

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika kabelů vysokého napětí**

**Ivo Plaček**

**2012**

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku kabelů vysokého napětí, použitých kabelových koncovek a spojek, specifika použitých materiálů a provádění diagnostických zkoušek na těchto kabelech. Poslední kapitoly práce seznamují čtenáře s typy kabelových poruch a základními metodami jejich vyhledání.

## **Klíčová slova**

Kabely PILC, XLPE. Kabelové soubory, částečný výboj, ztrátový činitel, metoda echometrie, plášťová porucha, vyhledávání kabelové poruchy

## **Abstract**

This bachelor's project is oriented on issues of high voltage cables, connectors and connections, specification of cable materials and diagnostic testing on these cables. The final chapter familiarizes the reader with types of cable problems and the basic methods for finding them.

## **Keywords**

PILC and XLPE cables, partial discharge, dissipation factor, coat breakdown, locate cable breakdown

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Kolíně dne 29.5.2012

Ivo Plaček

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Evě Müllerové, PhD., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Děkuji také svému kolegovi a odbornému konzultantovi ing. Petru Škardovi za předání jeho dlouholetých zkušeností při lokalizaci kabelových poruch a Mgr. Josefu Schwarzovi za jazykovou korekturu textu.

## Obsah

Úvod .....	7
<b>1 Struktura kabelů VN a kabelových souborů .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Kabely s izolací napuštěným papírem.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Kabely s izolací zesílenými polymery.....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Zesílené polymery .....	10
1.2.2 Kabelové soubory .....	11
1.2.3 Kabelové koncovky VN .....	13
<b>2 Metody diagnostiky kabelů.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Diagnostika částečných výbojů.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Účinky částečných výbojů.....	15
2.1.2 Fyzikální podstata šíření impulzu kabelem .....	17
2.1.3 Připojení měřeného kabelu, kalibrace a příklady z praxe .....	17
2.1.4 Slabá místa v kabelech z pohledu vzniku částečných výbojů.....	21
2.1.5 Ukázky příkladů z praxe.....	23
<b>2.2 Zvláštnosti různých typů kabelů .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Kabely s izolací XLPE .....	25
2.2.2 Kabely s papírovou izolací .....	25
2.2.3 Kombinované kabely .....	25
<b>2.3 Měření ztrátového činitele <math>\text{tg } \delta</math> .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 Ztrátový úhel $\delta$ .....	28
2.3.2 Vlastní měření ztrátového činitele .....	31
2.3.3 Vodní stromečky.....	33
<b>2.4 Příklad z praxe .....</b>	<b>34</b>
<b>3 Vyhledávání místa poruchy .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Metody vyhledávání kabelových poruch .....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Určení rozsahu poškození.....	37
3.1.2 Určení místa poruchy.....	37
3.1.3 Princip zobrazení poruchy .....	38
3.1.4 Odraz vlny .....	39
3.1.5 Úprava poruchy .....	40
3.1.6 Vlastní vyhledání poruchy .....	40
3.1.7 Princip rázového generátoru .....	41
3.1.8 Vyhledání kabelové trasy .....	43
<b>Závěr.....</b>	<b>44</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>45</b>
<b>Seznam symbolů .....</b>	<b>46</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>47</b>

## **Úvod**

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku používaných materiálů pro výrobu kabelů vysokého napětí, typy kabelových spojek a koncovek, dále na metody diagnostických zkoušek uvedených kabelů a posouzení možnosti vzniku kabelové poruchy.

Práce přibližuje základní principy těchto diagnostických zkoušek. Závěrem jsou objasněny typy kabelových poruch jak na kabelech pro hladinu nízkého napětí, tak i na kabelech vysokého napětí. Jsou popsány metody vyhledání poruchy a principy těchto metod. V práci jsou uvedeny také příklady z praxe, které dokládají význam provádění diagnostiky na kabelech pro hladinu vysokého napětí.

V příloze je kromě tabulky značení kabelů vysvětlena fyzikální podstata uvedených metod. Jedná se o šíření vlny kabelem a vykreslení místa částečného výboje.

## 1 Struktura kabelů VN a kabelových souborů

V distribuční soustavě a průmyslových rozvodech se pro hladinu vysokého napětí používají dva druhy kabelů. Starší typ označovaný PILC (kabel, jehož izolace je provedena napuštěným papírem, *Obr. 1*) a dnes používaný kabel s izolací zesíťovanými polymery označovaný XLPE (*Obr. 2*).



*Obr. 1* Kabel PILC (ANKTOYPV)



*Obr. 2* Kabel XLPE v řezu

### 1.1 Kabely s izolací napuštěným papírem

Do devadesátých let minulého století se pokládal kabel označovaný **ANKTOYPV** (*Obr. 1*). Jádrem kabelu je z hliníku (**A**), který je obalen napuštěným papírem (**N**); jedná se o kabel (**K**) se samostatně opláštěnými žilami (**T**) olovem (**O**) se souvislým bezešvým obalem z PVC (**Y**) s pancířem ze dvou pásek včetně polštáře s asfaltovou polevou (**P**), vše je kryto vláknitým asfaltovým obalem (**V**). (Tabulka vysvětlující značení kabelů je uvedena v příloze.)

Na výrobu kabelů pro vysoká napětí nebylo možno pro izolační vrstvy využít tehdy používané PVC, proto se používal napuštěný papír v několika vrstvách prokládaný tenkými děrovanými hliníkovými pásky pro rozložení elektrického pole. Toto řešení však není ideální z důvodu možného „přibalení vzduchu“ a vzniku částečných výbojů. Také muselo být zajištěno, aby byl papír neustále nasáknut, proto se začal používat systém tzv. dolévacích koncovek, kterými je kabel na obou koncích opatřen (*Obr. 3*), a to po předchozích negativních



zkušenostech s epoxidovými koncovkami (**Obr. 4**), u kterých docházelo k poruchám těsně pod těmito koncovkami vlivem vysušení izolačního papíru a jeho průrazem.

S velkou pečlivostí muselo být provedeno i spojení kabelů, jednak z důvodů správného rozložení elektrického pole, jednak z důvodů kvalitní izolace.

Spojka byla uložena v litinovém loži po předchozím spojení jednotlivých žil lisovacími trubičkami z hliníku, omotání (doplnění chybějící izolace napuštěným papírem a hliníkovými pásky), zaletování do olověné rakvičky a doplnění uzemnění. Celek byl po sešroubování litinového lože zalit asfaltem.

Postupem doby se začalo používat zesítného polyetylenu, který nahradil nepraktickou izolaci napuštěným papírem, a zjednodušilo se i provedení kabelové spojky.



**Obr. 3** Dolévací koncovka



**Obr. 4** Epoxidová koncovka

## **1.2 Kabely s izolací zesítnými polymery**

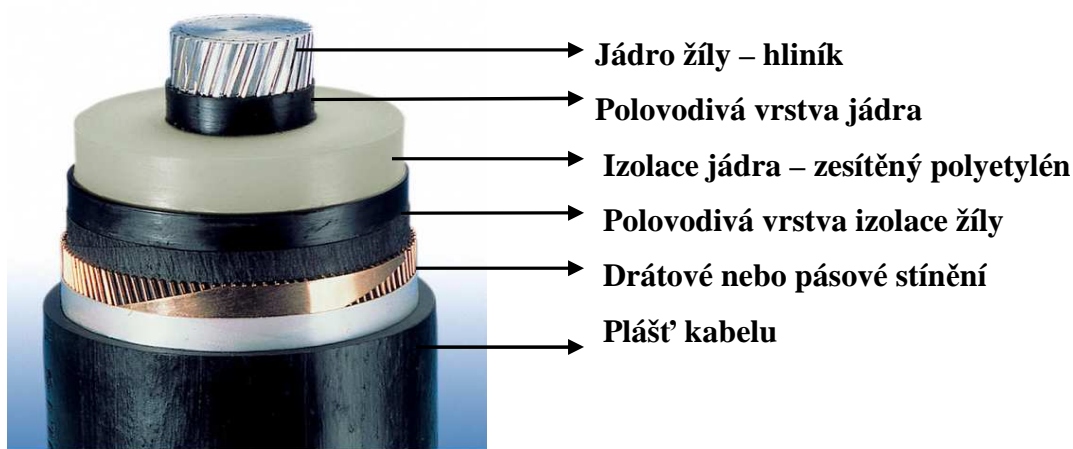
V devadesátých letech minulého století začaly být v československé distribuční soustavě kabely s papírovou izolací vytlačovány kabely s izolací provedenou zesítným

polyetylénem (**Obr. 5**) **AXEKCY** a **AXEVCE** (první kabel AXEKCY byl zkušebně položen již v roce 1970). Slabinou tehdy byly malé zkušenosti se spojováním a také nedostatek kvalitních kabelových koncovek. Dnes se používají převážně dva typy: 1) koncovky smrštitelné za tepla, kdy ke smrštění materiálu dojde po ohřátí horkovzdušnou pistolí nebo plynovým hořákem, a 2) koncovky smrštitelné za studena, kdy se celek nasune na připravené ukončení kabelu s nalisovaným kabelovým okem a zajistí se vytažením rozpěrného materiálu (**Obr. 6b, 6c**).

### 1.2.1 Zesítené polymery

Zesítených polymerů se využívá k výrobě izolace vn kabelů pro lepší mechanické a elektrické vlastnosti než vykazují termoplastické polymery, případně kaučuky. Zesíťování spočívá ve vytvoření nevratných příčných vazeb mezi polymerickými řetězci, kdy vznikne uspořádání podobné síti. Proto se nazývají zesítenými. Zesíťování se provádí chemickou přeměnou vnitřního uspořádání molekul. Změna je trvalá a významně zlepšuje mechanické vlastnosti polymeru i jeho stálost, elektrické vlastnosti a chemickou odolnost

Svoje mechanické a elektrické vlastnosti si zachovávají i při krátkodobém působení vysokých teplot. Podle údajů výrobce kabelů, je odolnost zesíteného polyetylénu krátkodobě až 250°C . Běžná odolnost uloženého kabelu v zemi je 90°C. Maximální hraniční teplotou je podle katalogových listů 130°C [1]



**Obr. 5** Kabel VN s izolací jádra tvořenou zesítenými polymery. Zdroj: Katalog ABB [2]

### 1.2.2 Kabelové soubory

Kabelovými soubory rozumíme kabelové spojky a koncovky (*Obr. 6, 7*). Z pohledu vzniku poruchy představují nejslabší článek kabelového vedení. Bezporuchovost kabelu proto z největší části závisí na kvalitně provedených koncovkách a spojkách. Dříve, když se používaly kabely s izolací napuštěným papírem, byla i kabelová spojka řešena pomocí napuštěného papíru, olova a litinového lože. To je však již minulost. Dnes se používají soupravy pro kabelové spojky (*Obr. 6a*), jejichž montáž je několikanásobně rychlejší a výsledné spojení podstatně kvalitnější, i když méně ochráněno před vnějšími vlivy prostředí. Existuje celá řada provedení kabelových souborů. Někteří výrobci se zaměřují na armatury smršťitelné za studena, ovšem po zkušenostech a výsledcích diagnostických zkoušek se jeví jako optimální teplem smršťitelné armatury, neboť při precizním provedení dojde k dokonalějšímu vypuzení vzduchových bublinek, které mohou být zdrojem vzniku částečných výbojů. Samozřejmě lze spekulovat o problémech způsobených tepelným namáháním při smršťování za tepla, i tak lze však konstatovat, že teplem smršťitelné koncovky (při kvalitním provedení) nevykazují částečné výboje. U smršťitelných armatur za studena byly v cca 20 % případů částečné výboje zjištěny.



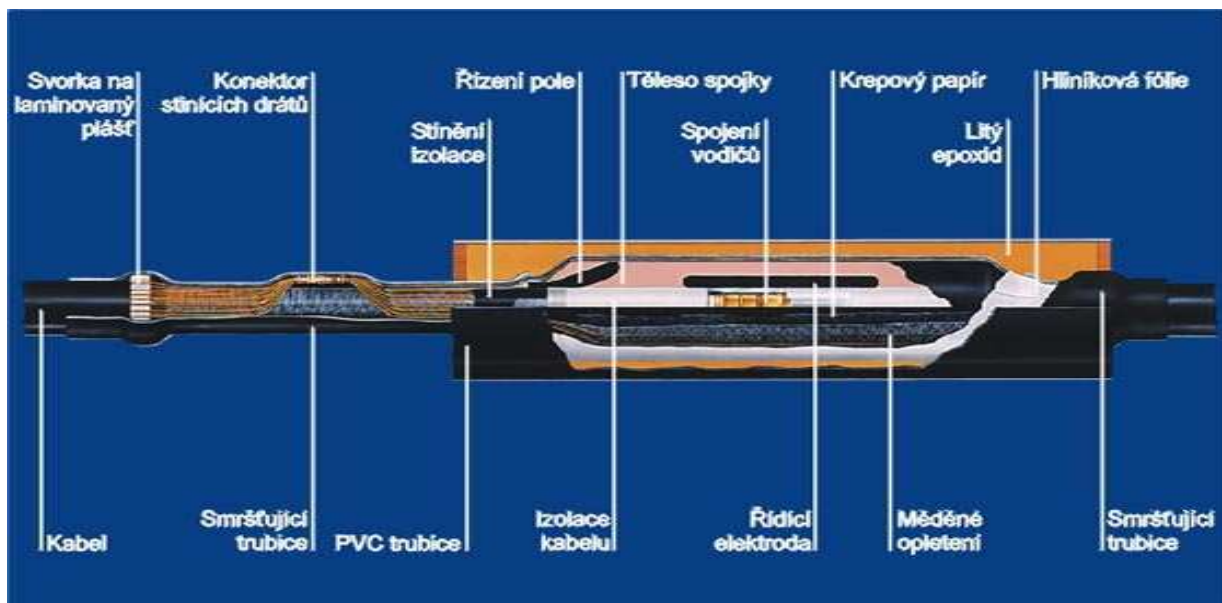
*Obr. 6a* Souprava pro kabelovou spojku teplem smršťitelná



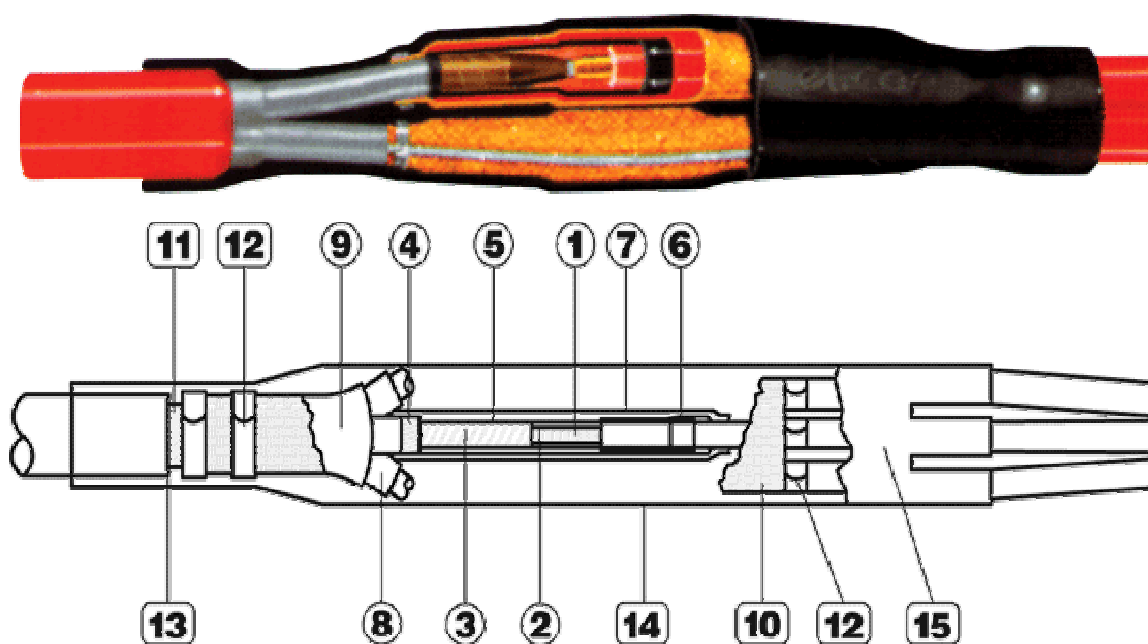
*Obr. 6b* Kabelová koncovka teplem smršťitelná



