

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měření vybraných dielektrických parametrů na
izolačním systému kabelu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin LOSKOT**
Osobní číslo: **E13B0371P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Měření vybraných dielektrických parametrů na izolačním systému kabelu**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Vypracujte teoretický úvod zaměřený na izolační systém kabelů a jejich příslušenství a na způsoby měření jejich dielektrických vlastností.
2. Změřte izolační odpor, ztrátový činitel, permitivitu a elektrickou pevnost na dodaných kabelech.
3. Vyhodnoťte naměřená data a proveďte základní statistickou analýzu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. OKÁLI, Daniel. A KOLEKTIV. Technologie výroby kabelů: pro I.,II. a III. ročník. Praha: Práce, 19363.
2. KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
3. MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
4. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
5. České technické normy

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Hahn

Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016

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



Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na praktický experiment a popis všech izolačních vrstev, které se nacházejí v izolačním systému kabelu. Popisuje dielektrické parametry, které jsou důležité z hlediska kontroly správné funkčnosti kabelu, a metody jejich měření. V práci je dále obsažena praktická část měření vybraných dielektrických parametrů, kde na dodaném vzorku popisuje měření povrchového a izolačního odporu, ztrátového činitele a permitivity. V závěru práce se nachází porovnání naměřených hodnot.

Klíčová slova

Kabel, elektrická pevnost, izolační odpor, ztrátový činitel, permitivita, povrchový odpor

Abstract

The bachelor thesis is focused on the practical experiment and the description of insulation layers, which are found in the insulation system of the cable. In the thesis is described the dielectric parameters that are important for the proper functioning of the control cable, and methods for their measurement. The thesis also included a practical part of the measurement of selected dielectric parameters, where on the delivered sample are described the surface and insulation resistance, dissipation factor and permittivity. At the end, the measured values are compared.

Key words

Cable, breakdown voltage, insulation resistance, dissipation factor, permittivity, surface resistance

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 2.6.2016

Martin Loskot

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Hahnovi za ochotu, profesionální rady, připomínky a metodické vedení této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Hornakovi za pomoc při měření ztrátového činitele, permitivity, povrchového a izolačního odporu.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 IZOLAČNÍ SYSTÉM KABELU	12
1.1 IZOLAČNÍ LAKY NA HOLÉ VODIČE.....	13
1.2 SKLOSLÍDOVÁ PÁSKA	13
1.3 TEXTILNÍ IZOLACE.....	14
1.3.1 Přírodní vlákna.....	15
1.3.2 Syntetické vlákna	16
1.4 KABELOVÝ PAPIR	17
1.4.1 Papír pro silové kabely.....	18
1.4.2 Papír pro sdělovací kabely.....	18
1.4.3 Napouštěcí hmota	19
1.5 ELASTOMERY	19
1.5.1 Přírodní kaučuk.....	19
1.5.2 Syntetický kaučuk.....	20
1.6 TERMOPLASTY	22
1.6.1 Polyetylen PE	22
1.6.2 Polyvinylchlorid PVC.....	22
1.6.3 Polytetrafluoretylen PTFE	23
1.6.4 Polypropylen PP.....	23
1.6.5 Polyamidy PA	23
1.6.6 Etylenvinylacetát EVA	24
1.7 RETARDÉRY HOŘENÍ.....	25
1.8 STÍNÍCÍ A KONSTRUKČNÍ KOVOVÉ MATERIÁLY	25
2 DIAGNOSTIKA IZOLAČNÍHO SYSTÉMU	26
2.1 IZOLAČNÍ ODPOR	26
2.2 POVRCHOVÝ ODPOR	27
2.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY - ZTRÁTOVÝ ČINITEL, PERMITIVITA	28
2.4 NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY.....	30
2.4.1 Zkouška stejnosměrným napětím	31
2.4.2 Zkouška střídavým napětím	31
2.4.3 Zkouška impulzním napětím	31
2.4.4 Elektrická pevnost.....	31
3 PRAKTICKÁ ČÁST	32
3.1 POPIS VZORKU.....	32
3.2 POUŽITÉ METODY A POSTUP MĚŘENÍ	33
3.2.1 Povrchový odpor	33
3.2.2 Izolační odpor.....	34
3.2.3 Ztrátový činitel, relativní permitivita	35
3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH HODNOCENÍ	37

3.3.1	<i>Povrchový odpor</i>	37
3.3.2	<i>Izolační odpor</i>	38
3.3.3	<i>Ztrátový činitel</i>	38
3.3.4	<i>Relativní permitivita</i>	40
ZÁVĚR		42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		44
PŘÍLOHY		46

Úvod

Tato bakalářská práce si klade za cíl vytvořit ucelený přehled o izolačních vrstvách kabelu a následné naměření vybraných dielektrických parametrů. Při dnešním globálním rozšíření elektrotechniky je důležitá bezpečnost a spolehlivá funkce izolačních systémů. Z tohoto důvodu je při výrobě, montáži a následném provozu doporučeno dodržování českých technických norem a technologických postupů, čímž se zajistí bezpečná a spolehlivá funkce po celou dobu životnosti.

Stejný princip se využívá i v případě kabelových systémů. Při návrhu se volí takové materiály, jejichž vlastnosti splňují nároky na odolnost vůči vlivům daného prostředí. Je tedy nezbytné znát chování materiálů v určitém prostředí, čímž se zabývá disciplína zvaná technická diagnostika. Technická diagnostika zkoumá jakost materiálu a ze získaných dat vyhodnocuje jeho parametry. Na základě diagnostiky se určuje, zda je výrobek pro dané prostředí vyhovující či nikoli. Význam těchto parametrů neustále roste.

Bakalářská práce se zabývá izolačním systémem kabelu a je složena ze tří hlavních částí. V první části představuje všechny složky kabelového svazku i materiály, které se pro výrobu daných vrstev používají. Nachází se zde popis vlastností a vhodného prostředí použití. Další část se zabývá diagnostikou izolačního systému, kde se formou rešerše popisuje měření dielektrických parametrů podle českých technických norem. Tyto normy specifikují zkušební metody pro zkoušení elektrických kabelů. V poslední části se práce zabývá praktickým experimentem, kde se na dodaném vzorku měří vybrané dielektrické parametry. V této části také dochází k hodnocení měření.

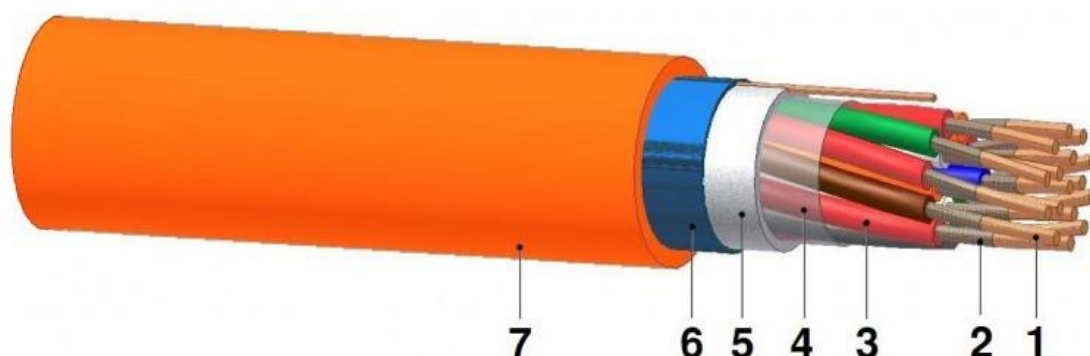
Seznam symbolů a zkratek

°	stupeň úhlu	cm ³	centimetr krychlový
rad	radián	MΩ	megaohm
%	procento	MPa	megapascal
°C	stupeň celsia	Pa	pascal
ε _r	relativní permitivita	N	newton
Ω	ohm	P _z	ztracený výkon
TΩ	teraohm	R	elektrický odpor
ω	úhlová rychlost	R _x	změřený el. Odpor
A	ampér	tg δ	ztrátový činitel
pA	pikoampér	U	napětí
C	kapacita	π	Ludolfovo číslo
d	vzdálenost	Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
T	tex	CO ₂	oxid uhličitý
dT	decitex	EVA	etylenvinylacetát
F	farad	H ₂ O	voda
pF	pikofarad	NaCl	chlorid sodný
g	gram	PA	polyamid
Hz	hertz	PE	polyetylen
kHz	kilohertz	PP	polypropylen
I	proud	PTFE	polytetrafluoretylen
V	volt	PVC	polyvinylchlorid
kV	kilovolt	VA	vinylacetát
km	kilometr	XLPE	zesíťovaný polyetylen
kN	kilonewton	HFFR	bezhalogenová oheň retardující směs
l	litr	ČSN	Česká technická norma
m	metr		
cm	centimetr		
mm	milimetr		
μm	mikrometr		
mm ²	milimetr čtvereční		
m ²	metr čtvereční		

1 Izolační systém kabelu

Předtím, než budou v této práci popsány všechny vrstvy izolačního systému kabelu, je třeba upřesnit, co slovo kabel znamená. Původně toto slovo představovalo lano, časem jej však odborníci začali používat pro paralelně uspořádané vodiče v jednom svazku se společnou izolací [1]. První kabel pro distribuci elektřiny byl vyroben v roce 1879, kdy se na vodič nanasla vrstva asfaltu doplněná směsí pryskyřice s olejem, na niž se nalisovalo olovo [2]. Vlivem velkého pokroku a přísných požadavků na kvalitu, ochranu životního prostředí a především bezpečnost jsou kabely od těch používaných v minulosti odlišné.

Pro ilustraci kabelové systému je zde předložen *obr. 1.1*, na kterém jsou popsány jednotlivé složky v kabelovém svazku.



Obr. 1.1 Ukázka izolačního systému kabelu (převzato z: [3])

Na *obr. 1.1* je zobrazen příklad izolačního systému kabelu. Jádro (1) je nejčastěji vyrobeno z mědi nebo hliníku a slouží k vedení proudu. Následuje skloslídová páska (2), která slouží jako ohnivzdorná bariéra při roztavení vnější izolace a chrání tak vodiče před zkratem. Třetí vrstva izolace (3) může být v závislosti na dané aplikaci tvořena izolačním lakem, textilním vláknem či polymerní směsí. Separací páskou (4) se obalí svazek vodičů v případě, že je plnidlo (5), přímo nanášené mezi vodiče za účelem kulatého tvaru, nežádoucí. Při požadavku na mechanické posílení a stínění kabelu se může přidat kovová páska (6) nebo paralelně opletený svazek z ocelových drátů. Poslední vrstvu kabelu tvoří oheň retardující plášť nejčastěji vyrobený z polymerních směsí.

