

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektrotechnická diagnostika kabelových vedení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš KRÖNES**
Osobní číslo: **E13N0044K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Elektrotechnická diagnostika kabelových vedení**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

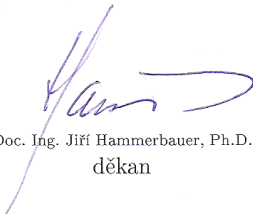
1. Popište organizaci elektrické sítě pomocí silových kabelů
2. Uveďte diagnostické a lokalizační metody v současnosti používané v PreDi
3. Podrobně rozeberte problematiku diagnostiky kabelů pomocí měření částečných výbojů
4. Provedte praktická diagnostická šetření na kabelech v praxi
5. Zhodnoťte užití diagnostiky a měření kabelů v PreDi

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Elektronické informační zdroje
2. Firemní materiály PreDi
3. Mentlík V. a kol., Diagnostika Elektrických zařízení, BEN, Praha 2008
4. ČSN a PN - relevantní normy
5. Dokumentace k síti a měřicím přístrojům

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku diagnostiky kabelů VN. Jednotlivé části se zabývají elektrickými rozvodnými sítěmi a jejich organizací pomocí silových kabelů, detailním popisem kabelu 22-AXEKVCEY a jeho příslušných souborů, přehledem nejpoužívanějších diagnostických a lokalizačních metod, teorií a měřeními částečných výbojů.

Klíčová slova

Diagnostika kabelů VN, částečné výboje, kabel, spojka, izolace, zkouška kabelu, koncovka, vyhodnocení, polyetylen

Abstract

The presented thesis is focused on issues at diagnostics HV cables. Individual parts deal with electricity distribution network and their configuration, detail description of cable 22-AXEKVCEY and his auxiliaries, an overview of the most used diagnostics and localization methods, theory and measure of partial discharges.

Key words

Diagnostics of HV cables, partial discharges, cable, joint, izolation, testing of cable, termination, assessment, polyethylen

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 13.5.2015

Lukáš Krönes

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady a metodické vedení práce, konzultantovi Ing. Václavu Aschenbrennerovi za cenné rady a poskytnutí letitých zkušeností a společnosti PREdistribuce a.s. za umožnění praktického měření a potřebných dat.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 ELEKTRICKÉ ROZVODNÉ SÍTĚ	10
2 SILOVÉ KABELY	14
2.1 KABEL 22 – AXEKVCEY	16
2.1.1 Přímá spojka pro kabel typu 22 – AXEKVCEY.....	17
2.1.2 Koncovky.....	18
2.2 KABEL Z DIAGNOSTICKÉHO HLEDISKA.....	19
3 PŘEHLED DIAGNOSTICKÝCH A LOKALIZAČNÍCH METOD PRO KABELY VN	23
4 TEORIE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	25
5 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	33
5.1 KALIBRACE.....	35
5.2 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	36
5.3 DIAGNOSTICKÉ METODY MĚŘENÍ NA KABELECH VN	39
5.4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	40
5.5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	44
6 ZHODNOCENÍ DIAGNOSTICKÝCH METOD	49
ZÁVĚR	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	51
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku organizace sítí VN pomocí silových kabelů a její preventivní údržbu v podobě diagnostiky kabelů VN. Jelikož v současné době jde do popředí diagnostika kabelů pomocí měření částečných výbojů, která nahrazuje dříve používané metody jako např. vysokonapěťová zkouška, je tato práce zaměřena hlavně na tuto metodu. Vyvíjet se začíná také měření částečných výbojů za provozu (on-line), které však zatím nedosahuje tolik kvantifikovatelných výsledků jako off-line měření. Pro měření na kabelech je důležité nejen globální měření vypovídající o stavu jejich izolace, ale i případné lokalizování poškozeného místa. Přístroje pro měření částečných výbojů jsou tedy vybavené výpočetní technikou potřebné pro zjištění přesného místa zdroje částečných výbojů popsané v kapitole 5. V terénu je pak nutné v místě poškození kabel vytrasovat, k čemuž slouží metoda popsaná v kapitole 3.

V první části je popsána problematika elektrických sítí obecně a detailněji kabelová síť PREdistribuce a.s. s cílem uvést obecný přehled o těchto sítích. Další část je věnována rozboru problematiky silových kabelů s uvedením nejvíce používaného kabelu a jeho příslušných souborů v síti PREdistribuce a.s. Dále je zde detailně probrána problematika částečných výbojů počínaje teorií, přes měřicí přístroje a metody používané k měření částečných výbojů až po praktické měření na kabelu. Nakonec jsou v této práci zhodnoceny diagnostické metody používané u PREdistribuce a.s.

1 Elektrické rozvodné sítě

Elektrická síť je definována jako galvanické propojení všech elektrických prvků elektrizační soustavy na stejné napěťové hladině, které zaručuje bezpečnost a spolehlivost dodávky elektrické energie ke všem odběratelům. Elektrické sítě dělíme na:

- Přenosové soustavy
- Distribuční soustavy

Přenosová soustava má za úkol propojení uzlů výrobních jednotek (elektráren) do uzlů rozvodných soustav tak, aby se výkon optimálně rozložil z hlediska nákladů.

Distribuční soustava je napájena hlavně ze soustavy přenosové nebo je zde také povoleno připojení výrobních jednotek o menších výkonech. Jejím úkolem je přivedení elektrické energie k cílovým spotřebitelům.

Řešení elektrických sítí je závislé na několika různých aspektech, a proto je dosti složité. Jedním z nejdůležitějších aspektů je napěťová úroveň, na které chceme elektrickou síť provozovat. Napěťová úroveň je u třífázového rozvodu hodnota jmenovitého sdruženého napětí a je dána hlavně velikostí a vzdáleností přenášeného výkonu z hlediska technického i ekonomického. Záleží na tom, zda se pohybujeme v přenosové nebo distribuční soustavě, na cílovém spotřebiteli a na charakteru napájené oblasti, zda chceme napájet město či průmyslovou zónu. Také může záviset na umístění z hlediska zeměpisného. Např. v ČR se v sítích VN převážně používá napěťová hladina 22 kV a na menší části území 35 kV. Přehled jednotlivých normalizovaných napěťových úrovní v ČR můžeme sledovat v tab. 1. Tyto se týkají střídavých napětí, ale existuje i řada normalizovaných stejnosměrných napětí, kterou není třeba uvádět.

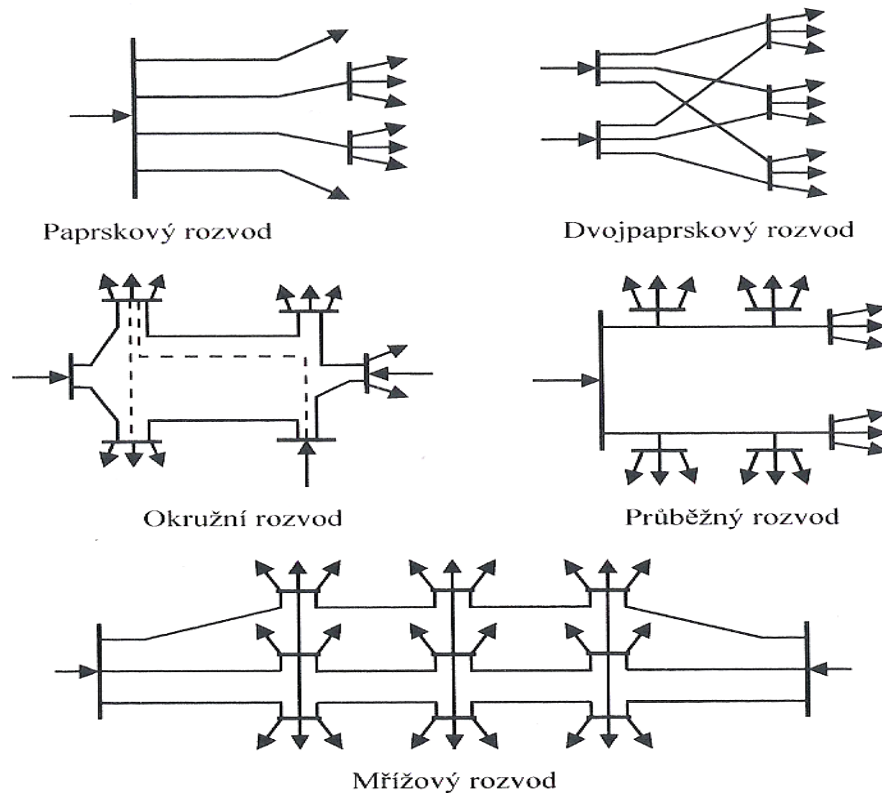
Typ sítě	Distribuční síť								Distribuční/Přenosová síť	Přenosová síť			
Napěťová hladina	NN			VN					VVN			ZVN	
Jmenovité sdružené napětí [kV]	0,4	0,5	0,69	3	6	10	22	35	110	220	400	750	

Tab. 1 Normalizované hodnoty napěťových hladin v ČR převzato z [2]

Dalším kritériem řešení elektrických sítí je způsob jejího uspořádání. Dle [2] dělíme na dva základní druhy:

- otevřený rozvod
- uzavřený rozvod

V otevřeném rozvodu je napájení elektrickou energií zajištěno pouze z jednoho přívodu (zdroje) a patří sem tedy rozvod paprskový a průběžný. V uzavřeném rozvodu je napájení elektrickou energií zajištěno ze dvou nebo více na sobě nezávislých přívodů a pro změnu sem patří okružní rozvod a mřížová síť. Jednotlivé rozvody jsou naznačeny na obr. 1. Rozhodnutí, který z těchto rozvodů je vhodný, závisí jak na rozdělování výkonu, tak samozřejmě i na hospodárnosti, ale také v neposlední řadě na stupni zabezpečení dodávky elektrické energie (např. nelze připojit nemocnici na paprskový rozvod atd.).



Obr. 1 Druhy elektrických rozvodů převzato z [2]

V řešení elektrických sítí je ještě důležité podotknout způsob uzemnění uzlů vinutí transformátoru někdy nazývané jako nulový bod soustavy. Pokud je síť v bezporuchovém symetrickém stavu, tak se způsob tohoto uzemnění nijak neprojeví. Většího významu však tento způsob uzemnění nabývá v případě poruchy a to tím způsobem, že ovlivňuje především velikosti zkratového proudu a fázového napětí. Z tohoto hlediska dělíme síť na:

- síť účinně uzemněné: nulový bod je přímo galvanicky spojen se zemí
- síť neúčinně uzemněné:
 - síť kompenzované: nulový bod je spojen se zemí přes Petersonovu tlumivku (používá se pouze u venkovního vedení, tlumivky pro kabelová vedení jsou kvůli vysoké kapacitě kabelů příliš velké a tím pádem i velice drahé)
 - síť uzemněné přes rezistor: nulový bod je spojen se zemí přes rezistor
- síť izolované: nulový bod je izolovaný a není spojen se zemí

U PREdistribuce a.s. se provozuje distribuční síť na napětíových hladinách 110 kV, 22 kV a 0,4 kV. Tyto sítě jsou konstruovány jako rozvod uzavřený resp. okružní síť, ale provozovány jsou jako rozvod otevřený a to tak, že v místě uzavření smyčky je rozpojeno.

Takto provozovaná síť kombinuje výhody paprskového a okružního rozvodu a tj. že nejsou zapojeny dva transformátory proti sobě resp. nepracují v paralelním chodu a v případě potřeby je zajištěna záloha z jiného zdroje. Síť je zde rozdělena na napájecí část a distribuční část. Do napájecí části patří všechny rozvodny 110/22 kV, kabely 110 kV tj. propojení mezi rozvodnami a kabely 22 kV z rozveden do rozpínacích stanic. Všechny ostatní kabely a transformační stanice 22/0,4 kV spadají pod distribuční část.

Z hlediska uzemnění nulového bodu a dodržení PNE 33 0000 - 1 jsou sítě NN a VVN zapojeny jako účinně uzemněné. Sítě VN jsou v distribuční části zapojené jako IT neboli sítě izolované. V napájecí části je síť VN provozována jako síť neúčinně uzemněná tj. transformátory 110/22 kV mají na straně VN nulový bod uzemněný přes odporník, který má hodnotu odporu 13Ω a tím omezuje zkratové proudy na maximální hodnotu 1000 A. Transformátory 22/0,4 kV jsou provozovány v zapojení trojúhelník/hvězda, což je výhodné kvůli nesymetriím. Nesouměrná zátěž např. zvýšení odběru v jedné fázi na straně NN rozloží výkon na straně VN do dvou fází nebo naopak při výpadku jedné fáze na straně VN neklesne napětí na straně NN úplně na nulu, takže spotřebitel tento výpadek nijak zvlášť nepozná.

Nesymetrie v těchto sítích se také omezují způsobem uložení kabelů a tj. uložení jednotlivých vodičů do trojúhelníkového svazku, čímž se elektromagnetická pole jednotlivých fází vzájemně vyruší a tím se omezí proudy pracovním stíněním oproti uložení kabelů vedle sebe, kdy může proud stíněním přesáhnout i hodnotu proudu v jádře. Toto uložení kabelů v trojúhelníkovém svazku má však menší proudovou zatížitelnost oproti uložení vedle sebe.

Z hlediska ochrany se v současné době používají hlavně ochrany distanční, pomocí kterých se měří hodnoty napětí a proudu v jednotlivých větvích rozvodu. Z těchto hodnot vypočítávají distanční ochrany hodnotu impedance, na základě čehož jsou schopny určit polohu poruchy. Když je tato porucha na jí hlídaném vedení tak vypne, pokud je porucha na vzdáleném vedení tak čeká, zda zafungují příslušné vzdálenější ochrany. Ochrany se umísťují hlavně do rozveden a rozpínacích stanic, v distribučních stanicích jsou umístěny pouze indikátory zkratového proudu, které jsou schopné detekovat a zaznamenat průběh zkratového proudu jednotlivými vodiči.

2 Silové kabely

Organizace sítě pomocí silových kabelů se provádí hlavně v místech s větší hustotou obyvatel. Kabely se také používají tam, kde jsou nepříznivé podmínky pro venkovní vedení např. silný vítr, ale můžeme se setkat i s důvody čistě estetickými. U PREdistribuce a.s. je celá síť přibližně z 97 % tvořená kabelovým vedením. V roce 2014 bylo celkem evidováno 3736,79 km kabelů 22 kV a 111,89 km venkovního vedení. Proto je zde třeba provádět preventivní údržbu v podobě diagnostiky kabelů, která nepochybně zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie.

Volba kabelů začíná již při zvolení vhodného průřezu z příslušné průřezové řady. Pokud budeme předpokládat jednožilový kabel kruhového průřezu, tak se jednotlivé průřezy liší pouze velikostí průřezu jádra. Hloubky všech vrstev nad jádrem jsou prakticky konstantní a závisí na příslušném jmenovitém napětí, přičemž se vychází ze střední hodnoty intenzity elektrického pole. Celkový vnější průměr kabelu lze tedy vyjádřit jako:

$$D = d + \sum t \quad (1)$$

kde D je celkový průměr [mm], d průměr jádra [mm], $\sum t$ součet hloubek všech vrstev nad jádrem (vnitřní stínění, izolace, vnější stínění, kovové stínění, plášť) [mm].

Průřez jádra se odvíjí od dovoleného proudového zatížení. Pro kabel uložený ve vzduchu ve vodorovné poloze při definované teplotě platí:

$$I = \frac{\vartheta_{max} - 20}{R_{20} [1 + \alpha(\vartheta_{max} - 20)] \sum H} \quad (2)$$

kde I je proudové zatížení [A], ϑ_{max} maximální dovolená provozní teplota jádra [°C], R_{20} odpor jádra při 20°C [Ω], α teplotní součinitel odporu [K^{-1}], $\sum H$ součet tepelných odporů [m^2KW^{-1}].

U PREdistribuce a.s. se používají nejčastěji průřezy kabelů 120, 180 a 240 mm². Jelikož se v Praze předpokládá celkový nárůst zatížení, tak se v současné době pokládají už

jen kabely o průřezu 240 mm². Materiál jádra je v drtivé většině hliník v podobě malých lanek stočených do kruhového průřezu.

Jako další kritérium volby kabelu je zvolení materiálu izolace. Velmi perspektivní materiál je v současné době polyethylen resp. zesítný polyethylen. Proti PVC je sice dražší, ale dle [8] má lepší izolační schopnosti a zároveň je polyethylen šetrnější k životnímu prostředí než PVC. Pro kabelářský průmysl se vyrábí polymer s nízkou hustotou materiálu označovaný rPE. Tento materiál je poměrně levný, lehce zpracovatelný a má výhodné elektrické i mechanické vlastnosti. Může být označován dle [8] také jako rozvětvený polyethylen, což znamená, že v řetězci molekul se vždy nachází jedna boční větev, která zabraňuje krystalizaci a tím redukuje stupeň krystality na cca 45 %. Často se setkáváme s kombinací PE+PVC, která se používá většinou na vnější plášť kabelu. Doplnění o PVC se dělá hlavně kvůli snížení finančních nákladů a zároveň slouží tato poslední vrstva jako ochrana PE pláště.

