

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zkoušky a diagnostika kabelů

Tomáš Kupilík

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš KUPILÍK**
Osobní číslo: **E19B0016P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Zkoušky a diagnostika kabelů**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte přehled kabelů používaných pro přenos a distribuci elektrické energie na napěťové úrovni NN i VN.
2. Zabývejte se zkouškami a diagnostikou kabelů a zaměřte se zejména na diagnostiku stárnutí izolace ve vztahu k použitým izolačním materiálům.
3. Analyzujte přínos nových diagnostických přístupů k uvedené problematice a navrhnete optimální metodu pro posouzení stavu kabelového souboru.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

P. C. J. M. van der Wielen. On-line detection and location of partial discharges in medium-voltage power cables. Technische Universiteit Eindhoven, <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/2380776/200511097.pdf>.
T.L. Koltunowicz, Accelerated Insulation Aging Due to Thermal and Electrical Stresses in Future Power Grids, <https://research.tudelft.nl/en/publications/accelerated-insulation-aging-due-to-thermal-and-electrical-stress>.
Abdulsalam S.Alghamdia, Rayan K.Desuqiab, A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019367799>.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje zejména na diagnostiku a zkoušky kabelů. V prvním oddíle se bakalářská práce zabývá popisováním jednotlivých částí, vlastnostmi a parametry kabelu. Druhá část je zaměřena na metodiku zkoušek a diagnostiku kabelových souborů, jak elektrických zkoušek, tak zkoušek neelektrických. Závěrem této práce je návrh na optimální posouzení stavu kabelového systému.

Klíčová slova

kabel, izolace, částečné výboje, ztrátový činitel, VLF, DAC, zkouška, diagnostika, PVC, XLPE,

Abstract

The bachelor thesis focuses mainly on diagnostics and testing of cables. First, the bachelor's thesis deals with the description of individual parts, properties and parameters of the cable. The second part is focused on methods of testing and diagnostics of the cable assemblies, both electrical tests and non-electrical tests. The conclusion of this work is a proposal for the optimal assessment of the condition of the cable system.

Key words

cable, insulation, partial discharges, dissipation factor, VLF, DAC, test, diagnostics, PVC, XLPE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto 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 práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2022

Tomáš Kupilík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Evě Mullerové Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 OBECNÝ POPIS SILOVÉHO KABELU	13
1.1 HISTORIE KABELŮ.....	13
1.2 VÝSTAVBA SILOVÝCH KABELŮ.....	14
1.2.1 Jádru kabelu.....	14
1.2.2 Žíla.....	17
1.2.3 Kabelová duše.....	17
1.2.4 Elektrické stínění.....	18
1.2.5 Plášť.....	19
1.2.6 Vnější a vnitřní polovodičivá vrstva.....	20
1.2.7 Pancéřování (armování) kabelu.....	20
1.2.8 Ochranné obaly.....	20
1.3 ZNAČENÍ KABELŮ.....	21
1.3.1 Základní značení kabelů.....	21
1.3.2 Nařízení pro uvádění stavebních výrobků na trh (CPR).....	22
1.3.3 Bezhalogenové oheň retardující kabely.....	24
1.4 IZOLAČNÍ VLASTNOSTI KABELU.....	25
1.4.1 Izolant.....	25
1.4.2 Elektrická pevnost izolantů.....	25
1.4.3 Ztrátový činitel $\tan \delta$	26
1.4.4 Mechanické vlastnosti.....	27
1.4.5 Tepelné třídy izolantů.....	27
1.4.6 Stárnutí izolace.....	28
1.5 IZOLAČNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V KABELOVÉ TECHNICE.....	29
1.5.1 Polyethylen (PE).....	29
1.5.2 Zesítěný polyethylen (XLPE).....	29
1.5.3 Polyvinylchlorid (PVC).....	30
1.5.4 Etylenpropylenové kaučuky (EPR).....	30
1.5.5 Polyuretan (PUR).....	31
1.5.6 Polyamid (PA).....	31
1.6 PŘEHLED SILOVÝCH VN A NN KABELŮ.....	32
2 ZKOUŠKY A DIAGNOSTIKA KABELŮ	34
2.1 ELEKTRICKÉ ZKOUŠKY.....	34
2.1.1 Elektrický stejnosměrný odpor jádra.....	34
2.1.2 Zkouška napětím na hotovém kabelu.....	35
2.1.3 Zkouška izolačního odporu.....	35
2.1.4 Kontrola celistvosti izolace.....	36
2.2 ZKOUŠKA VELMI NÍZKOU FREKVENCÍ (VLF).....	36
2.2.1 Měření ztrátového činitele.....	37
2.2.2 Měření a lokalizace částečných výbojů.....	38
2.2.3 Zátěžová zkouška VLF.....	40
2.3 ZKOUŠKA TLUMENÝM STRÍDAVÝM PROUDEM (DAC).....	41
2.3.1 Měření částečných výbojů pomocí DAC.....	42
2.3.2 Měření ztrátového činitele pomocí DAC.....	43
2.3.3 Zátěžová zkouška DAC.....	44
2.4 PROČ POUŽÍVAT DAC A VLF.....	45

2.4.1	Výhody a nevýhody DAC	45
2.4.2	Výhody a nevýhody VLF	46
2.4.3	Porovnání DAC a VLF	47
2.4.4	Případové studie VLF	49
2.4.5	Případové studie DAC	53
2.4.6	Optimální metodika pro posouzení stavu kabelového systému	55
2.5	NEELEKTRICKÉ ZKOUŠKY	57
2.5.1	Měření tloušťky izolace	57
2.5.2	Zkoušky pro určení mechanických vlastností izolačních a plášťových směsí	58
2.5.3	Zkouška zesíťovaných materiálů tlakem při vysoké teplotě (Hot set test)	59
2.5.4	Zkouška tlakem při vysoké teplotě pro izolaci a plášť	60
ZÁVĚR		62
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		63
SEZNAM OBRÁZKŮ		66
PŘÍLOHY		1

Úvod

V současné době se kabely stále významněji podílí na přenosu a distribuci elektrické energie a je nutné se zabývat také diagnostikou jejich výchozího i provozního stavu. To není snadné s ohledem na rozsáhlost kabelových systémů a způsob jejich uložení. Také inovace použitých izolačních materiálů a fakt, že se často jedná o DC namáhání, vyžadují také nové diagnostické metody, které budeme umět správně používat. Ačkoliv se kabely obecně považují za spolehlivou část systému, jejich dlouhodobé provozování přináší i potřebu diagnostiky. Proto chci v této bakalářské práci ukázat, jaké metody se používají a s jakými hodnotícími kritérii pracovat. A to jak zkoušky během výroby, výstupní zkoušky po výrobě, tak i během provozu kabelu. Poznávám, že je nutné rozlišit, co můžeme na kabelu udělat pouze jednou a co opakovaně během jeho životnosti. Něco není možné opakovat po instalaci a něco opakovat můžeme, ale přineslo by to rizikové namáhání izolace. Cílem práce je na základě prostudovaných materiálů vytipovat optimální zkušební postupy, zejména pro izolační systémy kabelových souborů na vyšších napěťových hladinách.

Seznam symbolů a zkratk

U	(V)	Napětí
P	(W)	Elektrický výkon
UV		Ultrafialové záření
Cu		Měď
Al		Hliník
R	(Ω)	Elektrický odpor
Ag		Stříbro
Cd		Kadmium
Cr		Chrom
Fe		Železo
γ	(S)	Elektrická vodivost
PVC		Polyvinylchlorid
PE		Polyethylen
PET		Polyethylentereftalát
XLPE		Zesítný polyethylen
PA		Polyamid
EPR		Ethylenpropylenové kaučuky
PUR		Polyuretan
LDPE		Vysokotlaký polyethylen
HPE		Nízkotlaký polyethylen
VPE		Síťovaný polyethylen
NN		Nízké napětí
VN		Vysoké napětí
SN		Střední napětí
d_z	(mm)	Průměr kruhové žíly
t₀	(mm)	Tloušťka izolace
m	(-)	Činitel násobku
D_p	(mm)	Průměr kabelu po stočení
ČV		Částečné výboje
Zn		Zinek
eV		Elektronvolt
E_p	(V/m)	Elektrická intenzita
U_p	(V)	Průrazné napětí
tg δ	(-)	Ztrátový činitel
nf	(Hz)	Nízká frekvence

vf	(Hz)	Vysoká frekvence
σ	(MPa)	Mechanická pevnost
σ	(N/mm ²)	Mechanická pevnost
°C		Stupeň Celsia
Q	(J)	Teplo
I	(A)	Elektrický proud
q	(W/m ³)	Měrné tepelné ztráty
r	(m)	Poloměr
l	(m)	Délka
V	(m ³)	Objem
dt	(s)	Změna času
α	(W/°C·m ²)	Ochlazovací konstanta
S	(m ²)	Plocha
VLF		Velmi nízká frekvence
f	(Hz)	Frekvence
U₀	(V)	Jmenovité napětí
DAC		Tlumený střídavý proud
q	(pC)	Zdánlivý náboj
v	(mm/min)	Rychlost tahu
T	(K)	Teplota
L	(H)	Indukčnost
C	(F)	Kapacita
ρ	($\Omega \cdot m$)	Měrný elektrický odpor
θ	(°C)	Oteplení vodiče
dθ	(°C)	Teplotní změna

1 Obecný popis silového kabelu

Kabel je soustava elektrických nebo optických vodičů, které jsou spojeny společným pláštěm. Jejich cílem je přenášet informace nebo elektrickou energii z bodu A do bodu B. Kabely se rozdělují podle různých kritérií, ovšem zásadní rozdělení je na dvě skupiny:

- kabely silové
- kabely sdělovací

1.1 Historie kabelů

Vést elektrickou energii kabelem je pro dnešní dobu jeden ze standardních způsobů, jak energii efektivně přenášet. Kabel se nezrodil hned po začátku využívání elektrické energie. V roce 1882 se pro rozvod energie používaly holé vodiče, které byly uloženy v dřevěných žlabech. Za moderní typ kabelu vděčíme švýcarské společnosti Val de Travers Asphalt Pasing Co. Společnost poznala elektroizolační schopnost asfaltu a její ředitel Franz Borel se pokusil vyrobit izolovaný vodič. Měděnou žílu obalil asfaltem. Už tehdy měl kabel podobu dnešního kabelu, avšak jeho životnost byla s porovnáním s dnešními kabely velice malá. Problém byla vlastnost asfaltu usychat na vzduchu, křehkost a časté odpadávání asfaltu. Výrobní proces byl oproti dnešnímu procesu velice namáhavý a zdoluhavý. Franz Borel se poté nechal inspirovat při své návštěvě v Pompejích, kde ve zříceninách viděl, jak olovo dokáže ochránit a zachovat předměty i přes 800 let staré. Proto tak doplnil asfalt směsí pryskyřice a oleje, na níž zalisoval olovo. Takto se zrodil první kabel určený pro distribuci, býval uložen v zemi a zároveň zůstal dosti vhodný pro navíjení na buben.

V roce 1886 byl zhotoven první kabel pro vysoké napětí, což tehdy bylo pro 600 V. Určený byl pro elektrickou dráhu ve Švýcarsku. Zajímavá je jeho životnost, která byla až 50 let.

Koncem 19. století prudce vzrostl počet kabelových elektroinstalací a přenos energie. Kabely se stále zdokonalovaly a v první polovině 20. století byla francouzská Paříž napájena kabelem, jenž byl schopný vést až 220 kV, přenášet výkon byl schopný trvale 160 kW. [3]



Obr. 1: Pokládka kabelů [3]

1.2 Výstavba silových kabelů

Kabely musí zajistit svoji plnou funkcionalitu v prostoru a v prostředí, kde jsou uloženy po celou předpokládanou dobu, na kterou jsou konstruovány. Klíčový vliv na provozuschopnost instalovaného kabelu má vliv samotné prostředí, kde je kabel instalován.

Charakter prostředí, např. teplota okolí a způsob uložení kabelu, má přímý vliv na maximální, konečné proudové jeho zatěžování.

V silových kabelech je nežádoucí jakákoli vzduchová dutina (mezi jednotlivými vrstvami kabelu), vznikající Joulovo teplo z jednotlivých žil kabelu musí být dostatečně dobře z kabelu vyzářeno do prostředí, kde je kabel uložen.

Kabel musí být konstruován z materiálů – zejména jeho plášť, aby plně odolával nežádoucím vlivům působení takového prostředí. Např. kabely v petrochemickém a rafinerském provozu musí odolávat ropným produktům anebo aromatickým účinkům uhlovodíků.

V energetice, zejména v jaderné, musí kabely odolávat ionizujícím záření, které na rozdíl, např. od záření UV anebo tepelného, prostupuje celou hmotou současně. Ionizující záření plastické materiály rozkládá v čase tak, že se bez dostatečných obsahů antioxidantů, mohou v relativně krátké době začít zcela rozpadat (jejich benzenové řetězce se ze svých vzájemných vazeb uvolňují).

1.2.1 Jádru kabelu

Jádru žíly kabelu tvoří elektrovedný materiál, nejčastěji se jedná o měď (Cu) nebo o hliník (Al). Měď se užívá častěji, kvůli jejím mechanickým vlastnostem a dobré elektrické vodivosti.

Tab. 1: Vlastnosti elektrovedných materiálů [5]

materiál	měrný elektrický odpor (nΩ·m)	elektrická vodivost (S/m)	tepelná vodivost (W/m·K)
Cu	16,78	$58,11 \cdot 10^6$	395
Al	28,74	$37,7 \cdot 10^6$	229

Elektrovedná měď musí obsahovat minimálně 99,9 % mědi. Její největší výhoda je velká vodivost a odolnost vůči korozi. Elektrovedná měď se vyrábí z katod (Cu desky

přibližně 0,6x0,6x0,03 m) elektrotavbou (odporová pec, kde přímo el. proud taví Cu katody). Hodně čistá měď se pak jako „drát“ o průměru 8 mm vypouští z této elektrické pece, po zchlazení na teplotu okolí se navíjí do svitků o hmotnosti přibližně 1 až 3 tun. Tyto svitky Cu drátů 8 mm již vstupují do „hrubotahů“. Výstupem z hrubotahů je Cu jádro o různých daných průměrech. Podle mechanických vlastností ji můžeme dělit na tři druhy:

- **Měkká** – menší pevnost než 30 kg/mm², využívá se pro kabely silové, sdělovací a pro instalační vodiče.
- **Polotvrdá** – pevnost od 30 až 36 kg/mm², oproti měkké mědi je více tvárná a má mírnou pružnost. Je určena pro profilové vodiče a lana pro stavbu sekundárních vedení.
- **Tvrdá** – pevnost až 40 kg/mm². Používá se ve tvaru venkovního vedení VN, kvůli její značné pružnosti.

Slitiny mědi mají výhodu v jejich větší pevnosti, ale elektrická vodivost už není tak vysoká. Slitin mědi je velké množství např. Cu-Ag, Cu-Cr, Cu-Cd a dále bronzy, což jsou slitiny různých kovů a mědi.

Elektrovodný hliník má oproti mědi menší elektrickou vodivost. Výhodou je ale jeho menší měrná hmotnost a menší cena. Proto se hliník využívá tam, kde nevádí velký průřez vodiče např. rozvodné sítě, silové kabely, AlFe lana. Jako další vodivé kovy se může používat zinek, olovo, cín, wolfram, zlato a stříbro. Stříbro má nejlepší elektrickou a tepelnou vodivost a je dobře zpracovatelný, jeho cena je ale téměř desetkrát větší než pro hliník. [4,9]

Tvary jader vodičů mohou být:

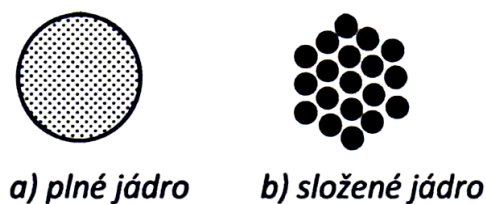
- a) **Kruhové** – nejčastější typ jádra
- b) **Sektorové** – jádra jednotlivých žil mají celkový kruhový tvar a jsou rozdělena do sektorů
- c) **Trubkové** – možnost chlazení
- d) **Obdélníkové** – pro holé vodiče a přípojnice



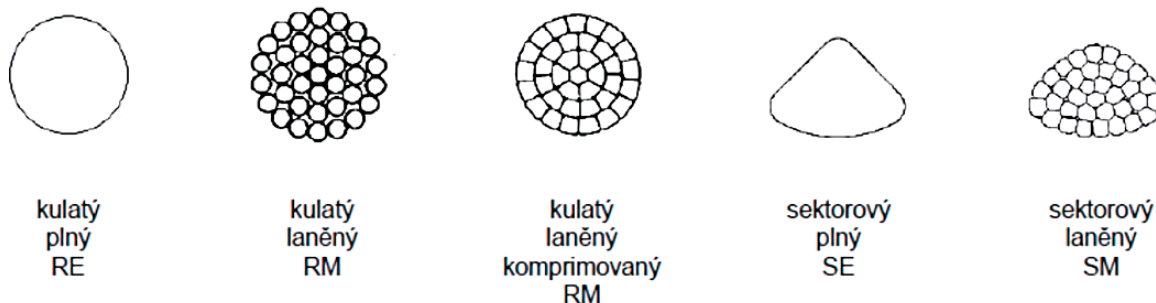
Obr. 2: Tvary jader vodičů [6]

Z důvodu mechanických vlastností jako je tažnost, napětí, mají **jádra dvě provedení:**

- a) **plné jádro** – je tvořeno jedním kompaktním materiálem a používá se od nejmenších průřezů až do průřezu 25 mm² (označováno RE, SE)
- b) **složené jádro** – průřez je tvořen jednotlivými lankami (označováno RM, SM). Jádro se lépe tvaruje a zároveň omezuje skinefekt. [6]






















Obr. 3: Provedení jader [6]



Obr. 4: Tvary vodičů [6]

1.2.2 Žíla

Žíla je tvořena vodivým jádrem, na kterém je extrudovaná izolace nejčastěji typu PVC (polyvinylchlorid), PE (polyethylen) nebo XLPE (zesítěný polyethylen). Nedílnou součástí žíly jsou její barevná označení, které rozlišují, zda se jedná o vodič fázový, ochranný nebo nulový. Barevné rozlišení kabelových žil u kabelů NN stanovuje norma ČSN 33 0166 ed.2; ČSN EN 50334; HD 308 S2. [4]

Vybrané vodiče/svorky	Identifikace vodičů / svorek prostřednictvím			
	Písmeno-číslicového zápisu		Barev	Grafických značek
	Vodiče	Svorky		
AC vodiče	AC	AC	-	
Vodič vedení (fáze) 1	L1	U	 BK nebo	 není doporučena
Vodič vedení (fáze) 2	L2	V	 BN nebo	
Vodič vedení (fáze) 3	L3	W	 GY	
Vodič středního bodu	M	M	 BU	
Nulový vodič	N	N		
DC vodiče	DC	DC	-	
Kladný	L+	+	 RD	
Záporný	L-	-	 WH	
Vodič středního bodu	M	M	 BU	není doporučena
Nulový vodič	N	N		
Ochranné vodiče	PE	PE	 GNYE	
PEN vodič	PEN	PEN	 	není doporučena
PEL vodič	PEL	PEL		
PEM vodič	PEM	PEM		
Vodiče ochranného pospojování	PB	PB		není doporučena
uzemněné	PBE	PBE		
neuzemněné	PBU	PBU		
Vodiče pracovního uzemnění	FE	FE	 PK	
Vodiče pracovního pospojování	FB	FB	doporučení není nutné	

Obr. 5: Označení vodičů [9]

1.2.3 Kabelová duše

Kabelová duše je složena z daného počtu žil v uspořádaném x-úhelníku. Počet žil v kabelové duši je závislý na typu sítě, do které je kabel zapojován jako např. síť TN-S, která má tři fázové vodiče, ochranný vodič a nulový vodič. Do této sítě je zapotřebí mít pět vodičů, proto bude mít kabelová duše pro tento typ sítě pět žil. Na obr. 5 můžeme vidět počty vodičů v uspořádání (J) a (O). Při uspořádání typu (J) se vyskytuje žlutozelený (ochranný vodič),

zatím co v uspořádání (O) se nevyskytuje. Proto je možné vidět, že v pětižilové variantě v (O) uspořádání se vyskytuje dvakrát černý fázový vodič.

