

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Souhrnná analýza dielektrických parametrů izolačního
systému kabelu**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav LIŠKA**
Osobní číslo: **E12N0020P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Souhrnná analýza dielektrických parametrů izolačního 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 stručný teoretický úvod zabývající se izolačními systémy kabelů (jejich konstrukce, výroba, používané materiály).
2. Proveďte rešerši českých norem zabývajících se měřením dielektrických parametrů a navrhněte vhodný diagnostický systém (výběr jednotlivých parametrů, návrh posloupnosti měření, určení četnosti měření).
3. Na dodaných vzorcích kabelů změřte vybrané dielektrické parametry.
4. Vyhodnoťte naměřená data a proveďte základní statistickou analýzu.




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


1. České technické normy
2. MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; TRNKA, P.
Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, SCOPUS, Interscience-Wiley, apod.)

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná diplomová práce poskytuje přehled izolačních materiálů, které se používají na izolaci žil nebo opláštění kabelů. Poskytuje informace o dielektrických parametrech, které je nutné kontrolovat pro správnou funkci kabelových systémů a popisuje metody kontrol. Tyto metody odpovídají ČSN (české státní normy) nebo firemním předpisům kabeloven. Práce se zabývá i praktickou částí měření dielektrických prvků, kde popisuje měření povrchového odporu, izolačního odporu, ztrátového činitele, permitivity a průrazného napětí na dodaných vzorcích. Součástí práce je i následné vyhodnocení změřených parametrů a porovnání s předepsanými hodnotami.

Klíčová slova

Izolace, kabel, žíla, plášť, diagnostický systém, povrchový odpor, izolační odpor, ztrátový činitel, permitivita, elektrická pevnost

Abstract

The main objective of this thesis is to provide an overview of insulating materials, which are used for core insulation or jacketing of cables. The thesis is concentrated on the information about the dielectric parameters that must be checked for correct function of cable systems and gives description of controlling methods. These methods correspond to the ČSN (Czech national standards), or firm's regulations of cable manufacturers. This work deals with the practical part of the measurements of dielectric parameters and describes the measurement of surface resistance, insulation resistance, dissipation factor and breakdown voltage on supplied samples. The work includes the evaluation of the measured parameters and comparison with the prescribed values.

Key words

Insulation, cable, core, jacket, diagnostic system, surface resistance, insulation resistance, dissipation factor, permittivity, breakdown voltage

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2014

Václav Liška

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Radkovi Nejdlovi za pomoc při měření izolačního odporu, prohlídku společnosti Kabelovna Kabex a.s. a profesionální rady při vyhodnocení měřených vzorků. Poděkování patří i Ing. Monice Bartůňkové za pomoc při měření na katedře technologií a měření a společnosti Kabelovna Kabex a.s. za podrobný popis výroby kabelů a za dodání měřených vzorků.

Ale hlavně bych rád poděkoval svým rodičům za podporu během mého studia.

Tato práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 IZOLAČNÍ SYSTÉM KABELŮ	11
1.1 IZOLAČNÍ LAKY NA HOLÉ VODIČE.....	12
1.1.1 Olejové laky.....	13
1.1.2 Syntetické laky.....	13
1.2 SKLOSLÍDOVÁ PÁSKA	14
1.3 TEXTILNÍ IZOLACE.....	15
1.3.1 Přírodní vlákna	15
1.3.2 Syntetická vlákna	17
1.4 SEPARAČNÍ MATERIÁLY	18
1.5 KABELOVÝ PAPIR	19
1.5.1 Kabelový papír pro silové kabely	20
1.5.2 Napouštěcí hmota pro kabelový papír	20
1.6 ELASTOMERY	20
1.6.1 Přírodní kaučuk	21
1.6.2 Syntetické kaučuky	21
1.6.3 Základní kaučuky	21
1.6.4 Olejovzdorné kaučuky	23
1.6.5 Teplovzdorné kaučuky.....	24
1.7 TERMOPLASTY	24
1.7.1 Polyvinylchlorid (PVC).....	24
1.7.2 Polyamidy (PA).....	26
1.7.3 Polypropyleny (PP).....	26
1.7.4 Fluoropolymery	27
1.7.5 Etylenvinylacetát (EVA)	27
1.8 POLYETYLENY	28
1.8.1 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)	29
1.8.2 Lineární nízkohustotní polyetylen (LLDPE).....	30
1.8.3 Vysokohustotní polyetylen (HDPE)	30
1.8.4 Zesíťovaný polyetylen (XLPE).....	30
1.9 STÍNÍCÍ A KONSTRUKČNÍ KOVOVÉ MATERIÁLY	32
1.9.1 Druhy stínění	32
1.9.2 Opláštění.....	33
2 DIAGNOSTIKA KABELOVÝCH SYSTÉMŮ	35
2.1 IZOLAČNÍ ODPOR	36
2.2 POVRCHOVÝ ODPOR	36
2.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY – MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A PERMITIVITY.....	37
2.4 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	39
2.5 ZKOUŠKA NAPĚTÍM.....	40

3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	41
3.1	SPECIFIKACE VZORKŮ.....	41
3.2	POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ.....	42
3.3	PŘÍPRAVA A POSTUP MĚŘENÍ.....	45
3.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	50
3.5	SHRnutí DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	55
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	60
	PŘÍLOHY	64
	PŘÍLOHA A – KOMPLETNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	64
	PŘÍLOHA B – VZORCE STATISTICKÉHO VÝPOČTU.....	69

Seznam symbolů a zkratek

°	stupeň úhlu	pF	pikofarad
%	procento	P_z	ztracený výkon
°C	stupeň celsia	R	elektrický odpor
ϵ_r	relativní permitivita	R_x	změřený el. Odpor
Ω	ohm	SS	stejnoseměrný
ω	úhlová rychlost	tg δ	ztrátový činitel
μm	mikrometr	T Ω	teraohm
A	ampér	U	napětí
C	kapacita	V	volt
cm	centimetr	V(1-5)	značení vzorku
d	vzdálenost		
E_p	elektrická pevnost		
F	farad		
g	gram	Al_2O_3	oxid hlinitý
Hz	hertz	CO_2	oxid uhličitý
hPa	hektopascal	ČSN	České státní normy
I	proud	EVA	etylenvinylacetát
kV	kilovolt	HFRR	halogen free flame retardant (bezhalogenové oheň retardující směs)
km	kilometr		
kN	kilonewton		
kHz	kilohertz	H_2O	voda
l	litr	IEC	International Electrotechnical Commission
m	metr		
mm	milimetr		
mm^2	milimetr čtvereční	NaCl	chlorid sodný
m^2	metr čtvereční	PA	polyamid
mol	látkové množství	PE	polyetylen
M Ω	megaohm	PP	polypropylen
MPa	megapascal	PTFE	polytetrafluoretylen
N	newton	PVC	polyvinylchlorid
Pa	pascal	XLPE	síťovaný polyetylen
pA	pikoampér		

Úvod

V dnešní době, kdy nás elektrotechnika doslova obklopuje na každém kroku, je nezbytné, aby tato technika byla bezpečná a plnila spolehlivě svoji funkci v prostředí, pro které je určena. Prvním krokem pro zabránění nebezpečí je dodržování norem a technologických postupů při výrobě a montáži, ale i v provozu.

Jinak tomu není ani při výrobě, montáži a následném provozu kabelových systémů. I pro tyto výrobky platí, že je nutné znát prostředí, ve kterém se budou vyskytovat a funkci, kterou budou plnit. Jedině tak je zajištěno, že bezpečně budou plnit svou funkci po celou dobu své životnosti. Kvalitu a případné defekty zkoumá obor, kterému se říká technická diagnostika. Pomocí různě získaných dat zjišťuje určité parametry výrobku, které následně porovnává a vyhodnocuje s předepsanými hodnotami.

Základem pro kvalitní výrobek je zvolit takové materiály, které budou pro dané prostředí nejvhodnější. Různé materiály se totiž v daném prostředí chovají odlišně. Technická diagnostika a materiály jsou dva důležité obory pro vývoj a testování nových i již provozovaných výrobků. Tato diplomová práce se zaměřuje na diagnostiku zkoumající dielektrické parametry izolačního systému kabelu.

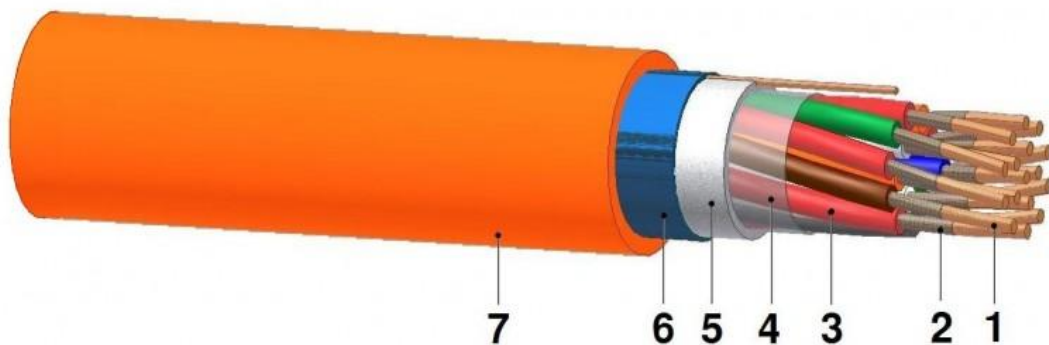
Práce nejprve představuje konstrukci kabelového systému a materiály, které se používají pro různé izolační vrstvy. Popisuje jejich vlastnosti a možnosti použití do různých prostředí tak, aby degradace probíhala co nejpomaleji a tím byla životnost kabelu co nejdelší. Další část práce se zaměřuje na rešerši ČSN¹ zabývajících se měřením dielektrických parametrů kabelu. ČSN stanovují pravidla měření různých parametrů na pláštích i vnitřních izolacích kabelů. Práce popisuje vhodný diagnostický systém včetně posloupnosti a potřebného počtu měření jednotlivých parametrů. V další části jsou tyto parametry měřeny na vzorcích dodaných společností Kabelovna Kabex a.s. Úkolem je tedy změřit vlastnosti vzorků dle ČSN a ověřit, zda testované vzorky vyhovují specifikaci. V poslední části práce se zpětně šetří možné diagnostické chyby a jsou zde shrnuty dosažené výsledky měření.

¹ ČSN - České státní normy

1 Izolační systém kabelů

V roce 1879 [1] byl vyroben první kabel pro distribuci elektřiny. Dnešní kabelové systémy se od těch používaných v minulosti liší. Požadavky na kvalitu a bezpečnost kabelových systémů jsou stále větší. Také na životní prostředí se bere čím dál tím větší ohled a tak není divu, že se od některých materiálů ustoupilo nebo se dokonce nesmějí používat. Každým dnem je slyšet ve zprávách, že požár zapříčinila špatná elektroinstalace. Proto je důležité, aby kabely, které se v instalaci používají, byly kvalitní a po dobu jejich životnosti plnily bezpečně svoji funkci. [2] A právě životnost se dá ovlivnit výběrem vhodné izolační vrstvy do prostředí, ve kterém se bude používat.

Kabel je složen z několika izolačních vrstev, které jsou na vodič nanášeny postupně ve vrstvách a každá vrstva má svoji specifickou funkci. V této části práce budou popsány všechny vrstvy izolačního systému kabelu od vodivého jádra až po ochranný obal.



Obr. 1 Vícevrstvá izolace (převzato z: [3])

Na obrázku 1 je zobrazen příklad kabelu o několika vrstvách. Jádro (1) je vyrobené nejčastěji z mědi nebo hliníku. Další vrstvu může tvořit skloslídová páska (2), která má za úkol při roztavení vnější izolace potenciálně oddělit jádra od sebe a zabránit tak případnému zkratu. Následuje izolace z polymerních směsí (3). Mezi ně nejčastěji patří elastomery a termoplasty. V jiných aplikacích může tuto vrstvu tvořit izolační papír, textilní vlákno, nebo izolační lak. Vodiče lze spojit do svazku, který lze různě zakroutit a vylepšit tím mechanické vlastnosti. Na svazek vodičů se nanáší plnidlo (5), které zaplňuje mezery mezi vodiči a vytváří kulatý tvar pro nanesení pláště. Je-li plnidlo mezi vodiči nežádoucí, pak se svazek vodičů obalí fólií (4), na kterou se nanese plnidlo. Na vrstvu plnidla se může nanést kovová vrstva (6), která je tvořena páskou, nebo se paralelně oplétá svazkem ocelových drátků. Tato vrstva může mít více úkolů. Může tvořit stínění nebo se jedná o vrstvu posilující mechanické

vlastnosti kabelu. Poslední vrstvou (7) je opláštění. To je nejčastěji tvořeno z polymerních směsí, ale i z kovových materiálů jako je olovo a hliník. V některých aplikacích se přidává ochranný obal, který je nejčastěji tvořen z pancíře. Ten je chráněn impregnační vrstvou bránící korozi. Toto byl jen příklad, jaké vrstvy se v kabelu mohou nacházet. Následující kapitoly se zaměří na nejčastěji používané materiály pro výrobu kabelových systémů.

1.1 Izolační laky na holé vodiče

Izolační lak se nachází na povrchu jádra vodiče. Jedná se o velice tenkou izolaci, která se nanáší v 5 - 8 vrstvách při maximální tloušťce jedné vrstvy 0,01 mm. Pro zlepšení izolačních vlastností se nanese na sebe dva izolační laky, v tomto případě nazýváme lakované jádro duplex, při třech vrstvách laků pak triplex. [4]

Izolační laky jsou roztoky z velké části organických syntetických látek v organických rozpouštědlech, do kterých jsou přimíchávána ředidla a katalyzátory. Aplikace laků probíhá tak, že se látka válečky, impregnační či ponořením nanese na vodič a vrstva se následně vypálí při teplotě 300 až 500 °C [4]. Rozpouštědla a ředidla se při vypalování odpaří a na vodiči zůstane pevný film laku. To, jaké bude mít lak vlastnosti, závisí na chemickém složení, struktuře a podmínkách zpracování. Správný poměr složek laku a rozpouštědel určuje viskozitu laku. Při vypalování je důležité vypalovat rovnoměrně, pozvolně a udržovat ideální teplotu. Ideálními podmínkami se dosáhne hladký a rovný film bez bublin a nerovností. Mechanické vlastnosti lakového filmu musí splňovat dostatečnou tažnost, ohebnost, odolnost vůči oděru a přilnavost k jádru vodiče. Největší mechanické namáhání izolace nastává při namotávání na cívku nebo následné instalaci. Izolace musí být tak kvalitní, aby bez problémů tyto úkoly zvládla bez ztráty mechanických či elektrických vlastností. Dále lak musí vydržet různé vlivy okolního prostředí. Jedná se hlavně o odolnost vůči vyšší teplotě, minerálním olejům, impregnačním lakům, plynům, pohonným a chladicím směsím. Stárnutí laků se projevuje zhoršením vlastností způsobené tvrdnutím laků a tím zvýšením křehkosti, což má za následek praskání a odchlípení od jádra. Elektrické vlastnosti, které se u laku sledují, jsou zejména elektrická pevnost a dielektrické ztráty. [4][5]

Laky se rozdělují na tři základní skupiny:

- a) Lihové laky - z přírodních pryskyřic
- b) Olejové laky - z vysychavých olejů
- c) Syntetické laky - ze syntetických pryskyřic

1.1.1 Olejové laky

Základní filmtvornou složku tvoří vysychavé oleje, které se modifikují přírodními bitumeny (asfalt - gilsonit) a přírodními, hlavně fosilními pryskyřicemi (kalafuna, kopál). Z ekonomických důvodů se přešlo od přírodních pryskyřic k syntetickým lakařským pryskyřicím. Nejosvědčenějším se stala chemicky upravená fenol-formaldehydová pryskyřice, která má dobrou rozpustnost v rostlinných olejích. K získání větší pružnosti se pryskyřice plastikuje, to znamená, že se eterifikují alkoholy. Olejové laky mají výborné vlastnosti, ovšem jejich výroba je časově náročnější kvůli přesně stanovené rychlosti a teplotě vypalování. Nevýhody spočívají v malé odolnosti proti aromatickým rozpouštědlům jako například benzen, toluen a jiné. [6] Dle [7] jsou olejové laky odolné povětrnostním podmínkám.

1.1.2 Syntetické laky

Příklady syntetických laků jsou:

Polyvinylacetátový lak – základní složka je tvořena rosolem modifikovaným polyvinylformalem. Polyvinylformal je sám o sobě termoplastický a hlavně málo odolný vůči vlhkosti a rozpouštědlům. Proto se přidává rosolová nebo melamin-formaldehydová složka. Silnou stránkou laku jsou dobré mechanické vlastnosti, odolnost vůči vlhkosti, alkoholům a esterům. Vhodný je do teploty 140 °C, po překročení této teploty nastává termoplastičnost a vznik vlasových trhlinek. Využívá se především na větší průřezy vodičů. [6]

Polyamidový lak – jedná se o fenol-formaldehydovou pryskyřici plastikovanou polyamidem. Vrstva laku je tvrdá, ale zároveň ohebná. Vlivem polyamidu je vrstva více navlhavá a to má nepříznivý vliv na mechanické, ale hlavně na elektrické vlastnosti. Jeho hlavní výhodou je odolnost vůči teplotním nárazům, nižší teplota vypalování 300 až 350 °C (ekonomická a časová výhoda oproti olejovým lakům), odolnost vůči impregnačním lakům a pohonným směsím. [6] Izolace je klasifikována pro tepelnou třídu E (120 °C). [5]

Polyuretanový lak – hlavní výhodou tohoto laku je, že se vodiče dají spájet bez odstranění lakového filmu. Při vysoké teplotě pájecí hmoty (300 °C) se film odpaří a cín se tedy nanáší na čisté jádro. Izolace je klasifikována na tepelnou třídu A (105 °C). [5]

Laky na bázi *epoxidových neboli etoxilinových pryskyřic* - jedná se o termoplasty, do kterých se přidávají tvrdidla, která po výpalu zlepšují vlastnosti izolace. Výhodou je elasticita, vysoká odolnost vůči vlhkosti a teplotě. Vlastnosti elektrické i mechanické jsou podobné olejovým

lakům, a proto jejich uplatnění je tam, kde se uplatňují olejové laky. [5]

Silikonový lak – nevýhoda těchto laků je špatná přilnavost laku k měděným jádrům. Odstranění tohoto problému se řeší dvouvrstvou izolací laku s tím, že spodní vrstva je z jiného materiálu. Další možnost je nános silikonového laku na skelnou přízi. Silikonový lak je klasifikován na vyšší teplotu (180 °C) než předchozí laky. Jsou vysoce chemicky a bakteriálně odolné, elektrické vlastnosti má materiál také dobré. [6]

Napouštěcí lak – využívají se hlavně k napuštění skelného hedvábí. Lak zde funguje spíše jako konstrukční prvek. Jeho aplikace zabráňuje skluzu hedvábí při mechanickém zatížení, zpevní konstrukci a zlepší elektrické vlastnosti. [5]

1.2 Skloslídivá páska

Další vrstvou, která se může nacházet v kabelu, je skloslídivá páska. Ta má bezpečnostní charakter a funguje na principu ohnivzdorné bariéry u ohnivzdorných kabelů. Úkolem pásy je zachovat funkci kabelu v přímém ohni alespoň po dobu 180 minut. Páska je vyrobena obvykle ze slídového papíru, silikonové pryskyřice a skelné tkaniny. Rekonstruovaná slída, která se používá k výrobě slídového papíru, se vyrábí z muskovitu² nebo flogopitu³ popřípadě kombinací obou materiálů. S páskami obsahujícími slídový papír vyrobený z flogopitu, nebo z muskovitu se lze setkat např. pod obchodním označením Elmicatex®. [8] Základní vlastnosti těchto pásek o tloušťce 0,12 mm jsou v tabulce 1:

Tab. 1 Vlastnosti skloslídivých pásek Elmicatex, které obsahují slídový papír vyrobený z flogopitu nebo muskovitu (zdroj: [8])

Vlastnosti	Jednotka	Elmicatex 54509 (Flogopit slída)	Elmicatex 53509 (Muskovit slída)
Jmenovitá tloušťka	mm	0,12±0,015	0,12±0,03
Plošná hmotnost	g/m ²	180±10	130±10
Slídový papír	g/m ²	127±10	75±4
Skleněná tkanina	g/m ²	30±3	24±3
Pryskyřice	%	13±2	25±5
Pevnost v tahu	N/mm	>8	>8
Průrazné napětí	V	1800	1300
Obsah halogenů	%	0	0
Obsah azbestu	%	0	0

² Muskovit je bezbarvý našedlý nerost ze skupiny slíd. Odborným názvem se nazývá hlinitokřemičitan draselný. [9]

³ Flogopit je černohnědý jednoklonný nerost ze skupiny slíd. Odborným názvem se nazývá hlinitokřemičitan hořečnatodraselný. [10]