*Obr. 6c* Kabelová koncovka smršťitelná za studena



Obr. 7a Řez kabelovou spojkou pro kabel vn s izolací XLPE

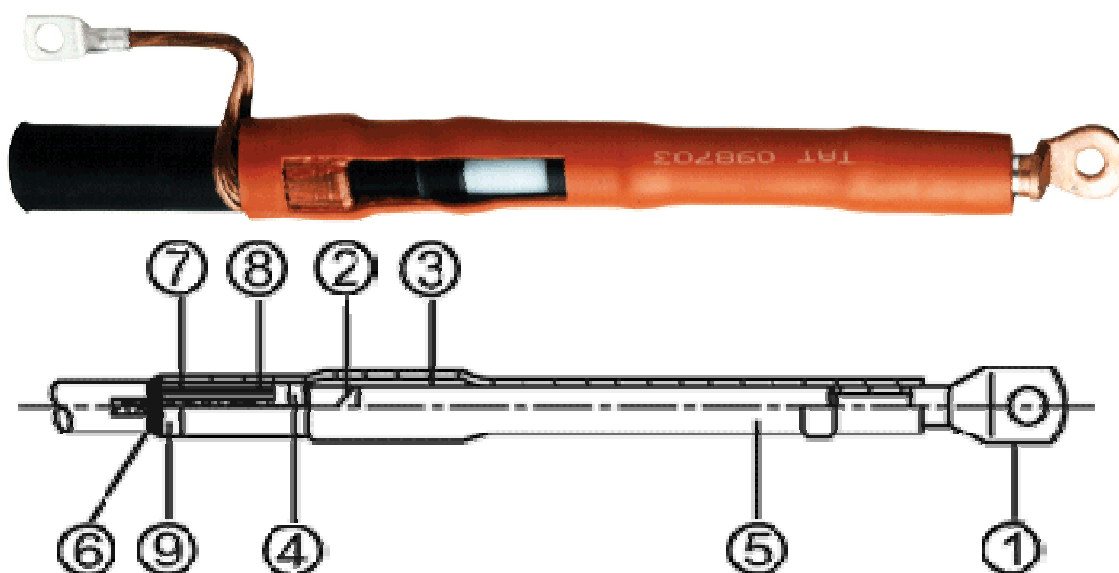


1) Lisovací spojka žil, 2) polovodivá papírová páska, 3) průsvitná smršťovací trubička, 4) polovodivá smršťovací trubička, 5) výplňová polovodivá páska na řízení potenciálu, 6) smršťovací trubička na řízení potenciálu, 7) izolační a polovodivá smršťovací trubička, 8) smršťovací trubička zaručující vodotěsnost spojů žil, 9) polovodivá třívývodová smršťovací rozdělovací hlava, 10) měděná páska, 11) výplňová směs, 12) uzemňovací pružina, 13) páska PVC, 14) smršťovací trubička silnostěnná na izolaci spojky, 15) třívývodová smršťovací rozdělovací hlava na utěsnění rozvětvení žil jednožilových kabelů.

Obr. 7b Kabelová přechodová spojka (např. mezi ANKTOYPPV a AXEKCY) Zdroj: katalog výrobků Tracon Elektrik [3]

### 1.2.3 Kabelové koncovky VN

Po přiblížení technologie a použitých materiálů pro kabelové spojky nesmíme opomenout na kabelové koncovky (*Obr. 3, 4, 6, 8*), které jsou na rozdíl od kabelových spojek důležité pouze pro kabely VN. Jde zejména o řízení elektrického pole kabelu zakončeného kabelovým okem. Dříve, pro kabely izolované napuštěným papírem (např. uvedený ANKTOYPV), se používaly koncovky suché – většinou epoxidové, což nebylo optimální, protože kabel postupně vysychal. Bylo proto potřeba zajistit doplňování kabelové hmoty do izolace, což vyřešily skleněné dolévací koncovky. Po nástupu kabelů s izolací zesíťným polyetylénem přišly i nové technologie kabelových koncovek. Samozřejmě i u těchto koncovek existuje několik výrobců a technologií a již zmíněný spor mezi technologiemi za tepla smršťitelnými a za studena (*Obr. 6b, 6c*).



1) Lisovací silnoproudé kabelové oko, 2) výplňová polovodiivá páska na řízení potenciálu, 3) smršťovací trubička na řízení potenciálu, 4) výplňová směs, 5) smršťovací trubička na izolaci koncovky odolná vůči plazivým proudům, 6) páska PVC, 7) měděná polovodiivá páska, 8) měděná síťka, 9) uzemňovací pružina, 10) lisovací kabelové oko ke stínění.

*Obr. 8* Kabelová koncovka v řezu. Zdroj: katalog výrobků Tracon Elektrik [3]

Z uvedených důvodů je zřejmé, že cílem bezporuchového provozu kabelové sítě je správná pokládka kabelu, aby byl eliminován vznik plášťové poruchy (podrobněji v kapitole měření ztrátového činitele), dále kvalitní provedení veškerých spojek a koncovek kabelu s vyloučením přibalení vzduchových bublinek při spojování. Je nutné také dbát na správné

rozložení elektrického pole a na předepsaný rádius ohybu kabelu v odbočeních a zaústění do transformačních stanic.

Pro zjištění stavu kabelu, který je uváděn do provozu, případně po poruše, byly na základě dlouholetých zkušeností vyvinuty diagnostické metody na odhalení možných nedostatků při montáži nebo vzniklých při provozu kabelu.

Používají se v podstatě tři metody diagnostických zkoušek, které dokáží odhalit počínající i závažné defekty na kabelech. Jedná se o diagnostiku částečných výbojů, měření ztrátového činitele a plášťovou zkoušku. Jednotlivé metody si rozebereme podrobněji v dalších kapitolách.



## 2 Metody diagnostiky kabelů

### 2.1 Diagnostika částečných výbojů

Částečné výboje jsou definovány jako místní elektrické výboje, které pouze částečně zkratují izolační systém mezi elektrodami o určitém potenciálu.

Částečné výboje mohou vznikat buď přímo v izolaci vodičů (částečné výboje v izolaci), mezi izolací a vodičem (štěrbina mezi vodičem a izolací) nebo na povrchu izolace (klouzavé výboje po povrchu, koróna apod.).

Částečné výboje vyvolávají postupné zhoršování kvality izolačního systému, a tím snižují jeho elektrickou pevnost. Globálním měřením částečných výbojů lze odhadnout celkový stupeň znehodnocení izolace izolačního systému, příp. i druh výbojové činnosti. [4]

Částečné výboje lze rozdělit na: [4]

- **Vnější částečné výboje – externí.** Jedná se o částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení – doutnavé výboje, korónové výboje, Trichelovy impulzy atd.
- **Vnitřní částečné výboje – inertní.** Jedná se o částečné výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem. Například v pevném dielektriku jde o výboje v plynných dutinkách.
- **Povrchové částečné výboje.** Jsou to částečné výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Příkladem jsou klouzavé výboje.

#### 2.1.1 Účinky částečných výbojů

Účinky částečných výbojů dělíme na **elektrické, erozivní, chemické a tepelné.** [4]

**Elektrické účinky** – Dojde-li v dutince dielektrika ke vzniku oblouku, s vysokou pravděpodobností se vytvoří vodivá dráha. Pokud intenzita elektrického pole nabývá vysokých hodnot, může koncentrace elektrického pole způsobit v tomto místě čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může šířit dielektrikem.

**Erozivní účinky** – Dochází k erozi stěn dutinky v dielektriku vlivem bombardování stěn dutinky ionty a elektrony. Důsledkem je postupné zvětšování dutinky a při pokračující erozi dojde k průrazu dielektrika.

**Chemické účinky** – Pokud dutinky obsahují kyslík, vytváří výboj v dutince ozón, který má silné oxidační účinky. Chemickou destrukci dielektrika mohou způsobit i produkty rozkladu některých izolantů při výbojích. Produkty rozkladu mohou difundovat do pevného dielektrika, a snižovat tak elektrickou pevnost.

**Tepelné účinky** – Příмым důsledkem částečných výbojů může být tepelná nestabilita, protože opakovaným působením částečných výbojů se dielektrikum otepluje a klesá hladina napětí tepelného průrazu.

Diagnostika částečných výbojů je metoda nedestruktivní a slouží k vyhodnocení parametrů izolace. Úroveň výbojů při laboratorních testech činí několik pC. Při měření v terénu je důležitější lokalizace zdroje částečných výbojů, úroveň hraje menší roli. Proto pracujeme s rozdílnými a poměrně vysokými úrovněmi. Úroveň stačí definovat s řádovou přesností, protože impuls se během šíření kabelem tlumí a naměřená úroveň závisí na vzdálenostech zdroje výboje a měřicího přístroje. Při lokalizaci je důležitá doba mezi prvním a druhým naměřeným impulzem. Jak již bylo zmíněno, nejčastěji se zdroj výboje nachází v kabelových souborech. Výboje v samotném kabelu XLPE jsou vzácností a bývají převážně způsobeny mechanickým poškozením či dutinami vzniklými tzv. vodními stromečky. Jiná je ale situace u kabelů izolovaných impregnovaným papírem. Z důvodů provedení kabelu (vrstvení papíru) dochází k částečným výbojům do izolace a v některých případech bývá zjištěno rozprostření výbojů po celé délce kabelu. To je způsobeno vznikáním a zanikáním dutin v izolaci, což je zapříčiněno teplotní roztažností a viskozitou kabelové hmoty, jíž je papír impregnován. Zde je ve srovnání s plastovými kabely vyhodnocení stavu mnohem obtížnější. Abychom zjistili případný defekt (výboje podstatně vyšší úrovně než výboje na pozadí), je nutné zaznamenat mnoho impulzů. [5]



### 2.1.2 Fyzikální podstata šíření impulzu kabelem

Měření a lokalizace částečných výbojů je založeno na principu echometrie. To znamená, že při vyhodnocování se využívá toho, že impulzy částečných výbojů vznikající v kabelové trase se šíří jako putující vlny a mohou být zaměřeny na koncích kabelové trasy. Na základě rozdílného časového průběhu impulzu může být posouzena vzdálenost závadových míst (*Obr. 12*).

*Obr. 10–12* znázorňují zobrazení místa částečného výboje v kabelové trase. Jednalo se o kombinovaný kabel 22 kV typu ANKTOYPV a AXEKVCE spojený hybridní spojkou o celkové délce 1099 m. Během diagnostiky byl zatížen sinusovým napětím o hodnotě  $1,5 U_0$  s frekvencí 0,1 Hz. Částečný výboj byl lokalizován ve zmíněné kabelové spojce.

Šíření vlny bude podrobně vysvětleno v kapitole vyhledávání kabelové poruchy. Jedná se o šíření vlny v daném prostředí, odraz této vlny na konci kabelu, popřípadě v místě přerušování či zkratu na testovaném kabelu. Vyhledávání kabelových poruch, ale i diagnostikování místa vzniku částečného výboje spočívá ve využití zákonitostí šíření vln a využití vlnové funkce. Fyzikální podstata místa vzniku částečného výboje je taktéž podrobně vysvětlena v příloze.

### 2.1.3 Připojení měřeného kabelu, kalibrace a příklady z praxe

Pro správné provedení diagnostických zkoušek je zapotřebí odstavit měřený kabel z provozu, tj. vypnout jej řádně vybitý zbytkový náboj, neboť je třeba mít na zřeteli, že kabel je v podstatě kondenzátor a po vypnutí zůstává nabitý. Z tohoto důvodu musíme zajistit zkratování měřeného kabelu po oboustranném vypnutí zkratovací soupravou a poté kabel odpojíme od přístrojů VN. Problém může nastat v moderních, zapouzďených rozvaděčích nových konstrukcí, kde je vlastní vypínací zařízení naplněno fluoridem sírovým ( $SF_6$ ), a vlastní odpojení měřeného kabelu je zde velmi problematické. V těchto případech se používají speciální nástavce, které se našroubují do odzátkovaného konektoru (*Obr. 9a*). Na druhý konec kabelu, který jsme taktéž odpojili, je vhodné nasadit polokulovité koncovky, abychom eliminovali ostré hrany kabelových ok. Po splnění uvedených podmínek, zajištění pracoviště a splnění všech stanovených bezpečnostních opatření (pracuje se v blízkosti vysokého napětí a vysoké napětí se používá i při samotné diagnostice) přistoupíme k vlastnímu propojení

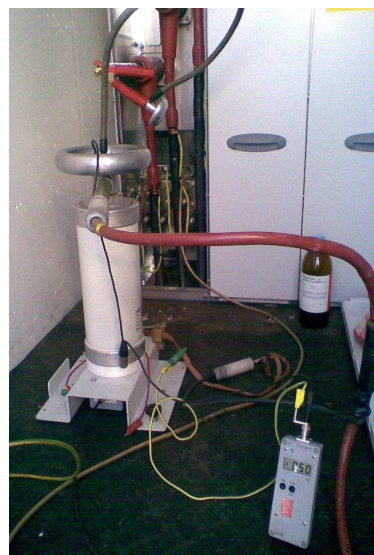
měřeného kabelu s měřicím systémem. Kabel je diagnostikován po jednotlivých fázích, nejprve je nutno provést kalibraci. Po propojení kabelu s měřicím systémem přes odrušovací filtr (slouží k odfiltrování rušivých signálů, čímž umožňuje velmi citlivé a přesné provedení měření částečných výbojů) a vazební kondenzátor se provede kalibrace připojením kalibrátoru (**Obr. 9c**).



**Obr. 9a** Nástavce pro zapouzdrnění rozvaděče



**Obr. 9b** Připojení vazebního kondenzátoru



**Obr. 9c** Připojení vazebního kondenzátoru a kalibrace

Kalibrátor vytvoří přesně definovaný pulz, který se šíří kabelem. Jde vlastně o uměle vytvořený částečný výboj o námi nastaveném náboji. Za optimálních podmínek je při nastavování hodnoty náboje vhodné řídit se délkou kabelu, bohužel někdy se stane, že kvůli blízkým zdrojům elektromagnetického rušení (silné vysílače apod.) není možné nastavit nízké hodnoty náboje (např. 0,5 nC při kabelu do 500 m) a musíme volit vyšší hodnotu. Z těchto důvodů je vřazen zmíněný odrušovací filtr při měření částečných výbojů.

Vazební kondenzátor je vlastně kapacitní dělič, který je nezbytný pro propojení s počítačem měřicího zařízení koaxiálním kabelem, abychom mohli sledovat odrazy v měřeném kabelu napájeném vysokým napětím.

Po spuštění ovládacího software, výběru typu měření a vyplnění hlavičky budoucího protokolu spustíme vlastní kalibraci. Objeví se začátek kabelu, průběh kabelu s případnými změnami impedance (spojky a jiné změny) a vzdálený konec (**Obr. 10**). Zde je na místě poznamenat, že je třeba nastavit šíření, tj. rychlost, jakou se vlna šíří kabelem. Nastavujeme poloviční hodnotu šíření  $v/2$ . Rychlost šíření v kabelech je u typů s papírovou izolací cca

$150\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , u XLPE  $170\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost nastavujeme v mikrosekundách. Na nastavení rychlosti šíření závisí přesnost určení délky kabelu a vzdálenosti případného výboje. Po provedení kalibrace lze přikročit k vlastnímu měření. Je nutné odpojit kalibrátor od vazebního kondenzátoru. (došlo by k jeho zničení vysokým napětím).

