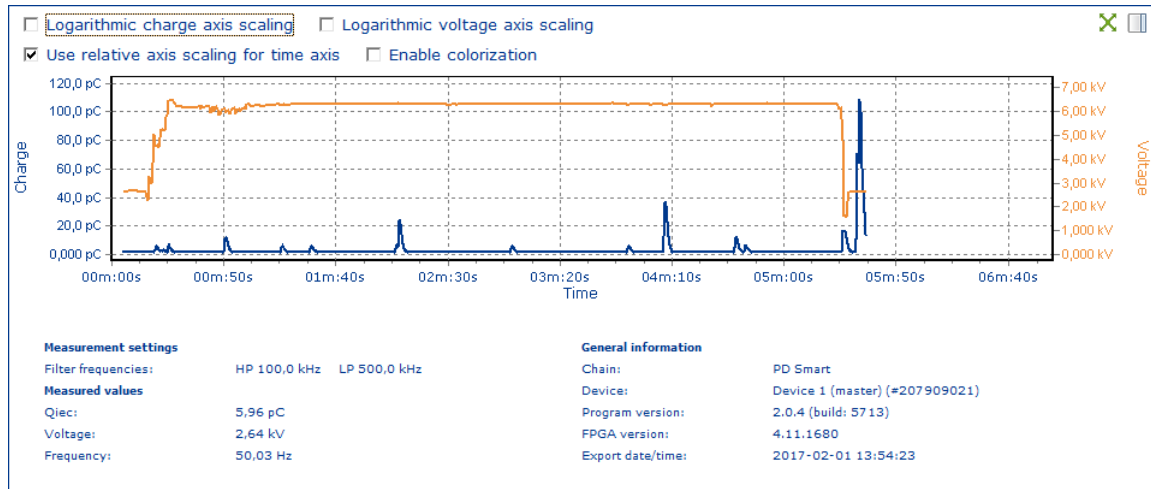


Obrázek 9: QtUt diagram: vzorek 1.2 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 10,4$ kV)

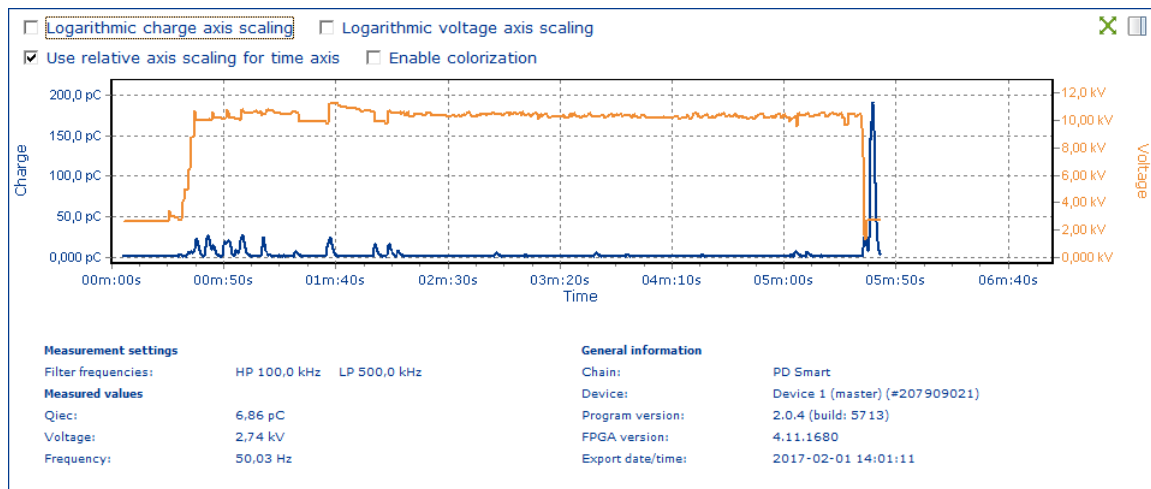


Obrázek 10: PRPD diagram: vzorek 1.2 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 10,4$ kV)

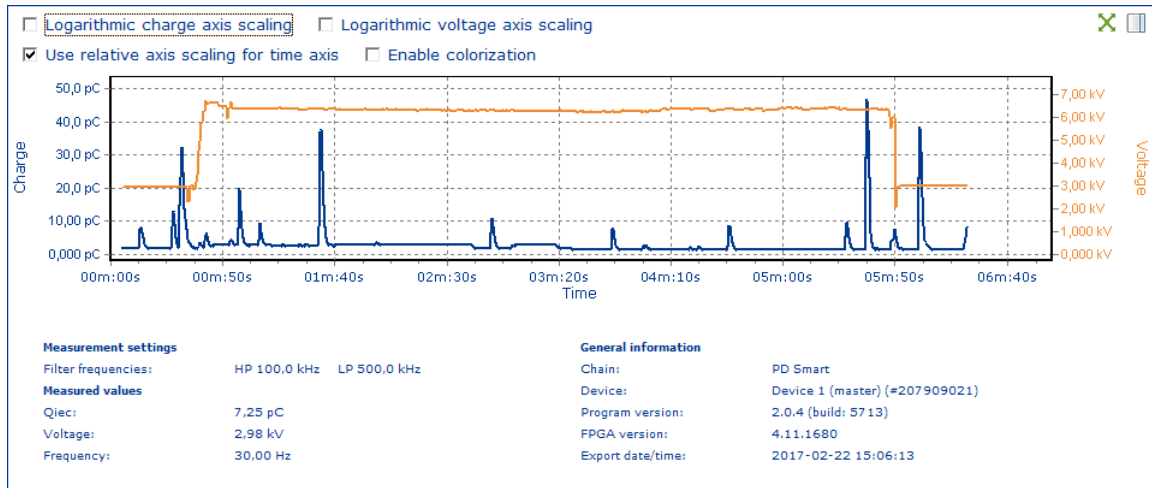
Příloha 3: Naměřené diagramy - vzorek 1.3



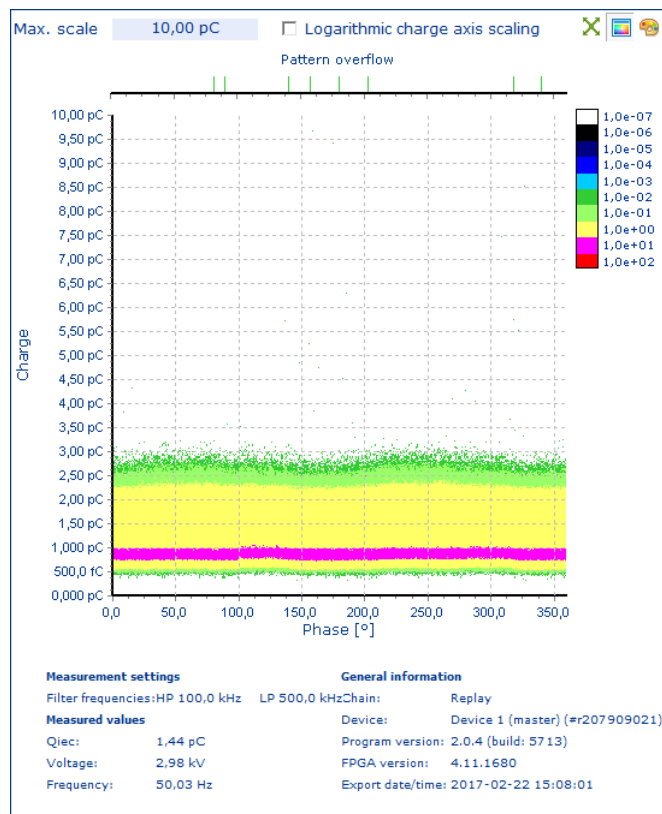
Obrázek 11: QtUt diagram: vzorek 1.3 se zakončeními ($U_{Zk} = 6,3$ kV)