Slídová páska je tepelnou a dielektrickou bariérou. Skelná tkanina zlepšuje mechanické vlastnosti, při výrobě a instalaci chrání skloslídovou bariéru v ohybu a tahu. Pryskyřice vytváří celistvost a elektrickou pevnost materiálu. Pásky vyrobené z flogopitu udržují své vlastnosti až do teploty 900 °C, postupné zhoršení vlastností nastává v rozmezí teplot 900-1200 °C. U muskovitu nastává zhoršení vlastností od 600 °C. Při spojení obou materiálů se vlastnosti zhoršují po překročení 750- 900 °C dle podílu materiálů. [8] Muskovit má nižší tepelnou bariéru a disponuje i horšími elektrickými vlastnostmi. Pásky jsou bezhalogenní a nevytváří škodlivé dýmy. Aplikace skloslídové pásky je hlavně tam, kde potřebujeme zachovat funkčnost obvodu po určitou dobu od vypuknutí požáru. Příklady takových míst jsou výtahy, osvětlení únikových cest, řízení ventilací a další bezpečnostní zařízení hlavně ve veřejných budovách. [11]

1.3 Textilní izolace

Pro konstrukci kabelů, které jsou mechanicky namáhané kroucením, tahem nebo ohybem, se využívá lehkých, pevných a ohebných materiálů. Nejlepší izolace pro tyto podmínky je z textilních vláken. Vlákná se rozdělují na přírodní a syntetická a dále na organická a anorganická. Výroba textilních izolací se provádí na vícechodých křížových navíječkách, přičemž se dohromady druží určitý počet vláken. Z důvodu zabránění klouzavosti, která je důvodem tvorby nepokrytých míst, je úhel navíjení jednotlivých vláken max. 15 až 30°. [5]

1.3.1 Přírodní vlákna

Přírodní hedvábí

Vzniká ve výměšcích housenky bource morušového. Barva je bílá nebo žlutá a je lesklá. Není chemicky odolné, už v 5% roztoku horkého hydroxidu sodného se rozpustí, kdežto syntetické hedvábí ne. Mechanické vlastnosti má podobné jako bavlna (viz níže), elektrické jsou lepší. Nevýhodou přírodního hedvábí je vysoká cena, proto se více používá levnější syntetické hedvábí. [6]

Bavlna

Bavlna se získává z plodů bavlníku. Plody jsou velikosti vlašského ořechu, jejich jádro je obaleno vlákny bavlny. Bavlněné vlákno je světlé, lesklé a jemné. Vlákná jsou chemicky méně odolná v koncentrovaných roztocích kyseliny sírové nebo solné, kde se rozpouští. Zpracování bavlny probíhá v přádelně, kde se vlákna spřádají do stejnoměrné příze, která je následně navinuta na cívku a slouží k dalšímu zpracování. [6]

Vlhkost bavlny velkou měrou ovlivňuje mechanické i elektrické vlastnosti. Se zvyšující se vlhkostí má bavlna lepší mechanické vlastnosti, ale elektrické se zhoršují. Při 65% vlhkosti okolí obsahuje bavlna 7 % vnitřní vlhkosti. Bavlna se využívá se při oprádkování vodičů pro vinutí. [6]

Příklady: Hlazená bavlna - opletení izolovaných vodičů
Acetylovaná bavlna - izolační účely (menší navlhavost materiálu)

Juta

Juta se získává z jutovníku vyskytujícího se v tropických oblastech a je velice levná. Zpracování probíhá tak, že stonky juty se nejprve zbaví dřeviny na lámacích strojích a následně se vlákna kropí vodou. Následuje mnutí, další zpracování se dělá dle požadavků na jemnost vláken. Technické vlákno je 150 – 400 cm dlouhé a průměr jádra má zhruba 18 μm . Jeho pevnost je poloviční než u bavlny. Vnitřní vlhkost vlákna je za normálních klimatických podmínek až 34 %, proto nejsou jeho elektrické vlastnosti dobré. Mechanické vlastnosti značně degradují působením tepla, světla a vlhkosti. Jutová příze se používá pro vnější ochranný obal kabelů. Z jemné jutové příze se vyrábí tkanina, ze které jsou řezány pásy a ty se aplikují na kabelové svazky. Juta se v praxi většinou impregnuje pro získání lepších vlastností. [12]

Sklo

Skelná vlákna se vyrábějí z taveniny skla specifického pro daný výrobek (např. E-sklo⁴). [13] Mechanické vlastnosti skelného vlákna jsou úměrné chemickému složení skla a jiných dalších parametrů. Například ohebnost a pevnost v tahu závisí na průměru vlákna. Elektrická pevnost se pohybuje kolem 3,5 kV/mm. Tato hodnota vzrůstá, je-li vlákno naimpregnováno. Pro porovnání: naimpregnuje-li se bavlněná páska, její pevnost je kolem 17 kV/mm. Skelné vlákno o stejné tloušťce a se stejným lakem má pevnost 23 kV/mm. Výhodou skelné izolace jsou dobré elektrické vlastnosti, mechanická pevnost, teplotní stabilita, nehořlavost, odolnost vůči vlhkosti, chemická a bakteriální odolnost. Nevýhodou je malá odolnost vůči oděru a pevnosti v rázu. Pro lepší pevnost v tahu lze skelná vlákna stočit do příze, ze které se vyrábí skelné tkaniny, které jsou využívány jako ochranný obal kabelů. Obal, ve kterém se nachází skelná tkanina, má menší průměr než obal s přírodními vláknitými materiály. [6]

⁴ Vlákna z E-skla je druh skla používaný pro elektroizolační účely. E-sklo obsahuje 55 % SiO_2 , 18 % CaO , 8 % Al_2O_3 , 4,6 % MgO a jiné prvky s podíly pod 5 %.

Keramické vlákno

Jedná se o izolaci, která se v kabelovém průmyslu teprve zavádí. Vlákna jsou vyrobena na bázi oxidu hlinitého nebo křemičitého. Přednosti keramiky jsou tepelně-izolační vlastnosti, tepelná stabilita, odolnost proti tepelným šokům, tvarová stálost a odolnost vůči většině chemikálií. Využití má podobné jako skloslídová páska. [14] Dle [15] byl materiál už úspěšně testován na kabelu dle mezinárodních norem (IEC 60331, BS 6387 kat. C, W, Z): 2 hodiny při teplotě 1050 °C a hned potom byl vystaven proudu vody po dobu 3 minut.

1.3.2 Syntetická vlákna

Viskóзовé hedvábí

Vzniká vařením rozemletého dřeva či slámy v sufitovém louhu. Vzniká kaše, která se dále čistí a zjemňuje, až vznikne mokrá buničina. Na buničinu se nechá působit 16-20% louh sodný a tím vzniká alkalicelelulosa, která se sulfiduje sirouhlikiem a vzniká xantogenát celulosy. Rozpuštěním xantogenátu v louhu sodném se získá viskóza. Vlákna se z viskózy získají protlačení přes jemné otvory do kyselé lázně. Viskóзовé hedvábí má velký lesk a minimální pružnost. Vlhkost je okolo 11-12 % při normální vlhkosti vzduchu. Proto se nepoužívá vlákno k elektroizolačním účelům, ale využívá se zejména jako vnější opletení obalů kabelu. [6]

Acetátové hedvábí

Vyrábí se z acetylované celulózy rozpuštěné v acetonu. Je podobné přírodnímu, ale jeho navlhavost při 65% vlhkosti okolí je jen 6-8 %. Elektrické vlastnosti jsou podobné jako u přírodního hedvábí, mechanické vlastnosti jsou horší. [6]

Polyamidová vlákna

Nejrozšířenější typy vláken jsou z polyamidu 6 a polyamidu 6.6. Rozdíly mezi nimi jsou v molekulové struktuře a hlavně ve vlastnostech. PA 6.6. má vyšší hranici tavení než PA 6. Vlákna vznikají taháním z roztaveného polymeru. Následuje dloužení, kde vlákno získává své specifické vlastnosti. Výhody jsou snadná údržba, tvarová stabilita, odolnost vůči vlhkosti. Nevýhodou je degradace světlem a malá odolnost proti zvýšeným teplotám. [16]

Aramidová vlákna (aromatické polyamidy)

Tato vlákna odolávají vysokým teplotám, kde se bod tání pohybuje okolo 400 °C. Další jejich výhodou je odolnost vůči chemickým vlivům. Nejznámější obchodní názvy aramidových a para-aramidových vláken jsou: Nomex, Kevlar, Twaron. [16] Nomex je výborným materiálem pro izolaci, neboť je ohnivzdorný, tepelně, elektricky a mechanicky

odolný. [17] Kevlar je odolný vůči organickým rozpouštědlům, špatně zápalný, odolný vůči odření, ale je citlivý na ultrafialové záření a vlhkost. [18]

Polyesterové vlákno

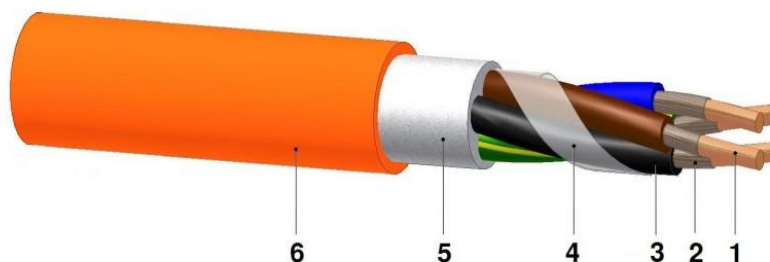
Vyrábí se z ropy z dimethyltereftalátu a glykolu. Polykondenzací těchto látek vzniká polyethyltereftalát, který se zvlákňuje nebo zpracuje diskontinuálně (tavený granulát). Polyesterové hedvábí má dobré mechanické vlastnosti, je odolné vůči oděru a ultrafialovému záření odolává lépe než polyamidové hedvábí. Využívá se jako mezivrstevová izolace, izolační páska, nebo jako vnější obal přírodních kabelů (viz obrázek 2). [19]



Obr. 2 Kabel opletený polyesterovým vláknem (převzato z: [20])

1.4 Separační materiály

Jedná se o součásti kabelu, které slouží nejen k mechanickým účelům. Tyto materiály například vytváří separační bariéru mezi izolací vodičů a obalem kabelu. Mají za účel zabránit smíchání tekuté obalové hmoty s vodiči při výrobě. Na tyto aplikace se používá tenká separační folie, nebo ovin z alu-PET fólie⁵.



Obr. 3 Ukázka separační, dielektrické pásky (č.4), která odděluje vodiče (č.3) od výplně (č.5). (převzato z: [21])

⁵ Alu-PET folie je vyrobena z hliníku a polyethyltereftalátu (PET). Její funkcí je bránit vstupu vodních par do nitra kabelu a zároveň vytváří stínící vrstvu.

1.5 Kabelový papír

Technický kabelový papír je vyráběn z technicky čisté, nebělené celulózy. U celulózy velice záleží na její kvalitě, která určuje elektrické vlastnosti. Hlavní surovina pro výrobu celulózy je smrkové nebo jedlové dřevo. Výroba kabelového papíru je velice podobná výrobě klasického papíru, jen je důležité dbát více na čistotu celulózy. Nesmí se v ní vyskytovat soli, které by zvýšily dielektrické ztráty. Dále je důležitý způsob a doba mletí celulózy, která udává mechanické vlastnosti papíru. Vybrané dřevo se nejprve odkorní, rozřeže na malé kousky a dále se rozemele na drť, ze které se vodou vyplavují soli a hrubé nečistoty. Tím vzniká technicky čistá celulóza, která se dále zpracovává na papírenských strojích. Zde se jednotlivá vlákna celulózy na sítěch zplstňují a vytváří papírový pás. [6]

Pro výrobu kabelů je důležité znát, v jakém směru tahu je papír odolnější. Proto se využívá proud vody, který přivádí celulózu na síta, a tím se většina vláken orientuje po délce papírového pásu. Tudíž po délce je papír mechanicky odolnější. Na papírenských strojích se dále papír suší, válcuje a vyhlazuje na potřebnou tloušťku a hladkost. Po zpracování se jen navine do role a je připraven k dalšímu zpracování. [6]

Mechanická odolnost papíru je dána pevností vláken a mezivlákněných vazeb. Kabelový papír je do určité míry namáhání odolný, pružný a jeho deformace je vratná. Po překročení kritické hodnoty (meze pevnosti) nastává porušení vláken nebo vazeb mezi nimi. Měření mechanických vlastností kabelového papíru je vhodné provádět za vhodných podmínek okolního prostředí, které by mělo být klimatizované. Teplota by měla být 23 ± 1 °C a relativní vlhkost 50 ± 2 %. Měření by mělo probíhat minimálně 10x z důvodu správného statistického zpracování (aritmetický průměr, směrodatná odchylka). [22]
Za přesně daných podmínek se zjišťuje tržné zatížení [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$], pevnost v tahu [MPa], tržná délka [m], práce potřebná k přetržení tahem a odolnost v přehýbání. [22]

Jednou z nejdůležitějších věcí jsou vlastnosti elektrické, které jsou závislé na vlhkosti, teplotě a kmitočtu (hlavně u sdělovacích kabelů). Velikost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ se při provozní teplotě pohybuje okolo hodnoty $25 \cdot 10^{-4}$, při teplotě 50-70 °C jsou ztráty minimální. Izolační odpor kabelového papíru je značný, při teplotě 20 °C se pohybuje kolem $3 \cdot 10^{15}$ $\Omega\cdot\text{m}$. Zvyšuje-li se teplota nebo vlhkost, tak izolační odpor klesá. Kabelový papír se dle použití rozděluje na papír pro silové kabely, sdělovací kabely a opřádací papír určený pro VVN. Pro účely této práce bude popsán jen papír pro silové kabely. [6]

1.5.1 Kabelový papír pro silové kabely

Pro tento typ kabelů je důležité, aby papír měl dobrou savost pro napouštěcí hmotu a prodyšnost. Papíry pro silové kabely dosahují tloušťky 0,125 mm. Předepsaná elektrická pevnost papíru činí 7 kV/mm, ovšem po vysušení ve vakuu a naimpregnování napouštěcí hmotou se elektrická pevnost mnohonásobně zvýší na 55 až 65 kV/mm. Kontrola parametrů pro savost a prodyšnost se provádí takto: prodyšnost se definuje jako objem plynu, který projde za jednotkou času papírem, při rozdílném tlaku na obou stranách. Savost pak sací výškou papíru, který je ponořen z části do destilované vody po dobu 10 minut. Z rozdílu výšky konce nasáklého papíru a hladiny se dá určit míra savosti, která vzniká pomocí kapilárních kanálek. Relativní permitivita silového kabelového papíru se pohybuje kolem 2,4. Dielektrické ztráty $\text{tg } \delta$ jsou kolem $25 \cdot 10^{-4}$. [5][6]

1.5.2 Napouštěcí hmota pro kabelový papír

Pro napuštění vysušeného kabelového papíru se používá impregnačních hmot, které se nejčastěji vyskytují ve formě rafinovaných minerálních olejů. Pro zlepšení elektroizolačních vlastností se do olejů přidává určité množství pryskyřice a jiné vhodné látky k zahuštění. Nejvhodnější jsou oleje s nízkou viskozitou pro vysoké napětí, které se vyrábí rafinací z vhodných vyšších frakcí převážně naftenických rop. Základními požadovanými vlastnostmi jsou dobrá hustota, kinetická viskozita, bod tuhnutí nižší než $-8 \text{ }^\circ\text{C}$, rezistivita nejméně $1,0 \cdot 10^{12} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ a nízký ztrátový činitel. [5]

1.6 Elastomery

Elastomery jsou makromolekulární látky, které se vyznačují velkou pružností. Označují se také jako kaučuky a rozdělují se na přírodní a syntetické. [4] V kabelovém průmyslu jsou více využívány kaučuky syntetické, protože jsou ekonomicky výhodnější a vlastnosti jsou podobné jako v případě přírodních kaučuků. Výhoda spočívá v pořizovací ceně materiálu a v jednodušším zpracování. Nevýhody kaučuků spočívají hlavně v nízkých provozních teplotách ($70 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$), malé odolnosti vůči olejům, pohonným látkám a oxidačním činidlům. Jsou i kaučuky, které jsou vůči některým zmiňovaným nevýhodám odolné. Například polychloropren (neopren) je odolný vůči olejům, silikonové kaučuky (silikony) jsou odolné vůči vysokým teplotám ($180 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$), ovšem mají horší jiné vlastnosti, jako pevnost v tahu nebo odolnost vůči otěru. [23]

1.6.1 Přírodní kaučuk

Jedná se o přírodní látku, která má mezi přírodními izolačními materiály nejvýznamnější zastoupení. Získává se z kaučukového mléka (latex), které obsahují kaučukové stromy v oblasti rovníku. Kaučukové mléko je vodní mikroskopická disperze kaučukových částic. [6] Mezi jeho důležité vlastnosti patří:

- *Mechanická plastikace*- jedná se o destrukci mikrostruktury a desagregaci kaučukových molekul, která nastává zapříčiněním mechanických, tepelných a oxidačních vlivů. Materiál se tímto stává plastickým a mohou být do něj přimíchávané práškové přísady. [4]
- *Vulkanizovatelnost*- děj, při kterém nastává fyzikálně chemický pochod, kdy pomocí vulkanizačního činidla (síra) a energie, nastávají v materiálu strukturní změny. Tyto změny mění plastickou kaučukovou směs v pryž, která má elastický charakter. Vlastnosti kaučukových vulkanizátů závisí na druhu a množství kaučuku ve směsi, vulkanizačních činidlech, plnidlech, ztužovadlech, změkčovadlech a v neposlední řadě také na způsobu a době vulkanizace. [4]

1.6.2 Syntetické kaučuky

Syntetické kaučuky vznikly jako náhražka za přírodní kaučuky. Dělí se na několik skupin dle způsobu polymerace, obsahu monomerních složek, antioxidantů a další. Těchto kaučuků je velké množství, proto následující kaučuky jsou výběrem těch, které se používají v kabelářském průmyslu nejvíce. [4]

1.6.3 Základní kaučuky

Etylen-propylenový kaučuk (EPM), Etylen- propylen-dienový kaučuk (EPDM)

Etylen-propylenové kaučuky (EPM) jsou jedny z těch používanějších. EPM je kopolymer etylenu a propylenu. Poměr těchto dvou složek a molekulární hmotnost určuje vlastnosti kaučuku. Dle [4] bývá tento poměr od 1:1 do 3:1 etylenu ku propylenu. Protože je tento kaučuk nasycený, je třeba vulkanizaci uskutečnit peroxidy místo běžné síry. Vulkanizace je proto obtížnější. Nasycenost kaučuku potlačuje degradační účinky způsobené kyslíkem, ozonem a povětrnostními vlivy. [24]

Etylen-propylen-dienový kaučuk (EPDM) je EPM, ve kterém se nachází 3 až 5 % nekonjugovaných dienů. [25] Dieny vytváří v řetězcích dvojité vazby, díky kterým může nastat vulkanizace peroxidy i sírou. EPDM má lepší vlastnosti než neopren (viz níže), ale postrádá nehořlavost, samozhášivost a také je méně odolný vůči polárním rozpouštědlům,

pohonným hmotám a olejům. Jejich odolnost vůči vodě je vysoká a mají dobré elektroizolační vlastnosti. Dlouhodobá teplotní použitelnost je v rozmezí -35 až 120 °C, nárazově až 150 °C. Elektroizolační vlastnosti jsou: relativní permitivita 2 - 2,5 , elektrická pevnost 28 až 32 kV·mm⁻¹. [24][26]

Butadienový kaučuk (BR)

Butadienový kaučuk je přímou náhražkou přírodního kaučuku. Pro kabelový průmysl se používá směs butadienového kaučuku se styrenem (SBR) nebo akrylonitrilem (NBR), která se vyrábí společnou kopolymerací (podíl složek je kolem 20 %). Výsledný latex se koaguluje⁶, následuje propírání a sušení. [6] Butadien-styrenový kaučuk byl poprvé vyroben už ve třicátých letech. Tento univerzální kaučuk představuje zhruba 45 % celosvětové produkce syntetických kaučuků. Pro optimální pevnostní vlastnosti by měl být obsah styrenu 18 %. Jeho elasticita a dynamické vlastnosti jsou horší než u přírodního kaučuku. Elektroizolační vlastnosti jsou relativně dobré: SBR- relativní permitivita 2,9 až 3,2, elektrická pevnost 20-25 kV·mm⁻¹, měrný vnitřní odpor 1·10¹⁴ až 8·10¹⁴ Ω·cm, ztrátový činitel tg δ 0,07 %. NBR má měrný vnitřní odpor 10⁷ až 10⁹ Ω·cm, relativní permitivitu 12 až 20 a elektrickou pevnost 15-18 kV·mm⁻¹. Ztrátový činitel je 10 až 20x horší než u SBR. Z horších dielektrických vlastností vyplývá, že jeho uplatnění se hodí spíše na pláště kabelů, které ale odolávají olejům a rozpouštědlům. Fyzikálně mechanické vlastnosti směsi určují i příměsi a plnidla. Ty jsou velice potřebná, neboť pevnosti v tahu a strukturální pevnosti jsou velice malé. Příkladem jsou kanálové saze, které se používají pro zlepšení mechanických vlastností materiálu. Nutnou příměsí je retardér hoření⁷, protože materiál je vysoce hořlavý. [6][24] Směs má teplotní použitelnost dlouhodobě při teplotě -40 až 100 °C, nárazově do 120 °C. [24]

Butylkaučuk (IIR)

Butylkaučuk vzniká spojením kopolymeru izobutylenu s izoprenem. Dle stupně nenasyčenosti, který je určen obsahem izoprenových jednotek, se dělí na různé druhy. S obsahem jednotek roste rychlost vulkanizace. Většinou je tento obsah od 1,7 mol. % do 3 mol. %. [25] Není příliš odolný vůči slunečnímu záření, ale jeho stálost vyniká v kyslíku a ozónu. Pro zvýšení stálosti při slunečním záření se do směsi přidávají saze, které odbourávají tento problém. Oproti přírodním kaučukům má lepší chemickou odolnost při působení živočišných a rostlinných tuků i impregnačních laků. Tepelná odolnost je nejvyšší ze

⁶ Koagulace (srážení) je proces, kdy se z roztoku vylučuje pevná látka přidáním činidla.