V neposlední řadě pro volbu kabelu zbývá určit materiál a způsob provedení kovového stínění neboli pracovního uzemnění, které slouží jako ochrana proti proudům vznikajícím při poruše. Toto stínění je na obou koncích kabelu přímo uzemněné, díky čemuž se proudy vzniklé poruchou bezpečně svedou na uzemnění ve stanicích. Pro toto stínění se v drtivé většině používá měď, díky které lze použít co nejmenší průměr, v podobě drátků kruhového průřezu. Provedení je spirálové po celém obvodu izolace často doplněné měděnou páskou proti směru spirály kvůli celkovému zpevnění stínění.

Je potřeba ještě zmínit vrstvy kabelu nazývané též stínění. Tyto vrstvy se ale narozdíl od pracovního kovového stínění používají k řízení elektromagnetického pole kolem kabelu vzniklého průchodem proudu. Jako materiál se používá hliníková fólie nebo uhlíkový papír. Úkolem těchto vrstev je narovnání tvaru elektromagnetického pole v okolí kabelu do kruhového tvaru.

U PREdistribuce a.s. se používají kabely typu 22-AXEKVCEY a 22-ANKTOYPVs (jednotlivé značení kabelů viz příloha A). V následující kapitole si podrobněji popíšeme kabel typu AXEKVCEY a jeho příslušné soubory.

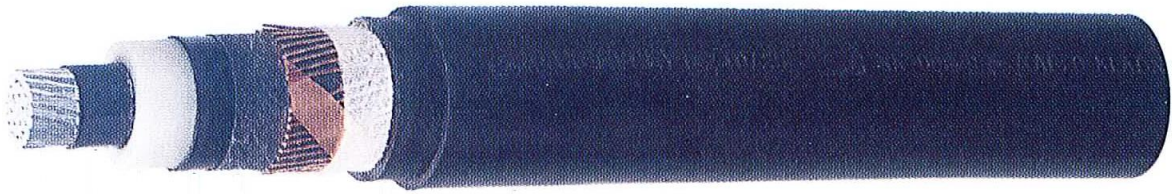
2.1 Kabel 22 – AXEKVCEY

U kabelů takového typu se setkáváme s pokročilou technologií výroby izolace ze zesíťného polyethylenu. Ten má dle [8] ve srovnání s lineárním polyethylenem díky příčným vazbám mezi řetězci makromolekul mnohem lepší mechanické a elektrické vlastnosti jako např. pevnost v tahu nebo elektrická pevnost.

U PREdistribuce a.s. se tyto kabely používají o jmenovitých průřezech 120 mm² a 240 mm². Jelikož se v současné době pokládají již pouze kabely o průřezu 240 mm², popíšeme si právě tento.

Základ kabelu tvoří laněné hliníkové jádro o průměru v mezích 17,6 – 19,2 mm. Mezery vzniklé v tomto jádře jsou vyplněny vodoblokujícím materiálem, který však nesmí ovlivňovat vodivé spojení jádra s následnou vnitřní polovodivou vrstvou. Tato tenká polovodivá vrstva se vyrábí vytlačováním z polovodivého materiálu, který se vyrábí většinou na bázi uhlíku a musí být od jádra snadno odstranitelný avšak ne samovolně. Následuje vrstva izolace ze zesíťného polyethylenu, která je vytlačovaná spolu se stínícími mezivrstvami, což jsou vnitřní a vnější polovodivé vrstvy. Tyto vrstvy se nanáší pomocí trojitě křížové hlavy, která bere materiál z extruderů, pomocí kterých se dávkuje izolační polyethylen a materiál polovodivých vrstev z oddělených komor uzavřeným potrubním systémem, čímž se zabrání vzájemnému či vnějšímu znečištění. Zesíťnění polyethylenu se provádí v dusíkové atmosféře za určitého tlaku a vysoké teplotě, přesněji popsáno v [13]. Nehomogenity vzniklé uvnitř izolace mohou mít dle normy PNE 34 7625 maximální rozměr 0,2 mm. Při zkouškách diagnostikou měřením částečných výbojů dle místní podnikové normy JK 202 nesmí úroveň částečných výbojů přesáhnout hranici 2 pC při dvojnásobku provozního napětí. Na tyto vrstvy se namotává kovové pracovní stínění z měděných drátů o průřezu 25 mm² doplněné protispirálou z měděné pásky o tloušťce 0,1 mm. Opět musí být zajištěno vodivé spojení s vnější polovodivou vrstvou. Dále následuje separační vrstva z vodoblokujícího materiálu, která zabraňuje podélnému šíření vody pod pláštěm. Plášť se skládá z vrstvy polyethylenu o tloušťce 2,5 mm a z vrstvy PVC o tloušťce 1,5 mm, která už plní pouze ochrannou funkci před okolními vlivy. Zbývá už jen zmínit orientační hodnotu kapacity kabelu 0,35 μF/km, která se mění dle jmenovitého průřezu kabelu. Ostatní hodnoty

jsou uvedené v příloze B.

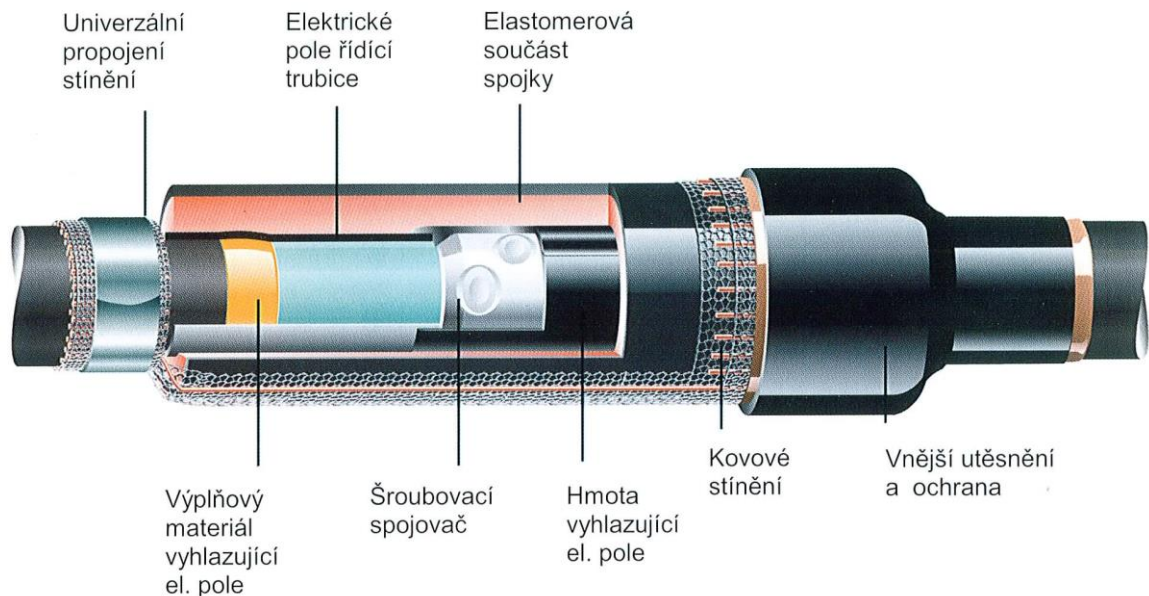


Obr. 2 Kabel 22-AXEKVCEY převzato z [13]

2.1.1 Přímá spojka pro kabel typu 22 – AXEKVCEY

Spojka je neodmyslitelná součást kabelu. Při pokládání delších kabelů není možná pokládka vcelku, proto je použití spojek nezbytné. Samozřejmě je také nezbytné použití spojek při opravách poruch, kdy se část kabelu s poruchou vystřihne a vloží se místo toho dvě spojky s novým kusem kabelu.

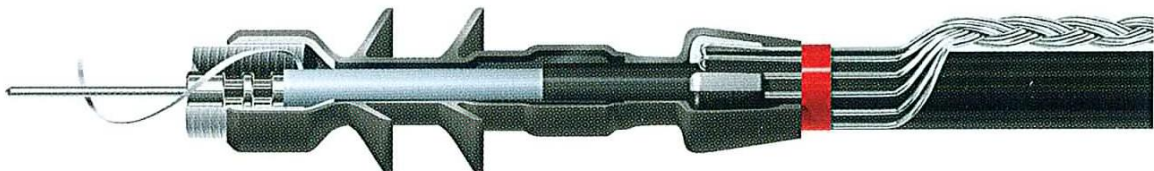
Základem spojky je tzv. spojovač též nazývaný jako upínací tělo tvořené slitinou hliníku, která kombinuje dobrou vodivost s dostatečnou pružností. Tyto spojovače mohou být lisovací či šroubovací. Šroubovací mají tu výhodu, že jsou výrazně kratší. Úkolem spojovače je zajistit dokonalé vodivé spojení dvou jader kabelů bez přechodového odporu, proto je ošetřen kontaktní vazelinou, která zabraňuje tvorbě oxidačních vrstev a podporuje stálost kontaktu. Na připevněný resp. nalisovaný či našroubovaný spojovač se nasadí teplem smrštitelná pole řídicí trubice, která pokrývá vnější polovodivou vrstvu v místě ukončení a celou délku izolace. Spojovač a pole řídicí trubice zakrývá s přesahem vodivá ovíjecí hmota, která se skládá z koextrudovaného předepjatého elastomeru a na povrchu z vodivého teplem smrštitelného polymerového materiálu. Dále následuje vrstva, která zajišťuje vodivé spojení pracovních stínění. Ta je tvořena z kruhových per a měděné síťky, pomocí které je i zároveň spojka odstíněna. Nakonec je na tělo spojky smrštnuta vnější plášťová trubice doplněná lepidlem, která přesahuje ve stanovené délce vnější plášť obou konců spojovaného kabelu. Tím se zajistí mechanická ochrana a ochrana proti vnějším vlivům jako např. vniknutí vody.

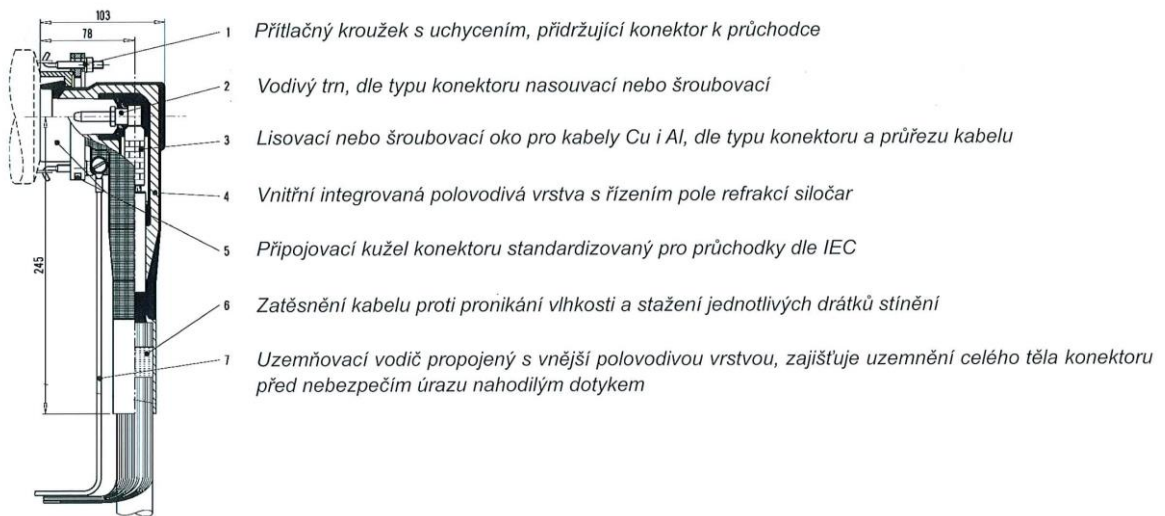


Obr. 3 Přímá spojka pro kabel 22-AXEKVCEY převzato z [14]

2.1.2 Koncovky

Kabelových koncovek se u PREdistribuce a.s. používá více druhů od různých výrobců. Ve výsledku se liší hlavně tím, zda jsou smrštitelné za tepla či za studena a samozřejmě také cenou. Vyrábí se v různých provedeních dle použitého rozváděče v trafostanici a dodávají se již hotové vcelku. Montér ji pak už jen připevní na kabel, smrští a přišroubuje k rozváděči. V klasických trafostanicích se používá klasická kabelová koncovka a v zapouzdřených rozváděčích se používají odpojitelné T – konektory. U kabelových koncovek je zvýšené riziko povrchových částečných výbojů a plazivých proudů. Proto musí mít koncovky proti těmto vlivům zvýšenou odolnost, k čemuž se nejvíce používá silikonový materiál, který vykazuje výborné vlastnosti jako nesmáčivost, nehořlavost, odolnost vůči ozonu, teplotní odolnost atd. Provedení druhů koncovek je patrné z obr. 4, kde jsou zobrazeny nejpoužívanější typy u PREdistribuce a.s.





Obr. 4 Koncovka kabelu 22-AXEKVCEY pro klasický rozváděč (nahore) a pro zapouzdřený rozváděč (dole) převzato z [15]

2.2 Kabel z diagnostického hlediska

Kabel jako takový je z hlediska spolehlivosti velmi spolehlivý prvek, díky čemuž se udává jeho průměrná životnost 40 – 50 let. To si můžeme dokázat zjednodušeným výpočtem spolehlivosti při elektrickém namáhání dle literatury [3].

Stanovení zásoby bezpečnosti, jejíž funkcí je poruchovost:

$$z_U = \frac{k_U - 1}{\sqrt{v_{zU}^2 + k_U^2 \cdot v_{pU}^2}} \quad (3)$$

kde z_U je zásoba bezpečnosti [-], k_U koeficient bezpečnosti [-], v_{zU} variační koeficient zatížení [-], v_{pU} variační koeficient odolnosti proti tomuto zatížení [-].

$$k_U = \frac{U_p}{U_U} = \frac{220}{\frac{22}{\sqrt{3}}} = 17,321 \quad (4)$$

kde U_p je průrazné napětí (na základě zkoušek dle PNE 34 7625 zvoleno 220 kV) [V],

U_U hodnota napětí zátěže [V].

Variační koeficient zatížení v_{zU} zvolen 0,1 na základě dovoleného kolísání napětí v síti $\pm 10\%$. Variační koeficient odolnosti vůči tomuto zatížení v_{pU} je 0,09 (rozptyl hodnot průrazného napětí je přibližně 20 kV). Potom:

$$z_U = \frac{17,321 - 1}{\sqrt{0,1^2 + 17,321^2 \cdot 0,09^2}} = 10,448 \quad (5)$$

Určíme poruchovost F_U , která je dána integrální funkcí hustoty pravděpodobnosti Φ pro zásobu bezpečnosti z_U , odečtením z tabulky viz příloha C.

$$F_{(U)} = \Phi(z_U) = \Phi(10,448) \cong 0,124 \cdot 10^{-24} \quad (6)$$

Potom spolehlivost kabelu při elektrickém namáhání $P_{(U)}$ je:

$$P_{(U)} = 1 - F_{(U)} = 1 - 0,124 \cdot 10^{-24} = 99,99 \% \quad (7)$$

Z analýz poruch vyplývá, že většina poruch je způsobena především okolními vlivy jako např. teplota, tlak nebo vlhkost, ale hlavně zacházení s kabelem při převážce, pokládce nebo různých manipulacích, kdy v důsledku špatného zacházení vznikají různé nehomogenity v izolaci, kde následně nejdůležitější roli hrají zřejmě silové účinky elektromagnetického pole, které je třeba brát dle [7] ne jako plošné, ale jako objemové.

Bohužel zatím není znám žádný spolehlivý popis stárnutí kabelu resp. jeho izolace. Všechny dostupné metody měření dokážou říci zatím pouze to, že se v kabelu nachází nějaký problém, neboli defekt popř. jej lze lokalizovat, ale nikdo už z toho nedokáže odvodit, jak dlouho ještě kabel vydrží ve spolehlivém provozu. Takže jelikož není stále několik jevů zcela objasněných, není ani model stárnutí kabelu pro svou složitost znám. Podle literatury [7] bylo experimentálně zjištěno, že jednu z důležitých rolí zde zastává vliv objemových sil elektrického pole. Tyto jevy se projevují tím více, přesáhne-li intenzita elektrického pole hranici 10^7 Vm^{-1} .

Pro představu si vypočítáme intenzitu elektrického pole v kabelu 22-AXEKVCEY o jmenovitém průřezu 240 mm^2 a délky 1 km za předpokladu ideálního dielektrika (izolace bez nehomogenit).

Intenzitu elektrického pole v okolí vodiče určíme podle vzorce:

$$E = \frac{R \cdot \sigma}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \frac{1}{z} \quad (8)$$

kde E je intenzita elektrického pole [Vm^{-1}], R poloměr vodiče [m], σ plošná hustota náboje [Cm^{-2}], ε_0 permitivita vakua [Nm^2C^{-2}], ε_r relativní permitivita (v našem případě polyethylenu) [-], z vzdálenost kolmo od osy vodiče [m].

Plošnou hustotu náboje na povrchu vodiče určíme dle vzorce:

$$\sigma = \frac{C \cdot U}{S} \quad (9)$$

kde σ je plošná hustota náboje [Cm^{-2}], C kapacita vodiče [F], U napětí na vodiči [V], S povrch vodiče [m^2].