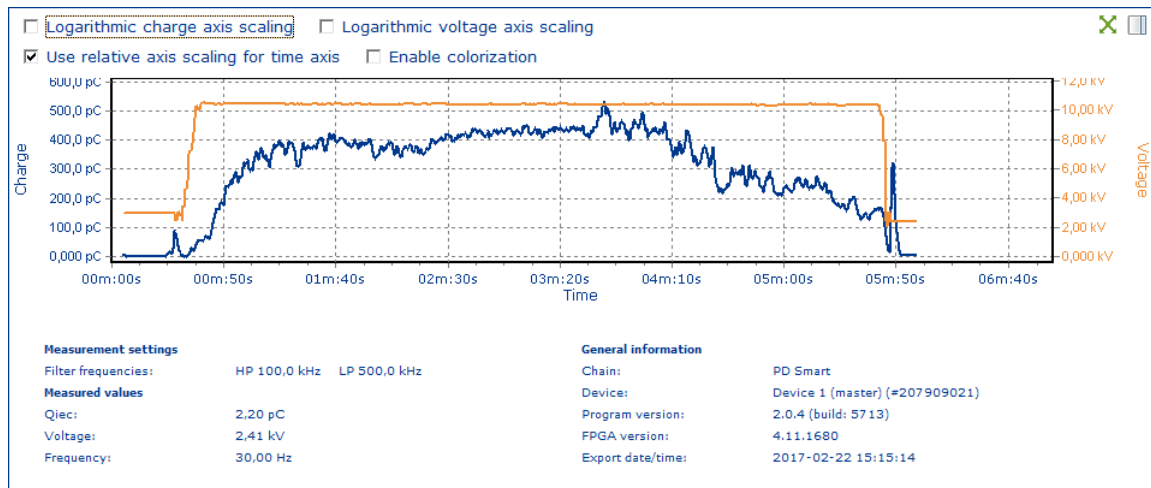
Obrázek 12: QtUt diagram: vzorek 1.3 se zakončeními ($U_{Zk} = 10,4$ kV)



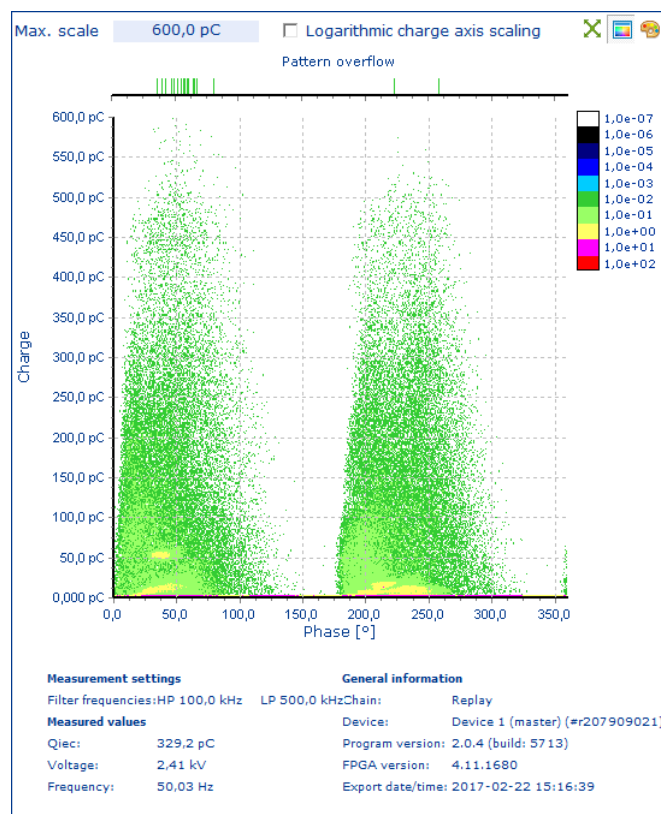
Obrázek 13: QtUt diagram: vzorek 1.3 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 6,3$ kV)



Obrázek 14: PRPD diagram: vzorek 1.3 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 6,3$ kV)

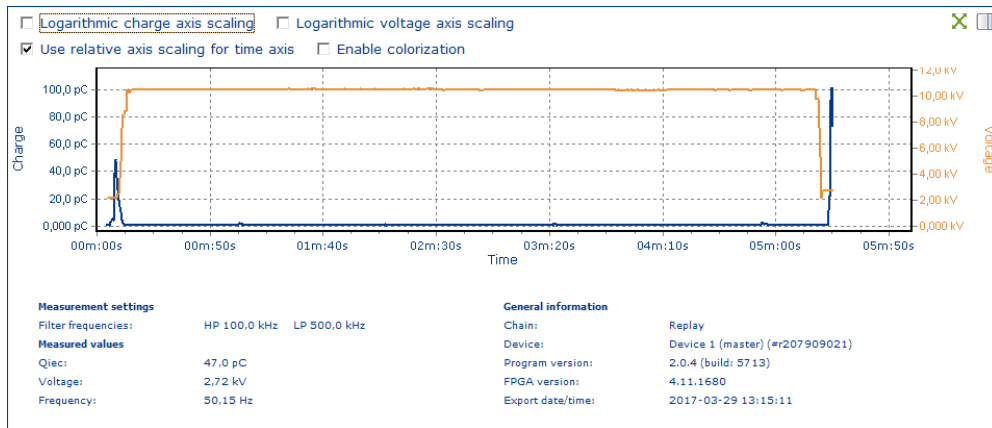


Obrázek 15: QtUt diagram: vzorek 1.3 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 10,4$ kV)