Barevné značení kabelů CYKY J a O pro pevné uložení		
	se značením CYKY J	CYKY O
2-žilové	–	
3-žilové		
4-žilové		
5-žilové		

Obr. 6: Barevné označení (J) a (O) [9]

Aby se žíly držely v x-úhelníkovém uspořádání, tak se žíly slaňují. Parametrem slanění je tzv. zkrut. „Délka zkrutu je měřítkem pro dráhu (měřeno ve směru podélné osy), kterou urazí prvky jedné vrstvy po ovinutí o 360°.“ [2]. Bez zkrutu dochází při ohybu duše k většímu tahovému namáhání vnějších vodičů než vodičů vnitřních, proto by kabel měl menší poloměr ohybu. Minimální poloměr ohybu u jednožilových kabelů nesmí být menší než 15x průměr kabelu a u vícežilových nesmí být menší než 12x průměr kabelu (pro kabely s plnými kruhovými jádry a určené pro pevná uložení). Průměr kabelové duše s kruhovým průřezem (3žilový) je dán vztahem (1) [1,2]

$$D_d = 2,41 \cdot d_z + 2 \cdot t_0 \quad (mm), \quad (1)$$

kde d_z je průměr kruhové žíly (mm) a t_0 je tloušťka obvodové izolace (mm)

Délka zkrutu kabelu L závisí na několika faktorech. Nejzásadnější je dovolený poloměr ohybu kabelu. Vztah je pro výpočet délky zkrutu je [1]

$$L = m \cdot D_p \quad (mm), \quad (2)$$

kde m je činitel násobku zkrutu (-) a D_p průměr kabelu po stočení (mm)

1.2.4 Elektrické stínění

Elektrické stínění slouží k ochraně kabelových duší proti vnějším elektrickým polím, snižuje vyzařování elektromagnetických polí do prostoru kolem kabelu, přispívá ke

zpevnění kabelových duší. Stínění jednotlivých kabelových žil zajišťuje rovnoměrné rozložení elektrického pole ve vlastní izolaci žíly: snižuje vznik poruchy izolace žíly tzv. stromečkové jevy, parciální (částečné) výboje v izolaci VN kabelů. Elektrovedný a polovodiivý materiál, který se využívá pro stínění může být např. ve formě: Cu folie, Cu pásek, ALPET folie, hliníková folie, měděné drátky, ploché vodiče. Při výrobě je kabelová duše ovíjena jedním z výše uvedených materiálů [3].



Obr. 7: Elektrické stínění z Cu drátů a Cu páskou [4]

1.2.5 Plášť

Plášť funguje jako obal kabelu, který fixuje všechny předchozí popsané části kabelu dohromady. Na plášti se musí vyskytovat informace o daném kabelu jako např. pro jakou napěťovou hladinu je kabel určen, jeho označení (5x16 CYKY, CXKE...), podle kterého poznáme, o jaký typ vodiče se jedná, rok výroby a zároveň funguje jako reklama pro výrobce (probráno v dalších kapitolách). Jednou z hlavních funkcí pláště je ochrana před vnějšími vlivy jako je UV záření od slunce, vlhkost, mechanické poškození. Skrze plášť se musí kabelové žíly také ochlazovat. [1]

Plášť si vybíráme podle okolí, v kterém bude instalován. Čím méně vnějších vlivů bude na plášť působit, tím méně může být plášť odolnější. Používají se materiály jako je PVC, PE, XLPE, EPR. Plášť lze vidět na (obr. 7)

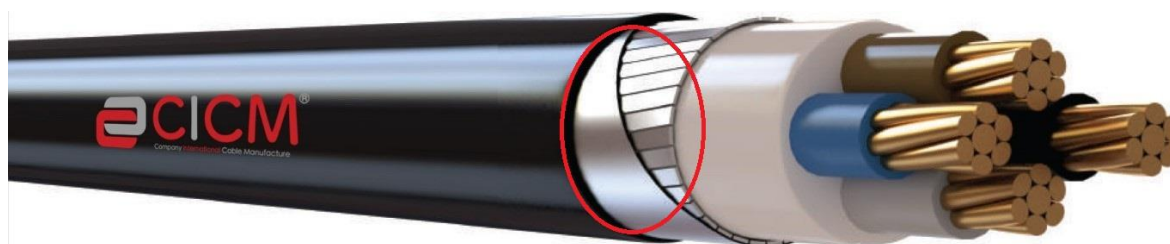
1.2.6 Vnější a vnitřní polovodivá vrstva

Polovodivá vrstva není polovodič, jedná se o polovodivou vrstvu tvořenou zesíťným polymerním materiálem s přísadou uhlíkových vodivých sazí. Vnitřní polovodivá vrstva eliminuje vzduchové mezery jádra mezi jednotlivými lanky, což zapříčiní že tato polovodivá vrstva má stejný potenciál jako jádro. Tím se eliminují částečné výboje, které způsobují degradaci izolačního materiálu a zároveň zařídí rovnoměrné rozložení elektrického pole, které omezí nerovnoměrné namáhání izolace vlivem nerovnoměrného vstupování siločar do izolace. [34]

1.2.7 Pancéřování (armování) kabelu

Pancíř je tvořen ovinutými hliníkovými, měděnými anebo pozinkovaný ocelovými pásky nebo dráty, obvykle s protisměrným ovinem kovovým páskem (FeZn plechem). Jeho hlavními funkcemi jsou:

- **Mechanická ochrana** – ochrana proti mechanickému poškození. Velice vhodné proti překopnutí kabelu na staveništi. Mechanická ochrana kabelu armováním je velice důležitá v instalacích kabelů do prostředí, kde se vyskytují hlodavci. Armování kabelů účinně zabrání poškození kabeláže.
- **Elektromagnetická ochrana** – ochrana proti vnějším elektromagnetickým vlivům nebo proti elektromagnetickému vyzařování samotného kabelu do okolí. [1,7]



Obr. 8: Pancéřování kabelu plochými galvanizovanými ocelovými dráty s páskou [4]

1.2.8 Ochranné obaly

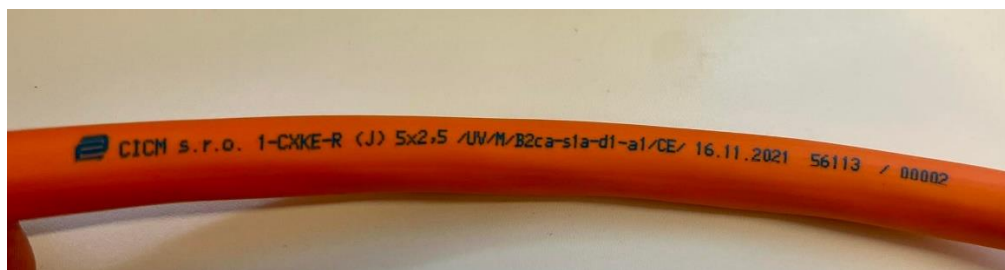
Plní účel další vrstvy pláště, která plní funkci ochrany armatury před chemickými vlivy jako je vlhkost. Zamezení vniku vody a tím zamezí korodování armování.

1.3 Značení kabelů

1.3.1 Základní značení kabelů

Značení udává, o jaký typ kabelu se jedná. Díky značení je možné poznat podle jednotlivých písmen parametry jako jsou:

- materiál pláště
- materiál vodičů
- jmenovité napětí kabelu
- způsob uložení kabelu
- počet a průřez žil
- druh kabelu
- technické normy, které kabel splňuje
- rok výroby



Obr. 9: Značení na plášti kabelu

Na obr. 9 je vidět značení kabelu na jeho plášti dle normy

ČSN 33 0166 ed. 2. Nyní si popíšeme a vysvětlíme jeho jednotlivé sekce. Značení začíná výrobcem, poté číselným symbolem, který označuje jmenovité napětí kabelu v kV. Silové kabely rozdělujeme podle napětí

- nn – nízké napětí do 1 kV
- sn – střední napětí 1–10 kV
- vn – vysoké napětí nad 10 kV

Po čísle následuje pomlčka, která odděluje jmenovitou hodnotu napětí kabelu od materiálu kabelu.

První písmeno určuje materiál jader:

- A – hliník
- C – měď

Druhé a čtvrté písmeno určuje materiál izolace a pláště

- N – impregnovaný papír (normální)
- M – impregnovaný papír (nemigrující)
- Y – měkčený polyvinylchlorid (PVC)
- E – polyetylén (PE)
- XE – zesítený polyetylén
- G – pryž (guma)
- H – oheň retardující, bezhalogenový materiál
- S – oheň retardující, ohniodolný bezhalogenový silikonový materiál

Třetí písmeno určuje provedení kabelu

- K – kabel pro pevné uložení
- H – vodič s obalem
- L – jádrem je lano nebo slaněný vodič
- S – strojní lano, svařovací vodič
- V – vodič pro vysoká napětí [7,8]

Dále se za výše zmíněnými značeními vyskytuje i informace o třídě požární odolnosti kabelů. Zde se vyskytují značení typu

- R – oheň retardující (oheň nešířící)
- V – oheň odolný (oheň nešířící a ohniodolný)

V závorkách je značeno rozdělení, které lze vidět na obr. 5. Udává informaci, zda se v kabelu vyskytuje žlutozelená žíla.

- J – se žlutozelenou žílou
- O – bez žlutozelené žíly

Normalizované průřezy silových vodičů a kabelů v mm²:

0,5;0,75;1,0;1,5;2,5;4;6;10;16;25;35;50;70;95;120;150;185;240;300;400;500;625

Do 25 mm² se jedná o plná jádra. Od průřezu většího než 25 mm² jde o složená jádra. Při tak velkém průřezu dochází k problému s jeho manipulací, výrobou a dochází ke skinefektu. [1,10]

1.3.2 Nařízení pro uvádění stavebních výrobků na trh (CPR)

Jedná se o systém pro zlepšení bezpečnosti budov. Vyšel v platnost 1. července 2017. Tento systém popisuje a rozděluje kabely na jednotlivé třídy podle jejich reakce na požár. „Odolnost proti ohni lze definovat jako schopnost kabelu zachovat elektrický chod instalace

při požáru.“ [10]

Rozděluje se na čtyři důležité aspekty:

1. Šíření požáru a tepla, vznikajícím při hoření samotného kabelu.
2. Uvolňování planoucích kapek.
3. Množství a hustotu uvolňovaného kouře při hoření kabelu.
4. Aciditu vznikajících plynů vznikajících pro hoření kabelu.

ad 1) Třídy kabelů:

- A_{ca} – nepřispívá požáru
- $B1_{ca}$, $B2_{ca}$ – přispívá k požáru jen minimálně
- C_{ca} , D_{ca} , E_{ca} – hořlavý, přispívá k požáru
- F_{ca} – přispívá k hoření

ad 2) poskytuje informace o odkapávání planoucích materiálů během požárů

- d0 – žádné planoucí kapky/částice
- d1 – kapky/částice planou maximálně 10 s
- d2 – nezařazeno do žádné ze shora uvedené klasifikace

ad 3) uvádí informace o hustotě uvolňovaného kouře.

- s1a – nízká tvorba kouře a jeho pomalé šíření – propustnost světla > 80 %
- s1b – nízká tvorba kouře a jeho pomalé šíření – propustnost světla > 60 % a < 80 %
- s2 – střední tvorba a šíření kouře
- s3 – nezařazeno do žádné ze shora uvedené klasifikace

ad 4) poskytuje informace o uvolňování kyselých plynů během požárů

- a1 – konduktivita < 2,5 $\mu\text{S}/\text{mm}$ a pH > 4,3
- a2 – konduktivita < 10 $\mu\text{S}/\text{mm}$ a pH > 4,3
- a3 – nezařazeno do žádné ze shora uvedené klasifikace.

Dalším v pořadí značení je CE, kterým výrobce označuje shodu mezi vlastnostmi a normou. Na kabelu se také nachází datum vyhotovení kabelu, společně s jeho orientační metráží. [10]

Při popisování kabelu na obr. 8 je možné říct, že kabel je dimenzován na jmenovitou hodnotu napětí 1 kV, jádro je tvořeno mědí. Izolace žíly je tvořena zesíťtým polyetylenem

a plášť polyetylénem. Kabel je určen pro pevné uložení, obsahuje žlutozelenou žílu a duše má 5 žil o průřezech 2,5 mm². Kabel je oheň retardující a odolný vůči UV záření. Vidíme že kabel přispívá požáru jen minimálně, má nízkou tvorbu kouře a jeho pomalé šíření, konduktivitu kyselých plynů menší než < 2,5 μS/mm a pH > 4,3 a odkapávající částice planou max. 10 s.

1.3.3 Bezhalogenové oheň retardující kabely

Jsou to bezhalogenové polymerní kabely, které mají schopnost samozhášivosti. Samozhášivost je schopnost kabelu odolávat šíření plamene. Kabel je samozhášivý tehdy, pokud vzdálíme zdroj plamene od kabelu a na kabelu do normou stanového času dochází k retardaci a k následnému zhašení plamene. Bezhalogenové znamená, že materiál neobsahuje žádný halogenový prvek, tj. chlor nebo fluor. Výhody těchto typů kabelů není pouze samozhášivost ale i během hoření nevzniká hustý optický dým ani žádné toxické a korozivní plyny. Během hoření bezhalogenové kabelu dochází k endochemické reakci, kdy během hoření kabelu se hydroxidy rozkládají na kysličníky kovů ve tvaru bílého prášku, který se usadí na povrchu kabelu a vodu, která přechází ihned v páru. Vzdušný kyslík, který je potřeba pro hoření je vytlačen vzniklou párou, přímo v plastu (PE) kabelu a kolem kabelu se vytvoří ochranná atmosféra. Dochází k procesu, kde tepelná energie odebírá energii plamene. [16, 27]

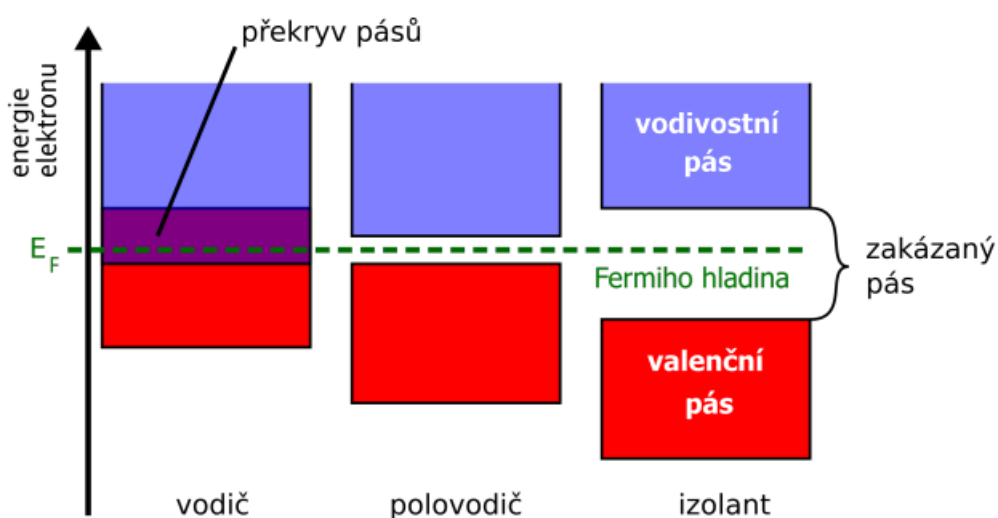
Bezhalogenové kabely jsou nejčastěji označovány:

- **FRNC** (Fire Retardant Non Corossive) – oheň retardující, nekorozivní
- **HFFR** (Halogen Free Fire Retardant) – bezhalogenový, oheň retardující
- **LS0H** (Low Smoke 0 Halogen) – nízký vývin kouře, nula halogenu
- **LSOH** (Low Smoke Non Halogen) – nízký vývin kouře, žádný halogen
- **LSZH** (Low Smoke Zero Halogen) – nízký vývin kouře, nula halogenu
- **LSFH** (Low Smoke Free Halogen) – nízký vývin kouře, nízký halogen
- **OHLS** (Zero Halogen, Low Smoke) – nula halogenu, nízký vývin kouře

1.4 Izolační vlastnosti kabelu

1.4.1 Izolant

Izolant je takové dielektrikum, které má velkou rezistivitu. Jeho hlavní vlastností je schopnost klást velký odpor průtoku elektrického proudu. Hlavním parametrem izolantů je měrný elektrický odpor ρ . Ideální izolant má nekonečně velký měrný odpor, avšak skutečný měrný odpor se pohybuje ve vysokých hodnotách v rozmezí $10^{15} - 10^{23} \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$. To znamená, že každý izolant je elektricky vodivý. Izolant se od vodivého materiálu odlišuje šířkou zakázaného pásma v teorii pásového modelu. Šířka zakázaného pásma izolantu musí být větší než 3 eV. [11]



Obr. 10: Pásový model izolantu [21]

Valenční pás zobrazuje energii valenčních elektronů a vodivostní pás je tvořen energií uvolněných elektronů. Čím větší je šířka zakázaného pásma, tím větší musí být energie valenčního pásma, k překonání zakázaného pásma. [12]

1.4.2 Elektrická pevnost izolantů

Elektrická pevnost je schopnost zachovávat si elektroizolační kvalitu (odolávat průrazu). Při překročení maximální intenzity elektrického pole dojde k průrazu izolantu a vytvoří se trvalý vodivý kanál. Elektrickou pevnost označujeme E_p a základní jednotkou je $\frac{\text{V}}{\text{m}}$. Je dána vztahem: [12]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad \left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right) \quad , \quad (3)$$

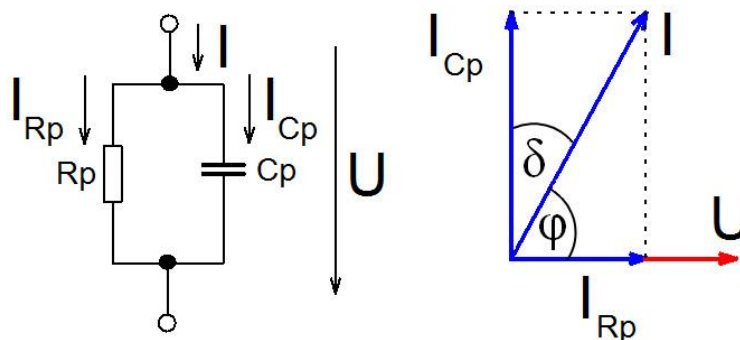
kde U_p je hodnota napětí při průrazu (V) a d je tloušťka izolace (m).