Kapacita kabelu je dle přílohy B $0,32 \text{ }\mu\text{F}$. Za napětí dosadíme provozní fázové napětí. Povrch vodiče spočteme dle vzorce:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 8,74 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 54,92 \text{ m}^2 \quad (10)$$

kde S je povrch vodiče [m^2], R poloměr vodiče [m], l délka vodiče [m].

Dosadíme do vzorce (9):

$$\sigma = \frac{0,32 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{54,92} = 0,102 \cdot 10^{-3} \text{ Cm}^{-2} \quad (11)$$

Uvnitř vodiče je intenzita elektrického pole nulová. Na povrchu vodiče je naopak hodnota intenzity maximální a tu vypočteme dle zjednodušeného vzorce:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} = \frac{0,102 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,4} \cong 4,8 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1} \quad (12)$$

Zajímá nás hlavně namáhání v oblasti izolace, která má jmenovitou šířku 5,5 mm. Takže při zanedbání polovodivých vrstev dosadíme do vzorce (8) za vzdálenost z 14,24 mm.

$$E = \frac{8,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,102 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,4} \cdot \frac{1}{14,24 \cdot 10^{-3}} \cong 2,95 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1} \quad (13)$$

Elektrická intenzita pole se tedy v oblasti izolace pohybuje přibližně v rozmezí 2,95-4,8 MVm⁻¹. Z definice intenzity elektrického pole víme, že je to síla působící na náboj. Dále víme, že v reálné izolaci vznikají vlivem nedokonalostí dutinky vyplněné plynem. V těchto dutinkách vzniká vlivem odsávání elektronů z okolní izolace při výbojové činnosti prostorový náboj a na ten tedy působí síla elektrického pole. Budeme-li počítat intenzitu elektrického pole lokálně v dutince vyplněné plynem (pro zjednodušení předpokládáme zde vzduch, který má $\varepsilon_r = 1$), tak je ze vzorce 8 zřejmé, že se hodnota intenzity 2,4krát zvětší a tím bude překročena ona hranice 10⁷ Vm⁻¹. Proto tedy v místech nehomogenit izolace kabelu vzniká silné lokální elektrické pole, které svými objemovými silami přispívá k degradaci izolace.

Výbojová činnost je také doprovázená zvláštním jevem nazývaným autoelektronová emise. Tento jev někdy vysvětlujeme jako vytrhávání elektronů elektrickým polem. Dle [7] je tato autoelektronová emise považována za hlavní příčinu elektronové laviny, která určuje další nárůst částečných výbojů. Při tomto jevu je předávána energie elektronů molekulám izolantu. Tato energie se spotřebovává na rozšiřování vzniklého vodivého kanálu a na rozrušování dalších molekulových vazeb. Dále musíme brát v potaz, že vlivem těchto jevů a vyšších teplot vznikají jiné chemické sloučeniny a izolace má v těchto místech jiné elektrické i mechanické vlastnosti.

3 Přehled diagnostických a lokalizačních metod pro kabely VN

- **Napět'ová zkouška** – tato zkouška spočívá v napět'ovém namáhání kabelu po určitou dobu. Provádí se střídavým nebo stejnosměrným napětím přiloženém mezi jádro a pracovní stínění kabelu, přičemž se měří svodový proud. Dle místní podnikové normy PK 201 musí mít střídavé napětí hodnotu 38 kV o frekvenci 0,1 Hz po dobu 1 h, stejnosměrné napětí hodnotu 54 kV po dobu 10 min a svodový proud nesmí přesáhnout hodnotu 2,5 mA.
- **Plášťová zkouška** – tato metoda spočívá v měření izolačního odporu pracovního stínění kabelu vůči zemi. Provádí se dle místní podnikové normy PK 201 stejnosměrným napětím o hodnotě 5 kV. Jelikož měřený obvod je kapacitního charakteru a jeho kapacitu je tedy potřeba nejdříve nabít, provádí se tato zkouška dle PK 201 po dobu 2 min.
- **Měření částečných výbojů** – pomocí této metody se vyhledávají nehomogenity v izolaci kabelu, u kterých je předpoklad postupného rozšiřování až po úplný průraz. Zkouška spočívá v nabití kabelu na požadovanou hodnotu napětí a jeho následné vybití přes příslušný rezonanční obvod. Dle místní podnikové normy PK 202 musí mít toto napětí tlumený sinusový průběh, jehož maximální hodnota odpovídá nabíjecímu napětí a kmitočet je dle kapacity kabelu v rozmezí 150 – 600 Hz.
- **Měření tg δ** – pomocí této zkoušky se dle místní podnikové normy PK 202 zjišťuje obsah vlhkosti v kabelech s papírovou izolací. Tato dielektrická spektroskopie se provádí na základě kmitočtové závislosti polarizačních veličin izolace. Hodnoty kapacity, permitivity a ztrátového úhlu se analyzují ve frekvenčním rozsahu 0,001 – 1000 Hz, který je dán typem a vlastnostmi kabelu. Obsah vlhkosti v kabelu se stanovuje na základě průběhu frekvenční závislosti ztrátového úhlu metodou hledání minimální hodnoty. Měření se provádí napětím do 140 V.
- **Trasování kabelu** – tato metoda slouží k určení trasy kabelu v terénu. K vytrasování (vytyčení) kabelu se u PREdistribuce a.s. používá tónový generátor, který vytváří pomocí klopných obvodů signál o určité frekvenci (nejpoužívanějšími jsou 491, 982 a 8440 Hz) a maximálním výkonu 50 W. Zapojení tónového generátoru se provádí mezi jádro kabelu a zem, přičemž musí být na druhém konci kabelu jádro spojeno se zemí, aby se obvod uzavřel. Princip spočívá ve vytvoření elektromagnetického pole v okolí kabelu o frekvenci připojeného signálu, které lze snímat v terénu nad kabelem

pomocí induktivního senzoru. Průběh energie tohoto pole má v místě kabelové trasy minimum pro induktivní senzor natočený kolmo k ose kabelu a maximum pro induktivní senzor natočený vodorovně k ose kabelu, čehož se využívá.

- **Impulsní odrazová metoda** – tato metoda slouží hlavně k určování délky kabelu, ale lze tímto způsobem změřit také vzdálenost spojek na kabelu. Provádí se pomocí impulsního zaměřovače zapojeného mezi jádro kabelu a pracovní stínění. Tento zaměřovač generuje vysokofrekvenční signál, který se při šíření kabelem odrazí od vzdáleného otevřeného konce kabelu zpět na začátek. Na základě časové prodlevy mezi vysláním impulsu a jeho odrazem se spočte celková délka kabelu. Část tohoto signálu se také odrazí od každé změny vlnové impedance, což jsou zpravidla spojky. Impuls odražený od spojky má vždy menší energii než impuls odražený od otevřeného konce, na základě čehož je od sebe rozlišíme.

4 Teorie částečných výbojů

O spolehlivé provozuschopnosti a bezpečnosti silových kabelů nebo jiných vysokonapěťových zařízení nejlépe vypovídá stav jejich izolace. Stav izolace se dá určit několika způsoby, avšak nejefektivněji se určuje na základě velikosti a četnosti částečných výbojů, které mají největší dopad na degradaci izolace.

Částečné nebo také nazývané jako neúplné výboje jsou dle normy ČSN EN 60270 definované takto: „*lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče.*“ Částečné výboje můžeme dělit na tři základní skupiny:

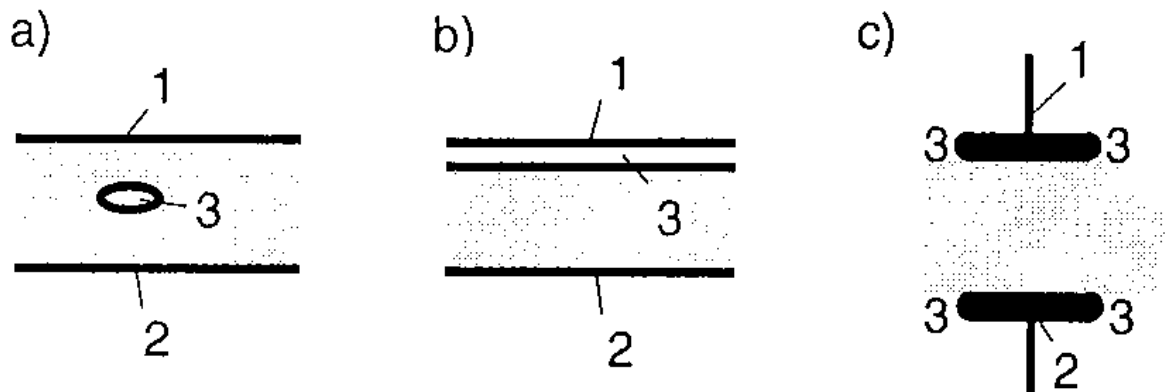
- vnější
- vnitřní
- povrchové

Vnější částečné výboje vznikají v plynném prostředí okolo vodičů. Nejčastějšími vnějšími částečnými výboji jsou např. koróna nebo doutnavý výboj. Tyto výboje neohrožují přímo svými vlivy izolaci kabelů, proto je musíme umět rozpoznat a odlišit od výbojů vnitřních či povrchových, abychom se nedopustili chyby ve vyhodnocování měření.

Větší zřetel musíme brát na výboje vnitřní a povrchové, které svými vlivy izolaci kabelů přímo degradují. Vnitřní částečné výboje vznikají v plynech ohraničených po celém svém objemu pevným nebo kapalným izolantem. Typickým prostředím pro vznik vnitřních částečných výbojů je dutinka vyplněná plynem v polyethylenové izolaci, vytvořená nejpravděpodobněji vlivem nedokonalosti technologie při výrobě nebo různými mechanickými vlivy způsobené při převážce či pokládce kabelu nebo i při jeho následném provozování.

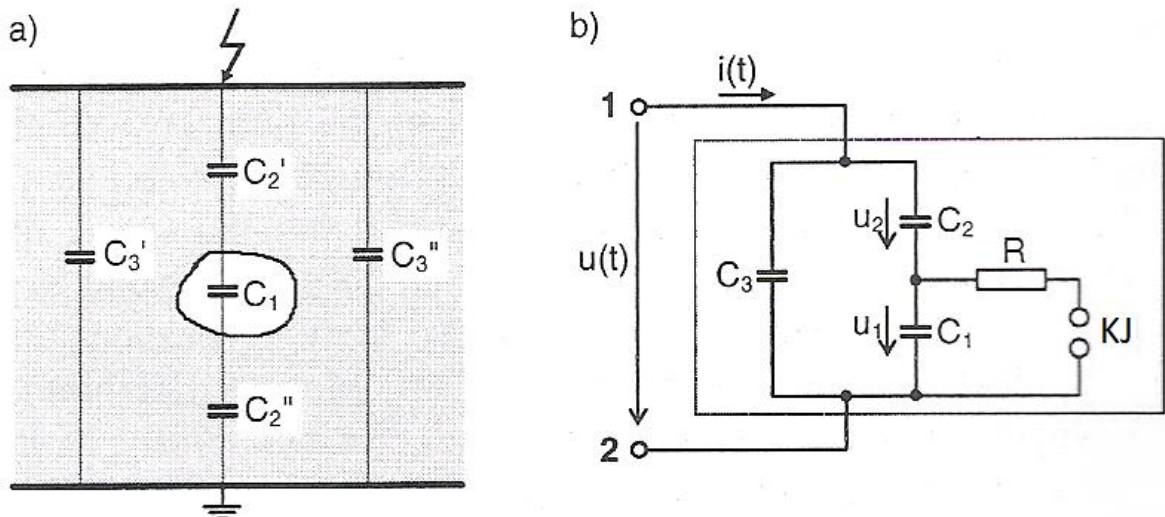
Povrchové částečné výboje nazývané také jako klouzavé se vytvářejí v okolí přechodu mezi pevným a plynným izolantem. Na následujícím obrázku jsou naznačené elektrodové uspořádání jednotlivých výbojů. Elektrody jsou značené číslicemi 1 a 2 a oblast výbojové

činnosti 3. Obr. 5a) zobrazuje dutinku vyplněnou plynem typickou pro vnitřní částečné výboje. Obr. 5b) zobrazuje delaminaci izolace a obr. 5c) zobrazuje typické klouzavé výboje na hranách elektrod.



Obr. 5 Elektrodové uspořádání částečných výbojů převzato z [4]

Všechny tyto výboje mají společné to, že při jejich působení vznikají proudové nebo napěťové impulsy, které se superponují na průběh celkového napětí či proudu a lze je tedy vhodnými měřicími přístroji změřit. Když si nahradíme např. dutinku vyplněnou plynem v polyethylenové izolaci ideální součástkou nejlépe kondenzátorem, tak dostáváme jednoduchý model a zjednodušené náhradní schéma, které vidíme na následujícím obrázku.

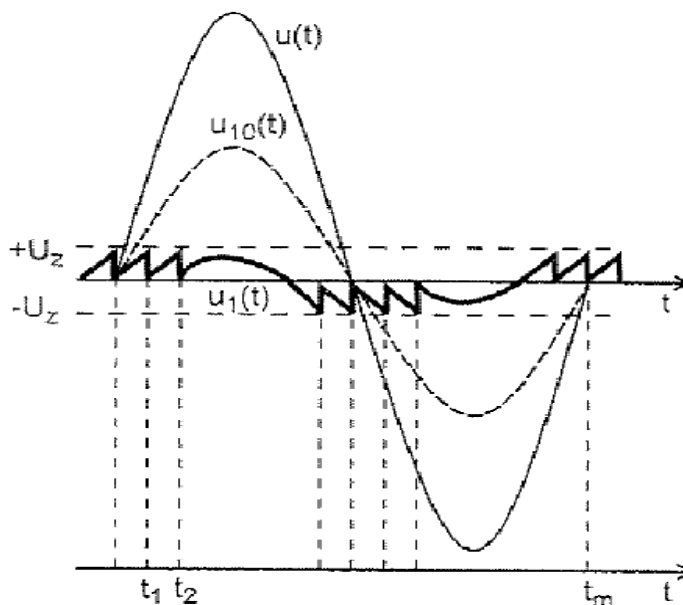


Obr. 6 Trojkapacitní model plynové dutinky a jeho náhradní schéma převzato z [4]

Jak popisuje literatura [4]: „Kapacita plynové dutinky je C_1 , C_2 vyjadřuje kapacitu zbytkové části zdravé izolace v sérii s dutinkou (sériová kombinace kapacit C_2' a C_2'') a C_3 představuje poměrně velkou kapacitu zbytku izolantu (paralelní kombinace C_3' a C_3''). Kulové jiskřiště KJ paralelně připojené ke kondenzátoru C_1 symbolizuje v náhradním obvodu

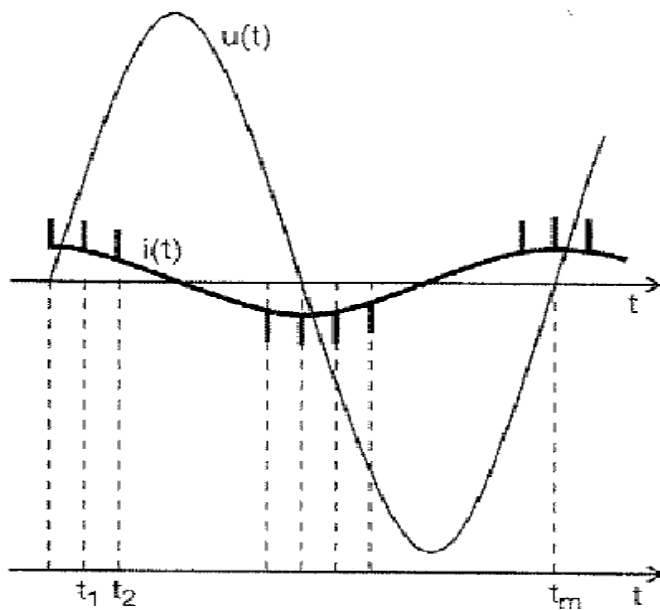
přeskok v plynové dutince při překročení její elektrické pevnosti. Odpor R vyznačuje odpor výbojové cesty (výbojového kanálku) po přeskoku na kulovém jiskřišti KJ , tj. odpor cesty proudu výboje v oblasti vybitých plošek povrchu dutinky a odpor dráhy výboje.“

Definujme si veličinu zapalovací napětí U_Z , která udává hodnotu napětí na dutince, při jehož překročení částečný výboj vzniká (zapaluje) a dále veličinu zhasací napětí (zbytkové napětí na dutince), při jehož hodnotě částečný výboj zaniká. Zavedeme si zjednodušující předpoklady, že zapalovací napětí U_Z je v obou polaritách stejné a dále, že zhasací napětí je rovno nule. Potom bude průběh jednotlivých napětí takový, jak je znázorněno na následujícím obrázku. Zde je znázorněno celkové napětí $u(t)$, fiktivní napětí na dutince bez přeskoků $u_{10}(t)$ a průběh napětí na dutince při výbojové činnosti $u_1(t)$.