1.1 Izolační laky na holé vodiče

Izolační laky jsou takové látky, které přímo na vodičích vytvářejí tenký izolační film, který má velmi dobré elektrické i mechanické vlastnosti. Jedná se o roztoky přírodních nebo syntetických látek doplněné o ředidla a rozpouštědla. [4]

Nanášení laků na vodič probíhá máčením v lakové lázni nebo pomocí do laku ponořeného rotačního válečku. Tloušťka jednoho nánosu je maximálně 0,01 mm a normální laková izolace jich obsahuje 5 – 8. Lakovaná jádra se zdvojenou nebo ztrojenou lakovou vrstvou se nazývají duplex, respektive triplex. Po nanesení je třeba lak vytvrdit vypalováním při teplotě 300 – 500 °C [4]. Při této teplotě se ředidla a rozpouštědla vypaří, dojde k polymerizaci pevné složky a vznikne výsledný lakový film, jehož vlastnosti jsou závislé na chemickém složení a podmínkách při výrobě. Při celém výrobním procesu je kladen velký důraz na rovnoměrnost (vrstva laku, vypalování), čistotu a ustálené okolní podmínky, jako jsou teplota, rychlost odtahování a vlhkost [5]. Při dodržení všech těchto podmínek vznikne izolační vrstva bez nežádoucích bublin a nerovností, jejíž mechanické vlastnosti budou splňovat dostatečnou přilnavost k jádru, tažnost, ohebnost, přilnavost k jádru a odolnost vůči oděru. Dále pak musí laková izolace odolat vyšší teplotě, minerálním olejům, lakům na impregnaci a chladícím směsím. Stárnutí laku se projevuje praskáním filmu při ohybu, kdy vlivem chemických změn dojde ke ztrátě pružnosti [6]. [4][5]

1.2 Skloslídová páska

Druhou vrstvou izolace může tvořit skloslídová páska. Vyrábí se ze slídy, která slouží jako elektrická a tepelná bariéra, skelné tkaniny zlepšující mechanické vlastnosti, jako jsou tah a ohyb, a pryskyřice, která pásce dává větší elektrickou pevnost a celistvost. Tato izolace je určena do ohnivzdorných kabelů, které se vyskytují v prostorách se zvýšeným rizikem požáru, s vysokou koncentrací osob a drahých přístrojů. Skloslídová páska má totiž schopnost udržet kabel funkční minimálně 180 minut v přímém ohni a zajistit tak dostatečný čas pro bezpečnou evakuaci budov nebo případnou likvidaci požáru. Zkoušky těchto kabelů se doporučují provádět teplotou 800 – 900 °C po dobu 180 minut. [7]

Vytváření ochranných prvků pro ohnivzdorné kabely vedlo k navržení a zavedení dvou druhů skloslídových pásek. Prvním druhem je skloslídová páska, která obsahuje slídu

muskovit. Muskovit má bílo-šedou barvu a jeho chemický název je hlinitokřemičitan draselný [8]. Tepelné vlastnosti pásky s touto slídou se postupně zhoršují od teploty 600 °C. Další druh skloslídové pásky obsahuje slídu flogopit. Flogopit má hnědo černou barvu a jeho chemické označení je hlinitokřemičitan hořečnatodraselný [9]. O této slídě je známo, že má největší tepelný odpor ze všech v průmyslu používaných slíd. Flogopit si je schopen zachovat své tepelné vlastnosti až do teploty 900 °C a jejich postupné zhoršování nastává při vystavení teplot v rozmezí 900 – 1200 °C. [7] Vzájemné porovnání skloslídových pásek vyrobených z těchto dvou slíd je znázorněno v následující tab. 1.1.

Tab. 1.1 Porovnání vlastností skloslídových pásek [7]

Vlastnosti	Jednotka	Slída flogopit			Slída muskovit
Tloušťka	mm	0,14±0,015	0,12±0,015	0,10±0,015	0,12±0,03
Plošná hmotnost	g/m ²	220±10	180±10	138±8	130±10
Slídový papír	g/m ²	160±10	127±10	91±8	75±4
Skelná tkanina	g/m ²	30±3	30±3	30±3	24±3
Pryskyřice	%	14±2	13±2	13±2	25±5
Pevnost v tahu	N/m ²	>8	>8	>8	>8
Průrazné napětí	V	2000	1800	1400	1300
Obsah halogenů	%	0	0	0	0
Obsah azbestu	%	0	0	0	0

1.3 Textilní izolace

V kabelářském průmyslu se používají přírodní a syntetické textilní vlákny, které se dále dělí na organické a anorganické. Slouží při výrobě kabelů, které jsou mechanicky namáhány tahem, ohybem nebo kroucením. Důležitým parametrem je jemnost, která vyjadřuje tloušťku vláknin. Značí se v jednotkách tex (T) a udává, jakou hmotnost má 1 km vlákniny. [5]

Textilní vlákny se většinou dodávají na křížových cívkách, případně se pomocí vícechodých křížových navíječek na tyto cívky převinou. Při této operaci se dohromady spojí potřebný počet vláken a navíjí se maximálně pod úhlem 15 – 30°, aby se zabránilo jejich klouzání a následnému vzniku nepokrytých míst. Dále je každý stroj vybaven samočinným zastavením, které se uplatní při dosažení žádaného průměru nebo při přetržení vlákna. [5]

1.3.1 Přírodní vlákna

Bavlna se nachází na plodech bavlníku. Využívá se jako bavlněná příze, která se češe, vícenásobně spojuje a dosahuje jemnosti 5 – 14 T. Vyznačuje se velkou pevností, dobrou zpracovatelností a značným izolačním odporem. Její vlastnosti jsou však velmi závislé na vlhkosti. S rostoucí vlhkostí se totiž snižuje mechanická pevnost vláken a především klesá izolační odpor. Bavlněná příze se standardně dodává na křížových cívkách nebo kopsech a využití nachází v opřádání vodičů pro vinutí. [5][6]

Přírodní hedvábí se získává v podobě vlákna, které je vylučováno žlázami housenky bource morušového. Má bílou nebo žlutou barvu a dosahuje jemnosti 23,3 dT. Jeho mechanické vlastnosti jsou téměř stejné jako u bavlny, dielektrické vlastnosti vykazují lepší hodnoty. Přírodní hedvábí je ceněno pro jeho malý přírůstek izolace, a proto se používá pro vinutí malých průměrů. Kvůli vysoké ceně se však více používá umělé hedvábí. [5][6]

Juta je vyráběna z lýka jutovníku, což je rostlina, která roste v jižní Asii. Vlákna mají šedobílou barvu, časem se zbarvují až do hněda. Spřádá se z nich jutová příze, která se používala pro izolaci sdělovacích a silových kabelů. Dnes nachází uplatnění jako vnější obal úložných kabelů a jako výplň mezi žilami silových kabelů. Působení světla, vlhka a tepla má negativní vliv na mechanické vlastnosti. Je značně navlhavá, a proto se pro lepší dielektrické vlastnosti impregnuje. [6]

Skelná vlákna se vyrábí roztavením skla ve speciálních vaničkách a následným protlačením několika platinovými tryskami obsahujícími otvory. Z trysek stékající vlákna roztaveného bezalkalického skla se podchycují a navíjejí na papírový válec rychlostí kolem 2000 m/min, a to až 100 vláken najednou. Navíjením touto rychlostí se dosáhne velmi malých tlouštěk 3 – 15 μm . K zamezení slepování vláken a pro jejich lepší zpracování se používá lubrikace, která však nesmí mít korozivní účinky na měď ani hliník. Mezi přednosti skelných vláken patří nehořlavost, vysoká pevnost v tahu, odolnost proti navlhání a chemickým vlivům, značný elektrický odpor a elektrická pevnost až 4 kV/mm. Vlivem lakové impregnace navíc hodnota elektrické pevnosti vzroste až na 23 kV/mm, což je asi o 25 % více než u bavlněných pásek impregnovaných stejným lakem. Naopak mezi nedostatky se řadí lámavost a malá tažnost skelných vláken. [5][6]

Keramické vlákno je základem pro keramické tkané textilie, které se používají jako tepelná ochrana pro kabely, kde může pracovní teplota dosahovat až 1100 °C [10]. Hlavní složkou těchto vláken je oxid hlinitý, oxid křemičitý a voda. Je pro ně typická vysoká odolnost vůči chemickým vlivům, vlhkosti, vysokým teplotám a stárnutí. Mezi jejich negativum patří křehkost. [11]

1.3.2 Syntetické vlákna

Viskózní hedvábí se vyrábí z buničiny, která vzniká vařením rozmlétoho dřeva či slámy v sulfitovém louhu. Po odstranění louhu se získá kaše, která se dále zjemňuje a čistí až do vzniku tzv. mokré buničiny. Působením 16 – 20% louhu sodného vzniká xantogenát, jehož rozpuštěním v sodném louhu vznikne viskóza, z níž se protlačením jemnými otvory do kyselé lázně získávají vlákna. Pro tato vlákna je charakteristický vysoký lesk, malá pružnost a vyšší navlhavost než u ostatních vláken, což má za následek horší dielektrické vlastnosti. Proto se viskózní hedvábí používá na vnější opletení kabelů. [6]

Acetátové hedvábí se podobá vzhledem i elektrickými vlastnostmi přírodnímu hedvábí, jeho mechanické vlastnosti jsou však horší. Vyznačuje se také menší navlhavostí, ve vlhku pak mírnějším poklesem pevnosti v tahu. Pro výrobu se používá acetylovaná celulóza, která se rozpouští v acetonu. [6]

Polyamidová vlákna se vyskytují ve dvou nejrozšířenějších typech: polyamid 6 a polyamid 6.6. Liší se molekulovou strukturou a vlastnostmi. Vlákna se vytvářejí z roztaveného polymeru tažením. Následným dlužením se dosahuje konečných vlastností (hlavně mechanických). Výsledná vlákna mají dobrou pevnost, elasticnost, tvarovou stálost, odolnost vůči oděru a vlhkosti. [12]

Aramidová vlákna jsou charakteristická odolností vůči chemickým vlivům a vysokým teplotám, při kterých je bod tání až dvakrát větší než u polyamidových vláken. Nejvýznamnější zástupci aramidových vláken jsou známy pod obchodními názvy Kevlar a Nomex. [12] Kevlar je vysoce pevný, teplotně stabilní, odolný vůči oděru a organickým rozpouštědlům, ale citlivý na ultrafialové záření, vlhkost a salinitu [13]. Nomex je vysoce odolný vůči teplotě, je ohnivzdorný, pevný a stejně jako Kevlar má dobré dielektrické vlastnosti [14].

Polyesterová vlákna se vyrábí polykondenzací dimethyltereftalátu a glykolu získaných z ropy. Vzniká polyetylenteraftalát, který se buď přímo zvlákňuje, nebo diskontinuálně zpracovává tavením a zvlákňováním granulátu. Mezi kladné vlastnosti patří vysoká odolnost vůči povětrnostním podmínkám, navlhavosti, oděru a ultrafialovému záření. [15]

Příklad textilního kabelu opleteného textilní izolací je zobrazen na *obr. 1.2*.



Obr. 1.2 Kabel s textilní izolací (převzato z [16])

1.4 Kabelový papír

Kabelový papír je další možnou vrstvou v izolačním systému. K jeho výrobě se používá technicky čistá celulóza, která se získává ze smrkového nebo jedlového dřeva. Kmeny se po zbavení kůry rozřežou na malé kousky a následně vyvaří v louhu, aby se odstranily necelulózové zbytky, jako lignin a pryskyřice. Poté se celulóza propírá vodou za účelem odstranění ve vodě rozpustných solí, které zvyšují dielektrické ztráty. Následuje rozemletí celulózy. Důležitým faktorem, který má výrazný vliv na mechanické vlastnosti výsledného papíru, je způsob a doba mletí. S rostoucí dobou mletí se totiž tažnost a mechanická pevnost nejprve zvětšují, ale po určité době procesu naopak začne pevnost klesat. [6]

Technicky čistá celulóza se přivádí do papírenských strojů na síta, kde se jednotlivá vlákna zplstňují, vlivem proudící vody uspořádají a vytvářejí tak papírový pás.