⁷ Retardér hoření = látka, která zpomaluje nebo zabraňuje hoření.

základních typů kaučuků, použitelnost butylkaučuku se pohybuje od -40 do 125 °C, nárazově až 150 °C. Využívá se pro vývody elektromotorů, izolaci elektrovedných jader pro vyšší silové namáhání a pro izolaci kabelů vysokého napětí. [4]

1.6.4 Olejovzdorné kaučuky

Chloroprenový kaučuk - CR (Neopren)

Neopren byl vyvinut již v roce 1931 v americké společnosti DuPont. [27] Jedná se o jeden z nejvíce používaných polymerů. Původně se vyráběl blokovou polymerací iniciovanou ultrafialovým světlem. Dnes se vyrábí emulzní polymerací a jejich molekulová hmotnost se reguluje modifikovanou sírou a tetramethyl-thiuramdisulfidem nebo thioly. V kabelářském průmyslu se požívají tzv. teplé druhy kaučuku, při jejichž zpracování probíhá pomalejší krystalizace. Jejich výhoda spočívá především ve snazší zpracovatelnosti (vytlačování). [25] Neopren se používá na povrchové vrstvy, které jsou odolné vůči atmosférickým vlivům, ozonu a chemikáliím. Ve srovnání s přírodním kaučukem má chloroprenový kaučuk lepší termooxidační stabilitu, menší propustnost vodních par, vyšší odolnost vůči rozpouštědlům a olejům a v neposlední řadě je samozhášivý. Jeho dlouhodobá teplotní použitelnost je -35 až 110 °C [24], nárazově až 120 °C. Elektroizolační vlastnosti jsou relativní permitivita 6,5-8 a elektrická pevnost 16-20 kV·mm⁻¹. [24][25] Dle [4] je aplikace této směsi vhodná do dolů, chemických závodů, v letectví a k náhradě olověných plášťů.

Polysulfidový kaučuk – OT (Thiokol)

Jeden z nejstarších vyráběných typů syntetického kaučuku, který dnes nese obchodní název Thiokol po firmě Thiokol Chemical Co. v USA. [25] Vzniká polykondenzační reakcí dichlorovaných uhlovodíků společně s polysulfidy (sodíku). [6] Thiokol má výbornou odolnost vůči bobtnání v olejích a polárních rozpouštědlech. [25] Je odolný i vůči ozónu, vodě, UV záření a povětrnostním podmínkám. Teplotní použitelnost je od -40 do 70 °C a nárazově až 100 °C. Elektroizolační vlastnosti jsou: měrný vnitřní odpor 10¹² až 10¹⁵ Ω·cm, relativní permitivita 4 až 4,5, elektrická pevnost 20 kV·mm⁻¹. Nevýhoda těchto kaučuků spočívá ve vulkanizaci, při které vzniká zápach, a proto se od nich ustupuje. Použití je vhodné pro izolace kabelů odolných proti ozónu, oleji a povětrnostním podmínkám. V některých aplikacích nahrazuje olověné opláštění kabelů. [6]

1.6.5 Teplovzdorné kaučuky

Silikonový kaučuk

Na rozdíl od předchozích kaučuků, není silikonový kaučuk tvořen atomy uhlíku a vodíku, ale je tvořen atomy křemíku a kyslíku. Silnější vazby (intramolekulární) vytváří výbornou odolnost vůči vysokým teplotám (až 250 °C), olejům a alifatickým uhlovodíkům. Odolné jsou také proti stárnutí, oxidačním činidlům, UV záření, chemickým činidlům, vlhkosti a vodě. Jsou antibakteriální a odolají plísním, proto jsou vhodné i do tropických oblastí. Jejich další výhodou je zdravotní nezávadnost. Některé chemické látky mohou povrch nabobtnat, ovšem tento děj je vratný, protože silikon neobsahuje antioxidanty ani změkčovadla. Intramolekulární vazby tvoří mnoho výhod, ale vytváří i slabiny. Jednou z nich jsou mechanické vlastnosti, které jsou horší než u jiných kaučuků. Způsobují to siloxanové molekulární řetězce, které nemají tolik možností kde přichytit vulkanizační vazby. To způsobuje, že silikonové kaučuky jsou měkčí a ohebnější. Pro zlepšení mechanických vlastností se doplňuje do kabelů vrstva ze skelného vlákna nebo polyesteru. Další možností pro zlepšení mechanických vlastností je použití platinou tvrzené silikonové pryže. [4][23] Polydimethoxysilan (MQ) se používal dříve, dnes už ho nahrazuje methylvinylpolysiloxan (MVQ). Silikonová pryž tohoto typu dokáže odolávat teplotám až 200 °C, krátkodobě až 250 °C. Oproti tomu methylfenylvinylpolysiloxan (MPVQ) je typ silikonové pryže, která je schopna pracovat při velmi nízké teplotě, až -90 °C. [25]

1.7 Termoplasty

Mezi další významné izolační materiály se řadí termoplasty, které jsou většinou tvořeny organickými makromolekulárními látkami. Vyznačují se tím, že při zvyšování teploty měknou. To je způsobeno slábnutím mezimolekulární interakce. Zvýší-li se teplota ještě více, termoplasty dosáhnou teploty tání a ve formě viskózní kapaliny se pak dále zpracovávají vytlačováním, odléváním nebo lisováním. Pro navrácení do tuhého stavu stačí hmotu pouze ochladit. Děj lze opakovat, struktura a původní tuhost zůstává neměnná. Výhodu to přináší nejen ve zpracování, ale i pro recyklaci. [4] Mezi nejvíce používané termoplastické hmoty patří níže uvedené polymery.

1.7.1 Polyvinylchlorid (PVC)

Jedná se o jednu z nejznámějších plastických hmot. Příprava monomerního vinylchloridu se provádí adiční syntézou acetylenu a chlorovodíku za podpory různých katalyzátorů. Následuje polymerace vinylchloridu, při které vzniká polyvinylchlorid. Tato

polymerace se provádí většinou v emulzi. Výsledným produktem je prášek neměkčeného PVC. Polymery vyrobené v emulzním prostředí mívají však vyšší hydrofilnost, neboť mají v sobě zbytky emulgátorů a ty zvyšují navlhavost. To zhoršuje elektrické vlastnosti, a proto je nutné vybírat vhodné emulgátory a katalyzátory. Následné zpracování měkčeného PVC probíhá tak, že se do prášku přimíchávají barviva, stabilizátory, měkčidla a další přísady zlepšující vlastnosti PVC. Tím vzniká pasta PVC, která se nechává v klidu 24 hodin při teplotě 60 °C. Následně se želatinuje v mixeru vyhřátém na 165 °C. Správně želatinované PVC se projeví hladkým sklovitým leskem, průsvitností a značnou pevností v tahu. Pro další zpracování v kabelářském průmyslu se směs PVC granuluje. Šnekové stroje vytlačují směs opět při 165 °C. Pro kabelářský průmysl se používá výhradně měkčené PVC, které se snadněji zpracovává. Dalšími rozdíly měkčeného PVC oproti neměkčenému jsou: menší pevnost v tahu, nižší bod měknutí, horší odolnost vůči vlhku, zhoršení elektrických vlastností, lepší mrazuvzdornost a tažnost. Ukázka změn vlastností v poměru PVC a změkčovadla je uvedena v tabulce 2. Volba typu změkčovadla by se měla hodnotit nejen dle mechanických vlastností, ale i elektrických, protože izolační odpor běžného změkčovadla je kolem $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, tedy nižší než polymeru, jehož izolační odpor je kolem $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$. [4][6]

Tab. 2 Vliv poměru PVC a změkčovadel (zdroj: [6])

Poměr PVC/ změkčovadlo	Izolační odpor při 50 °C [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Elektrická pevnost [kV/mm]	Pevnost v tahu [kg/cm^2]	Prodloužení [%]	Mrazuvzdor- nost [°C]
75/25	$5 \cdot 10^{12}$	27	245	270	-18
70/30	$8 \cdot 10^{11}$	26	220	320	-26
65/35	$3 \cdot 10^{11}$	25	195	340	-33
60/40	$1 \cdot 10^{11}$	25	165	350	-40

Izolace je vhodná pro kabely určené k domovním rozvodům. Pro venkovní rozvody se příliš nehodí z důvodu propustnosti vodních par. PVC je za běžných teplot nezávadný a i jeho zpracování, které probíhá mezi 100 °C až 200 °C, neuvolňuje žádné škodlivé látky. Nastanou-li jiné podmínky, například se zvýší teplota při zpracování nebo při požáru, stane se PVC nestabilní a začnou se uvolňovat aditiva a zplodiny z jejich rozkladu. Ty jsou nebezpečné pro životní prostředí i organismus. Při použití organických retardérů hoření, které jsou na bázi halogenů, se při hoření uvolňují toxické plyny (halogenovodíky) a jiné látky, které jsou nebezpečné pro lidský organismus. Aby se při hoření tyto látky neuvolňovaly, je třeba používat anorganické retardéry. Ty jsou sice bezpečné, ovšem jejich poměr v základní směsi je 40 % až 60 % a tím mění mechanické vlastnosti a zhoršují zpracování. [28]

1.7.2 Polyamidy (PA)

Využití polyamidového izolačního materiálu je hlavně tam, kde je velké mechanické namáhání. Tedy například kabely, které slouží u jeřábů, podavačů a robotů. Respektive tam, kde kabel vyžaduje neustálý pohyb. Polyamid je polykondenzační produkt diaminů a dikarbonových kyselin. Pro kabelářský průmysl se používá obchodní označení Nylon, jiné označení jsou například Perlon, Ultramid, Silon, Igamid atd. [6] Mechanické vlastnosti polyamidů jsou z velké části závislé na obsahu vody, relativní vlhkosti vzduchu a na krystalické fázi. Krystalická fáze je ovlivněna způsobem chlazení taveniny. Polyamidová izolace je tuhá a pevná, odolná vůči tření a má nízkou opotřebitelnost. Bezbarvé polyamidy vlivem času a UV záření žloutnou, nejsou tedy barevně stabilní. Nicméně, polyamid je velmi odolný vůči rozpouštědlům, olejům, tukům a sloučeninám kyselin. Odolnost proti koncentrovaným kyselinám je horší. Polyamid je odolný vůči povětrnostním podmínkám, pro zvýšení odolnosti se do hmoty mohou přidávat saze. Při vyšších teplotách si materiál drží rozměrovou stálost, která se dá ještě vylepšit přidáním skelných vláken. [4][29] Provozní teplota je mezi -40 a 80 °C, nárazově až 125 °C. Tavení polyamidu nastává při 300 °C, vznícení pak při 500 °C, při hoření stéká. [29]

Typ Iganid U má nejlepší elektrické vlastnosti a odolnost vůči vodě. Zpracování probíhá vytlačováním na šnekových strojích při teplotě 210 °C. Jeho vlastnosti jsou: pevnost v tahu 400-500 kg/cm², bod tání při 190 °C, povrchový izolační odpor 10¹⁴ Ω po 24 hodinách ve vodě, činitel dielektrických ztrát tg δ 1 - 4 %, relativní permitivita 3,7 až 4,2. Uplatnění nachází v mechanické ochraně izolovaných vodičů ve tvaru nastříkané vrstvy nebo jako opletení z polyamidových vláken. [6]

1.7.3 Polypropyleny (PP)

Polypropylen byl objeven v roce 1951 a jeho výroba se neustále zvyšuje. V dnešní době se pohybuje až kolem 45 mil. tun za rok. [30] Vyrábí se polymerací propylénu za přítomnosti katalyzátorů. Nabízí velmi všestranné využití a má dobré vlastnosti jako například pevnost v ohybu, tepelnou odolnost, dobré dielektrické vlastnosti, chemickou odolnost. Materiál je velmi podobný polyetylenu, ale má vyšší bod tavení, nižší hustotu a lepší vlastnosti při vyšší teplotě. Pracovní teplota se pohybuje od -160 do 100 °C, nárazově až 125 °C. Teplota tání se pohybuje kolem 165 °C. Měrný izolační odpor dosahuje hodnot kolem 10¹⁷ Ω·cm, elektrická pevnost je 80 kV/mm a jeho povrchový odpor je 10¹⁴ Ω. [4][30] Nevýhoda PP je jeho tuhost a tím i zhoršená možnost ohybu, využívá se proto spíše pro kabely menšího průměru jádra. Oproti PVC při hoření neuvolňuje tolik toxických látek. [30]

1.7.4 Fluoropolymery

Mezi nejvýznamnější fluoropolymery patří **polytetrafluoretylen (PTFE)**, jenž je také znám pod obchodním názvem Teflon. Vyrábí se polymerací fluorových derivátů za přítomnosti katalyzátorů. Jeho nejlepší vlastností je velký rozsah pracovních teplot (-200 °C až +260 °C, nárazově až 300 °C), výborná chemická odolnost a dobré dielektrické vlastnosti. Dále je odolný vůči tření, nasákavosti vody a stárnutí. Tyto vlastnosti si drží i za zvýšené teploty. Změna vlastností nastává přidáním plnidel. [31]

PTFE má v kabelářském průmyslu využití zejména pro kabely frekvenční, souosé, vysokonapěťové a pro kabely v letadlech. Práškový teflon je zpracováván při teplotě 360 °C až 400 °C na šnekových výtlačných strojích. Vrstva teflonu se na vodič nanáší vodní disperzí. Voda se následně vysuší vyšší teplotou a při 350 °C se vrstva speče a vytvoří film. Vlastnosti: pevnost v tahu 140- 300 kg/cm², relativní permitivita 2, činitel dielektrických ztrát tg δ 0,02 %, měrný vnitřní odpor 10¹⁶ Ω·cm, elektrická pevnost 18-25 kV/mm. [6]

Izolace z PTFE nehoří, neboť obsahuje fluor, který plamen dusí a zamezuje šíření. Ovšem jelikož fluor patří mezi halogeny, tak při hoření uvolňuje zdraví nebezpečné látky, a proto jej nelze použít všude. [23]

Další izolační materiály na bázi fluoropolymerů jsou **ETFE** (etylén-tetra-fluoro-etylén) s rozsahem pracovních teplot -60 °C až 155 °C, **FEP** (fluoro-etylén-propylén) s rozsahem -100 °C až 205 °C a **PFA** (perfluor-alcoxy) s rozsahem -100 °C až 250 °C. Tyto materiály sice nemají tak vysoký teplotní rozsah, ale disponují lepšími chemickými a dielektrickými vlastnostmi. Využívá se pro izolaci slabých vodičů, pro osvětlovací techniku, v piezoelektrickém prostředí a v letectví. [23]

1.7.5 Etylvinylacetát (EVA)

Mezi hlavní výrobce kopolymerů EVA patří DuPont a Exxon, které je uvádějí na trh pod názvy Elvax a Escorene. EVA se vyrábí kopolymerací etylenu s vinylacetátem. Hmotnostní podíl vinylacetátu je 10 až 40 %, zbytek tvoří etylen. Tento polymer má svými vlastnostmi blízko k elastomerům, ale zpracovává se jako termoplast. Podobný je také PVC, ale na rozdíl od něj je šetrnější k životnímu prostředí a bezpečnější při požáru. [32]

Dobré vlastnosti materiálu EVA jsou: vysoká pevnost v tahu, nízká hustota, dobrá pružnost, odolnost vůči UV záření a povětrnostním vlivům a v neposlední řadě výborné dielektrické vlastnosti. [24]

Vlastnosti etylvinylacetátu lze také rozlišovat dle závislosti koncentrace vinylacetátu v EVA. Dle [33] lze poměr rozdělit na 3 skupiny se 7,5%, 18% a 28%

koncentrací vinylacetátu. V nízkém poměru je vyšší stupeň krystality, to má za následek lepší elektrické vlastnosti. V poměru kolem 18 % se zlepšují mechanické vlastnosti, jako pevnost v tahu a pružnost. Nejvyšší mechanická pevnost nastává při poměru 28 %, ale elektrické vlastnosti jsou potlačeny. Pro kabelářský průmysl se využívá koncentrace kolem 50 %. Všechny parametry jsou dostupné v tabulce 3.

Tab. 3 Vliv koncentrace vinylacetátu v etylenvinylacetátu na vlastnosti materiálu EVA (zdroj: [33])

Vlastnosti	Koncentrace VA v kopolymeru EVA		
	7,5%	18%	28%
Ztrátový činitel při 50 Hz [-]	0,0016	0,0012	0,0008
Ztrátový činitel při 10 ⁶ Hz [-]	0,014	0,035	0,043
Permitivita při 10 ⁶ Hz [-]	2,46	2,7	2,95
Izolační odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$2 \cdot 10^{17}$	$2,5 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{14}$
Elektrická pevnost [kV/mm]	20	20	20

Pro lepší mechanické a tepelné vlastnosti se provádí zesíťení. Zesíťení lze provést několika způsoby, nejběžnější jsou radiační záření nebo více užívaná chemická cesta. Pro odstranění nedostatků se do etylenvinylacetátu přidávají plniva. Jedno z nejběžnějších plnidel je retardér hoření. Jiná plniva zlepšují mechanické vlastnosti, teplotní odolnost, ohnivzdornost či chemickou odolnost. S předepsanými plnidly patří EVA do skupiny halogen-free flame retardant cables (HFFR)⁸, kde jsou požadovány nízké emise kouře, nízké uvolňování agresivních a toxických plynů (bezhalogenovost), nehořlavost a nešíření plamene. Uplatnění kabelů s tímto materiálem je ve veřejných budovách, komunikačních střediscích, elektrárnách a ve veřejné dopravě. Používá se převážně na opláštění kabelů. [34]

1.8 Polyetyleny

Polyetyleny se řadí mezi termoplasty a vznikají polymerací ethenu za vysokého tlaku (až 2000 atmosfér). Je to jeden z nejvíce používaných plastů v řadě aplikací. Mimo elektroniku se používají v potravinové výrobě jako obalový materiál. Například to mohou být PET-lahve, ochranné fólie a podobně. [35] Pro kabelářský průmysl se používá polyetylen o průměrné molekulové váze 15 až 20 000. Polyetyleny lze rozdělit do mnoha skupin. V kabelářském průmyslu se používají hlavně tyto polyetyleny: nízkohustotní polyetylen (LDPE), vysokohustotní polyetylen (HDPE), lineární nízkohustotní polyetylen (LLDPE) a zesíťovaný polyetylen (XLPE). [6]