Druhy průrazů:

- Elektrický – je způsobený vysokou intenzitou elektrického pole.
- Tepelný – průraz je vyvolaný ohřevem dielektrika v důsledku dielektrických ztrát.
- Elektrochemický – vlivem stárnutí materiálů. [12]

1.4.3 Ztrátový činitel $\tan \delta$

Ztrátový činitel slouží k posuzování ztrát dielektrika. Uvádí se hlavně u kondenzátorů. Je dán dvěma ztrátovými složkami: ztráty závislé na kmitočtu a ztráty způsobené svodem mezi elektrodami. Svod je unikající proud, jenž je způsoben nedokonalostí izolace (neexistuje izolant s nekonečným izolačním odporem). Když porovnáme schéma kondenzátoru a kabelu, poznáme že se jedná o stejné schéma (platí pro nf). Na obr. 10, lze pozorovat obě výše zmíněné ztrátové složky. Z fázorového diagramu je vidět, že ztráty jsou nulové, pokud je ztrátový úhel $\delta = 0$. Ztrátový činitel se uvádí v tabulkách a jeho obvyklé hodnoty jsou 10^{-1} - 10^{-5} . [12,23,24]



Obr. 11: Náhradní schéma kabelu a fázorový diagram [24]

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{\omega C U} = \frac{1}{\omega C R} \quad (-), \quad (4)$$

1.4.4 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti udávají maximální jednotlivé mechanické zatížení, jak vodiče, tak izolačního materiálu. Jedna z hlavních mechanických vlastností je v pevnost v tahu. Pevnost v tahu je měřena pomocí tzv. trhačky. Vzorek se umístí do upínacích čelistí, které se od sebe definovanou rychlostí postupně vzdalují. Konečné mechanické napětí před roztrhnutím materiálu je pevnost tahu materiálu udáváná v MPa nebo N/mm². Další velice důležitou vlastností izolace je tažnost. Tažnost je udávána v mm nebo procentech a udává nám o kolik se materiál protáhne oproti původní podobě, do jeho přetrhu.

1.4.5 Tepelné třídy izolantů

Dle normy ČSN EN 60085 ed. 2 dělíme elektrickou izolaci do tepelných skupin. Na vodiči vznikají ztráty, které mají charakter tepla:

$$Q = R \cdot I^2 \quad (J), \quad (5)$$

kde R je odpor vodiče (Ω) a I je proud procházející vodičem (A).

Měrné tepelné ztráty q v jednotkách $\left(\frac{W}{m^3}\right)$ pro kulatý vodič:

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{R \cdot I^2}{\pi \cdot r^2 \cdot l} \left(\frac{W}{m^3}\right) \quad , \quad (6)$$

kde R je odpor vodiče (Ω), I je proud procházející vodičem (A), r je poloměr vodiče (m), l je délka vodiče (m).

Bilanční rovnice:

$$q \cdot V \cdot dt = \alpha \cdot S \cdot \theta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\theta \quad , \quad (7)$$

kde q jsou měrné tepelné ztráty $\left(\frac{W}{m^3}\right)$, V je objem (m^3), dt je změna času (s), α je ochlazovací konstanta $\left(\frac{W}{^\circ\text{C} \cdot m^2}\right)$, S je ochlazovací povrch (m^2), θ oteplení vodiče ($^\circ\text{C}$), c je měrné teplo $\left(\frac{W}{^\circ\text{C} \cdot m^3}\right)$ a $d\theta$ je teplotní změna ($^\circ\text{C}$).

Po dalších úpravách dostáváme vztah pro oteplení vodiče v ustáleném stavu:

$$\theta = \frac{4 \cdot \rho \cdot I^2}{\alpha \cdot \pi^2 d^3} \quad (^\circ\text{C}) \quad , \quad (8)$$

kde ρ je měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot m$), I je proud protékající vodičem (A), α je

ochlazovací konstanta $\left(\frac{W}{^{\circ}C \cdot m^2}\right)$, d je průměr vodiče v (m).

Na základě z výpočtu ze vztahu (8) jsme schopni určit maximální oteplení vodiče. Je potřeba ke vztahu pro oteplení vodiče přičíst teplotu okolí a uvažovat jeho způsob a typ zatížení a uložení. Dle toho vybrat vhodnou tepelnou třídu izolace. Při překročení maximální teploty třídy tepelné izolace může dojít k poškození izolace vlivem nadměrného oteplení vodiče. Pokud je vodič zatěžován dlouhodobě na více než jeho dovolenou maximální teplotu, tak dochází ke zkrácení jeho životnosti. [12]

Tab. 2: Tepelné třídy [12]

Písmenné označení	Y	A	E	B	F	H	N	R	-
Tepelná třída (°C)	90	105	120	130	155	180	200	220	250

1.4.6 Stárnutí izolace

Izolace vzhledem k jejímu uložení má svoji životnost. Na izolaci působí několik různých faktorů jako je např. teplo, aromatické účinky ropných látek, různé druhy záření, ozón, které životnost izolace zásadně ovlivňují. Každé prostředí tedy klade na kabel jiné nároky a kabel musí v tomto prostředí spolehlivě fungovat po dobu předpokládané životnosti určené výrobcem, normou nebo předpisem. Tato doba je obvykle 40 let plné funkceschopnosti při provozu.

Jelikož je 40 let dlouhá doba, aby se ověřilo, zda kabel splňuje předepsanou životnost provádí se tzv. zrychlené stárnutí. Zrychleného stárnutí můžeme dosáhnout několika způsoby jako je např. tepelné, elektrické, mechanické stárnutí. Princip spočívá v tom, že daný vzorek řízeně nadměrně zatěžujeme, oproti běžnému zatížení. Může se tedy jednat o zrychlené tepelné stárnutí, kde nám předpis, respektive norma udává, pro jaký materiál a jak dlouho materiál zatěžovat pomocí zrychleného stárnutí při dané teplotě. Postup je dán normou ČSN EN 60811-401.

1.5 Izolační materiály používané v kabelové technice

Díky různým izolačním materiálům můžeme kabel dimenzovat na různá prostředí a zatížení. Každý izolační materiál má specifické vlastnosti. Hlavními požadavky na materiál izolace jsou:

- vysoký měrný odpor
- vysoká teplotní odolnost
- vysoká elektrická pevnost
- dobré mechanické vlastnosti
- odolnost proti vlhkosti, UV záření a dalším zářením a vlivům
- dlouhá životnost

1.5.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen je tzv. termoplast. Termoplasty jsou takové plasty, které s vyšším teplem, ztrácejí pevnost. Polyethylen se vyrábí polymerací v plynné fázi, suspenzní, emulzní a roztokovou polymerací za vysokého tlaku. Polymerace je chemická reakce, při níž následkem uvolnění dvojných vazeb monomeru vzniká vysokomolekulární látka. Polyethylen má velice dobré elektroizolační vlastnosti, na který nemá vliv změna teploty ani vlhkost. Proto se může využívat pro vyšší jmenovité napětí než PVC. Tento materiál má výborné i mechanické vlastnosti, zejména se jedná o jeho ohebnost, rázovou houževnatost. Zároveň je při běžných podmínkách odolný vůči vodě a dalším chemickým účinkům. Polyethylen rozdělujeme na dva druhy lineární (HDPE) a rozvětvený (LDPE). Lineární se označuje jako vysoko hustotní polyethylen, a naopak rozvětvený jako nízko hustotní. Jedná se o jeden z nejvyužívanějších izolačních materiálů v kabelové technice. Používá se jako materiál pro plášť (2.1.5) a pro izolaci žíly (2.1.3). Využívá se pro silové a sdělovací kabely. Polyethylen má i svoje nevýhody. Velký problém je hořlavost, kde kvůli uvolňování planoucích kapek přispívá k požáru, tepelné omezení, oxidace a nízká pevnost v tahu. [13,15]

1.5.2 Zesítený polyethylen (XLPE)

Zesítený polyethylen je výsledkem hledání odolnější varianty polyethylenu. Zesítení polyethylenu se dosáhne pomocí procesu nazývaného jako vulkanizace. Vulkanizace je chemický proces, kde pomocí přidávání malého množství přísad dosáhneme, že řetězce makromolekul jsou vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí trojrozměrnou

prostorou síť. [13] Tento chemický proces nám pomůže dosáhnout lepších vlastností polyethylenu. Zejména se jedná o lepší stabilitu při vyšších teplotách a na základě vyšší odolnosti můžeme zvýšit jmenovité zatížení kabelu. Proto se zesíťovaný polyetylen upřednostňuje před PVC. U XLPE můžeme mít stejné jmenovité zatížení s menším průřezem jádra, než je u PVC. [14, 15]

1.5.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je stejně jako polyetylen termoplast. Společně s polyethylenem je nejvíce vyráběným syntetickým plastem. Polyvinylchlorid je jednoduchý vyrobit a zpracovat. Vyrábí se hlavně pomocí suspenzní polymerace a výrobek je v práškové podobě. Pro kabelovou techniku se dále zpracovává do granulátu. Polyvinylchlorid je dobře chemicky odolný. Odolává neoxidujícím kyselinám, benzínu a minerálním olejům. Další jeho výhodou je jeho vysoká pevnost v tahu. PVC má spoustu modifikací, ale kvůli procesu opláštění existuje měkčené PVC (Novoplast), které oproti neměkčenému PVC (Novodur) vyniká lepší tažností, zpracovatelností a ohebností. Změkčovadla snižují elektrické vlastnosti izolace, což jsou v kabelové technice nejdůležitější vlastnosti, proto se do směsi měkčeného PVC přidávají stabilizátory a barviva. Nevýhodou PVC je jeho teplotní odolnost a při zasažení požárem uvolňuje PVC velké množství agresivních a jedovatých zplodin (chlorovodíků) z hoření. Dlouhodobě lze užívat pouze do teploty 60 °C. [14, 15]

1.5.4 Etylenpropylenové kaučuky (EPR)

Etylenpropylenové kaučuky se označují zkratkou EPR. Patří do třídy elastomerů, což jsou takové polymery, které lze lehce deformovat a po působení deformační síly se obnoví do původního stavu. Vyrábí se pomocí roztokové kopolymerací za přítomnosti Zieglerových – Nattových katalyzátorů. Základním typem se rozlišují podle hmotnostního poměru etylen – propylen. U typu nasyceného kopolymeru etylen s propylenem se označuje EPM. Hmotnostní poměr se u tohoto typu pohybuje od 1:1 do 3:1. Druhým typem etylenpropylenových kaučuků je EPDM. Výhodou EPDM spočívá v širším způsobu vulkanizace. EPDM lze vulkanizovat pryskyřicemi, sírou i peroxidy, zatímco EPM, lze vulkanizovat pouze za použití peroxidů. Tyto zmíněné typy vynikají díky odolnosti vůči stárnutí na povětrnosti, v kyslíku a ozonu. Oba typy jsou používány pro opláštění kabelů, kde je požadavek na odolnost vůči stárnutí. [14, 13]

1.5.5 Polyuretan (PUR)

Polyuretan je termoplast a patří do skupiny polyestamiradů. Polyestamirady jsou chemické kombinace polyesterů a polyamidů. Polyuretany mají nižší navlhavost, lepší elektroizolační vlastnosti, větší odolnost vůči vodě a povětrnosti než polyamidy. Je možné vyrábět tuhé, měkké, lineární a síťované polyuretany. Díky velkému množství variant polyuretanu dokážou zahrnout velkou škálu vlastností. Nejzákladnější je však vlastnost odolávat oděru a dobrá adheze k jiným materiálům. V mechanických vlastnostech vyniká velice dobrou pevností v tahu a tažností. [14, 13]

1.5.6 Polyamid (PA)

Polyamid patří stejně jako polyuretan do skupiny polyestamiradů a jedná se o termoplast. Jak už bylo zmíněno u polyuretanu, polyamid má menší tažnost, podobné mechanické napětí, větší měrný odpor a lepší odolnost vůči ohni.

Tab. 3: Vlastnosti jednotlivých izolačních materiálů [17]

Označení				Vlastnosti		
kód	Chemický název	VDE	přípustná provozní teplota dle VDE (°C)	mechanické		
				pevnost v tahu (MPa)	tažnost (mm)	reakce při oděru
	Termoplasty					
PVC	směsi polyvinylchlorid	Y	70-105	12,5-25	125-300	prům. dobrá
LDPE	vysokotlaký polyethylen	2Y	70	10-20	400-600	prům. dobrá
HPE	nízkotlaký polyethylen	2X	90	25-40	500-1000	dobrá
VPE	síťovaný polyethylen	2X	90	12,5-20	300-450	prům. dobrá
PA	polyamid	4Y	80	50-60	50-200	velmi dobrá
PUR	polyuretan	11Y	80	35-50	500-700	velmi dobrá
Označení		Vlastnosti				
kód	tepelné			elektrické		
	reakce v chladu	odolnost proti plameni	korozivní plyny v případě požáru	vnitřní izolační odpor	permitivita	ztrátový činitel
PVC	slabší-dobrá	průměrná-dobrá	chloro-vodík	10^{12} - 10^{15}	4-6,5	10^{-2} - 10^{-3}
LDPE	dobrá	špatná	-	$> 10^{16}$	2,25-2,6	10^{-4}
HPE	dobrá	špatná	-	$> 10^{16}$	2,4-2,5	10^{-4}
VPE	dobrá	špatná	-	10^{16}	2,3-2,6	10^{-4}
PA	dobrá	dobrá	-	10^{15}	4	10^{-2} - 10^{-3}
PUR	dobrá	slabší-prům.	-	10^{12}	6	10^{-2}

1.6 Přehled silových VN a NN kabelů

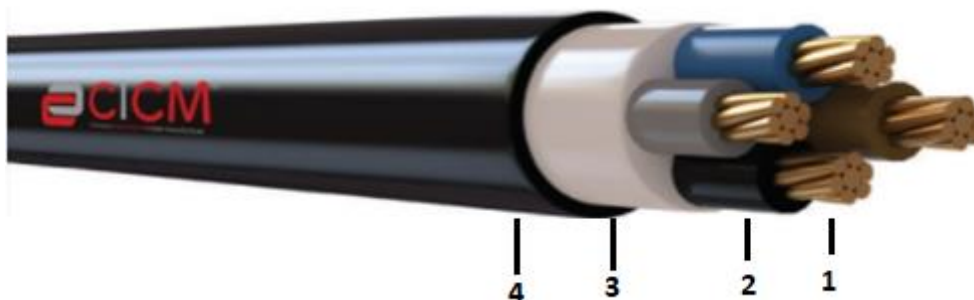
V této části popíšu nejčastěji používané kabely typu NN, SN a VN.

