

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Moderní trendy ve vývoji materiálů pro elektroizolační
systémy kabelů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan ŠIPLA**
Osobní číslo: **E16B0171P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Moderní trendy ve vývoji materiálů pro elektroizolační systémy kabelů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte teoretický úvod do problematiky kabelů (dělení kabelů dle účelu použití, základní konstrukce kabelů, dělení dle použitých izolačních materiálů).
2. Proveďte stručnou rešerši současného stavu v oblasti elektroizolačních materiálů využívaných v kabelovém průmyslu (přehledné shrnutí polymerů používaných pro jednotlivé elektroizolační vrstvy kabelů se zaměřením na silové kabely, popis přechodu od využívání jen čistých polymerů k využívání polymerních kompozitů v mnoha aplikacích).
3. Realizujte charakterizaci několika silových kabelů splňujících současné bezpečnostní požadavky (rozbor použitých materiálů se zaměřením na použitá plniva a další aditiva přispívajících např. ke snížení hořlavosti daných materiálů; charakterizaci proveďte na základě dostupných produktových listů, dalších informací od výrobců kabelů a dle odborné literatury).
4. Navrhněte možná zlepšení elektroizolačního systému jednoho charakterizovaného kabelu.
5. Proveďte laboratorní testování libovolného polymerního kompozitu navrženého pro kabelový průmysl (testování zaměřené na seznámení se základními principy měření vybraných dielektrických parametrů a principy termických analýz).



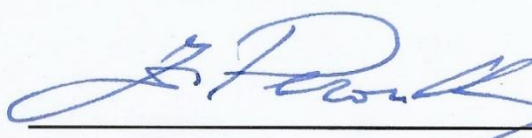
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

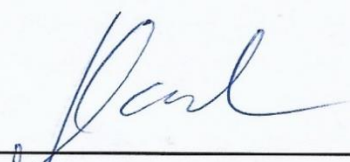
1. R. Linhart. Kabely a vodiče, kabelové soubory, spojovací a izolační materiál. Praha: Merkur, 1988, 250 s.
2. V. Ducháček. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
3. G. F. Moore. Electric Cables Handbook. Oxford: Blackwell Science, 1997, 1120 s. ISBN 978-0-632-04075-9.
4. W. A. Thue. Electrical Power Cable Engineering. Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis), 2012, 449 s. ISBN 978-1-4398-5645-1.
5. elektronické informační zdroje (SUMMON – vyhledávací nástroj knihovny ZČU, případně přímo Science Direct, IEEE Explore atd.)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kadlec**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena primárně na problematiku elektroizolačních materiálů používaných v kabelovém průmyslu pro výrobu jednotlivých izolačních vrstev kabelů. V teoretické části je popsán současný technický stav v oblasti elektroizolačních materiálů používaných v kabelovém průmyslu se zaměřením především na polymerní materiály. Dále jsou v teoretickém úvodu zpracovány základní informace o konstrukci běžně používaných kabelů a jejich dělení. Celá teoretická část je postupně směřována k silovým kabelům, které jsou předmětem zájmu v praktické části. Praktická část bakalářské práce se soustředí hlavně na polymerní elektroizolační materiály, u kterých se měří a vyhodnocují dielektrické vlastnosti. Důraz je kladen na seznámení s postupy měření vybraných dielektrických parametrů a na termické analýzy, které jsou velmi důležité při komplexní charakterizaci materiálu i s ohledem na potřebu hodnocení materiálů v havarijních stavech, mezi které patří hlavně požár. Z provedených analýz vyplývá, že při použití vhodně zvolených polymerních, většinou kompozitních, materiálů dochází k výraznému zlepšení vlastností silových kabelů, především v oblasti snížení tepelného toku při vyšších teplotách např. při vzniku požáru.

Klíčová slova

Elektroizolační materiály, silový kabel, odolnost materiálů při požáru, termické analýzy, permitivita, dielektrická spektroskopie, simultánní termická analýza

Abstract

This bachelor thesis is focused on electrical insulating materials used in cable industry for fabrication of insulating layer of cables. A current state of electrical insulating materials with emphasis on polymer materials is described in theoretical part. Furthermore, the information about standard construction of cables are described. The whole theoretical part is directed to power cables, which are the main topic of interest in this theses. The practical part is concentrated on electrical insulating materials, for which they are measured and evaluated dielectric properties. The emphasis is placed on the understanding of techniques and process of dielectric properties measurement and thermal analysis, which are the most important for complex material characterization even under emergency conditions which includes also fire conditions. The results of realized analysis show, that the using of suitable polymer, mostly composite, material significantly improves the properties of power cables, especially reducing heat flow at higher temperatures, e.g., during the fire.

Key words

Electrical insulating materials, power cable, flame resistant materials, thermal analysis, permittivity, dielectric spectroscopy, simultaneous thermal analysis

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 15.6.2020

Jan Šipla

Poděkování

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

Poděkování patří také společnosti Kabelovna Kabex a.s., která poskytla vzorky kabelů využité pro popis moderní konstrukce silových kabelů a testování vybraných materiálů v praktické části předkládané práce.

Také bych rád poděkoval Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy ČR, že tato práce mohla vzniknout díky podpoře v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	11
2 OBECNÉ PŘEDSTAVENÍ KABELŮ	12
2.1 HISTORIE VÝVOJE KONSTRUKCE KABELŮ	12
2.2 POPIS KONSTRUKCE KABELŮ	13
2.2.1 Jádru kabelu	14
2.2.2 Žilová izolace.....	14
2.2.3 Výplňová izolace.....	15
2.2.4 Plášť	15
2.3 VÝROBA KABELU V PRAXI.....	15
3 POLYMERNÍ MATERIÁLY A ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉM KABELŮ	18
3.1 HISTORIE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ.....	19
3.2 VYBRANÉ POLYMERY A KOPOLYMERY PRO VÝROBU IZOLAČNÍCH VRSTEV KABELŮ.....	20
3.3 MODIFIKACE VYBRANÝCH POLYMERŮ	22
3.4 POLYMERNÍ KOMPOZITY PRO VÝROBU ELEKTROIZOLAČNÍCH VRSTEV KABELŮ	25
4 SILOVÉ KABELY	27
4.1 KONSTRUKCE SILOVÝCH KABELŮ	28
4.2 VÝROBCI A ZNAČENÍ SILOVÝCH KABELŮ.....	28
4.3 ZLEPŠENÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ.....	30
4.4 OBECNÁ CHARAKTERIZACE VYBRANÝCH KABELOVÝCH IZOLACÍ.....	31
4.5 DIAGNOSTIKA V KABELOVÉM PRŮMYSLU	32
5 PRAKTICKÁ ČÁST	34
5.1 ŠIROKOPÁSMOVÁ DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIE (BDS).....	35
5.1.1 Příprava vzorku a průběh měření.....	37
5.1.2 Naměřené hodnoty.....	37
5.2 SIMULTÁNNÍ TERMICKÁ ANALÝZA (STA)	39
5.2.1 Příprava vzorku a průběh měření.....	40
5.2.2 Naměřené hodnoty.....	42
6 ZÁVĚR.....	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	46

Seznam symbolů a zkratk

Fyzikální veličiny

f	(Hz)	Frekvence
P	(W)	Výkon
U	(V)	Napětí
ε	(F/m)	Permitivita
ε^*	(-)	Komplexní permitivita
ε'	(-)	Reálná část komplexní relativní permitivity
ε''	(-)	Imaginární část komplexní relativní permitivity
γ	(S/m)	Konduktivita (měrná elektrická vodivost)
$\tan \delta$	(-)	Ztrátový činitel
m	(g)	Hmotnost
l	(mm)	Délka
E_p	(kV/mm)	Elektrická pevnost
ρ	(Ω)	Rezistivita
T	($^{\circ}\text{C}$)	Teplota

Zkratky polymerů a dalších materiálů

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
Al	Hliník
APP	Polyfosfát amonný
ATH	Hydroxid hlinitý (aluminiumtrihydrát)
Cu	Měď
CBs	Černý pigment (<i>Carbon Blacks</i>)
Cd	Kadmium
CR	Chloroprenový kaučuk
Cr	Chrom
EPDM	Ethylen-propylen-dienový elastomer
EPM	Ethylen-propylenový kopolymer
EPR	Ethylen-propylenový elastomer
EVA	Kopolymer vinyl-acetát
Fe	Železo
HDPE	Vysokohustotní polyethylen