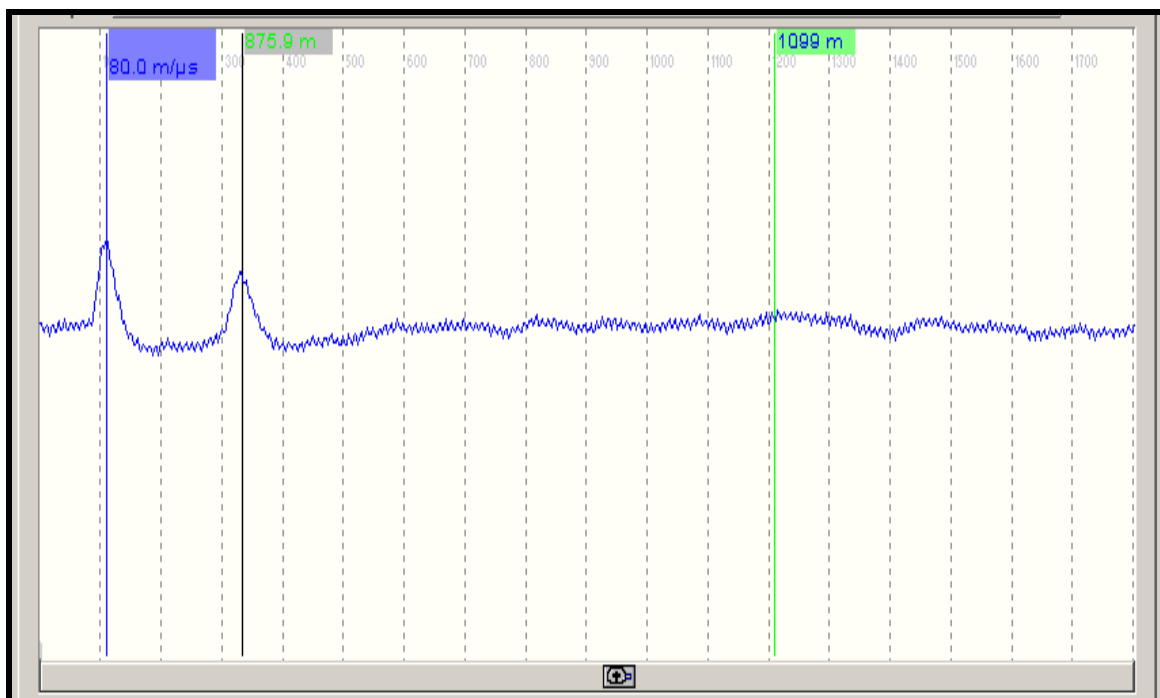


**Obr. 10** Zobrazení průběhu při kalibraci

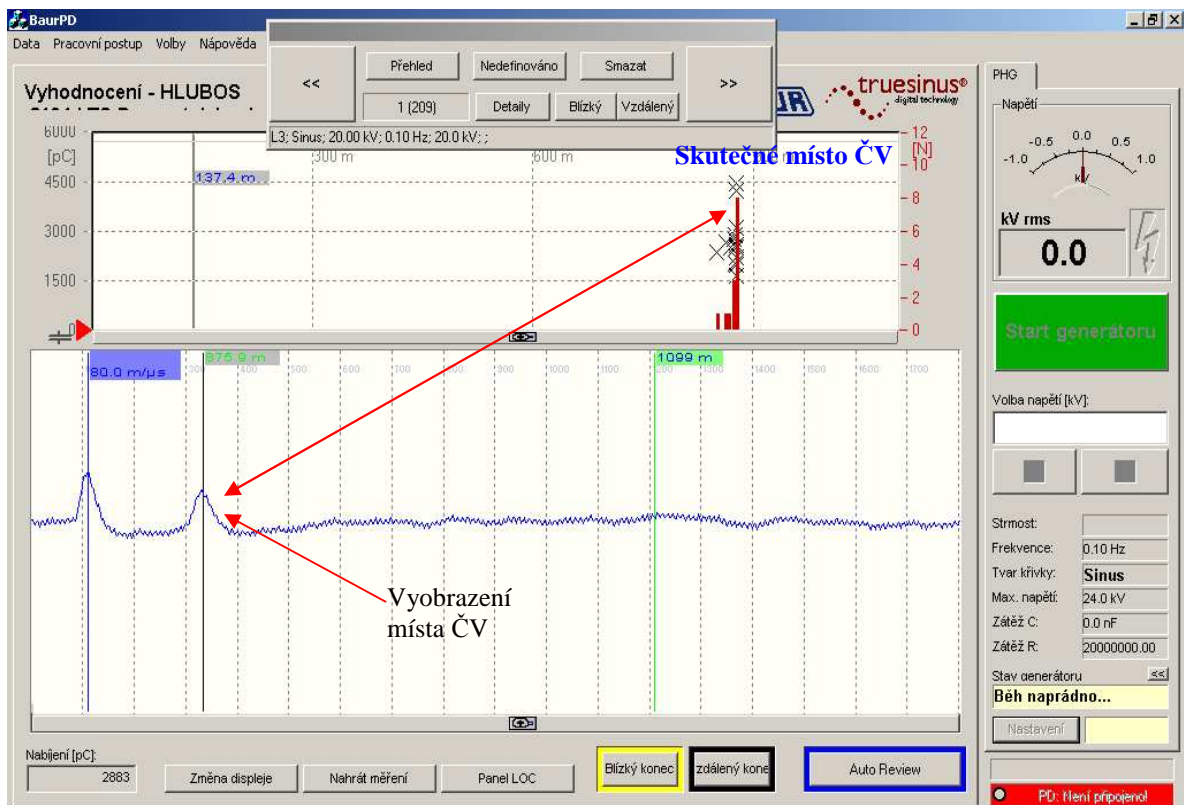
Následně spustíme generátor vysokého napětí, které pomalu zvyšujeme až na hodnotu  $2U_0$ . (Např. při diagnostice kabelu na napěťovou hladinu 22 kV je hodnota  $U_0$  12 kV a její dvojnásobná hodnota tedy 24 kV.) Používáme zdroj sinusového průběhu o frekvenci 0,1 Hz, což je výhodné zejména při následném měření ztrátového činitele. Při najetí kabelu napětím 1 kV dojde k vypočtení kapacity kabelu a hodnoty svodového odporu pracovní izolace. Tyto hodnoty jsou důležité také při měření ztrátového úhlu – viz podrobně v následující kapitole věnované měření ztrátového činitele. Můžeme nastavit hodnotu napětí od 1 kV do 24 kV – při nastavení měření pro napěťovou hladinu 22 kV.

Pokud v trase kabelu vznikne částečný výboj, vidíme tento na monitoru. Je třeba mít na paměti, že skutečné místo výboje je obráceno oproti zobrazení (viz detailní rozbor vzniku ČV v příloze). Na obrázku (**Obr. 11**) vidíme zobrazení částečného výboje, někdy se však stane, že

částečný výboj po chvíli zanikne. Proto je důležité nastavit záznam více událostí, a to i několika desítek či stovek. Částečný výboj může zaniknout zalitím dutinek v izolaci vlivem teplotní expanze izolační hmoty. Toto zaniknutí částečného výboje se vyskytuje převážně v kabelech s papírovou izolací. Samozalévání dutinek je víceméně neškodné, dalo by se uvažovat pouze o vlivu lokálního ohřevu, ovšem v případě zániku částečného výboje dojde i k okamžitému poklesu teploty v daném místě.



**Obr. 11** Zobrazení částečného výboje



Obr. 12 Vyhodnocení místa vzniku částečného výboje

#### 2.1.4 Slabá místa v kabelech z pohledu vzniku částečných výbojů

Proč vlastně měřit částečné výboje u kabelů pro vysoká napětí? Částečný výboj je nebezpečný tím, že místo, kde výboj vzniká, je tepelně namáháno, protože produktem výboje je teplo. Toto lokální oteplování má z dlouhodobého pohledu za následek degradaci okolního materiálu a následný průraz. Musíme si uvědomit, že kabel je provozován vysokým napětím a okolo vlastního vodiče je poměrně silné elektrické pole. Proto jakékoliv poškození izolace vede k průrazu a okamžitému zemnímu spojení, což má za následek nedodávku energie pro velkou oblast. Konkrétně pro tu část zástavby, která je připojena na sekundární část transformační stanice, jež je napájena ohroženým kabelem.

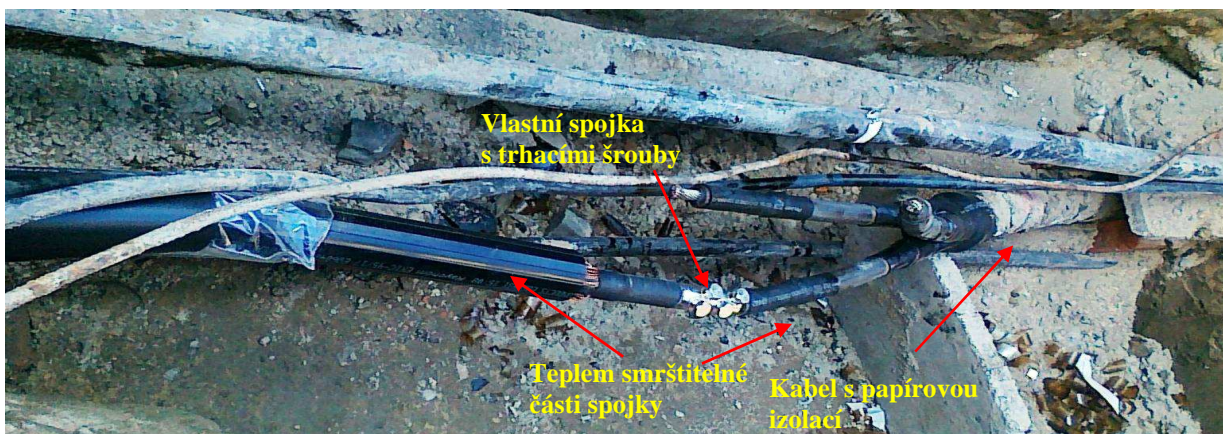
Nelze jednoduše říct, že potenciálním nebezpečím je pouze stáří kabelu, popřípadě starší typ s izolací napuštěným papírem. Při diagnostických zkouškách bylo zjištěno, že naopak mnoho kabelů s papírovou izolací vyrobených v šedesátých letech vykazuje i po mnoha letech výborné vlastnosti; samozřejmě záleží na terénu, kde je kabel uložen, a dalších faktorech. Velmi často jsou zjištěny částečné výboje v tzv. hybridních spojkách (viz Obr. 7b a



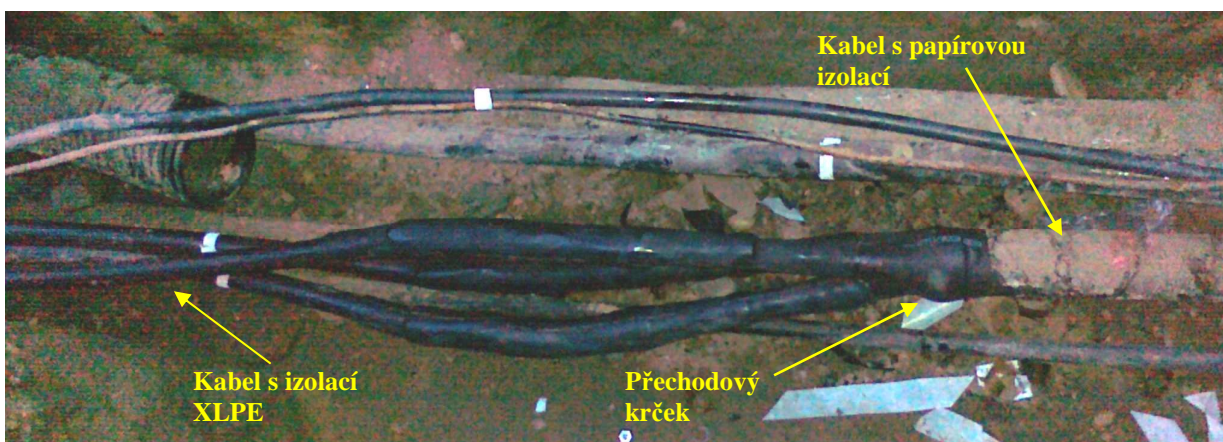
**Obr. 12).** Tyto spojky jsou dnes často používány při opravách starších kabelů s papírovou izolací po poruchách, spojování kabelu s izolací XLPE a PILC (zde není jiná možnost) a také se hybridní spojky používají při vřazování nových transformačních stanic s moderními zapouzdřenými rozvaděči do kabelových úseků s papírovou izolací.

U těchto spojek bývají dvě slabá místa, a to krček a trubičková spojka s trhacími šrouby (viz **Obr. 13**). Při montáži spojky je nutné bezpodmínečně zajistit montáž v suchém a čistém prostředí a striktně dodržet montážní postup. Jakékoliv opomenutí některé z montážních součástí vede k brzkému průrazu spojky, což bylo několikrát zjištěno rozborem spojky po poruše, a navíc velmi často dochází k tomu, že vzniklým tepelným jevem dojde i k poškození spojky vedlejší fáze (**Obr. 28**).

Problém vzniku částečných výbojů se samozřejmě týká i spojek na kabelech XLPE a starých typů na kabelech PILC.



**Obr. 13a** Rozpracovaná hybridní spojka



**Obr. 13b** Hotová hybridní spojka

### 2.1.5 Ukázky příkladů z praxe

Dva následující příklady ukazují nejčastější případy vzniku částečných výbojů u kabelů VN. Jak bylo zmíněno, výboje se v 99 % případů vyskytují v kabelových armaturách. První případ ukazuje poškození kabelové koncovky (*Obr. 14*), kdy pravděpodobně vlivem nedostatečného prohřátí smršťitelné trubičky zůstala vzduchová kapsa okolo kabelového oka. Zároveň byla zjištěna trhlinka na této koncovce pod kabelovým okem. Povrchový výboj má za následek výrazné tepelné namáhání materiálu koncovky. Pokud by tato závada nebyla odstraněna, v krátké době by došlo k postupnému znehodnocení izolačních vlastností materiálu koncovky a následnému vzniku oblouku mezi kabelovým okem a stíněním kabelu, což vede k vytvoření zemního spojení a zahoření koncovky. Důsledkem je silné poškození této kabelové části a výpadek s následnou nedodávkou na příslušné lince VN.



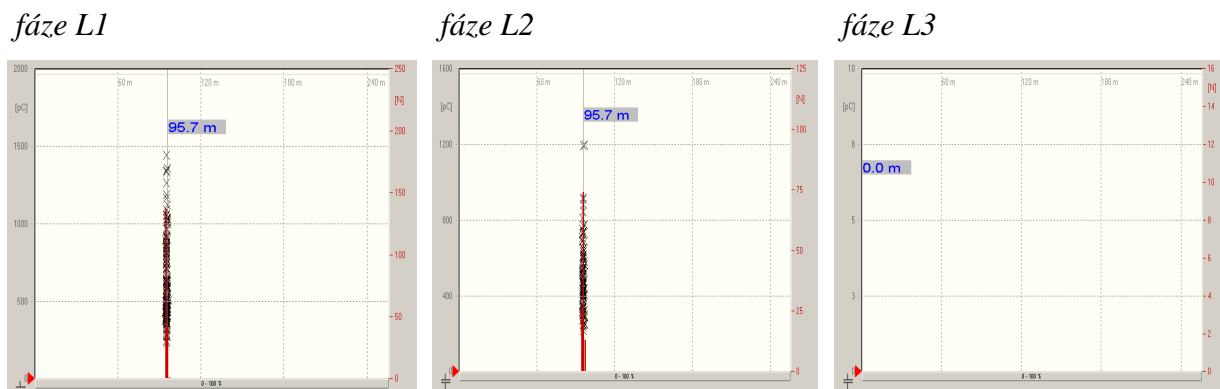
Zde si můžeme povšimnout výrazného klouzavého povrchového výboje s korónou. V tomto případě se projevila výhoda použití zdroje o frekvenci 0,1 Hz. Při běžném provozu kabelu bylo slyšitelné pouze neurčité slabé sršení. Při najetí kabelu napětím o frekvenci 0,1 Hz vidíme i výraznou korónu, jelikož změna polarity trvá 5 s.