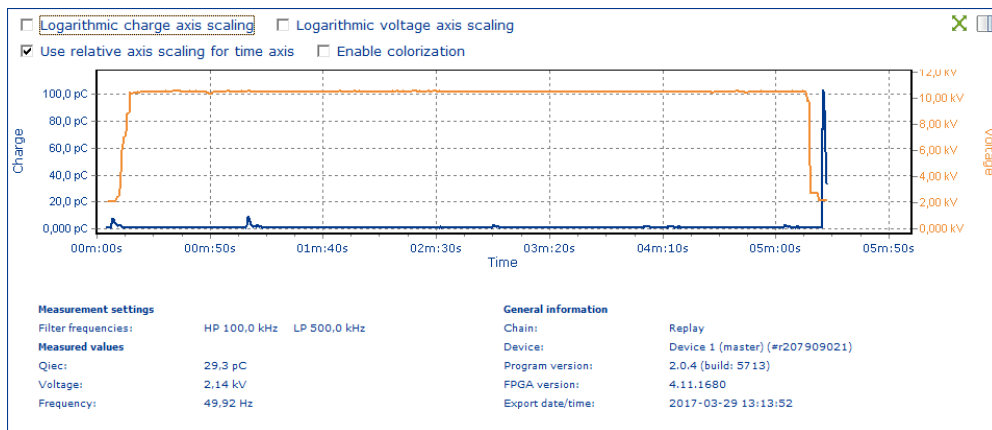


Obrázek 16: PRPD diagram: vzorek 1.3 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk} = 10,4$ kV)

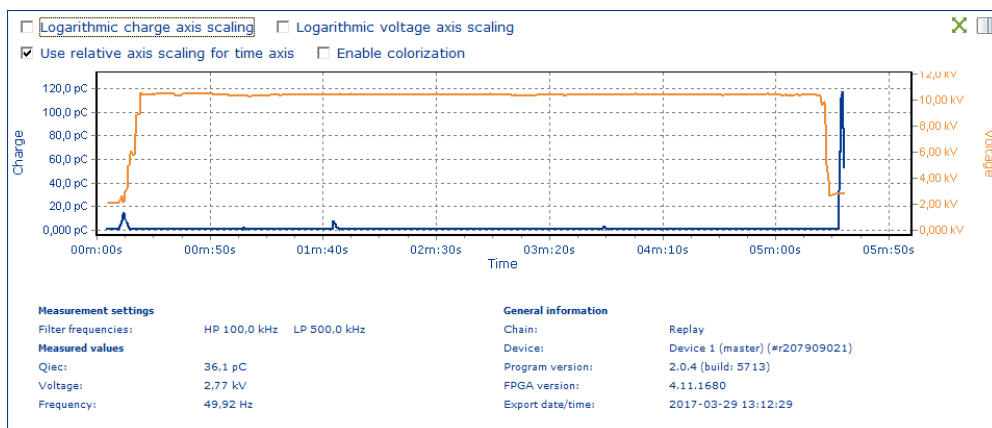
Příloha 4: Naměřené diagramy - vzorek 2.1



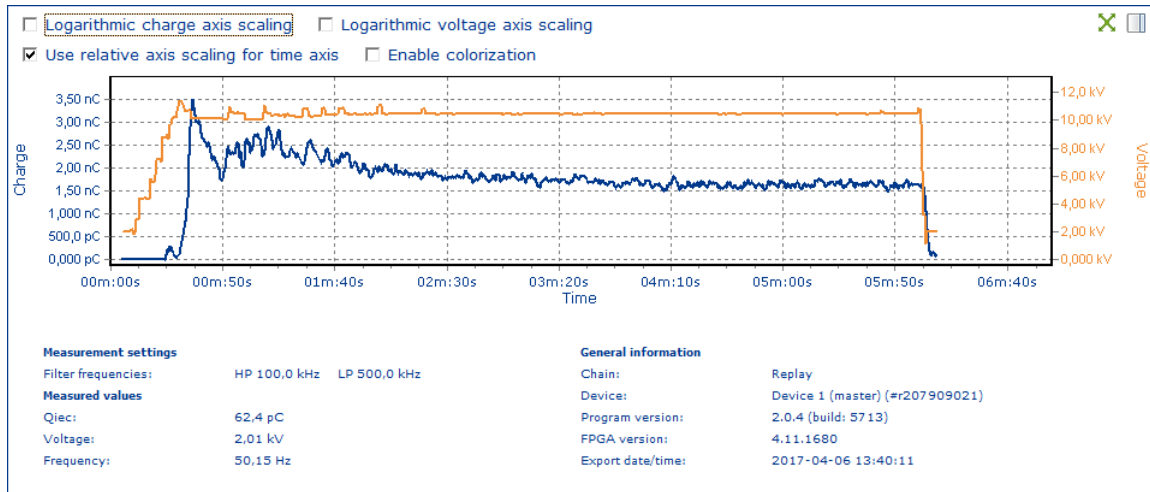
Obrázek 17: QtUt diagram: vzorek 2.1 se zakončeními ($U_{Zk L1} = 10,4$ kV)



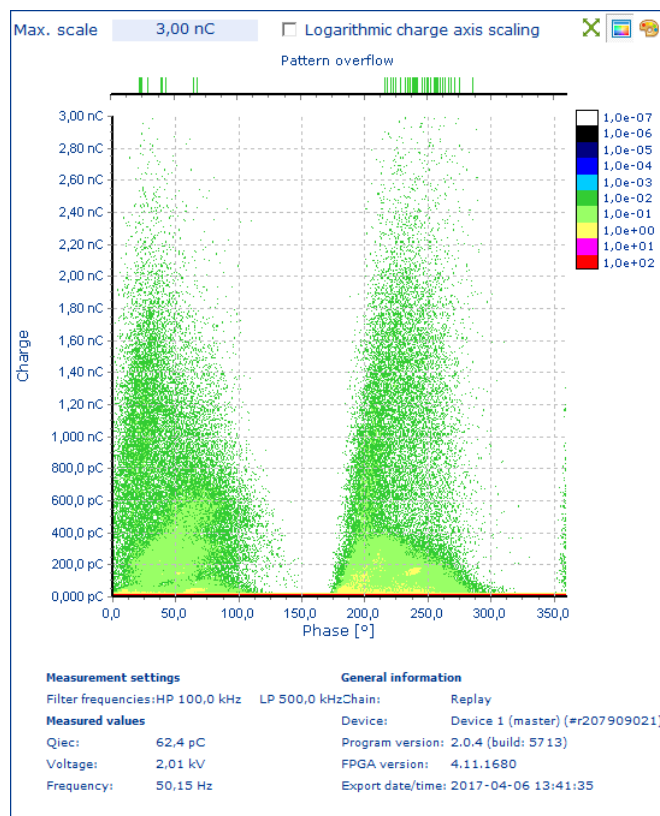
Obrázek 18: QtUt diagram: vzorek 2.1 se zakončeními ($U_{Zk L2} = 10,4$ kV)