HFFR	Bezhalogenový retardér hoření (<i>Halogen-Free Flame Retardant</i>)
LDPE	Nízkohustotní polyethylen
LLDPE	Lineární nízkohustotní polyethylen
MDH	Hydroxid hořečnatý (magnesiumdihydrát)
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
SBR	Butadien-styrenový kaučuk
Ti	Titan
XLPE	Sít'ovaný polyethylen
Zn	Zinek

Ostatní zkratky

AC	Střídavé napětí/proud
BDS	Širokopásmová dielektrická spektroskopie
ČSN (EN, IEC)	České technické normy (evropské, mezinárodní elektrotechnické)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
DTA	Diferenční termická analýza
ICTAC	Mezinárodní konfederace pro termické analýzy a kalorimetrii
LOI	Limitní kyslíkové číslo
NN	Nízké napětí
PNE	Podnikové normy
STA	Simultánní termická analýza
TG	Termogravimetrická analýza
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí

1 Úvod

Již od objevu elektřiny byla snaha o její přenos na velkou vzdálenost a zavedení do všech domácností. Ať už považujeme za „otce“ elektřiny Thomase Alvu Edisona (stejnoseměrný proud) nebo Nikolu Teslu (střídavý proud), dnes si život bez elektřiny nedovedeme představit. První vedení byla na stejnosměrný proud, ale velké ztráty elektrické energie, ukázaly výhody střídavého proudu, který lze snadno transformovat, a tím snížit ztráty. Zvyšující se napěťová hladina využívající se v domácnostech a nároky na bezpečnost, urychlovaly vývoj především v oblasti elektroizolačních systémech kabelů. Jednalo se o dostupnost a nízké náklady na materiál, který by měl být co nejuniverzálnější ve všech elektrotechnických oborech. Elektrická vedení se na svém počátku odlišovaly svojí podobou, která se odvíjela od účelu použití. V případě přenosu elektrické energie, ať se jednalo o energetické celky (elektrárny) nebo o malé domácí spotřebiče (např. kávovar), se začaly uplatňovat vodiče izolované elektroizolačním materiálem, který se nachází přímo na vodiči. Prvotně se izolovalo pomocí nejrůznějších materiálů (např. asfalt, olej, papír, dřevo apod.), postupem času se začalo přecházet na polymerní materiály zejména na bázi termoplastů. Tyto izolované vodiče nazýváme kabely, ať už se jedná o jeden izolovaný vodič nebo více vodičů v jednom obalu (plášti). Kabely umožnily realizovat rozvod elektrické energie téměř kdekoliv, a navíc při vhodné volbě materiálu a správném postupu výroby minimalizují riziko úrazu elektrickým proudem, zkratu a dalších nebezpečí spojených s výskytem elektrické energie v blízkosti člověka. V mnoha aplikacích již základní polymery nevyhovují ve všech svých vlastnostech, a proto se stále více uplatňují polymerní kompozitní materiály odvozené od základních polymerů nejčastěji polyethylenu.

2 Obecné představení kabelů

Kabel slouží k přenosu elektrické energie nebo informací v podobě elektrických signálů a tvoří tak vodivou cestu z místa zdroje do místa určení. Na kabel je uplatňováno široké spektrum kritérií, které vycházejí z konkrétního účelu a použití kabelu, a mají tak zásadní vliv na jeho finální podobu a vlastnosti.

Kabely lze dělit podle různého hlediska. Nejčastěji se dělí podle využití na kabely silové a sdělovací. Silové kabely se dále rozlišují podle napěťové hladiny na NN - nízké napětí (do 1 kV), VN - vysoké napětí (1 až 33 kV) a VVN - velmi vysokého napětí (nad 33 kV) [1]. U silových kabelů je možné narazit na specifické konstrukce kabelu, které se uplatňují v určitém prostředí, např. flexibilní kabely (servomotory), kabely pro dopravní techniku (výtahy, jeřáby...), hybridní kabely (spojení datového a silového kabelu), kabely pro rozšířený rozsah teplot.

Sdělovací kabely slouží k přenosu dat (signálů). Signály jsou přenášeny pomocí malých výkonů (10^{-6} W) [2]. Z toho vyplývá, že u těchto kabelů musíme používat stínění proti elektromagnetickému rušení. Stínění je zajištěno buď další stínicí vrstvou z vodivého opletu, nebo tzv. kroucení párů¹.

2.1 Historie vývoje konstrukce kabelů

První zmínky o výrobě kabelů se datují ke konci 18. století, nicméně až během průmyslové revoluce, která od poloviny 19. století vyvolávala zvýšení poptávky po elektrické energii, se začal kabelový průmysl masivně rozvíjet. Zpočátku se elektrická energie rozváděla odlišně, např. ještě v roce 1882 bylo zavedení elektrické energie do Městského divadla v Brně realizováno pomocí dřevěných žlabů, ve kterých byly uloženy holé vodiče [3].

První záznamy o použití kabelu se souvislou vrstvou izolace z proužků indické gumy se datují k roku 1812, kdy byl takovýto kabel použit k odpálení dolu v Rusku. O pár let později byla jako izolace zkoušena i vlna napuštěná šelakem, ale tato instalace měla plno problémů,

¹ Od sebe izolované vodiče jsou po celou svoji délku pravidelně vzájemně stáčené, aby se zlepšila elektromagnetická kompatibilita.

a tak od ní bylo upuštěno. Až roku 1842 byla v Evropě představena přírodní termoplastická guma Gutaperča. Tato guma je pevná, průhledná a podobná kaučuku. Gutaperča se osvědčila díky tomu, že zajišťovala ochranu jádra před oxidací. Roku 1860 se prvně k izolaci použil vulkanizovaný kaučuk. První distribuční sítě byly postaveny v Buffalu a New Yorku roku 1886, přičemž tyto sítě pracovaly na 1000 V (AC) [4].

Roku 1890 byl v Londýně zkonstruován kabel s papírovou izolací. Kabel obsahoval dvě měděná jádra izolovaná proužky papíru napuštěného olejem na bázi kalafuny. Již o čtyři roky dříve byl v Americe vyroben kabel s papírovou izolací, který byl napuštěn olejem na bázi parafinu a pokryt olověným pláštěm. Jednalo se tak o první flexibilní kabel s papírovou izolací. Tyto kabely našly své uplatnění především v distribuční síti pro napětí 12,5 kV a více [4]. Během druhé světové války se v průmyslu využívala technologie extrudování polymerů. Konec druhé světové války vedl k používání této technologie i k výrobě kabelů a postupnému ustupování od používání kabelů s papírovou izolací. Prvně se používaly přírodní polymery, ale postupný vývoj dal za vznik nových syntetických polymerů, které se v izolaci kabelů uplatňují dodnes [4].

Kabel moderního typu se zrodil ve Švýcarsku a zasloužil se o to Franz Borel, který jako první využil k izolaci asfalt. Později byl asfalt doplněn směsí pryskyřice a oleje, na vnější povrch bylo aplikováno olovo pomocí lisu. Tímto způsobem byl roku 1879 zhotoven první kabel určený pro distribuci elektřiny. V průběhu let se vývoj zaměřil spíše na vývoj elektroizolačních materiálů pro izolování vodičů. V tomto směru se jako perspektivní materiály ukázaly polymery [3]. Zmíněná problematika je řešena v následující kapitole.

2.2 Popis konstrukce kabelů

V praxi se můžeme setkat s holým nebo izolovaným vodičem. Holé vodiče nemají žádnou ochranu před dotykem živých částí ani žádnou izolaci, používají se u bondování součástek, vývodů součástek atd. Izolovaný vodič je pokryt dielektrickým materiálem. Zvláštním případem je vodič izolovaný pouze vzduchem. Tento způsob izolace se uplatňuje u venkovního a trolejového vedení. Každá odborná literatura má na tento případ svůj pohled, např. podle literatury [5] se jedná o holý vodič, oproti tomu v literatuře [6] je tento způsob izolace označován jako pokrytý vodič. Kabel je složením jednoho nebo více izolovaných vodičů, optických vláken v jednom obalu, který je chrání před mechanickým poškozením a přírodními vlivy. Tento obal je nazýván pláštěm [6]. Podle požadavků na kabel se může

přidat výplňová směs pro vyplnění prostoru mezi žilami, nebo nejrůznější pásy zajišťující voděodolnost nebo stínění proti okolnímu elektromagnetickému rušení.