*Obr. 14 Povrchový výboj na koncovce*

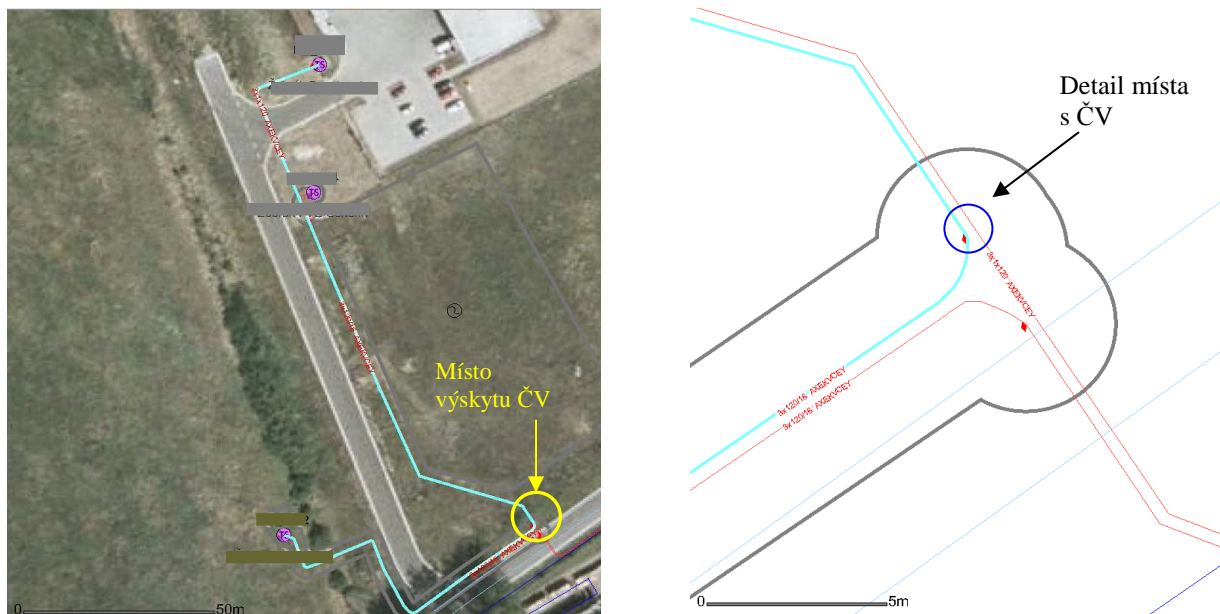
Druhým nejčastějším místem vzniku částečných výbojů jsou již zmíněné kabelové spojky. V tomto případě byl měřen kabel nově uváděný do provozu. Kabel byl v provedení s izolací XLPE o délce 256 m se dvěma spojovacími místy. Ve fázi L1 a L2 byl zjištěn výrazný výskyt částečných výbojů. Kabel byl na základě měření opraven a následně zjištěna chybná montáž kabelové spojky. Opět by vlivem nedokonalého rozložení elektrického pole a

následného tepelného namáhání došlo k degradaci izolačního materiálu s následným průrazem armatury s výpadkem příslušného vedení vlivem zemního spojení.

Zde vidíme i výhody kvalitní dokumentace kabelových vedení v terénu, kdy lze naměřená místa porovnat se skutečnou trasou kabelu, a tak okamžitě posoudit např. náročnost výkopových prací.



Obr. 15 Výstupní grafy měření částečných výbojů



Obr. 16 Vyobrazení trasy kabelu s vyznačením místa zjištěných částečných výbojů



## **2.2 Zvláštnosti různých typů kabelů**

### **2.2.1 Kabely s izolací XLPE**

Zmínili jsme se o dvou používaných typech kabelů – s papírovou izolací a s izolací XLPE. Zde je potřeba brát v úvahu, že spojky kabelů s izolací XLPE se vyznačují menším činitelem odrazu, ale tlumení kabelu je velmi malé. Proto má smysl měření kabelů do délky 5000 m, je-li třeba vyhledat místa s poškozenými spojkami, kde dochází ke vzniku částečných výbojů vysoko nad normální hladinou intenzity rušení. U takových kabelových délek samozřejmě nelze spolehlivě určit částečný výboj v trase kabelu, např. dutinový výboj v místě vzniklého vodního stromečku (problematika vodních stromečků je vysvětlena v kapitole o měření ztrátového činitele) o intenzitě několika málo pC. Stejně tak problematické bude měření kabelu o délce okolo 30 m, kde zase dochází k zakmitávání mnohočetnými odrazy vlny. Proto tyto kritické délky nejsou fyzikálně měřitelné.

Vzhledem k vysoce kvalitní izolaci u kabelů XLPE je třeba věnovat pozornost každému měřitelnému částečnému výboji, i když nemá okamžitý vliv na provozuschopnost kabelu. Mějme na paměti, že každý takový přesně lokalizovaný výboj vždy povede v blízké budoucnosti k výraznému poškození izolace až k následnému průrazu.

### **2.2.2 Kabely s papírovou izolací**

Kabely s papírovou izolací se díky vrstvě smíšeného dielektrika ve srovnání s kabely s izolací XLPE vyznačují mnohem vyšším tlumením a také nižší rychlostí šíření signálu (60–80 m/μs). Pro kalibraci proto použijeme úroveň v rozsahu 1000–5000 pC. Silné tlumení vede k tomu, že citlivost měření je ve srovnání s citlivostí kabelů s izolací XLPE stejné délky podstatně nižší. Na druhou stranu je třeba poznamenat, že úroveň částečných výbojů u kabelů s papírovou izolací je relativně vysoká, což z fyzikálního hlediska umožňuje měření kabelů do délky až 3000 m.

### **2.2.3 Kombinované kabely**

Z uvedených informací pro jednotlivé typy izolací vyplývá, že měření na kombinovaných kabelech (kterých je v rozvodné síti značné množství) přináší jisté obtíže. Různý útlum a nesterjná rychlost šíření vyžaduje na těchto kabelech větší pečlivost při diagnostice. Je dobré mít o měřeném kabelu informace a vědět, v jakém poměru je kabel

složen, a to zejména z důvodů vyhodnocení případného částečného výboje vznikuvšího na části XLPE. Lehce se může stát, že vlivem zatlumení bude tento výboj malé intenzity, a proto bude při vyhodnocení považován z pohledu měřítek pro kabely s papírovou izolací za bezpředmětný.

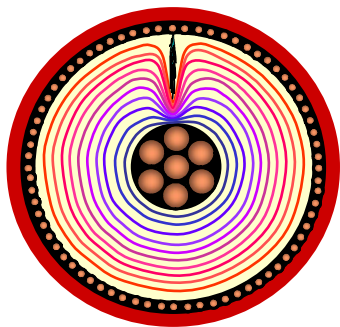


## 2.3 Měření ztrátového činitele $\tan \delta$

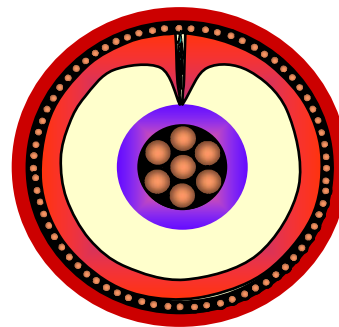
V naší distribuční soustavě jsou nejčastěji používané kabely pro napětíovou hladinu 22 kV, v průmyslových objektech se setkáme s kabely pro napětí 6 kV a ve velkých městech i pro napětí 100 kV. Protože na kvalitě kabelů závisí spolehlivost dodávky elektrické energie, u energetických společností se stalo běžným standardem provádět diagnostiku provozovaných i do provozu uváděných kabelů.

Po mnoho let se při stanovení kvality silových kabelů používaly stejnosměrné napětíové zkušební zdroje, kde měřítkem kvality zkoušeného kabelu byl měřený stejnosměrný činný svodový proud. Použijeme-li však stejnosměrnou napětíovou zkoušku na polymerické kabely, které jsou určeny pro provoz na střídavých systémech 50 Hz, můžeme odhalit přinejlepším hrubé defekty a naopak můžeme způsobit výpadek nevhodným elektrickým namáháním izolace kabelu. Bylo dokázáno, že stejnosměrné napětíové zkoušky silových kabelů z polymerů mohou vyvolat v pevném dielektriku polymerů prostorový náboj, který může nesmazatelně ovlivnit životnost silového kabelu (viz **Obr. 17**). Z těchto důvodů se dnes užívá střídavých zdrojů o nízké frekvenci.

Elektrické pole během testu



Zbytkový prostorový náboj po testu



**Obr. 17** Zkoušky kabelu stejnosměrným napětím [7]

Z pohledu diagnostiky je kabel v pořádku, nejsou-li zjištěny částečné výboje (viz předchozí kapitola). Tyto se mohou vyskytovat v kabelových souborech (spojky) a poměrně často i ve starších typech kabelů s pracovní izolací provedenou napuštěným papírem.

Druhým ukazatelem je měření ztrátového úhlu  $\text{tg } \delta$ . Právě na měření ztrátového úhlu se podíváme podrobněji v této kapitole.

### 2.3.1 Ztrátový úhel $\delta$

Izolace kabelu přirozeně stárne. V případě zesítného polyetylénu v důsledku tzv. vodních stromečků a u papírové izolace tepelným namáháním nebo pronikáním vlhkosti do izolace. Stárnutí izolace znamená omezení izolačních schopností, snížení izolačního odporu a následně zvětšení ztrátového úhlu  $\delta$ , neboli ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  [5]. Měřený kabel si můžeme představit jako reálný koaxiální kondenzátor. Protože ideální kondenzátor by měl dokonalé dielektrikum, což však není možné, musíme uvažovat kapacitu kabelu  $C$  a paralelní izolační odpor  $R_{iz}$ , který odpovídá ztrátám v izolaci. Delší kabel má větší kapacitu  $C$  a menší izolační odpor  $R_{iz}$ . Ztrátový úhel  $\delta$  je tedy vlastně matematický rozdíl fázového posunu napětí a proudu na ideálním kondenzátoru, což je  $90^\circ$ , a změnou fázového posunu na reálném kondenzátoru s paralelním izolačním odporem (viz **Obr. 18**). Ztrátový činitel je potom tangenta tohoto úhlu  $\delta$  a lze jej vyjádřit vztahem:  $\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega CR}$ , kde  $\omega = 2\pi f$  a vyjadřuje

úhlovou rychlost,  $C$  kapacitu a  $R$  svodový odpor. Z rovnice vyplývá závislost na frekvenci. Se snižující se frekvencí zkušebního napětí hodnota ztrátového činitele roste, proto se pro toto měření používá napětí o frekvenci 0,1 Hz. Užitím této nízké frekvence se podstatně usnadňuje měření ztrátového činitele.

Ztrátový činitel vyjadřuje poměr mezi odporovou a kapacitní složkou impedance kondenzátoru. Proto je ztrátový činitel zvlášť důležitý, pracuje-li kondenzátor (kabel) v obvodu střídavého proudu. Ztráty vznikající v kondenzátoru způsobují jeho ohřev, který může vést při vysokých frekvencích až k destrukci při vysokých ztrátách.

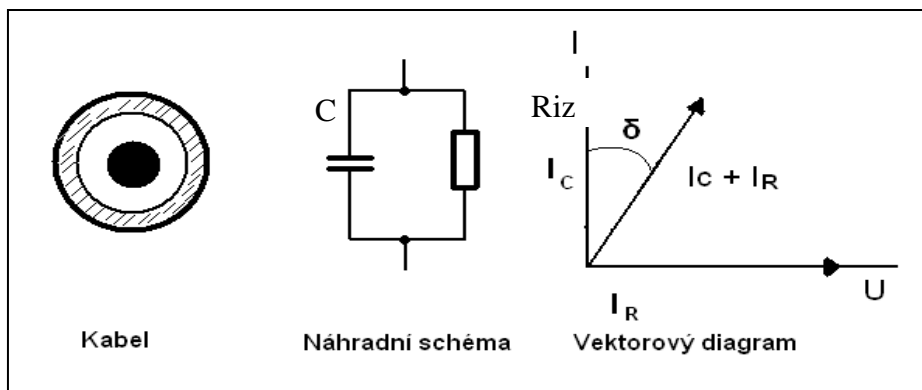
Izolační odpor klesá se vzrůstající teplotou, proto je také důležitá hodnota jmenovitého napětí. Jmenovité napětí vyjadřuje maximální stejnosměrné napětí, maximální velikost efektivní hodnoty střídavého napětí nebo amplitudu napětíových impulzů, při kterých může kondenzátor trvale pracovat v rozsahu pracovních teplot. Při použití v obvodu střídavého napětí může vzniknout vnitřní tepelný efekt vlivem proudu, který prochází přes vnitřní odpory kondenzátoru. Na ekvivalentním ztrátovém odporu bude ztrátový výkon:  $P_D = U_{ef}^2 \cdot 2\pi f C \cdot \text{tg } \delta$

Z uvedeného plyne, že kromě závislosti ztrátového úhlu na frekvenci je důležitá i závislost na napětí. Zvýšíme-li frekvenci, hodnota střídavého napětí musí být snížena, aby nedošlo ke kritickému zvýšení ohřevu s následnou destrukcí. [13]

Na **Obr. 21** si můžeme u měřeného kabelu povšimnout dočasně klesající hodnoty ztrátového činitele se zvyšujícím se napětím. To je právě způsobeno ztrátovým výkonem v místě sníženého izolačního stavu. Vidíme, že dochází ke zmenšování ztrátového úhlu vlivem lokálního ohřevu v místě sníženého izolačního stavu a vysušování trhlinek v dielektriku dochází k dočasnému zmenšení úhlu  $\delta$ . Tento jev je vždy nezvratným důkazem přítomnosti vodních stromečků, případně jiných závažných defektů vedoucích k brzké destrukci dielektrika, neboť tento ohřev vede k výraznému snížení izolačního odporu.

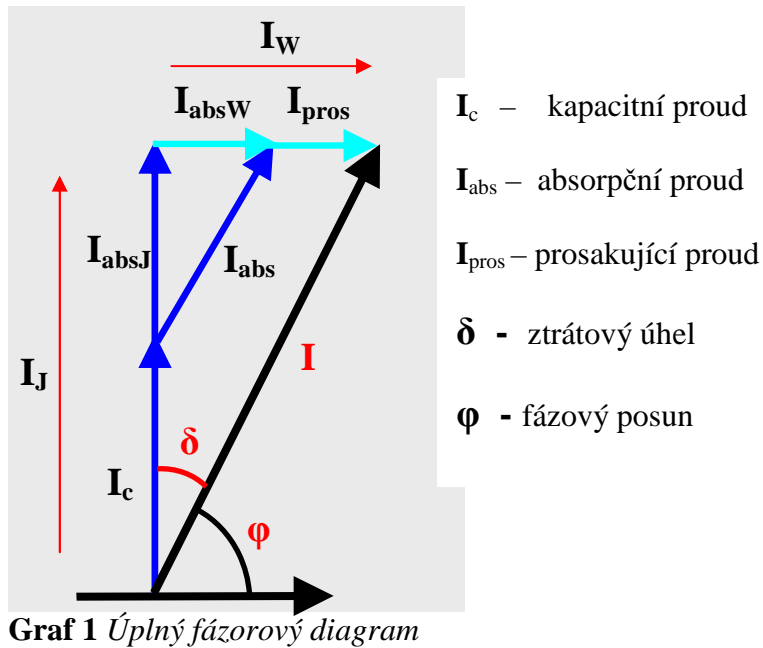
Napětíová závislost nabývá na významu také při přepětíových stavech, kdy napětíové impulzy s rychlou změnou vyvolávají značný impulzní proud, který lze vyjádřit rovnicí:

$$I_p = C \cdot \frac{dU}{dt}$$



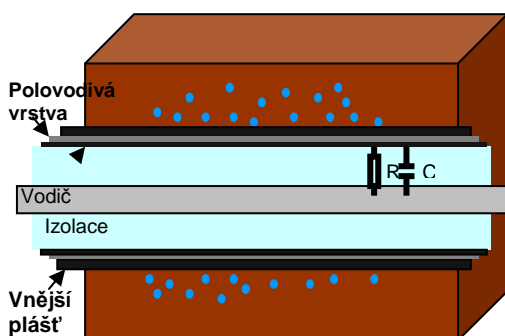
**Obr. 18** Znárodnění kabelu, jeho náhradní schéma a vektorový diagram [6]

Je zřejmé, že pro objektivní měření je ideální – stejně jako v případě měření částečných výbojů – měřený kabel odpojit od přístrojů VN. I tak zůstávají na měřeném kabelu koncovky, případně spojky, kterými jsou jednotlivé části kabelu spojovány do výsledné délky. Samostatnou kapitolou jsou zmiňované hybridní spojky, které nejsou zrovna šťastným řešením a lze je označit za nejslabší místo kabelu.