Uspořádáním vláken vznikne papír s větší podélnou pevností, čehož se využívá právě při výrobě kabelů. Nakonec se papír vysouší a prochází hladícími válci. [6] U vyhotoveného kabelového papíru se sledují různé mechanické vlastnosti, z nichž jsou nejdůležitější pevnost v tahu a tažnost v podélném i příčném směru. Poměrné prodloužení papíru v okamžiku přetržení udává tažnost, tržné zatížení (kN/m), při kterém dochází k přetržení papírové pásky o teoretické šířce 1 m, definuje pevnost v tahu. [5]

Elektrické parametry kabelů jsou značně ovlivňovány vlastnostmi použitého papíru, a proto výsledný kabelový papír musí splňovat požadavky na jakost. Je tedy třeba dbát na správné provedení výše popsaného postupu, aby kabelový papír neobsahoval žádné nečistoty a nenacházela se na něm jakákoliv mechanická poškození (dírký, natržení apod.). [5] Elektrické vlastnosti dále ovlivňuje použitá frekvence a vlastnosti prostředí, jako je teplota a vlhkost. Dielektrické ztráty papíru exponenciálně rostou s frekvencí a teplotami překračujícími 70 °C. Pro velikost izolačního odporu je stěžejní vlhkost papíru a teplota prostředí. Při zvýšení teploty o 30 °C nebo při zvýšení vlhkosti papíru o 1 % klesne izolační odpor přibližně o řád. [6]

1.4.1 Papír pro silové kabely

Pro izolaci silových kabelů se používá papír o tloušťce 0,12 mm s elektrickou pevností minimálně 7 kV/mm, která se vlivem vysušení ve vakuu a následným impregnováním napouštěcí hmotou zvýší na 55 – 65 kV/mm. Základem pro takové zvýšení elektrické pevnosti je dobrá vzduchová propustnost a savost papíru. Propustnost lze ovlivnit různým stupněm mletí a udává, za jakou dobu projde plochou 6,45 cm² papírového vzorku 100 cm³ vzduchu. Savost papíru se udává nejmenší sací výškou (mm), do které pomocí kapilárních kanálků mezi vlákny vystoupá destilovaná voda na zavěšeném papírovém proužku po 10 minutách ponoření. Dalšími důležitými parametry, které se sledují u papírů pro silové kabely, jsou izolační odpor, permitivita a ztrátový činitel tg δ. [5][6]

1.4.2 Papír pro sdělovací kabely

U papíru pro sdělovací kabely se na rozdíl od papíru pro silové kabely nevyužívá impregnace napouštěcí hmotou, a tak je vyžadována co nejmenší savost. Zatímco na elektrickou pevnost jsou kladeny menší požadavky, u dielektrických ztrát je tomu naopak.

Jak již bylo napsáno výše, s rostoucími frekvencemi prudce rostou dielektrické ztráty, což omezuje použití papíru pro kabely s nosnými frekvencemi. [5]

1.4.3 Napouštěcí hmota

Napouštěcí hmota je určena pro impregnaci papírové izolace silových kabelů a je složena z minerálního oleje, ke kterému se přidává zpravidla pryskyřice. Minerální olej se vyrábí destilací a rafinací naftenické ropy. Pryskyřice se získává z některých jehličnatých stromů naříznutím kůry. Pryskyřice se pro lepší elektrické vlastnosti destiluje. Napouštěcí hmota musí mít hustotu při teplotě 20 °C nejméně 0,91 g/cm³, bod tuhnutí alespoň -8 °C, rezistivitu minimálně 10¹² Ω·cm při teplotě 100 °C a ztrátový činitel při 70 °C maximálně 0,7 %. [5][6]

1.5 Elastomery

Elastomery jsou spolu s termoplasty důležitým izolačním materiálem, který se používá na výrobu obalů kabelů a vodičů. Souborně se tak označují přírodní i syntetické kaučuky, což jsou makromolekulární látky s velkou elasticitou. [4] K vratné deformaci tedy dochází již při působení malé síly[17]. Elastomery vykazují výborné elektrické i mechanické vlastnosti, jsou mrazuvzdorné, odolné vůči teplu a oděru. Významná je i jejich požární bezpečnost, kdy samy o sobě nešíří oheň a při hoření nevznikají dusivé plyny. [5]

1.5.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se vyrábí z latexu (kaučukové mléko), který se získává z kořenů kaučukových rostlin nacházejících se v oblasti rovníku. V latexu jsou rozptýleny mikroskopické částičky kaučuku, tyto částičky se vysrážejí po přidání zředěné kyseliny octové nebo mravenčí. Přírodní kaučuk je citlivý na ozon a kyslík, jež urychlují jeho stárnutí, a proto se z něho odstraňují bílkoviny, čímž se zlepšují i elektrické vlastnosti. Pro elasticitu přírodního kaučuku je rozhodující okolní teplota prostředí. Při teplotách pod 0 °C se pružnost rapidně zmenšuje a při 35 – 50 °C dosahuje maxima. [6]

Mezi další významné vlastnosti patří mechanická plastikace a vulkanizovatelnost. Mechanická plastikace zapříčiní destrukci mikrostruktury a rozpad kaučukových molekul za působení mechanických, tepelných a oxidačních vlivů. Tím vzniká plastický přírodní kaučuk, do kterého je možno vmíchat práškové a další přísady. Vulkanizovatelnost je

fyzikálně chemický děj, při kterém za působení vulkanizačního činidla (většinou síra [6]) a energie dochází ke strukturálním změnám, které vytvoří převážně elastickou pryž. V kabelářském průmyslu je významná měkká pryž s výbornými elastickými vlastnostmi. Tato pryž obsahuje 2 – 10 % síry. Použitím většího množství síry se snižuje pružnost a při obsahu 20 – 45 % vzniká ebonit, tj. tvrdá pryž. Pro ztužení a lepší světelnou stabilitu vulkanizátů se do kaučukových směsí přidávají saze. [4]

1.5.2 Syntetický kaučuk

Průmyslově vyráběné kaučuky se nazývají syntetické. Dělí se do skupin podle způsobu polymerace, druhu a obsahu antioxidantů, nastavovadel atd. Syntetických kaučuků se vyrábí velké množství a kvůli jejich dlouhým názvům se používají mezinárodní zkratky. V následujícím textu jsou uvedeny pouze nejčastěji používaní zástupci. [4][17]

Butylkaučuk IIR je kopolymer izobutylenu s izoprenem, který je odolný vůči působení kyslíku a ozonu. Pro lepší odolnost proti světelnému stárnutí se do izolačních směsí přidávají saze. Je schopný dlouhodobě odolávat teplotám 85 – 90 °C a účinkům impregnačních laků, a proto se používá na vodiče pro elektromotory. Další použití nachází u izolace pro vysoké napětí a osvědčují se i v tropických oblastech. [4]

Izoprenový kaučuk IR se vyrábí polymerací monomerního izoprenu. Svou strukturou, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi je velmi podobný kaučuku přírodnímu, a tak je jeho použití stejné jako u přírodního kaučuku. Kvůli dražší průmyslové výrobě se však postupně stává okrajově používaný. [4][17]

Etylenpropylenové kaučuky EPM, EPDM jsou kaučuky s výbornou odolností vůči degradaci a teplu. Používají se zejména k opláštění kabelů. EPM lze vulkanizovat pouze peroxidy a je to kopolymer etylenu s propylenem, kdy je jejich hmotnostní poměr od 1:1 do 3:1. Oproti tomu EPDM je terpolymer etylenu a propylenu s nekonjugovaným dienem, který urychluje vulkanizaci a umožňuje vulkanizaci i sírou. Obsah dienu je zpravidla 5 – 10 %. [17]

Butadienový kaučuk BR je svými vlastnostmi podobný přírodnímu kaučuku, ale kvůli ne příliš dobré zpracovatelnosti se v kabelovém průmyslu používá ve směsi se styrenem (SBR) nebo akrylonitrilem (NBR). Výroba se ve většině případů provádí

roztokovou polymerací. Získaný latex se po přidání činidla vysráží, propere a nakonec vysuší. Vulkanizovaný kaučuk má vysokou odolnost vůči oděru a mohou se vyrábět i mrazuvzdorné pryže, které mají teplotu skelného přechodu pod $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále mají dobré elektrické vlastnosti, kdy měrný vnitřní odpor ρ dosahuje hodnot $10^{14} - 8 \cdot 10^{14}\ \Omega \cdot \text{cm}$, relativní permitivita ϵ_r se pohybuje kolem 3, ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ je 0,07 % a elektrická pevnost až 25 kV/mm. U NBR jsou elektrické vlastnosti horší, ale pro jejich dobrou odolnost vůči olejům a rozpouštědlům se používají pro pláště kabelů. [6][17]

Chloroprenový kaučuk CR (Neopren) se pro kabelový průmysl vyrábí emulzní polymerací chloroprenu nejčastěji při teplotě $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, kterou se docílí lepší zpracovatelnosti [17]. Chloroprenový kaučuk má nespočet dobrých vlastností. Mezi nejvýznamnější patří velká elasticita, dobré mechanické vlastnosti, malá hořlavost i propustnost vodních par, velmi dobrá odolnost vůči povětrnostním vlivům a oleji. Elektrické vlastnosti se zlepšují přidáním většího množství plnidel. Tím se docílí zvětšení izolačního odporu z $10^7\ \Omega \cdot \text{cm}$ až na $10^{12}\ \Omega \cdot \text{cm}$. CR se používá k opláštění kabelů a vodičů všude tam, kde jsou zvýšené nároky na nehořlavost, odolnost vůči agresivnímu prostředí a oleji. [6] Dále se používá v tropických oblastech, letectví a jako náhrada olověných pláštů kabelů [4].

Polysulfidový kaučuk OT (Thiokol) je po chloroprenovém kaučuku druhý zástupce olejovzdorných kaučuků. Vyrábí se několik druhů, avšak pro kabelový průmysl je nejvýznamnější thiokol A. Vzniká polykondenzační reakcí dichloridu s polysulfidem sodným. Získaný latex se promývá, vysráží a suší, čímž nabývá ohebných a pružných vlastností. Dalšími vlastnostmi je výborná odolnost vůči bobtnání v olejích, ozonu a povětrnostním vlivům. Charakteristický je pro ně zápach při zahřívání. Použitelnost je víceméně stejná jako u Neoprenu. [6][17]

Silikonový kaučuk MQ se řadí do skupiny teplovzdorných kaučuků, jejichž hlavní vlastností je použitelnost v nízkých i vysokých teplotách v rozmezí -60 až $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odolnost vůči povětrnostním podmínkám, UV záření, minerálním olejům, plísním a bakteriím patří mezi další ceněné vlastnosti. Naopak pevnost ani tažnost se nevyrovnají hodnotám, které vykazují vulkanizáty přírodního kaučuku. Používají se jako izolace tepelně namáhaných vodičů, např. v tryskových letadlech. [4][6][17]

1.6 Termoplasty

Termoplasty mají široké uplatnění v kabelovém průmyslu, kde se používají k výrobě izolačních obalů vodičů a kabelů. Jedná se o polymery, které se opakovaně za působení tepla stávají plastickými a po zchladnutí znovu tuhými beze změny původní tuhosti materiálu. [4] Níže jsou popsány nejpoužívanější termoplasty v kabelovém průmyslu.

1.6.1 Polyetylen PE

Polyetylen se vyrábí vysokotlakou polymerací etylenu. Je vhodným materiálem pro izolaci kabelů a vodičů, protože vykazuje výborné elektrické vlastnosti, které lze ještě vylepšit zesíťením, neboli vytvářením příčných vazeb vlivem ozáření nebo přidáním organických peroxidů. Mezi další pozitiva patří dobré mechanické vlastnosti i při nízkých teplotách, odolnost vůči vodě, atmosférickým vlivům a většině chemikálií. Rezistivita dosahuje až $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$, elektrická pevnost 60 kV/mm, izolační odpor $10^{14} \Omega$ a ztrátový činitel se pohybuje v rozmezí 0,01 - 0,04 %. Tvarově stálý zůstává do teplot kolem 100 °C, roztavení nastává při teplotě 115 °C. Dobré mechanické vlastnosti si udržuje do -60 °C a v teplotách nižších než -120 °C se stává tvrdým a křehkým. Nevýhodou je jeho hořlavost, která se může snížit přidáním chloru. Ten má však špatný vliv na elektrické vlastnosti, zejména na ztrátový úhel [6]. [4]

1.6.2 Polyvinylchlorid PVC

Mezi nejznámější a zároveň nejrozšířenější termoplastické hmoty patří PVC, vyrábějící se polymerací vinylchloridu v emulzi. PVC je neohebný a křehký při nízkých teplotách, proto se pro izolace a pláště používají směsi s asi 30 % změkčovadla. Přidávání měkčidel vede ke zhoršení elektrických vlastností, pevnosti v tahu, tvrdosti a odolnosti vůči vlhkosti, naopak zpracovatelnost, tažnost a mrazuvzdornost se zlepšují. [4] Vliv změkčovadla na fyzikálně mechanické vlastnosti je zobrazen v tab. 1.2.