2.2.1 Jádru kabelu

Jádra kabelů se vyrábějí z vodivých materiálů, nejčastěji z hliníku (Al) a mědi (Cu). Jelikož má hliník přibližně 60% vodivost mědi, musí být pro stejný účel zvolen větší průřez jádra [2]. Hliník je ale podstatně lehčí a levnější než měď. Jádro může být realizováno dvojitým způsobem, a to buď jako plné jádro, které je tvořeno kompaktním materiálem (používá se pro menší průřezy), nebo složené jádro, kde je průřez tvořen z více jednotlivých vodičů (lanek). Složené jádro vzniklo kvůli potřebě zvyšování ohebnosti vodičů [5].

Před samotnou výrobou jádra kabelů je třeba věnovat pozornost i přípravě surové mědi a hliníku. Získávání mědi je složitý proces, během něhož se za pomoci pražení a dmýcháním dostává ze sulfidických rud. Poté je elektrolyticky očištěna a odlita do čtverhranných tyčí [2]. Hliník se řadí mezi nejrozšířenější prvky v přírodě, kde ho nenalezneme v čisté podobě, ale je obsažen v mnoha sloučeninách. Nejběžněji se vyskytuje v hornině zvané bauxit, kde obsah hliníku činí 60 %. Výrobní proces od sloučeniny obsahující hliník až po hliníkový drát se skládá ze tří procesů: získání čistého Al_2O_3 (oxid hlinitý), výroba surového hliníku a elektrolytická rafinace. Oxid hlinitý se získává z bauxitu zásaditým tzv. Bayerovým způsobem. Získání surového hliníku se realizuje elektrolytickým rozkladem rozpuštěného Al_2O_3 v kryolitu², který se nachází v elektrolyzérech. Rafinace se využívá pro zvýšení čistoty hliníku, kde pro potřeby kabelového průmyslu je požadována čistota hliníku nejméně 99,5 %. Podrobnější informace o průběhu výrobě hliníku určeného pro kabelový průmysl naleznete v literatuře [7]. Po rafinaci se hliník odlévá do menších bloků. Takto vyrobené polotovary se dostanou do kabelovny pro jejich další zpracování.

2.2.2 Žilová izolace

Jádro je obaleno izolační hmotou. Tato vrstva se často označuje jen jako izolace, případně žilová izolace. Nejuniverzálnější izolací se ukázalo PVC (polyvinylchlorid). Masivní rozšíření kabelů do nejrůznějších odvětví mělo za příčinu využití jiných materiálů. U silových kabelů se v současnosti nejčastěji uplatňuje PE (polyethylen), který má lepší

² Kryolit (Na_3AlF_6 – Hexafluorhlinitan sodný) je minerál, který se v uváděném případě používá jako tavidlo pro snížení teploty tání bauxitu [7].

dielektrické vlastnosti, a také je z hlediska požární bezpečnosti výrazně lepší, protože při jeho hoření se neuvolňuje kyselina chlorovodíková, jak je tomu u PVC. Pokud je zvolen materiál žíly a její barva, poté můžeme přikročit ke konstrukci kabelové duše. Stáčením žil do svazku se vytváří duše kabelu.

2.2.3 Výplňová izolace

Prostor mezi jednotlivými žilami kabelu může zůstat prázdný nebo bývá vyplněn. Tato výplň není nezbytná. Její funkcí je zajistit kruhovost kabelu a vyplnit prostor mezi žilami, aby byl kabel pevnější. Výplňová izolace nezajišťuje ochranu před dotykem, a proto zde bývá použit nejlevnější materiál, který lze nalézt v každém kabelu. Nejčastěji je výplňová izolace vyhotovena z EPDM (etylen-propylen-dienový elastomer) [2]. V některých aplikacích se může jako výplňová izolace využít HFFR směs (obsahující bezhalogenový retardér hoření), která je totožná s HFFR směsí pláště. Toto řešení bývá dražší, ale může se tak zvýšit celková odolnost kabelu proti ohni. Než se přikročí k nanesení pláště, tak může být konstrukce s výplňovou izolací opletena nejrůznějšími speciálními páskami, které zajišťují např. ochranu před elektromagnetickým rušením, před vniknutím vody nebo se jedná např. o oheň retardující pásy.

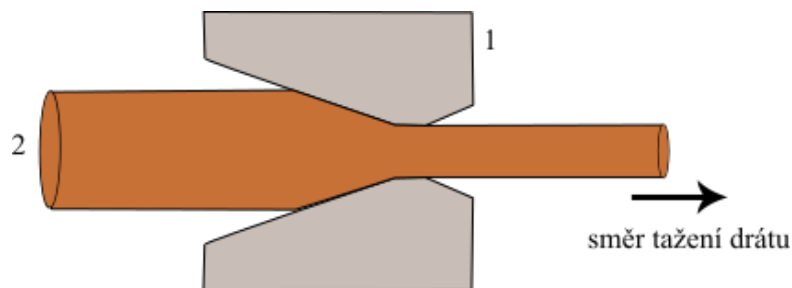
2.2.4 Plášť

Plášť drží kabel pohromadě a chrání jej před nepříznivými vnějšími vlivy. Běžným pracovním podmínkám obecně vyhovuje plášť z PVC. Stále častěji se lze ale setkat s pláští oranžové či hnědé barvy, což jsou barvy typické pro kabely se zvýšenou požární odolností. Samotná polymerní směs je ve většině případů bílá a je dobarvena během procesu výroby přidáním pigmentů či barviv, které zajistí výsledný barevný odstín pláště [8]. Barva pláště může mít téměř jakoukoliv barvu, kterou zákazník požaduje, proto ve specializovaných výrobních je důležité neřídit se pouze barvou, ale také popisem kabelu. Některé kabely mohou mít odlišnou barvu jenom proto, aby se upozornilo na jejich přítomnost.

2.3 Výroba kabelu v praxi

Před samotnou výrobou kabelu musí kabelovna zajistit všechny potřebné komponenty, které se použijí na výrobu kabelu. Mezi základní komponenty patří materiál na výrobu vodiče, polymerní granulát pro výrobu izolačních vrstev, různé fólie k návinu atd. V kabelovně začíná proces postupného zmenšování průměru (tažení za studena). Drát se

protahuje pomocí kotoučů přes kalibrované tažecí průvlastky (viz Obr. 1). Tento proces se musí několikrát opakovat, než se dosáhne požadovaného průměru. Během tohoto procesu vodič prochází emulzí, která drát ochladí a taky zajistí výsledný homogenní povrch.



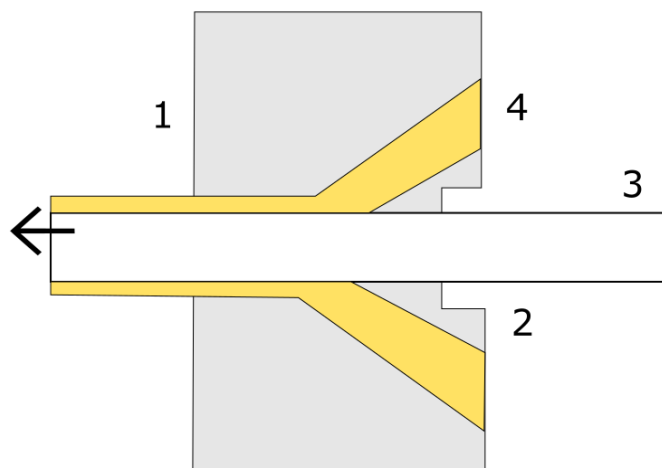
Obr. 1: Řez kalibrovaného tažecího průvlastku: 1 – tažecí průvlastek, 2 – drát (překresleno z [9]).

Poslední operací při výrobě samotného drátu je žíhání³. Následuje vstup drátu (jádra) do extrudéru⁴ (řez extrudéru je vidět na Obr. 2), kde se za vysoké teploty a tlaku nanáší roztavená polymerní směs na jádro [2]. Nejčastěji používanými polymery jsou PVC, PE a XLPE (síťovaný polyethylen). U PVC a PE stačí po nanesení ochladit, ale u XLPE musí dojít k zesítnění látky nejčastěji chemicky [10]. Již v této fázi se na izolaci nanáší barva, a to dvěma způsoby. V rámci prvního způsobu je barva přimíchána ve směsi s roztaveným polymerem. Druhý způsob představuje nanesení tenké vrstvy směsi s barvou na vytvořenou izolaci. Následuje konstrukce kabelové duše. Žíly ve svazku prochází extrudérem, kde se na ně nanáší výplňová směs. Poté jsou takto vyrobené kabely stáčeny na lanovacím stroji, kde je na ně navijena páska, pokud je vyžadována zákazníkem. Na lanovacím stroji je konstrukce fixována pomocí PET (polyethylentereftalát) pásky nebo fixačních vláken. Celá konstrukce naposledy projde extrudérem, kde kabel dostane svůj plášť [2].