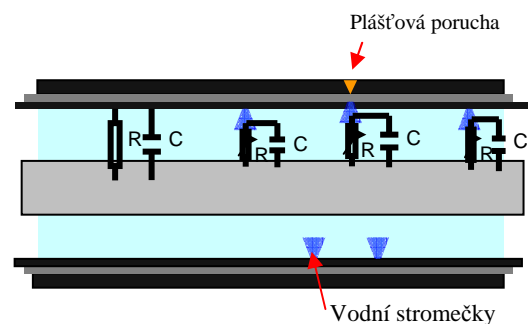


Jak bylo uvedeno, ztrátový úhel je tím větší, čím menší je izolační odpor. Izolační odpor u kabelů s papírovou, impregnovanou izolací je většinou zmenšen vlivem stárnutí a degradace impregnačního oleje a také vlivem dlouhodobého tepelného namáhání.

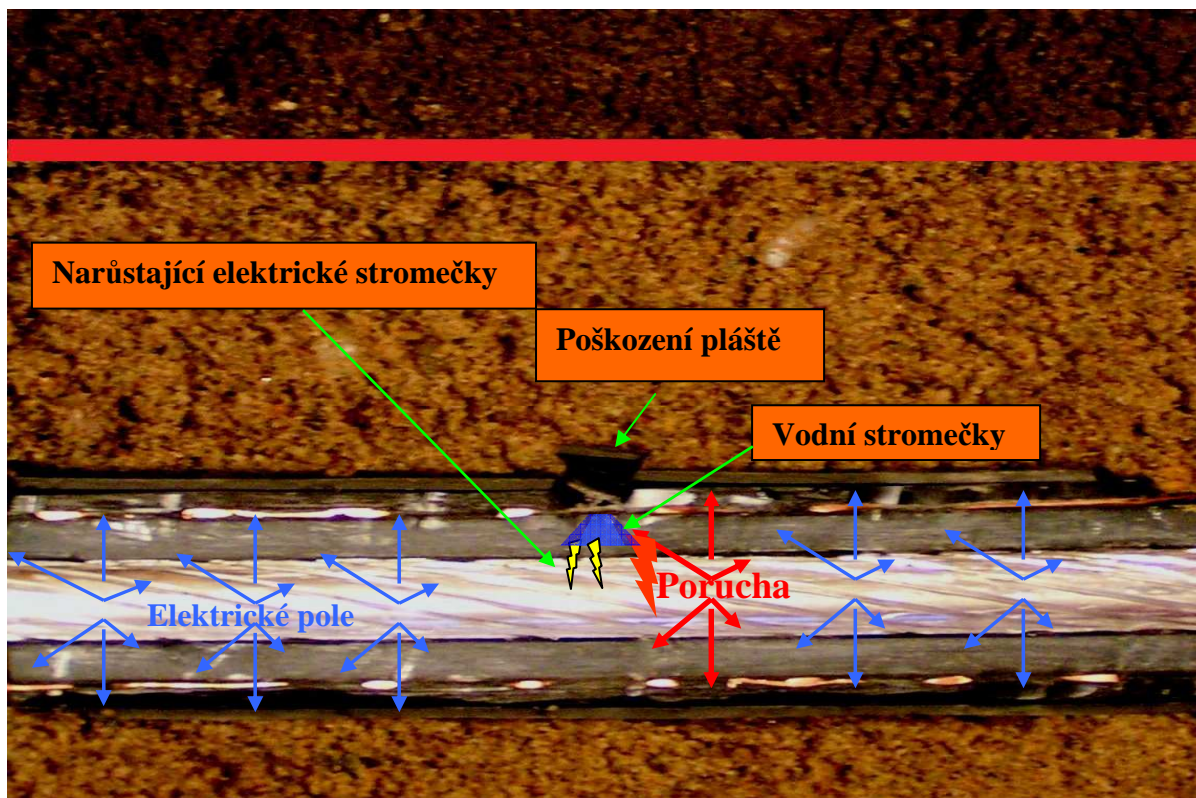
U kabelů XLPE je tento odpor snížen většinou přítomností tzv. vodních stromečků, které se nejčastěji vytvoří po poškození pláště kabelu a vniknutím vlhkosti až k pracovní izolaci (viz **Obr. 19**). Z těchto důvodů je velice důležité provádět plášťové zkoušky nově pokládaných kabelů a používat dvouplášťové kabely.



**Obr. 19a** Řez kabelem uloženým v zemi



**Obr. 19b** Znáznornění vodních stromečků



Obr. 19c Princip vzniku poruchy kabelu

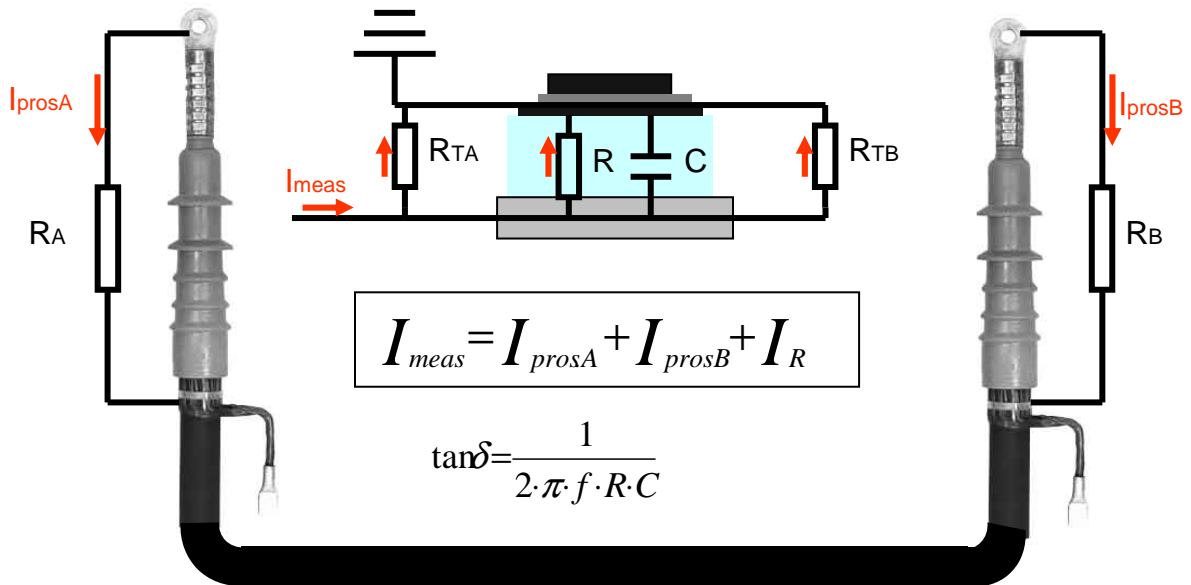
### 2.3.2 Vlastní měření ztrátového činitele

Výrobou techniky zabývající se diagnostikou kabelů VN se zabývá stále více firem. České energetické společnosti používají převážně systémy rakouské firmy Baur a německé firmy Seba. Měřicí soustava pro měření ztrátového činitele se skládá ze zdroje vysokého napětí o přesné frekvenci 0,1 Hz, vyhodnocovací jednotky, kde dochází k měření kapacity, odporu, fázového posunu a výpočtu tangenty ztrátového úhlu a příslušného software, který zajišťuje možnost nastavení testovacího napětí, počet kroků měření, vypočtení střední hodnoty, vykreslení grafu a dle zadaných parametrů tisk protokolu s celkovým hodnocením zkoušeného kabelu. Celý měřicí systém bývá vestavěn do měřicího vozu.

Měření probíhá ve třech krocích po osmi měřeních. Začíná se na hodnotě testovacího napětí  $U_0$ , po změření osmi vzorků se průměr z těchto hodnot se střední odchylkou uloží a pokračuje měření testovacím napětím  $1,5U_0$ . Hodnoty se opět uloží a následuje měření napětím  $2U_0$ . Po ukončení měření se provede vyhodnocení, podle kterého lze ihned posoudit stav kabelu.

Stanovené limity pro jednotlivé typy kabelů udává tabulka **Tab. 1**. V zásadě jde o to, aby hodnota prudce nenarůstala se zvyšujícím se napětím. Dalším ukazatelem

problematického stavu kabelu je náhlý pokles hodnot při  $2U_0$ . Tento stav svědčí o vlhkosti v kabelu nebo kabelových souborech, zejména v koncovkách, a o jejich vysušování jak již bylo v předchozím textu zmíněno.



Obr. 20 Princip měření ztrátového činitele [7]

Pro různé typy kabelů byly stanoveny mezní hodnoty naměřeného ztrátového činitele a pro správné vyhodnocení je vhodné kabel odpojit od spínacích přístrojů a svodičů přepětí. To je u kratších kabelů naprosto nezbytné, jelikož s délkou narůstá i kapacita a výsledná hodnota je potom méně ovlivněna odpory součástí spínacích prvků.

Tab. 1a Hodnocení stavu podle naměřených hodnot

<b>Kabel s izolací zesíťovaným polyetylénem <i>XLPE</i></b>	$\text{tg } \delta (2xU_0) < 6$ $\text{tg } \delta (2xU_0)-(U_0) < 1$	<b><i>Kabel je provozuschopný</i></b>
	$\text{tg } \delta (2xU_0) > 6 < 8$ $\text{tg } \delta (2xU_0)-(U_0) > 1 < 1,5$	<b><i>Mírné zhoršení stavu</i></b>
	$\text{tg } \delta (2xU_0) > 8$ $\text{tg } \delta (2xU_0)-(U_0) > 2$	<b><i>Riziko provozní poruchy</i></b>

Tab. 1b Hodnocení stavu podle naměřených hodnot



<b>Kabel s izolací impregnovaným papírem <i>PILC</i></b>	$\text{tg } \delta (2xU_0) < 20$ $\text{tg } \delta (2xU_0)-(U_0) < 4$	<b><i>Kabel je provozuschopný</i></b>
	$\text{tg } \delta(2xU_0) > 20 < 25$ $\text{tg } \delta (2xU_0)-(U_0) > 5 < 7$	<b><i>Mírné zhoršení stavu</i></b>
	$\text{tg } \delta (2xU_0) > 30$ $\text{tg } \delta (2xU_0)-(U_0) > 15$	<b><i>Riziko provozní poruchy</i></b>

Hodnoty  $\text{tg } \delta$  uvedené v tabulkách jsou vyjadřovány celočíselně, ve skutečnosti jsou tyto hodnoty násobeny  $10^{-3}$ . Hodnota napětí není uvedena, záleží na napěťové hladině, na kterou je měřený kabel provozován, zda na 6, 10, 22, 35 kV. Vidíme, že významnou roli hraje diference mezi jednotlivými napěťovými kroky měření. Ideální je, když se hodnota ztrátového činitele s nárůstem napětí nemění.

### 2.3.3 Vodní stromečky

Vodními stromečky označujeme útvary stromečkovitého tvaru v izolacích XLPE, sestávající z vodou naplněných mikrodutinek, které jsou obvykle propojeny velmi jemnými kanálky. Bez zvětšení a obarvení vzorku řezu jsou vodní stromečky prakticky nepozorovatelné.

Vodní stromečky vznikají jen při současném působení následujících faktorů:

- a) nehomogenity v izolaci
- b) působení vody
- c) působení elektrického pole

Je proto nutné i během skladování a přepravy kabelu zajistit obnažené konce kabelu čepičkami, protože vlhkost proniká do kabelu i slaněným jádrem. Před uvedením nového kabelu do provozu je pak třeba provedení zkoušky na celistvost pláště. [8]

## 2.4 Příklad z praxe

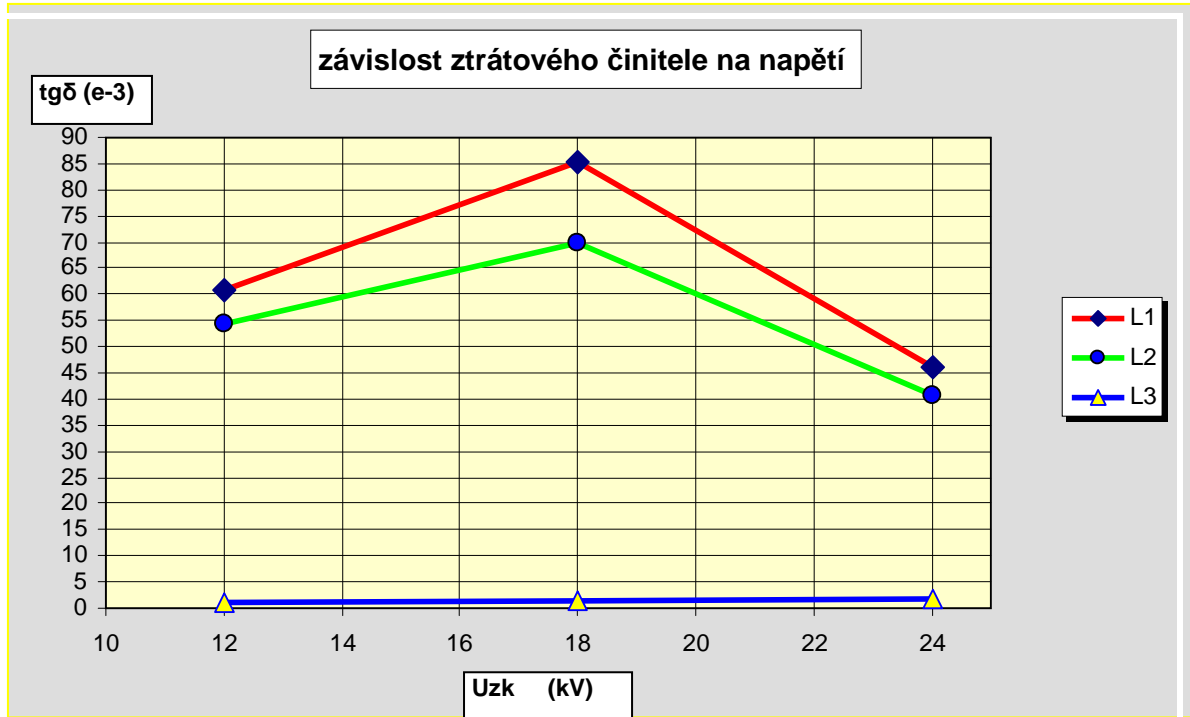
Po objasnění teorie se blíže podíváme na praktické měření ztrátového činitele. Vybral jsem měření, které odhalilo silné poškození pracovní izolace. Kabel byl následně odstaven z provozu a částečně vyměněn. Jednalo se kabel AXEVCE z venkovního vedení do rozvaděče ve spínací stanici, určený pro napěťovou hladinu 22 kV s průřezem 120 mm<sup>2</sup>.