6-AYKCY



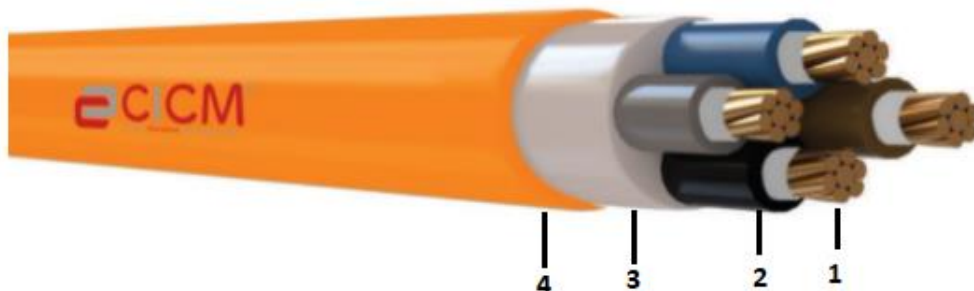
1, Al jádro 2, PVC izolace 3, výplň 4, PVC ochrana 5, stínění z Cu pásky 6, výplň 7, PVC plášť (odolný vůči UV záření)

1-CYKY

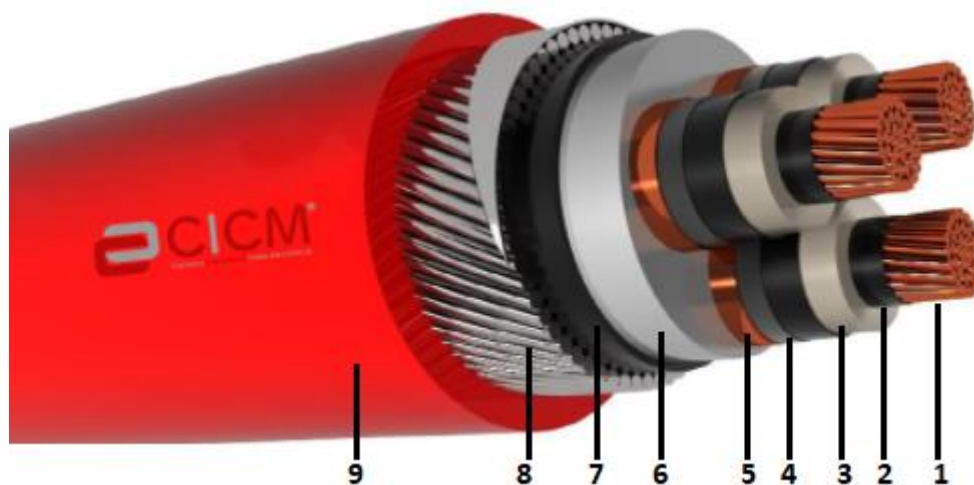


1, Cu jádro 2, PVC izolace 3, výplň 4, PVC plášť (odolný vůči UV záření)

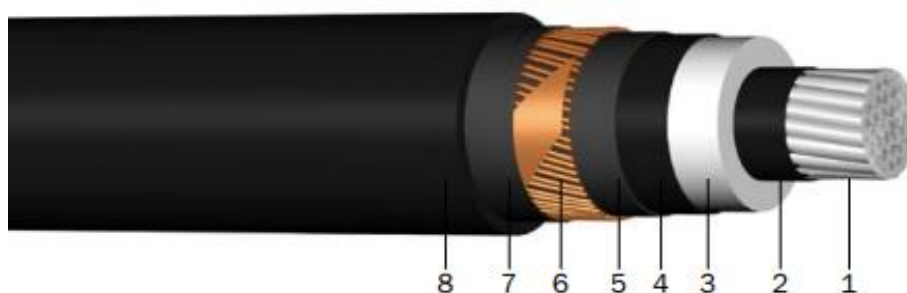
1-CXKE-V



1, Cu jádro 2, XLPE izolace 3, LZSH výplň 4, XLPE LZSH plášť (oheň odolný)

18-CXEKCH

1, Cu jádro 2, vnitřní polovodivá vrstva 3, XLPE izolace 4, vnější polovodivá vrstva 5, stínění Cu dráty a Cu páska 6, XLPE LZSH výplň 7, XLPE vnitřní plášť 8, armování galvanizovanými ocelovými dráty 9, XLPE LSZH plášť

22-AXEKVCEY

1, Al jádro 2, vnitřní polovodivá vrstva 3, XLPE izolace 4, vnější polovodivá vrstva 5, polovodivá vodoblokující páska 6, stínění Cu dráty a Cu páska 7, polovodivá vodoblokující páska nad stíněním 8, PE + PVC plášť

Přehled a vyobrazení VN a NN kabelů čerpán od společnosti CICM, s. r. o [4] a PRAKAB PRAŽSKÁ KABELOVNA, s. r. o [33]

2 Zkoušky a diagnostika kabelů

Zkoušky kabelů ověřují shodu vlastností kabelu s požadavky norem, zatímco diagnostika slouží k posuzování stavu životnosti kabelu nebo lokalizovat místa poruchy. Nejdůležitější je tzv. typová zkouška. Tato zkouška v sobě zahrnuje všechny zkoušky požadované normou. Provádí se při různých změnách jako např. změna materiálů, změna směsi atd. Další zkouškou je zkouška výběrová, kde se zkouší dané parametry, a to na základě dané četnosti. Posledním typem je zkouška kusová. Je to zkouška, kde se ověřují parametry výrobku. Jde např. o měření tloušťky izolace. [18]

Zkoušek a metod zkoušení společně s diagnostikou kabelů je veliké množství. V této práci se budu zabývat mechanickými zkouškami izolace pro NN a VN kabely, kde stárnutí kabelu hraje významnou roli a uvedu základní elektrické a mechanické zkoušky. Poté se budu věnovat VLF a DAC zkouškám pro kabely VN.

2.1 Elektrické zkoušky

Tento typ zkoušek potřebuje pro svou správnou funkci zdroj elektrického napětí a proudu. Za pomoci těchto zkoušek měříme elektrické vlastnosti jako je např. ztrátový činitel, částečné výboje, elektrický odpor atd.

2.1.1 Elektrický stejnosměrný odpor jádra

Elektrický odpor je již zmiňován u izolace. Naopak od izolace by měl být měrný odpor co nejmenší, aby se zamezilo Joulovým ztrátám a nadměrnému ohřívání vodiče a následně i celku. Zkouška probíhá následujícím způsobem: definovaná délka vodiče se vloží do měřicího přístroje, svorky se přiloží na konce vodiče a změří se odpor pomocí mikroohmetru. Přesahuje-li hodnota odporu maximální hodnotu odporu stanovenou normou, je jádro nevyhovující a nelze jej použít.



Obr. 12: Zařízení pro měření odporu jádra

2.1.2 Zkouška napětím na hotovém kabelu

Pokud kabel nemá kovovou vrstvu ponoří se do vody. Kabel je po danou časovou dobu vystaven zatěžovacímu stejnosměrnému napětí, které je dáno normou kabelu. Napětí se přikládá mezi zkoušené jádro a skupiny jader, tak aby se izolace zkoušela proti všem sousedním žilám a kovové vrstvě, která je uzemněna. Zkouška je úspěšná nedojde-li k průrazu izolace, jak udává norma ČSN EN 50395 část 6.

2.1.3 Zkouška izolačního odporu

Izolační odpor je činný odpor izolace. Je to odpor mezi dvěma vodiči nebo vodičem a zemí. Hodnota $1 \text{ k}\Omega$ na 1 V při 1 m délky tzn. pro kabely do 1 kV musí být izolační odpor, alespoň $1 \text{ M}\Omega$ na 1 m . Zkouška se provádí na kabelu dlouhém 5 m , na kterém byla provedena zkouška napětím na hotovém kabelu. Vzorek se ponoří do zahřáté vody na dobu a teplotu dle normy kabelu. Konce vzorků musí vyčnívat alespoň 250 mm mimo vodu. Jádro vzorku se zatíží stejnosměrným napětím o hodnotě $80\text{--}500 \text{ V}$. Izolační odpor se změří mezi všemi sousedními jádry. Vzorek je úspěšný nenaměří-li se hodnota izolačního odporu menší, než stanovuje norma kabelu.

2.1.4 Kontrola celistvosti izolace

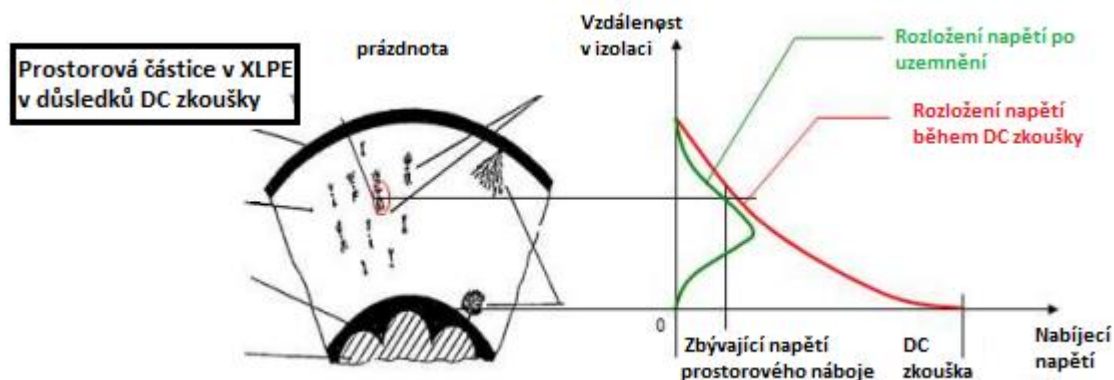
Jedná se o napěťovou zkoušku v závěrečné fázi výroby. Může se jednat o výrobní délku nebo dodávanou délku. Kabel musí být v suchém stavu a mít teplotu okolí. Dnes je typické že se zkouška provádí tzn. Sparktesterem. Za chodu linky je kabelová žíla vytlačovaná z extruderu a před navíjecím mechanismem vystavena pomocí vhodně umístěnými elektrodami vysokému napětí, kde se ověřuje, zda nedošlo k průrazu izolace.



Obr. 13: Sparktester Zumbach AST

2.2 Zkouška velmi nízkou frekvencí (VLF)

Zkoušky velmi nízkou frekvencí se používají pro zkoušení podzemních kabelů středního a vysokého napětí. VLF se zavedlo na základě rozporu stejnosměrného zkoušení napájecích kabelů s izolací PE a XLPE. Stejnosměrná zkouška byla velice spolehlivá metoda zkoušení, ale později při zavedení XLPE izolace se zjistilo, že zkouška stejnosměrným napětím neodhalila skryté poruchy v XLPE izolaci. Zkouška střídavým napětím není realizovatelná z důvodů nedostatečného výkonu při síťové frekvenci 50 Hz a rozměrů zařízení. Při stejnosměrném zkoušení vznikaly v polymerním materiálu uzavřené prostorové náboje, které mají škodlivý vliv na elektrickou pevnost. Přestože zkouška proběhla úspěšně, tak po opětovném napájení kabelu došlo brzy k poruše. Prostorové náboje se při zkoušce se stejnosměrným napětím rozloží po délce kabelu mezi žílu a plášť. V dutinkách, které se v určitých místech jeví jako miniaturní kondenzátory, se může nashromáždit energie. Po dokončení stejnosměrné zkoušky se žíly uzemní, ale náboje uložené v dutinkách si svoji energii mohou zachovat, díky vysoce izolačnímu materiálu XLPE. Při zapnutí kabelu může dojít k přetížení míst s dutinkami a kabel může brzy selhat. [22]



Obr. 14: Prostorové náboje v dutinkách XLPE [22]

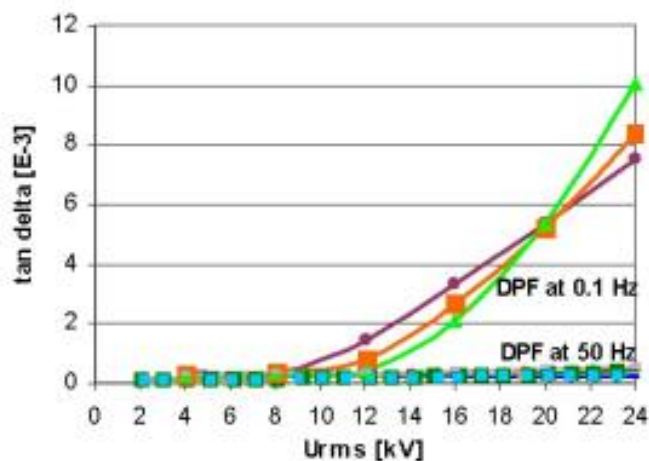
VLF napětí je definováno jako zdroj adekvátního vlnění pro provozní zkoušky VN. Jedná se o celosvětově nejrozšířenější provozní zkoušku a diagnostickou metodou zprovožňování a údržby SN a VN aplikací. Zkušební zdroje napětí generují sinusový, respektive kosinus-obdélníkový signál o frekvenci 0,01 – 1 Hz při různé velikosti napětí, pro dosažení vysoké zkušební kapacity. Zkušební metoda využívá nejčastěji střídavé napětí o frekvenci 0,1 Hz s hodnotou napětí vyšší, než je jmenovitá hodnota napětí kabelu po určitou dobu. Frekvence nižší než 0,1 Hz jsou užitečné v případě, přesahuje-li délka kabelového systému omezení zkušebního zařízení se zdrojem 0,1 Hz. Při této frekvenci je potřeba zvážit prodloužení doby zkoušky a počet cyklů pro dosažení dostatečného počtu vyvolání průrazů. Tato metoda vyčnívá mezi ostatními metody hlavně kvůli následujícím důvodům:

- hmotnost a rozměry zkušebních zařízení
- mobilita při použití v terénu
- vyšší účinnost než stejnosměrné zkoušky
- citlivost a přesnost měření ztrátového činitele
- zkoušení a diagnostika v souladu s normami [22]

2.2.1 Měření ztrátového činitele

Již zmíněný ztrátový činitel udává reálné ztráty v dielektrickém materiálu. Měření ztrátového činitele posuzuje spíše všeobecný stav kabelového systému než dielektrické ztráty způsobené poruchou. Izolační systém je dán modelem na obr. 10, kde celkový proud tvoří součet proudu protékajícího kondenzátorem a proudu protékajícího odporem. Ze vztahu (4) je vidět, že jsou dielektrické ztráty kmitočtově závislé. Měření velmi nízkou frekvencí nám zvyšuje citlivost měření oproti frekvenci 50 Hz, jak je vidět na obr. 14. Bohužel vzhledem k rozdílným ztrátám při frekvenci 0,1 Hz a 50 Hz není možné tyto

hodnoty společně porovnávat. Tato metoda je doporučena za účelem kontroly stavu izolace zatížené vysokým napětím a tvarem vlnění předepsaný normou IEC 60060-3. Diagnostické zkoušky jsou běžné od úrovně napětí $0,5U_0 - 2U_0$. Důležité je upozornit na to, že napětí by nikdy nemělo přesáhnout vyšších hodnot, než je uvedeno výrobcem. Může dojít k trvalému poškození izolace na základě neznalosti stavu izolačního kabelového systému. [22]



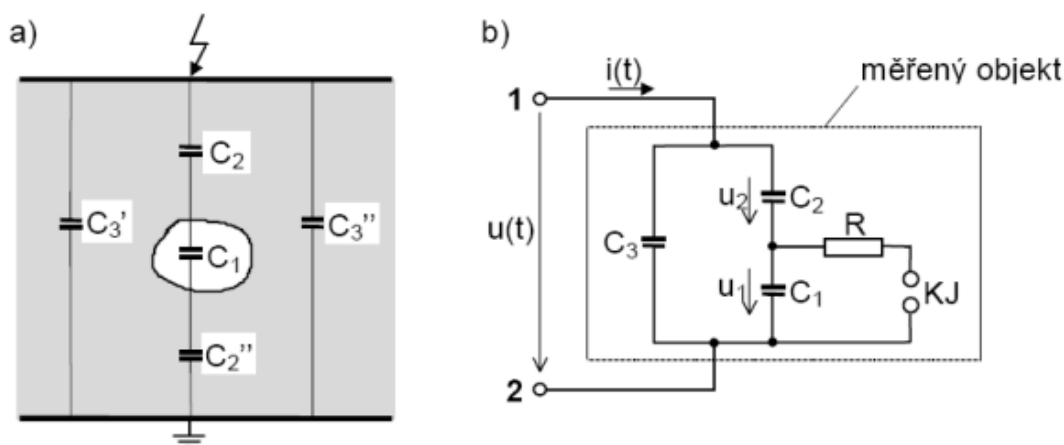
Obr. 15: Rozdíl citlivost při měření 0,1 Hz a 50 Hz [22]

Zvyšující se hodnota ztrátového činitele v průběhu času může znamenat degradaci kabelu. Tato degradace je zapříčiněna tzv. vodními stromečky, jež jsou hlavním faktorem životnosti kabelu. Jedná se o kanálkovité útvary, které se rozvíjejí do větví v izolačním materiálu a jejich rozvoj trvá několik let. Jsou způsobeny vlhkostí a elektrickým polem v místě poruchy a zvyšují svod kabelu. Mohou se vyskytovat po celé délce kabelu, ale na rozdíl od částečných výbojů je nelze lokalizovat. Kritická situace nastává v případě, že se ve špičkách vodních stromečků začnou tvořit částečné výboje, které vyprodukují elektrický stromeček, kde působí již samostatné částečné výboje bez vlhkosti. Jakmile se ztrátový činitel dosáhne mezních hodnot a mění se s napětím, lze brát kabel jako narušený a plánovat jeho výměnu. [22]

2.2.2 Měření a lokalizace částečných výbojů

Částečný výboj je elektrický výboj, který částečně přemostuje izolaci mezi elektrodami, které jsou na různých potenciálech. Způsobují elektrické namáhání uvnitř izolace, na povrchu izolace nebo v dutinkách izolace. Vytvářejí proudové impulzy s velice krátkou dobou trvání $\sim 1 \mu\text{s}$. Částečné výboje způsobují degradaci a zbytečné zatěžování izolace kabelu, což způsobuje zkrácení doby životnosti a spolehlivosti kabelu. Částečné výboje

můžeme rozdělit na tři základní skupiny. Jedná se o částečné výboje vnitřní, vnější a povrchové. V kabelové technice se zabýváme zejména těmi vnitřními. Jsou to částečné výboje v plynech, které jsou obklopeny pevným dielektrikem. [25,22]



Obr. 16: Jednoduchý model a náhradní schéma ČV [25]

Na obr. 15 je znázorněn jednoduchý model částečného výboje. C_1 je kapacita plynové dutinky, C_3 je velká kapacita dielektrika, která je dána paralelním součtem C_3' a C_3'' , C_2 je zbytková kapacita zdravé izolace v sériovém spojení s plynovou dutinkou (sériové spojení $C_2' + C_2''$). KJ označují kulové jiskřiště a odpor R charakterizuje výbojové cesty po přeskoku na KJ. Částečné výboje působí čtyřmi účinky: [25]

- **Elektrické** – vznikem oblouku v dutince se může vytvořit vodivá dráha. V oblasti vodivé dráhy se začne koncentrovat elektrické pole a může dojít k elektrickému průrazu.
- **Erozivní** – v místě výboje do stěn dielektrika narážejí ionty a elektrony a dochází k rozšiřování dutinky, což může vést k průrazu.
- **Chemické** – výboje vytvářejí ozon, v případě, že je uvnitř dutinky kyslík a následně dochází ke zvětšení oxidačních účinků a dojde k chemické destrukci dielektrika
- **Tepelné** – opakovaným působením výbojů se dielektrikum otepluje a tím klesá elektrická pevnost. Tento účinek může vést k tepelnému průrazu.