Dříve, než se masivně začalo uplatňovat izolování jader polymerními materiály, se využívaly k izolaci papírové pásy. Tyto pásy postupně ztratily význam k izolaci jader u silových kabelů. Stále ale mají svoje uplatnění při izolování pravoúhlých vodičů pro vinutí olejových transformátorů, případně cívek velkých točivých strojů. Samotná technologie ovinu páskou má využití i při výrobě kabelů s izolací zhotovenou z polymerních materiálů. U silových kabelů je tato technologie používána k návinnu pásek s různými vlastnostmi [10].

³ Žíhání – proces tepelného zpracování při vysoké teplotě, cílem je mít měkký materiál a snadno obrobitelný [59].

⁴ Extrudér je zařízení pro vytlačování roztaveného polymerního materiálu, který je nanášen na vodič.



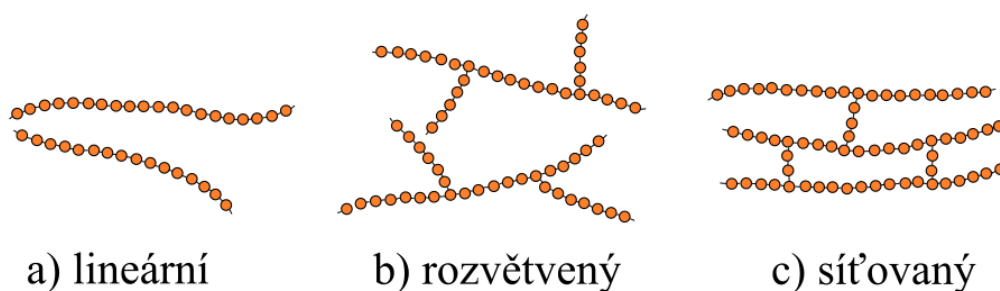
Obr. 2: Řez extrudérem: 1,2 - vytlačovací hlavy, 3 - drát, 4 - roztavený polymerní materiál (překresleno z [11]).



Obr. 3: Extruzní linka k izolování holých vodičů polymerními materiály vyráběný firmou Sampsistemi (převzato z [12]).

3 Polymerní materiály a elektroizolační systém kabelů

Mezi polymerní materiály jsou zařazeny polymery a následně také kompozity s polymerní maticí. Polymery představují rozsáhlou skupinu materiálů, jejichž vlastnosti se mohou i velmi výrazně lišit v případě odlišných typů polymerů. Polymery představují makromolekulární látky, které vznikají vzájemným spojením velkého počtu základních molekul (monomerů). Syntetické polymery vznikají třemi základními typy polyreakcí: polymerací, polyadící, polykondenzací. Podle složení makromolekuly můžeme polymery rozdělit na homopolymery a kopolymery. Homopolymery jsou tvořeny pouze jedním druhem monomeru, naopak u kopolymerů se vyskytuje více druhů monomerů. Makromolekuly se mohou lišit svým tvarem, který může záviset na způsobu výroby, proto u makromolekul rozlišujeme řetězce na hlavní a postranní. Podle výsledného tvaru makromolekuly dělíme polymery na lineární, rozvětvené a síťované [13] viz Obr. 4.



Obr. 4: Tvary makromolekul (překresleno z [14]).

Polymerem můžeme v širším kontextu nazvat i bílkoviny, polysacharidy a škrob. Tato práce se však věnuje pouze polymerům používaným v elektroizolačních systémech. Prioritně se vzhledem k ceně a způsobu výroby využívají syntetické polymery a v kabelových systémech se navíc používají standardně jen syntetické termoplasty.

Existuje mnoho hledisek podle, kterých můžeme polymery rozdělit např. podle původu (přírodní nebo syntetické), podle druhu polyreakce, podle chemického složení hlavního řetězce [13]. V případě této práce lze považovat za základní dělení na reaktoplasty, termoplasty a elastomery. Toto dělení se zakládá na chování při zvyšování a snižování teploty. Termoplasty při zvyšování teploty postupně přecházejí z pevného stavu do kapalného a mají teplotu tavení, přičemž tato změna je vratná. Naopak reaktoplasty se při zvyšující se teplotě vytvrzují až do okamžiku nevratné degradace.

3.1 Historie polymerních materiálů

Již roku 1493 se objevují první zmínky o využívání kaučuku v Jižní Americe kdy, pomocí něhož Indiáni vyráběli míče, plátna a obuv. Až kolem roku 1736 se přírodní kaučuk objevuje v Evropě. Kaučuk měl však tu nepříznivou vlastnost, že se během léta rozpouštěl, a naopak v zimě tvrdl a stával se křehkým. Tyto nedostatky vyřešili objevitelé vulkanizace Američan Charles Goodyear a Angličan Thomas Hancock. Do přelomu 19. a 20. století byl zaznamenán strmý nárůst poptávky po přírodním kaučuku získávaného ze stromů. Tento nedostatek podnítil vývoj výroby umělého kaučuku [8].

Syntetický (neboli umělý) kaučuk byl vynalezen r. 1860, kdy se podařilo destilací přírodního kaučuku izolovat látku izopren. Technologie výroby byla zdokonalena během první světové války v Německu, kde byl nedostatek přírodního kaučuku.

Z historického hlediska je dalším významným polymerem bakelit, který byl vynalezen belgickým vědcem a chemikem Leem Hendrikem Baekelandem. Bakelit vznikne při reakci fenolové pryskyřice a formaldehydu. Bakelit je prvním plně syntetickým plastem. Jako nehořlavý materiál se bakelit používal v izolátorech v elektrotechnice a v automobilovém průmyslu. V druhé polovině 20. let minulého století se bakelit hromadně rozšířil v podobě bakelitových krytů telefonů, rozhlasových přijímačů, vypínačů, zásuvek až k bakelitovým klikám od dveří a oken. Bakelit začal z trhu ustupovat až po 2. světové válce, kdy se objevily nové plastické hmoty, které mohly být tvarovány stříkáním [8].

Začátky používání syntetický polymerů v kabelových systémech se datují do 30. let 20. století, kdy v Německu byl vyvíjen kabel s izolací z PVC. Kolem roku 1942 se začíná ve velkém v průmyslu využívat polyethylen. V 50. letech dochází k uvedení kabelů s PVC izolací na obchodní trh [4]. Roku 1962 byl v USA představen ethylen-propylenový elastomer (EPR), jeho výroba ale začala až o rok později [15]. Postupné rozšíření a používání izolace se zvýšenou tepelnou ochranou, především XLPE se datuje do 70. let 20. století. Následující roky je výzkum zaměřen především na izolace, které odolávají vysokým teplotám, jsou oheň retardující, samozhášivé a nedýmavé [16].

3.2 Vybrané polymery a kopolymery pro výrobu izolačních vrstev kabelů

Z široké škály v současnosti vyráběných a používaných polymerů (viz literatura [17]) splňuje jen omezená skupina polymerů takové požadavky, aby bylo možné jejich použití v elektroizolačních systémech v silových kabelech. Dnes se v kabelovém průmyslu nejvíce uplatňují polyethyleny a PVC. Polyethylen je často využíván v síťované podobě.

Polyvinylchlorid (PVC) je stále jedním z nejznámějších a nejrozšířenějších polymerů pro kabelový průmysl. V Evropě se PVC používá na VN kabely od 10 do 20 kV [4]. Můžou za to především nízké náklady na jeho výrobu, dobré izolační vlastnosti, odolnost proti UV záření. PVC nevyžaduje síťování, je recyklovatelný [4], odolný proti oděru, samozhášivý (ovlivňuje obsah chlóru), odolný proti vodě a kyselinám [17]. V současnosti se PVC vyrábí suspenzní polymerací⁵. Po výrobě je PVC bílý prášek s nízkou tepelnou stabilitou oproti ostatním polymerům, proto je nutnost používat maziva, změkčovadla a stabilizátory. K izolaci vodičů se používá měkčený PVC (směs PVC se změkčovadly a stabilizátory) [17]. U silových kabelů je nejběžnější PVC černé barvy, která je dosažena přidáním organických černých pigmentů Carbon Blacks (CBs) [18]. Podrobnějšímu popisu barevných pigmentů se věnuje kapitola 3.3.