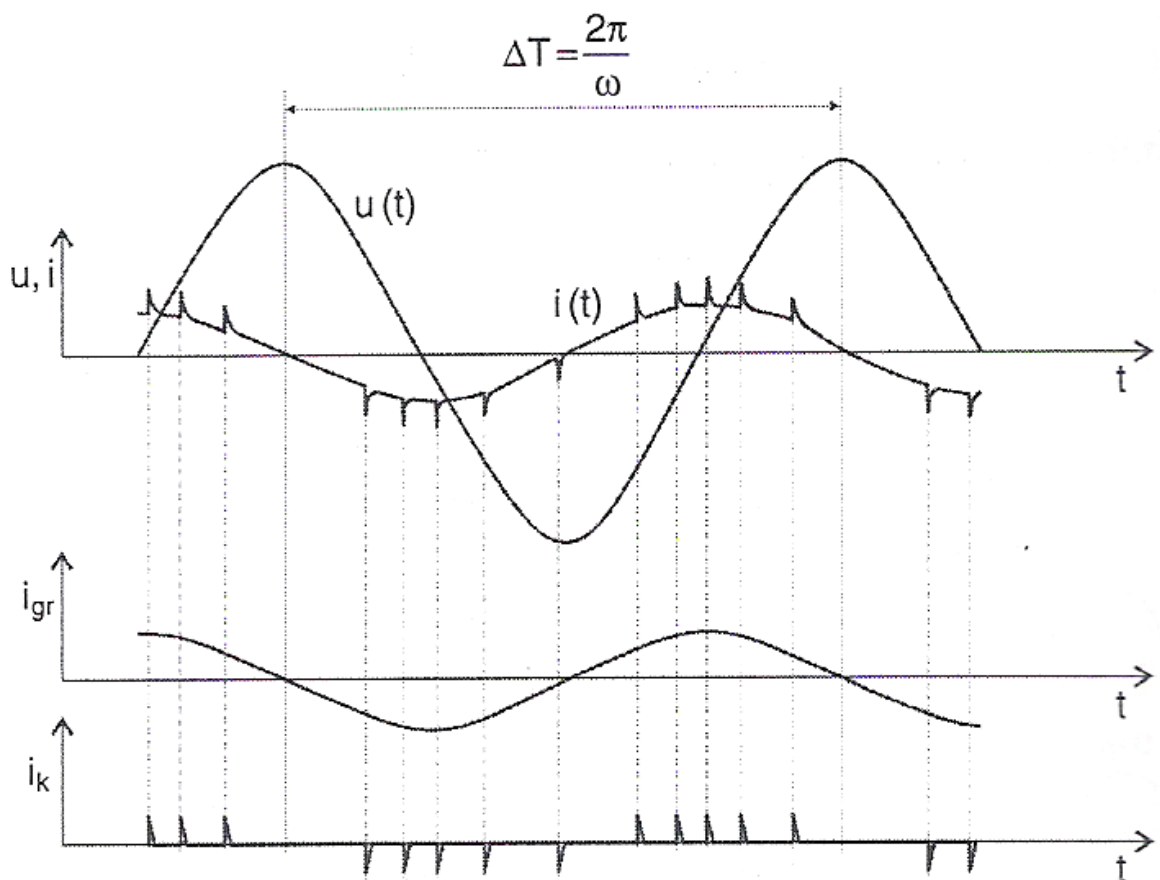
Obr. 7 Průběh jednotlivých napětí při výbojové činnosti převzato z [4]

Přivedeme-li toto napětí na svorky měřeného objektu, vznikne v izolačním systému proud. Tento proud bude čistě kapacitní a tudíž bude předbíhat napětí o 90° . Pokud budou vznikat v izolaci částečné výboje, můžeme pozorovat na obr. 8 jejich jednotlivé proudové pulsy superponované s proudem celkovým $i(t)$.



Obr. 8 Průběh celkového proudu a napětí při výbojové činnosti převzato z [4]

Z toho je zřejmé, že celkový proud se skládá ze dvou složek. Ze složky základní I_{gr} a složky impulsní I_k , což vidíme na obr. 9.



Obr. 9 Jednotlivé složky celkového proudu převzato z [4]

Základní složka, která je závislá pouze na přiloženém napětí a kapacitě kabelu, je pro naše vyhodnocování nepodstatná. Proto ji oddělíme, aby se nám lépe pracovalo se složkou impulsní. Na základě tvaru a velikosti této křivky resp. jednotlivých pulsů můžeme určit náboje jednotlivých částečných výbojů, pro něž platí:

$$q = \int i_k dt \quad (14)$$

kde q je zdánlivý náboj změřený na svorkách měřeného objektu [C], i_k proudový impuls vyvolaný výbojovou činností [A].

Tento náboj je však pouze zdánlivý a může se lišit resp. bude menší až o několik stovek pC než náboj skutečný, který se vybije v místě defektu důsledkem vzniku částečného výboje. Když si uvědomíme, že tyto děje probíhají v řádu jednotek ns, tak lze říci, že dle zjednodušeného náhradního schématu platí:

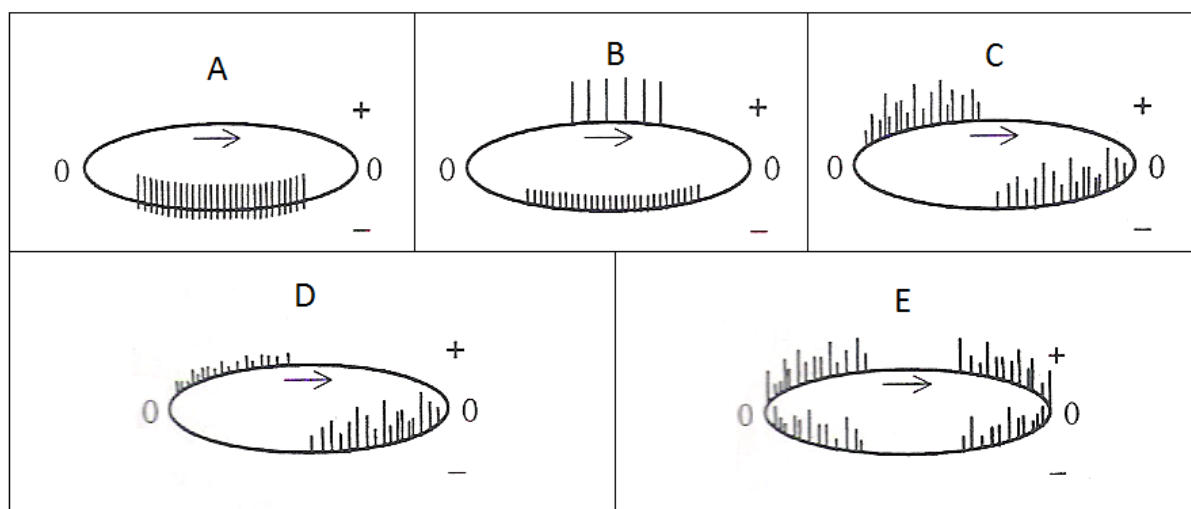
$$q_{zd} = C_2 \cdot U_Z \quad (15)$$

$$q_s = (C_1 + C_2) \cdot U_Z \quad (16)$$

kde q_{zd} je zdánlivý náboj [C], q_s skutečný náboj [C], U_Z zápalné napětí [V], C_1 a C_2 kapacity kondenzátorů [F].

Z uvedených vzorců je zřejmý rozdíl mezi skutečným a změřeným neboli zdánlivým nábojem. Jelikož je v podstatě nemožné změřit kapacity jednotlivě, musíme se spokojit pouze s hodnotou zdánlivého náboje a brát tuto skutečnost na vědomí. Opět tímto narážíme na problém všech vyhodnocování stavu jakéhokoliv izolačního systému na základě činnosti částečných výbojů a to, že můžeme pouze poukázat na přítomnost výbojové činnosti, ale nelze určit přesně co se v daném místě děje a jak dlouho izolace v tomto místě toto namáhání vydrží. Víme ale, jak bezpečně určit druh výbojové činnosti a to na základě porovnání s časovým průběhem napětí přiloženém na měřený objekt. Princip spočívá v přiřazení pulsů způsobených výbojovou činností jednotlivé části křivky časového průběhu celkového napětí tzn. přiřazení fázového posuvu jednotlivého impulsu vůči sinusoidě přiloženého napětí. Záleží na tom, zda výboje vznikají v části maxima, minima nebo mezi nimi v časovém průběhu

celkového napětí. Základní případy jsou naznačeny na obr. 10. A jsou pulsy stejné velikosti v jedné půlperiodě symetricky okolo maxima a značí výboje v plynech v uspořádání hrot-deska. B jsou pulsy v obou půlperiodách symetricky okolo maxim v jedné s větší velikostí než v druhé a značí výboje v kapalinách uspořádání hrot-deska. C jsou pulsy mezi průchodem nulou a maximem s přibližně stejnou velikostí a značí typické výboje v dutinkách v pevném či kapalném izolantu. D jsou pulsy mezi průchodem nulou a maximem v jedné půlperiodě s větší velikostí než v druhé a značí výboje v dutinkách v pevném či kapalném izolantu u elektrod. E jsou pulsy symetricky kolem průchodů nulou a značí špatný kontakt mezi kovovými částmi.



Obr. 10 Pulsy částečných výbojů přiřazené k fázi zkušebního napětí převzato z [4]

Také jsme schopni na základě osciloskopických měření s časovou základnou a znalosti šíření elektromagnetického vlnění v daném materiálu lokalizovat přesné místo výbojové činnosti. Princip lokalizace místa výbojové činnosti spočívá vlastně v přesném měření času odezvy na přiložené napětí. Pro elektromagnetický impuls vzniklý výbojovou činností je zbytek kabelu jako vlnovod a to znamená, že se tento impuls v místě defektu rozdělí na dva přibližně stejné (samozřejmě záleží na konkrétní vlnové impedanci, ale pro zjednodušení předpokládáme, že jsou tyto velikosti stejné) impulsy šířící se každý na jinou stranu. Očekáváme impuls vzniklý výbojem putující přímo směrem k měřicímu přístroji a měříme, po jaké době dorazí i impuls, který se šířil kabelem na druhou stranu a odrazil se zpět od otevřeného konce směrem k měřicímu přístroji. Tento druhý impuls musí být samozřejmě vůči prvnímu utlumený vlivem útlumu kabelu. Pokud tedy známe celkovou délku kabelu, rychlost šíření elektromagnetických signálů v daném materiálu a útlumovou křivku, jsme schopni určit s jistou přesností místo výbojové činnosti.

Z velikostí zdánlivých nábojů a jejich četností lze také určit úroveň hladin nebezpečnosti průrazu izolace. Je třeba si uvědomit, co vlastně částečné výboje způsobují. S jistotou můžeme říci, že vlivem částečných výbojů neboli přeskoků vzniká lokální zvýšení teploty, což v důsledku vede k ohřívání okolní izolace a následně její postupné degradaci. Z chemického hlediska se díky přítomnosti kyslíku vytváří vlivem výbojové činnosti ozon, který umožňuje tvorbu oxidačních procesů. Samotný výboj také vytváří vodivou cestu, která se dále rozrůstá, až dokud nedojde k úplnému proražení izolace. Tyto a spousta dalších jevů degradují izolaci, proto bychom měli tvorbě částečných výbojů co nejvíce zabránit. Materiály jako polyethylen jsou právě na účinky výbojové činnosti velice citlivé, ale např. porcelán je vůči těmto účinkům velmi odolný.

Izolace kabelů vytlačovaná z polyethylenu resp. ze zesíťného polyethylenu značená jako XPE je na tvorbu částečných výbojů velice citlivá. Více než např. izolace z olejem napuštěného papíru, kde se vrstvením papíru zamezí rozšiřování vodivých cest. Je důležité si uvědomit, že částečné výboje vznikají při jakékoliv změně přiloženého napětí. Při provozním namáhání střídavým napětím o frekvenci 50 Hz tato změna nastává prakticky každou půlperiodu, což znamená za každých 0,01 s. To ovšem platí pro dielektrika resp. nehomogenity v dielektriku, které mají zápalné napětí nižší než maximální hodnota provozního napětí. Pro nehomogenity, které mají zápalné napětí vyšší než je maximální hodnota provozního napětí, nastává tato změna při přepětí. V tomto případě také záleží na hodnotě zhasacího napětí, které když je menší než provozní napětí, tak částečný výboj nezhasne a objevuje se již i nadále při provozu. Z výše uvedeného vyplývá, že částečný výboj je vlastně přeskok vznikající při překročení hodnoty zápalného napětí daného dielektrika a zanikající při poklesu napětí pod hodnotu zhasacího napětí. Tím přemostňuje pouze dané dielektrikum čili celkovou izolaci jen částečně. Tento přeskok lze nahradit zkratem neboli ideálním vodičem s nulovou hodnotou odporu. Vysvětlit si jej můžeme jako snahu vzniklého elektromagnetického pole přitáhnout si zápornou elektrodu, což je v našem případě silových kabelů měděné pracovní stínění. Tato snaha je vlastně síla, jejímž působením zde vzniká energie, kterou změříme pouze na svorkách měřeného objektu a která se od té skutečné dosti liší. Pro tuto energii platí:

$$W = q \cdot u \tag{17}$$

kde W je celková energie změřená na svorkách měřeného objektu [J], q náboj jednotlivého

pulsu částečného výboje [C], u okamžitá hodnota napětí na svorkách měřeného objektu [V].

Následkem této energie je lokální zvýšení teploty, což způsobuje různé oxidační či ionizační procesy v okolním materiálu a tím i vznik nových chemických látek. Z těchto důvodů sledujeme lokální změnu jakožto snížení permitivity a elektrické pevnosti a jako důsledek narušení elektromagnetického pole v okolí nehomogenity.

Veškeré tyto procesy jsou zřejmě také velice závislé na poloze vzniklého defektu vůči elektrodám. Působí zde různé síly přispívajících k degradaci izolace a skládajících se ze složek objemové síly, tlakové síly, objemové síly vyvolané nehomogenitou pole a anizotropií izolace, gradientové síly. To je podrobněji popsáno v literatuře [7], dle které platí:

$$f = \rho E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \gamma_D} \gamma_D \right) + p \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) \cdot \frac{1}{\partial V} \quad (18)$$

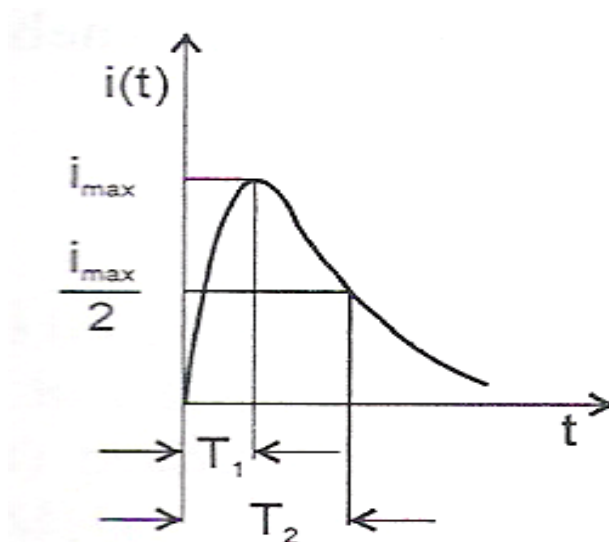
kde f je celková síla působící v okolí nehomogenity [$\text{Wsm}^{-1}\text{m}^{-3}$], ρ hustota materiálu [kgm^{-3}], E intenzita elektrického pole [Vm^{-1}], ε permitivita [Nm^2C^{-2}], γ_D poloha [m], V objem [m^3].

5 Měření částečných výbojů

Částečné výboje lze měřit několika metodami. Je známo, že při výbojové činnosti vznikají jak veličiny elektrické, tak i veličiny neelektrické. Proto existují mimo elektrických metod také metody neelektrické jako např. akustická či chemická detekce. Při akustické detekci jsou využívány mikrofony s vysokou citlivostí v ultrazvukové oblasti. Při chemické detekci je využívána např. plynová chromatografie či metoda indikace ozonu. Tyto neelektrické metody jsou však pro měření částečných výbojů na kabelech nevhodné a používají se spíše pro měření na strojích.