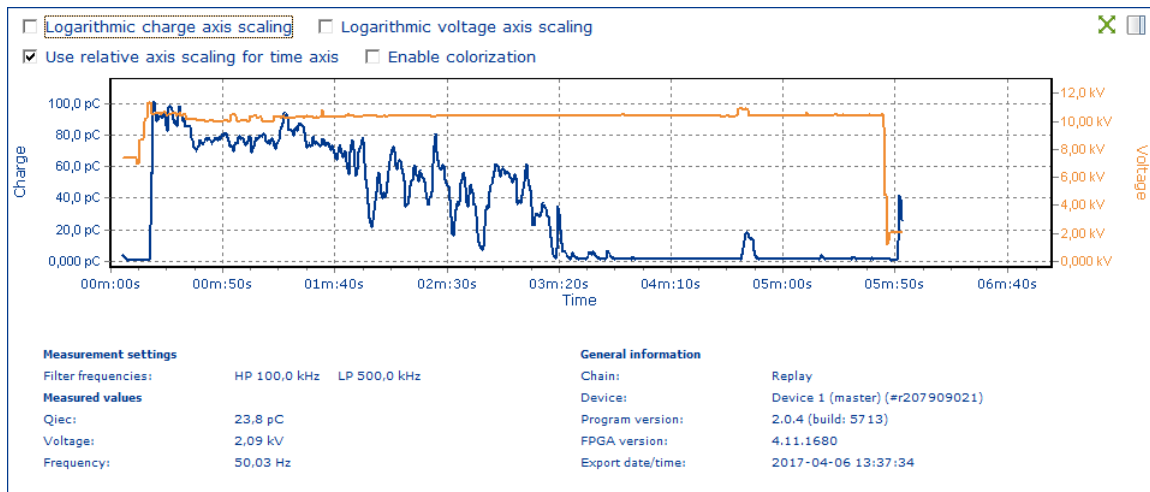
Obrázek 19: QtUt diagram: vzorek 2.1 se zakončeními ($U_{Zk L3} = 10,4$ kV)



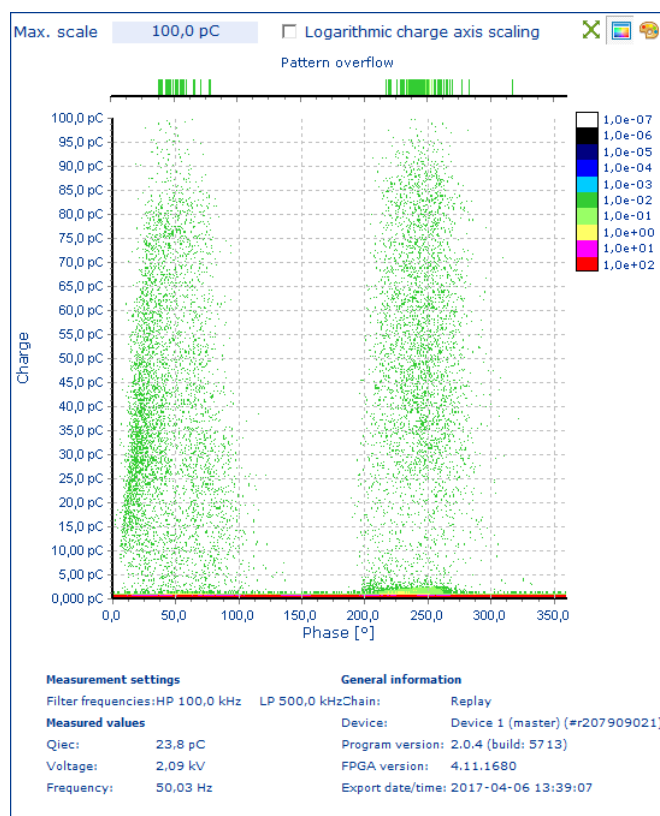
Obrázek 20: QtUt diagram: vzorek 2.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L1} = 10,4$ kV)



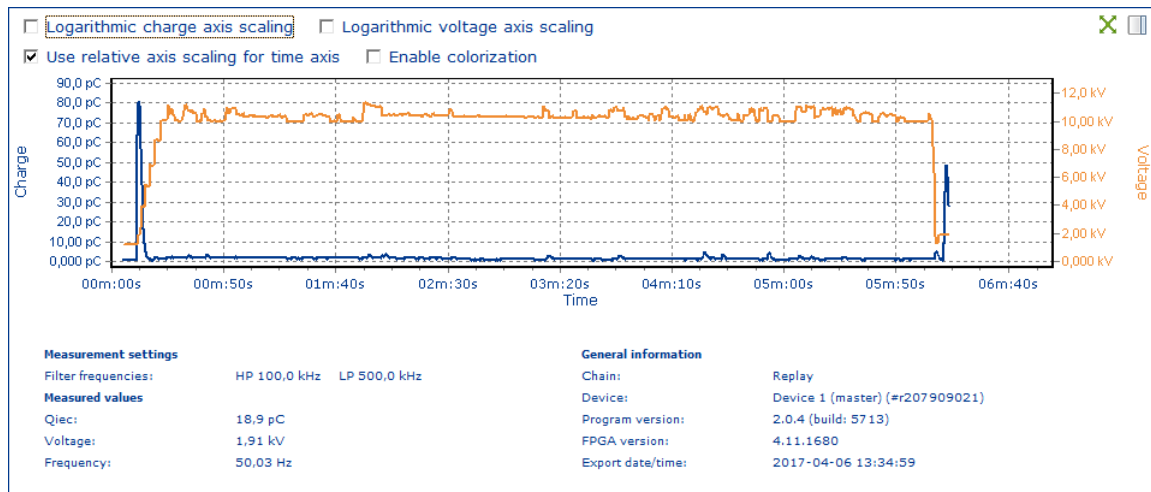
Obrázek 21: PRPD diagram: vzorek 2.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L1} = 10,4$ kV)



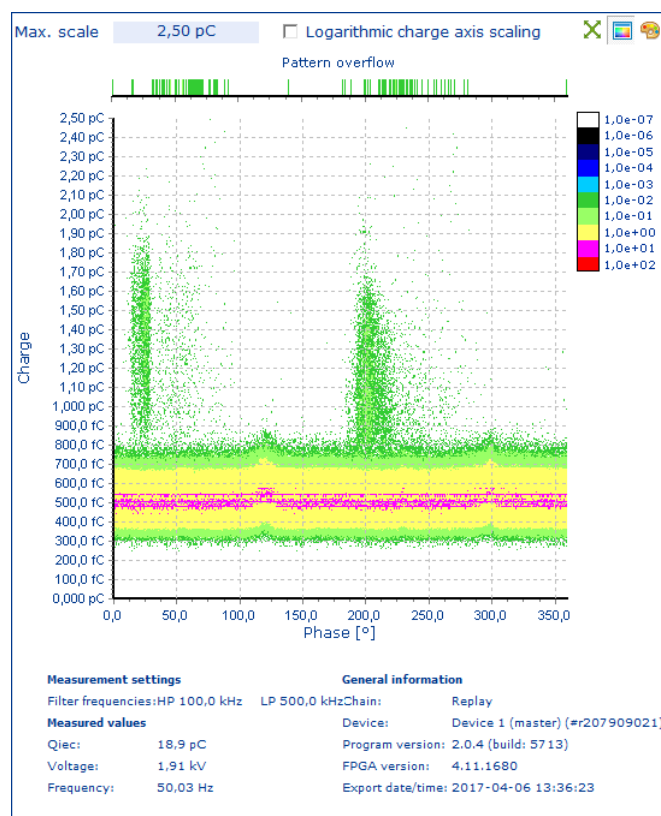
Obrázek 22: QtUt diagram: vzorek 2.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L2} = 10,4$ kV)