⁸ HFFR = zkratka pro bezhalogenové a oheň retardující kabely

Všechny tyto druhy mají základní jednotku etylen, jejich odlišnost spočívá v délce molekulárního řetězce, jeho pravidelnosti, větvení a podílu krystalické fáze. Tyto rozdíly určují vlastnosti materiálu a zpracovatelnost. Za normální teploty jsou polyetyleny snadno ohebné, při nižší teplotě tuhnou a stávají se křehkými. Běžná mrazuvzdornost se pohybuje kolem $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jsou-li k polyetylenu přimíchány přísady, jako například polyizobutylen, pak je dostatečně ohebný i při $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. K vyšší mrazuvzdornosti přispívá také rychlé ochlazování při zpracování. Naopak tavení materiálu probíhá při teplotě $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jeho tvarová stálost bývá do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Má vyšší hořlavost, která se dá potlačit přidáním chloru, ovšem to zhoršuje dielektrické vlastnosti, například ztrátový úhel a chlor také není příznivý k životnímu prostředí. Při normální teplotě je polyetylen velice chemicky odolný, při teplotách nad $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ polyetylen více absorbuje síru, oleje a podobné látky. Toto se negativně projevuje i na jinak velice dobrých elektrických parametrech. Síra je nebezpečná pro použití PE s jiným materiálem například s PVC nebo kaučukem z důvodu negativních reakcí. PE je velmi odolný vůči povětrnostním vlivům a propustnosti vodních par. Přidáním přísad se zlepšuje odolnost vůči UV záření, které je nebezpečné z důvodu stárnutí materiálu a tím zvyšování křehkosti. [5] PE izolace se používá pro své výborné elektrické vlastnosti ve vysokofrekvenčních kabelech nebo jako náhrada olověného opláštění. Měrný izolační odpor je v rozmezí 10^{16} až $10^{17}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, povrchový odpor $10^{14}\text{ }\Omega$, elektrická pevnost 50 až 60 kV/mm , ztrátový činitel je v rozmezí 0,001 až 0,004 a permitivita je 2,2. Velice dobré dielektrické vlastnosti má také pěnový polyetylen díky obsahu vzduchu v pěně. [4][6] PE je vzhledem k ostatním plastům k životnímu prostředí příznivější. Je fyziologicky nezávadný a při hoření uvolňuje méně škodlivých látek. Teplota vznícení se pohybuje kolem $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při hoření odkapává. Hořlavost se dá regulovat vhodnými aditivami. [36]

1.8.1 Nízkohustotní polyetylén (LDPE)

Jedná se o nejstarší typ polyetylenu, který byl objeven v britských laboratořích v roce 1933. [36] Vyrábí se radikálovou polymerací za vysokých teplot a extrémně vysokých tlaků, proto dříve nesl označení vysokotlaký. Při vysokém tlaku a teplotě vzniká větvení molekul, které omezuje schopnost krystalizace. Důsledkem toho má materiál oproti ostatním druhům polyetylenu nižší hustotu, proto je označován jako nízkohustotní. V současné době se vyrábí polyetylen polymerací v trubkových reaktorech nebo v autoklávech. Nízkohustotní PE má oproti jiným druhům nejnižší tuhost a tvrdost. Je odolný vůči korozi a má vysokou houževnatost. Jeho vlastnosti byly nejčastěji využívány pro izolaci a ochranu podmořských kabelů a pro konstrukce prvních radarů. LDPE se také používá pro chemicky síťované XLPE,

pro svou schopnost propouštět plyny. To umožňuje propustnost H₂O do základní mřížky. LDPE také v mnoha aplikacích nahrazuje PVC, a to nejen pro podobné náklady na výrobu, ale také z důvodu širší možnosti použití. [24][36] Nevýhoda LDPE je převážně v malé provozní teplotě, která se pohybuje od -50 do 85 °C a v nízké tuhosti. Elektrické vlastnosti LDPE jsou následující: ztrátový činitel při 1 kHz je 0,0006, elektrická pevnost se pohybuje kolem 40 kV/mm, povrchový izolační odpor je 10¹⁴ Ω a měrný vnitřní izolační odpor je až 10¹⁹ Ω·cm. Je odolný vůči neoxidujícím kyselinám a je ohebný i při teplotě -55 °C. Odpad je recyklovatelný. [24][37]

1.8.2 Lineární nízkohustotní polyetylen (LLDPE)

Jedná se o jeden z nejnovějších druhů polyetylenů, který vznikl v sedmdesátých letech. Jeho výroba je podobná výrobě vysokohustotního polyetylenů, ale v průběhu procesu se do lineární molekuly polyetylénu přidávají alfa olefiny. Ty mají za následek nižší hustotu polyetylenů, neboť zabraňují dokonalému krystalickému uspořádání. [36] Jedná se o jakýsi přechod mezi oběma základními typy. Je měkčí než HDPE, ale tužší než LDPE. Je pevnější v tahu a má také širší teplotní rozsah. Využití je podobné jako u LDPE a také pro sdělovací kabely. [24]

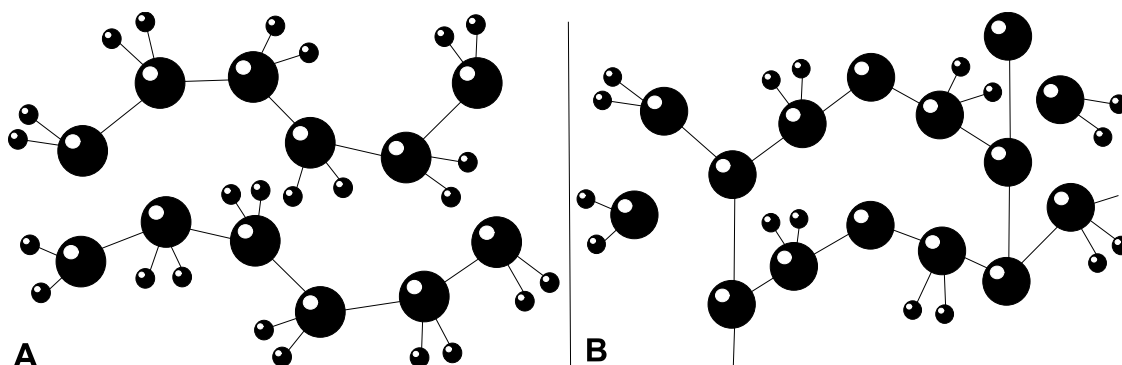
1.8.3 Vysokohustotní polyetylen (HDPE)

Výroba HDPE začala v padesátých letech. Vyrobil ho Karl Ziegler pomocí vhodných katalyzátorů při atmosférickém tlaku a při teplotě 100 °C. Rozdíl mezi vysokohustotním a nízkohustotním polyetylenem spočívá ve stupni větvení struktury, úbytku bočních skupin a v delších řetězcích. Stupeň větvení určuje mechanické vlastnosti materiálu. Vysokohustotní PE je více krystalický, protože obsahuje méně rozvětvení. [38] Díky tomu má HDPE širší rozmezí pracovních teplot a to až do 120 °C. Dále je tvrdší, má vyšší pevnost v tahu, je odolný vůči vodě a má dobrou chemickou odolnost. Vysokohustotní polyetylen je však méně ohebný než předchozí PE, a to může mít za následek až praskání izolace při ohybu. Nepříznivý vliv má i UV záření, které způsobuje degradaci. [38][39]

1.8.4 Zesíťovaný polyetylen (XLPE)

První zesíťování bylo provedeno v roce 1930. Od té doby se metody v průmyslové výrobě změnily, ale důvod zesíťování je stále stejný – zlepšení kvality izolačního materiálu. Výroba XLPE je rozdělena na dva kroky. První krok je nanášení PE (obvykle LDPE) na vodič. Druhým krokem je chemická přeměna vnitřní struktury (jiným způsobem, jak dosáhnout zesíťování je ozařováním). Přeměna má za následek vytvoření nevratných příčných

vazeb mezi řetězci (viz obrázek 4). Ideální stupeň zesítení je mezi 65 a 89 %. Je-li stupeň zesítení vyšší, může to mít za následek lámavost a praskání při mechanickém namáhání. [11]



Obr. 4 Porovnání vnitřní struktury PE (A) a XLPE (B) (překresleno na základě [40])

Změna vnitřní struktury způsobuje zlepšení celkových vlastností materiálu, hlavně pak mechanických, tepelných a chemických. Z tepelných vlastností je zásadní hlavně eliminace tečení a z toho plynoucí odkapávání materiálu při hoření. Tato vlastnost dovoluje vystavovat materiál vyšším pracovním teplotám (120 – 130 °C), než kterým se vystavuje běžný polyetylen. Po krátkou dobu mohou teploty dosahovat více než 200 °C. Proto tato izolace umožňuje průtok větších proudů. Je-li materiál vystaven vysokým teplotám delší dobu, vzniká degradace materiálu a tím zhoršení jeho vlastností. Další výhodou je, že oproti běžným termoplastům lze pro stejné použití nanést tenčí vrstvu materiálu. [11][23]

Kabely se zesítenou izolací nachází uplatnění v místech, kde je vyžadována bezpečnost osob v případě vypuknutí požáru. Tato místa jsou například veřejné budovy, tunely, podchody a podobně. Při hoření XLPE nejenže nevzniká odkapávání, ale také jsou nízké emise škodlivých plynů, které jsou bezhalogenní. Pro funkčnost kabelů při požáru je vhodné pod XLPE izolaci navinout přímo na vodič skloslídovou pásku, která žily vodiče potenciálně oddělí a nedojde tedy ke zkratu. [11]

Retardéry hoření

Při vypuknutí požáru v budovách se oheň šíří velkou rychlostí. Evakuace musí proběhnout co nejrychleji, a proto rozvržení únikových tras a celková konstrukce budov musí odpovídat určitým normám. Kabelové izolace představují velká rizika, neboť jsou zavěšeny u stropů na chodbách a v případě jejich hoření se mohou uvolňovat toxické plyny nebo odkapávat hořící hmota. Je tedy nutné při realizaci či rekonstrukci budov volit takové materiály, které sníží nebezpečí při požáru. Hlavními parametry pro tyto kabely jsou bezhalogenovost a ohniodolnost. Pro dosažení těchto vlastností je nutné plnit směsi aditivy,

jako jsou například retardéry hoření. Při vysoké teplotě polymery podléhají pyrolýze⁹, při které se uvolňují těkavé hořlavé látky, ty se v kombinaci se vzduchem následně vznítí. U nízkohustotního polyetyleny je tato teplota 350 °C, u PVC 455 °C. [41]

Retardéry hoření slouží k tomu, aby omezily vznik toxických látek a potlačily hoření. Retardéry hoření mohou plnit svůj účel buď fyzikálně, nebo chemicky. Fyzikálně plní svůj účel ochlazením materiálu endotermní reakcí, kdy se uvolní vodní pára a CO₂, nebo zabráněním přímého kontaktu plamene vytvořením ochranné vrstvy. Další možnost potlačení hoření je chemickou reakcí. Chemická reakce uvolní látky, díky kterým poklesne koncentrace radikálů a tím se plamen uhasí. Uvolňují se přitom i toxické látky a tak se tento způsob blokace příliš nepoužívá. Další možností je chemická blokace v pevné fázi, kdy při hoření retardér vytvoří zuhelnatělou vrstvu na povrchu izolace nebo povrch nabobtná. Oba dva způsoby vytvoří ochrannou bariéru, která zabrání uvolnění toxických plynů. [41]

Příkladem takových retardérů pro fyzikální blokaci je hydroxid hlinitý Al(OH)₃, který se při teplotě kolem 200 °C přemění na Al₂O₃ a 3H₂O, vzniklá voda izolaci ochlazuje. Jinou možností je hydroxid hořečnatý, ten potřebuje pro svůj rozklad teplotu 300 až 340 °C. Je nutné si uvědomit, že procento plnění základního materiálu retardéry je kolem 60 % a to má za následek podstatné zhoršení mechanických vlastností. [41]

1.9 Stínící a konstrukční kovové materiály

V případě opláštění vytváří kovové materiály obal, který kabel chrání před mechanickým poškozením, ale i vnikáním vzduchu a vlhkostí. Je-li kovový materiál použit pro stínící účely, je obvykle uložen pod pláštěm a slouží k tomu, aby kabel neovlivňoval nebo nebyl sám ovlivňován rušením sousedních kabelů. Toto rušení může být vyvoláno galvanickým, kapacitním nebo magnetickým spojením. [42]

1.9.1 Druhy stínění

Mezi nejpoužívanější druhy stínění můžeme řadit [42]:

1) Stínění páskou z hliníku nebo polyesteru

Pokrývá vodič nebo twistované¹⁰ páry, kde je zaručeno 100% stínění. S páskou je v kontaktu ještě neizolovaný vodič, který je uzemněn a tím je zaručeno zvýšené uzemnění a odvod elektrostatického náboje. Toto provedení není vhodné pro pohyblivé kabely z důvodu snadného poškození.

⁹ Pyrolýza = tepelný rozklad látek

¹⁰ Twistovaný pár = stočené dvě žíly vodiče v sobě

2) *Spirálové stínění*

Pokrývá více vodičů a je tvořeno souběžnými vlákny uloženými šikmo k ose kabelu. Stínění není tak kvalitní jako v předchozím případě, ale je vhodné pro pohyblivé uložení, kde mohou vznikat ohyby a zkruty. Je vhodné jako ochrana proti elektrostatickým výbojům.

3) *Stínění opletením (punčoška)*

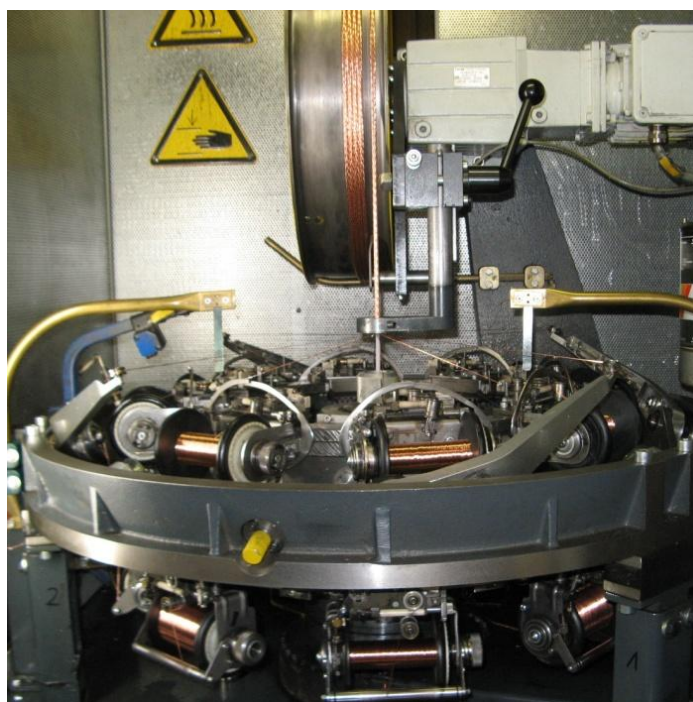
Tvoří jej svazek paralelních vláken uložených šikmo k ose kabelu. Úhel šikmosti je dán rychlostí oplétacího stroje a procentem krytí. Stínění je účinnější než při spirálovém stínění. Je ideální pro silové kabely, protože má dobrou flexibilitu a výborné stínící vlastnosti, které má i při velkých frekvencích. Zároveň slouží i jako dobrá mechanická ochrana.

4) *Stínící spirála + páska*

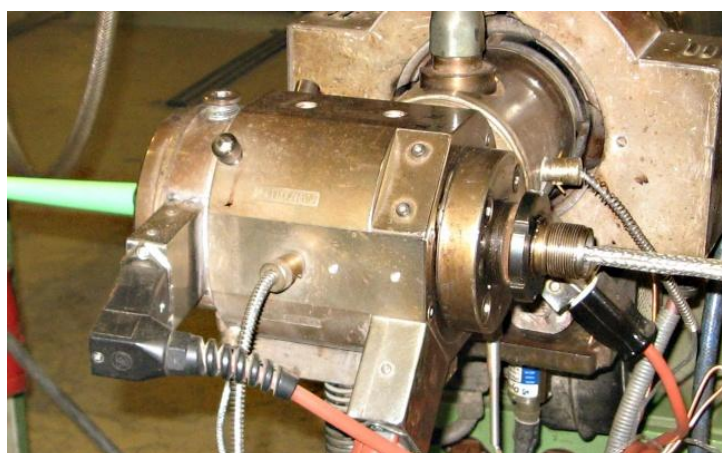
Jedná se o kompletní zastínění, které se používá pro aplikace, kde se vyžadují velmi přesné hodnoty. Provedení zvětšuje průměr izolace a snižuje ohebnost. Ostatně odolnost vůči ohýbání a zkrutům není dobrá. Použití je vhodné pro nepohyblivé uložení, například rozvody v měřicích laboratořích. Ze všech typů stínění se jedná o nejdražší variantu.

1.9.2 Opláštění

Opláštění kabelu tvoří kovová vrstva, která slouží k ochranným účelům, nejčastěji tvoří mechanickou ochranu. Také slouží jako ochranná vrstva před vnějšími vlivy a ostrými hranami při instalaci. Kovová vrstva je vhodná pro instalaci kabelů v prostorech, kde by plastový plášť nevydržel mechanické namáhání. Uplatnění nachází v dolech, na stavbách a podobně. Pro kovové opláštění se používají nejčastěji tyto materiály: olovo, slitiny olova, hliník a ocel. Nepřítelem kovových plášťů je koroze, proto je vhodné v některých případech vrstvu impregnovat oleji. Kovové opláštění se vyrábí buď navíjením pásky na kabel, nebo ze svazku ocelových drátků, které jsou na kabel navinuty pomocí oplétacího stroje (viz obrázek 5 a 6).



Obr. 5 Ukázka výroby kovové vrstvy opletením (tzv. punčoška) na oplétacím stroji.



Obr. 6 Ukázka nanášení vrstvy izolace na kovovou vrstvu pomocí extrudéru.

2 Diagnostika kabelových systémů

Při výrobě kabelu je nezbytné provádět množství kontrol, díky kterým je zaručena spolehlivost kabelového systému. Nejprve se provádí vstupní kontrola, která prověřuje požadované parametry hlavních výrobních materiálů. Další kontrolou je výrobní kontrola, která zajišťuje správný průběh výroby a v případě nesrovnalostí dokáže předejít větším škodám při výrobě. A poslední kontrolou je finální kontrola, která prověřuje předepsané parametry hotových výrobků nejen dle příslušné firemní normy, ale musí být provedena také podle českých státních norem.

Během výroby, instalace a provozu je kabel vystavován mnoha technologickým vlivům, které mohou zkrátit jeho životnost, nebo ho natolik poškodit, že ho nelze v aplikaci použít. Proto je vhodné vybrat pro dané prostředí takový kabelový systém, který si s předpokládanými provozními vlivy poradí, aniž by došlo k jeho poškození.

Vlastnosti, které u hotových kabelů měříme, se dají rozdělit do čtyř skupin. Jsou to vlastnosti mechanické, tepelné, elektrické a požární. Metody prověření těchto vlastností, jsou popsány v ČSN 34 7010-82 [44], která je přímo určená pro měření vlastností elektrických kabelů. Další specifické metody měření pro určité druhy směsí jsou obsahem jiných státních norem. Pro splnění cílů této diplomové práce je dostačující již zmíněná norma ČSN 34 7010-82, ze které čerpají i následující podkapitoly.

Elektrické vlastnosti

Měření elektrických vlastností izolačních materiálů je velice důležité pro budoucí provoz. Dle výsledků měření se dá určit, zda bude mít kabel požadované vlastnosti po celou dobu své životnosti. Samozřejmě nezáleží jen na elektrických vlastnostech, ale i na okolních vlivech, které je také důležité sledovat.

U kabelů a vodičů lze změřit jejich odpor, vodivost, indukčnost, provozní kapacitu, izolační odpor, povrchový odpor, izolační vlastnosti výplňové směsi i jiných vrstev, přenosovou impedanci, částečné výboje v izolaci, ztrátový činitel $\tan \delta$, elektrickou pevnost izolace, průrazné napětí izolace a zkoušku napětím.

Práce se zabývá pouze dielektrickými parametry izolačního systému kabelu, a proto odpor a vodivost vodičů již dále popsána nebude. Elektrické vlastnosti typu provozní kapacita, provozní svod, kapacitní nerovnováhy, měrný útlum, charakteristická impedance a podobné jsou měřeny u sdělovacích kabelů, kde to má význam pro budoucí provoz. U silových kabelů se tyto parametry projeví jen na velkých vzdálenostech, a proto se tato práce

zabývá jen měřením izolačního odporu, povrchového odporu, ztrátového činitele, relativní permitivity a elektrické pevnosti. Hlavní údaje o těchto parametrech jsou uvedeny v následujícím textu.