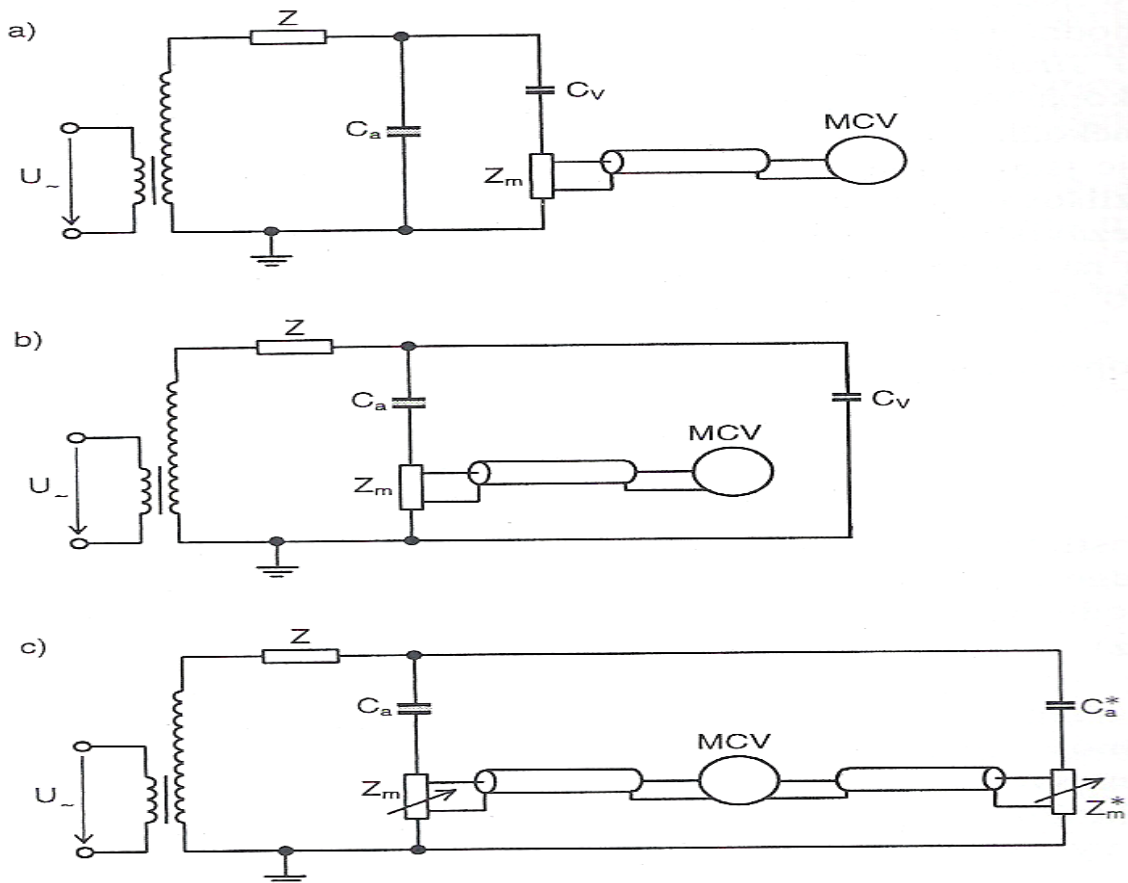
Pro kabely jsou mnohem vhodnější elektrické metody, které se provádějí pomocí galvanického připojení nebo pomocí kapacitních a induktivních sond. Sondy neboli snímače jsou založeny na skutečnosti, že zdroj výbojové činnosti vyzařuje vysokofrekvenční energii, která se skládá ze složky elektrické a magnetické. Kapacitní sondy jsou schopné detekovat elektrickou složku a induktivní sondy složku magnetickou. Pro měření na kabelech uložených v zemi jsou však tyto sondy vhodné pouze pro měření na koncovkách nebo pro měření ve výkopu.

Nejvíce je v praxi využívána metoda galvanického připojení. Tato elektrická metoda vychází z toho, že vlivem výbojové činnosti vznikají proudové impulsy, které se přímo snímají. Tyto impulsy mají svůj charakteristický tvar, který je zřejmý z obr. 11. Doba čela T_1 tohoto impulsu je dle [4] v pevných izolantech několik ns a v kapalných izolantech kolem 1 μ s. Doba půltýlu T_2 je dle [4] v pevných izolantech několik desítek ns a v kapalných izolantech několik μ s. Náboj q je podle vzorce (14) plocha pod touto křivkou. Oddělení tohoto impulsu od základního napájení se provádí pomocí měřící impedance, kterou tvoří RLC obvod navržený jako nízkofrekvenční propust.



Obr. 11 Charakteristický tvar impulsu částečného výboje převzato z [4]

Zapojení přístrojů metodou galvanického připojení se uskutečňuje podle tří různých schémat znázorněných na obr. 12. Zde je C_a měřený objekt. Impedance Z zamezuje průchodu impulsů částečných výbojů vzniklých ve zdroji zkušebního napětí U_0 do měřicího obvodu. Vazební kondenzátor C_v je důležitý prvek, který je dimenzován na maximální testovací napětí, musí vykazovat malou indukčnost a nesmí být zdrojem částečných výbojů. Z_m je měřicí impedance a MCV představuje vlastní měřicí přístroj. Zapojení a) má výhodu možnosti měřit na uzemněném objektu a je vhodné pro měření na objektech s vysokou hodnotou kapacity. Zapojení b) se používá pro měření na neuzemněných objektech. Pokud je rozptylová kapacita měřicího obvodu vyšší než kapacita měřeného objektu, tak může být vazební kondenzátor C_v vynechán. Zapojení c) je můstkové zapojení, které snímá rozdílově proudové impulsy částečných výbojů. Toto zapojení je nejvíce odolné vůči vnějšímu rušení. Jako vazební kondenzátor C_a^* se používá kondenzátor s přibližně stejnou kapacitou jako kapacita měřeného objektu nebo se také může použít vzorek se známou hodnotou částečných výbojů.



Obr. 12 Schémata zapojení metodou galvanického připojení převzato z [4]

5.1 Kalibrace

Jelikož se v těchto měřeních měří pouze náboj zdánlivý, který je závislý hlavně na parametrech daného kabelu, tak je před každým měřením nutná kalibrace měřicího obvodu. Provádí se pomocí kalibrátorů, které jsou buď elektronické, nebo pracující na fyzikálním principu. Kalibrátory pracující na fyzikálním principu generují skutečný výboj v plynném prostředí o známé hodnotě náboje a využívají se spíše při měření v laboratořích.

V praxi jsou více využívány kalibrátory elektronické, které se obvykle skládají ze sériového spojení generátoru obdélníkových pulsů o známé hodnotě amplitudy U_0 a derivačního kondenzátoru o známé hodnotě kapacity C_0 . Tímto vytváří s konstantní frekvencí jehlovité pulsy, které jsou podobné pulsům skutečných částečných výbojů. Dosazením hodnot kalibrátoru do vzorce (15) dostaneme hodnotu kalibračního náboje:

$$q_0 = C_0 \cdot U_0 \tag{19}$$

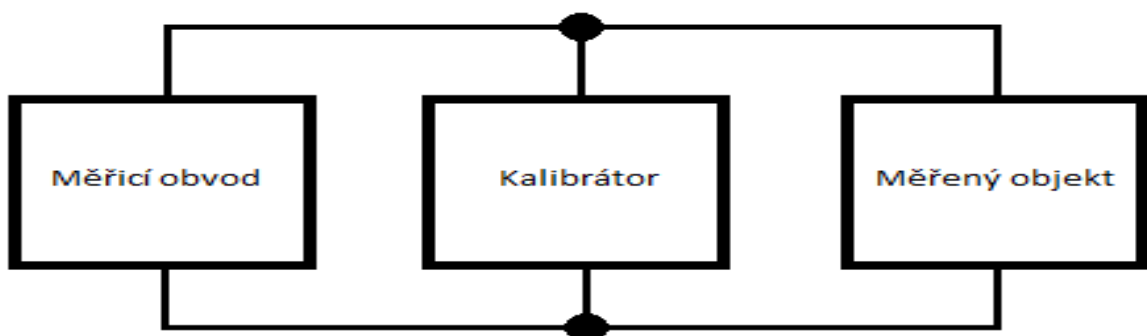
kde q_0 je kalibrační náboj [C], C_0 kapacita derivačního kondenzátoru [F], U_0 amplituda obdélníkových pulsů [V].

Jelikož není praktické používat pro kalibrátory generátor obdélníkových vln o vysoké amplitudě, musí být náležitě zvětšena hodnota kapacity derivačního kondenzátoru. Aby bylo zajištěno dočasné uložení kalibračního náboje v kapacitě měřeného objektu, musí být splněna podmínka:

$$C_0 \ll C_a \quad (20)$$

kde C_0 je kapacita derivačního kondenzátoru [F], C_a kapacita měřeného objektu [F].

Kalibrace se provádí před každým měřením při nulové hodnotě zkušebního napětí v zapojení dle schématu na obr. 13. Princip spočívá v nastavení referenčních hodnot zdánlivého náboje v izolačním systému kabelu a v zachycení kalibračního pulsu ozařeného od otevřeného konce kabelu, z čehož se dá odvodit útlumová křivka.

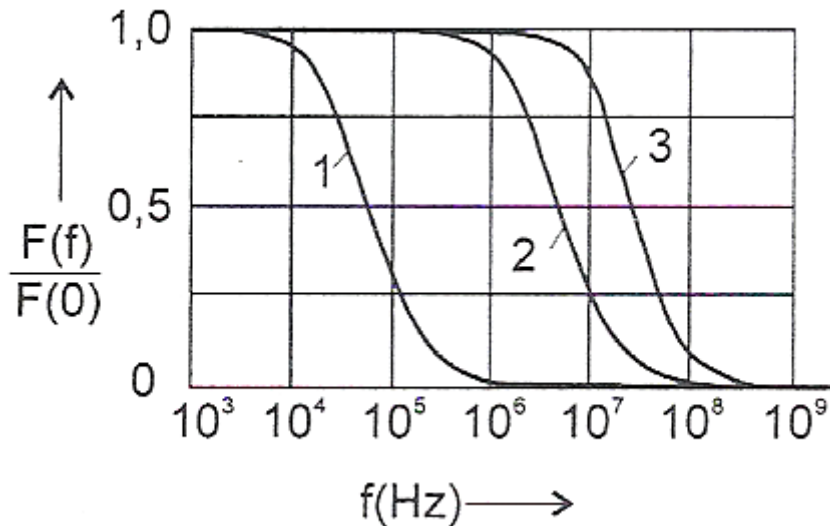


Obr. 13 Schéma zapojení kalibrátoru

5.2 Přístroje pro měření částečných výbojů

Přístroje používané pro měření částečných výbojů se rozdělují dle způsobu zpracování impulsu na úzkopásmové a širokopásmové. Úzkopásmové měřiče integrují změřený impuls ve frekvenční oblasti. Používají omezenou část frekvenčního spektra (šířka pásma těchto přístrojů je přibližně 10 kHz), které se získává rozložením impulsu pomocí Fourierovy transformace. Normalizované charakteristiky spektrální amplitudové hustoty v závislosti na frekvenci jsou na obr. 14. Z tohoto je patrné, že impuls částečného výboje vykazuje do určité

frekvence konstantní amplitudovou hustotu $\frac{F(f)}{F(0)}$, kde zdánlivý náboj q_{zd} odpovídá stejnosměrné složce $F(0)$. Toho úzkopásmové měřiče využívají, jelikož jejich šířka pásma je mnohem menší než oblast konstantní charakteristiky amplitudové hustoty. Proto jsou také tyto měřiče velmi závislé na tvaru impulsu a nelze u nich rozpoznat polaritu pulsů.



Obr. 14 Normalizované charakteristiky spektrální amplitudové hustoty v závislosti na frekvenci (1 – dlouhé impulsy, 2 – středně dlouhé impulsy, 3 – krátké impulsy) převzato z [4]

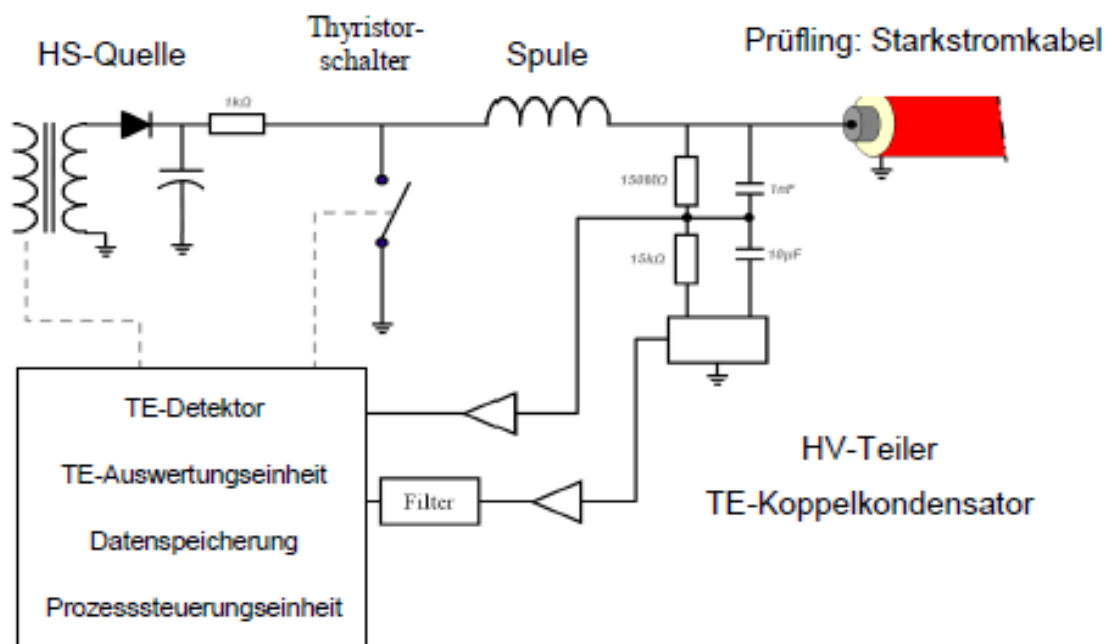
Širokopásmové přístroje integrují změřený impuls v časové oblasti dle vzorce (14) pomocí rychlých operačních zesilovačů. Tyto přístroje udávají daleko kvantifikovanější výsledky. Díky jejich šířce pásma větší než 1 MHz, dokážou rozpoznat polaritu pulsů a jsou prakticky nezávislé na tvaru charakteristiky spektrální amplitudové hustoty.

Přístroje pro měření částečných výbojů se také rozlišují podle používaného zdroje zkušební napětí. Protože by bylo nepraktické a neekonomické využívat pro diagnostiku kabelů v terénu zdroj zkušební napětí o provozní frekvenci 50 Hz, využívají se zdroje napětí s velmi nízkým kmitočtem, oscilační napětí nebo napětí spínacích pulsů. Použití těchto zdrojů má společné to, že vždy se snaží co nejlépe přiblížit provozním podmínkám tedy frekvenci 50 Hz.

Zdroje napětí s velmi nízkým kmitočtem využívá např. technologie CDA (komplexní analýza vybíjení), kdy se kabel nabíjí po dobu 10 s a poté se během 10 ms vybije. Částečné výboje jsou detekovány při vybíjení, jelikož se tento průběh svou strmostí nejvíce podobá průběhu provozního napětí.

Zdroje oscilačních napětí a napětí spínacích pulsů jsou schopné vygenerovat napětí o frekvenci 150 - 400 Hz dle kapacity měřeného objektu. Využívají řízeného tlumení napětí na měřeném objektu, kdy jsou srovnatelné podmínky vzniku výbojové činnosti jako při provozním namáhání. Díky svým nedestruktivním účinkům jsou v praxi více používané.

U PREdistribuce a.s. se používá širokopásmový měřicí přístroj pracující se zdrojem oscilačních napětí. Tento přístroj nazývaný OWTS M-serie verze 5.0 je vyvinutý firmou SEBA KMT speciálně pro měřicí vůz. Sestává se z VN cívky, VN děliče, VN spínače, vazebního kondenzátoru, vazebního členu, detektoru částečných výbojů a připojovacího pole. Technická data jsou uvedena v příloze D. Princip získávání tlumeného oscilačního napětí je zřejmý z obr. 15, kde je zobrazeno schéma zapojení přístroje k měřenému objektu. Digitálně řízená napájecí jednotka nabije kabel stupňujícím se stejnosměrným napětím na požadovanou hodnotu, čímž se vytvoří v kabelu potřebný náboj. Poté se přes tyristorový spínač spojí cívka s měřeným kabelem do rezonančního obvodu. Tímto se vytvoří utlumená oscilační vlna střídavého napětí trvající několik 100 ms.



Obr. 15 Schéma zapojení OWTS M-serie verze 5.0 převzato z [16]

5.3 Diagnostické metody měření na kabelech VN

Diagnostické metody se obecně dělí na destruktivní a nedestruktivní. Liší se od sebe tím, že využitím destruktivní metody je při negativním výsledku zkoumaný objekt dále nepoužitelný a využitím nedestruktivní metody je zkoušený objekt schopen dalšího provozu i při negativním výsledku zkoušky. Pro měření na kabelech VN uložených v zemi jsou v praxi nejvíce používané metody VN zkouška (destruktivní metoda) a měření částečných výbojů (nedestruktivní metoda).

VN zkouška spočívá v namáhání kabelu výdržným napětím po určitou dobu. Výdržné napětí je buď stejnosměrné, nebo střídavé. U PREdistribuce a.s. podléhá tato zkouška místní podnikové normě PK 201, dle které se VN zkouška provádí stejnosměrným napětím velikosti pětinásobku provozního napětí (54 kV) po dobu 10 min a střídavým napětím o frekvenci 0,1 Hz a velikosti třinásovkou provozního napětí (38 kV) po dobu 1 h. Výsledkem zkoušky je hodnocení *vyhověl* nebo *nevyhověl*. Při hodnocení *nevyhověl* se musí kabel okamžitě opravit, jelikož není schopen dalšího provozu.