Termoplasty jako je XLPE, PE a PVC jsou velice citlivé na částečné výboje. V izolaci se vždycky v různém podílu vyskytují nehomogenity, které mají větší elektrickou vodivost než samotná izolace. Částečné výboje kromě elektrických efektů, produkují efekty optické, zvukové a chemické. Proto můžeme pro měření použít i jiné měřicí metody, než jsou metody elektrické. Základním parametrem je zdánlivý náboj q , udává se v pC. Je to unipolární náboj,

který, je-li injektován ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu v předepsaném zkušebním obvodu, který by měl na měřicím přístroji způsobit stejnou výchylku, jako vlastní proudový impulz ČV. Dalšími důležitým parametrem je četnost impulzů, jedná se o počet zaznamenaných impulzů ČV za daný časový interval. Napětí při vzniku ČV, je takové napětí, při kterém začíná aktivita ČV. V případě že je toto napětí nižší nebo rovno jmenovitému napětí kabelu, dochází k trvalému vzniku částečných výbojů v kabelu a kabel se trvale poškozuje. Zhášecí napětí ČV, je takové napětí, při kterém zaniká aktivita ČV. [25]

Částečné výboje lze lokalizovat v kabelových úsecích, spojích nebo koncokách. Impulzy částečných výbojů jsou závislé na útlumu kabelu. Velikost částečných výbojů proto závisí na vzdálenosti částečných výbojů od zdroje měřicího zařízení. Proto je možné částečné náboje lokalizovat na základě časové prodlevy mezi prvním a odraženým impulzem. Výsledek měření je zobrazen na obr. 17. [25,22]



Obr. 17: Lokalizace ČV [22]

2.2.3 Zátěžová zkouška VLF

Cílem této zkoušky je ověření integrity kabelu. Pokud je kabel vadný, prokáže se jeho porucha při větším napětí, než je jmenovité napětí. Elektrické stromečky začnou v izolaci růst do té doby, než dojde k úplnému průrazu.

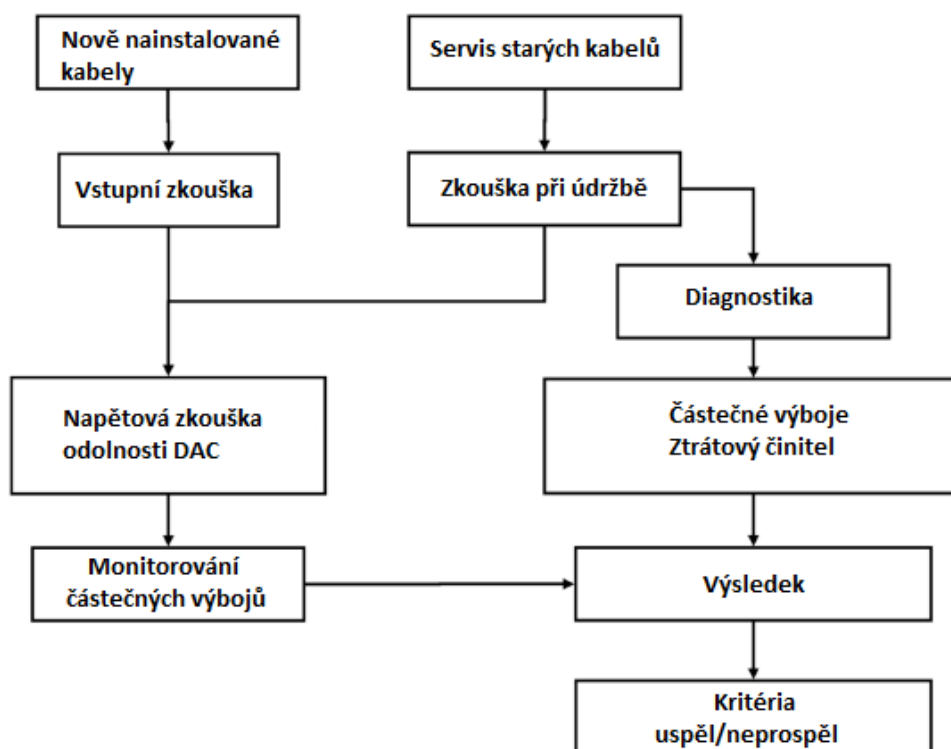
Pro tuto zkoušku se používají kosinus-obdélníkové a sinusové průběhy. Doba selhání kabelu se může lišit na základě odlišných izolačních materiálů a rychlosti růstů elektrických stromečků v jednotlivých materiálech. Úrovně napětí jsou dány nejpoužívanějšími celosvětovými postupy od méně než $2U_0$ až $3U_0$, kde U_0 je efektivní hodnota fázového napětí. Zvýšením napětí nad $3U_0$ a zkrácení časové délky neodpovídá hodnotám, při nižším napětí a delší časové zkoušky. Minimální délka zkoušky pro frekvenci 0,1 Hz je 30 min, pro již zestárlé kabely, 60 min pro nově nainstalované kabely. [29]

2.3 Zkouška tlumeným střídavým proudem (DAC)

Obdobně jako VLF zkouška má zkouška tlumeným střídavým proudem výhody, co se týče rozměrů měřicího zařízení. DAC zkouška je úspěšně využívána již přes 20 let, poprvé byla zmíněna na konferenci Jicable v roce 1999.

Zkouška DAC je rozdělena na 3 typy zkoušek:

- vstupní zkouška – pro nově nainstalované kabelové systémy.
- zkouška při údržbě – pro kabelové systémy, které jsou odstaveny
- diagnostická zkouška – pravidelná zkouška za účelem zjištění stavu životnosti kabelového systému



Obr. 19: Možnosti zkoušek DAC [28]

Napěťová zkouška za pomoci tlumených kmitů se skládá ze tří fází. První část je tzv. **nabíjecí fáze**. Během této části zkoušky je kabelový systém zatěžován stejnosměrným napětím. Může se jednat o napětí záporné či kladné. Doba nabíjení kabelového systému je závislá na maximálním dostupném zatěžovacím proudu napájecího zdroje, zkušebnímu napětí a kapacitě kabelového systému. Po dosažení zkušebnímu napětí se sepne VN spínač (obr. 18) a v kabelovém systému již není ustálený stav, to znamená, že je velice málo

pravděpodobné, že by v izolaci vznikl prostorový náboj.

Přepínací fáze je další částí napěťové DAC zkoušky. Po dosažení zkušebního napětí pomocí stejnosměrného napětí se velmi rychle sepne VN spínač. Doby sepnutí se pohybují v hodnotách menších než 1 μ s. Tato spínací doba je nezbytná pro zamezení spínacích přepětí a poruchy měření částečných výbojů. Na základě přechodného jevu a LC rezonance vznikne aperiodický děj.

Poslední fází je **LC tlumená kmitající fáze**. LC rezonance vznikne při jmenovité frekvenci obvodu. Rezonance dosáhneme, když připojíme vysokonapěťový induktor s takovou hodnotou sériově ke kapacitě kabelového systému, aby vznikla přirozená rezonance. Pro výpočet velikosti hodnoty induktoru lze použít vztah (9). [26, 28]

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot C}, \quad (9)$$

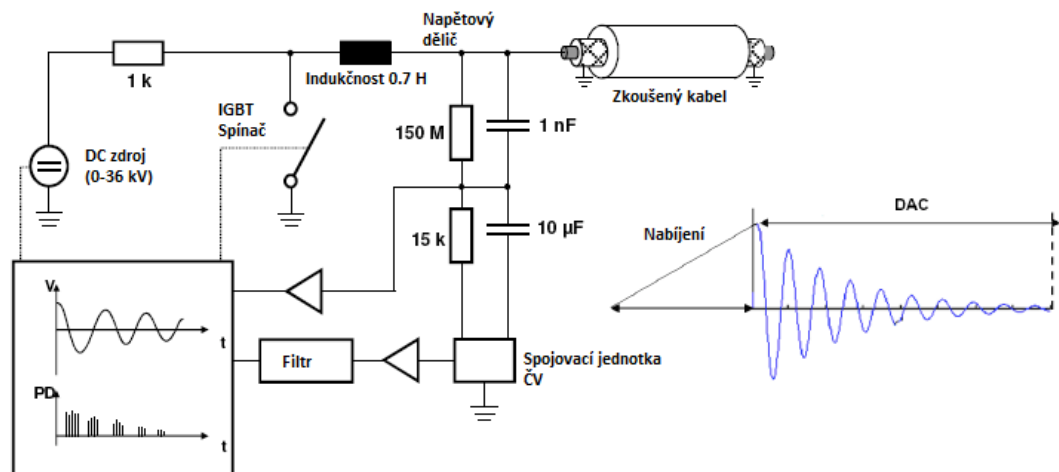
kde L je indukčnost (H), C je kapacita (F), f je rezonanční (jmenovitá) frekvence (Hz)

Útlum kmitů je nepřímo úměrný ztrátám v kabelu, ztrátám v přídavné indukčnosti a ztrátám v testovacím zařízení.

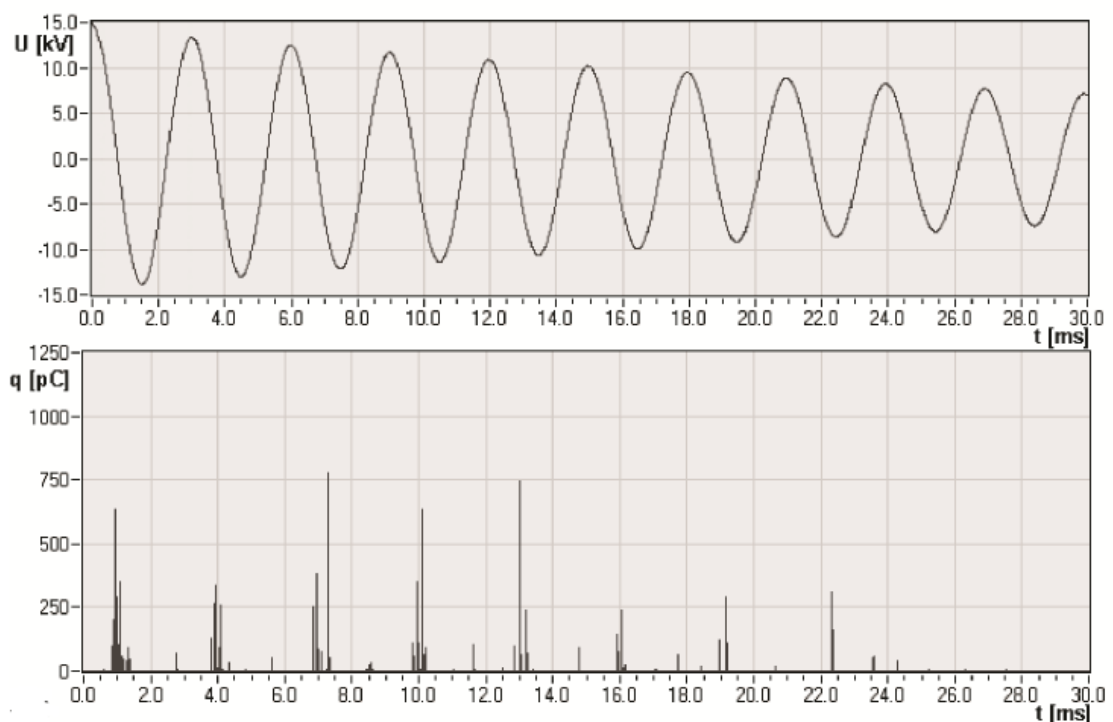
Malé rozměry DAC měřicího systému oproti AC zkoušce je zapříčiněno nepřítomností AC zdroje. DAC zkouška totiž napodobuje střídavý průběh pomocí přirozené LC rezonance. Zkoušecí napětí může dosáhnout špičkového napětí 300 kV s rozsahem frekvencí 20-500 Hz. Pomocí této zkoušky, lze zkoušet a diagnostikovat kabely s jmenovitým napětím až do 230 kV. [26, 28]

2.3.1 Měření částečných výbojů pomocí DAC

Na základě DAC zkoušky je možné s velkou citlivostí detekovat částečné výboje a jejich lokalizace za pomoci reflektometrie v časové oblasti. Při měření dlouhých kabelových systému a pro dosažení citlivé detekce a lokalizace částečných výbojů, lze danou citlivost zlepšit měřením na obou stranách kabelového úseku. V případě jednostranné lokalizace částečných výbojů je celková vzdálenost pulzu částečného výboje dvojnásobkem délky kabelu. Při oboustranným měřením částečných výbojů musí částečné výboje na blízkém konci cestovat pouze na vzdálený konec, aby tam byl detekován, čímž se zmenší vzdálenost pouze na jednonásobek délky kabelu. To přinese zlepšení citlivosti až o 200 %. [26] Z měření částečných výbojů získáme informace o amplitudě ČV, velikosti zhášecího napětí, závislost ČV na napětí.



Obr. 20: Schéma DAC zkoušky

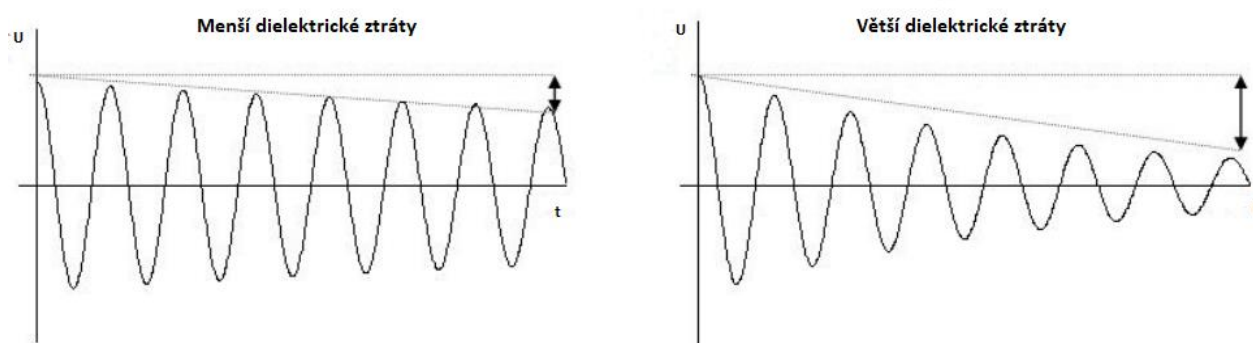


Obr. 21: Měření ČV [28]

2.3.2 Měření ztrátového činitele pomocí DAC

Ztrátový činitel lze určit na základě průběhu DAC zkoušky, kde sledujeme velikost útlumu. Dielektrické ztráty rostou společně se stárnutím materiálu. Toto měření lze použít pro diagnostické účely. Na základě tohoto měření jsme schopni vypočítat kapacitu kabelu, potřebujeme k tomu zjistit pouze rezonanční frekvenci a na základě známé hodnoty

indukčnosti kapacitu dopočítat. Na obr. 21 je vidět, jak je při větších dielektrických ztrátách větší útlum. [28]



Obr. 22: Vliv velikosti dielektrických ztrát [28]

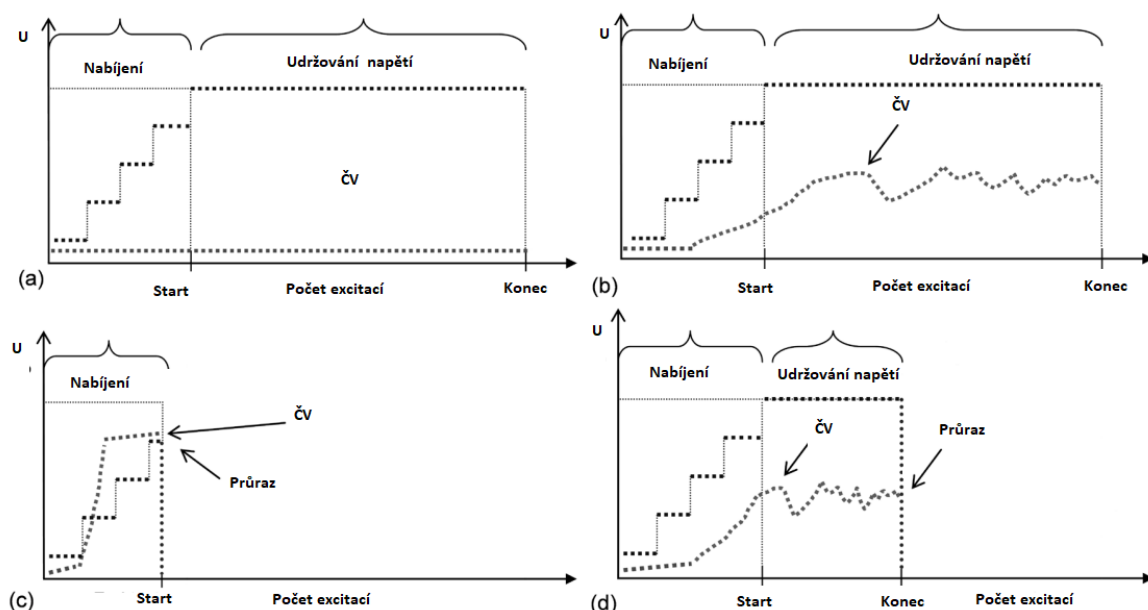
Pro přesnější měření je potřeba znát parametry obvodu např. ztráty na induktoru, vysokonapětovém vypínači atd. Výsledkem měření je velikost dielektrických ztrát v procentech.