Tab. 1.2 Poměr PVC/změkčovadlo a jeho vliv na vlastnosti [4]

Poměr PVC/ Změkčovadlo	Izolační odpor při 50 °C [$\Omega \cdot \text{m}$]	Elektrická Pevnost [kV/mm]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení [%]	Mrazuvzdornost [°C]
75/25	$5 \cdot 10^{12}$	27	24,5	270	-18
70/30	$8 \cdot 10^{11}$	26	22	320	-26
65/35	$3 \cdot 10^{11}$	25	19,5	340	-33
60/40	$1 \cdot 10^{11}$	25	16,5	350	-40

Měkčený polyvinylchlorid se dodává jako granulát nebo prášek, který se míchá a granuluje až v kabelovnách. Měkčený PVC má při 23 °C permitivitu nejvýše 5, ztrátový činitel 0,08 a rezistivitu $2 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$. Hoří při přímém styku s plamenem. [5]

1.6.3 Polytetrafluoretylen PTFE

PTFE je znám hlavně pod názvem teflon a vyrábí se polymerací fluoru za přítomnosti katalyzátorů. Jedná se o bílošedý prášek s vysokou teplotou tavení (326 °C [17]), výborně odolný vůči vysokým teplotám, vodě, kyselinám, zásadám a rozpouštědlům. Má výborné dielektrické vlastnosti, téměř nulovou nasákavost a prakticky nestárne [18]. Je použitelný v širokém rozsahu teplot -100 až +260 °C. Krátkodobě může teplota dosáhnout i 300 °C, ale při překročení této hodnoty nebo vystavení přímému ohni vznikají zdraví škodlivé plyny. PTFE má následující elektrické vlastnosti: permitivitu 2, ztrátový činitel 0,02 %, rezistivitu až $10^{17} \Omega \cdot \text{m}$ a elektrickou pevnost 60 kV/mm. Používá se jako izolace vodičů malých průřezů, vysokonapěťových a leteckých kabelů a všude tam, kde jsou kladeny nároky na odolnost vysokým teplotám. [4][6]

1.6.4 Polypropylen PP

První polypropylen byl vyroben v roce 1951 a díky jeho dobrým vlastnostem a nízké ceně se ho dnes vyrábí přes 45 mil. tun za rok [19]. PP se vyrábí polymerací propylenu za přítomnosti katalyzátorů ve 3 modifikacích, ale nejdůležitější je PP s obchodním názvem Mosten. Mezi jeho charakteristické vlastnosti patří nízká měrná hmotnost, dobrá opracovatelnost, vysoká odolnost vůči chemikáliím, rezistivita $10^{17} \Omega \cdot \text{m}$ a elektrická pevnost 80 kV/mm. Vykazuje výborné mechanické a elektroizolační vlastnosti i při vyšších teplotách, avšak při styku s étery, ketony a chlórovanými parafíny nabobtnává. Má široké spektrum použití, ale v kabelovém průmyslu se používá zejména k výrobě fólií a izolování neměděných vodičů, u kterých teplota nepřekračuje 120 °C. [4][11]

1.6.5 Polyamidy PA

Polyamidy, též známé pod obchodním označením Nylon, se vyrábí polykondenzací diaminů a dikarbonových kyselin [6]. PA mají výborné mechanické vlastnosti, mezi něž patří bod tání nad 300 °C, vysoká odolnost vůči oděru a malý koeficient tření. Vysokou pružnost, tuhost a rázovou pevnost si udržují pouze s obsahem určitého množství vlhkosti. Pro zlepšení mechanických vlastností se během výroby přidávají skelná vlákna. PA dobře

odolávají většině rozpouštědel, olejům, tukům, kyselinám a také jsou odolné vůči povětrnostním podmínkám a stárnutí. [19] Dielektrické vlastnosti polyamidů v suchém stavu vykazují také velmi dobré hodnoty a dají se upravovat přidáváním anorganických přísad. Povrchový odpor dosahuje až $10^{14} \Omega$, rezistivita se pohybuje kolem $10^{15} \Omega \cdot m$, ztrátový činitel se udává do 4 %. V kabelovém průmyslu se používají k opláštění izolace z PVC nebo PE a všude tam, kde dochází k velkému mechanickému namáhání. [4][6]

Mezi nejvýznamnější představitele polyamidů patří Igamid B a Igamid U, který vykazuje nejlepší elektrické vlastnosti a odolnost vůči vodě. Oba typy lze zpracovávat na vytlačovacích šnekových strojích výtlačným stříkáním při teplotě kolem 210 °C. [6]

1.6.6 Etylvinylacetát EVA

Etylvinylacetát vzniká kopolymerací etylenu s vinylacetátem za vysokých teplot a tlaků [17]. Je tedy zřejmé, že vlastnosti EVA jsou závislé na obsahu vinylacetátu (VA). Při nízkém obsahu VA je stupeň krystality vysoký, povrch kopolymeru měkký a může dojít k oděru i nehtem. Přidáváním VA se docílí vyšší tvrdosti, nicméně dochází i ke zhoršení dielektrických vlastností. Dielektrické vlastnosti se zhoršují i s rostoucími frekvencemi. V kabelovém průmyslu se používá k opláštění kabelů a jako samozhášivá izolace. EVA je také charakteristický tím, že umožňuje přimíchávání vysokého množství sazí a oheň retardujících přísad. Dále se snadno zesítuje, což vede k lepším mechanickým a tepelným vlastnostem. V tab. 1.3 je znázorněn vliv množství VA na dielektrické vlastnosti EVA kopolymerech. [20]

Tab. 1.3 Vliv množství VA na dielektrické vlastnosti EVA [20]

Vlastnosti	Obsah VA v EVA kopolymerech [%]		
	7,5	18	28
Ztrátový činitel při 50 Hz [%]	0,16	0,12	0,08
Ztrátový činitel při 10^6 Hz [%]	1,4	3,5	4,3
Permitivita při 10^6 Hz [-]	2,46	2,7	2,95
Rezistivita [$\Omega \cdot cm$]	$2 \cdot 10^{17}$	$2,5 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{14}$
Elektrická pevnost [kV/mm]	20	20	20

1.7 Retardéry hoření

Jelikož se kladou čím dál větší nároky na požární bezpečnost v místech se zvýšeným rizikem vzniku požáru či s větším výskytem osob, vznikají nové plastické směsi obsahující retardéry hoření, které mají při vypuknutí požáru za úkol prodloužit čas potřebný na bezpečnou evakuaci osob. Retardéry hoření jsou chemické látky, které zpomalují či potlačují hoření, zamezují odkapávání hořící hmoty a omezují vznik toxických zplodin. Dělí se do dvou základních skupin. První skupina blokuje oheň fyzikálně, v tomto případě dochází buď k ochlazení materiálu endotermní reakcí, při které se uvolňuje vodní pára a CO_2 , nebo se vytvoří ochranná vrstva, která zabrání toku tepla a přísunu kyslíku k polymeru. Mezi nejpoužívanější zástupce patří hydroxid hlinitý, který se při teplotě 200 °C rozkládá na Al_2O_3 a vodu, která ochlazuje materiál. Při použití s tzv. „charforming agent“ se navíc vytvoří ochranná bariéra zamezující kontaktu ohně s polymerem. Druhou skupinu tvoří chemická blokáce ohně. Při té se na povrchu vytváří zuhelnatělá vrstva, která snižuje tvorbu kouře, nebo polymer při hoření nabobtná a vzniká tak výborná ochranná bariéra. [21]

Tyto plastické směsi obsahují kolem 60 % retardérů hoření, což má za následek zhoršení mechanických vlastností výsledného produktu. Pro dobré požární vlastnosti je důležité, aby byly retardéry hoření rovnoměrně rozloženy po celém obvodu materiálu. [21]

1.8 Stínící a konstrukční kovové materiály

Stínící a konstrukční kovové materiály, mezi něž patří např. olovo, hliník, hliníkové fólie a ocelové pásy, se používají jako plášť kabelu na ochranu proti mechanickému poškození, vniku vlhkosti či vzduchu a korozi. V některých případech je nutné materiály impregnovat oleji právě pro lepší antikorozi ochranu. Dále tyto materiály slouží ke stínícím účelům. V tomto případě jsou obvykle uloženy pod pláštěm kabelu a jejich funkcí je ochrana před elektromagnetickým rušením. [5] Druhy stínění dle [22]:

Stínění pomocí hliníkové pásky představuje 100% krytí a velmi účinnou ochranu proti elektrostatickým výbojům a stínění v pásmu dlouhých vln. Tento typ stínění není vhodný pro pohyblivé připojení kabelů, neboť špatně odolává stálým ohybům a krutům.

Spirálové stínění se dává šikmo k ose kabelu a tvoří jej svazek nebo souběžná vlákna. Tento způsob zaručuje pokrytí maximálně 97 %. Stejně jako u předchozího typu výborně stíní v pásmu dlouhých vln a odvádí elektrostatický náboj. Zvýšení efektivity stínění v pásmu krátkých vln nastává přidáním vodivé tkaniny. Jelikož je spirálové stínění odolné vůči ohybům a krutům, je vhodné pro pohyblivé uložení kabelů.

Stínění opletením (punčoška) se také dává šikmo k ose kabelu a tvoří ho svazek paralelních vláken, které jsou schopny 98% pokrytí. Pro tento druh stínění je charakteristická dobrá flexibilita, životnost a výborné stínící vlastnosti v pásmu krátkých i dlouhých vln.

Stínění spirálou + stínící páskou kombinuje vlastnosti dvou druhů. Jedná se o poměrně nákladné řešení, ale výsledkem je skvělé stínění v pásmu krátkých i dlouhých vln a výborná ochrana vůči výbojům. Negativum je nízká odolnost vůči kroucení a ohýbání.

2 Diagnostika izolačního systému

Aby se zajistila správná funkčnost izolačního systému, je třeba provést několik kontrol, které se uskutečňují v celém průběhu výroby kabelů. Jako první se provádí vstupní kontrola, která má za úkol odhalit materiál kvalitou nevyhovující normám i technickým podmínkám. Následuje kontrola výroby, která má předcházet chybám během výrobního procesu, a finální kontrola prověřující vyhotovený výrobek. [5]

Vyrobený kabel je podroben měření mechanických, tepelných, požárních a elektrických vlastností. Pro elektrické kabely jsou metody těchto měření popsány v české technické normě ČSN 34 7010-82. V další části této bakalářské práce budou popsány dielektrické parametry izolačního systému silových kabelů, a to konkrétně izolační odpor, povrchový odpor, ztrátový činitel, relativní permitivita a elektrická pevnost. [23]

2.1 Izolační odpor

Izolační odpor je vyjádřen poměrem stejnosměrného napětí připojeného na elektrody zkoušené izolace a celkového proudu v daném čase po připojení napětí [24]. Elektrody se umístí mezi povrch a jádro kabelu, jehož délka by měla dosahovat minimálně 1,7 m. V dalším kroku se připraví nerezová nádrž, do které se nalije 5% roztok NaCl dosahující

teploty $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Do této nádrže se ponoří kabel na 24 hodin tak, aby oba konce kabelu byly nad hladinou a alespoň 1 m byl pod hladinou roztoku NaCl. Poté se mezi jádro a měděnou elektrodu umístěnou v nádrži přiloží stejnosměrné napětí o velikosti 500 V a po uplynutí 1 minuty se z měřicího přístroje odečte hodnota protékajícího proudu. [23] Pomocí Ohmovy metody se vypočítá izolační odpor R_x :

$$R_x = \frac{U}{I} [\Omega], \quad (2.1)$$

kde U [V] je přiložené napětí a I [A] protékající proud [25].