Metoda měření částečných výbojů se provádí nabitím kabelu na požadovanou hodnotu napětí a následným vybitím, při kterém se měří veličiny částečných výbojů. U PREdistribuce a.s. se dle místní podnikové normy PK 202 provádí tato zkouška při hodnotách zkušebního napětí 0,5;0,8;1,0;1,4;1,7·U₀, kde efektivní hodnota napětí U₀ je 13 kV. Pro každou z těchto hodnot zkušebního napětí se dělají 3 nezávislá měření. Výsledkem této metody jsou 4 různá hodnocení dle velikosti zdánlivého náboje a četnosti částečných výbojů viz tab. 2. Při hodnocení *dobrý* se doporučuje provádět opakované měření do 10ti let, při hodnocení *horší* je potřeba provést další měření do 2 let, při hodnocení *špatný* je nutné další měření po ½roce a při hodnocení *kritický* musí být navržena výměna celého nebo jen části kabelu okamžitě.

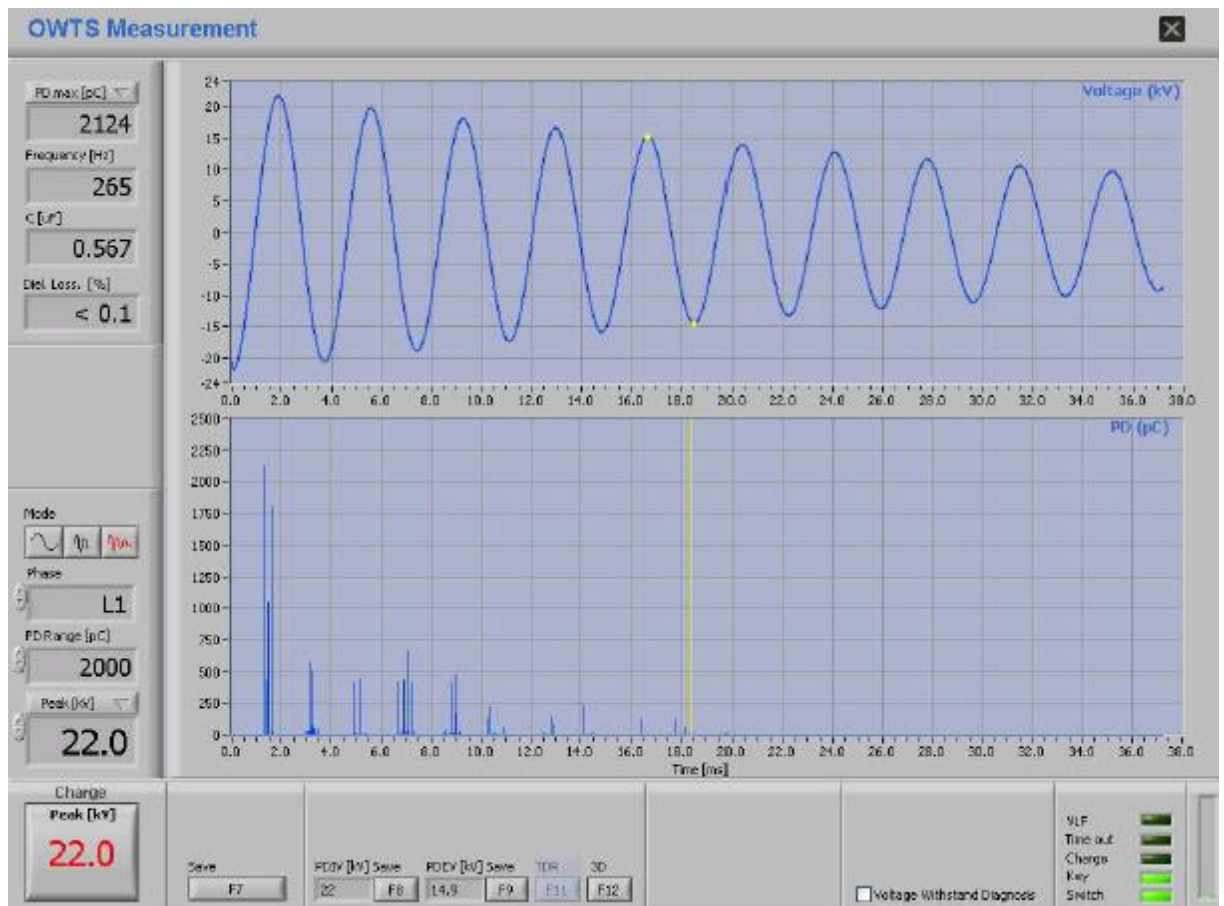
Hodnocení stavu izolace dle výskytu ČV	Papírová izolace Q_{max} (pC)	Plastová izolace Q_{max} (pC)	Doplňující podmínky k hodnocení kabelů s papírovou izolací Q_{max} vztaženo k jmenovitému napětí ($U_0 = 13$ kV)
Nízké	< 5.000	nezjištěny	Nízké četnosti výbojů.
Vyšší	< 10.000	< 250	Četnost výboje $Q \geq 2.000$ pC je vyšší než 6.
Vysoké	< 20.000	< 500	Zapalovací napětí $U_z \leq U_0$, četnost výbojů $Q \geq 5.000$ pC je vyšší než 6. Velký počet roztroušených výbojů. Výboje $Q \geq 5.000$ pC jsou v místě nebo v okolí přechodové spojky
Kritické	> 20.000	> 500	Výboje při zvyšování napětí prudce rostou. Četnost výbojů $Q > 10.000$ pC je vyšší než 6. Velký počet roztroušených výbojů

Tab. 2 Hodnocení diagnostiky měřením částečných výbojů převzato z [17]

5.4 Vyhodnocení naměřených dat

Vyhodnocování se provádí pomocí software příslušného měřicího přístroje. Zde je popsán software vyvinutý firmou SEBA KMT pro přístroj OWTS. Toto uživatelské rozhraní umožňuje zobrazení naměřených dat takové, které je vhodné pro určení celkového stavu izolace kabelu a případné dopřesnění polohy zdroje částečných výbojů.

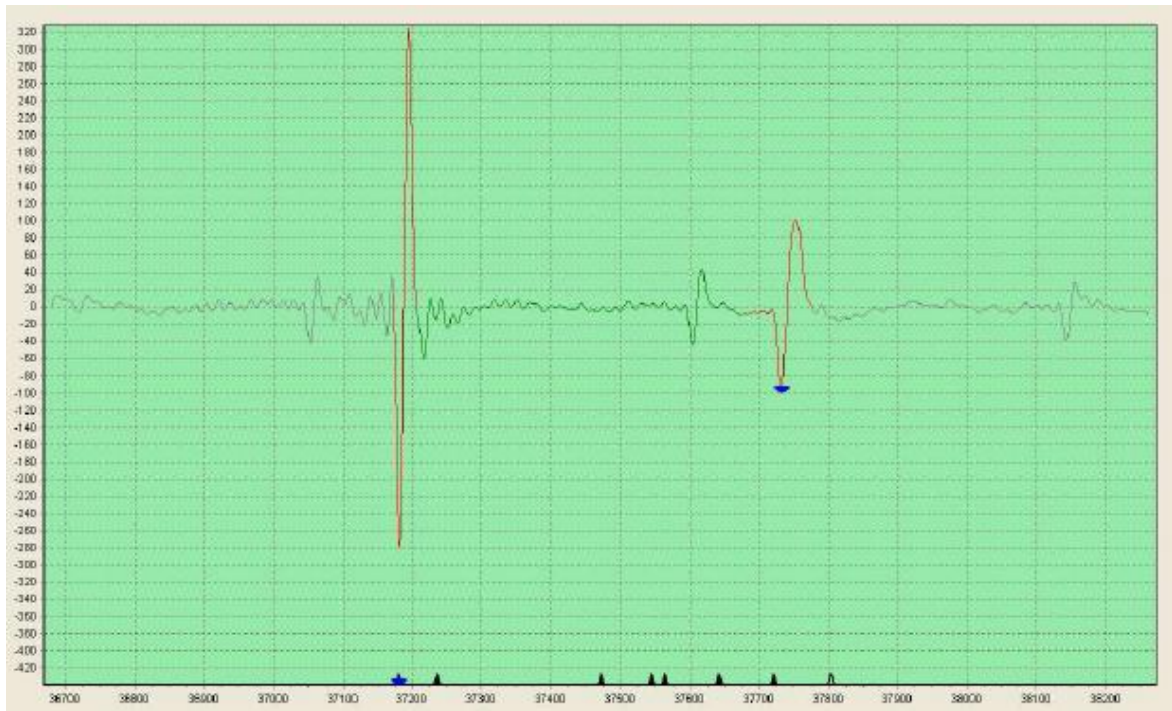
Zpočátku je vidět na obr. 16 zobrazení naměřených veličin v režimu OWTS, kde v horní části vidíme časový průběh zkušební napětí a v dolní části diagram hodnot zdánlivého náboje v závislosti na čase. Dále jsou zde v levé horní části zobrazeny hodnoty nejvyššího zdánlivého náboje v pC, frekvence zkušební napětí v Hz, kapacity kabelu v μ F a dielektrických ztrát v %. Pomocí tohoto zobrazení lze konstatovat výskyt částečných výbojů přesahujících určitou mez zdánlivého náboje při určité hodnotě zkušební napětí a dále lze určit hodnoty zápalného a zhášecího napětí. Např. v případě na obr. 16 byl zaznamenán výskyt částečných výbojů s maximální hodnotou zdánlivého náboje 2124 pC až při hodnotě zkušební napětí 22 kV. Pokud by byla mez nebezpečnosti částečných výbojů 2000 pC, pak je toto napětí 22 kV hodnotou zápalného napětí. Hodnota amplitudy zkušební napětí při zániku částečných výbojů 15 kV je hodnotou zhášecího napětí vyznačená na obr. 16 žlutě.



Obr. 16 Ukázka režimu zobrazení OWTS

Dále je zde potřeba využít možnosti zobrazení detailu 1. periody zkušebního napětí, kdy se určí druh částečných výbojů pomocí přiřazení fáze zkušebního napětí jednotlivým impulsům. Pomocí tohoto zobrazení tedy zjistíme, na která naměřená data je třeba se zaměřit v dalším kroku.

Další funkce režim TDR na obr. 17 umožňuje zobrazení každého jednotlivého impulsu ze spodní části obr. 16 zvlášť. Tímto se provádí hlavní činnost vyhodnocování tzv. mapování částečných výbojů, díky kterému lze určit polohu zdroje částečných výbojů na kabelu. Na tomto zobrazení vidíme prvotní impuls částečného výboje s jeho reflexí neboli odrazem od vzdáleného konce kabelu v závislosti na čase. Princip spočívá ve správném přiřazení odraženého impulsu k jeho originálu. To se nejlépe pozná podle podobnosti tvarů nejen samotných impulsů, ale i jejich okolí. Také je pro tyto účely vhodná možnost změny šířky pásma. Pokud se mění šířka pásma, musí se vzájemně měnit tento pár impulsů stejným způsobem tzn. musí se navzájem stejně zvyšovat či snižovat.



Obr. 17 Ukázka režimu zobrazení TDR

Pro správné vyhodnocení je potřeba znát fyzikální princip šíření elektromagnetického vlnění daným prostředím. Důležité je brát na vědomí útlum kabelu. Ten je závislý hlavně na typu a délce kabelu, počtu spojek či jiných impedančních změn a vlhkosti izolace. Typický průběh útlumu kabelu je červeně vyznačená křivka na obr. 18, která se zjišťuje při kalibraci na začátku měření. Platí, že kabely s papírovou izolací mají větší útlum než kabely s PE izolací, ale např. kabely s PVC izolací mají útlum mnohem větší a nemá smysl na nich provádět měření částečných výbojů. Délka kabelu je útlumu přímo úměrná stejně jako počet spojek. Z toho vyplývá, že odražený impuls nemůže mít nikdy vyšší amplitudu než jeho originál.



Obr. 18 Typický průběh útlumu na kabelu

Dále je nutné brát na vědomí hraniční frekvenci kabelu. Jelikož má každý kabel charakteristiku dolní propusti, tak při překročení hraniční frekvence jsou vysokofrekvenční signály výrazně utlumované. Hraniční frekvence je závislá hlavně na délce a typu kabelu. Délka kabelu je nepřímo úměrná vůči jeho hraniční frekvenci a kabely s papírovou izolací mají tuto frekvenci nižší než kabely s PE izolací.

Také je třeba znát vliv disperze signálu, čímž se označuje závislost rychlosti šíření elektromagnetických vln na jejich frekvenci. Vlivem disperze se vysokofrekvenční signál při šíření kabelem rozšiřuje resp. zvětšuje se doba jeho trvání. Z toho vyplývá, že odražený impuls nemůže být nikdy užší než originál. Problém nastává hlavně tehdy, nachází-li se zdroj částečných výbojů blízko vzdálenému konci kabelu. Tento pár impulsů musí urazit prakticky stejnou vzdálenost časově hned za sebou a vlivem disperze se rozšíří, čímž se tzv. slijou do jednoho impulsu. V tomto případě je dobré provést měření z druhé strany kabelu.

Po správném přiřazení impulsů následuje další krok, kde program spočte vzdálenost místa vzniku částečného výboje pomocí známé rychlosti šíření signálu a doby mezi originálním a odraženým impulsem. Tato vzdálenost je pak v závislosti velikosti zdánlivého náboje na poloze na kabelu vynesena do diagramu viz obr. 19. Z tohoto diagramu lze určit dle četnosti částečných výbojů místa ohrožená výbojovou činností. V případě obr. 19 je zřejmý četnější výskyt výbojů na začátku kabelu a uprostřed přibližně na 235 m.



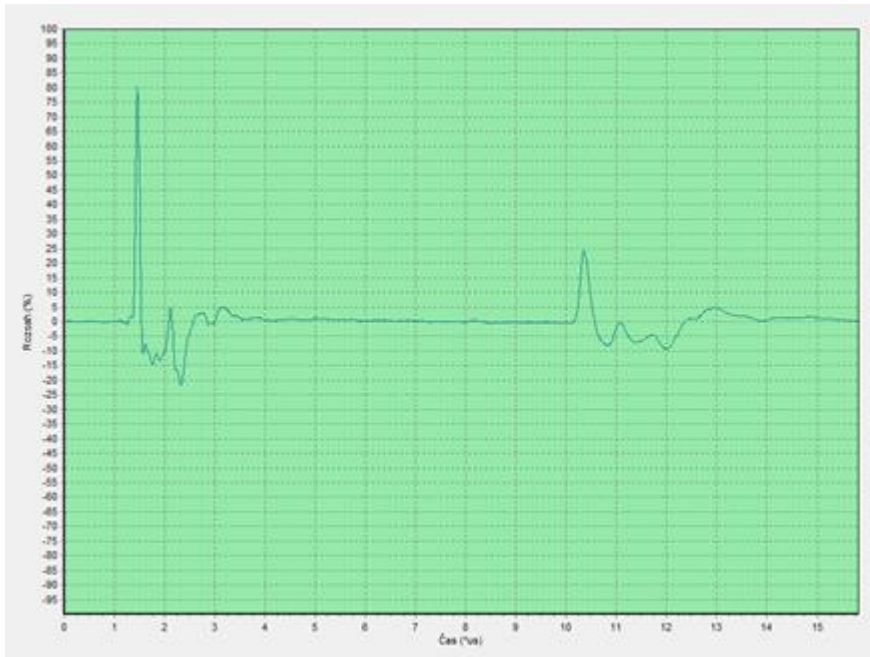
Obr. 19 Ukázka mapy částečných výbojů

5.5 Praktické měření částečných výbojů

Aby bylo možné provést diagnostické měření částečných výbojů v rámci údržby kabelové sítě VN, je potřeba vytipovaný kabel vyřadit z provozu. K tomu je nutné předem zajistit příslušná opatření, díky kterým nebude přerušena dodávka elektrické energie. Poté je možno kabel vypnout, zajistit a uzemnit. Pro samotné měření se musí kabel znovu odzemnit.

Zde popsané měření proběhlo na kabelu typu 22 – AXEKVCEY o průřezu 120 mm^2 a délce 720 m. Tento kabel obsahuje jednu spojku typu, který je popsán v kapitole 2.1.1 a která se nachází 540 m od místa měření. Blízký konec kabelu je zakončen v klasickém rozváděči a vzdálený konec v zapouzdřeném rozváděči pomocí koncovek viz kapitola 2.1.2. K měření byl využit kabelový měřicí vůz viz příloha E se zabudovaným přístrojem OWTS viz kapitola 5.2, kde zapojení podléhá místní podnikové normě PX 509. Dále měření proběhlo dle metody popsané v kapitole 5.3.