2.3.3 Zátěžová zkouška DAC

Tato zkouška je založena na aplikaci definovaných počtů DAC excitací na dané napěťové hladině, která je většinou vyšší než jmenovité napětí. Lze aplikovat na všechny typy kabelů. Zkouškou ověříme, zda izolace vydrží předepsané napětí, v případě průrazu je izolace (kabel) nevyhovující. Tato zkouška je tedy destruktivního charakteru, ta se liší od předešlých zkoušek tím, že v případě poruchy je izolace zničena. Při provádění této zkoušky nezískáme žádné další informace jako v předešlých zkouškách DAC, ale pouze zjistíme, zda nastal průraz či nikoliv. Zkoušku lze rozdělit do dvou tříd:

Nemonitorovaná DAC zátěžová zkouška: Je aplikován daný počet DAC excitací a zaznamenává se schopnost udržet maximální DAC napětí. Záměrem zatěžovací zkoušky je rozšířit existující nebezpečné závady při aplikovaném napětí s minimálním poruchovým proudem. To zapříčiní menší náklady na opravu poruchy. Pokud dojde k selhání během testu, měla by být porucha lokalizovaná prostřednictvím procesu lokalizace poruchy. Výsledkem této zkoušky je vyhovující/nevyhovující.

Monitorovaná DAC zátěžová zkouška: Je aplikován daný počet DAC excitací a k tomu je zaznamenáváno o jeden nebo více parametrů, podle kterých se dá určit závěr zkoušky. Tyto navíc měřené parametry (ČV) slouží jako pokročilá diagnostika kabelů. Časovou stabilitu měřené vlastnosti, lze použít ke sledování vlivů zkoušky na kabelový systém. [28]



Obr. 23: Různě průběhy zátěžové DAC zkoušky [28]

Na obr. 23 jsou vidět různé situace průběhu zkoušky. V případě obr. 23(a) vidíme průběh zkoušky bez přítomnosti částečných výbojů, tečkovaná linie značí pouze šum při měření ČV, při zkoušce se neobjeví průraz. Na obr. 23 (b) vidíme stejnou situaci na obr. 23 (a), až na přítomnost ČV. Obr. 23 (c) je zkouška, kde došlo k průrazu vlivem velkých ČV už v nabíjecí fázi a na obr. 23 (d) je vidět průraz po nabití kabelového systému. [28]

2.4 Proč používat DAC a VLF

Nové, moderní diagnostické metody a přístupy, které jsem zanalyzoval v předešlých kapitolách (DAC a VLF) mají své výhody, ale i nevýhody. Oproti předešlým metodám disponují velkým výkonem při menších rozměrech oproti DC a AC zkušebních zařízeních.

2.4.1 Výhody a nevýhody DAC

Výhody

- Díky danému počtu DAC excitací je možné určit hodnotu průrazného napětí a zaznamenat výskyt ČV v izolaci.
- Možnost odhalení různých závad izolace, které budou škodit kabelovému systému za provozu, aniž by způsobovaly výrazné stárnutí zdravé izolace.
- Nízká složitost systému, malé rozměry, lehce manipulovatelný
- Poskytuje výsledky ČV podobné jako při zkoušce střídavým napětím s frekvencí 50/60 Hz.

- Vyžaduje relativně malý příkon pro měření dlouhých kabelových systémů

Nevýhody

- Výsledky testu DAC se mohou lišit od výsledků získaných ze zkoušky trvalým střídavým výdržným napětím, zejména v přítomnosti nehomogenit v izolaci.
- Použitím pevných tlumivek zapříčiníme při různých kapacitách kabelů různou rezonanční frekvenci.
- Udržet frekvenci v rozsahu 20–500 Hz pro případ krátkého kabelu je velice obtížné a je potřeba přídatná kapacitní zátěž.
- Pokles napětí DAC závisí na skutečném chování dielektrických ztrát.
- Doba nabíjení se může lišit v závislosti na krytu kabelu.

2.4.2 Výhody a nevýhody VLF

Výhody

- Zátěžové zkoušky jsou jednoduché a pro jejich interpretaci výsledků není potřebný odborník.
- Díky neustálým změnám polarity je malá pravděpodobnost vzniku prostorového náboje, pokud není frekvence menší než 0.01 Hz. Elektrické namáhání je menší než 10 kV/mm.
- Svodový proud je možné měřit při dostatečném vybavení.
- Kabelové systémy mohou být měřeny větším střídavým napětím, než je jmenovité napětí při stejné nebo menší velikosti zařízení jako je stejnosměrné měření
- Zkoušku VLF lze použít ke zkoušení extrudovaných, laminovaných a smíšených dielektrik.
- S vysokonapěťovými generátory, které nevytvářejí ČV, je užitečné monitorovat a lokalizovat jednu nebo více závad.
- Na vysoce degradovaných kabelech, lze měřit ztrátový činitel za provozu při jmenovitém napětí nebo menším.
- Jednoduchá a rychlá měření s minimálním vlivem vnějších elektrických polí nebo šumu.
- Pravidelná měření ztrátového činitele umožní posoudit stav kabelového systému.

Nevýhody

- Kabelové systémy musí být za účelem zkoušení vyřazeny z provozu

- U nových kabelů budou pravděpodobně zjištěny pouze hrubé vady zpracování
- Jednoduchá zátěžová zkouška nesleduje vliv zkoušky na kabel během aplikovaného napětí a může selhat při odhalování destruktivní vady.
- Data nelze porovnat se zkouškou střídavým napětím při 50 Hz.
- Povrchové výboje, konektory zařízení a útlum kabelu má veliký vliv na měření ČV

2.4.3 Porovnání DAC a VLF

Obecně jsou metody VLF a DAC široce používané pro zátěžové zkoušky a pro pokročilé diagnostické testy kabelových systémů, ale i u stacionárních a točivých strojů. Výsledky dosažené těmito metodami poskytují jasný obraz o chování ČV.

Tab. 4: Porovnání VLF a DAC [30]

Požadavky	VLF sin	VLF cos-obdélník	DAC
Zátěžová zkouška v souladu s IEC, VDE, IEEE	ANO	ANO	ANO
Zkušební signál závislý na zátěži	ANO	Změna při 30–250 Hz	Zkušební frekvence závislá na délce kabelu
Přesnost měření ztrátového činitele	VYSOKÁ	NELZE MĚŘIT	STŘEDNÍ
Ztrátový činitel citlivost / srovnatelnost	VYSOKÁ	NELZE MĚŘIT	STŘEDNÍ, závislá na zátěži
Lokalizace ČV	ANO	ANO	ANO
Úroveň ČV a vzor ČV jsou srovnatelné s měřením při 50 Hz	ANO	NENÍ ZNÁMO	ANO
Zápalné napětí ČV srovnatelné s měřením při 50 Hz	ANO	NENÍ ZNÁMO	ANO
Kompaktní zdroj napětí	ANO	ANO	ANO

Z tab. 4 jsou vidět různě hodnocená kritéria. Zkušební signály VLF metody jsou stále na stejné frekvenci. Tuhle frekvenci si můžeme zvolit libovolně dle potřeby a dle toho porovnávat např. ztrátový činitel. Ovšem pro VLF platí nevýhoda, která neumožňuje

porovnávat výsledky při 0,01 Hz a při 50 Hz. Proto je potřeba posuzovat dlouhodobý trend vývoje ztrátového činitele při 0,01 Hz, abychom dokázali specifikovat stav životnosti kabelového systému. U DAC metody nastává problém v odlišných délkách kabelových systémů, kde se nám při různých délkách mění kapacita, tím pádem abychom vytvořili přirozenou rezonanci, musíme zvolit jinou hodnotu indukčnosti nebo zapojit přídavné kapacity. To ovšem znamená jinou rezonanční frekvenci. Na obr. 15 je již zmíněná citlivost ztrátového činitele při měření VLF. Ztrátový činitel u DAC je dán velikostí útlumu amplitudy při kmitající fázi DAC zkoušky a pro zlepšení přesnosti měření je potřeba znát již zmíněné ztráty na induktoru. Obě tyto zkoušky mají odlišné citlivosti při detekování odlišných závad. DAC je citlivější při detekování závad způsobené částečnými výboji a VLF je citlivější na odhalování přímých průrazů způsobenými elektrickými stromečky. DAC zkouška trvá krátkou dobu, což je považováno za méně destruktivní než VLF. [31]

Jak už ze zbytku tabulky a mého názoru vyplývá, metoda VLF se sinusovým průběhem je ve všech těchto kritériích nejlépe nebo stejně hodnocená oproti ostatním metodám. VLF je metoda, která má zkoušky v souladu s IEEE, VDE a IEC. Metoda je kompaktní, protože pro nabití kabelu je při malých frekvencích potřeba menší nabíjecí proud, lze s ní vysokou citlivostí a přesností měřit ztrátový činitel, částečné výboje a lokalizovat ČV. Kabelový systém je při měření metodou VLF málo namáhán. Ovšem je potřeba tuto metodu dále inovovat a získat praxi s informacemi, abychom měli možnost posuzovat výsledky ztrátového činitele u stejných izolačních materiálů a mohli stanovit limitní hodnotu, která bude určovat, zda je kabelový systém schopný provozu či nikoliv.

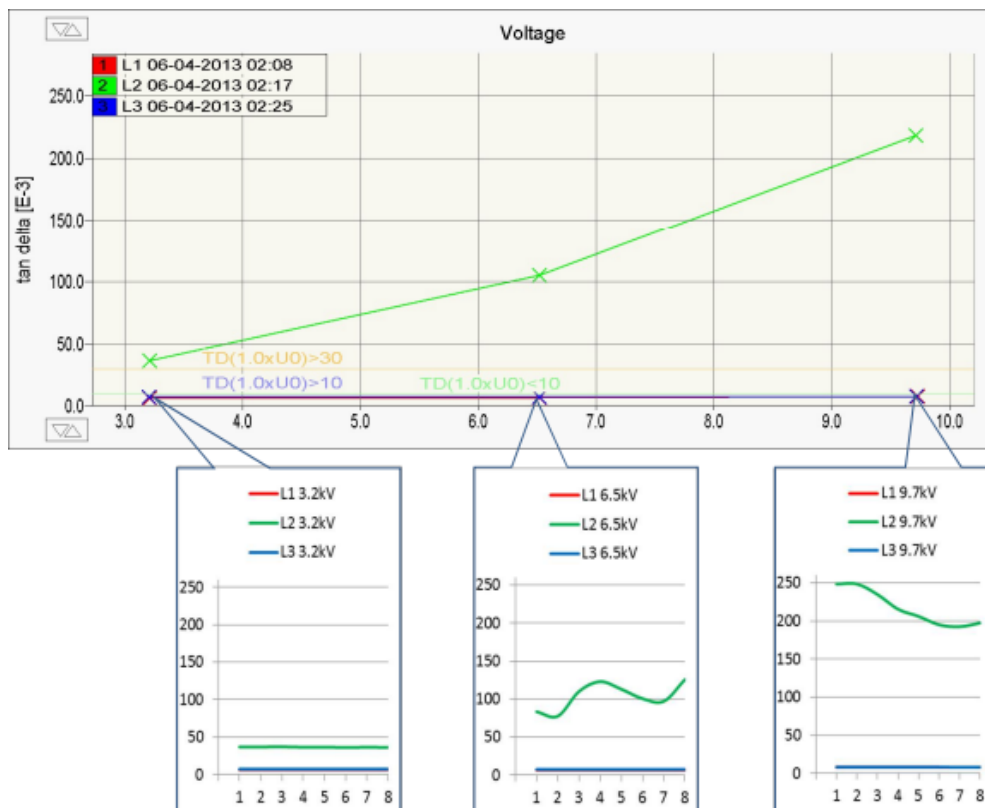
2.4.4 Případové studie VLF

Hongkong, Čína

Monitorovaná zkouška odolnosti s cílem potvrdit přítomnost vody ve spoji. Kabel dlouhý 2675 m, jmenovitá hodnota napětí kabelu je 11 kV, XLPE kabel smíšený s PILC

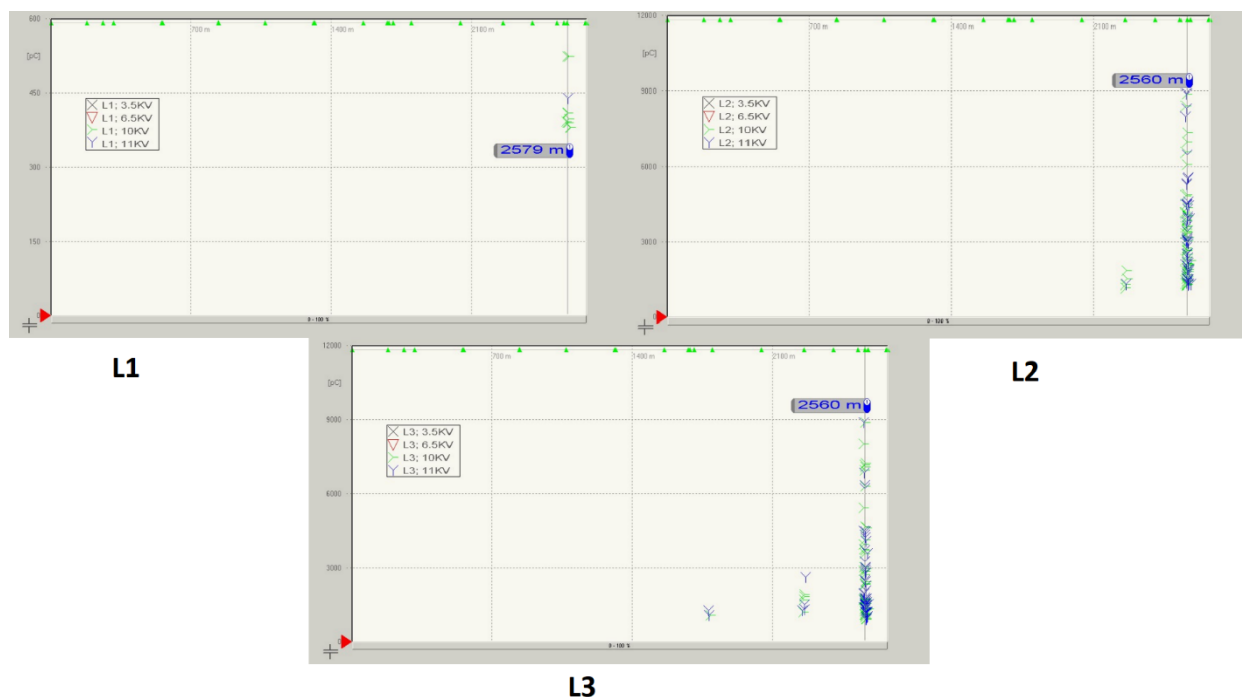
Tab. 5: Informační hodnoty při zkoušce [22]

Datum zkoušky:	29.11.2013
Počasí:	Slunečné
Vlhkost:	60 %
Umístění kabelu:	Hongkong
Typ kabelu:	Smíšený kabel XLPE a PILC, 11 kV
Rychlost impulsu (m/ μ s)	78,3
Počet spojů	22
Délka kabelu (m)	2675
Použité zkušební zařízení	Baur Frida TD
	Přenosný BAUR PD



Obr. 24: Měření ztrátového činitele na 3 fázích [22]

Z obr. 24 je vidět průběh ztrátového činitele v závislosti na napětí. Fáze L2 má oproti zbylým fázím L1 a L3 vysoký ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, což značí vysoké provozní riziko a možné vniknutí vody.



Obr. 25: Měření částečných výbojů na 3 fázích [22]

Na fázi L1 se vyskytuje aktivita ČV na 2579 m při spouštěcím napětím $1.5U_0$ a hodnota zdánlivého náboje q je 500 pC. U fází L2 a L3 je 2560 m vysoká koncentrace částečných výbojů, které dosahují hodnoty až 9000 pC při napětí $1.5U_0$. Při jmenovitém napětí U_0 se nevyskytují žádné aktivity ČV. Jelikož se všechny aktivity ČV vyskytují nad hodnotou vyšší než jmenovité napětí U_0 , tak se riziko kabelového systému nepovažuje za příliš vážný. Spojе na fázích L2 a L3 musí být naplánována výměna ve střednědobém termínu. [22]

Výsledkem zkoušky je zjištění, že je potřeba provést opravu na fázi L2. Při sledování trendu ztrátového činitele vykazovala fáze L2 vysokou výchylku. Toto může souviset s minimálně jedním spojem do kterého mohla vniknout voda. Jakmile se ve spoji vyskytuje voda, aktivita částečných výbojů se výrazně sníží nebo dokonce ani nevznikají. [22]

Tato případová studie ukazuje, že použitím pouze jedné diagnostické metody může dojít k chybnému posouzení kabelového systému v důsledku vniknutí vody.

Hongkong, Čína

Další případovou studií je na kabelu XLPE, dlouhém 740 m a jmenovitém napětí 11 kV. V tomto případě se objevil vadný spoj.

Tab. 6: Informační hodnoty při zkoušce [22]

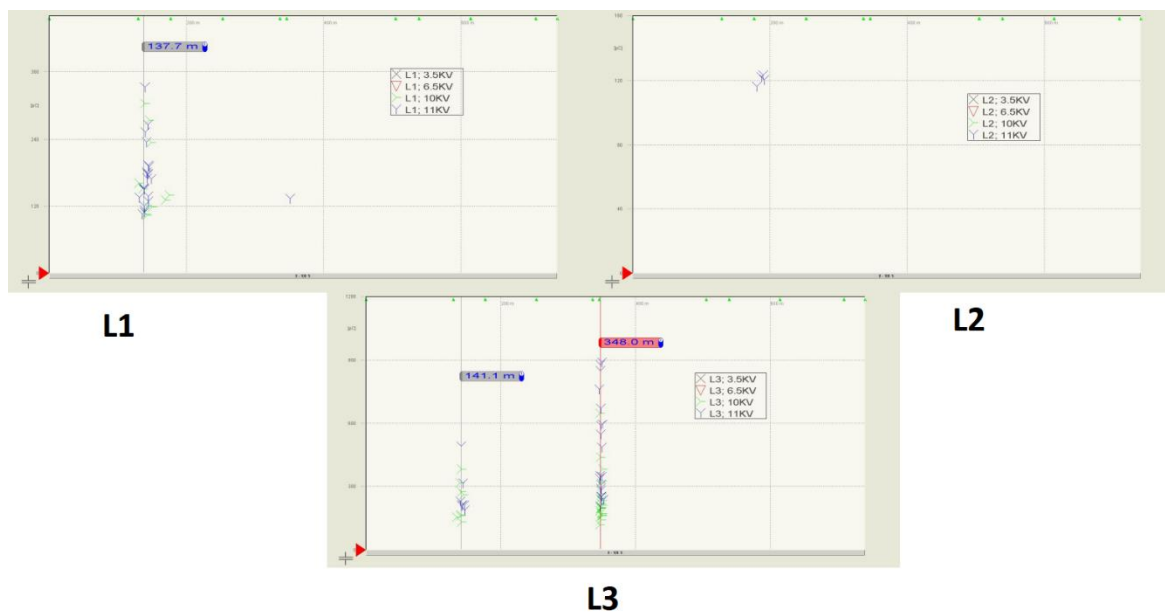
Datum zkoušky:	16.4. 2013 – 1. zkouška
	10.05.2013 - 2. zkouška
Počasí:	Slunečné
Vlhkost:	80 %
Umístění kabelu:	Hongkong
Typ kabelu:	AX, CX, 2CX
Rychlost impulsu (m/ μ s)	85,3
Délka kabelu (m)	740
Počet spojů:	9
Rok výroby:	1998
Použité zkušební zařízení	Baur Frida TD
	Přenosný BAUR PD

Tab. 7: Naměřený ztrátový činitel u jednotlivých fázích [22]

tg δ (10^{-3})	0,5U ₀ (kV)	U ₀ (kV)	1,5U ₀ (kV)
L1	45,97	51,1	54,79
L2	43,09	52,46	65,62
L3	2,643	3,748	4,808

V tabulce 7 jsou vidět výsledky ztrátového činitele v jednotlivých fázích. Fáze L1 a L2 mají velmi vysoké provozní riziko. Společně s analýzou trendu ztrátového činitele se zjistilo, že klesající vývoj trendu na fázi L1 indikuje vniknutí vody do spoje. Fáze L2 má naopak rostoucí vývoj trendu, což indikuje vodivé cesty ve spoji. Fáze L1 a L2 musí být prozkoumány.