2.2 Povrchový odpor

Povrchový odpor zkoušeného materiálu je poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi měděnými elektrodami, které se nachází na povrchu izolace, a protékajícího proudu mezi elektrodami v definovaném čase po připojení napětí. Měřený povrchový proud, jehož součástí je i proud tekoucí vnitřkem izolace, je ovlivňován absorbovanou vlhkostí, příměsemi a nečistotami. Polarizační jevy v oblasti elektrod jsou zanedbány. [24]

K měření povrchové odporu je potřeba ohmmetr s minimálním rozsahem $2 \cdot 10^8\text{ M}\Omega$. Z pláště kabelu se odebere 150 mm dlouhý vzorek, který se nasune na izolovanou tyč o přibližně stejném průměru, jako má vnitřní průměr pláště. Je důležité, aby byl povrch zkoušeného vzorku čistý, a proto se před měřením očistí etanolem. Poté se na něj navinou dvě elektrody z měděného drátu o průměru 0,2 - 0,6 mm, přičemž vzdálenost mezi nimi je $10 \pm 0,5\text{ mm}$. Po opětovném očištění etanolem se vzorek umístí do zkušební horkovzdušné komory, kde panují normalizované atmosférické podmínky. Po 24 hodinách se vzorek vyndá a připojí se k elektrodám napětí. Opět po uplynutí 1 minuty se odečte hodnota povrchového odporu z ohmmetru. [23] Pomocí změřeného povrchového odporu lze spočítat povrchovou rezistivitu ρ_p podle vzorce:

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d} [\Omega], \quad (2.2)$$

kde R_p [Ω] je změřený povrchový odpor, l_e [m] je obvod elektrod a d [m] je vzdálenost elektrod od sebe [24].

2.3 Dielektrické ztráty - ztrátový činitel, permitivita

Dielektrické ztráty vyjadřují, kolik elektrické energie se přemění za působení elektrického pole v izolantu na jinou energii (většinou tepelnou), která je nežádoucí. Tato přeměněná energie se nazývá dielektrickými ztrátami, které se musí při provozu elektrického zařízení odvádět do okolí, aby nedocházelo k přehřívání izolace. To totiž může vést k tepelnému průrazu izolantu, tzn. jeho destrukci. Dielektrické ztráty vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí. V případě stejnosměrného napětí se jedná o Jouleovy ztráty, které vznikají průchodem vodivostního proudu dielektrikem. Jejich velikost závisí na velikosti vodivostního proudu a odporu izolace. Ztracený výkon je definován vztahem: [24]

$$P_{Zss} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (2.3)$$

kde R_i [Ω] je izolační odpor izolantu, U [V] je přiložené napětí, I [A] je ustálená hodnota proudu tekoucího izolantem. Působením stejnosměrného pole na izolant vznikají i ionizační ztráty, jejichž význam je v porovnání s Jouleovými ztrátami zanedbatelný. [24]

Dielektrické ztráty vznikající působením střídavého elektrického pole zahrnují ztráty vodivostní, ionizační a ztráty vyvolané polarizacemi. Časový průběh elektrické indukce se v reálném dielektriku zpožďuje za časovým průběhem intenzity elektrického pole o ztrátový úhel δ . Tangenta tohoto úhlu se nazývá ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, jenž se v praxi používá pro posouzení kvality izolantu. Pro popis chování dielektrika se používají ekvivalentní náhradní obvody, které tvoří sériové nebo paralelní spojení ideálního kondenzátoru s odporem. Kondenzátor a odpor v náhradním obvodu mají parametry odpovídající ztrátám a fázovému posunu φ zkoumaného dielektrika. Ztrátový činitel se vypočte dle vzorce: [24]

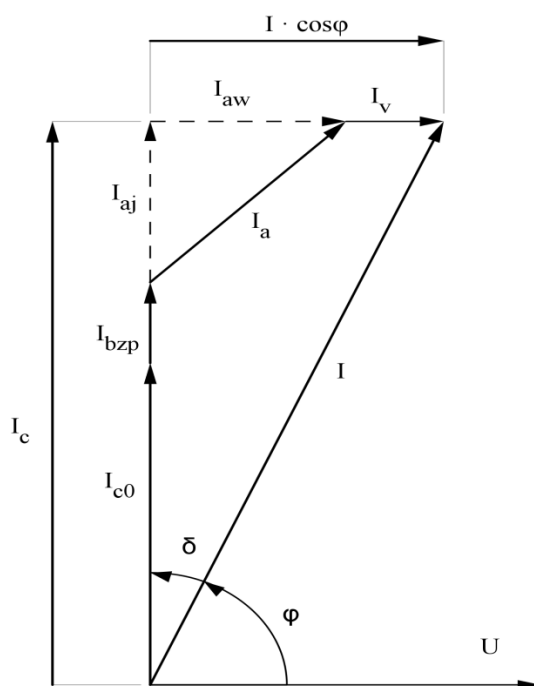
$$\text{tg } \delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p}, \quad (2.4)$$

kde ω [rad/s] je úhlová rychlost, C_s a R_s je kapacita a odpor v sériovém zapojení a C_p a R_p v zapojení paralelním.

Relativní permitivita, jež bývá součástí měření ztrátového činitele, se vypočítá dle vzorce (2.5), kde C_0 vyjadřuje kapacitu elektrodové soustavy ve vzduchu a C_x změřenou kapacitu mezi elektrodami. [24]

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} [-] \quad (2.5)$$

Střídavý proud procházející izolantem lze rozložit do složek, což znázorňuje fázový diagram na obr. 2.1. Proud I_{c0} nabíjí geometrickou kapacitu C_0 , proud I_{bzp} představuje rychlé bezeztrátové polarizace, proud způsobený elektrickou vodivostí je označen I_v a I_a je absorpční proud, který odpovídá pomalým ztrátovým polarizacím. Absorpční proud lze dále rozdělit na činnou a jalovou složku. Činná složka I_{aw} odpovídá ztrátám způsobeným dielektrikem procházejícím proudem I_a a jalová složka I_{aj} odpovídá kapacitě C_p , která vlivem absorpčních jevů zvětšuje kapacitu C_0 . Ideální bezeztrátové dielektrikum má fázový úhel φ roven 90° . U reálného dielektrika je tento úhel zmenšen o ztrátový úhel δ . [24]



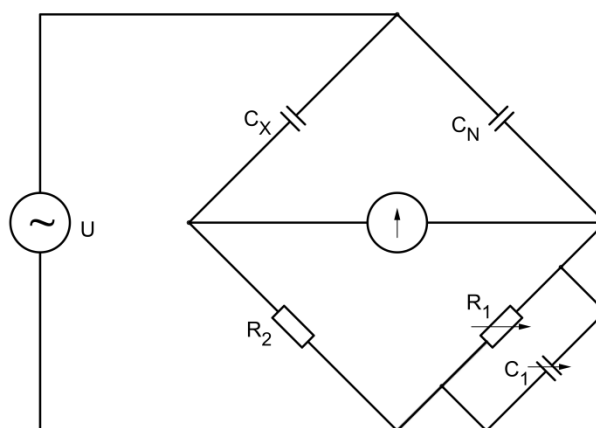
Obr. 2.1 Fázový diagram reálného dielektrika (překresleno z [24])

Výsledný vztah pro ztracený výkon ve střídavém elektrickém poli lze vyjádřit následujícím vzorcem: [24]

$$P_{Zstř} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.6)$$

kde C je kapacita daná součtem geometrické kapacity C_0 a kapacity C_p . [24]

Pro měření ztrátového činitele je nejpoužívanější metodou zapojení Scheringova můstku, jehož schéma je zobrazeno na obr. 2.2. Frekvenční rozsah tohoto můstku je v rozmezí 50 Hz až 100 kHz. Při vyšších frekvencích je třeba na měření ztrátového činitele použít Q-metry. [26]



Obr. 2.2 Scheringův můstek (překresleno z [26])

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ se nejčastěji měří jako funkce napětí při pokojové teplotě 20 °C. Mezi jádro a plášť kabelu se připojí střídavé napětí o velikosti $0,5 \cdot U_0$, U_0 a $2 \cdot U_0$. Zaznamenané hodnoty $\operatorname{tg} \delta$ při U_0 a rozdíl hodnot $\operatorname{tg} \delta$ při $2 \cdot U_0$ a $0,5 \cdot U_0$ nesmí překročit uvedené hodnoty ve specifikacích. [23]

2.4 Napět'ové zkoušky

Jedny z nejdůležitějších zkoušek elektroizolačních materiálů a kabelů jsou napět'ové zkoušky, které dávají informaci o elektrické pevnosti. Elektrický průraz nastává při celkovém povrchovém či vnitřním přemostění izolace, což má za následek porušení izolace a pokles napětí mezi elektrodami téměř k nule. Napět'ové zkoušky se provádí stejnosměrným, střídavým a impulzním napětím. [24]

2.4.1 Zkouška stejnosměrným napětím

Napěťové zkoušky se provádí na žilách stejnosměrným napětím, přičemž se 5 m dlouhé vzorky žil po odstranění všech obalů ponoří do roztoku NaCl s vodou tak, aby nad roztok vyčnívalo 25 cm vzorku na každé straně. Kladný pól zkušebního stejnosměrného napětí se připojí k měděné elektrodě ponořené do roztoku a záporný pól se připojí k jádru vzorku. [23]

2.4.2 Zkouška střídavým napětím

Při použití střídavého napětí je postup podobný jako u zkoušky stejnosměrným napětím, akorát se místo vodného roztoku NaCl používá voda, do které se vzorek ponoří minimálně na jednu hodinu. Napětí se přikládá mezi jádro a elektrodu ponořenou ve vodě. [23]

2.4.3 Zkouška impulzním napětím

U zkoušky impulzním napětím se vzorek zahříváním udržuje v mezích, které jsou uvedeny ve specifikaci daného kabelu. Následně se vzorek zkouší 10 napěťovými impulzy s kladnou polaritou a 10 napěťovými impulzy s polaritou zápornou. Hodnota zkoušeného impulzního napětí se opět nachází v příslušné specifikaci. [23]

2.4.4 Elektrická pevnost

Základním úkolem elektroizolačního materiálu je oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. Tuto schopnost jednoznačně charakterizuje elektrická pevnost. Jedná se o jednu z nejdůležitějších veličin, jež se prakticky využívá v návrzích i konstrukci elektrických zařízení. [24]

Důležitým pojmem je průrazné napětí U_p , což je napětí, při kterém dojde k překročení kritické úrovně intenzity elektrického pole a následnému prudkému nárůstu měrné elektrické vodivosti neboli konduktivity. Nastává výboj, tedy spojení původně izolovaných míst dokonale vodivou cestou. Vzniklý výboj prochází dvěma stádii. V prvním stádiu dochází k prudkému nárůstu konduktivity a následnému výboji. V dalším stádiu vzniká poškození materiálu způsobené vznikem, případně hořením elektrického oblouku v místě výboje. Tento jev je charakteristický výskytem vysokých teplot a degradací izolačního materiálu. Při výboji je elektrický proud omezen pouze impedancí zdroje a přívodů

k elektrodám, a tak dosahuje značných hodnot. Následek průrazu, což je výboj v pevných izolantech, je prudký pokles napětí na elektrodách a trvalé zhoršení elektroizolačních vlastností materiálu. Průrazné napětí je závislé na druhu a velikosti izolantu, tvaru a době působení elektrického pole, ale také na vlhkosti, nečistotách, tlaku a teplotě. Výsledná hodnota průrazného napětí se vypočítá pomocí vztahu: [24]

$$E_p = \frac{U_p}{d} [kV/mm], \quad (2.7)$$

kde U_p [kV] je průrazné napětí a d [mm] je tloušťka izolantu. [24]