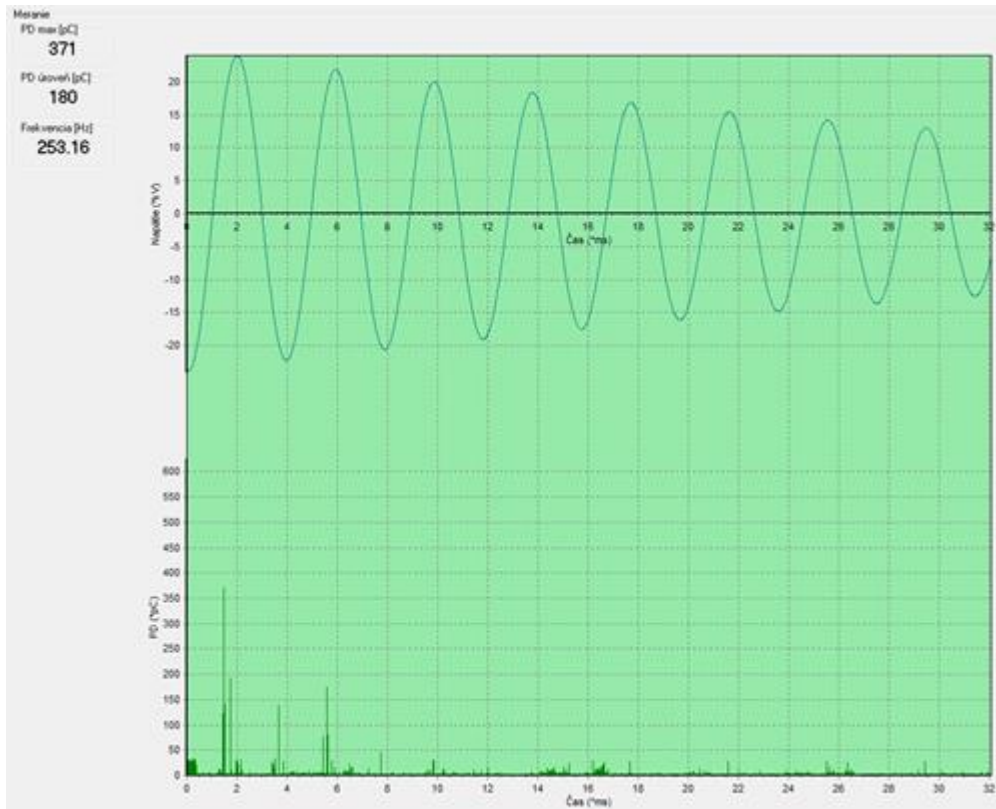
Na začátku měření byla provedena kalibrace předpokládaných hodnot zdánlivého náboje částečných výbojů tj. 100 – 50 000 pC. Na obr. 20 je zobrazena kalibrace náboje 2000 pC, ze které lze určit přibližný průběh útlumu kabelu a vliv disperze na odražený impuls částečného výboje. Jak je patrné, kalibrace se provádí na 80% rozsahu kvůli přebuzení.



Obr. 20 Průběh kalibrační křivky pro náboj 2000 pC

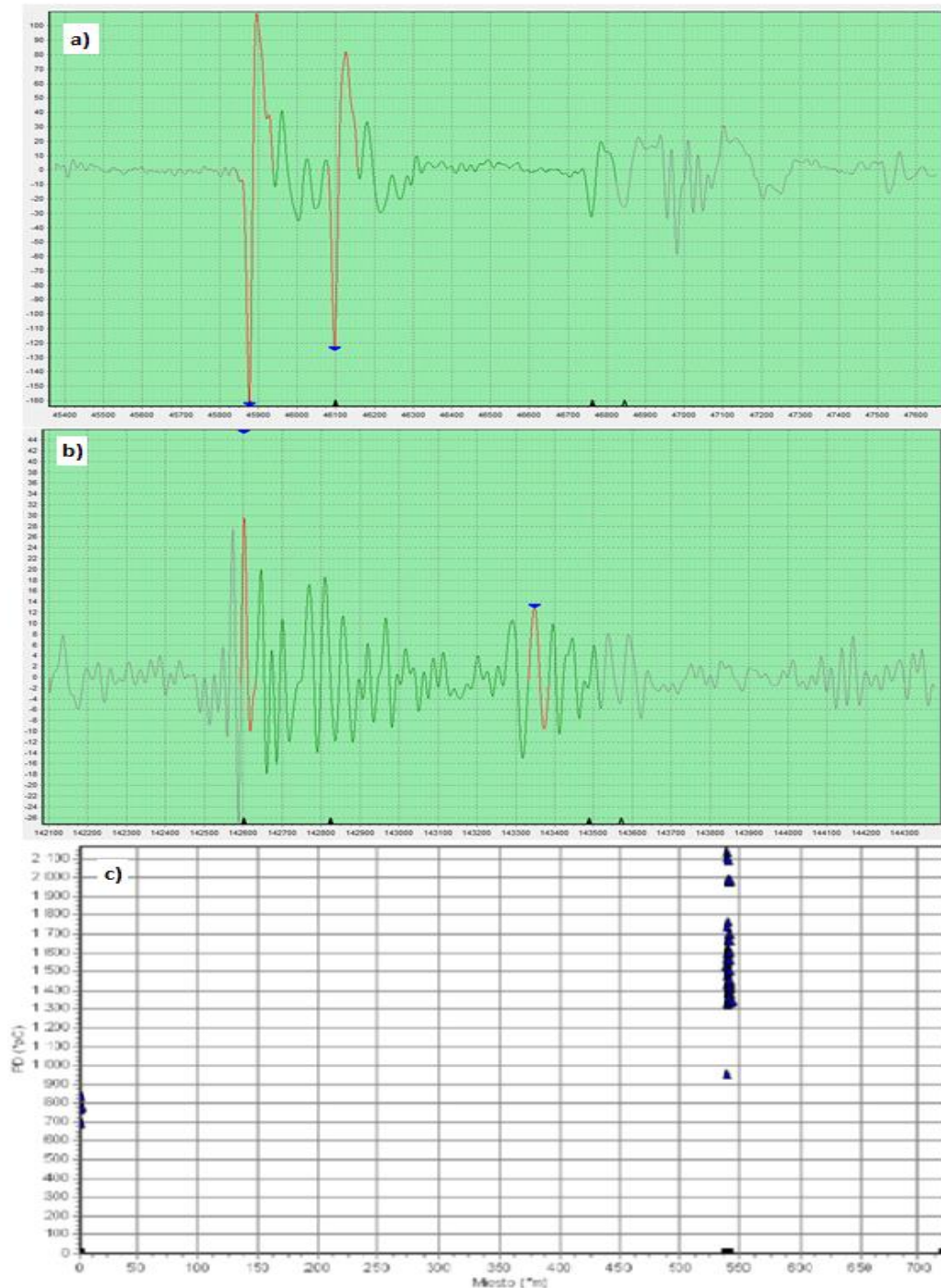
Po kalibraci začíná samotné měření při nulové hodnotě zkušebního napětí. Z tohoto se určí hodnota okolního rušení, která je v tomto případě 71 pC. Tato hodnota je důležitá proto, že při naměření hodnot zdánlivého náboje pod úroveň tohoto rušení nelze tyto data považovat za impulsy částečných výbojů. V praxi se tato hodnota přičítá k mezím kritérií vyhodnocování tzn. v našem případě kritická úroveň bude až při hodnotě 571 pC.

Při postupném zvyšování hodnoty zkušebního napětí byl při $1,3U_0$ zjištěn zvýšený výskyt částečných výbojů průměrné hodnoty 180 pC a maximální hodnoty 371 pC viz obr. 21. Vzhledem k tomu, že se jedná o plastový kabel, hodnota $1,3U_0$ je blízko hodnotě provozního napětí a hodnota zdánlivého náboje překročila hodnotu 200 pC, lze tedy konstatovat, že tato výbojová činnost může ohrožovat izolaci kabelu při provozu.



Obr. 21 Měření v režimu OWTS při $1,3U_0$

Při vyhodnocení těchto impulsů v TDR režimu se často objevovaly vzorové případy částečných výbojů viz obr. 22a). Z takového průběhu se dá díky krátké časové prodlevě mezi originálem a reflexí impulsu předběžně odvodit, že zdroj tohoto částečného výboje se nachází blíže vzdálenému konci kabelu. Po odstranění impulsů ovlivněných rušením viz obr. 22b) se v mapě částečných výbojů zobrazily tyto impulsy do jednoho místa na 540 m od začátku kabelu viz obr. 22c). Toto umístění odpovídá poloze spojky. Je zde také vidět umístění některých výbojů na samotný začátek kabelu, které vznikají nejpravděpodobněji vlivem připojení pomocí měřicích kleští na klasickou koncovku viz příloha F. Na základě tohoto a faktu, že při vyšších hodnotách zkušebního napětí přesáhly hodnoty zdánlivého náboje kritickou mez 571 pC, lze tedy označit tuto spojku za místo ohrožené výbojovou činností.



Obr. 22 a) Průběh impulsu částečného výboje v režimu TDR, b) Průběh impulsu v režimu TDR ovlivněný rušením, c) mapa částečných výbojů

Měření proběhlo následně i z druhé strany kabelu, kdy se tento výsledek potvrdil. Spojka byla tedy navržena na výměnu. V takovém případě je potřeba v tomto místě provést výkop a kabel se spojkou najít, což díky dřívějšímu geodetickému zaměření nebyl žádný problém. Po vykopání a obnažení kabelu je ještě nutné identifikovat postiženou fázi, což se provádí pomocí identifikačního přístroje, který vysílá po kabelu kódovaný signál a ten se

snímá inдукtivním snímačem viz příloha F. Poté byla část kabelu se spojkou vystřižena a poslána k rozboru, při kterém byla objevena opálená část izolace viz obr. 23, ostatní fotografie jsou uvedené v příloze G. Tento defekt vznikl pravděpodobně přítomností nepatrné vlhkosti či nějaké nečistoty při montáži spojky. To ovšem nelze dostupnými prostředky vzhledem k mikroskopické velikosti defektu na 100% prokázat.



Obr. 23 Fotografie z rozboru vadné spojky

6 Zhodnocení diagnostických metod

Diagnostika částečných výbojů je v současné době vzhledem k masivní pokládce kabelů s PE izolací velice perspektivní metoda. Při uvádění nových kabelů do provozu v síti PREdistribuce a.s. již zcela nahradila dříve nezbytnou vysokonapětovou zkoušku. Jejimi velkými výhodami jsou nepochybně nedestruktivní účinky vůči měřenému kabelu a kvantifikovatelné výsledky. Měřením částečných výbojů lze také ušetřit investiční náklady kabelové sítě, což je podrobněji popsáno v [9]. Typickým příkladem je naplánovaná celková výměna kabelu, přičemž se měřením částečných výbojů zjistí, že by bylo možné vyměnit pouze polovinu kabelu. Do popředí se také dostává měření částečných výbojů za provozu tzv. on-line měření. To však zatím není schopné udávat tolik kvantifikovatelné výsledky. Při měření na starších typech kabelů s papírovou izolací, které stále zastávají velký podíl v kabelové síti, však metoda diagnostiky částečných výbojů naráží na problém s vlhkostí těchto kabelů. Pokud kabel obsahuje vlhkost vyšší než 2%, nelze na něm změřit částečné výboje. Proto je v praktických vyhodnoceních měření na těchto kabelech výsledek bez detekovaných výbojů považován za nevyhovující.

Díky tomu se při uvádění starších kabelů do provozu stále využívá vysokonapětová zkouška. Ta má proti diagnostice částečných výbojů velikou nevýhodu ve svých destruktivních účincích. Při záporném výsledku je kabel zničen a musí se okamžitě opravit. Při kladném výsledku je však kabel vystaven zvýšenému namáhání, tudíž se mohou objevit i jiná neúplná poškození, která by za normálních okolností nevznikla. V případě kabelů s PE izolací se musí VN zkouška provádět výhradně střídavým napětím, jelikož použitím stejnosměrného napětí se PE izolace jakožto dielektrikum nevhodně polarizuje.

Celkově lze říci, že v kabelových sítích se nejvíce vyplatí používat kombinaci obou těchto metod, které se navzájem doplňují. Např. nehomogenity vzniklé na koncokách kabelů se mnohem lépe odhalují pomocí VN zkoušky, ale naopak kontrola správnosti provedení spojky se lépe provádí diagnostikou částečných výbojů. Takto prováděná údržba kabelové sítě omezuje neplánované výpadky na minimum a tím tedy zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie, díky čemuž se vyplatí i navzdory svým vysokým pořizovacím a provozním nákladům.

Závěr

Cílem této práce je uvedení do problematiky diagnostiky kabelů VN. Proto byl v kapitole 1 uveden obecný přehled elektrických sítí a následně detailně probrány kabelové sítě a kabel VN včetně jeho příslušných souborů nejpoužívanějších u PREdistribuce a.s. Pro pochopení problematiky částečných výbojů v kabelech je nutné znát některé fyzikální principy materiálů používaných pro výrobu kabelů, což je naznačeno v kapitolách 2 a 2.2.

Samotná teorie částečných výbojů je velice rozsáhlá a složitá, proto byl v kapitole 4 použit nejjednodušší model částečného výboje nazývaný jako trojkapacitní model. Pro názornost je tento model dostatečný, přičemž je třeba si uvědomit, že zde probíhají mnohem složitější procesy, které pro svou mikroskopickou velikost není prakticky možné přímo zkoumat. Z uvedeného si lze udělat základní přehled principů vzniku částečného výboje.

Problematika měření částečných výbojů je uvedena v kapitole 5, kde je přehled základních schémat zapojení měřicích přístrojů a kalibrace těchto obvodů. V této kapitole jsou uvedeny potřebné znalosti pro správné měření částečných výbojů a vyhodnocení naměřených dat, které je ovlivněno použitým přístrojem a jeho softwarem, přičemž jsou zde popsány měřicí přístroje obecně a detailně přístroj používaný u PREdistribuce a.s. i s jeho vyhodnocovacím softwarem. Je zde naznačena potřebná problematika šíření elektromagnetického vlnění kabelem a praktické zkušenosti z vyhodnocování měření částečných výbojů. Pro úplnost je uvedeno praktické měření částečných výbojů na kabelu VN v síti PREdistribuce a.s.

Zhodnocení diagnostických metod uvedené v kapitole 6 naznačuje výhody a nevýhody používaných metod a jejich kombinací.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří, MIŠÁK, Stanislav, ORSÁGOVÁ, Jaroslava, PAAR, Martin, TOPOLÁNEK, David a spol. *Provoz distribučních soustav*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2011. 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] MERTLOVÁ, Jiřina, NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008.
- [3] MENTLÍK, Václav, TRNKA, Pavel, TRNKOVÁ, Magdaléna, ŠAŠEK, Lumír. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Vyd. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [4] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 2005. 140 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [5] MENTLÍK, Václav, PIHERA, Josef, POLANSKÝ, Radek, PROSR, Pavel, TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008
- [6] MARŠÁL, M. *Přířezové rady silnoprúdových káblů a ich zákonitosti*. Elektroizolačná a káblková technika 41:4, 3-10 (1988).
- [7] MARTON, K. *Klasifikácia objemových sil prispievajúcich k dagraďácii polymérnej izolácie*. Elektroizolačná a káblková technika 53:3, 92-96 (2000).
- [8] RADO, R. *Štruktúra a vlastnosti zosieteného polyetylénu*. Elektroizolačná a káblková technika 41:4, 11-21 (1988).
- [9] KŘIVÁNEK, F. *Diagnostika kabelových vedení 22 kV v PREdistribuce, a.s. a vývoj poruchovosti kabelů VN za dobu používání diagnostiky částečných výbojů*. Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2013
- [10] ČSN EN 60270: *Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů*, Český normalizační institut, 2001.
- [11] PNE 34 7625: *VN kabely se zesítěnou PE izolací pro distribuční sítě do 34 kV*, 2011.
- [12] PNE 33 0000 – 1: *Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribuční soustavě dodavatele elektřiny*, 2011.
- [13] Firemní materiály a pracovní návody NKT CABLE (KABLO KLADNO)
- [14] Firemní materiály a pracovní návody TYCO ELEKTRONICS
- [15] Firemní materiály a pracovní návody 3M
- [16] Firemní materiály a pracovní návody SEBA KMT
- [17] Firemní materiály a normy PREdistribuce a.s.