2.1 Izolační odpor

Izolační odpor měřeného izolantu je poměr stejnosměrného napětí, které se připojí k elektrodám zkoušeného objektu a celkového proudu, který izolantem protéká v daném čase po připojení. Elektrody jsou umístěné mezi povrchem a jádrem kabelu, popřípadě mezi vodivými prvky. [43] Dle [44] oddílu 3.3 by měla být délka vzorku kabelu nebo žíly alespoň 1,7 metru. Kabel nebo žíla se ponoří na 24 hodin do nerezové nádrže, ve které je 5% roztok NaCl o teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kabel je ponořen tak, aby oba konce vyčnívaly nad hladinu a pod hladinou byl alespoň 1 metr. Mezi jádro a měděnou elektrodu, která je ponořena v roztoku, je přiloženo stejnosměrné napětí o velikosti 500 V. Po uplynutí 1 minuty od připojení napětí je přečtena hodnota procházejícího proudu na měřicím přístroji. V případě výstupní kontroly, kdy se provádí měření na celé cívce kabelu dle oddílu 3.3.3, se délka kabelu ponechá při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 12 hodin. Následně se sejme plášť na obou koncích o délce 15 cm a odizoluje se 7 cm izolace žíly na jednom konci. Na celé délce kabelu jsou zapojena nejvýše dvě jádra, zbylá jádra jsou spojena dohromady a uzemněna. Napětí a doba měření je stejná jako u měření předchozího kratšího vzorku. Dle [11] se naměřená hodnota odporu přepočítá na 1 km délky kabelu, aby výsledná hodnota byla v $\text{M}\Omega/\text{km}$. Výpočet izolačního odporu R_x se provádí Ohmovou metodou dle následující rovnice: [43]

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

2.2 Povrchový odpor

Jedná se o poměr stejnosměrného napětí, které se připojí mezi dvě elektrody na povrchu kabelové izolace a celkového proudu, který mezi elektrodami protéká v daném čase po přiložení napětí. Při měření jsou zanedbány polarizační jevy v oblasti elektrod. Výsledný proud, který teče po povrchu tělesa, je ovlivňován absorbovanou vlhkostí, příměsemi, nečistotami, ale i proudem tekoucím uvnitř kabelu. [2][45]

Dle [44] je potřeba k měření povrchového odporu ohmmetr s rozsahem alespoň $2 \cdot 10^8\text{ M}\Omega$ s mezní chybou $(10 \pm 0,0002\text{ R})\%$ měřené hodnoty. Vzorek, odebraný z pláště o délce 150 mm, se nasune na izolovanou tyč o přibližně stejném průměru jádra, jako je vnitřní průměr pláště. Vzorek se očistí ethanolem a navinout se na něj dvě elektrody z měděného

drátu o průměru jádra 0,2 mm až 0,6 mm, které jsou umístěny ve vzájemné vzdálenosti $10 \pm 0,5$ mm. Povrch se opět očistí ethanolem a uloží se na 24 hodin za normalizovaných atmosférických podmínek do zkušební horkovzdušné komory. Po uplynutí 24 hodin se po jedné minutě po přiložení stejnosměrného napětí změří povrchový odpor mezi oběma oviny. V případě, že by hodnota odporu byla tak velká, že by nešla změřit měřicím přístrojem, připojí se k měřenému vzorku „n“ stejných vzorků a výsledná hodnota se vydělí počtem měřených vzorků. Dle [2] lze povrchovou rezistivitu spočítat vzorcem 2.2, kde l_e [m] je obvod elektrod, d [m] je vzdálenost elektrod od sebe a R_p je změřený povrchový odpor.

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

2.3 Dielektrické ztráty – měření ztrátového činitele a permitivity

Dielektrické ztráty jsou velmi důležitým parametrem v oblasti zkoumání dielektrika. Při zkoumání izolantu je důležité sledovat, kolik elektrické energie se přemění v jinou energii při zatížení elektrickým polem. Tato energie bývá většinou tepelná a je pro materiál nežádoucí. Proto je třeba ji dobře odvádět do okolí, aby nevzniklo lokální přehřátí dielektrika. Přehřátí může mít za následek tepelný průraz a tím destrukci izolantu. Tyto změny energie vznikají ve struktuře izolantu a jsou nazývány dielektrickými ztrátami. Ztráty existují při stejnosměrném i střídavém napětí při jakémkoliv tvaru napěťové křivky. U stejnosměrného napětí se projevují Joulovy ztráty, které vytváří vodivostní proud procházející dielektrikem. U SS napětí se mohou projevit i ionizační ztráty, ale ty jsou nevýznamné. Velikost ztrát závisí na odporu izolantu. [2] Velikost ztraceného výkonu lze napsat takto [2]:

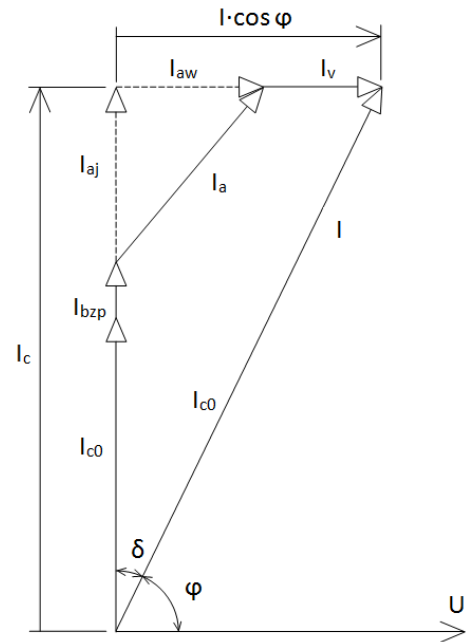
$$P_{Z_{SS}} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (2.3)$$

kde R_i [Ω] je izolační odpor dielektrika, U [V] je přiložené napětí a I [A] je ustálená hodnota proudu procházejícího dielektrikem. [2]

U střídavého napětí se krom vodivostních ztrát projevují i ztráty vyvolané polarizacemi a také ztráty ionizační. Ztráty ve střídavém elektrickém poli jsou větší než u stejnosměrného pole. Velikost ztraceného výkonu ve střídavém elektrickém poli se vyjádří takto [2]:

$$P_{Z_{stř}} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot tg\delta, \quad (2.4)$$

kde C je kapacita izolantu daná součtem geometrické kapacity C_0 (I_{c0}) a kapacity C_p (I_{aj}). Kapacita C_p vzniká důsledkem absorpčních jevů a činnou (ztrátovou) složkou. U bezztrátového dielektrika je fázový posun φ roven 90° , u reálného dielektrika je fázový posun zmenšen o ztrátový úhel δ jak je zobrazeno na obrázku 7, kde I_c je kapacitní proud, I_{c0} nabíjecí proud geometrické kapacity, I_{bzp} je proud bezztrátových polarizací, I_a je absorpční proud, I_{aj} je jalová složka absorpčního proudu, I_{aw} je činná složka absorpčního proudu a I_v je vodivostní proud. [2]



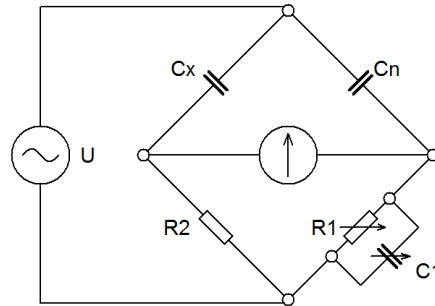
Obr. 7 Fázorový diagram reálného dielektrika (překresleno dle [2])

Pro popis chování dielektrika ve střídavém poli se používají sériové nebo paralelní náhradní obvody, které jsou složeny z odporu a kapacity. Ztrátový činitel se vypočte dle vzorce 2.5, kde C_s a R_s je kapacita a odpor v sériovém zapojení a C_p a R_p v paralelním zapojení, ω je úhlová frekvence. Ztrátový činitel je v praxi využíván k rychlému posouzení stavu izolace. Dobrá izolace má velikost ztrátového činitele menší než 10^{-2} . Součástí měření ztrátového činitele bývá i vyhodnocení relativní permitivity, která se získá dle vzorce 2.6, kde C_0 je kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu a C_x je změřená kapacita mezi elektrodami. [2]

$$tg\delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} [-] \quad (2.6)$$

Ztrátový činitel se běžně měří Scheringovými můstky (obrázek 8), jejichž frekvenční rozsah je od 50 Hz do 100 kHz, při vyšších frekvencích od 10 kHz do 260 MHz se měří ztrátový činitel na Q-metrech. [46]



Obr. 8 Scheringův můstek – schéma zapojení (překresleno z [46])

Ztrátový činitel se často měří jako funkce teploty nebo jako funkce napětí. Funkce napětí se měří střídavým napětím při teplotě kolem 20 °C. Napětí se přiloží mezi jádro a příslušnou kovovou mezivrstvou nebo plášť. Ztrátové úhly se měří při 0,5 U_0 , U_0 , a 2 U_0 . Hodnota při U_0 a rozdíl hodnot 2 U_0 a 0,5 U_0 nesmí překročit specifikaci kabelu. V případě, že se ztrátový činitel měří při jiné teplotě, než je 20 °C, provádí se korekce k 20 °C. Ta je daná dle převodní tabulky v ČSN 34 7010-82 oddíl 3.11. [44]

2.4 Elektrická pevnost

Elektroizolační materiál má za úkol elektricky oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. Tuto schopnost vyjadřuje elektrická pevnost. Veličinu lze prakticky využívat při návrzích a konstrukci elektrických zařízení a patří mezi základní údaje charakterizující daný materiál. Elektrická pevnost se vyjádří velikostí přiloženého napětí, které se zvyšuje až do průrazu a tloušťkou izolantu v místě průrazu dle vzorce 2.7, kde E_p je elektrická pevnost, U_p je průrazné napětí a d je tloušťka materiálu. [2]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ [kV} \cdot \text{mm}^{-1}, \text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad (2.7)$$

Při průrazu izolace vznikne výboj, kdy jsou původně izolovaná místa spojena dokonale vodivou cestou, kterou prochází proudy značných hodnot. Výboj má dvě stádia. Nejdříve dochází k nárůstu konduktivity izolantu, následně vznikne výboj. Vznikne-li při výboji elektrický oblouk, vzniká nejen velká degradace izolantu, ale i nebezpečí požáru, neboť oblouk dosahuje vysokých teplot. Práce se zabývá dielektrickými parametry izolačního systému kabelů, tedy izolantů o pevném skupenství, důsledkem průrazu je tedy konec životnosti vzorku (kabelu). Kdyby se jednalo o izolanty v plynném nebo kapalném skupenství, nedochází k průrazu, ale k přeskoku. Zhoršení izolačních vlastností by bylo jen dočasné, protože tato skupenství mají regenerační schopnost. [2]

Elektrická pevnost žil pro silnoproudé účely (SYP) se dle [11] měří ve zkušební nádobě z nerezového plechu určené pro zkoušení napětí proti vodě. Z kabelu se odebere vzorek o délce 1,7 metru a ponoří se pod hladinu tak, aby pod hladinou byl 1 metr vzorku a každý konec vyčníval nad hladinu 35 cm. Žíly jsou ponořeny pod vodou alespoň hodinu před zkouškou. Teplota vody by se měla pohybovat v rozmezí teplot 15 °C až 25 °C. Mezi jádro a vodu se připojí střídavé sinusové napětí o velikosti, která je určená dle průřezu jádra vodiče. Pro průřezy 0,35 – 4 mm² je napětí 1,5 kV, pro průřezy 6 – 95 mm² je napětí 2 kV. Měření probíhá při průmyslové frekvenci 50 Hz. Elektrická izolace musí odolat předepsanému zkušebnímu napětí. Dle normy [44] je měření podobné předchozímu, ovšem vodič by měl být dlouhý 5 metrů a konce by měly vyčnívat z nádoby jen 25 cm.

2.5 Zkouška napětím

Napěťová zkouška patří opět mezi základní zkoušky při testování izolací. Má za úkol podat informaci o elektrické pevnosti kabelu. Elektrický průraz nastává při porušení izolace, kdy výboj zcela přemostí zkoušenou izolaci a je jedno, jestli po povrchu nebo uvnitř. Důsledkem průrazu klesne napětí mezi elektrodami skoro k nule. Na rozdíl od měření elektrické pevnosti, kdy se postupně zvyšuje napětí až do elektrického průrazu, je napěťová hladina při měření konstantní, tedy 5000 V (testovací napětí určené vodičům se jmenovitým napětím 0,6/1 kV). Měření probíhá 1 minutu a v případě, že nenastane elektrický průraz, pak splňuje izolace provozní požadavky. Dle druhu přiloženého napětí se zkoušky dělí na zkoušky stejnosměrným, střídavým nebo impulzivním napětím. [43]

Dle [44] se provádí zkoušky na žilách stejnosměrným napětím. Vzorky žil, které jsou 5 metrů dlouhé, se ponoří na 1 hodinu do roztoku chloridu sodného (10 g/l) s vodou tak, že oba konce vyčnívají z roztoku 25 cm. Zkušební napětí se přikládá mezi jádra žil a měděnou elektrodu ponořenou v roztoku, ke které se připojí kladný pól. Probíhají-li zkoušky při střídavém napětí, pak princip je stejný, jen nemusí být použit roztok, ale stačí voda. U vícežilových kabelů probíhá zkouška za sucha tak, že se napětí přikládá mezi izolované jádro a všechna ostatní jádra, která jsou vzájemně propojena, případně spojena i s kovovým pláštěm.

3 Experimentální část práce

Zadaným úkolem praktické části této diplomové práce bylo změřit vybrané dielektrické parametry na dodaných vzorcích vodičů a kabelů. Měření bylo rozloženo mezi dvě pracoviště, z nichž jedno se nacházelo v laboratořích Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni (dále jen ZČU FEL) a druhé ve výrobě kabelů. V laboratořích ZČU FEL se proměřovaly čtyři dielektrické parametry a to povrchový odpor, ztrátový činitel, permitivita a průrazné napětí. Ve výrobě se měřil izolační odpor a zkouška napětím, tedy základní parametry, které se proměřují při výstupní kontrole. Tyto parametry určují, zda kabely odpovídají požadavkům. Typy kabelů pro jednotlivá měření jsou specifikovány v následující kapitole.

3.1 Specifikace vzorků

Vzorky pro měření byly dodány společností Kabelovna Kabex a.s. Celkem bylo dodáno pět vzorků (bližší specifikace viz Tab. 4), které byly vyrobeny ze třech různých materiálů. Vzorek (V1), jehož izolace je vyrobená z PVC, je určen pro použití při teplotách -30 °C až $+70\text{ °C}$ a je vhodný pro silové rozvody v běžných elektroinstalacích. Pevnost izolace v tahu je 12,5 MPa a tažnost je 125 %. [11]

Vzorek (V2) s izolací z XLPE (zesíťovaný polyetylen) je určen pro použití při teplotách -50 °C až $+90\text{ °C}$. Izolace disponuje velice dobrými mechanickými vlastnostmi i při vyšších teplotách. Pevnost izolace v tahu je 12,5 MPa a tažnost je 200 %. Kabel obsahující žíly s touto izolací je určen pro instalace v místech se zvýšeným nebezpečím požáru a v prostorách s větším výskytem osob. [11]

Posledním typem izolace použité na vzorcích (V3 až V5) je materiál vyhovující požadavkům HFFR (Halogen free flame retardant – bezhalogenová oheň retardující směs). Tento materiál je vhodný do prostředí o teplotách -50 °C až $+90\text{ °C}$. Jeho pevnost v tahu je 9 MPa, tažnost je 125 % a je odolný proti šíření plamene. Je bezhalogenový, a proto má při hoření nízkou korozivitu plynů a také nízkou hustotu kouře. Kabely oheň nešířící jsou pro jejich protipožární vlastnosti a zvláště pro jejich bezhalogenové složení určeny pro použití v místech se zvýšeným nebezpečím požáru a v prostorách se zvýšeným výskytem osob. Všechny měřené vzorky jsou určeny pro silové rozvody o jmenovitém napětí 0,6/1 kV a všechny mají minimální izolační odpor 200 M Ω /km při 20 °C. [11]

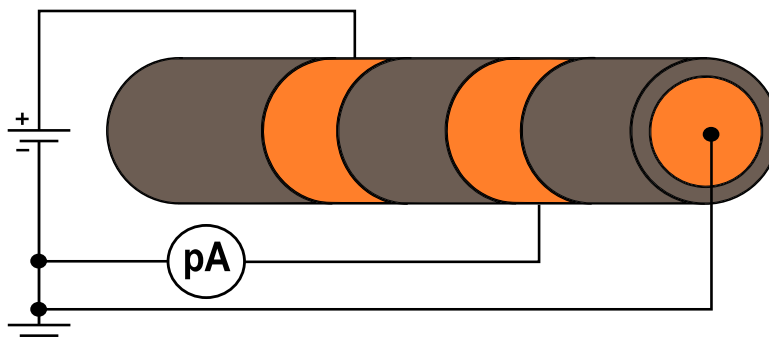
Tab. 4 Parametry měřených vzorků včetně lokality měření

Označení	Materiál	Typ vzorku	Průřez žíly [mm ²]	Vnitřní průměr izolace [mm]	Vnější průměr izolace [mm]	Tloušťka izolace [mm]	Lokalita měření
V1	PVC	žíla	6	2,656	4,144	0,744	Laboratoř ZČU
V2	XLPE	žíla	10	3,495	4,948	0,726	Laboratoř ZČU
V3-C (černý)	HFFR	žíla	50	7,686	10,172	1,243	Laboratoř ZČU
V3-H (hnědý)	HFFR	žíla	50	7,686	10,172	1,243	Laboratoř ZČU
V3-M (modrý)	HFFR	žíla	50	7,686	10,172	1,243	Laboratoř ZČU
V3-S (šedý)	HFFR	žíla	50	7,686	10,172	1,243	Laboratoř ZČU
V4	HFFR	žíla	1,5	1,338	2,854	0,758	Laboratoř ZČU a Kabelovna
V5	HFFR	Kabel	7x 1,5	7x 1,338	7x 2,854	7x 0,758	Kabelovna

3.2 Použité metody měření

Povrchový odpor

Pro zjištění výsledků měření povrchového odporu byla použita voltampérová metoda, jejíž schéma zapojení je vyobrazené na obrázku 9. Jako zdroj napětí byl použit zdroj Keithley 248 s napětíovou hladinou 500 V. Proud byl měřen mezi elektrodami, za použití přístroje pro měření malých proudů Keithley 6514.



Obr. 9 Schéma zapojení pro měření povrchového odporu (překresleno na základě [2])

Tato metoda je velice náchylná na okolní vlivy prostředí, a proto byla použita na ochranu měřeného vzorku Faradayova klec, která slouží jako stínění od okolních rušivých vlivů. Stínění potlačuje vnější elektromagnetické pole. Povrchový odpor je následně vypočítán dle vztahu:

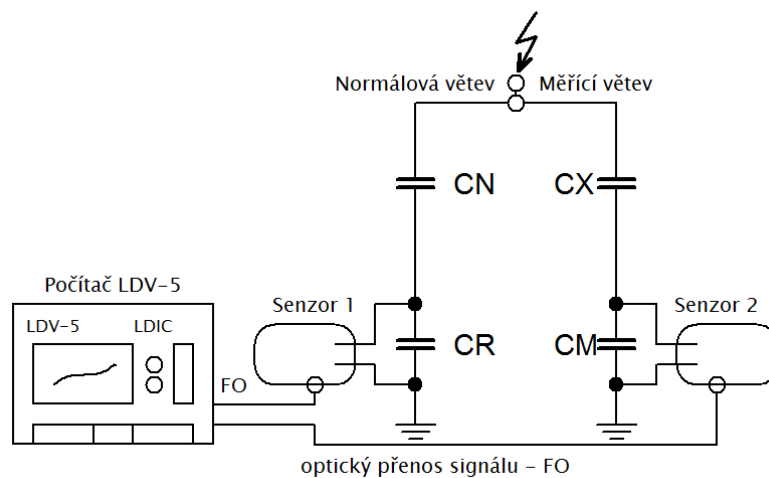
$$R = \frac{U}{I_x} [\Omega], \quad (3.1)$$

kde U je připojené napětí [V],

I_x je proud, který protéká vzorkem [A].