Měření elektrické pevnosti probíhá v nádobě s vodou pokojové teploty. Vzorek o délce 5 m se ponoří do nádoby s vodou nejméně hodinu před měřením tak, aby na každé straně vyčníval přibližně 25 cm. Střídavé sinusové napětí přiložené mezi jádro a měděnou elektrodu ve vodě se po určitých časových úsecích zvětšuje, až dojde k průrazu. Výsledkem je poslední napětí, kterému izolace odolá celý časový interval. [23][25]

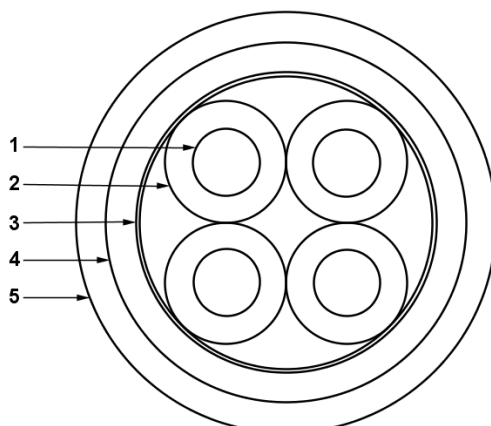
3 Praktická část

Hlavním úkolem praktické části této bakalářské práce je měření vybraných dielektrických parametrů na dodaném kabelovém vzorku. V laboratoři elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni se měřil ztrátový činitel, permitivita a povrchový odpor. Měření izolačního odporu nebylo možné provést na půdě elektrotechnické fakulty, jelikož fakulta nedisponuje patřičným přístrojem. Proto měření bylo provedeno ve společnosti Kabex®. Následující kapitoly obsahují popis dodaného vzorku, použité metody měření, výsledky měření a jejich vyhodnocení.

3.1 Popis vzorku

Pro měření dielektrických parametrů byl použit kabel od společnosti Kabex®. Jedná se o silový kabel, jehož plášť a výplň jsou vyrobeny z oheň nešířících bezhalogenových látek. Hodí se pro použití v silových rozvodech všude tam, kde jsou kladeny vyšší nároky na požární bezpečnost, a to v suchém i mokřím prostředí. Kabel je testován pro životnost 40 let a havárii HELB, což je havárie s roztržením vysokoenergetického potrubí. Je určen pro jmenovitá napětí do 0,6/1 kV a provozní rozmezí teplot - 50 až + 90 °C. Izolační odpor

dosahuje hodnot $> 1000 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$. Řez kabelem, na kterém jsou popsány jednotlivé vrstvy, je předložen na *obr. 3.1*. [27]



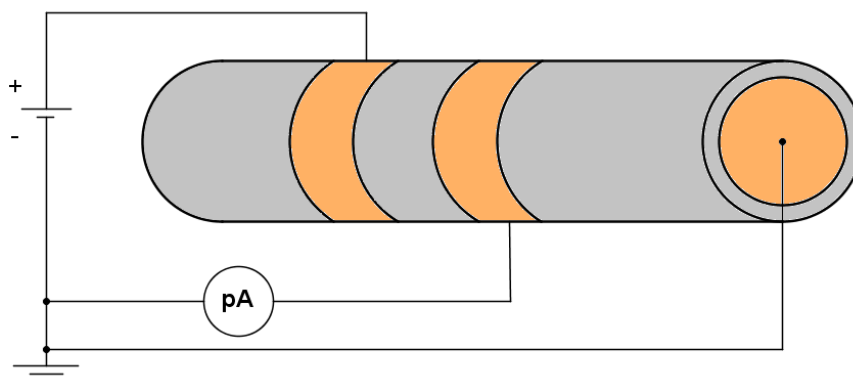
Obr. 3.1 Řez kabelu (překresleno z [27])

Na *obr. 3.1* je zobrazen řez kabelu, kde číslo 1 představuje měděné jádro, č. 2 izolaci ze XLPE¹, č. 3 separační pásku, č. 4 oheň nešířící bezhalogenovou výplň a č. 5 plášť z oheň nešířící bezhalogenové polymerní směsi HFFR². [27]

3.2 Použité metody a postup měření

3.2.1 Povrchový odpor

Povrchový odpor se měřil voltampérovou metodou. Pro měření se použil napěťový zdroj Keithley 248 a přístroj pro měření malých proudů Keithley 6514. Pro ilustraci schématu zapojení, které se použilo pro měření povrchového odporu, je předložen *obr. 3.2*.



Obr. 3.2 Schéma zapojení pro měření povrchového odporu (překresleno z [24])

¹ XLPE je zesíťovaný polyetylen. Zesíťuje se pro lepší kvalitu izolačního materiálu

² HFFR z anglického halogen free flame retardant - bezhalogenová oheň retardující směs

Samotnému měření předcházela příprava kabelu. Kabel byl nejprve zbaven nečistot a následně bylo po celé jeho délce vytvořeno 8 měřících míst s pravidelnými mezerami. Každé měřící místo obsahovalo 2 elektrody, mezi kterými byla mezera 10 mm. Elektrody tvořila 25 mm široká měděná fólie, která byla nalepena na vzorek.

Po sestavení měřícího obvodu se na napěťovém zdroji nastavilo napětí 500 V a po uplynutí 1 minuty se z měřícího přístroje odečetla hodnota proudu tekoucího mezi elektrodami. Následně se povrchový odpor vypočítal dle vzorce:

$$R = \frac{U}{I} [\Omega], \quad (3.1)$$

kde U [V] je přiložené napětí a I [A] je vzorkem protékající proud.

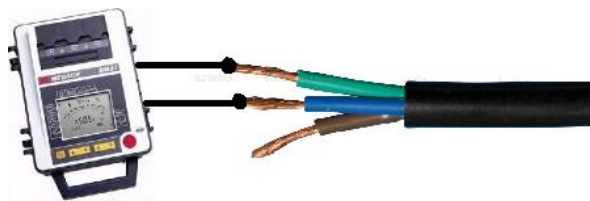
Napěťový zdroj Keithley 248 a přístroj pro měření malých proudů Keithley 6514 jsou zobrazeny na *obr. 3.3*.



Obr. 3.3 Přístroj pro měření malých proudů (vlevo) a zdroj napětí (vpravo)

3.2.2 Izolační odpor

Pro měření izolačního odporu byla použita metoda pro vícežilový kabel popsaná v ČSN 34 7010-82. Měření probíhalo pomocí přístroje Megger BM 25 7-D-231. Pro znázornění zapojení je předložen *obr. 3.4*.

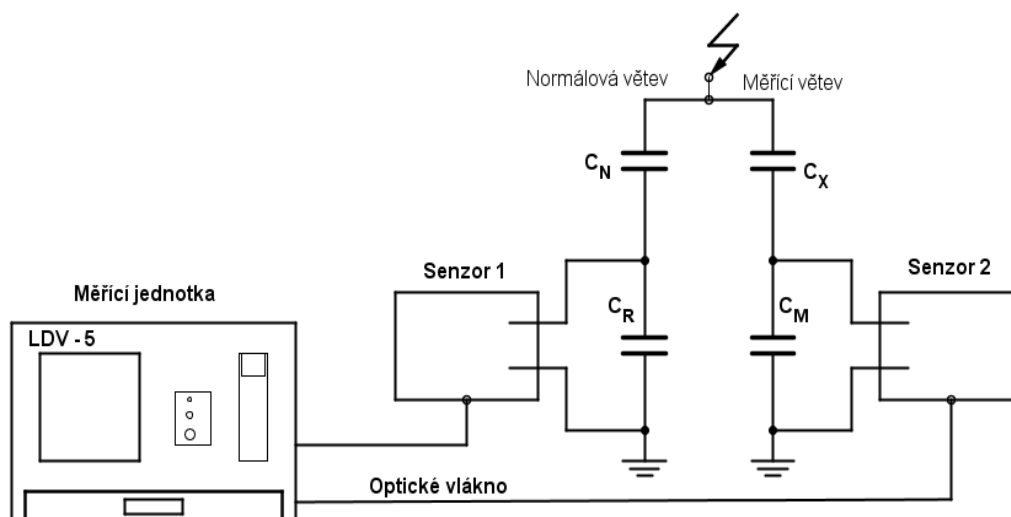


Obr. 3.4 Zapojení pro měření izolačního odporu

Před samotným měřením se kabel na jedné straně oholil až na jádro tak, jako je tomu na obr. 3.4. Jednotlivé žíly se od sebe oddělily, aby při měření nevznikaly chyby. Následovalo umístění svorek měřicího přístroje na kabel, přičemž první svorka byla připojena k jednomu jádru a druhá svorka se postupně připojovala k ostatním. Tento postup se opakoval pro všechna jádra. Stejnoseměrné napětí o velikosti 500 V se přiložilo ke svorkám umístěným na jádrech a hodnota izolačního odporu se z přístroje odečetla po jejím ustálení, ale minimálně po 1 minutě po připojení napětí.

3.2.3 Ztrátový činitel, relativní permitivita

Ztrátový činitel a permitivita se měřily pomocí metody Scheringova můstku. Pro samotné měření byl použit automatický Scheringův můstek LDV-5 a vysokonapěťový systém HighVolt, který se skládal z ovládacího modulu SM 4 s ovládacím panelem Siemens Simatic OP17 a výkonového modulu LM 30. Základní koncept měřicí soustavy je zobrazen na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Schéma měřicího systému (překresleno z [28])

Můstek se skládá z měřicí a referenční větve. Měřicí větev lze považovat za napěťový dělič, kde C_X představuje kapacitu měřeného objektu zapojeného do série s nízkonapěťovým kondenzátorem C_M . Referenční větev obsahuje vysokonapěťový normálový kondenzátor C_N zapojený do série s nízkonapěťovým kondenzátorem C_R . Scheringův můstek nemusí být pro měření $\text{tg } \delta$ a C_X zcela vyvážen, jako tomu je v případě obvyklých můstků. Ztrátový činitel se určí ze změřeného fázového úhlu mezi napětími na kondenzátorech C_M a C_R . Tato napětí jsou digitalizována pomocí bateriemi napájenými vysoce přesnými senzory 1 a 2. Každý senzor je vybaven velkou impedancí, nízkošumovým zesilovačem následovaným rychlým 16 - bitovým AD převodníkem a elektrooptickým rozhraním. Optickými vlákny přenášené digitalizované signály jsou dále zpracovávány počítačem, kde se pomocí Fourierovy transformace vypočítá fázový rozdíl základní frekvence zkušebního napětí. To zajišťuje vysoce přesné měření $\text{tg } \delta$ i kapacitu C_X měřeného objektu. [28]

Měření ztrátového činitele a permitivity probíhalo na stejně upraveném kabelu jako u měření povrchového odporu, tedy kabelu s elektrodami tvořenými měděnou páskou. Takto upravený kabel byl zavěšen dostatečně daleko od všech předmětů, čímž se zvýšila přesnost měření i bezpečnost vůči zkratu. Jedna svorka napěťového zdroje se připevnila na jádro kabelu, druhá pak k povrchové elektrodě. Ukázka zavěšení kabelu a detail připojení svorky na elektrodu je na *obr. 3.6*.