Každá fáze měřeného kabelu byla postupně testována střídavým napětím 12 kV/0,1 Hz v osmi krocích. Po každé periodě byla vyhodnocena hodnota  $\text{tg } \delta$  a stanovena střední hodnota (viz **Tab. 2**). Následovalo testování napětím 18 kV/0,1 Hz a nakonec napětím 24 kV/0,1 Hz. Naměřené hodnoty byly pro přehlednost graficky znázorněny pro vyhodnocení.

Po připojení měřicího zařízení byla zjištěna délka kabelu 609 m, změřena kapacita 64,2 nF a izolační odpor při 1 kV pouze 84 M $\Omega$ . Obvyklá hodnota pro kabel XLPE je okolo 180 M $\Omega$ . Tato hodnota při zvyšování napětí kolísala a dostávala se až ke kritickým hodnotám 5 M $\Omega$ .

**Tab. 2** Naměřené hodnoty  $\text{tg } \delta$  v jednotlivých fázích při vzrůstajícím napětí

Označení fáze	Krok měření	Napětí (kV)	Průměrná hodnota $\text{tg } \delta$	Odchylka ( $e^{-3}$ )	Počet měření
L1	1	12	60,850	1,272	8
L1	2	18	85,367	10,009	8
L1	3	24	46,152	1,453	8
L2	1	12	54,291	3,401	8
L2	2	18	70,003	7,394	8
L2	3	24	40,733	1,604	8
L3	1	12	1,057	0,006	8
L3	2	18	1,532	0,013	8
L3	3	24	1,905	0,026	8



**Obr. 21** Grafické znázornění měnící se hodnoty  $\text{tg } \delta$  se zvyšujícím se napětím

Měřený kabel byl vyhodnocen jako kabel s vysokým rizikem provozní poruchy a bylo doporučeno provedení plášťové zkoušky, kdy se testuje celistvost vnější ochranné izolace. Tato zkouška prokázala značné poškození pláště v místě vstupu kabelu do kabelové vany pod rozvaděčem. Kabel byl odkopán a byly vyměněny postižené fáze (L1 a L2) v délce 30 m. Odříznutý kus byl podroben důkladnému rozboru (viz **Obr. 22**), kdy bylo zjištěno vzlínání vlhkosti až ke kabelovému oku.



Přítomnost vlhkosti až u kabelového oka (2 m od poškození kabelu)

**Obr. 22** Poškozený kabel

### 3 Vyhledávání místa poruchy

V dnešní době si již jen málokdo umí představit život bez elektrické energie. Většinou si vůbec neuvědomujeme, jak je pro náš současný způsob života důležitá stabilní dodávka elektřiny. Vždyť se dnes bez ní obejde již jen nepatrný díl lidské činnosti. Naše okolí je doslova protkáno elektrickým vedením a také elektrickými kabely. Při poškození venkovního vedení je lokalizace poškozeného místa většinou snadná a lze zjistit pohledem. Jiná situace však nastane, dojde-li k poruše na kabelovém vedení. Kabelové vedení je i přes několikanásobně vyšší pořizovací náklady naprosto nezbytné, ať již z pohledu bezpečnosti (těžko si lze představit v hustě obydleném sídlišti změt' vedení o vysokém napětí), nebo z důvodů estetických; samozřejmě také musíme brát v potaz větší odolnost před vnějšími vlivy (nehrozí poškození poryvy větru – pokácené sloupy, stromy ve vedení atd.).

I na kabelovém vedení však může dojít k poruše v důsledku zkratu na venkovním vedení a vlivem šířícího se zkratového proudu občas dojde k průrazu ve slabém místě kabelu.

V případě vzniku kabelové poruchy a zajištění dodávky náhradním způsobem (z jiného vedení, provizorním kabelem, elektrocentrálou) je třeba místo s poruchou lokalizovat pro následnou opravu, protože není možné měnit kabel o délce i několika set metrů na rušné ulici jen pro lokální poškození.

Kabelové poruchy můžeme rozdělit na *vysokoohmové* a *nízkoohmové*. U vysokoohmových poruch je vzájemný odpor mezi jednotlivými fázemi, případně fází a zemí vysoký – stovky kiloohmů, které vzniknou v případě kabelů provozovaných nízkým napětím většinou poškozením izolace, např. při výkopových pracích, špatném uložení (propíchnutí izolace ostrým kamenem), popřípadě vlivem dlouhodobého tepelného účinku svodových proudů, např. ve starých spojkách. U těchto poruch dojde buďto k postupné přeměně hliníkové žíly na nevodivý oxid hlinitý, nebo k uhoření části žíly vzniknuvším elektrickým obloukem. U kabelů VN jsou vysokoohmové poruchy způsobeny účinkem vysokých teplot při zemním spojení po průrazu kabelu a relativně čistém prohoření izolace.

Druhým základním typem poruch jsou poruchy *nízkoohmové*, kdy je vzájemný odpor mezi jednotlivými fázemi, případně fází a zemí velmi malý – desítky, někdy i jednotky ohmů. U těchto typů poruch dojde většinou k porušení mezifázové izolace (u kabelů NN) a tepelnými účinky se jednotlivé žíly dostanou do vzájemného vodivého styku, někdy se i „svaří“. U kabelů pro vysoké napětí se působením tepelných účinků oblouku spálí izolační vrstva a natavené

olovo (u kabelu PILC) se dostane do vodivého styku s fází. U kabelu XLPE se do vodivého styku může dostat měděné opletení.

## **3.1 Metody vyhledávání kabelových poruch**

### **3.1.1 Určení rozsahu poškození**

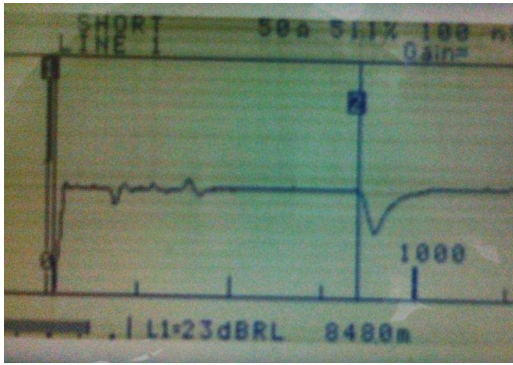
Efektivní a přesné vyhledání místa poruchy je souhrou několika diagnostických metod. Po uvolnění kabelu z provozu je nejprve nutné určit rozsah poškození kabelu změřením jeho izolačního stavu. To lze orientačně provést kupříkladu i pomocí přístroje MEGMET, kdy jeho generovaným vysokým napětím dokážeme odhalit svod na konkrétní žíle. Toto orientační měření je spolehlivé u kabelů NN.

U kabelů provozovaných vysokým napětím musíme kabel v mnoha případech najet vysokým napětím, protože často dojde k přeskočení až při napětích okolo 3 kV (např. kabel pro 22 kV) a orientačním měřením pomocí MEGMETU by se kabel jevil v pořádku. Tím zjistíme opět poškozenou fázi.

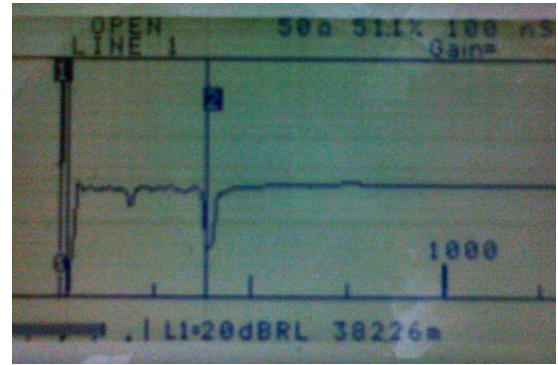
### **3.1.2 Určení místa poruchy**

Místo poruchy je určováno – jak již bylo popsáno v kapitole o měření částečných výbojů – na principu echometrie.

Přístroj se připojí na začátek měřeného kabelu a odrazy vln šířících se kabelem vykreslí délku kabelu a v některých případech také místo kabelové poruchy. Místo kabelové poruchy je vykresleno pouze v případě, že je kabel přerušen (vzájemný odpor mezi porovnávanými žílami, nebo žílou a zemí je v řádech stovek ohmů a více), případně zkratován. To bývá vzájemný odpor mezi porovnávanými žílami v řádu jednotek až desítek ohmů (přibližně do 40  $\Omega$ ). V ostatních případech může být porucha lehce zaměněna se změnou impedance v trase kabelu. Toto echometrické měření je vhodné pro ověření provést z obou stran kabelu. Nastavením kurzorů lze následně odečíst vzdálenost od místa měření (viz **Obr. 23**).



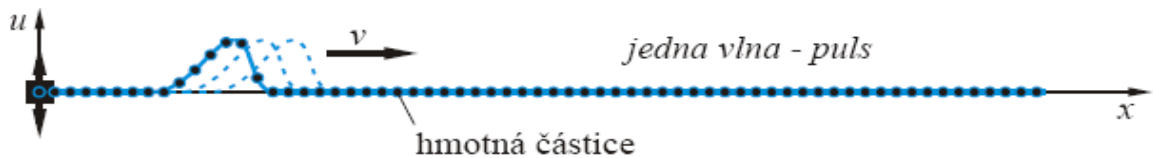
**Obr. 23a** Zobrazení délky kabelu (zkratovaný konec)



**Obr. 23b** Zobrazení místa poruchy (postižená fáze)

### 3.1.3 Princip zobrazení poruchy

Echometry pracují na principu šíření a odrazu vlny. Vlna se šíří prostřednictvím hmotných částic, které kmitají kolem rovnovážné polohy, ale nepřemísťují se ve směru šíření vlny. Důležitá je pružná vazba mezi částicemi a možnost pohybu v příčném nebo podélném směru. Pohyb se přenáší z jedné částice na druhou, a tak postupuje hmotou. Pokud se částice vychylují ve směru kolmém na směr šíření vlny, jedná se o vlnu příčnou neboli transverzální (**Obr. 24**). Pokud se částice pohybují ve směru šíření vlny, jedná se o vlnu podélnou neboli longitudinální. Tento typ vlny je typický pro šíření zvuku. [9]



**Obr. 24** Příklad šíření transverzální vlny [9]

Elektromagnetické vlny, například světlo, nepotřebují ke svému šíření hmotné prostředí a šíří se prostorem rychlostí  $c = 299\,792\,458$  m/s. Vlna šířící se kabelem je však „brzděna“ materiálem, a proto je rychlost šíření podstatně menší než uvedená rychlost  $c$ . Protože rychlost šíření kabelem je hodnota pro určení délky kabelu, případně místa poruchy velice důležitá a její znalost je nezbytná pro nastavení echometru a také pro kalibraci při diagnostice částečných výbojů, vypočítáme ji ze vztahu:  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , kde  $v$  je rychlost šíření vlny v daném prostředí,  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita, dříve nazývaná

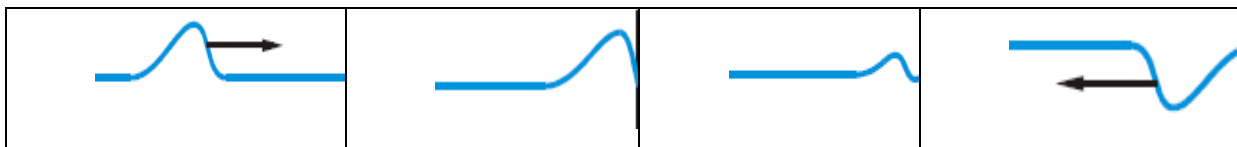
dielektrická konstanta. Je podílem permitivity daného prostředí a permitivity vakua:  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ .

Relativní permitivita je látková konstanta, jejíž hodnota závisí na vlastnostech daného materiálu. Jde tedy o materiálovou konstantu a je bezrozměrnou veličinou. Permitivitu  $\epsilon$  určíme ze vztahu:  $\epsilon = \frac{D}{E}$ , kde  $\mathbf{D}$  je elektrická indukce a  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrického pole.

Permitivita vakua ( $\epsilon_0$ ) je fyzikální konstantou, jejíž hodnota je  $8,854187817 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$  [8].

### 3.1.4 Odraz vlny

K odrazu dochází u všech druhů vln, a to na rozhraní dvou prostředí. Například odraz TV vln od budov, ale i obyčejné zrcadlo je založeno na principu odrazu vln. Odraz vlny šířící se kabelem si lze představit jako odraz vlny na napnuté struně. Když vlna doputuje na konec struny, odrazí se. U pevného uchycení struny působí příchozí pulz na stěnu silou. Stejně velkou silou působí i stěna na strunu, takže vlastně vytváří novou vlnu s opačnou výchylkou v místě stěny. Po sečtení vln je zde pak uzel, u kabelu uzel napětí (tvrdý odraz) (*Obr. 25*).



*Obr. 25 Princip odrazu vlny na struně s vetknutým koncem[9]*

Nyní, po osvětlení tvrdého odrazu vlny, si povšimněme vyobrazení na *Obr. 23a*. Zde vidíme tentýž případ u vlny šířící se kabelem, jehož konec byl zkratován (analogie k vlně na struně s vetknutým koncem na *Obr. 25*). Na *Obr. 23b* si můžeme povšimnout místa poruchy ve vzdálenosti 382 m. I zde je tvrdý odraz, což svědčí pro nízkoohmovou poruchu – zkrat v tomto místě.

Druhý případ odrazu vlny lze realizovat např. lehkým prstencem, jenž může volně a bez tření klouzat po tyči. Při pohybu prstence nahoru se element struny napíná a má tendenci vrátit prsteneček dolů. V tomto případě se vlna odráží s nezměněnou polaritou výchylky a vzniká zde kmitna, u kabelu kmitna napětí (viz *Obr. 26*).



**Obr. 26** Princip odrazu vlny s volným koncem[9]

Tomuto odrazu na struně s volným koncem odpovídá odraz na kabelu, jehož konec není zkratován. Typickým příkladem je kalibrace při měření částečných výbojů (viz **Obr. 10**).

Při hledání poruchy svědčí tento odraz v průběhu trasy kabelu o přerušení kabelu v tomto místě. Konec kabelu na takto poškozené fázi bývá nezřetelný, neboť k odrazu dojde v přerušeném místě. [9]

### 3.1.5 Úprava poruchy

Když se nepodaří určit místo poruchy metodou echometrie, musíme toto místo upravit, tj. snížit nebo zvýšit vzájemný odpor v místě poškození. K tomuto účelu používáme propalovací transformátor s plynule regulovatelným napětím a proudovou hustotou. Připojením tohoto zdroje k poškozené žíle dojde působením tepla z hořícího oblouku v místě poruchy buď ke zvýšení vzájemného odporu (zvětšení mezery mezi žílami upálením), nebo ke snížení odporu (vytvořením vodivého uhlíku, popřípadě svařením kabelu).

Po ukončení propalování bývá již obvykle porucha echometricky zjistitelná.

### 3.1.6 Vlastní vyhledání poruchy

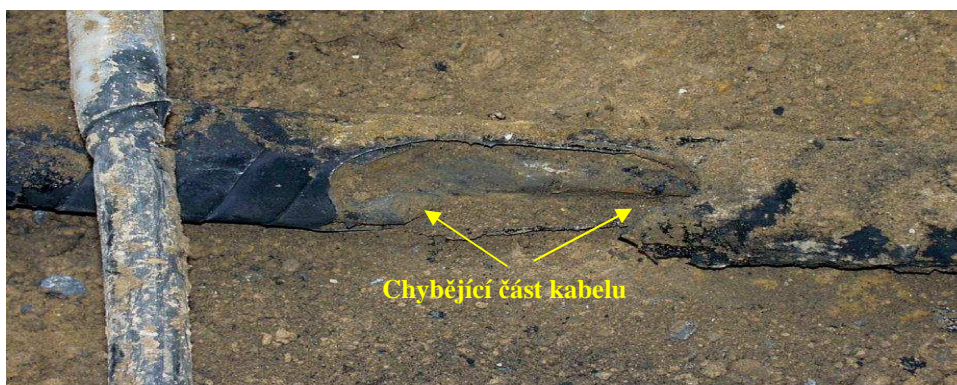
K vlastnímu vyhledání poruchy se užívá rázový generátor vysokého napětí, kdy je ráz v kondenzátorech naakumulované energie v časových cyklech vybíjen do poškozeného kabelu (viz **Obr. 29**). V místě poruchy dochází k přeskokům se zvukovým efektem a toto místo určíme buď zemním mikrofonom, případně určením místa poruchy metodou ss proudu (**Obr. 30**).