Polyethylen (PE) je tuhá, elastická téměř průhledná látka. Polyethylen se vyrábí polymerací ethylene (C_2H_4) a podle zvoleného způsobu polymerace se polyethylen vyrábí ve třech stavech, kde každý stav má rozdílnou hustotu a tvar řetězce, na kterých záleží jeho další vlastnosti. Polyethyleny se rozdělují primárně podle hustoty na LDPE (nízko hustotní), MDPE (středně hustotní) a HDPE (vysoko hustotní) [19]. PE je levný, snadno zpracovatelný, zdravotně nezávadný, ale jeho použitelnost je dosti omezena jeho nízkým bodem měknutí, sklonem k oxidaci a hořlavostí, kde je požár podporován odkapáváním dříve roztaveného polyethylenu [17]. V kabelové technice se PE nejčastěji používá k výrobě žilové izolace a pláště.

Síťovaný polyethylen (XLPE) je termoplastický materiál s velkou dielektrickou pevností, nízkými dielektrickými ztrátami a s lepší odolností proti stárnutí než nesíťovaný PE či PVC [20]. Síťování se provádí dvojím způsobem, a to buď chemickou cestou, nebo

⁵ Suspenzní polymerace je způsob výroby polymeru z monomeru, který je rozptýlený ve vodě [60].

vystavením polyethylenu specifickému záření (radiační síťování). Při chemickém síťování jsou ke směsi polyethylenu přidána síťovací činidla, kterými jsou nejčastěji silany nebo peroxidy. U síťování prováděného ozářováním není potřeba k polyethylenu přidávat další chemické látky. Polyethylen se vystaví ionizujícímu záření a musí být pevně definována doba i intenzita osvětlení. Při nedodržení těchto parametrů může dojít k nežádoucí degradaci materiálu [21]. XLPE se stal z historického hlediska náhradou za impregnovaný papír např. i proto, že i při velké tloušťce je relativně lehký [4].

Mezi další využívané materiály patří syntetické kaučuky získávané polymerací nebo kopolymerací uhlovodíků. Základní informace týkající se vybraných syntetických kaučuků jsou uvedeny v následujících odstavcích.

Butadien-styrenový kaučuk (SBR) je vyráběn kopolymerací styrenu a butadienu. Používá se na izolaci vodičů na napěťové hladině do 1 kV [22]. SBR se stal plnohodnotnou náhradou za přírodní kaučuk [16].

Chloroprenový kaučuk (CR) častěji uváděno jako neopren, byl první komerčně dostupný syntetický kaučuk. Zřídka je používán jako samostatná izolace, ale používá se ve směsi s přírodním kaučukem. CR je houževnatý materiál, který se vyznačuje pozvolným stárnutím a výbornou odolností proti vodě, olejům a rozpouštědlům [16]. CR sám o sobě zabraňuje šíření plamene během hoření, ale vytváří při něm dým obsahující chlorovodík, a proto je od něj v dnešní době upouštěno a je nahrazován jinými materiály [22].

Kopolymer vinyl-acetát (EVA) je jeden z řady materiálů, které se vyrábějí z PE pomocí radikálové polymerace. EVA je průsvitný až téměř průhledný materiál mající vysokou pevnost. Vlastnosti EVA významně závisí na obsahu vinylacetátové složky. Pro kabelový průmysl se obsah vinylacetátové složky musí pohybovat mezi 40 až 70% [17]. Mezi hlavní výrobce EVA patří DuPont a Exxon.

Ethylen-propylenové elastomery (EPR) jsou kopolymery polyethylenu a polypropylenu. Poměr mezi ethylenem a propylenem se může pohybovat v širokém rozmezí, pro komerční účely kabelového průmyslu se podíl ethylenu pohybuje mezi 50 až 80 %. Čistý EPR má sice dobré elektrické vlastnosti, ale jeho použití v praxi vyžaduje přidání aditiv (modifikaci), které zlepšují jeho fyzikální a mechanické vlastnosti.

Přidáním třetího monomeru k EPR a jejich následnou polymerací vzniká ethylen-propylen-dienový monomer (EPDM) [4]. Vulkanizaci EPM, EPDM je nutné uskutečnit pomocí peroxidů nebo síry, což je technologicky i finančně náročný úkol. Tuto nevýhodu ale zastíňuje jejich vynikající odolnost proti kyselinám a alkoholům. EPM a EPDM se v kabelovém průmyslu používají na výrobu pryží odolných proti povětrnostním vlivům [17]. Kaučuky EPR jsou v současnosti nejlepší volbou pro výrobu NN i VN izolací, pláštěů a výplňových směsí v kabelovém průmyslu [22].

3.3 Modifikace vybraných polymerů

Modifikací rozumíme záměrnou změnu fyzikálních nebo chemických vlastností polymerů, které závisí na jeho aplikaci, od které se odvíjejí jeho vyžadované parametry. Modifikace rozlišujeme na fyzikální, mechanochemickou a chemickou [8].

Při fyzikální modifikaci dochází ke smíšení dvou nebo více polymerů a k získání směsi pro další zpracování. Jedná se o nejsnazší způsob modifikace. Mechanochemická modifikace je založena na principu využití mechanické práce (např. hnětení) a za podmínek přítomnosti látek usnadňující destrukci makromolekulárních řetězců vznikají reaktivní úseky. Rozbité úseky polymeru se navzájem propojí nebo zreagují s přítomným monomerem. Chemická modifikace je záměrná změna chemické struktury [8].

V současnosti jsou na materiály kladené takové požadavky, které často neumožňují použití čistých polymerů, ale je potřeba využít polymery s určitou modifikací. U žilové izolace VN a VVN kabelů je však pořád z hlediska dielektrických ztrát nejvýhodnější čistý PE. Přidáním standardních plniva nám obecně rostou dielektrické ztráty, a proto se v každé aplikaci hledá kompromis zajišťující požadované vlastnosti (např. dostatečnou elektrickou pevnost, retardaci hoření a mechanickou odolnost). Takto upravené polymerní směsi mohou být nazývány kompozity, kterým je věnována kapitola 3.4. Existuje celá řada aditiv, které po přidání do polymerní směsi více či méně ovlivní konečné vlastnosti polymeru, některé informace o nich jsou shrnuty v následujících odstavcích.

Aditiva dělíme podle literatury [23] na látky chránící materiál před degradací při zpracování, prodlužující nebo umožňující jejich použití, modifikující polymerní strukturu řetězce a na aditiva upravující povrch. Mezi zástupce aditiv chránící materiál při zpracování patří antioxidanty, plastifikátory, tepelné stabilizátory, maziva. Druhou skupinu aditiv jsou

látky, které zvětšují dobu použitelnosti nebo umožňují použití těchto kompozitů v jejich koncových aplikacích. Do druhé skupiny patří světelné stabilizátory, antioxidanty a retardéry hoření.

Polymerní materiály, jako všechny organické materiály, jsou náchylné k oxidaci, která způsobuje nevratné změny ve struktuře materiálu, která může vést ke zhoršení materiálových vlastností, k prasklinám nebo k rozpadu materiálu [23]. Antioxidanty⁶ jsou chemické sloučeniny, které ochraňují polymer před oxidací, kdy tyto látky zabraňují řetězovému průběhu oxidace. Antioxidanty je možné rozdělit do dvou skupin. V první skupině jsou látky, které zabraňují vzniku oxidačních reakcí, v druhé skupině jsou látky přerušující řetězovou reakci [8].

Mezi další zástupce skupiny aditiv používaných při zpracování polymerních materiálů patří: maziva, plastifikátory, změkčovadla. Plastifikátory jsou látky zlepšující flexibilitu, roztažnost a zpracovatelnost polymeru [18]. Maziva nám nejenom usnadňují zpracování, ale také mohou zlepšovat jiné vlastnosti polymeru. Dělíme je na maziva s vnějším a vnitřním účinkem. Maziva s vnějším účinkem jsou málo rozpustné v polymerní směsi, a to má za následek, že vystoupí na povrch a zde utvoří tenkou vrstvu. Maziva s vnitřním účinkem snižují celkovou viskozitu směsi a tím usnadňují zpracování [24]. Změkčovadla jsou organické látky zlepšující ohebnost, tvárnost, ale na úkor jiných vlastností [8].