Obr. 3.6 Zavěšení kabelu (vlevo), detail zapojení elektrody (vpravo)

Po zajištění všech bezpečnostních prvků probíhalo samotné měření, kdy se postupně v krocích po 100 V zvyšovalo napětí od 500 V do 4 kV a přístroj LDV-5 v každém kroku uložil hodnotu ztrátového činitele a permitivity na pevný disk. Tento postup se opakoval

pro všechna měřicí místa. Automatický Scheringův můstek LDV-5 a vysokonapěťový systém HighVolt jsou zobrazeny na obr. 3.7.



Obr. 3.7 Automatický Scheringův můstek (vlevo) a vysokonapěťový systém HighVolt (vpravo)

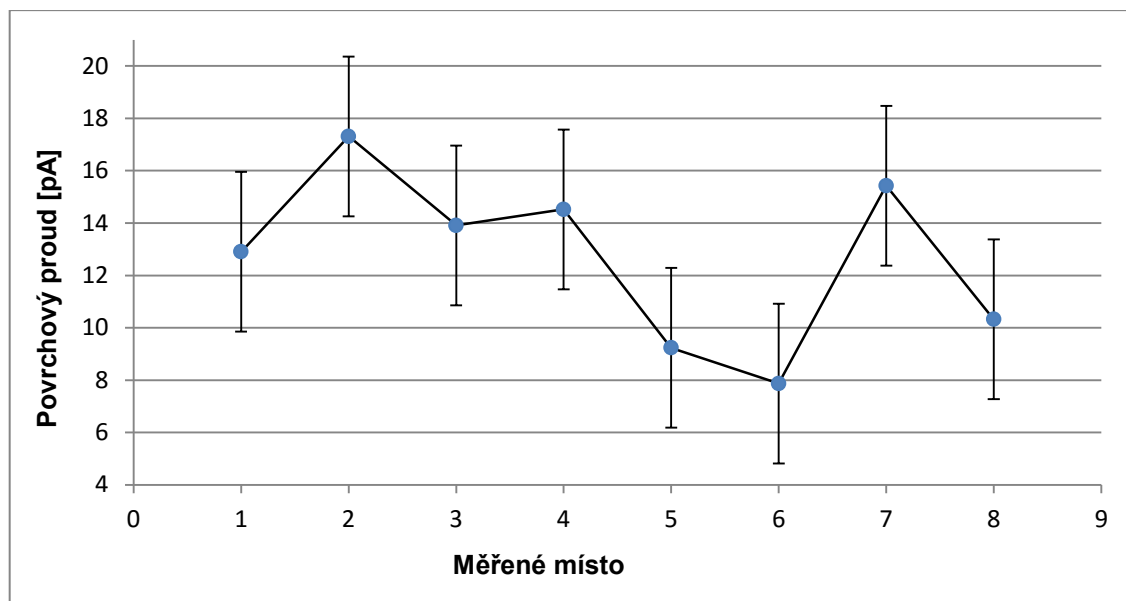
3.3 Výsledky měření a jejich hodnocení

3.3.1 Povrchový odpor

Soubor naměřených dat byl podroben statistické analýze, konkrétně testu na odlehlé hodnoty. Tento soubor obsahoval, zřejmě díky špatnému odečtení dat z přístroje, dvě odlehlé hodnoty, které byly posléze vyřazeny. Pro ověření přesnosti měření povrchového odporu byl vypočten aritmetický průměr naměřených povrchových proudů, jejich směrodatná odchylka a variační koeficient. Popis a vzorce statistických parametrů jsou uvedeny v příloze B. Z hodnot těchto parametrů je patrné, že výsledky měření z různých měřených míst jsou velice podobné. Lze předpokládat, že vyšší variační koeficient přes 24 % vznikl působením rušivých vlivů při měření. Pomocí vzorce (3.1) byl vypočten povrchový odpor. V tab. 3.1 jsou uvedeny výsledky měření a na obr. 3.8 je zobrazen graf s naměřenými povrchovými proudy z 8 míst kabelového vzorku spolu s jejich směrodatnými odchylkami. Všechny naměřené povrchové proudy, které sloužily pro výpočet povrchového odporu, jsou uvedeny v příloze A.

Tab. 3.1 Vypočtené hodnoty z naměřených povrchových proudů

Aritmetický průměr [pA]	Směrodatná odchylka [pA]	Variační koeficient [%]	Povrchový odpor [TΩ]
12,6898	3,0516	24,0479	39,4019



Obr. 3.8 Graf naměřených hodnot povrchového proudu

3.3.2 Izolační odpor

Izolační odpor se naměřil mezi všemi žilami, které jsou v kabelu obsaženy. Změřené hodnoty se přepočítaly na kilometr vydělením přepočítávacím koeficientem. Následně byl z přepočtených hodnot vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky z měření izolačního odporu jsou uvedeny v tab. 3.2. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze A.

Tab.3.2 Výsledky z přepočtených izolačních odporů na km

Napětí [V]	Aritmetický průměr [Ω/km]	Směrodatná odchylka [Ω/km]	Variační koeficient [%]
500	$1,98 \cdot 10^9$	$1,52 \cdot 10^8$	7,67

Naměřené izolační odpory byly velice podobné, což se podepsalo pod nízký variační koeficient 7,67 %. V katalogu společnosti Kabex® se uvádí, že izolační odpor je větší než 1000 M Ω/km , naměřená hodnota je tedy téměř dvakrát větší.

3.3.3 Ztrátový činitel

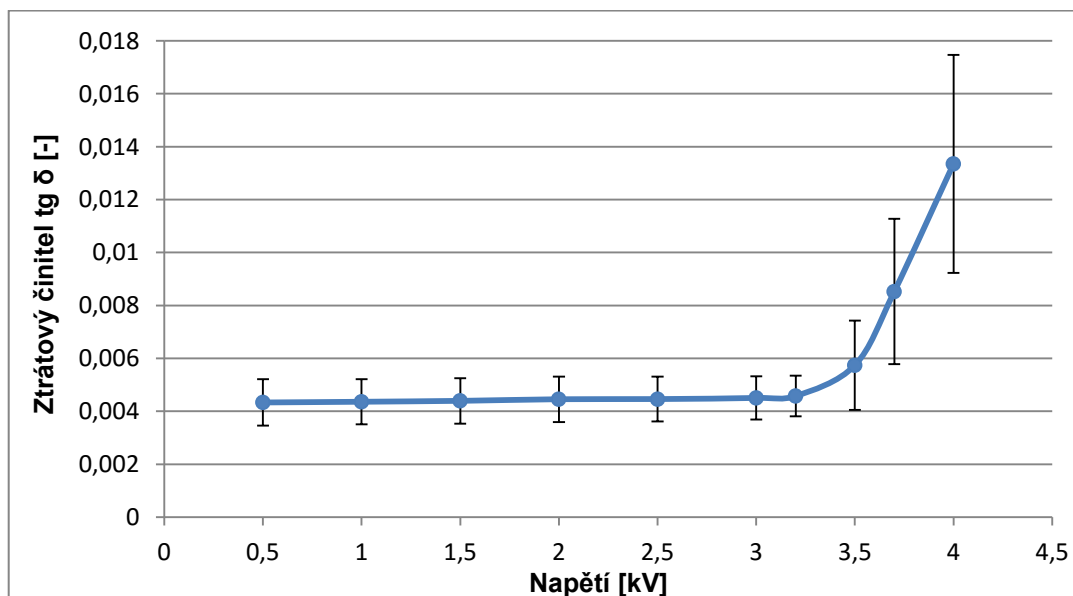
Z měření ztrátového činitele a permitivity se podařilo získat hodnoty z devíti měřených míst. U jednoho měřicího místa byly elektrody umístěny příliš blízko k oholenému jádru, a tak by měření bylo nepřesné. Aritmetický průměr, směrodatná

odchylka a variační koeficient byly spočteny pro vybrané hodnoty napětí 0,5 - 3,5 kV a jsou uvedeny v tab. 3.3. Veškeré hodnoty ztrátového činitele při těchto napětích jsou uvedeny v příloze A.

Tab. 3.3 Vybrané výsledky z měření ztrátového činitele

Napětí [kV]	Aritmetický průměr $\text{tg } \delta$ [-]	Směrodatná odchylka $\text{tg } \delta$ [-]	Variační koeficient [%]
0,5	0,004334	0,000876	20,22
1	0,004361	0,000857	19,64
1,5	0,004395	0,000857	19,50
2	0,004456	0,000859	19,27
2,5	0,004463	0,000848	19,00
3	0,004505	0,000814	18,07
3,5	0,005741	0,001687	29,39

Variační koeficient se pohybuje kolem 20 %, což lze vzhledem k nízkým hodnotám ztrátového činitele považovat za dobře naměřené hodnoty. Vyšší variační koeficient vycházel při hodnotách napětí nad 3,5 kV, kde už docházelo ke značnému růstu tangenty ztrátového úhlu. Závislost ztrátového činitele na napětí jsou spolu se směrodatnými odchylkami zobrazeny v grafu na obr. 3.9. Z tohoto grafu je také zřejmé, že ztrátový činitel je téměř konstantní. K výraznému nárůstu dochází až po překročení více než trojnásobku jmenovitého napětí.



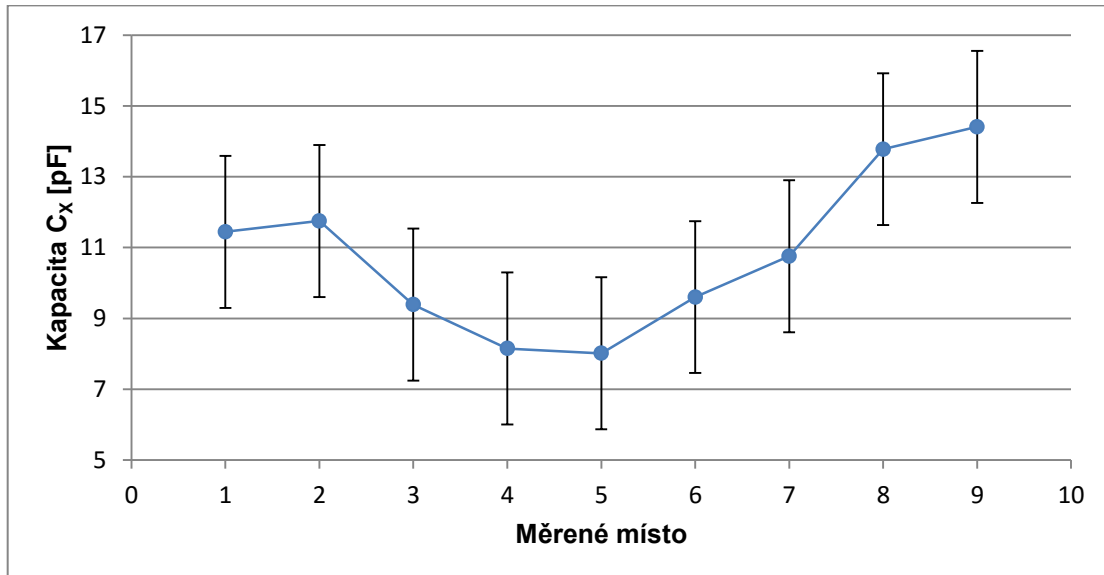
Obr. 3.9 Graf závislosti ztrátového činitele na napětí

3.3.4 Relativní permitivita

Jak bylo již napsáno výše, měření relativní permitivity je součástí měření ztrátového činitele. Kapacita izolantu se opět měřila na devíti místech kabelu. Pro napětí 1 kV se ze všech měřených míst vypočetl aritmetický průměr a z něho se pomocí vzorce (3.2) vypočetla kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu C_0 . Následně se dle vzorce (2.5) vypočetla samotná relativní permitivita. V příloze A jsou uvedena všechna naměřená data pro napětí 1 kV.