Přílohy

Příloha A – Značení kabelů

Značení starších kabelů vyráběných od r. 1964:

Číslo – jmenovité napětí v kV (6, 10, 22, 35)

1. písmeno – materiál jádra: **A** – hliník, **C** – měď
2. písmeno – materiál izolace: **E** – polyethylen, **M** – nemigrující, olejem napuštěný papír, **N** – olejem napuštěný papír, **XE** – zesítený polyethylen, **Y** – měkčený PVC
3. písmeno – druh kabelu: **K** – silový kabel, **KT** – tříplášťový silový kabel
4. písmeno – materiál pláště: **A** – hliník, **C** – měděné stínění, **O** – olovo, **Q** – legované olovo, **V** – vodotěsná ochrana pod stíněním, **Y** – měkčený PVC
5. písmeno – obal nad pláštěm: **B** – vinutá protikorozní ochrana z PVC, **D** – pancíř z ocelových drátků, **E** – polyethylen, **P** – pancíř z ocelových pásků, **V** – vlákninový, **Y** – bežešvá (lisovaná) protikorozní ochrana z PVC, **Z** – pancíř z drátků v nemagnetickém provedení

Označení na konci: **s** – speciál se zesíleným Pb pláštěm a pancířem

Značení plastových kabelů:

Číslo – jmenovité napětí v kV (6, 10, 22, 35)

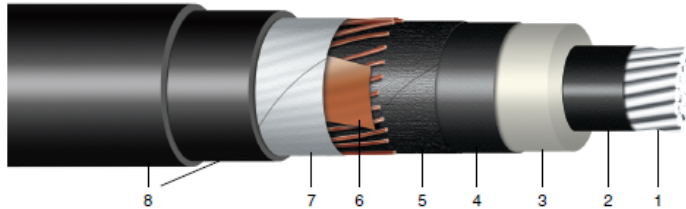
1. písmeno – materiál jádra: **A** – hliník, **AV** – hliník s vodotěsnou ochranou, **C** – měď, **CV** – měď s vodotěsnou ochranou
2. písmeno – materiál izolace: **XE** – zesítený polyethylen
3. písmeno – **K** – silový kabel
4. písmeno – materiál stínění: **C** – měď, **VC** – měď ochranou proti podélnému šíření vody pod pláštěm
5. písmeno – materiál pláště: **E** – polyethylen, **EY** – polyethylen + PVC, **OY** – olovo + PVC, **VE** – polyethylenový plášť s bariérou proti příčnému vniknutí vlhkosti

Příloha B – kabel 22-AXEKVCEY převzato z [13]

22-AXEKVCEY

Silové kabely s izolací ze zesítěného polyetylenu / Power Cables with XLPE Insulation

Odolnost proti podélnému šíření vlhkosti / Lengthwise Water-Blocking System



Konstrukce:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Hliníkové jádro | 6. Stínění měděnými dráty s protispíralou z měděné pásky |
| 2. Vnitřní polovodičivá vrstva | 7. Vodoblokující páska |
| 3. Izolace ze zesítěného polyetylenu | 8. Vnější plášť PE+PVC |
| 4. Vnější polovodičivá vrstva | |
| 5. Polovodičivá vodoblokující páska | |

Construction:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Circular compacted Al-conductor | 6. Cu wire screen and Cu tape counterhelix |
| 2. Inner semiconducting layer | 7. Water-blocking tape |
| 3. XLPE insulation | 8. PE+PVC sheath |
| 4. Outer semiconducting layer | |
| 5. Semiconducting water-blocking tape | |

	Technická specifikace / Standard	TP-KK-008/95
	Jmenovité napětí U _v /U (kV) / Rated voltage	12,7/22
	Zkušební napětí (kV) / Test voltage	50
	Maximální provoz. teplota při zkratu (°C) / Maximal short-circuit temperature	250
	Provozní teplota jádra (°C) / Operating cond. temperature	90

	Min. teplota pokládky / manipulace s kabelem (°C) / Min. temperature for laying / manipulation with cables	-5/-15
	Min. teplota skladování (°C) / Min. storage temperature (°C)	-25
	Barva izolace / Color of insulation	přírodní / natural
	Barva pláště / Color of sheath	černá nebo červená / black or red
	Balení / Packaging	kabelové bubny / cable drums

Použití:

Kabely jsou určeny pro volné uložení ve vzduchu na nosné konstrukce, do země, do tvárcí, do trubek z nemagnetického materiálu. Uložení dle CSN 33 2000-5-52 v prostředí obyčejném i mokřém - voda skapávající, šikmo dopadající, stříkající všemi směry, voda tryskající, přechodné zaplavování.

Application:

Cables are destined for loose installation in the air on supporting structures, in ground, into building blocks and into pipes made of non-magnetic material. Installation shall be done according to CSN 33 2000-5-52 in the ordinary and damp environments - dripping water, water showered on crossways, water spouting in all directions, temporary flooding.

Počet a průřez žil (mm ²)	Tvar jádra	Průměr inf. (mm)	Hmotnost inf. (kg/km)	Poloměr ohybu (mm)	Činný odpor (Ω/km)	Ekvivalentní zkrat. proud (kA)	Časová oteplovací konst. (sec)	Zatížitelnost na vzduchu (A)	Zatížitelnost v zemi (A)	Kapacita (μF/km)	Indukčnost (mH/km)	Obsah Cu/Al (kg/km)
No. of cores (mm ²)	Shape of the conductor	Diameter appr. (mm)	Cable mass appr. (kg/km)	Radius of bend (mm)	Effect. resist. of conductors (Ω/km)	Short circuit current-equiv. (kA)	Time heating constant (sec)	Current carrying cap. in air (A)	Current carrying cap. in ground (A)	Capacity (μF/km)	Inductivity (mH/km)	Content Cu/Al (kg/km)
1x50/16	RMV	35	1 150	700	0,641	4,70 3,20	303 215	181 215	165 187	0,170	0,480 0,640 0,730	157 / 150
1x70/16	RMV	36	1 180	720	0,443	6,58 3,20	382 271	226 268	202 228	0,190	0,450 0,610 0,700	157 / 210
1x95/16	RMV	38	1 330	760	0,320	8,93 3,20	478 340	274 325	241 271	0,210	0,430 0,590 0,670	157 / 285
1x120/16	RMV	39	1 440	780	0,253	11,30 3,20	570 405	317 376	274 306	0,230	0,420 0,580 0,650	157 / 360
1x150/25	RMV	41	1 640	820	0,206	14,10 5,00	694 500	359 423	306 338	0,250	0,400 0,560 0,620	245 / 450
1x185/25	RMV	43	1 840	860	0,164	17,40 5,00	802 581	412 484	347 380	0,270	0,390 0,550 0,610	245 / 555
1x240/25	RMV	45	2 390	900	0,125	28,20 5,00	1 150 847	558 650	452 490	0,320	0,360 0,520 0,560	245 / 900
1x300/25	RMV	45	2 050	900	0,125	22,60 5,00	970 708	486 569	400 437	0,300	0,370 0,530 0,580	245 / 720
1x400/35	RMV	51	2 830	1020	0,078	37,60 7,00	1 520 1 168	647 738	514 541	0,360	0,350 0,500 0,540	343 / 1 200
1x500/35	RMV	53	3 220	1060	0,060	47,00 7,00	1 763 1 379	751 849	585 609	0,400	0,330 0,490 0,520	343 / 1 500

Číselné údaje jsou bez záruky a podléhají změnám bez předchozího oznámení. / Numerical data are not guaranteed, and they are subject to changes without notification.

Vliv na životní prostředí: Výrobek neovlivňuje negativně životní prostředí. / Influence on the environment: The product does not have any negative influence on the environment.

Příloha C převzato z [3]

Tab. A Okrajová plocha poloviny normální křivky $F(x/\sigma)$

	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0,4601722	0,4207403	0,3820886	0,3445783	0,3085375	0,2742531	0,2419637	0,2118554	0,1840601	0,1586553
1	0,1356661	0,1150697	0,0968005	0,0807567	0,0668072	0,0547993	0,0445655	0,0359303	0,0287166	0,0227501
2	0,0178644	0,0139034	0,0107241	0,0081975	0,0062097	0,0046612	0,0034670	0,0025551	0,0018658	0,0013499
3	0,0009676	0,0006871	0,0004834	0,0003369	0,0002326	0,0001591	0,0001078	0,0000723	0,0000481	0,0000317
4	0,207 · 10 ⁻⁴	0,133 · 10 ⁻⁴	0,854 · 10 ⁻⁵	0,541 · 10 ⁻⁵	0,340 · 10 ⁻⁵	0,211 · 10 ⁻⁵	0,130 · 10 ⁻⁵	0,793 · 10 ⁻⁶	0,479 · 10 ⁻⁶	0,287 · 10 ⁻⁶
5	0,170 · 10 ⁻⁶	0,996 · 10 ⁻⁷	0,579 · 10 ⁻⁷	0,333 · 10 ⁻⁷	0,190 · 10 ⁻⁷	0,107 · 10 ⁻⁷	0,599 · 10 ⁻⁸	0,332 · 10 ⁻⁸	0,182 · 10 ⁻⁸	0,987 · 10 ⁻⁹
6	0,530 · 10 ⁻⁹	0,282 · 10 ⁻⁹	0,149 · 10 ⁻⁹	0,777 · 10 ⁻¹⁰	0,402 · 10 ⁻¹⁰	0,206 · 10 ⁻¹⁰	0,104 · 10 ⁻¹⁰	0,523 · 10 ⁻¹¹	0,260 · 10 ⁻¹¹	0,128 · 10 ⁻¹¹
7	0,624 · 10 ⁻¹²	0,301 · 10 ⁻¹²	0,144 · 10 ⁻¹²	0,681 · 10 ⁻¹³	0,319 · 10 ⁻¹³	0,148 · 10 ⁻¹³	0,680 · 10 ⁻¹⁴	0,310 · 10 ⁻¹⁴	0,139 · 10 ⁻¹⁴	0,622 · 10 ⁻¹⁵
8	0,275 · 10 ⁻¹⁵	0,120 · 10 ⁻¹⁵	0,521 · 10 ⁻¹⁶	0,223 · 10 ⁻¹⁶	0,948 · 10 ⁻¹⁷	0,399 · 10 ⁻¹⁷	0,166 · 10 ⁻¹⁷	0,684 · 10 ⁻¹⁸	0,279 · 10 ⁻¹⁸	0,113 · 10 ⁻¹⁸
9	0,452 · 10 ⁻¹⁹	0,179 · 10 ⁻¹⁹	0,702 · 10 ⁻²⁰	0,273 · 10 ⁻²⁰	0,105 · 10 ⁻²⁰	0,400 · 10 ⁻²¹	0,151 · 10 ⁻²¹	0,563 · 10 ⁻²²	0,208 · 10 ⁻²²	0,762 · 10 ⁻²³
10	0,276 · 10 ⁻²³	0,991 · 10 ⁻²⁴	0,352 · 10 ⁻²⁴	0,124 · 10 ⁻²⁴	0,432 · 10 ⁻²⁵	0,149 · 10 ⁻²⁵	0,509 · 10 ⁻²⁶	0,172 · 10 ⁻²⁶	0,576 · 10 ⁻²⁷	0,191 · 10 ⁻²⁷
11	0,627 · 10 ⁻²⁸	0,204 · 10 ⁻²⁸	0,656 · 10 ⁻²⁹	0,209 · 10 ⁻²⁹	0,660 · 10 ⁻³⁰	0,206 · 10 ⁻³⁰	0,637 · 10 ⁻³¹	0,195 · 10 ⁻³¹	0,592 · 10 ⁻³²	0,178 · 10 ⁻³²
12	0,528 · 10 ⁻³³	0,155 · 10 ⁻³³	0,453 · 10 ⁻³⁴	0,131 · 10 ⁻³⁴	0,373 · 10 ⁻³⁵	0,106 · 10 ⁻³⁵	0,296 · 10 ⁻³⁶	0,820 · 10 ⁻³⁷	0,225 · 10 ⁻³⁷	0,612 · 10 ⁻³⁸
13	0,165 · 10 ⁻³⁸	0,439 · 10 ⁻³⁹	0,116 · 10 ⁻³⁹	0,302 · 10 ⁻⁴⁰	0,782 · 10 ⁻⁴¹	0,200 · 10 ⁻⁴¹	0,508 · 10 ⁻⁴²	0,127 · 10 ⁻⁴²	0,317 · 10 ⁻⁴³	0,779 · 10 ⁻⁴⁴
14	0,190 · 10 ⁻⁴⁴	0,458 · 10 ⁻⁴⁵	0,109 · 10 ⁻⁴⁵	0,259 · 10 ⁻⁴⁶	0,606 · 10 ⁻⁴⁷	0,140 · 10 ⁻⁴⁷	0,322 · 10 ⁻⁴⁸	0,732 · 10 ⁻⁴⁹	0,165 · 10 ⁻⁴⁹	0,367 · 10 ⁻⁵⁰
15	0,810 · 10 ⁻⁵¹	0,177 · 10 ⁻⁵¹	0,382 · 10 ⁻⁵²	0,818 · 10 ⁻⁵³	0,173 · 10 ⁻⁵³	0,364 · 10 ⁻⁵⁴	0,756 · 10 ⁻⁵⁵	0,156 · 10 ⁻⁵⁵	0,317 · 10 ⁻⁵⁶	0,639 · 10 ⁻⁵⁷
16	0,128 · 10 ⁻⁵⁷	0,252 · 10 ⁻⁵⁸	0,493 · 10 ⁻⁵⁹	0,956 · 10 ⁻⁶⁰	0,183 · 10 ⁻⁶⁰	0,348 · 10 ⁻⁶¹	0,655 · 10 ⁻⁶²	0,122 · 10 ⁻⁶²	0,225 · 10 ⁻⁶³	0,411 · 10 ⁻⁶⁴
17	0,742 · 10 ⁻⁶⁵	0,133 · 10 ⁻⁶⁵	0,235 · 10 ⁻⁶⁶	0,413 · 10 ⁻⁶⁷	0,716 · 10 ⁻⁶⁸	0,123 · 10 ⁻⁶⁸	0,201 · 10 ⁻⁶⁹	0,353 · 10 ⁻⁷⁰	0,590 · 10 ⁻⁷¹	0,974 · 10 ⁻⁷²

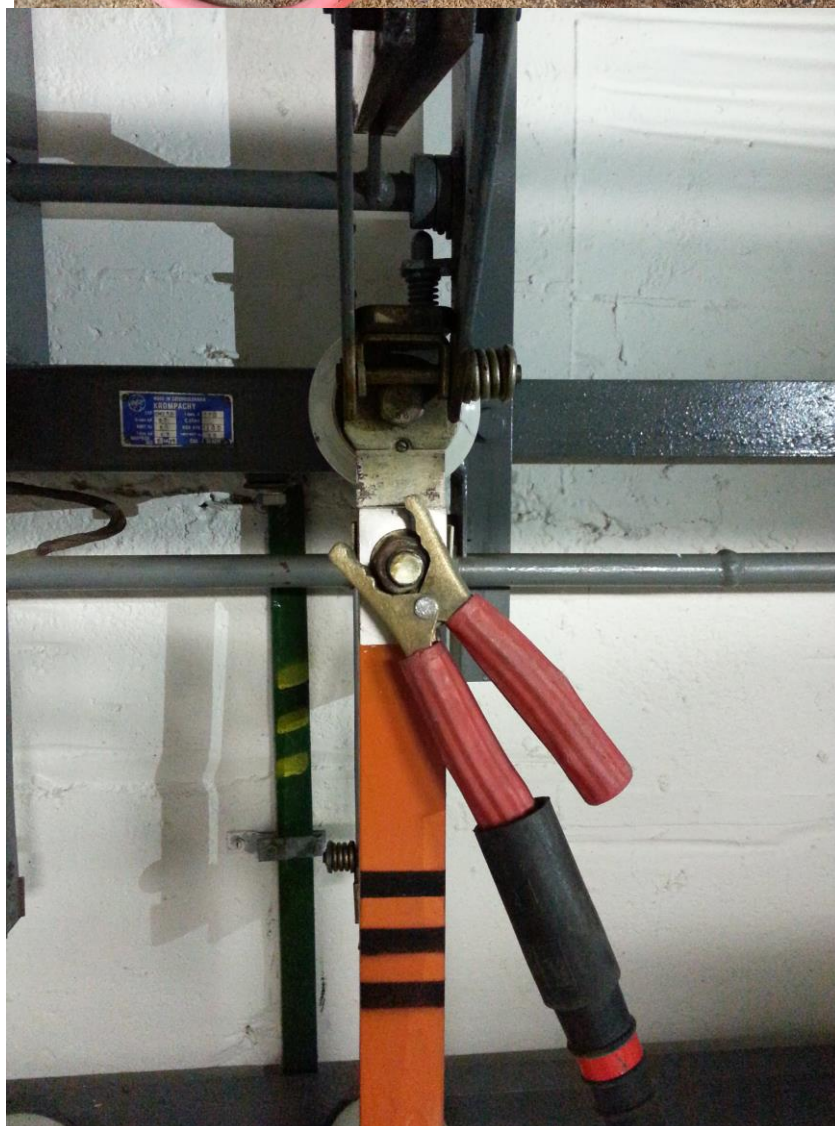
Příloha D – Technická data OWTS M-serie verze 5.0 převzato z [16]

Technická data	
Max. DAC-výstupní napětí	60 kV špička / 42 kV Eff
DAC-Frekvenční rozsah	50 Hz ... 500 Hz
Kapacitní rozsah	0,05 μ F ... 2 μ F
VN-nabíjecí proud	7 mA
Měřicí rozsah ČV	1 pC ... 100 nC
Měření úrovně ČV	podle IEC 60270
Šířka pásma pro vyhledávání ČV	150 kHz ... 45 MHz
Ztrátový činitel $\tan \delta$	0,1 % ... 10 %
Napájecí napětí	110/240 V 50/60 Hz
Příkon	500 VA
Provozní teplota	-10 °C ... + 40 °C
Hmotnost	cca. 80 kg
Rozměry OWTS-přístroje, Serie M	Ø: 600 mm, v: 970 mm
Hmotnost notebooku	cca. 2 kg
Jistič	2 x 4A/250V SLB

Příloha E – fotografie kabelového měřicího vozu PREdistribuce a.s.



Příloha F – Fotografie identifikace postižené fáze a připojení měřících kleští ke klasické koncovce



Příloha G – fotografie z rozboru vadné spojky