Tepelné stabilizátory mají svoje uplatnění především při výrobě polymeru, ale využívají se i při běžném používání polymeru. Nejvíce se tyto stabilizátory používají při zpracování PVC, protože jeho struktura je velmi citlivá na teplo. Dříve se jako tepelné stabilizátory používalo olovo, ale jeho jedovatost vedla k používání odlišným materiálů a při tom k dosažení stejného účinku [23]. Tepelné stabilizátory rozlišujeme na tři skupiny: metalické soli, organometalické sloučeniny a na nemetalické organické stabilizátory [18]. Světelné stabilizátory mají za úkol především absorbovat UV záření [8]. Světelné stabilizátory se nejvíce používají u PE. Na příklad využití poukazuje experiment, kde vhodnou volbou množství stabilizátoru (derivátu hydroxybenzofenolu) zvýší PE svojí životnost z 1 roku až na 10 let [17].

⁶ V literatuře [8] jsou antioxidanty označovány jako antidegradanty.

Pigmenty jsou barevné nerozpustné prášky zajišťující barevný odstín polymeru. Podle literatury [18] pigmenty dělíme na organické a anorganické. Organické pigmenty se používají pro matné barvy a musejí být smíchány s pryskyřicí [18]. Anorganické pigmenty jsou na bázi kovů např. oxidy a sulfidy Ti (titan), Zn (zinek), Fe (železo), Cd (kadmium) a Cr (chrom). Anorganické pigmenty dále dělíme podle odstínu na bílé, černé a barevné pigmenty. Bílé pigmenty jsou na bázi TiO₂ (oxid titaničitý) [18]. Černé barvy je dosaženo přidáním anorganických pigmentů zvaných CBs. Tab. 1 uvádí komerčně dostupná barviva a jejich použití. Podrobnější informace ohledně používaných pigmentů vyráběných firmou BASF naleznete v literatuře [25]. V současnosti se lze setkat i se speciálními pigmenty, které zajišťují např. perleťový, fluorescenční nebo metalický odstín barvy [18].

Tab. 1: Přehled komerčně dostupných pigmentů (přepřacováno z [18, 25]).

	Chemické složení	Komerční název	Barva	Aplikace
Anorganické pigmenty	Oxidy železa	Eupolen PE Brown	Hnědá	PP, PE
	CBs	Black Masterbatch 045	Černá	PE, LDPE
		JE-BLACK JE2100	Černá	PVC
		QualiBlack M13	Černá	HDPE, LDPE
	Oxid titaničitý	Polywhite 8000	Bílá	PE, PP
		Tronox R-FK-2	Bílá	PVC
Organické pigmenty	Benzimidazolone	Microlen Yellow 1410 MCN	Žlutá	PP, PE
	Mono Azo	Sinfast Yellow	Žlutá	PS, PVC

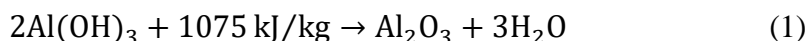
Dalšími přísadami ovlivňujícími fyzikální vlastnosti jsou plniva, která se významnou mírou podílejí na výsledných vlastnostech polymeru či konečného výrobku. Podle literatury [26] je definice plniv: „*Plnivem nazýváme pevný modifikátor, který se liší svojí strukturou a složením od polymeru a je záměrně přidán k polymeru za účelem zvýšit hmotnost nebo vylepšit jeho vlastnosti.*“ Právě jejich kvalitou a kvantitou lze upravovat fyzikální vlastnosti v širokém rozmezí (mechanické, elektrické a optické vlastnosti, zdravotní nezávadnost atd.). Mezi plniva patří i níže popisované retardéry hoření.

Pro zvýšení bezpečnosti proti ohni se stále častěji uplatňují prostředky snižující hořlavost (neboli retardéry hoření). Retardéry hoření nepřemění polymer v nehořlavý materiál, ale zvýší jeho odolnost proti vznícení, a pokud ke vznícení dojde, zpomalí hoření nebo redukují množství uvolněné energie. Podle literatury [27] je možné retardéry hoření rozdělit do čtyř skupin. Malou skupinou jsou anorganické retardéry hoření, mezi které ale

patří hydroxid hlinitý (ATH) nebo také hydroxid hořečnatý (MDH), které se po vystavení ohni rozloží na oxid uhličitý a uvolní vodní páru. Dalšími skupinami jsou fosforové retardéry, organické retardéry (dusík obsahující retardéry hoření) a retardéry hoření založené na halogenech. Podrobnější popis těchto retardérů uvádí zdroje [18, 23, 27].

Podle způsobu účinkování retardéru je možné rozlišovat procesy fyzikálního a chemického charakteru. Mezi fyzikální procesy je zahrnuto chlazení, vytvoření ochranné vrstvy [28]. Při použití principu chlazení, dochází při hoření materiálu k endotermickému procesu⁷, při kterém se chladí spodní vrstvu materiálu až na teplotu nižší, než je teplota spalování. Materiály využívajícími tento způsob retardace hoření jsou ATH a MDH. Vytvoření ochranné vrstvy je založeno na principu uvolňování látek, které vytvoří vrstvu kolem plamene a zabrání přísunu kyslíku k ohnisku plamene [27]. V případě přidání retardéru s chemickým účinkem dochází k reakcím v plynné nebo pevné fázi. Reakce v plynné fázi funguje na principu zachytávání volných radikálů, které vedou k zastavení exotermické reakce. Při využívání reakce v pevné fázi je na povrchu polymeru uhlíková vrstva [27].

Rovnice rozpadu ATH a MDH jsou zpracovány podle [29]:



3.4 Polymerní kompozity pro výrobu elektroizolačních vrstev kabelů

Obecná definice kompozitního materiálu podle literatury [30] zní: „*Kompozitní materiál je kombinací materiálů s rozdílným složením nebo tvarem v makroměřítku. Složky si zachovávají svoji identitu (tzn. jednotlivé složky se úplně nerozpustí nebo nesloučí v jeden celek). Komponenty musí být fyzicky rozpoznány a jsou vzájemně odděleny rozhraním.*“ Tato práce se věnuje pouze polymerním kompozitům, které lze využít v elektroizolačních systémech kabelů. Uvažované polymerní kompozity obsahují termoplastickou matici. V matici se vyrábí z polymerů jako jsou PE, PS, ABS (akrylonitrilový-butadien-styren),

⁷ Jedná se o proces, při kterém je spotřebováno teplo (odebíráno z okolního prostředí).

PVC, PP (polypropylen) a další [31]. Výčet výhod a nevýhod polymerních kompozitů je uveden v literatuře [31].

Kompozitní materiály našly svoje uplatnění především ve výplňové směsi a plášti kabelu. V současnosti se často používají pro výrobu izolačních vrstev materiály s označením HFFR, což jsou materiály s bezhalogenovými retardéry hoření. Bezhalogenové retardéry hoření jsou používány vzhledem ke snaze snižovat zdravotní závadnost samotných materiálů a následně i degradačních produktů uvolňovaných při požáru. Výrobci těchto polymerních směsí (např. firmy Kisuma a Arkema) se shodují na složení HFFR z materiálů EVA, PE a minerálního retardéru hoření (ATH, MDH) [32, 33]. Komerčně dostupné HFFR materiály jsou např. Amodel HFFR (Solway Inv. Group); Pexidan HF, Thermodan HF (SACO AEI Polymers); EcoForte HF (EcoForte), Flame-X (TF Kable); Optim (Pluss Polymers Ltd.) a další.

Současný vývoj v oblasti elektroizolačních kompozitních materiálů se soustředí z velké části na volbu vhodných plniv. Při začleňování plniv s rozměry částic v řádu nanometrů vznikají tzv. nanokompozity. Nejčastěji užívanými polymery jsou matrice na bázi epoxidů nebo polyolefinů⁸. Větší pozornost je však věnována nanoplňivům, kterými bývají vrstvené silikáty (jíly) nebo anorganické oxidy (SiO_2 , Al_2O_3). Velmi důležité je také dostatečná dispergace částic v matrici a celková homogenita materiálu [34].