Při měření ČV na obr. 26 bylo na fázi L1 zjištěna aktivita ČV na 137 m při 1,5U₀. Nebyli zde zjištěny vážné aktivity ČV. Na fázi L2 byla koncentrace malých ČV blízko spoje číslo 2 při 1,7U₀. Fáze L3 měla aktivitu ČV u spoje číslo 1 na 141 m, která dosahovala hodnoty do 500 pC při 1,5U₀ a u spoje číslo 5 na 348 m byla aktivita ČV do 900 pC při 1,5U₀. Při jmenovitém napětí nebyli zjištěny žádné aktivity ČV a proto není potřeba považovat tento stav za vážný. Je zde vidět, jak je důležité provést měření při 1,7U₀ k odhalení skrytých poruch. [22]



Obr. 26: Měření částečných výbojů [22]

Na fázi L1 je možné rozpoznat vniknutí vody do jednoho ze spojů na základě klesajícího trendu ztrátového činitele. Jedná se o vysoušecí účinek při aplikaci VN. L2 má naopak rostoucí trend, což je známkou vodivých cest. Jelikož tento kabel obsahoval 9 spojů, byla pro lokalizaci použita metoda odrazu impulsů (TDR), kde na základě nepravidelných změn impedance byl lokalizován vlhký spoj.



Obr. 27: Lokalizace vlhkých spojů pomocí TDR [22]

Po diagnostické zkoušce a lokalizace vlhkého spoje byl spoj 10. 5. 2013 vyměněn. Po instalaci proběhla stejná zkouška jako 16. 4. 2013, kdy byl kabelový systém vyhodnocen jako vysoce rizikový. Po nové zkoušce byl již kabelový systém vyhodnocen jako bezpečný a byl spuštěn jeho bezpečný provoz. Na tabulce 8 je možné vidět hodnoty ztrátového činitele před a po výměně vlhkého spoje. [22]

Tab. 8: Hodnoty ztrátového činitele před a po výměně vlhkého spoje [22]

PŘED				PO			
tg δ (10^{-3})	0,5U ₀	U ₀	1,5U ₀	tg δ (10^{-3})	0,5U ₀	U ₀	1,5U ₀
L1	45,97	51,1	54,79	L1	1,73	1,903	2,159
L2	43,09	52,46	65,62	L2	2,248	2,623	2,962
L3	2,643	3,748	4,808	L3	1,213	1,351	1,583

2.4.5 Případové studie DAC

Zde pro podložení výše uvedených faktů využijí případové studie, kde na dvou místech s odlišným kabelem byla použita metoda DAC, pro měření a lokalizaci částečných výbojů.

Šanghaj, Čína

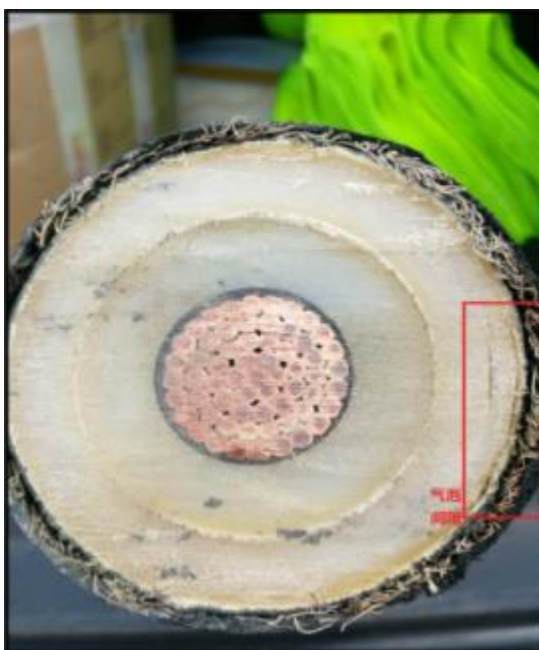
Jedná se o pravidelnou diagnostiku kabelu v místě instalace. Diagnostikovaný kabel má jmenovitou hodnotu napětí 35 kV s izolací XLPE a délkou 3313 m. Kabel je pospojován celkem na 16 místech. Měření probíhalo při kapacitě kabelu 0,62 μ F a teplotě 24,57 °C a frekvenci 139,36 Hz.

Pro měření bylo použito zařízení M60 s výstupním napětím 60 kV (špička) / 42 kV (efektivní hodnota)

Tab. 9: Parametry měřícího zařízení M60 [32]

Frekvenční rozsah	20 Hz - 1000 Hz
Kapacita kabelu	0,025 μ F - 5 μ F
ČV rozsah / rozlišení	5 pC - 100 nC / 1 pC
Šířka pásma ČV	100 kHz - 500 kHz
Kalibrace spojek	Integrovaná
Zdroj	1f, 94 V–250 V, 48 Hz - 63 Hz, 500 VA
Šířka pásma lokalizace ČV	100 kHz - 20 MHz
Rozměry měřícího zařízení	620x890 mm
Hmotnost měřícího zařízení	90 kg
Ovládání měřícího zařízení	Notebookem přes LAN

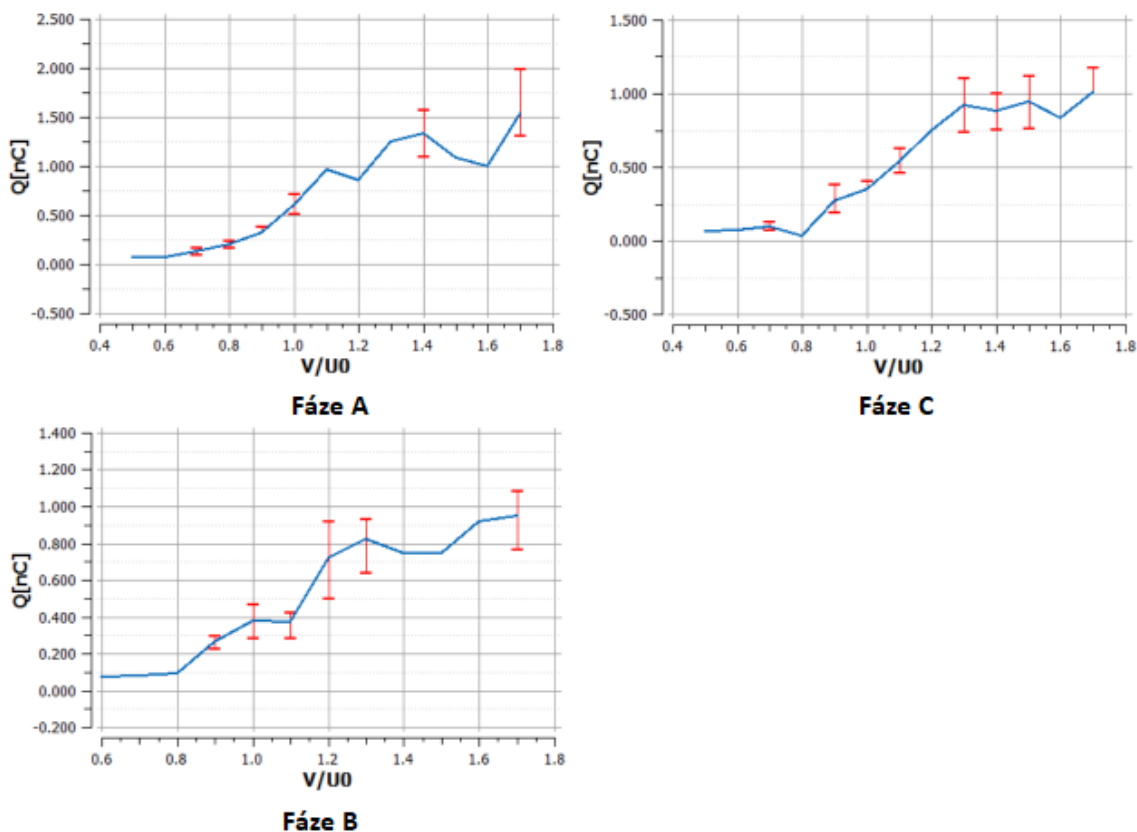
Nejdříve byla provedena kalibrace a poté zátěžová zkouška při napěťové úrovni do $2U_0$, aby se zjistilo, zda je izolace bez závad a zda vydrží velké napětí. Během měření se všechny důležité hodnoty jako je velikost ČV, ztrátový činitel zaznamenává. Měřením bylo zjištěno zapalovací napětí ČV na všech třech fázích pod $1,1U_0$ a nejvyšší úroveň ČV ve fázi A, která činila 1000 pC. Pro lokalizaci ČV se použila časová reflektometrie a zjistilo se, že závada je ve spojení v 1650 m. Spoj byl nalezen a vyměněn za nový, provedla se další zkouška s novým spojem, kde již nebyla zvýšená koncentrace ČV. Starý spoj byl rozříznut kolmo na osu jádra kabelu a XLPE izolaci byla nalezena vzduchová mezera, kde se koncentrovaly částečné výboje. Závada mohla být způsobená tepelnou roztažností. [32]



Obr. 28: Vzduchová mezera v XLPE izolaci [32]

Nordenham, Německo

Další případová studie je z německého města Nordenham, kde byl měřen kabel s délkou 2435 m s jmenovitým napětím 20 kV XLPE izolací. Kabel měl celkem 4 spoje a měření probíhalo při průměrné kapacitě kabelu $0,70 \mu\text{F}$, frekvenci 127,55 Hz a teplotě $24,57 \text{ }^\circ\text{C}$. Bylo použito stejné měřicí zařízení jako je na tab. 5. Stejně jako u kabelu ze Šanghaje se částečné výboje vyskytovali ve všech fázích pod $1,1U_0$ a největší úroveň částečných výbojů ve fázi A (viz. obr. 25). [32]



Obr. 29: Úroveň ČV v jednotlivých fázích [32]

Zvýšená koncentrace částečných výbojů byla nalezena ve spojích ve vzdálenosti 223,9 m, 865,4 m a 1758,6 m. Po výměně spojů byla provedena stejná zkouška, která nevykazovala další koncentraci částečných výbojů. Těto závadě se dá sledováním částečných výbojů a mohlo by se předejít těmto závadám. [32]

2.4.6 Optimální metodika pro posouzení stavu kabelového systému

Jsou dvě možnosti kde posuzovat stav kabelového systému. První možností je zkoušet kabelový systém hned po jeho výrobě ve firemní zkušebně. Přímo ve výrobní nebo zkušební laboratoři si můžeme dovolit pevně nainstalované zkušební zařízení, které dosahují dostatečných výkonů pro zkoušení kabelového systému. Nehraje zde roli rozměr zařízení, jelikož není potřeba, aby bylo zařízení mobilní. V tomto případě by se měla celá délka kabelu diagnostikovat, zda hodnoty ztrátového činitele a částečných výbojů dosahují hodnot takových, aby mohl být kabel expedován k zákazníkovi. Bohužel není nikde normou dáno, jaké by tyto hodnoty měli být. Tyto kritéria musí výrobce nebo zkušební pracovník stanovit zkušenostmi z předešlých zkoušek.

Druhou možností je diagnostika v místě instalace. Může se jednat o zkoušku ihned po instalaci, aby se ověřilo, zda je kabelový systém správně nainstalován, protože při instalaci je velká šance výskytu závady. V tomto případě můžeme nasadit nové diagnostické metody jako je VLF a DAC, které disponují dobrým výkonem při malých rozměrech, širší škálou možností a jsou mobilní. Díky této výhodě je možné přijet s dodávkovým automobilem, jenž je přizpůsoben měřicímu zařízení a kabelový systém vyzkoušet. V ideálním případě by se měly naplánovat pravidelné kontroly, kde bude probíhat měření ztrátového činitele, částečných výbojů. Na základě těchto pravidelných kontrol je potom možné pozorovat trend vývoje ztrátového činitele a vyhodnocovat jeho rizika při provozu. Při diagnostice by se měly použít veškeré možnosti zkoušení jako je zátěžová zkouška, měření ztrátového činitele a částečných výbojů, aby se předešlo chybným závěrům posouzení stavu kabelového systému (viz případová studie VLF z Hongkongu). Při překročení hodnoty nebo při silném nárůstu částečných výbojů by měl být kabelový systém vyhodnocen jako vysoce rizikový a měla by následovat jeho oprava nebo výměna. Na základě pravidelné kontroly se může naplánovat odstávka kabelového systému za účelem opravy nebo výměny. Jedná se o pozitivnější situaci než nečekaná porucha, protože plánovaná oprava proběhne rychleji než nečekaná porucha a kabelový systém se spustí dříve do provozu.

2.5 Neelektrické zkoušky

Neelektrické zkoušky se zabývají mechanickými vlastnostmi izolace. V tomto typu zkoušek je velké množství zkoušek, které se dělají podle potřeby. Může se jednat např. o získání certifikace CPR, posuzovat kvalitu izolačních materiálů při extrémních podmínkách, vstupní kontrola materiálů a výstupní kontrola daného výrobku.

2.5.1 Měření tloušťky izolace

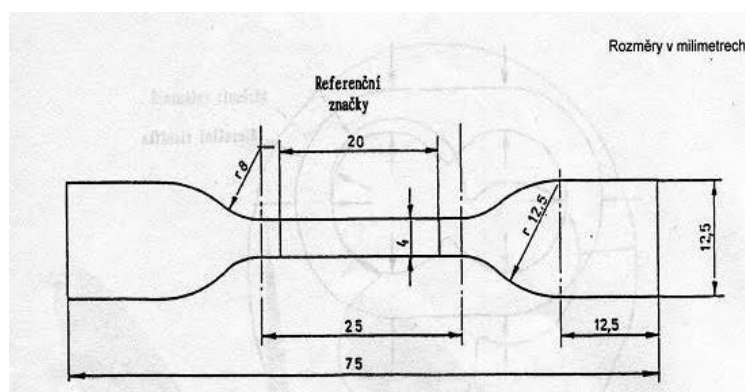
Měření tloušťky izolace se provádí dle normy ČSN EN 50396. Měření se provádí, za účelem stanovení minimální tloušťky izolace. V případě nesplnění minimální tloušťky může dojít k průrazu izolace a následně ke zkratu či úrazu. Z kabelu odebereme tři vzorky, vzájemná vzdálenost jednotlivých vzorků musí být minimálně 1 m. Následně odřízneme podél roviny kolmé k ose kabelu vzorky na tenké plátěčky. Vzorky vložíme do optického měřicího zařízení (obr. 30), kde dojde k naměření maximální, minimální a průměrné tloušťky izolace. Na dvě desetinná místa se vypočte průměrná hodnota z 18 hodnot, získaných ze 3 vzorků. Vypočtené hodnoty porovnáme a vybereme tu nejnižší hodnotu, která nám udává minimální tloušťku izolace na kterémkoliv místě izolace žíly.



Obr. 30: Optické měřicí zařízení BMZ-49

2.5.2 Zkoušky pro určení mechanických vlastností izolačních a plášťových směsí

Zkoušky jsou určeny pro stanovení pevnosti v tahu a tažnosti izolačního materiálu, bez jakéhokoliv stárnutí tzv. tak jak jsou dodány. Ovšem pokud je vyžadováno normou, pro daný typ kabelu je potřeba využít jednu z možností zrychleného stárnutí. Pro zkoušku je potřeba nejméně 5 vzorků ze 100 m izolace. Vzorek musí být před zkouškou chráněn před přímým slunečním zářením a udržovat po dobu 3 h při teplotě $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ (termoplasty $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$). Pokud je to možné, tak se vzorek musí vyseknout do zkušebního tělíska ve tvaru lopatky, které můžeme vidět na obr. 31. Zkušební tělísko se musí vyseknout bez polovodivých vrstev a výplně. Dále je nutné vzorek upravit na danou tloušťku, která nesmí být menší než 0,8 mm a větší než 2 mm. Pokud není možné splnit podmínku tloušťky je nutné využít tvar trubičky. Při vyjmutí jádra z izolace nesmí dojít k poškození izolace.