Ztrátový činitel a permitivita

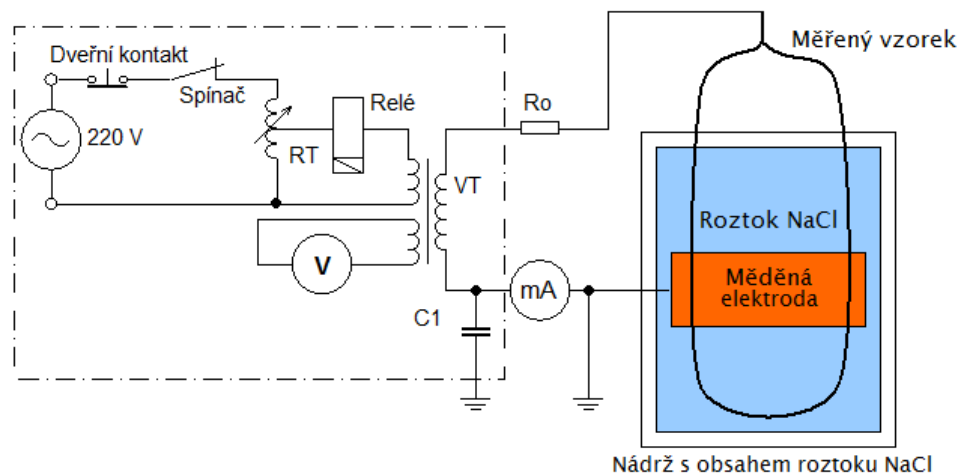
Pro měření ztrátového činitele a permitivity byla použita metoda pomocí Scheringova můstku. Měření probíhalo na automatickém Scheringově můstku LDV-5 a vysokonapětovém stavebnicovém systému od firmy HighVolt. Vysokonapětový systém se skládal z ovládacího modulu SM 4 a výkonového modulu LM 30. Základní schéma měření ztrátového činitele pomocí LDV-5 je zobrazeno na obrázku 10. Můstek je rozdělen na dvě větve, jedné se říká referenční, a druhá je měřicí. Každá větev můstku se skládá z vysokonapětového děliče a v každé se nachází vysokonapětový kondenzátor. Kondenzátor C_X se nachází v měřicí větvi a zastává kapacitu měřeného objektu. Je zapojen do série s nízkonapětovou impedancí. Další větví je referenční, v té je do série spojen bezztrátový normálový kondenzátor C_N s nízkonapětovou impedancí. Jiný konvenční můstek musí být vyvážen, aby vyhodnotil C_X a $\text{tg } \delta$, oproti tomu LDV-5 měří fázový úhel mezi důležitými dílčími napětími, které se vyskytují na obou nízkonapětových impedancích. Uvedený postup nepotřebuje vyvážení můstku, místo napětových impedancí lze použít nízkonapětové kondenzátory. Výhodou je zejména odstranění chyb způsobených příčnými (rozptylovými) kapacitami. Napětí na obou nízkonapětových kondenzátorech jsou digitalizována pomocí přesných senzorů 1 a 2 napájených bateriemi. Oba senzory jsou vybavené nízkošumovým zesilovačem s vysokou impedancí s následným 16 - bitovým A/D převodníkem a elektricko-optickým rozhraním. Následně jsou digitalizované signály přenášeny do počítače, kde jsou zpracovány a zaznamenány. Fázový rozdíl základního kmitočtu zkušebního napětí je vypočten pomocí Fourierovy transformace. To má za následek velice přesné určení ztrátového činitele, ale také kapacity C_X . [47]



Obr. 10 Schéma zapojení pro měření ztrátového činitele (překresleno dle [47])

Elektrická pevnost

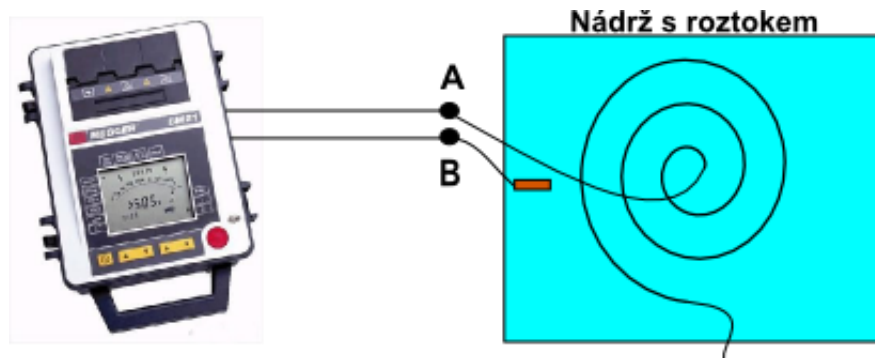
Pro měření elektrické pevnosti byl použit vysokonapětový stavebnicový systém pro střídavé napětí od firmy HighVolt. Systém se skládal z ovládacího modulu SM 4 a výkonového modulu LM 30. Měření probíhalo ve speciální laboratoři pro měření vysokého napětí. Tato laboratoř disponuje několika bezpečnostními prvky, které zabraňují úrazu elektrickým proudem. Napětěová hladina byla nastavena k automatickému zvyšování při běžné průmyslové frekvenci, tedy 50 Hz. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 11, kde jsou zakresleny i některé z bezpečnostních prvků, jako je například dveřní kontakt, který by přerušil měření v případě náhodného vstupu do měřicího prostoru. Hlavní částí obvodu je zdroj - zkušební transformátor o dostatečném výkonu. Proudové relé je dimenzované tak, aby vzhledem k výkonu zkušebního transformátoru zajistilo odpojení při průrazu. Měření zkušebního napětí je prováděno buď prostřednictvím třetího vinutí, nebo přímo na straně vysokého napětí, což zvyšuje přesnost. [48]



Obr. 11 Schéma zapojení pro měření průrazného napětí (překresleno na základě [48])

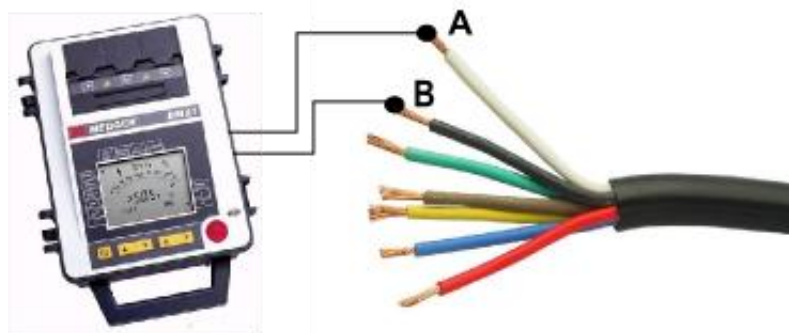
Izolační odpor

Izolační odpor byl měřen pomocí dvou metod. První metodou se proměřoval izolační odpor samotné žíly u vzorku V4. Vzorek byl ponořen na hodinu do roztoku vody s NaCl tak, aby oba konce vyčnívaly nad hladinu. Následně se na jeden oholený konec nasadí měrná elektroda (A) a druhá elektroda (B) se připevňuje na měděnou elektrodu, která je ponořena ve vodě. Zapojení obvodu je vyobrazené na obrázku 12.



Obr. 12 Znárodnění zapojení pro měření izolačního odporu žil

Druhou metodou se proměřoval izolační odpor kabelu, kdy se měří na celém kabelu. Kabel se na jednom konci rozholí a ze všech žil se sejme izolace až na jádro. Měření probíhá tak, že se jedna elektroda (A) přiloží na měřené jádro a druhá (B) se přikládá mezi ostatní jádra a proměřuje se izolační odpor mezi nimi. Tímto způsobem se postupně odzkouší všechna jádra. Zapojení obvodu pro měření izolačního odporu celého kabelu je vyobrazeno na obrázku 13. Pro obě metody byl použit přístroj pro měření izolačního odporu Megger BM 25 7-D-231. Obě měření byly provedeny ve společnosti Kabelovna Kabex a.s.



Obr. 13 Znárodnění zapojení pro měření izolačního odporu kabelu.

3.3 Příprava a postup měření

Povrchový odpor

Dle metody pro měření povrchového odporu byl sestaven měřící obvod. K měření byly využity vzorky o délce 2 metrů, které byly pečlivě očištěny etanolem. Následně byly na vzorky po celém jejich obvodu nalepeny elektrody z měděné fólie o šířce 25 mm. Pro jedno měřící místo byly nalepeny dvě elektrody a mezi nimi byla mezera 10 mm. Měření probíhalo na 10 místech podél celého vodiče, vzdálenost mezi jednotlivými místy byla 140 mm. Ukázka jednoho měřícího místa je vyobrazená na obrázku 14a), kde jsou na ukázkou zobrazeny tři vzorky o různém průměru izolace.



a)

b)

Obr. 14 Měření povrchového odporu: a) detail měřících elektrod na třech různých průměrech žíly, b) detail zapojení měřících elektrod při samotném měření.

Následně byly vzorky opět očištěny ethanolem a vysušeny po dobu 24 hodin. Od prvního čištění bylo se vzorky manipulováno pouze v latexových rukavicích, aby se zabránilo znečištění měřeného vzorku. Pro zabezpečení co nejpřesnějšího měření byl každý přívodní vodič k měřené elektrodě veden zvlášť a izolován od stěny Faradayovy klece. Ukázka zapojení měřících elektrod je na obrázku 14b). Výsledná hodnota proudu, protékajícího mezi elektrodami, byla odečítána 60 sekund po přiložení napětí, které mělo konstantní hodnotu 500 V.

Ztrátový činitel a permitivita

Pro změření ztrátového činitele a permitivity byl sestaven obvod se Scheringovým můstkem. Pro měření byly použity stejné vzorky kabelových žil jako v případě měření povrchového odporu, tedy vzorky obsahující nalepené proužky měděné pásky široké 25 mm. Rozdíl oproti měření povrchového odporu byl ten, že u měření povrchového odporu se přikládalo napětí mezi dvě sousedící elektrody situované 10 mm od sebe, kdežto pro měření ztrátového činitele a permitivity byl použit jen jeden z těchto proužků měděné pásky. Napětí se přikládalo mezi jádro žíly a vnější měděnou elektrodu. Měření probíhalo na každém vzorku na 10 měřených místech, kdy se jen přesouvala svorka po vnějších měděných elektrodách. Ukázka zapojení elektrody je na obrázku 15a).

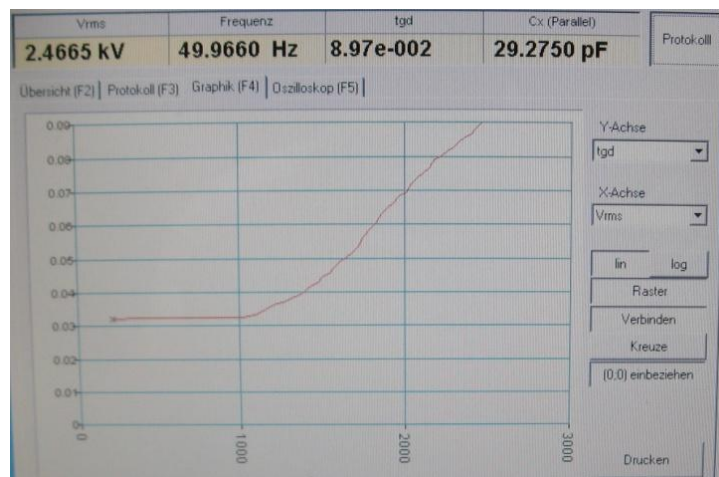


a)

b)

Obr. 15 Měření ztrátového činitele a permitivity: a) detail zapojení měřící elektrody, b) zavěšení měřeného vzorku v prostoru.

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků měření a zajištění bezpečnosti proti zkratu byl měřený vzorek zavěšen v prostoru dostatečně daleko od uzemněných předmětů (obrázek 15b). Po zajištění všech bezpečnostních podmínek následovalo samotné měření, kdy se na elektrodách postupně zvyšovalo napětí od 100 V do 2,5 kV v krocích po 32 V při konstantní frekvenci 50 Hz. Na přístroji LDV-5 se zobrazovala křivka ztrátového činitele závislá na napětí (obrázek 16). Hodnoty ztrátového činitele a permitivity se ukládaly na pevný disk pro následné zpracování.

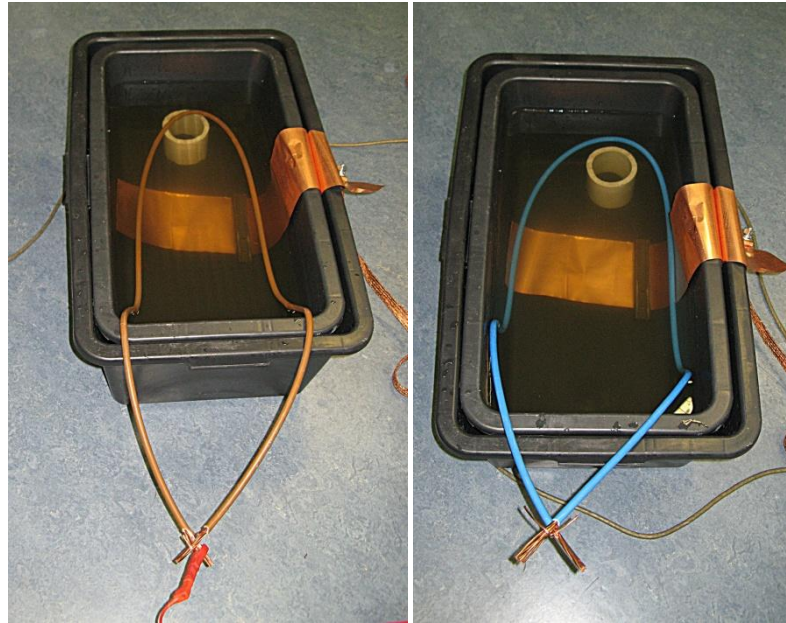


Obr. 16 Ukázka záznamu křivky ztrátového činitele v závislosti na napětí na přístroji LDV-5.

Elektrická pevnost

Elektrická pevnost byla posledním měřením na dodaných vzorcích. Jednalo se o destruktivní zkoušku, po které již vzorky nesplňovaly předepsané a před tím měřené dielektrické parametry. Měřící obvod byl sestaven dle metody pro měření elektrické pevnosti. Vzorky pro toto měření na svém povrchu neměly připevněny elektrody z předchozích měření a jejich povrch byl vyčištěn ethanolem. Elektrody v tomto zapojení tvořily jádro vodiče a

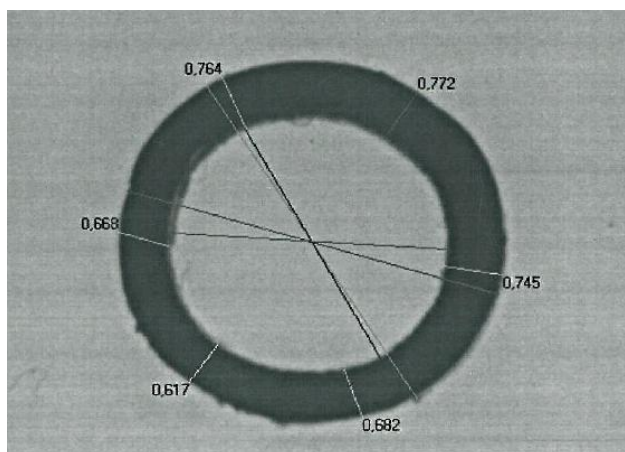
roztok NaCl (10 g/l) a vody. Roztoku bylo 50 litrů a byl nalit do 60 litrové nádrže. Pro zajištění dobré vodivosti mezi roztokem a měřicím systémem, byla elektroda spojena s měděnou fólií, která byla volně ponořena do roztoku. Ukázka zapojení elektrod a měřeného vzorku je zobrazena na obrázku 17.



Obr. 17 Ukázka zapojení elektrod při měření elektrické pevnosti, jedna elektroda je připojena na jádro vodiče a druhá k měděné fólii, která je ponořena do roztoku NaCl (10 g/l) a vody.

Měřený vzorek byl do roztoku ponořen v délce jednoho metru a zbytek byl vyveden mimo nádrž, kde byly oba konce vodičů spojeny. Na oholené konce se následně připojila elektroda.

Než začalo samotné měření, bylo nutné zajistit, aby se přívodní elektroda nacházela v dostatečné vzdálenosti od uzemněných těles a nevznikal tak přeskok napětí, nebo koróna. Po zajištění všech bezpečnostních podmínek začalo samotné měření. Vysokonapěťový systém automaticky zvyšoval napětí do doby, než vznikl průraz. V průběhu měření bylo nutné sledovat diagnostikovaný vzorek, aby se zjistilo, jestli se přístroj vypnul po průrazu, nebo jen po přeskočení napětí. To by pak znamenalo nutnost celý pokus opakovat. Po ukončení měření se vzorek v místě průrazu odštíhl a byl odeslán na expertízu do kabelovny, při které se měřila tloušťka izolační stěny v několika osách. Ukázka z měření je zobrazena na obrázku 18.



Obr. 18 Měření tloušťky izolace, získané rozdílem vnějšího a vnitřního průměru izolace. Na obrázku je zobrazen vzorek V2.

Izolační odpor

Měření izolačního odporu probíhalo na výstupní kontrole v kabelovně. Obvody pro měření kabelu i žíly byly zapojeny dle schémat na obrázcích 12 a 13. Nejdříve se měřil izolační odpor kabelu. Kabel bylo nutné na obou koncích rozholit a jednotlivé žíly od sebe oddělit, aby nedocházelo k chybám při měření. Na jednom z konců se krom rozholení pláště odstranila i izolace z konců žil tak, aby se k nim mohly připojit elektrody. Následně se připojila k měřené žíle elektroda a druhá elektroda se postupně připojovala k ostatním žílám. Tento postup se opakoval u všech jednotlivě měřených žil. Hodnoty se odečítaly na displeji měřicího přístroje Magger BM 25 po minutě od přiložení napětí k měřenému vzorku. Napěťová hladina se na rozdíl od jiných měření snižovala. Nejdříve se prováděla zkouška napětím, kdy se na elektrody připojilo napětí 5000 V. V tomto případě není hodnota izolačního odporu podstatná. Jedná se jen o zkoušku, při které se zjišťuje, zda je vzorek v pořádku. Pokud ano, následuje měření izolačního odporu při napěťové hladině 500 V a pak ještě při 80 V. Přesně tak, jak udává norma ČSN 34 7010-82. Tento postup měření byl aplikován na vzorku V5 v jednotlivých stádiích výroby. Nejprve se měřil odpor po lanění, pak po nanesení výplně a nakonec po opláštění vzorku.

Dalším měřením bylo měření izolačního odporu samotné žíly (vzorek V4). Vzorek se ponořil na jednu hodinu do roztoku vody a NaCl tak, že oba konce vyčnívaly nad hladinu a pod hladinou bylo 10 metrů. Měrná elektroda se připojila na jádro žíly a druhá na měděnou elektrodu, která byla ponořena do roztoku. Měření probíhalo stejně jako v předchozím měření, tedy nejprve se provedla zkouška napětím při 5000 V. Následně se snížila napěťová hladina na 500 V a pak na 80 V. Hodnoty se opět odečítaly až po minutě od přiložení napětí.

Posloupnost měření

Pro určení posloupnosti měření jednotlivých dielektrických parametrů, je důležité rozdělit měření na ta, při kterých nedochází k degradaci či destrukci izolantu a na ta, kde k těmto negativním jevům dochází. Měření dielektrických parametrů začíná u těch, kde k degradaci nedochází, postupuje se přes ta, kde může dojít ke zhoršení izolačních vlastností a končí se měřením, kde dochází k destrukci materiálu. V případě této diplomové práce byla navržena posloupnost měření takto: nejprve se změřil povrchový a izolační odpor, následně se změřil ztrátový činitel a relativní permitivita, jako poslední se měřil elektrický průraz. Po tomto průrazu už nebylo možné na izolaci měřit žádné dielektrické parametry.

Četnost měření dle měřených parametrů

Pro co nejvyšší přesnost měření povrchového odporu, ztrátového činitele a permitivity bylo navrženo, aby se každý vzorek měřil s četností 10. Proto se na měřené vzorky připevnilo 10 elektrod s přesně danou vymezovací vzdáleností tak, aby se vzájemně nerušily. Elektrody se následně jednotlivě proměřily. Izolační odpor se měřil u vzorku V5 jen jednou, ale zato mezi všemi žilami, které jsou v kabelu, u vzorku V4 se izolační odpor proměřil s četností 2. Jedenkrát byla měřena i elektrická pevnost, neboť zde nastala destrukce izolace, a proto následné měření nebylo možné.

3.4 Výsledky měření

Povrchový odpor

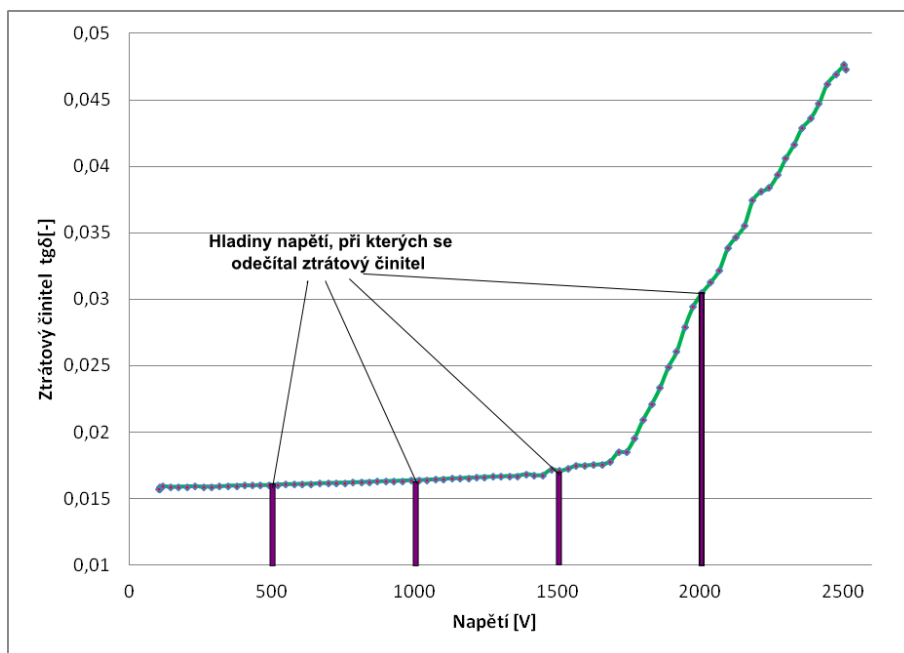
Výsledky z měření povrchového odporu se nepodařilo získat ze všech vzorků. Povrchový odpor byl dobře naměřen jen u vzorků s průřezem jádra 50 mm². U menších vzorků vznikaly tak velké chyby měření, že nebylo možné odpor stanovit. Odpor byl tedy naměřen jen u vzorků V3-C, V3-S, V3-H, V3-M. Pro zjištění přesnosti jednotlivých měření povrchového odporu byl spočítán z četnosti měření aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Vzorce statistických výpočtů jsou uvedeny v příloze B. Povrchový odpor byl vypočítán dle vzorce 3.1. Výsledky povrchového odporu jsou shrnuty v tabulce 5. Kompletní naměřená data jsou uvedena v příloze A. Měření bylo prováděno při teplotě 22 °C, tlaku 970 hPa a 42% vlhkosti.