Tímto způsobem vyhledáváme i plášťové poruchy v kabelech XLPE. Princip je zřejmý z obrázku. Uniklé napětí detekujeme podle výchylky ručičky. Tato metoda se však hodí pouze pro kabely s PVC izolací (nn kabely) a XLPE izolací (vn kabely). V případě kabelů s izolací napuštěným papírem nelze tuto metodu použít, protože zde je uzavřený elektrický obvod – opláštění těchto kabelů je vodivé. Ve většině případů lze však poruchu vyhledat pomocí zemního mikrofону. Výjimku tvoří čistě svařený kabel, který nelze upravit ani pomocí



propalovacího transformátoru. Tyto případy se vyskytují velmi zřídka, ale jsou vidět na echometru. Zde nezbývá než místo co nejpřesněji odměřit na povrchu.

Další takový extrém tvoří upálená několikacentimetrová část kabelu vlivem špatného vykompenzování sítě (**Obr. 27**), kdy je kabel uložen v suché půdě s vysokým odporem. Zde lze většinou rázovat mezi jednotlivé žíly, ale v případě kabelu provozovaného vysokým napětím dojde k poškození dvou nebo tří fází současně pouze výjimečně, proto se tento postup využívá u kabelů provozovaných nízkým napětím, kde dojde k propálení izolace i mezi sousedními žíly a vzhledem k použití slabé vrstvy izolace mezi těmito tepelným působením obnaženými žíly dochází k přeskokům. Porucha je opět viditelná na echometru.



**Obr. 27** Kabelová porucha s upálenou velkou částí kabelu

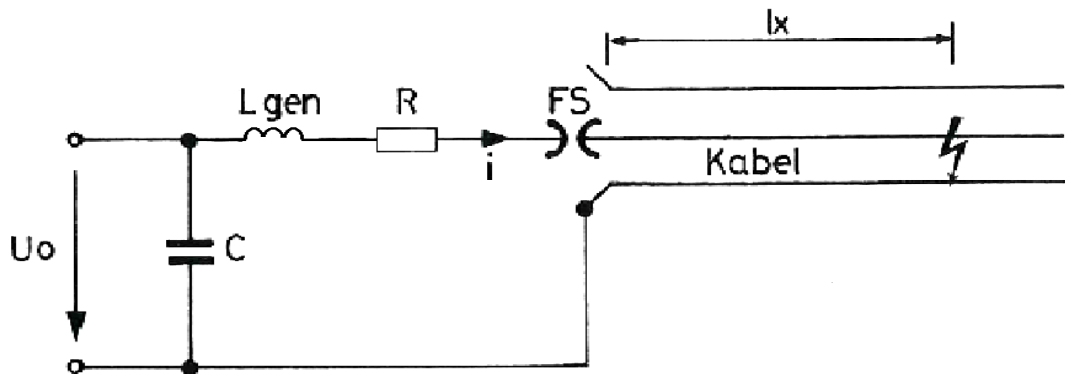


**Obr. 28** Kabelová porucha na spojce XLPE (zde je zřetelné poškození sousedních fází)

### **3.1.7 Princip rázového generátoru**

Rázové generátory umožňují přesnou lokalizaci vysoko- i nízkoohmových poruch na nn i vn kabelech. Výstupní napětí bývá plynule regulovatelné většinou ve třech stupních: I. 0–8 kV,

II. 0–16 kV, III. 0–32 kV. Náboj vysokonapěťových kondenzátorů se cyklicky vybíjí přes elektromagnetický rázový spínač na poškozený kabel (viz **Obr. 29**).



**Obr. 29** Schéma připojení rázového generátoru [10]

$U_0$  – výstupní regulovatelné napětí

$C$  – vysokonapěťový kondenzátor

$L_{gen}$  – indukčnost generátoru

$i$  – rázový proud

$l_x$  – vzdálenost k poškozenému místu

Energii rázového generátoru spočítáme podle rovnice:  $W = \frac{1}{2}CU^2$  (1)

Pro výpočet maximálního rázového proudu použijeme rovnici:  $i_{Max} = U_0 \cdot \sqrt{\frac{C}{L_{gen} + L_K}}$  (2),

kde  $L_K$  je indukčnost kabelu.

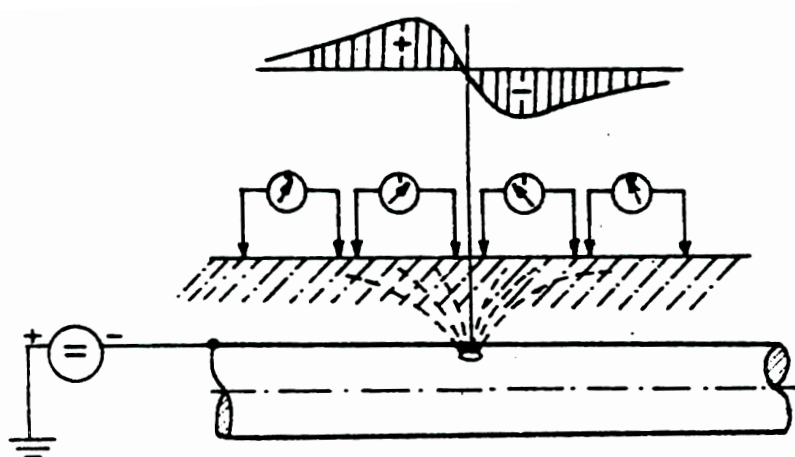
#### **Příklad:**

Kapacita vysokonapěťových kondenzátorů je  $50 \mu\text{F}$ ,  $U_0 = 4000 \text{ V}$  a  $(L_{gen} + L_K) = 10 \mu\text{H}$ .

Potom po dosazení do rovnice (1) dostaneme:  $W = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot (4000)^2 = 400 \text{ Ws}$

a max. proud z rovnice (2) dostaneme:  $i_{Max} = 4000 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}}} = 8900 \text{ A}$

Na uvedeném příkladu vidíme, že energie i rázový proud dosahuje poměrně vysokých hodnot.



**Obr. 30** Určení poruchy metodou ss proudů (pouze pro kabely s XLPE a PVC izolací) [8]

### 3.1.8 Vyhledání kabelové trasy

Abychom mohli přesně vyhledat místo kabelové poruchy, musíme znát trasu kabelu. Potom můžeme buď odměřit vzdálenost k poruše, nebo prostým přikládáním zemního mikrofonu (**Obr. 31**) po vyznačené trase jít a hledat místo rázování. V mnoha případech je rázování slyšitelné i bez mikrofonu, prostým poslechem. Kabelovou trasu vytyčíme jednoduše tak, že do kabelu pustíme z generátoru pulzy o stanovené frekvenci např. 8 kHz a ručním přijímačem naladěným na stejnou frekvenci vyhledáváme minimum, případně maximum tohoto signálu nad terénem. Takto určíme trasu kabelu pro následné vyhledání místa poruchy.



**Obr. 31** Souprava zemního mikrofonu  
a generátoru pro vytyčení trasy



**Obr. 32** Souprava pro vytyčení kabelové trasy

## Závěr

Kabel je známý již několik desetiletí, ovšem teprve v posledních letech se při výrobě kabelů otevřel prostor pro využívání nových materiálů. Kabel dnes najdeme prakticky ve všech odvětvích lidské činnosti i v prostředcích denní potřeby. Kilometry kabelů protkávají naše města a obce, a i když si to často neuvědomujeme, na kvalitě kabelů závisí chod našich domácností, průmyslových podniků, dopravních prostředků, počítačových sítí, obchodů a zdravotnických zařízení.

Předkládaná práce seznamuje se základním okruhem používaných kabelů a armatur a nastiňuje problematiku diagnostických zkoušek a vyhledávání poruch. Práce se zabývá diagnostickými metodami používanými v tuzemských energetických společnostech.

Je možné, že budoucnost přinese nové technologie, možná jednou i bezdrátový přenos elektrické energie, ale klasický kabel bude ještě dlouho nenahraditelný; jsem navíc přesvědčen, že ne všude bude možné klasický kabel nahradit.

Nové materiály také podstatně zjednodušily výrobu kabelů pro VN. Odpadl systém dolévacích koncovek, olovený plášť, systém složitých litinových spojek, zjednodušila se i manipulace při pokládce, protože nové kabely mají podstatně nižší hmotnost. Používáním zesíťovaného polyetylénu se výrazně zlepšila kvalita pracovní izolace. Nové kabely však mají i své záporné stránky, a to snadný vznik plášťové poruchy. Ne vždy se totiž používají dvouplášťové kabely a měkký plášť se snadno prodře, či jinak poškodí. Dřívější typy kabelů měly jednotlivé žíly opatřeny oloveným opláštěním, následně ještě PVC vrstvou a celek byl opět obalen olovem, ovinut plechem a nakonec jutou napuštěnou asfaltem. Zde bylo podstatně menší riziko poškození kabelu.

Proto je u nově pokládaných kabelů po dokončení montáže velice důležité provést plášťové zkoušky a diagnostiku kabelu, čímž se prověří kvalita provedení případných spojek dříve, než je kabel uveden do provozu, neboť včasným odhalením poruchy předejdeme nenadálému výpadku, přerušení dodávky elektrické energie a nákladné opravě spojené s výkopovými pracemi.

## Použitá literatura

- [1] <http://www.encables.cz/data/elektricke-kabely-obecne.pdf>.
- [2] Katalog produktů ABB, použití obrázku struktury kabelu. Skenováno 20. 11. 2009
- [3] [http://cz.traconelectric.com/products/index/Category\\_Id/5053](http://cz.traconelectric.com/products/index/Category_Id/5053). Obrazový materiál kabelových souborů. Staženo 15. 07. 2011
- [4] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [5] BAUR Prüf – und Messtechnik GmbH – Návod k obsluze – zkoušení a diagnostika kabelu.
- [6] Vinter, P.: Měření ztrátového činitele silových kabelů. *Elektro*, 2001, č. 4. ISSN 1210-0889 elektronická verze, [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz), čerpáno 10. 10. 2010
- [7] <http://www.sebakmt.com>. z prezentace pro školení. Autor neuveden
- [8] Trefný, K.: Zkoušky celistvosti pláště u VN kabelů typu AXEKCY. Vyhledávání míst poruch na pláštích kabelů. Výzkumný ústav energetický Praha
- [9] Halliday, Resnick, Walker: *Fyzika* (český překlad) Vutium Brno 2000 ISBN 80-214-1869-9.
- [10] BAUR Messtechnik- Bedienungsanleitung – Echometer IRG, Stosspanungs-Generator SSG, volně převzato z uživatelských příruček pro echometr a rázový generátor Baur
- [11] Kříž, M.: Použití vodičů a kabelů, vydáno 27. 11. 2006 [www.in-el.cz](http://www.in-el.cz) staženo 4. 11. 09
- [12] Prezentace firmy Baur: Fyzikální podstata vzniku PD. Autor neuveden
- [13] <http://www.es-ostava.cz/> Elektronické součástky CZ a. s. Základní informace o kondenzátorech, čerpáno 7. 9. 2011

## Seznam symbolů

<b>C</b> [F]	kapacita
<b>Hz</b>	hertz – jednotka frekvence
<b>kV</b>	kilovolt ( $10^3$ V) – jednotka elektrického napětí
<b>L</b> [H]	indukčnost
<b>L1, L1, L3</b>	označení fází
<b>nn, NN</b>	nízké napětí (obecně do 1000 V)
<b>pC</b>	pikocoulomb ( $10^{-12}$ C) – jednotka pro náboj
<b>PILC</b>	paper insulation cables (kabely s papírovou izolací)
<b>R</b> [ $\Omega$ ]	elektrický odpor
<b>tg<math>\delta</math></b>	ztrátový činitel
<b><math>U_0</math></b>	jmenovité napětí
<b>vn, VN</b>	vysoké napětí (obecně nad 1000 V)
<b>XLPE</b>	cross-linked polyethylene (zesíťovaný polyetylén)
$\varphi$	fázový posun
$\omega$	úhlová rychlost ( $2\pi f$ )

## **Přílohy**

### **Příloha č. I. Značení kabelů (dnes již nepoužívané) [10]**

#### **První písmeno určovalo materiál jader:**

- A – hliník,
- C – měď.

#### **Druhé písmeno určovalo materiál izolace:**

- N – napuštěný papír „normální“,
- M – napuštěný papír „nemigrující“,
- Y – měkčený polyvinylchlorid,
- G – kaučukový vulkanizát,
- E – polyetylén.

#### **Třetí písmeno „K“ charakterizovalo, že se jedná o kabel. Čtvrté písmeno určovalo materiál pláště:**

- A – hliník,
- O – olovo,
- Q – slitina olova (legované olovo),
- Y – měkčený polyvinylchlorid,
- U – vulkanizát z polychloroprénového kaučuku.

Písmeno „T“ bylo uváděno u kabelů se samostatně opláštěnými žilami a bylo následováno písmenem označujícím materiál tohoto pláště.