Obr. 31: Zkušební tělísko ve tvaru lopatky

Zkouška se provádí na tzv. Trhačce, kterou lze vidět v Příloze č.1. Do upínacích čelistí celkově vzdálených 50 mm od sebe (pro zkušební tělísko na obr. 31) se vloží zkušební vzorek (lopatka nebo trubička). Na vzorek se vyznačí referenční značky ve vzdálenosti 20 mm. Po úspěšném uchycení vzorku se začnou upínací čelisti od sebe vzdalovat danou rychlostí tzv. prodlužovací rychlost. Prodlužovací rychlost je (250 ± 50) mm/min, až na PE a PP, kde musí být prodlužovací rychlost (25 ± 5) mm/min. Během vzdalování čelistí, se zaznamenávají hodnoty prodloužení (mm) a přepočítávají se na tažnost (%) a mechanický pevnosti (N/mm^2) Měření opakujeme na celkem 5 vzorcích. Výsledkem je medián z pěti měření a výrobek vyhovuje normám má-li tažnost a mechanickou pevnost větší, než je minimální povolená hodnota dána normou

2.5.3 Zkouška zesíťených materiálů tlakem při vysoké teplotě (Hot set test)

Tato zkouška se provádí na základě normy ČSN EN 60811-507. Zkouškou se ověřuje, zda vlastnosti zesíťených materiálů odpovídají normě. Zkoušky se musí provádět nejméně 16 h po extrudování. Vzorky se odebírají v místě blízkého odběru vzorků pro tahové zkoušky (2.2.2). Je-li možno vzorek se vysekne do tvaru zkušebního tělíska ve tvaru lopatky a připraví se na zkoušku stejným způsobem jako v předešlé zkoušce včetně vyznačených referenčních značek.

Pro zkoušku je potřeba horkovzdušná pec, která je schopná udržovat teplotu a čelisti, které jsou upraveny dle normy ČSN EN 60811-507. Při zkoušení trubiček, se trubičky upínají tak, aby nebyla na obou koncích neprodyšně uzavřena. Zkušební tělísko zavěsíme do horkovzdušné pece a na spodní čelist se zavěsí závaží (obr. 32). Závaží má takovou hmotnost, jakou udává norma pro daný typ kabelu. Tento postup se provádí co nejrychleji, aby nedošlo k velkému poklesu teploty uvnitř horkovzdušné pece. Po ustálení teploty na požadovanou teplotu se vzorky ponechají v peci po dobu 10 min. Po uplynutí 10 min se změří vzdálenost prodloužení mezi referenčními značkami (toto se provádí se zavřenými dveřmi pece, není-li to možné a dveře nemají okno, je zapotřebí je otevřít). Poté co naměříme prodloužení se odřízne spodní část tělíska, abychom uvolnili závaží a po dobu 5 min necháme tělísko se zotavit. Zotavení může trvat po dobu 5 min nebo až do dosažení stanovené teploty. Po uplynutí doby se tělísko vyjme z pece a nechá se ochladit na teplotu okolí a znovu se proměří vzdálenost mezi referenčními značkami.

Výsledkem zkoušky je střední hodnota prodloužení, která byla zjištěna po 10 min při stanovené teplotě se zavěšeným závažím a nesmí překročit předepsanou hodnotu příslušnou normou pro daný typ kabelu. V případě neexistenci daného požadavku jsou daný doporučené hodnoty:

- Zkušební teplota: $(200 \pm 3) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Mechanické namáhání: $(20 \pm 0,5) \text{ N/mm}^2$
- Max. protažení při zatížení: 175 %
- Max. protažení za odlehčení: 15 %



Obr. 32: Upnutý vzorek v peci a zatížený zaváží [19]

2.5.4 Zkouška tlakem při vysoké teplotě pro izolaci a plášť

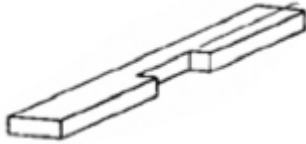
Zkouška se provádí dle normy ČSN EN 60811-508. Stejně jako u hot set testu je ke zkoušce zapotřebí horkovzdušná pec, která má přirozenou cirkulaci vzduchu (mechanická cirkulace vzduchu může způsobovat vibrace a tím ovlivnit zkoušku). Pec nesmí obsahovat zařízení způsobující vibrace a musí být schopná regulovat teplotu v rozmezí $\pm 2 K$ zadané teploty (toto je velice důležité u termoplastů s vysokým bodem tání, kde i malé zvýšení teploty může způsobit větší protlačení). Je zapotřebí mít správné vtláčovací zařízení, jež sestává z rámu, pravoúhlé čepele s hranou širokou $(0,70 \pm 0,01)$ mm. Tělísko musí mít daný tvar podle typu kabelu (kruhový, plochý, sektorový) a minimální tloušťku izolace 0,7 mm.

Konečný vzorek vložíme na podpěru mimo horkovzdušnou pec, na osu kolmo vzorku položíme pravoúhlou čepel, která je součástí rámu, tak aby síla působila kolmo na vzorek. Celou soustavu vložíme do horkovzdušné pece, která je předehřátá na teplotu předepsanou normou. Teplota se během zkoušky musí udržovat trvale na hodnotě předepsanou příslušnou předmětovou normou. Zatížené nepředehřáté těleso se udržuje v poloze předepsanou příslušnou předmětovou normou po dobu:

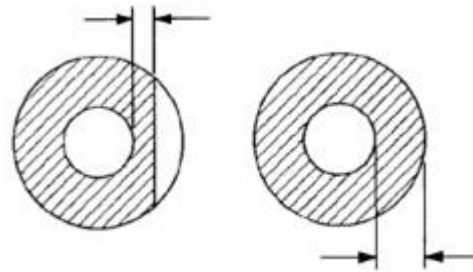
- 4 h pro zkušební tělíška se střední hodnotou tloušťky izolace $D \leq 15$ mm
- 6 h pro zkušební tělíška se střední hodnotou tloušťky izolace $D > 15$ mm

Po skončení předepsané doby se zatížená tělíška prudce ochladí buďto v horkovzdušné peci nebo mimo horkovzdušnou pec postříkáním zkušebního tělíška studenou vodou v místě působení čepele. Tělíška se odlehčí poté, co se ochladí na teplotu, při které již nenastává návrat izolace. Potom se zkušební tělíška ponoří do studené vody. Zchlazený vzorek se na

plocho vloží do měřicího projektoru a změří se původní tloušťka izolace a tloušťka izolace po zkoušce tlakem (obr. 33). U pláště se vzorek v místě kolmo na protlačení vyřízne (obr. 34). Tato hodnota se porovná s původní nepoškozenou tloušťkou izolace a vyjádří se v procentuální hodnotě. Výsledkem je medián ze tří hodnot.



Obr. 34: Tělísko pro měření hloubky vniku u pláště [20]



Obr. 33: Měření hloubky vniku u malého tělíska [20]

Závěr

V současné době se kabely stále významněji podílí na přenosu a distribuci elektrické energie. V této bakalářské práci jsem se zabýval popisem jednotlivých částí kabelu. U jednotlivých částí jsem uvedl i jejich značení, vlastnosti, parametry a typy izolačních materiálů. Závěrem první části byl přehled VN a NN kabelů, které jsou nejčastěji používány v provozu.

Ve druhé části jsem se zabýval diagnostikou a zkouškou kabelových souborů. Metodiky zkoušek a diagnostik jsem rozdělil na elektrické a neelektrické. U elektrických zkoušek jsem popsal základní jednoduché zkoušky, které jsou nezbytné pro správný chod kabelu. Zvolil jsem nejmodernější diagnostické metody, kterými jsou VLF a DAC, tyto metody jsem důkladně popsal a věnoval jim velkou část mé bakalářské práce. Popsal jsem jejich princip, výhody a nevýhody a ukončil jsem je případovými studii, pro doložení mnou psaných informací. U neelektrických zkoušek se jednalo o zkoušky mechanické, kde se porovnávaly naměřené hodnoty s normou. Tyto zkoušky mohou vyžadovat již zestárnutý materiál, jelikož mechanické (i elektrické) vlastnosti se v závislosti na čase zhoršují

Jedním z hlavních cílů této práce bylo navrhnout optimální metodiky pro posouzení stavu kabelového systému. Je zde více možností, kde kabel nebo kabelový soubor zkoušet či diagnostikovat, proto jsem zde vybral metody VLF a DAC, které disponují mobilitou. Důležitou roli zde hraje zkušenost s provozem a používáním diagnostických postupů a zkoušek. Je to otázka nastavení výstupních kritérií po výrobě, jejich zaznamenávání ve formě prvotních technických podkladů k výrobku, která musí být správně zvolená a potom můžeme sledovat jejich změny v provozu. Ne všechno, co můžete změřit při vývoji nebo po výrobě ve fabrice je možné monitorovat i po instalaci. Sledování trendu je vždy u takových systémů nejdůležitější, protože stanovit jednoznačná kritéria není vždy možné nebo to vyžaduje dlouhodobé zkušenosti s provozem. Současné metody monitorování stavu po instalaci umožňují provádět měření významných parametrů (částečné výboje, ztrátový činitel) pro stav izolace, ale interpretace výsledků je otázkou zkušeností. Proto za optimální metodiku považuji použití různých metod s cílem zamezit chybné interpretaci dat a metody používat dlouhodobé pro vytvoření dostatečné datové základny. Poté by bylo možné pracovat i se zpracováním dat umělou inteligencí

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BUCHLOVSKÝ, E., HOUŽVIČKA, F., GREŠÍK, P.: VÝROBA KABELŮ A VODIČŮ. STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, PRAHA 1988
- [2] KREJZA, Karel. LAPP. ElektriKa.cz [online]. 2010 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://elektriKa.cz/terminolog/eterminologitem.2005-07-26.1241861792>
- [3] REDAKCE ELEKTRO. Z historie kabelů. ELEKTRO. 2011, Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36453
- [4] Produkty přehled CICM s.r.o. – Spolehlivý dodavatel metalických a optických kabelů [online]. Copyright © CICM s.r.o. 2020, Dostupné z: <https://cicm.cz/produkty-prehled/>
- [5] rejstřík pojmů | kabelové centrum ALLKABEL s.r.o. kabelové centrum | kabelové centrum - allkabel s.r.o. - specializovaný kabelářský velkoobchod [online]. Dostupné z: <http://www.allkabel.eu/rejstrik-pojmu/>
- [6] Jádra vodičů pro kabely, jejich vlastnosti a použití - AVK. Asociace výrobců kabelů a vodičů České republiky a Slovenské republiky - AVK [online]. Copyright © Asociace výrobců kabelů a vodičů ČR a SR [cit. 30.01.2022]. Dostupné z: <https://www.vyrobcikabelu.cz/normy-rady-navody/jadra-vodicu-pro-kabely-jejich-vlastnosti-a-pouziti/>
- [7] JAURA, L. Výrobní procesy v kabelovém průmyslu. Plzeň, 2013.
- [8] Toraka elektro-materiály [online]. Copyright © [cit. 30.01.2022]. Dostupné z: https://www.elektro-materialy.cz/files/prod_files/kabely-popis--rozdeleni--pouziti-a-prudove-zatizeni.pdf
- [9] ELSIP . ELSIP - Elektroinstalační materiál a jiné [online]. Copyright © [cit. 10.03.2022]. Dostupné z: <https://www.elsip.cz/Kabely-CYKY-a-jejich-znaceni-b46512.htm>
- [10] allkabel s.r.o. kabelové centrum | kabelové centrum - allkabel s.r.o. - specializovaný kabelářský velkoobchod [online]. Copyright © [cit. 01.02.2022]. Dostupné z: http://www.allkabel.eu/upload/attachments/2859_allkabel_CPR_web.pdf
- [11] Izolanty a dielektrika. [online]. Copyright © Václav Vávra Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita [cit. 08.02.2022]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [12] Vlastnosti elektrotechnických materiálů. [online]. Copyright © 2012 CENIA. [cit. 08.02.2022]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [13] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha:Vydavatelství VŠCHT Praha, 2005. 354 s.

- [14] [online]. Dostupné z: <https://cs.answersexpress.com/characteristics-xlpe-insulated-cables-29127>
- [15] MENCLOVÁ, Monika. *Recyklační technologie plastů a využití recyklátů v elektrotechnice*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, KET.
- [16] GŘEŠÍK, František. *Bezhalogenové oheň retardující kabely*. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2010
- [17] allkabel s.r.o. kabelové centrum | kabelové centrum - allkabel s.r.o. - specializovaný kabelářský velkoobchod [online]. Copyright © [cit. 17.02.2022]. Dostupné z: http://www.allkabel.eu/upload/attachments/1377_allkabel_katalog.pdf
- [18] Jak se zkouší kabely? - AVK. Asociace výrobců kabelů a vodičů České republiky a Slovenské republiky - AVK [online]. Copyright © Asociace výrobců kabelů a vodičů ČR a SR [cit. 04.03.2022]. Dostupné z: <https://www.vyrobcikabelu.cz/se-zkousi-kabely/>
- [19] 502 Bad Gateway. Cables RCT - Fabricante de cables eléctricos de baja tensión - Cables RCT [online]. Dostupné z: <https://www.cablesrct.com/en/blog-cables-rct-en/2830-hot-set-test-for-cross-linked-materials>
- [20] ČSN EN 60811-508. Elektrické a optické kabely: *Zkušební metody pro nekovové materiály – část 508: Mechanické zkoušky – Tlak při vysoké teplotě pro izolaci a plášť*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013
- [21] [online]. Copyright © [cit. 10.03.2022]. Dostupné z: <http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/konicek/F2-B1B02FY2/materialy/pasovy-model.pdf>
- [22] Servis Baur - Prodej, servis a kalibrace měřicí kabelové techniky [online]. Copyright © [cit. 10.03.2022]. Dostupné z: <https://www.baur.cz/wp-content/uploads/2019/11/Diagnostika-kabelu.pdf>
- [23] Měření ztrátového činitele izolace silových kabelů - Časopis Elektro - Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 10.03.2022]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-ztratoveho-cinitele-izolace-silovych-kabelu--15092>
- [24] ELUC. ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/558>
- [25] DSpace at University of West Bohemia: NO TITLE [online]. Copyright © [cit. 11.03.2022]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18667/1/BP_Mereni_castecnych_vyboju_Vaclav_Vlasek_E12B0120K.pdf

- [26] Damped AC for Commissioning & Diagnostic Testing of HV Cable Circuits -. INMR - Enriching Technical Knowledge of T&D Professionals [online]. Copyright © 1993 [cit. 17.03.2022]. Dostupné z: <https://www.inmr.com/damped-commissioning-diagnostic-testing-cable-circuits/>
- [27] Všeobecné značení bezhalogenových kabelů - ElektroPrůmysl.cz. informace ze světa průmyslu a elektrotechniky - ElektroPrůmysl.cz [online]. Copyright © 2011 [cit. 24.03.2022]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/kabely-vodice-a-konektory/vseobecne-znaceni-bezhalogenovych-kabelu?fbclid=IwAR2Pq-CCqSTm3ustC86s29QQfkGR8xh58b9qRZqVRXXPpIEZiYs17nMW5AU>
- [28] IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage," in IEEE Std 400.4-2015, vol., no., pp.1-62, 29 Jan. 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7395998.
- [29] "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)," in IEEE Std 400.2-2013 , vol., no., pp.1-60, 9 June 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6517854.
- [30] BAUR GmbH: Cable testing and diagnostics on medium-voltage cables with VLF sine voltage sources < Press releases < Media center. [online]. Copyright © copyright by xoo design websolutions [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: <https://www.baur.eu/en/media-center/press-releases/cable-testing-and-diagnostics-on-medium-voltage-cables-with-vlf-sine-voltage-sources>
- [31] Niasar, M.G.; Wang, X.; Kiiza, R.C. Review of Partial Discharge Activity Considering Very-Low Frequency and Damped Applied Voltage. *Energies* 2021, 14, 440. <https://doi.org/10.3390/en14020440>
- [32] ELECTRISA | Equipamentos Elétricos [online]. Copyright © [cit. 08.04.2022]. Dostupné z: <https://www.electrisa.com.br/fornecedores/ohv/dac-technology.pdf>
- [33] Prakab: Company [online]. Copyright © [cit. 08.04.2022]. Dostupné z: https://www.prakab.cz/upload/PRAKAB_katalog.pdf
- [34] ČSN EN 60228. Jádra izolovaných kabelů. Praha: ÚNMZ, červenec 2005.

Seznam obrázků

Obr. 1: Pokládka kabelů [3].....	13
Obr. 2: Tvary jader vodičů [6].....	16
Obr. 3: Provedení jader [6].....	16
Obr. 4: Tvary vodičů [6].....	16
Obr. 5: Označení vodičů [9].....	17
Obr. 6: Barevné označení (J) a (O) [9].....	18
Obr. 7: Elektrické stínění z Cu drátů a Cu páskou [4].....	19
Obr. 8: Pancéřování kabelu plochými galvanizovanými ocelovými dráty s páskou [4].....	20
Obr. 9: Značení na plášti kabelu.....	21
Obr. 10: Pásový model izolantu [21].....	25
Obr. 11: Náhradní schéma kabelu a fázorový diagram [24].....	26
Obr. 12: Zařízení pro měření odporu jádra.....	35
Obr. 13: Spakrtester Zumbach AST.....	36
Obr. 14: Prostorové náboje v dutinkách XLPE [22].....	37
Obr. 15: Rozdíl citlivost při měření 0,1 Hz a 50 Hz [22].....	38
Obr. 16: Jednoduchý model a náhradní schéma ČV [25].....	39
Obr. 17: Lokalizace ČV [22].....	40
Obr. 18: Možnosti zkoušek DAC.....	41
Obr. 19: Možnosti zkoušek DAC [28].....	41
Obr. 20: Schéma DAC zkoušky.....	43
Obr. 21: Měření ČV [28].....	43
Obr. 22: Vliv velikosti dielektrických ztrát [28].....	44
Obr. 23: Různě průběhy zátěžové DAC zkoušky [28].....	45
Obr. 24: Měření ztrátového činitele na 3 fázích [22].....	49
Obr. 25: Měření částečných výbojů na 3 fázích [22].....	50
Obr. 26: Měření částečných výbojů [22].....	52
Obr. 27: Lokalizace vlhkých spojů pomocí TDR [22].....	52
Obr. 28: Vzduchová mezera v XLPE izolaci [32].....	54
Obr. 29: Úroveň ČV v jednotlivých fázích [32].....	55
Obr. 30: Optické měřicí zařízení BMZ-49.....	57
Obr. 31: Zkušební tělísko ve tvaru lopatky.....	58

Obr. 32: Upnutý vzorek v peci a zatížený závažím [19]	60
Obr. 33: Měření hloubky vniku u malého tělíška [20]	61
Obr. 34: Tělíško pro měření hloubky vniku u pláště [20]	61

Přílohy

Příloha č. 1: Zařízení pro měření mechanických vlastností