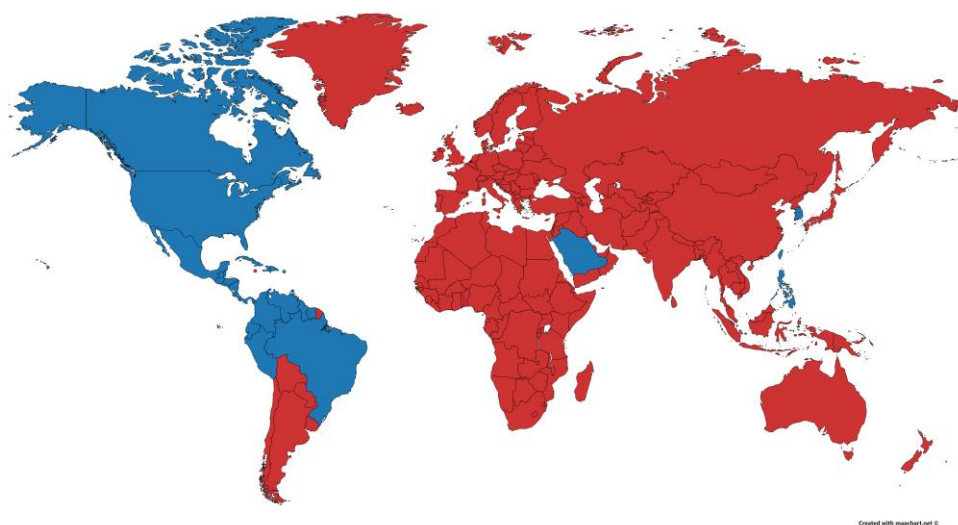
Využívání jílu, jako plniv v polymerní matrici, umožňuje dosažení zajímavých fyzikálních vlastností. Výzkum optimálního využívání jílu je stále spíše na začátku a jsou hledána stále nová řešení pro zlepšení mechanických a dalších funkčních parametrů [35]. EPDM je kompatibilní s velkým množstvím minerálních plniv (jílu) ve své struktuře bez ztráty užitečných vlastností, ale nejvíce se změna projevuje v jeho flexibilitě. V případě potřeby zlepšení elektrických vlastností se využívá přidání speciálních jílu (různé druhy kaolínu). Tyto jíly snižují riziko vzniku požáru a můžou být doplněny i o další retardér hoření, např. melamin, ATH, MDH apod. [36]

⁸ Polyolefiny jsou vyráběny polymerací olefinů, tj. uhlovodíků, které obsahují jednu dvojnou vazbu, např. HDPE, LLDPE (lineární nízkohustotní polyethylen), PP, EPDM.

4 Silové kabely

Silové kabely se používají k rozvodu elektrické energie většinou o frekvencích 50/60 Hz. V České republice se standardně uplatňuje frekvence 50 Hz, což vyplývá z normy ČSN EN 50160 ed.2. Rozlišují se dva typy rozvodných sítí, a to přenosová a distribuční soustava. Přenosová soustava je v České republice provozována na napěťových hladinách 400 a 220 kV a slouží k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti [37]. Distribuční soustavy slouží k rozvodu elektrické energie ke koncovému odběrateli. V České republice se podle poskytovatelů provozují napěťové hladiny 110, 35, 22, 10, 6, 3 a 0,4 kV. Největšími poskytovateli elektrické energie (porovnáváno podle územního rozdělení) v České republice jsou ČEZ Distribuce a.s., E.ON Distribuce a.s., PREdistribuce a.s. Přenosové soustavy jsou vlastněny a spravovány firmou ČEPS a.s., distribuční sítě jsou vlastněny a spravovány již dříve zmíněnými společnostmi (ČEZ, E.ON atd.) [38].

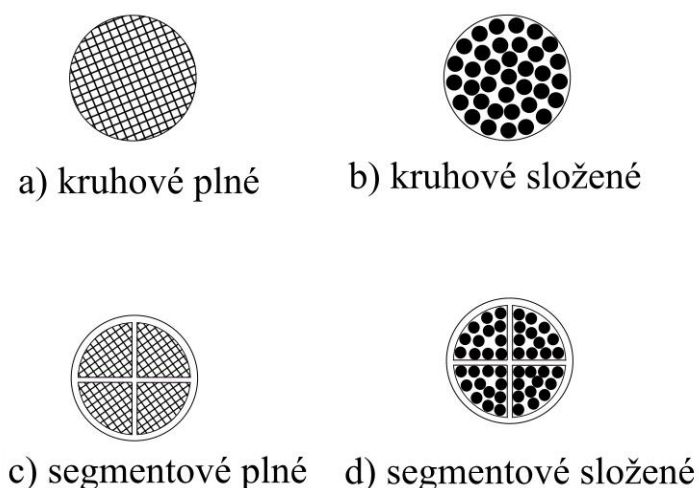
Pro doplnění informací o rozvodných sítích v ostatních státech je níže uveden Obr. 5 znázorňující rozdělení sítí dle frekvence. Tento rozdíl frekvencí ovlivňuje celkovou provázanost elektrizačních sítí mezi jednotlivými státy. Aby se zajistila celková provázanost sítě mezi státy používajícími odlišně frekvence, je zapotřebí, aby byly propojeny pomocí stejnosměrného vedení [39]. Přenášený výkon se pohybuje v řádu jednotek až tisíců kW. Podle zvoleného uložení dělíme silové kabely na uložené v zemi, vedená vzduchem nebo uložená v budovách (např. pod omítkou).



Obr. 5: Rozdělení zemí podle používaných frekvencí: 50 Hz – červená, 60 Hz - modrá (převzato z [40]).

4.1 Konstrukce silových kabelů

V kapitole 2.2 bylo uvedeno, z jakých jednotlivých částí se skládá kabel. Silový kabel se skládá z jádra, které může být konstruováno jako plné nebo složené. Tato volba záleží především na koncovém uložení kabelu, které může být pevné nebo pohyblivé. Nejčastěji se uplatňují kruhové nebo segmentové typy jader viz Obr. 6. V kabelu se může nacházet jeden nebo více od sebe izolovaných vodičů k vytvoření silového kabelu. K izolaci jádra se nejčastěji používá PVC, PE, XLPE. U některých kabelů je možné se setkat s výplňovou izolací mezi jednotlivými žilami a vnějším pláštěm, stíněním nebo také s polovodivými vrstvami. Vnější plášť tvoří první ochranu kabelu proti působení nežádoucích vlivů okolního prostředí. Podrobné informace o konkrétních kabelech lze získat z katalogových listů od výrobce. Pro VN kabely používané v distribuční síti se uplatňuje podniková norma PNE 347625, která obsahuje přehledné informace o jednotlivých komponentech kabelu.



Obr. 6: Tvary a druhy jader silových kabelů (překresleno z [41]).

4.2 Výrobci a značení silových kabelů

Jedním z významných producentů silových kabelů v České republice je Kabelovna Kabex a.s., která poskytla vzorky silových kabelů k testování. Mezi další producenty silových kabelů patří NKT cables, Nexans, Prakab, Top Cable, CICM a další.

Celkové značení kabelu se může mírně lišit podle výrobce a podle trhu určení. Barevné značení žil pro český trh se řídí normou ČSN 33 0166 ed.2. Kódové značení kabelu, které lze nalézt na jeho plášti, se řídí normou ČSN 34 7409. Z této normy vychází značení

např. společností Kabelovna Kabex, a.s. a NKT cables. Názorný příklad kódového označení zpracovaný podle literatury [42] je uvedený v následujícím odstavci.

1-CXKE-R/ZE/ Na prvním místě se uvádí jmenovité napětí, pro které je kabel dimenzován (1- znamená napětí 0,6/1 kV). Druhá pozice určuje materiál a provedení jádra (C – měď), další pozice značí typ izolace jádra (X – síťovaný polyethylen, Y – PVC). Písmenné označení na čtvrté pozici znamená celkové provedení kabelu, zda je kabel stíněný a případně jakým způsobem je stínění provedeno. Pátá pozice určuje materiál pláště, zde se často uplatňují stejné zkratky pro materiál jako v případě izolace jádra (E – oheň nešířící bezhalogenová směs). Následující písmeno určuje požární odolnost (R – oheň nešířící, V – ohniodolný). Poslední písmenné označení představuje dodatkové označení kabelu, jako může být samostatné stínění /st/, armování /AR/, přídavná bariéra proti vniku kapalin /WB/ nebo v příkladu uvedený lehký pancíř /ZE/.

V rámci problematiky zvyšování odolnosti materiálů vůči hoření se vyskytuje mnoho odlišných názvů (označení) a odpovídajících zkratek, podle kterých lze konkrétní kabel lépe charakterizovat. Význam vybraných zkratek je zpracován v Tab. 2.

Tab. 2: Zkratky používané u silových kabelů (přepřacováno z [43]).

Zkratka	Doslovné znění	Český význam
HFFR	Halogen free flame retardant	bezhalogenový, plamen nešířící
LSHF	Low smoke halogen free	bezhalogenový, nedýmivý
LSZH	Low smoke zero halogen	bezhalogenový, nedýmivý
FRNC	Flame retardant non corrosive	plamen nešířící, neprodukuje korozivní prvky

U požárně bezpečných kabelů, je důležité si vymezit pojmy, které s touto problematikou souvisejí. Pojmy související s požárně bezpečnými kabely jsou definovány na základě literatury [42–44].