Tab. 5 Vypočítané hodnoty při měření povrchového odporu

Vzorek	Aritmetický průměr [pA]	Směrodatná odchylka [pA]	Variační koeficient [%]	Povrchový odpor [TΩ]
V3-C	14,80	2,96	20,02	33,7
V3-S	14,93	2,95	19,76	33,4
V3-H	13,29	2,79	20,99	37,6
V3-M	13,94	2,47	17,75	35,8

Ztrátový činitel

Výsledky měření ztrátového činitele se podařilo změřit na všech dodaných vzorcích. Hodnoty ztrátového činitele se odečítaly při napětí 0,5 kV, 1 kV, 1,5 kV a 2 kV. Z četnosti měření na každém vzorku se následně spočetl aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. U všech vzorků lze považovat hodnoty za dobře odměřené, neboť variační koeficient vychází poměrně nízký (pod 10 %). Variační koeficient je vysoký jen u vzorku V2, kde je použit materiál XLPE. Tento vzorek vykazoval tak nízké hodnoty ztrátového činitele, že i malé rozdíly tvořily velkou odchylku a to se projevilo na vysokém variačním koeficientu (nad 100 %). Vyšší variační koeficient (nad 10 %) vycházel u všech vzorků i při měření při 2 kV, kde už docházelo k rychlému nárůstu ztrát. Nárůst se projevoval u každé měřené lokality jinak. Shrnuté výsledky měření ztrátového činitele jsou uvedeny v tabulkách 6, 7, 8 a 9. Kompletní naměřená data jsou uvedena v příloze A. Měření bylo provedeno při teplotě 20 °C, tlaku 983 hPa a 45% vlhkosti prostředí.



Obr. 19 Ukázka průběhu ztrátového činitele u vzorku V3-C se zvyšujícím se napětím. V grafu jsou vyznačeny napětíové hladiny, při kterých se zaznamenával ztrátový činitel k dalšímu zpracování.

Tab. 6 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorky V1 a V2

Vzorek	V1 (PVC)			V2 (XLPE)		
Napětí [kV]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]
0,5	0,03508	0,00205	5,83	0,00022	0,00027	121,66
1	0,03529	0,00200	5,67	0,00022	0,00027	120,54
1,5	0,04690	0,00208	4,44	0,00029	0,00030	103,80
2	0,06784	0,00674	9,93	0,01443	0,00382	26,48

Tab. 7 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorky V3-M a V3-S

Vzorek	V3 - M (HFFR)			V3 - S (HFFR)		
Napětí [kV]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]
0,5	0,01582	0,00051	3,19	0,01606	0,00051	3,19
1	0,01604	0,00056	3,51	0,01628	0,00050	3,09
1,5	0,01643	0,00077	4,70	0,01697	0,00049	2,88
2	0,02150	0,00223	10,35	0,02463	0,00333	13,53

Tab. 8 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorky V3-C a V3-H

Vzorek	V3 - C (HFFR)			V3 - H (HFFR)		
Napětí [kV]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]
0,5	0,01805	0,00183	10,15	0,01651	0,00044	2,69
1	0,01839	0,00193	10,47	0,01667	0,00045	2,70
1,5	0,01914	0,00190	9,91	0,01705	0,00038	2,21
2	0,02875	0,00213	7,40	0,02372	0,00208	8,77

Tab. 9 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V4

Vzorek	V4 (HFFR)		
Napětí [kV]	Aritmetický průměr tg δ [-]	Směrodatná odchylka tg δ [-]	Variační koeficient [%]
0,5	0,01984	0,00093	4,71
1	0,02003	0,00093	4,66
1,5	0,02207	0,00106	4,80
2	0,03494	0,00319	9,13

Relativní permitivita

Měření relativní permitivity probíhalo současně s měřením ztrátového činitele. Kapacitu izolantu se podařilo změřit na všech dodaných vzorcích. Z četnosti měření na každém vzorku se spočetl aritmetický průměr při napěťové hladině 1 kV. Z těchto hodnot se dle vzorce 3.2 spočetla kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu C_0 a následně se dle

vzorce 3.3 vypočetla relativní permitivita. Výsledky relativní permitivity jsou shrnuty v tabulce 10. Kompletní naměřená data jsou uvedena v příloze A. Měření bylo provedeno při teplotě 20 °C, tlaku 983 hPa a 45% vlhkosti prostředí.

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{2\pi l_1}{\ln d_2/d_1} [pF], \quad (3.2)$$

kde

- C_0 je kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu [F],
- ε_0 je permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$],
- l_1 je délka elektrody [cm],
- d_1 je vnitřní průměr izolace [cm],
- d_2 je vnější průměr izolace [cm].

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} [-], \quad (3.3)$$

kde

- C_x je kapacita měřeného vzorku [F],
- ε_r je relativní permitivita [-].

Tab. 10 Výsledky měření relativní permitivity

Vzorek	Materiál	Kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu C_0 [F]	Kapacita C_x [F]	Relativní permitivita [-]
V1	PVC	3,13E-12	2,72E-11	8,71
V2	XLPE	4,00E-12	1,61E-11	4,03
V3-C	HFFR	4,96E-12	3,01E-11	6,06
V3-H	HFFR	4,96E-12	2,90E-11	5,85
V3-M	HFFR	4,96E-12	2,99E-11	6,04
V3-S	HFFR	4,96E-12	3,04E-11	6,14
V4	HFFR	1,84E-12	1,63E-11	8,92

Elektrická pevnost

Elektrická pevnost byla měřena na všech dodaných vzorcích. Měření proběhlo v pořádku u vzorků V1, V2 a V4, kde nastal elektrický průraz izolace. U vzorků V3-M, V3-S, V3-C a V3-H se izolaci nepodařilo prorazit. Se zvyšujícím se napětím vznikala na koncích vzorků vyvedených z roztoku koróna. Následkem toho při 40 kV přemostil výboj lázeň a to ovlivnilo měření. U vzorků, kde se podařilo změřit elektrickou pevnost, nastal průraz většinou v ohybu, tedy v místě, kde byl vzorek více mechanicky namáhán. Výpočet elektrické pevnosti byl proveden dle vzorce 2.7. Výsledky elektrické pevnosti jsou shrnuty v tabulce 11. Měření probíhalo při teplotě 21 °C, tlaku 981 hPa a 40% vlhkosti vzduchu.

Tab. 11 Výsledky měření elektrické pevnosti

Vzorek	Materiál	Průměr jádra [mm]	Vnější průměr izolace [mm]	Tloušťka izolace [mm]	Průrazné napětí [kV]	Elektrická pevnost [kV/mm]
V1	PVC	2,656	4,144	0,744	24	32,25
V2	XLPE	3,495	4,948	0,7265	31,53	43,40
V4	HFFR	1,338	2,854	0,758	26,69	35,21

Izolační odpor

Izolační odpor se měřil na vzorcích V4 a V5. U obou vzorků se podařilo naměřit hodnoty, které splňují předepsané parametry. Požadavky výrobce na izolační materiál vyhovující požadavkům HFFR jsou: vnitřní rezistivita ρ_v minimálně 10^{12} [$\Omega \cdot \text{cm}$], izolační odpor přepočtený na kilometr minimálně $2,00\text{E}+08$ [Ω/km]. [11] U vzorku V5 se proměřoval izolační odpor v průběhu výroby a to po lanění, po výplni a po opláštění. Měření probíhalo v každém stádiu výroby s četností 1, ale vždy se proměřovala každá žíla se všemi ostatními žilami. Hodnoty měření se přepočítaly z Ω na Ω/km a spočetl se pro ně aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Naměřené a vypočítané hodnoty izolačního odporu jsou shrnuty v tabulce 12. V tabulce 13 je vypočítána vnitřní rezistivita pro oba vzorky dle vzorce 3.4. Izolační odpor je zde uveden v původní hodnotě (Ω) z důvodu výpočtu vnitřní rezistivity, kde je požadován izolační odpor v Ω . Kompletní naměřená data jsou uvedena v příloze A. Měření probíhalo při teplotě 20°C , tlaku 974 hPa a 43% vlhkosti.

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln d_2/d_1} [\Omega \cdot \text{cm}], \quad (3.4)$$

kde

- l je délka měřené žíly nebo kabelu [cm],
- R je změřený izolační odpor [Ω],
- d_2 je vnější průměr izolace [mm],
- d_1 je vnitřní průměr izolace [mm],
- ρ je vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$].

Tab. 12 Vypočítané hodnoty z měření izolačního odporu

Stádium výroby	Zkušební napětí [V]	Aritmetický průměr [Ω/km]	Směrodatná odchylka [Ω/km]	Variační koeficient [%]
Po lanění	80	2,57E+09	3,48E+08	13,58
Po výplni	80	1,59E+09	1,56E+08	9,80
Po opláštění	80	2,10E+09	2,47E+08	11,77
Po lanění	500	2,27E+09	3,55E+08	15,66
Po výplni	500	1,47E+09	1,28E+08	8,69
Po opláštění	500	1,94E+09	2,40E+08	12,33
Po lanění	5000	1,85E+09	3,11E+08	16,81
Po výplni	5000	1,39E+09	2,32E+08	16,64
Po opláštění	5000	1,57E+09	4,92E+08	31,25

Tab. 13 Výsledky změřeného izolačního odporu a vnitřní rezistivity

Vzorek	Délka vzorku [cm]	Izolační odpor [Ω] při 500 V	Vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$] při 500 V
V5 po lanění	51200	4,42E+09	1,88E+15
V5 po výplni	51200	2,87E+09	1,22E+15
V5 po opláštění	37700	5,15E+09	1,61E+15
V4 samotná izolovaná žíla	1000	5,10E+11	4,23E+15

3.5 Shrnutí dosažených výsledků

V následujícím odstavci jsou porovnány změřené hodnoty s hodnotami referenčními. Referenční hodnoty byly převzaty z českých norem (ČSN IEC 60502-1), německých norem (DIN VDE 0207) nebo z katalogových listů jiného výrobce (italská kabelovna FainPlast). U některých parametrů se nepodařilo získat referenční hodnoty, ale po konzultaci s výrobcem měřených vzorků byly změřené hodnoty vyhodnoceny jako uspokojivé a splňující požadavky.

U měření, kde se měřilo na více místech podél celého vzorku nebo vícekrát za sebou, se vyhodnocoval i aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Změřené a vypočítané hodnoty ze všech měření byly předány výrobcu, který vzorky poskytl, a ten je může dále zpracovávat. Výsledné parametry vzorků jsou shrnuty v tabulkách 14 a 15. Kompletní výsledky měření jsou obsaženy jak v samotné práci, tak v příloze. Změřené hodnoty byly porovnány s referenčními v následujících odstavcích.

Tab. 14 Výsledné parametry měřených vzorků. Hodnoty označené „N“ se nepodařilo zvolenou metodou vyhodnotit.

Vzorek	V1	V2	V3-C	V3-H	V3-M	V3-S	V4
Materiál	PVC	XLPE	HFFR	HFFR	HFFR	HFFR	HFFR
Průřez jádra [mm^2]	6	10	50	50	50	50	1,5
Tloušťka izolace [mm]	0,744	0,726	1,243	1,243	1,243	1,243	0,758
Povrchový odpor [$\text{T}\Omega$]	N	N	33,784	37,622	35,868	33,490	N
Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ při 1kV [-]	0,0353	0,0002	0,0184	0,0167	0,0160	0,0163	0,0200
Relativní permitivita [-]	8,71	4,03	6,06	5,85	6,04	6,14	8,92
Elektrická pevnost [kV/mm]	32,25	43,4	N	N	N	N	35,21

Tab. 15 Výsledné hodnoty izolačního odporu vzorku V4 a V5 změřené mezi jednotlivými technologickými operacemi.

Zkušební napětí [V]	80	500	5000	Vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$] při 500 V
V5 Izolační odpor - po lanění [Ω/km]	2,57E+09	2,27E+09	1,85E+09	1,88E+15
V5 Izolační odpor - po výplni [Ω/km]	1,59E+09	1,47E+09	1,39E+09	1,22E+15
V5 Izolační odpor - po opláštění [Ω/km]	2,10E+09	1,94E+09	1,57E+09	1,61E+15
V4 Izolační odpor - samotná izolovaná žíla [Ω/km]	1,99E+08	5,10E+09	1,06E+09	4,23E+15

Povrchový odpor

Jak bylo již psáno v předchozí podkapitole, povrchový odpor se podařilo změřit jen na vzorcích s největším průřezem, tedy na vzorcích s označením V3. Vyšší variační koeficient (až 21 %) lze přikládat rušivým vlivům při měření. Referenční hodnoty se k tomuto měřenému parametru získat nepodařilo, a proto v následující tabulce je kromě výsledků měření také vyjádření výrobce, který udává, že hodnoty jsou vyhovující.

Tab. 16 Výsledky a vyhodnocení povrchového odporu. Hodnoty označené „N“ se nepodařilo vyhledat.

Vzorek	Materiál	Variační koeficient [%]	Povrchový odpor [$T\Omega$]	Referenční hodnota [$T\Omega$]	Hodnoty dle výrobce
V3-C	HFFR	20,2	33,78	N	Vyhovující
V3-H	HFFR	19,76	37,62	N	Vyhovující
V3-M	HFFR	20,99	35,86	N	Vyhovující
V3-S	HFFR	17,75	33,49	N	Vyhovující

Ztrátový činitel

U vyhodnocení výsledků ztrátového činitele se porovnávaly hodnoty při napětí 1 kV. Dle nízkého variačního koeficientu (pod 10 %) lze považovat výsledky měření za dobře odměřené. Jen u vzorku V2 byl variační koeficient vysoký. Bylo to způsobeno vlastnostmi měřeného materiálu z XLPE, který má velice nízký ztrátový činitel. Proto i malá odchylka způsobila velký rozptyl a tím i vysoký variační koeficient (nad 100 %). Referenční hodnotu, převzatou z katalogového listu společnosti Fainplast, se podařilo získat jen k materiálu z XLPE. Dle této hodnoty, ale i samotného výrobce, výsledky odpovídají požadavkům a jsou vyhovující.

Tab. 17 Výsledky a vyhodnocení ztrátového činitele. Hodnoty označené „N“ se nepodařilo vyhledat.

Vzorek	Materiál	Variační koeficient [%]	Ztrátový činitel [-]	Referenční hodnota [-]	Hodnoty dle výrobce
V1	PVC	5,67	0,0353	N	Vyhovující
V2	XLPE	120,54	0,0002	0,0006	Vyhovující
V3-C	HFFR	10,47	0,0184	N	Vyhovující
V3-H	HFFR	2,70	0,0167	N	Vyhovující
V3-M	HFFR	3,51	0,0160	N	Vyhovující
V3-S	HFFR	3,09	0,0163	N	Vyhovující
V4	HFFR	4,66	0,0200	N	Vyhovující

Relativní permitivita

Opět jako v předchozím parametru se porovnávaly hodnoty při napětí 1 kV. Výsledky relativní permitivity jsou vyšší, než by měly být. Referenční hodnota, převzatá z katalogového listu společnosti Fainplast, udává u materiálu XLPE hodnotu 2,3, kdežto změřená hodnota je 4,03. Ostatní hodnoty jsou také vyšší, ale k těm se nepodařilo získat referenční hodnoty a ani výrobce tento parametr nehodnotil. Výsledky a srovnání jsou v následující tabulce:

Tab. 18 Výsledky a vyhodnocení relativní permitivity. Hodnoty označené „N“ se nepodařilo vyhledat.

Vzorek	Materiál	Relativní permitivita [-]	Referenční hodnota [-]	Hodnoty dle výrobce
V1	PVC	8,71	N	N
V2	XLPE	4,03	2,3	N
V3-C	HFFR	6,06	N	N
V3-H	HFFR	5,85	N	N
V3-M	HFFR	6,04	N	N
V3-S	HFFR	6,14	N	N
V4	HFFR	8,92	N	N

Elektrická pevnost

Elektrická pevnost se podařila změřit na vzorcích V1, V2 a V4. Referenční hodnotu, získanou z katalogového listu společnosti Fainplast, se podařilo vyhledat jen pro materiál z XLPE. Po konzultaci s výrobcem jsou výsledné hodnoty elektrické pevnosti vyhovující a splňují bezpečně dané požadavky. Výsledky a porovnání hodnot z měření elektrické pevnosti jsou v následující tabulce:

Tab. 19 Výsledky a vyhodnocení elektrické pevnosti. Hodnoty označené „N“ se nepodařilo vyhledat.

Vzorek	Materiál	Elektrická pevnost [kV/mm]	Referenční hodnota [kV/mm]	Hodnoty dle výrobce
V1	PVC	32,25	N	Vyhovující
V2	XLPE	43,40	34	Vyhovující
V4	HFFR	35,21	N	Vyhovující

Izolační odpor

Izolační odpor se proměřoval jen u vzorků V4 a V5. Vzorky jsou ze stejného materiálu, ale každý z nich se proměřoval jinou metodou. U tohoto parametru se podařilo získat referenční hodnotu jak k izolačnímu odporu, tak i k vnitřní rezistivitě. Referenční hodnota k izolačnímu odporu ($2,00E+08 \Omega/\text{km}$) byla převzata z interních materiálů

společnosti Kabelovna Kabex a.s. U vnitřní rezistivity byla spodní hranice referenční hodnoty ($1 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$) převzata z německé normy DIN VDE 0207 a horní hranice ($1 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$) z katalogového listu společnosti Fainplast. Vzorek V5 má vyšší hodnotu izolačního odporu ve všech technologických operacích, než je referenční hodnota, která je zároveň i nejnižší přípustná. Proto lze změřené hodnoty považovat za vyhovující. Totéž platí i pro vzorek V4. Vnitřní rezistivita vyšla dle referenčních hodnot také správně a i výrobce potvrdil, že hodnoty jsou vyhovující. Výsledky a porovnání výsledků jsou v následující tabulce:

Tab. 20 Výsledky a vyhodnocení izolačního odporu. Hodnoty označené „N“ se nepodařilo vyhledat.

Vzorek	Materiál	Izolační odpor [Ω/km]	Referenční hodnota [Ω/km]	Vnitřní rezistivita [Ω·cm]	Referenční hodnota [Ω·cm]	Hodnoty dle výrobce
V5 - po lanění	HFFR	2,27E+09	2,00E+08	1,88E+15	$10^{12} - 10^{15}$	Vyhovující
V5 - po výplni	HFFR	1,47E+09	2,00E+08	1,22E+15	$10^{12} - 10^{15}$	Vyhovující
V5 - po opláštění	HFFR	1,94E+09	2,00E+08	1,61E+15	$10^{12} - 10^{15}$	Vyhovující
V4 - samotná izolovaná žíla	HFFR	5,10E+09	2,00E+08	4,23E+15	$10^{12} - 10^{15}$	Vyhovující

Závěr

Elektrotechnika má v dnešní době velký význam, obklopuje nás a nedovedeme si bez ní představit praktický život. Tak jako v každém odvětví, tak i v tomto oboru je důležitý vývoj. Zvyšují se nároky zákazníků, ale i požadavky na bezpečnost provozu. I když se v současnosti často používá termín „bezdrátová doba“ není to vždy úplně pravda. Elektrická energie se stále nejlépe přenáší vodičem. I v kabelovém průmyslu je znát výrazný pokrok. U prvních kabelů se hledělo hlavně na to, aby vedly elektrickou energii a izolace bránila zkratu. Platí to i dnes, ale s tím, že před instalací kabelu je nutné znát prostředí, ve kterém bude kabel provozován. Podle toho je nutno zvolit vhodný izolační materiál. Každý izolační materiál má specifické parametry (např. mechanické, tepelné, chemické, elektrické). Určováním těchto parametrů se zabývá obor nazvaný technická diagnostika.

Tato diplomová práce se zabývala souhrnnou analýzou dielektrických parametrů izolačního systému kabelu. Teoretická část byla zaměřena na izolační systém kabelů, základy jejich konstrukce a izolační materiály, které se dříve i v současné době používají. U těchto materiálů jsou uvedeny důležité vlastnosti a možnosti jejich použití tak, aby izolace bezpečně plnila svojí funkci. Dále se práce zabývala diagnostikou kabelových systémů. V této části jsou popsány vlastnosti vybraných dielektrických parametrů a metody měření těchto parametrů, které vycházely hlavně z normy ČSN 34 7010-82.