Obrázek 23: PRPD diagram: vzorek 2.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L2} = 10,4$ kV)

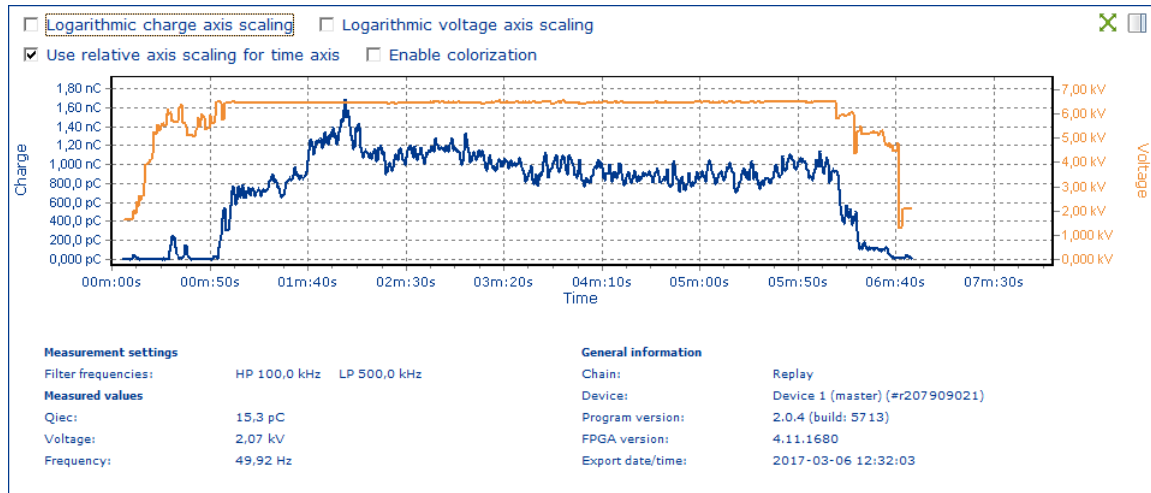


Obrázek 24: QtUt diagram: vzorek 2.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L3} = 10,4$ kV)

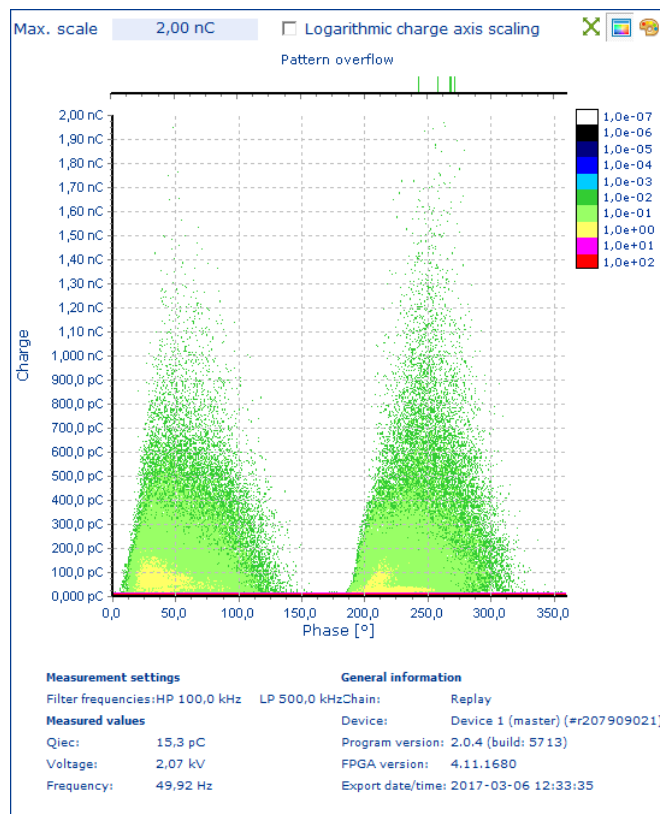


Obrázek 25: PRPD diagram: vzorek 2.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L3} = 10,4$ kV)

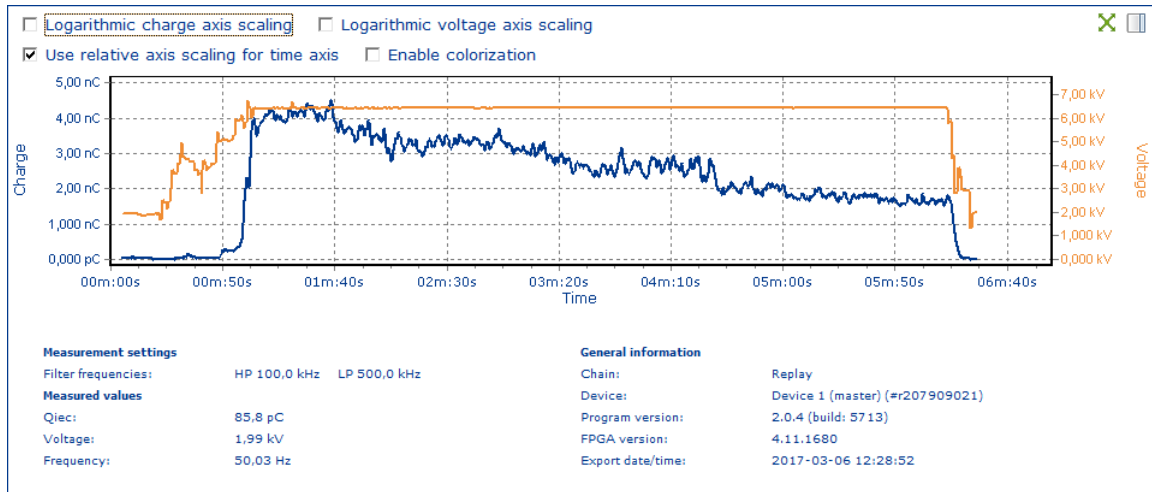
Příloha 5: Naměřené diagramy - vzorek 3.1