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln d_2/d_1} [F], \quad (3.2)$$

kde C_0 [F] je kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu, ε_0 [F/m] je permitivita vakua, l [m] je délka elektrody, d_1 [m] je vnitřní průměr izolace a d_2 [m] je vnější průměr izolace. Vnitřní a vnější průměr izolace byl naměřen pomocí digitálního posuvného měřítka. Graf naměřených hodnot C_x z 9 měřených míst je spolu se směrodatnými odchylkami zobrazen na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Graf naměřených hodnot kapacity C_x

Zde se variační koeficient pohybuje pod 20 %, což při velmi malých hodnotách kapacit znamená, že jsou hodnoty z měřených míst po celé délce kabelu podobné a jedná

se o poměrně přesné měření. Výsledky z měření relativní permitivity jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Vypočtené hodnoty z měření relativní permitivity

Kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu C_0 [F]	Aritmetický průměr kapacit C_x při 1 kV [F]	Směrodatná odchylka [F]	Variační koeficient [%]	Relativní permitivita ϵ_r [-]
$1,868 \cdot 10^{-12}$	$1,081 \cdot 10^{-11}$	$2,145 \cdot 10^{-12}$	19,84	5,786

Závěr

Tato bakalářská práce se v první části zabývala rešerší na popis všech izolačních vrstev kabelového svazku a materiály, které se pro jejich výrobu používají, ale i materiály, které byly používány v minulosti. U těchto látek jsou popsány vlivy působení různých prostředí a jejich mechanické a dielektrické vlastnosti, což je nezbytné pro určení jejich použití. Materiálů je samozřejmě celá řada, a tak se tato práce snažila popsat ty nejdůležitější. Další materiály by mohly být tématem pro případné rozšíření práce. Další část rešerše tvořila diagnostika kabelové izolace, kde byly popsány dielektrické parametry a metody jejich měření. Metodami měření kabelové izolace se zabývá norma ČSN 34 7010-82, která byla jedním ze zdrojů při popisu těchto metod.

Poslední část této bakalářské práce se zabývala praktickým experimentem, ve kterém se měřily vybrané dielektrické parametry na kabelu, jehož základní specifikace jsou popsány v kapitole 3.1. V práci se nachází statistické hodnocení, a to pomocí směrodatné odchylky a variačního koeficientu. Tyto statistické metody objasnily, jak se měnily hodnoty parametrů vzhledem k měřícím místům, které byly rozprostřeny po celé délce kabelu. Variační koeficient se u měření povrchového odporu, ztrátového činitele a relativní permitivity pohyboval kolem 20 %, to při velmi malých hodnotách vypovídá o téměř stejnorodých výsledcích. Pro měření elektrické pevnosti nebylo získáno dostatečné množství vzorků kabelu od výrobce, aby mohla být dosažena dostatečná četnost měření. Na základě toho, rozhodl vedoucí práce o nekonání této zkoušky. Namísto měření elektrické pevnosti se změřil povrchový odpor, jehož hodnota přesahovala 39,4 T Ω . U měření izolačního odporu byly hodnoty velice podobné, což dokazuje variační koeficient 7,67 %. V katalogu výrobce kabelového vzorku Kabex® je uvedeno, že je izolační odpor větší než 1 G Ω /km. Naměřená hodnota dosahuje téměř dvojnásobku, tedy 1,98 G Ω /km. Při měření dielektrických ztrát byly hodnoty ztrátového činitele a kapacity C_x v závislosti na napětí konstantní až do překročení více než trojnásobku jmenovitého napětí. Poté již docházelo k jejich značnému nárůstu, což odpovídá teoretickým předpokladům.

Výrobce si nepřál uveřejnit informace z výstupní kontroly dodaného kabelu, a proto nebylo možné naměřené hodnoty porovnat s referenčními. Bohužel nebylo možné nalézt podobný veřejný zdroj, který by poskytl informace alespoň pro podobný typ kabelu.

Jelikož se ale kabelový vzorek skládal ze zesíťovaného polyetylenu XLPE a bezhalogenové oheň retardující směsi HFFR, byly naměřené hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele porovnány s referenčními hodnotami těchto materiálů, které jsou převzaty z katalogů společností Brugg cables a Lucobit. Dle těchto katalogů je relativní permitivita u XLPE 2,4 a u HFFR 3,6. Obě tyto hodnoty jsou menší než vypočtená hodnota ϵ_r , která je 5,79. Dále katalogy uvádějí referenční hodnoty ztrátového činitele, který je u XLPE $7 \cdot 10^{-4}$ a v případě HFFR $7,35 \cdot 10^{-3}$. Naměřený $\text{tg } \delta$ dosahuje hodnoty $4,4 \cdot 10^{-3}$, nachází se tedy mezi referenčními hodnotami těchto dvou materiálů, avšak blíže bezhalogenové oheň retardující směsi.

Bakalářská práce si kladla za cíl podat ucelené informace o izolačních složkách v kabelovém svazku a naměřit vybrané dielektrické parametry jako jsou povrchový a izolační odpor, permitivita a ztrátový činitel. Tento cíl byl dle mého názoru naplněn. V budoucnu bych chtěl pracovat na rozšíření této práce a změřit i zbylé dielektrické parametry.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ELEKTRO. *Jak se dělá kabel* [online]. FCC Public, 2011, (7) [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-se-dela-kabel--9622>
- [2] ELEKTRO. *Z historie kabelů* [online]. FCC Public, 2008, (1) [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-kabelu-11642>
- [3] DIXI TRANSPORTKABEL. *JXFE - V B2ca,s1,d0 E30-90: Vyobrazení* [online]. 2013. vyd. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://www.tkdx.cz/katalog-kabelu-detail/28_jxfe---v-b2cas1d0-e30-90
- [4] LINHART, Roman. *Kabely a vodiče, kabelové soubory, spojovací a izolační materiál*. 1. vyd. Praha: Merkur, 1988, 250 s.
- [5] BUCHLOVSKÝ, Emil, František HOUŽVIČKA a Pavel GREŠÍK. *Výroba kabelů a vodičů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 440 s.
- [6] KOLEKTIV AUTORŮ, REDIGOVAL ARTBAUER, J.: *Kabely a vodiče*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1956
- [7] KUIMOV, I.E. a A.V. PAPKOV. *Specific materials based on mica papers for fire resistant cable production*. In: Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075) [online]. IEEE, 2000, s. 131-132 [cit. 2016-02-20]. DOI: 10.1109/ELINSL.2000.845474. ISBN 0-7803-5931-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=845474>
- [8] ENCYKLOPEDIJE COJECO. *Muskovit* [online]. 2000, 2.6.2004 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=62588&s_lang=2&title=muskovit
- [9] ENCYKLOPEDIJE COJECO. *Flogopit* [online]. 2000, 11.6.2006 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=26956&title=flogopit&s_lang=2
- [10] SIBRAL UNIFRAX. *Textilie* [online]. 2010 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.inheat.cz/produkty&idk=82>
- [11] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [12] STANĚK, Jaroslav. E-LTEX. *Polyamidová vlákna* [online]. 2010 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/466/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Polyamidova-vlakna.html>
- [13] ODETKA. *Specifikace materiálu: Kevlar* [online]. 2008 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_kevlar.aspx
- [14] ODETKA. *Specifikace materiálu: Nomex* [online]. 2008 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx
- [15] POLYESTER. *Polyesterová vlákna* [online]. 2013 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.polyester.cz/Polyesterova-vlakna.php>
- [16] MATERIO. *MatériO # 6 2012* [online]. 2012 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://klient.mailone.cz/_e_email.php?ident=MTQ1NzU1NDR8MTA1OTk4Mjg2fDI2NDZ8ZTY3MzM4NjMyYmVjZmZlZTBiNDg0NDA0MzI3ZTg2OGY
- [17] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s.

- ISBN 978-80-7080-788-0
- [18] EPP Plasty: *Polytetrafluoretylen*. [online]. 2013 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/ptfe.php>
- [19] HEYMAN. *Technické informace: Polyamidy* [online]. 2003 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische_angaben/polyamidy.pdf?f=1
- [20] HENDERSON, A.M. Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers: a general review. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 1993, **9**(1), 30-38 [cit. 2016-04-23]. DOI: 10.1109/57.249923. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=249923>
- [21] PINKEROVÁ, Martina a Radek POLANSKÝ. Nové trendy v materiálech používaných pro izolaci a opláštění kabelů. *Electroscope* [online]. Plzeň, 2012, 2012(3) [cit. 2016-04-23]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3_2012/r6c2c4.pdf
- [22] ENCABLES. *Typy stínění* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.elisch.cz/wp-content/uploads/2015/08/Typy-_stineni.pdf
- [23] ČSN 34 7010-82. *Elektrické kabely - Doplňující zkušební metody*. 4/09. Praha: UNMZ, 2009.
- [24] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [25] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [26] ČSN IEC 250. *Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. 1. vyd. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997.
- [27] KABEX: Výroba kabelů. *1-CHKE-R, 1-CXKE-R* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.kabex.cz/1-chke-r-1-cxke-r>
- [28] ERSOY, Aysel, Mukden UGUR, Ayten KUNTMAN, Ahmet MEREV a Berrak ÖZTÜRK. The effect of colemanite on dielectric properties of polymers. In: *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on* [online]. IEEE, 2009, s. 341-344 [cit. 2016-05-14]. ISBN 978-9944-89-818-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=845474>

Přílohy

Příloha A - Naměřené hodnoty

Povrchový proud

Tab. 4.1 Hodnoty povrchového proudu, 8 měřených míst

Povrchový proud [pA], 8 měřených míst							
1	2	3	4	5	6	7	8
12,906	17,312	13,912	14,525	9,236	7,873	15,429	10,325

Izolační odpor

Tab. 4.2 Změřené a přepočtené hodnoty z měření izolačního odporu

Délka kabelu [m]	Napětí [V]	Naměřený izolační odpor [Ω]	Přepočtený izolační odpor na km [Ω/km]
312	500	$6,33 \cdot 10^9$	$1,98 \cdot 10^9$

Ztrátový činitel

Tab. 4.3 Hodnoty ztrátového činitele při napětí 0,5 - 3,5 kV, 9 měřených míst

U [kV]	Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ [-], 9 měřených míst								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,00547	0,00559	0,00463	0,00376	0,00354	0,00457	0,00500	0,00328	0,00317
1	0,00548	0,00558	0,00466	0,00396	0,00351	0,00456	0,00499	0,00328	0,00323
1,5	0,00558	0,00556	0,00464	0,00423	0,00352	0,00456	0,00498	0,00328	0,00321
2	0,00560	0,00558	0,00465	0,00464	0,00354	0,00458	0,00499	0,00330	0,00323
2,5	0,00552	0,00559	0,00467	0,00468	0,00355	0,00459	0,00501	0,00331	0,00324
3	0,00552	0,00560	0,00472	0,00470	0,00356	0,00461	0,00502	0,00357	0,00324
3,5	0,00614	0,00606	0,00477	0,01006	0,00516	0,00489	0,00529	0,00568	0,00362

Relativní permitivita

Tab. 4.4 Hodnoty kapacit C_x při 1 kV, 9 měřených míst

U [kV]	Kapacita C_x [pF], 9 měřených míst								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	11,444	11,750	9,389	8,152	8,016	9,602	10,756	13,777	14,408

Příloha B - Popis a vzorce statistických výpočtů

Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je součet všech hodnot vydělený jejich počtem.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka ukazuje, jak moc se jednotlivé hodnoty vzájemně liší. Vypočítá se jako odmocnina z rozptylu.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Variační koeficient

Variační koeficient je podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Posuzuje relativní velikost rozptýlenosti dat vzhledem k průměru.

$$V_x = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 [\%]$$