V praktické části diplomové práce byly proměřeny vybrané dielektrické parametry dle výše popsaných metod na vzorcích, které jsou detailně popsány v tabulce 4. Výsledky všech měření jsou shrnuty v tabulkách 14 a 15 v kapitole 3.5. Po srovnání hodnot z měření povrchového odporu, ztrátového činitele, relativní permitivity, elektrické pevnosti a izolačního odporu s hodnotami referenčními a také po konzultaci s výrobcem vzorků bylo konstatováno, že měřené vzorky (žíly a kabely) vyhovují specifikaci. Pro vzájemné porovnání měřených vzorků je nejvhodnějším parametrem ztrátový činitel. Při měření tohoto parametru vyšel nejlépe vzorek V2 (XLPE) s hodnotou $\text{tg } \delta$ 0,0002. Hůře dopadly vzorky V3-C, V3-H, V3-M, V3-S a V4 (všechny HFFR), kde byla změřena hodnota ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ v rozmezí 0,0160 až 0,0200. Nejhůře dopadl vzorek V1 (PVC), kde byla změřena hodnota ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ 0,0353. Výsledky měření byly předány společnosti Kabelovna Kabex a.s.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ELEKTRO. *Z historie kabelů* [online]. 2008/01. Fcc public, 2008 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36453
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [3] DIXI TRANSPORTKABEL. *JXFE - V B2ca,s1,d0 E30-90: Vyobrazení* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-011-11]. Dostupné z: http://www.tkdixi.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, E., HOUŽVIČKA, F., GREŠÍK, P.: *Výroba kabelů a vodičů*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1986
- [6] KOLEKTIV AUTORŮ, REDIGOVAL ARTBAUER, J.: *Kabely a vodiče*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1956
- [7] KVÍTEK, Emil. *Materiály pro elektrotechniku: Kapalné izolanty*. [online]. 2007, s. 64 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/ls/IMPEE/Skripta_materialy.pdf
- [8] Kuimov, I.E.; Papkov, A.V., "Specific materials based on mica papers for fire resistant cable production," *Electrical Insulation*, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on , DOI: 10.1109/ELINSL.2000.845474. [online]. vol., no., pp.131,132, 2000 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=845474&isnumber=18299>
- [9] ENCYKLOPEDIIE COJECO. *Muskovit* [online]. 2000, 2.6.2004 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=62588&s_lang=2&title=muskovit
- [10] ENCYKLOPEDIIE COJECO. *Flogopit* [online]. 2000, 11.6.2006 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=26956&title=flogopit&s_lang=2
- [11] Interní firemní materiály firmy Kabelovna Kabex a.s.
- [12] MARŠÁLKOVÁ, Miroslava. *Textilní vlákna: Juta*. [online]. 2010, s. 26 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.opvk.eu/LinkClick.aspx?fileticket=wXo%2BF%2Fzb0XI%3D&tabid=5541&mid=8815&language=cs-CZ&forcedownload=true>
- [13] ECTA. *Výrobky ze skelného vlákna: E-sklo* [online]. 2009 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.ecta-gmbh.com/czech/glasfaser.html>

- [14] DARTE. *Keramické vlákno* [online]. 2013 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.darte.cz/technicke-izolace/keramicke-vlakno>
- [15] ALEXANDER, Graeme, Kenneth BARBER, Donavan MARNEY a Dong Churl LEE. *Ceramifying insulation materials for fire safety cables*. [online]. 2010, s. 1 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2007/2007-B3-4_page1.pdf
- [16] STANĚK, Jaroslav. *E-LTEX. Polyamidová vlákna* [online]. 2010 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.skolertextilu.cz/vlakna/index.php?page=12>
- [17] ODETKA. *Nomex: Specifikace materiálu* [online]. 2008 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx
- [18] ODETKA. *Kevlar: Specifikace materiálu* [online]. 2008 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_kevlar.aspx
- [19] FTVSLIB. *Syntetická vlákna: Polyesterové vlákno* [online]. s.63. 2008 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/synteticka_vlakna.pdf
- [20] BUTTERFLY. *Textilní kabely* [online]. 2011 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.textilnikabel.cz/index.htm>
- [21] DIXI TRANSPORTKABEL. *1- CXXH - V B2ca,s1,d0 E90: Vyobrazení* [online]. 2013 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.tkdixi.cz/katalog-kabelu-detail/26_1--cxkh--v-b2cas1d0-e90
- [22] *Vlastnosti papíru a jeho degradace – teoretická část. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2010 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuuka/labcv/labor/res_vlastnosti_papiru/teorie.htm
- [23] ENCABLES. *Elektrické kabely*. [online]. 2008, s. 27 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.encables.cz/data/elektricke-kabely-obecne.pdf>
- [24] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠNUPÁREK. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [25] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [26] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie: Kaučuky*. [online]. 2010, s. 28 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.home.karneval.cz/0323339201/text/kaucuky.pdf>
- [27] DuPont™, Neopren Polychloropren. [online]. 2013 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/elastomers/brands/neoprene-polychloroprene.html>
- [28] PINKEROVÁ, M. *Zdravotní (ne)závadnost kabelových izolací. Elektroinstalátér*, 2011, roč. 17, č. 6, s. 10-11. ISSN: 1211-2291

- [29] HEYMAN. Polyamid: vlastnosti materiálu. [online]. 2013 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
http://www.heyman.cz/media/useruploads/files/documentation_cz/Kazub/Vlastnosti%20polyamidu.pdf
- [30] TIEFYIEHEN, PP thermoplast: Polypropylen. [online]. [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
<http://tiefziehen.com/cz/PP/>
- [31] EPP Plasty: Polytetrafluoretylen. [online]. 2013 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
<http://www.eppplasty.cz/ptfe.php>
- [32] Ethylene-vinyl acetate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene-vinyl_acetate
- [33] Henderson, A.M., "Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers: a general review," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol.9, no.1, pp.30,38, Jan.-Feb. 1993 DOI: 10.1109/57.249923. [online]. [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=249923&isnumber=6395>
- [34] EXXONMOBIL. *Formulations for halogen-free flame retardant (HFFR) cables* [online]. 2006 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z:
<http://www.exxonmobilchemical.com/Chem-English/yourindustry/polyethylene-dpe-formulations-halogen-free-flame-retardant-cables.aspx>
- [35] RESINEX. PE - Polyetylén. [online]. 2013 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
<http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pe.html>
- [36] LUNA PLAST. Polyetylen: Typy a vlastnosti polyetylénu. [online]. 2013 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.lunaplast.cz/index.php?page=99001&lang=cz>
- [37] ARCOPLAST, Nízkohustotní polyetylen: Vlastnosti LDPE materiálu. [online]. 2011 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.arcoplast.sk/produkty.htm>
- [38] High Density Polyethylene: HDPE. [online]. 2011 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z:
<http://www.eng.buffalo.edu/Courses/ce435/Polyethylene/CE435Kevin.htm>
- [39] Ausetute, Vysokohustotní polyetylen: Vlastnosti. [online]. 2011 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.usetute.com.au/polythen.html>
- [40] XLPE: Characteristics of cross-linked polyethylene (XLPE). [online]. 2010, s. 7 [cit. 2014-01-12]. Dostupné z: <http://cavi.com.sg/public/drakaxlpe.pdf>
- [41] PINKEROVÁ, Martina a Radek POLANSKÝ. Nové trendy v materiálech používaných pro izolaci a opláštění kabelů. *Electroscope*. 2012, roč. 2012, č. 3. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3_2012/r6c2c4.pdf
- [42] ENCABLES. Typy stínění. [online]. 2009, s. 1 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z:
<http://www.encables.cz/data/Typy%20stineni.pdf>

- [43] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 235 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [44] ČSN 34 7010-82. *Elektrické kabely - Doplnující zkušební metody*. 4/09. Praha: UNMZ, 2009.
- [45] BARTŮŇKOVÁ, Monika. *Ztrátový činitel jako diagnostický parametr*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Boček Václav.
- [46] 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.
- [47] LEMKE DIAGNOSTICS. *Uživatelská příručka: Počítačový systém pro měření ztrátového činitele a kapacity LDV-5*. Verze 07-03. Volkersdorf: SRN, 2003.
- [48] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika izolantů*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1986.

Přílohy

Příloha A – Kompletní výsledky měření

Kompletní výsledky měření ztrátového činitele

Tab. 21 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V1

Vzorek V1	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,035064	0,035227	0,046482	0,073753
2	0,036400	0,036576	0,048990	0,067092
3	0,038299	0,038427	0,048336	0,069672
4	0,038704	0,038861	0,050235	0,071214
5	0,035304	0,035470	0,048499	0,081611
6	0,033173	0,033534	0,047163	0,067227
7	0,034091	0,034421	0,045401	0,061830
8	0,032094	0,032381	0,044561	0,068978
9	0,033850	0,033959	0,046254	0,059393
10	0,033841	0,034016	0,043045	0,057593
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,035082	0,035287	0,046897	0,067836
Směrodatná odchylka	0,002046	0,001999	0,002081	0,006738
Variační koeficient [%]	5,83	5,67	4,44	9,93

Tab. 22 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V2

Vzorek V2	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,0002343	0,0002545	0,0003329	0,0145925
2	0,0000552	0,0000764	0,0000663	0,0064022
3	0,0000724	0,0000567	0,0000345	0,0119218
4	0,0000651	0,0001072	0,0002130	0,0134555
5	0,0000845	0,0000564	0,0000216	0,0192621
6	0,0000809	0,0000709	0,0000440	0,0129922
7	0,0000947	0,0000947	0,0006059	0,0153084
8	0,0000769	0,0000644	0,0000577	0,0122432
9	0,0005706	0,0005555	0,0005893	0,0186144
10	0,0009103	0,0009031	0,0009221	0,0195114
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,0002245	0,0002240	0,0002887	0,0144304
Směrodatná odchylka	0,0002731	0,0002700	0,0002997	0,0038211
Variační koeficient [%]	121,66	120,54	103,80	26,48

Tab. 23 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V3-C

Vzorek V3-C	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,017073	0,017387	0,017817	0,025449
2	0,017089	0,017381	0,018274	0,025090
3	0,015999	0,016359	0,017066	0,030455
4	0,018971	0,019294	0,019673	0,030691
5	0,021939	0,022590	0,023258	0,030796
6	0,020569	0,020913	0,021911	0,030732
7	0,018233	0,018538	0,018910	0,030068
8	0,017666	0,018111	0,018876	0,026659
9	0,016339	0,016519	0,017298	0,028906
10	0,016612	0,016807	0,018270	0,028608
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,018049	0,018390	0,019135	0,028746
Směrodatná odchylka [-]	0,001832	0,001925	0,001897	0,002126
Variační koeficient [%]	10,15	10,47	9,91	7,40

Tab. 24 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V3-H

Vzorek V3-H	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,015626	0,015782	0,016343	0,020209
2	0,016808	0,016965	0,017224	0,025117
3	0,015997	0,016173	0,016682	0,026351
4	0,016672	0,016835	0,017085	0,020421
5	0,016362	0,016502	0,016819	0,025345
6	0,016341	0,016484	0,016963	0,026286
7	0,016726	0,016871	0,017106	0,023550
8	0,016866	0,017053	0,017351	0,024173
9	0,017278	0,017456	0,017819	0,022437
10	0,016428	0,016600	0,017074	0,023339
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,016510	0,016672	0,017047	0,023723
Směrodatná odchylka [-]	0,000444	0,000449	0,000376	0,002081
Variační koeficient [%]	2,69	2,70	2,21	8,77

Tab. 25 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V3-M

Vzorek V3-M	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,015456	0,015641	0,015910	0,019627
2	0,015072	0,015249	0,015497	0,019212
3	0,015791	0,015995	0,016345	0,021058
4	0,015837	0,016014	0,016273	0,017413
5	0,015474	0,015656	0,015977	0,025556
6	0,015521	0,015714	0,015960	0,021530
7	0,016067	0,016267	0,016765	0,021916
8	0,015588	0,015744	0,016000	0,023514
9	0,016832	0,017024	0,017353	0,021991
10	0,016531	0,017050	0,018222	0,023218
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,015817	0,016036	0,016430	0,021504
Směrodatná odchylka [-]	0,000504	0,000562	0,000772	0,002225
Variační koeficient [%]	3,19	3,51	4,70	10,35

Tab. 26 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V3-S

Vzorek V3-S	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,014908	0,015180	0,016473	0,025663
2	0,016050	0,016237	0,016517	0,019941
3	0,015591	0,015797	0,016365	0,021918
4	0,016126	0,016324	0,016699	0,023079
5	0,016129	0,016322	0,017204	0,030959
6	0,016798	0,017005	0,017320	0,022976
7	0,016540	0,016766	0,017121	0,023543
8	0,016546	0,016784	0,017737	0,029494
9	0,016100	0,016360	0,017709	0,026640
10	0,015833	0,016046	0,016567	0,022063
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,016062	0,016282	0,016971	0,024628
Směrodatná odchylka [-]	0,000511	0,000502	0,000488	0,003332
Variační koeficient [%]	3,19	3,09	2,88	13,53

Tab. 27 Výsledky měření ztrátového činitele pro vzorek V4

Vzorek V4	Ztrátový činitel tg δ při napětí:			
četnost	500 V	1kV	1,5kV	2kV
1	0,019520	0,019676	0,021383	0,032764
2	0,019605	0,019787	0,023155	0,034492
3	0,021675	0,021855	0,022888	0,033679
4	0,018694	0,018938	0,020460	0,036810
5	0,019605	0,019787	0,023155	0,034492
6	0,020355	0,020548	0,022618	0,041138
7	0,020868	0,021085	0,022334	0,036139
8	0,020435	0,020630	0,023039	0,038421
9	0,018784	0,018967	0,021495	0,029277
10	0,018820	0,018994	0,020194	0,032207
Aritmetický průměr tg δ [-]	0,019836	0,020027	0,022072	0,034942
Směrodatná odchylka [-]	0,000934	0,000933	0,001060	0,003189
Variační koeficient [%]	4,71	4,66	4,80	9,13

Kompletní výsledky měření izolačního odporu

Tab. 28 Výsledky měření izolačního odporu u vzorku V5 po lanění

Měření po lanění - délka [m]	512					
	80		500		5000	
Zkušební napětí [V]						
Hodnota izolačního odporu	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]
V5 1. žíla vs zbytek	3,43E+09	1,75E+09	2,75E+09	1,40E+09	2,27E+09	1,16E+09
V5 2. žíla vs zbytek	5,79E+09	2,96E+09	4,70E+09	2,40E+09	4,30E+09	2,20E+09
V5 3. žíla vs zbytek	5,14E+09	2,63E+09	4,56E+09	2,33E+09	3,64E+09	1,86E+09
V5 4. žíla vs zbytek	5,14E+09	2,63E+09	4,56E+09	2,33E+09	3,58E+09	1,83E+09
V5 5. žíla vs zbytek	5,18E+09	2,65E+09	4,70E+09	2,40E+09	3,66E+09	1,87E+09
V5 6. žíla vs zbytek	5,19E+09	2,65E+09	4,77E+09	2,44E+09	3,69E+09	1,88E+09
V5 7. žíla vs zbytek	5,21E+09	2,66E+09	4,92E+09	2,51E+09	4,16E+09	2,13E+09

Tab. 29 Výsledky měření izolačního odporu u vzorku V5 po výplni

Měření po výplni - délka [m]	512					
	80		500		5000	
Zkušební napětí [V]						
Hodnota izolačního odporu	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]
V5 1. žíla vs zbytek	2,48E+09	1,27E+09	2,30E+09	1,17E+09	2,01E+09	1,02E+09
V5 2. žíla vs zbytek	3,59E+09	1,83E+09	2,96E+09	1,51E+09	2,71E+09	1,38E+09
V5 3. žíla vs zbytek	3,08E+09	1,57E+09	2,88E+09	1,47E+09	2,64E+09	1,35E+09
V5 4. žíla vs zbytek	3,05E+09	1,56E+09	2,87E+09	1,46E+09	2,62E+09	1,34E+09
V5 5. žíla vs zbytek	3,21E+09	1,64E+09	2,95E+09	1,51E+09	3,67E+09	1,87E+09
V5 6. žíla vs zbytek	3,19E+09	1,63E+09	2,98E+09	1,52E+09	2,75E+09	1,40E+09
V5 7. žíla vs zbytek	3,14E+09	1,60E+09	3,16E+09	1,61E+09	2,63E+09	1,34E+09

Tab. 30 Výsledky měření izolačního odporu u vzorku V5 po opláštění

Měření po plášti - délka [m]	377					
Zkušební napětí [V]	80		500		5000	
Hodnota izolačního odporu	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]	Naměřená	Přepočtená [Ω/km]
V5 1. žíla vs zbytek	4,54E+09	1,71E+09	3,71E+09	1,39E+09	3,24E+09	1,22E+09
V5 2. žíla vs zbytek	5,64E+09	2,12E+09	5,60E+09	2,11E+09	5,22E+09	1,96E+09
V5 3. žíla vs zbytek	5,35E+09	2,01E+09	5,44E+09	2,05E+09	1,41E+09	5,31E+08
V5 4. žíla vs zbytek	5,31E+09	2,00E+09	5,80E+09	2,18E+09	5,14E+09	1,93E+09
V5 5. žíla vs zbytek	6,91E+09	2,60E+09	5,02E+09	1,89E+09	4,54E+09	1,71E+09
V5 6. žíla vs zbytek	5,71E+09	2,15E+09	5,22E+09	1,96E+09	5,26E+09	1,98E+09
V5 7. žíla vs zbytek	5,49E+09	2,07E+09	5,30E+09	1,99E+09	4,40E+09	1,65E+09

Kompletní výsledky měření povrchového odporu

Tab. 31 Výsledky měření povrchového odporu – proud procházející mezi elektrodami

Vzorek	Materiál	Povrchový proud [pA], měřeno na 10 místech									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V3-C	HFFR	14,3	16,6	11,9	17,4	13,3	18,2	10,5	13,6	12,1	20,1
V3-S	HFFR	15,7	18,1	18,2	16,4	15,3	13,1	10,1	15,3	17,6	9,5
V3-H	HFFR	17,9	11,1	14,1	10,2	16,5	14,3	9,1	16,1	12,2	11,4
V3-M	HFFR	18,1	17,1	11,1	16,4	13,1	11,5	13,3	10,5	13,5	14,8

Kompletní výsledky měření permitivity

 Tab. 32 Výsledky měření kapacity C_x při 1 kV

Četnost	Vzorek							
	V1	V2	V3-C	V3-H	V3-M	V3-S	V4	
1	2,513E-11	1,641E-11	3,122E-11	3,047E-11	3,134E-11	2,900E-11	1,566E-11	
2	2,620E-11	1,539E-11	2,993E-11	2,818E-11	3,060E-11	2,930E-11	1,650E-11	
3	2,654E-11	1,613E-11	2,955E-11	2,885E-11	3,011E-11	3,027E-11	1,651E-11	
4	2,699E-11	1,531E-11	3,098E-11	2,945E-11	2,982E-11	2,976E-11	1,531E-11	
5	2,517E-11	1,633E-11	3,112E-11	2,783E-11	2,973E-11	2,822E-11	1,523E-11	
6	2,722E-11	1,636E-11	3,147E-11	2,856E-11	2,953E-11	2,916E-11	1,503E-11	
7	2,786E-11	1,596E-11	2,731E-11	2,835E-11	2,980E-11	3,121E-11	1,612E-11	
8	2,731E-11	1,682E-11	3,067E-11	2,887E-11	2,872E-11	3,222E-11	1,664E-11	
9	2,871E-11	1,546E-11	2,974E-11	2,889E-11	2,963E-11	3,209E-11	1,734E-11	
10	3,107E-11	1,707E-11	2,899E-11	3,093E-11	3,041E-11	3,331E-11	1,951E-11	
Aritmetický průměr [F]	2,722E-11	1,612E-11	3,010E-11	2,904E-11	2,997E-11	3,045E-11	1,638E-11	
Směr. odchylka [F]	1,660E-12	5,670E-13	1,215E-12	9,364E-13	6,680E-13	1,585E-12	1,253E-12	
Variační koef. [%]	6,10	3,52	4,04	3,22	2,23	5,21	7,65	

Příloha B – Vzorce statistického výpočtu

Aritmetický průměr

Součet všech hodnot (x_i) vydělených jejich počtem (n).

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

Směrodatná odchylka – σ

Směrodatná odchylka je rovna odmocnině z rozptylu.

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

Variační koeficient - V_x

Charakterizuje přesnost měření či výsledku. Je to podíl aritmetického průměru a směrodatné odchylky vynásobený 100 pro výsledek v procentech.

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