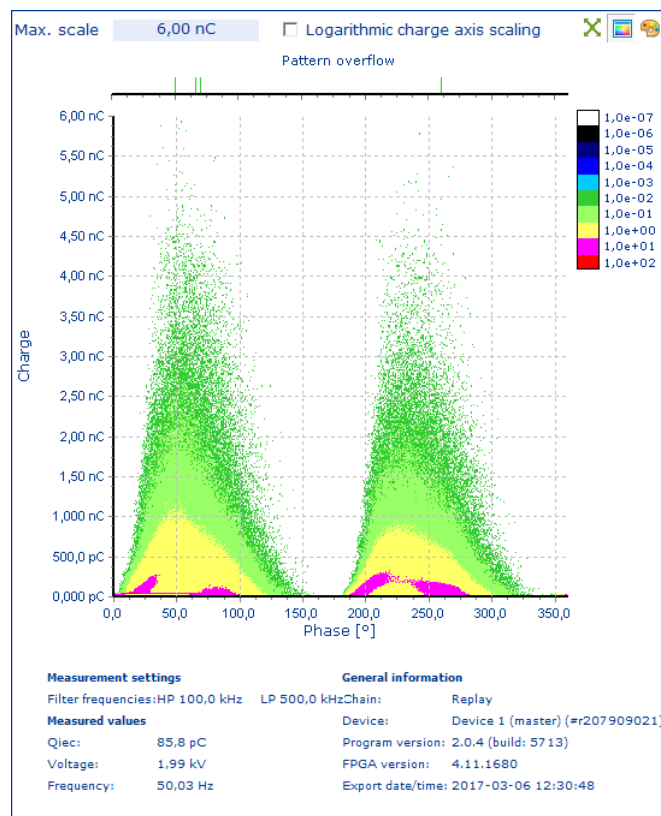
Obrázek 26: QtUt diagram: vzorek 3.1 se zakončeními ($U_{Zk L1} = 6,3 \text{ kV}$)



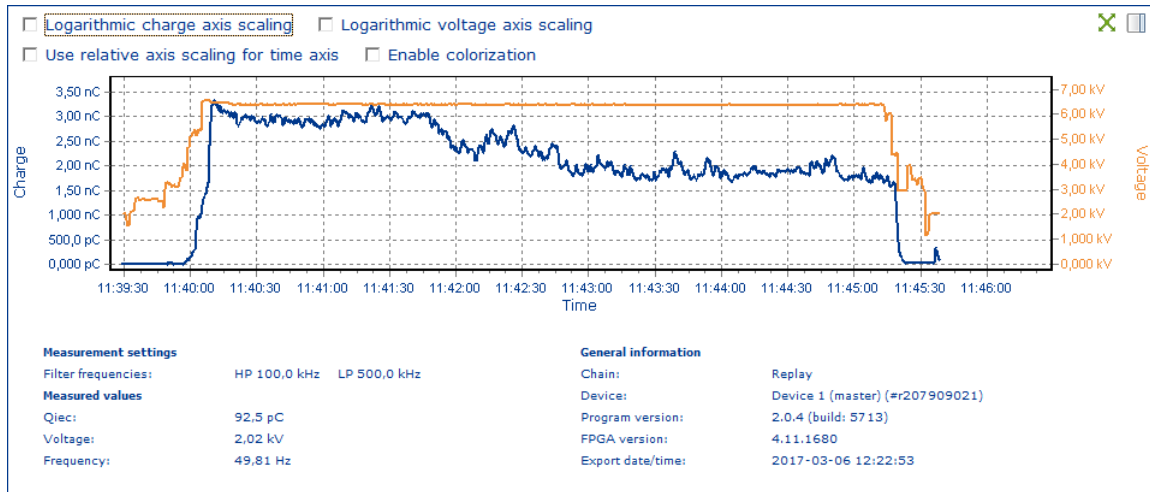
Obrázek 27: PRPD diagram: vzorek 3.1 se zakončeními ($U_{Zk L1} = 6,3 \text{ kV}$)



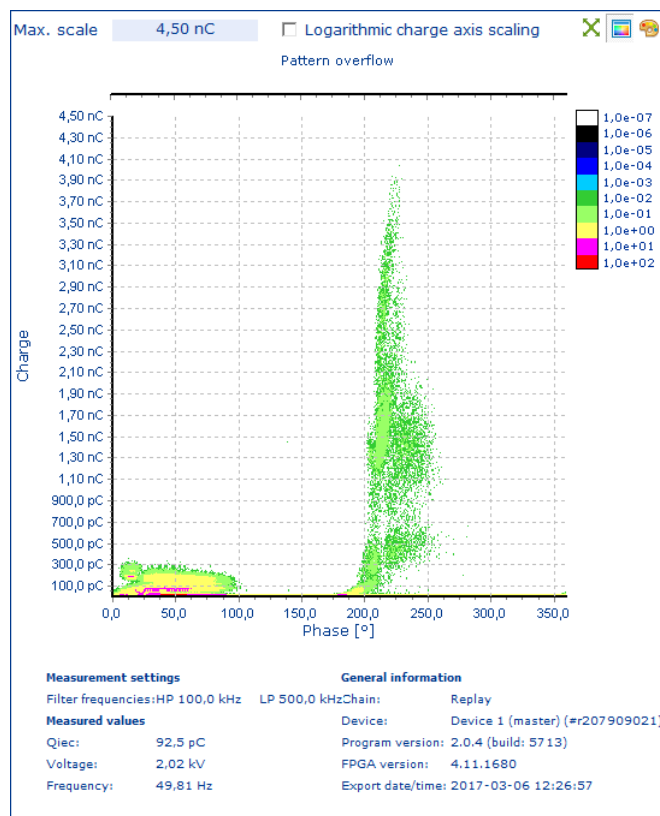
Obrázek 28: QtUt diagram: vzorek 3.1 se zakončeními ($U_{Zk L2} = 6,3 \text{ kV}$)



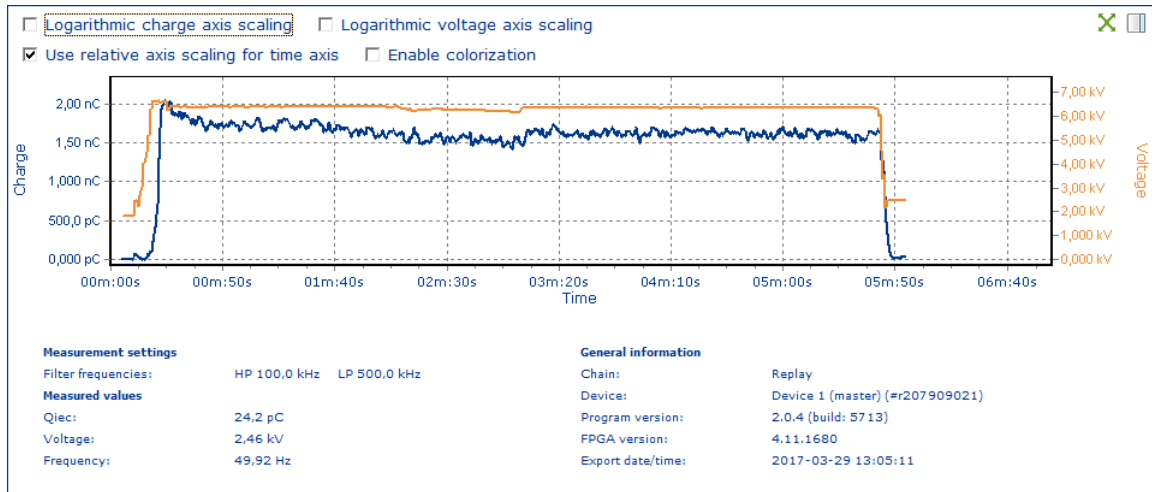
Obrázek 29: PRPD diagram: vzorek 3.1 se zakončeními ($U_{Zk L2} = 6,3 \text{ kV}$)