#### **Páté a podle potřeby i další písmena udávala obaly nad pláštěm, jejichž účelem většinou byla protikorozní ochrana:**

- J – polštář z asfaltového polevu předem napuštěné tkaniny,
- V – vláknitý asfaltový obal,
- B – asfaltový polev předem napuštěné tkaniny a dva nebo tři pásy z měkčeného PVC,
- Y – souvislý bezešvý obal z měkčeného PVC,

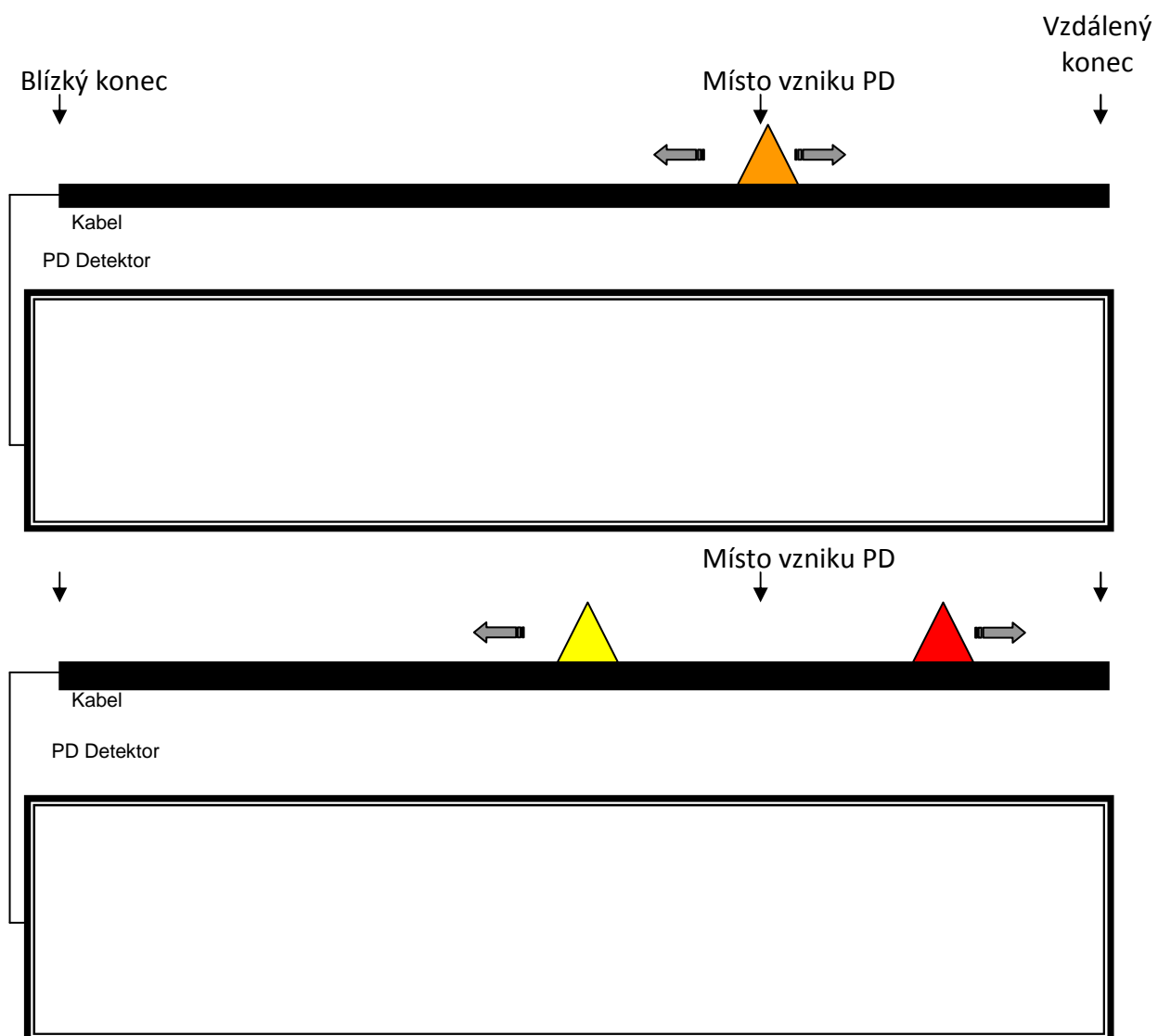
**P** – pancíř ze dvou pásek včetně polštáře z asfaltového polevu,

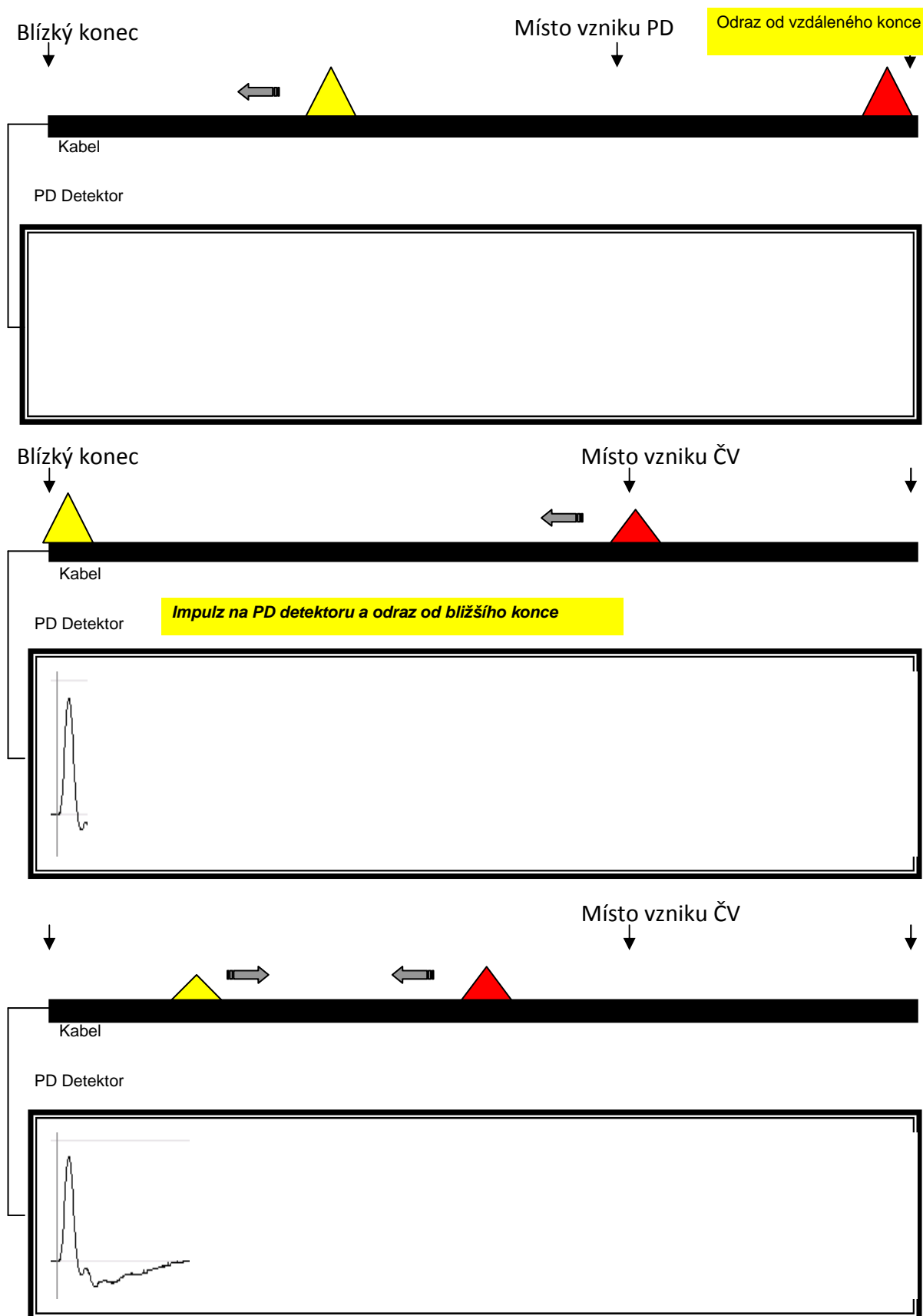
**D** – pancíř z drátků včetně polštáře z asfaltového polevu,

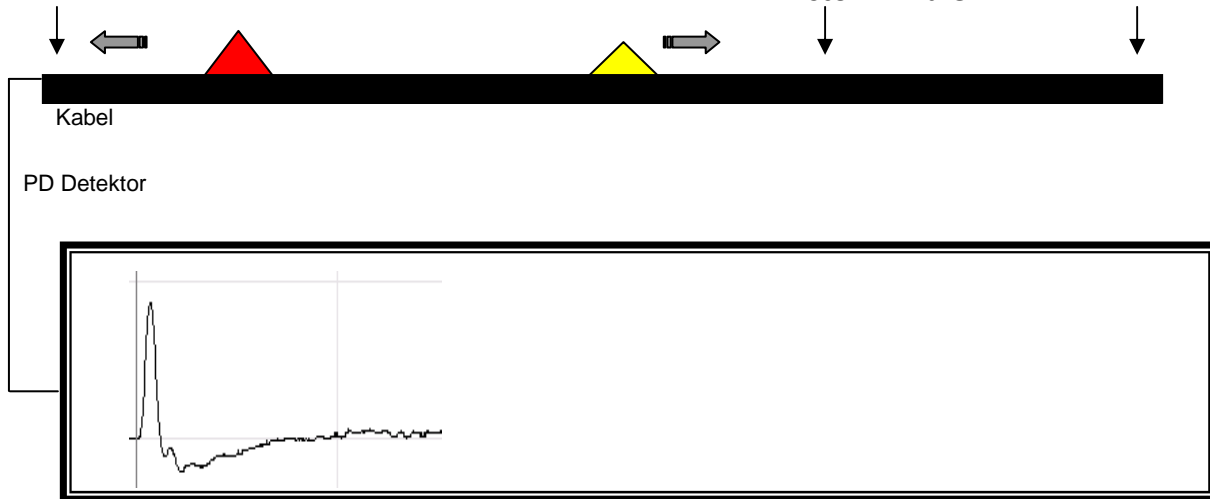
**Z** – pancíř z nemagnetických drátků (pro jednožilové kabely na střídavý proud).



## Příloha č. II. Princip zobrazení místa částečných výbojů [12]

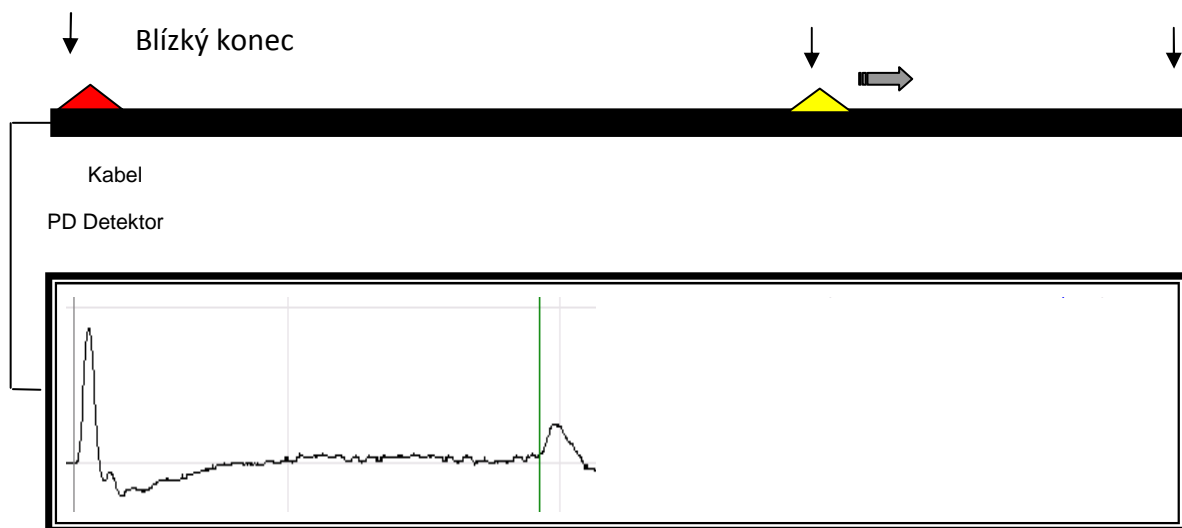


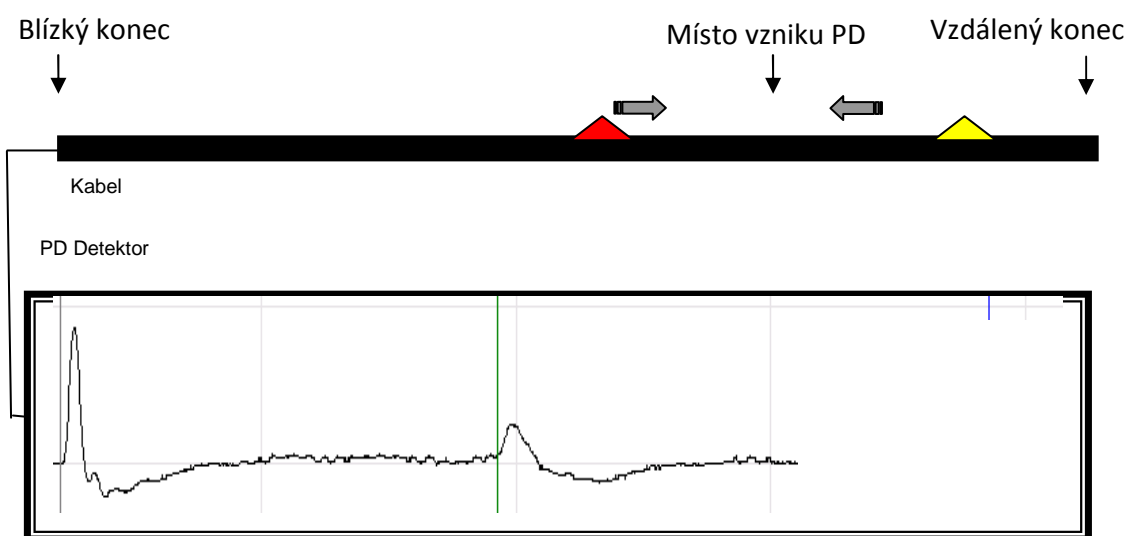
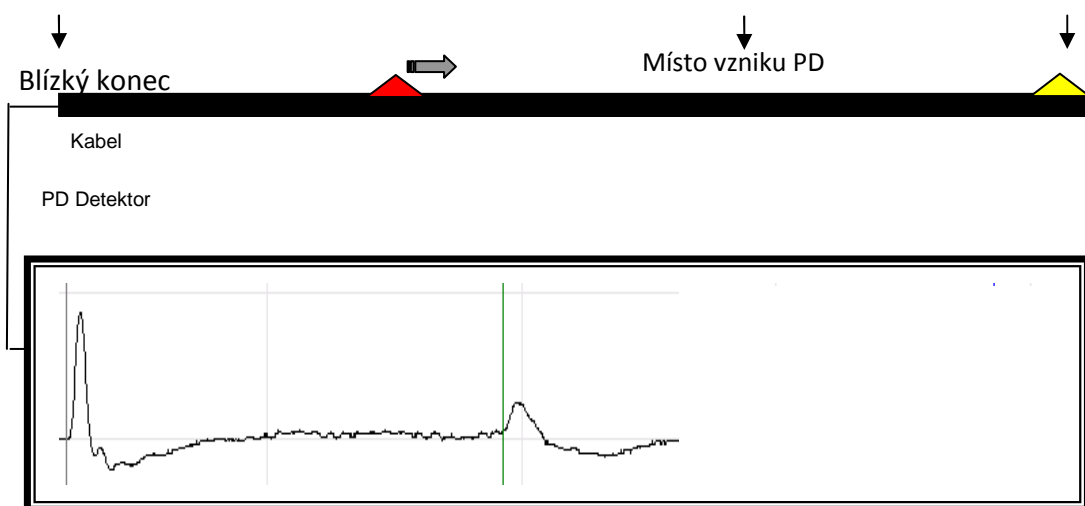
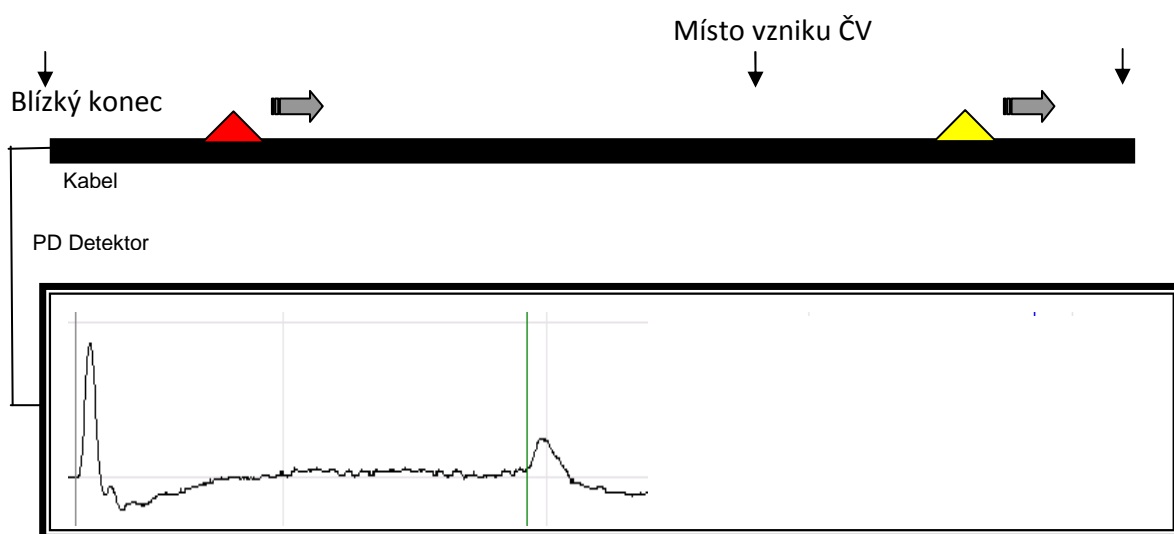




Odras od blízkého konce

Místo vzniku ČV





Vzdálený konec