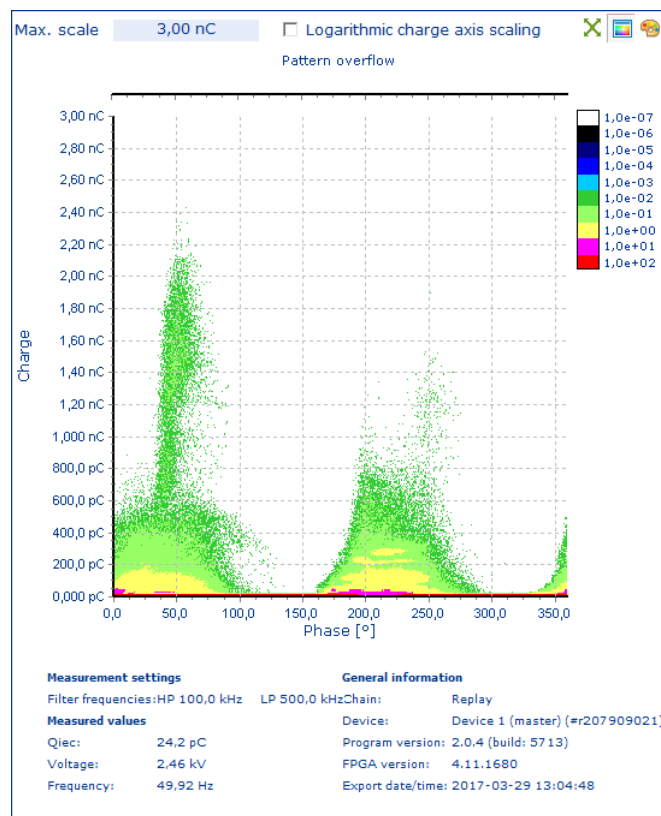
Obrázek 30: QtUt diagram: vzorek 3.1 se zakončeními ($U_{Zk L3} = 6,3 \text{ kV}$)



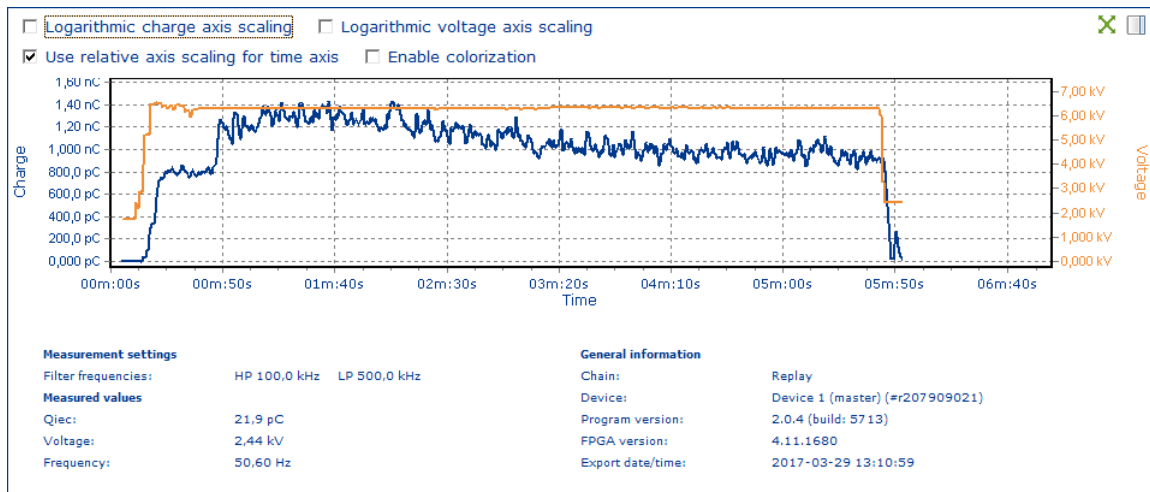
Obrázek 31: PRPD diagram: vzorek 3.1 se zakončeními ($U_{Zk L3} = 6,3 \text{ kV}$)



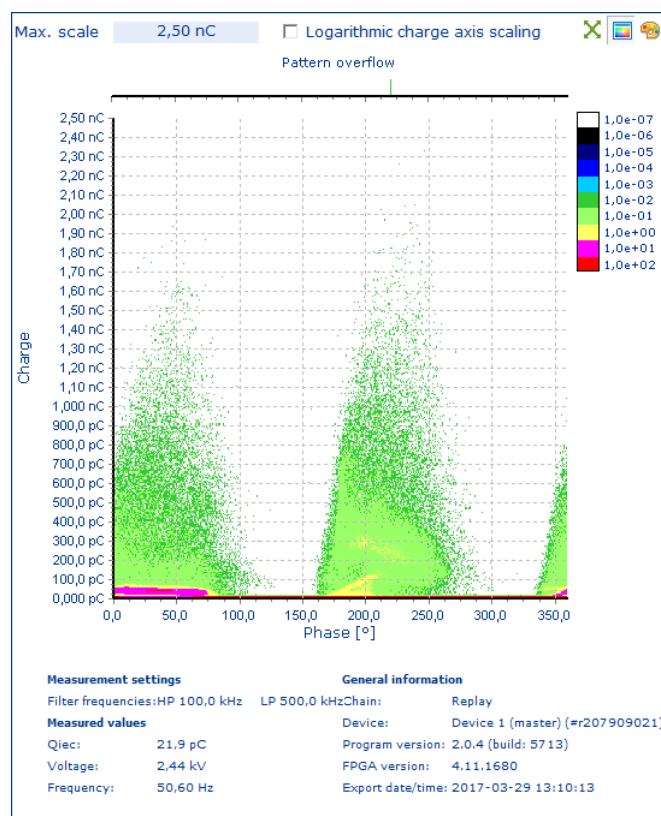
Obrázek 32: QtUt diagram: vzorek 3.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L1} = 6,3 \text{ kV}$)



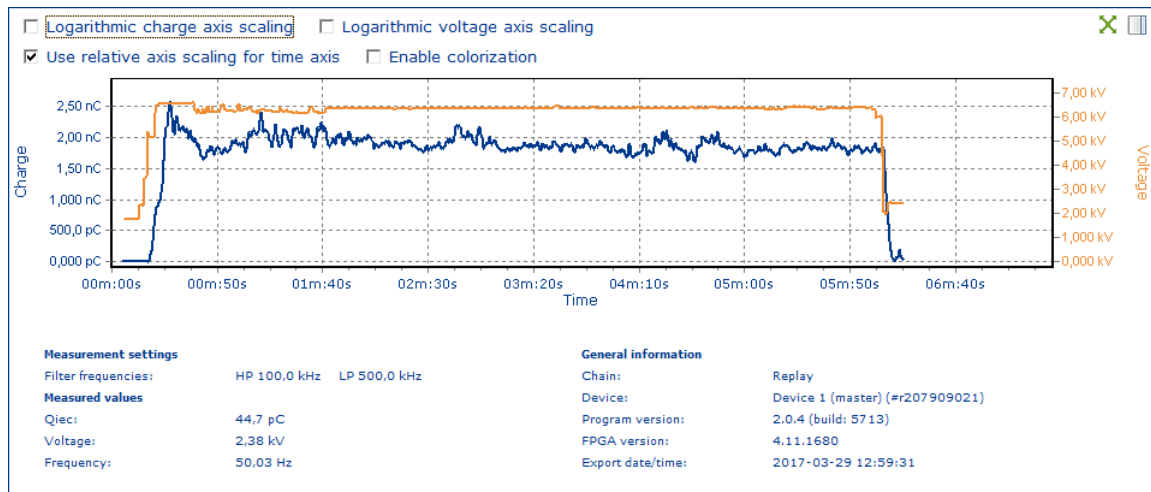
Obrázek 33: PRPD diagram: vzorek 3.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L1} = 6,3 \text{ kV}$)



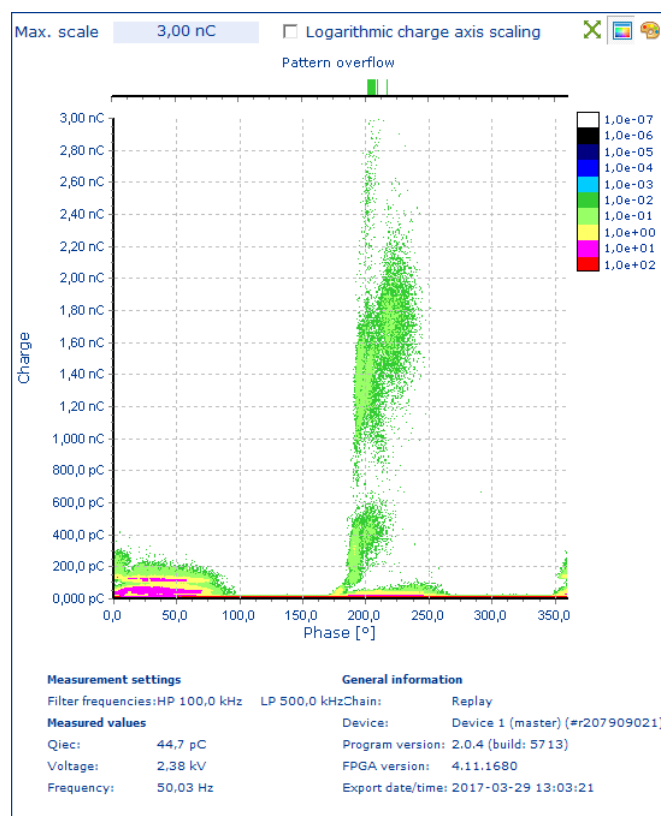
Obrázek 34: QtUt diagram: vzorek 3.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L2} = 6,3 \text{ kV}$)



Obrázek 35: PRPD diagram: vzorek 3.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L2} = 6,3 \text{ kV}$)



Obrázek 36: QtUt diagram: vzorek 3.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L3} = 6,3 \text{ kV}$)

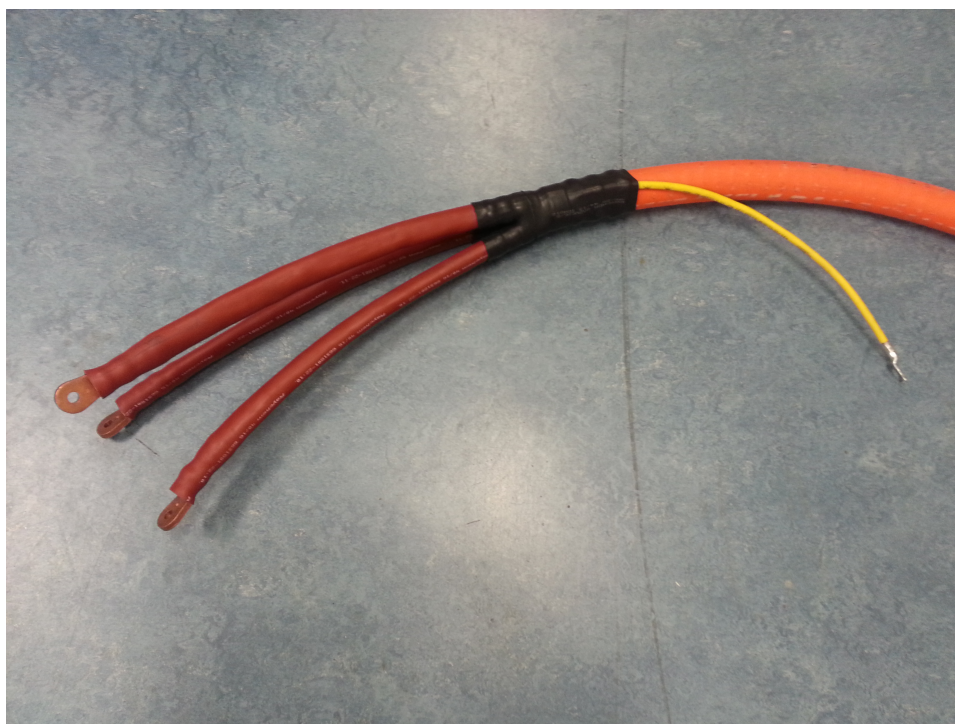


Obrázek 37: PRPD diagram: vzorek 3.1 se zakončeními a spojkou ($U_{Zk L3} = 6,3 \text{ kV}$)

Příloha 6: Vybrané fotografie měřených vzorků



Obrázek 38: Hotové kabelové zakončení (vzorek 2.1)



Obrázek 39: Hotové kabelové zakončení (vzorek 3.1)



Obrázek 40: Hotová kabelová spojka (vzorek 3.1)



Obrázek 41: Nedokonale smrštěná trubice spojky (vzorek 1.2)

Příloha 7: Fotografie zkoušek



Obrázek 42: Zapojení při měření částečných výbojů globální metodou



Obrázek 43: Lokalizace částečných výbojů LEMKE sondou