Oheň nešířící kabel je nehořlavý a samozhášivý⁹. Použité izolační materiály obsahují značné množství retardérů hoření. Kabely splňují normy EN 50266.

Bezhalogenový kabel je takový kabel, který je vyrobený pouze z bezhalogenových materiálů, při hoření nevznikají toxické plyny.

⁹ Samozhášlivost kabelu je popisována normou ČSN EN 60332-1 [61].

Ohniodolný kabel zachovává izolační integritu během působení ohně. Kabel je doplněn o minerální izolaci, která zaručuje izolační schopnost mezi žilami kabelu. Výrobky takto označené splňují normu IEC 60331.

Kabel s nízkým vývinem kouře při hoření (nedýmavý) obsahuje látky, které potlačují vývin kouře při hoření kabelu. Na tyto výrobky se vztahuje norma IEC 61034-2.

Kabel s funkčností zaručuje funkčnost elektrického okruhu po dobu 180 minut v případě vzniku požáru. Zkušební norma je ČSN IEC 60331 [43].

4.3 Zlepšení elektroizolačních systémů

K dosažení lepších požadovaných vlastností vždy vede více cest, ale při použití jakékoliv cesty obecně dochází zároveň ke zhoršení některých dalších materiálových vlastností. Proto je právě při volbě způsobu zlepšení elektroizolačního systému důležité si určit, které materiálové parametry jsou pro výslednou aplikaci nejdůležitější, a které jsou až druhořadé. Existuje celá řada způsobů, mezi které se řadí např. začlenění další izolační vrstvy, zesílení stávající izolace apod. Dosažení zvýšení požární bezpečnosti, může být realizováno např. použitím jiného retardéru hoření, zvýšením podílu retardéru hoření v materiálu nebo použitím vhodných plniv i v žilové izolaci kabelu.

Existuje celá řada studií zabývajících se zlepšením elektroizolačních vlastností, ale některé teoretické předpoklady jsou v praxi téměř nepoužitelné, protože se vždy jedná jen o odhad, jak bude daný materiál reagovat. Proto přicházejí na řadu experimenty, které jsou mnohdy více vypovídající o chování daného materiálu při běžných podmínkách.

Jedna z vybraných studií o možném přístupu ke zlepšení požární bezpečnosti pojednává o zvýšení podílu plniva ATH v LLDPE. Autoři dospěli k závěru, že zvýšení podílu ATH výrazně vylepšuje (zvyšuje) LOI (limitní kyslíkové číslo)¹⁰, ale negativně se projevuje především na pevnosti v tahu materiálu, která se zhoršuje výrazně, dokud koncentrace ATH nedosáhne 40 phr¹¹. Při minimálním obsahu ATH je pevnost v tahu kolem 24 MPa, naopak

¹⁰ LOI – minimální koncentrace kyslíku ve směsi s dusíkem, při které materiál ještě hoří.

¹¹ phr – podíl plniva na sto dílů polyethylenu.

při koncentraci 40 phr se dostáváme na hodnotu kolem 16 MPa, což je zhoršení o 30 %. K vykompenzování těchto negativní vlivů se zkoušely silikonové oleje nebo silany [45].

Další studie se zaměřuje na kombinaci ATH s APP (polyfosfát amonný) a jejich vliv na EVA během hoření. Závěrem této studie je, že nejlepší poměr ATH s APP je 1:1, kdy je LOI rovno 29,7 %, což je považováno za hodnotu pro nehořlavý materiál. Detailní informace k uvedenému zjištění včetně výsledků i pro další poměry ATH/APP uvádí literatura [46].

V době využívání čistých polymerů především PE, se variantou stal i chlorovaný PE, který byl na výrobu levnější než klasický PE a měl podobné elektroizolační a mechanické vlastnosti. Obsah chloru se pohyboval v rozmezí od 25 % do 42 %. Dnes se od jeho využití upouští, protože během hoření se uvolňovala kyselina chlorovodíková a oxid uhličitý, které jsou vysoce toxické [47].

Dalším způsobem zvýšení odolnosti izolačních vrstev kabelu vůči ohni je použití keramizujících (ceramifiable) polymerů na bázi silikonového kaučuku. Jedná se o pasivní retardéry hoření, které při působení ohně vytvoří souvislou vrstvu na kompozitu žilové izolace zabraňující přísunu látek podporujících hoření, hlavně kyslíku, do ohniska požáru. Hlavní výhodou tohoto způsobu je minimální výskyt toxických produktů během požáru. V současné době jsou nejslibnějšími materiály EVA a SBR [48].

4.4 Obecná charakterizace vybraných kabelových izolací

Přehled základních dielektrických parametrů používaných polymerních materiálů je uveden v Tab. 3, kde ϵ_r – relativní permitivita, $\text{tg } \delta$ – ztrátový činitel, ρ_v a ρ_s – vnitřní a povrchová rezistivita, E_p – elektrická pevnost. Podrobnější informace o používaných kabelech s PVC nebo XLPE izolací a s PVC/PE pláštěm uvádí podnikové normy PNE 34-7659-3 a PNE 34-7659-5.

Tab. 3: Dielektrických parametrů vybraných polymerních materiálů (přepřacováno z [13]).

	ϵ_r (-)	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$ (-)	ρ_v ($\Omega \cdot \text{m}$)	ρ_s (Ω)	E_p (kV/mm)
PP	2	<4	$>10^{15}$	10^{13}	40–60
PVC	4	150–170	10^{13}	10^{13}	35–50
PE lineární	2	2	$>10^{15}$	10^{14}	42
PE rozvětvený	2	2	$>10^{15}$	10^{14}	380

Každý výrobce kabelů, případně dodavatel surovin pro výrobu izolačních materiálů, si pečlivě hlídá a téměř nikomu neposkytuje informace a konkrétním složení jejich polymerních směsí na výrobu izolace/pláště kabelu. V Tab. 4 je zpracován přehled závislosti vybraných dielektrické vlastností na koncentraci vinylacetátové (VA) složky v kopolymeru EVA. Nelze říci, že označení EVA zaručuje stejné vlastnosti, protože záleží na konkrétním složení, přípravě atd. Stejně se mohou lišit i parametry PE – pro LDPE, HDPE, LLDPE atd.

Tab. 4: Vliv koncentrace VA v kopolymeru EVA (převzato z [49]).

Dielektrické parametry	Obsah VA v kopolymeru EVA		
	7,5 %	18 %	28 %
$\operatorname{tg} \delta$ (-) pro 50 Hz	0,0016	0,0012	0,0008
$\operatorname{tg} \delta$ (-) pro 10^6 Hz	0,014	0,035	0,043
ε' (-) pro 10^6 Hz	2,46	2,7	2,95
ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$2 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{12}$
E_p (kV/mm)	20	20	20

4.5 Diagnostika v kabelovém průmyslu

Diagnostické metody se uplatňují v průběhu celého procesu výroby kabelu s důrazem na charakterizaci jeho izolačního systému. Již na začátku výroby je potřebné vědět s jakými parametry používaných materiálů je možné počítat a jak je možné je v průběhu výroby ovlivňovat pro dosažení požadovaných parametrů hotového kabelu. V rámci diagnostiky je možné obecně zvolit dva odlišné přístupy – fenomenologický nebo strukturální [50]. Fenomenologický přístup pohlíží na objekt jako na celek a zjišťují se vztahy mezi vstupem a výstupem. Naopak strukturální přístup klade důraz na změny ve struktuře objektu, avšak popisuje objekt z vnitřního hlediska. Oba tyto přístupy mají svoje výhody i nevýhody. Strukturální přístup vyžaduje speciální měřicí přístroje a školenou obsluhu a je tak cenově nákladný. Jeho výsledky však mají velkou vypovídací hodnotu a rozptyl naměřených hodnot bývá menší. Strukturální přístup je cenově méně nákladný, protože často nevyžaduje speciální aparatury, nevyžaduje proškolenou obsluhu, ale rozptyl hodnot u některých metod může být větší [51].

Neustále se zvyšující požadavky na elektrická zařízení, především na jejich velikost a všestranné využití, představují pro technology a projektanty nutnost stále získávat nové znalosti o moderních materiálech a jejich vlastnostech, nejen při standartních podmínkách. Při volbě diagnostických metod musí být brán zřetel i na jejich objektivitu,

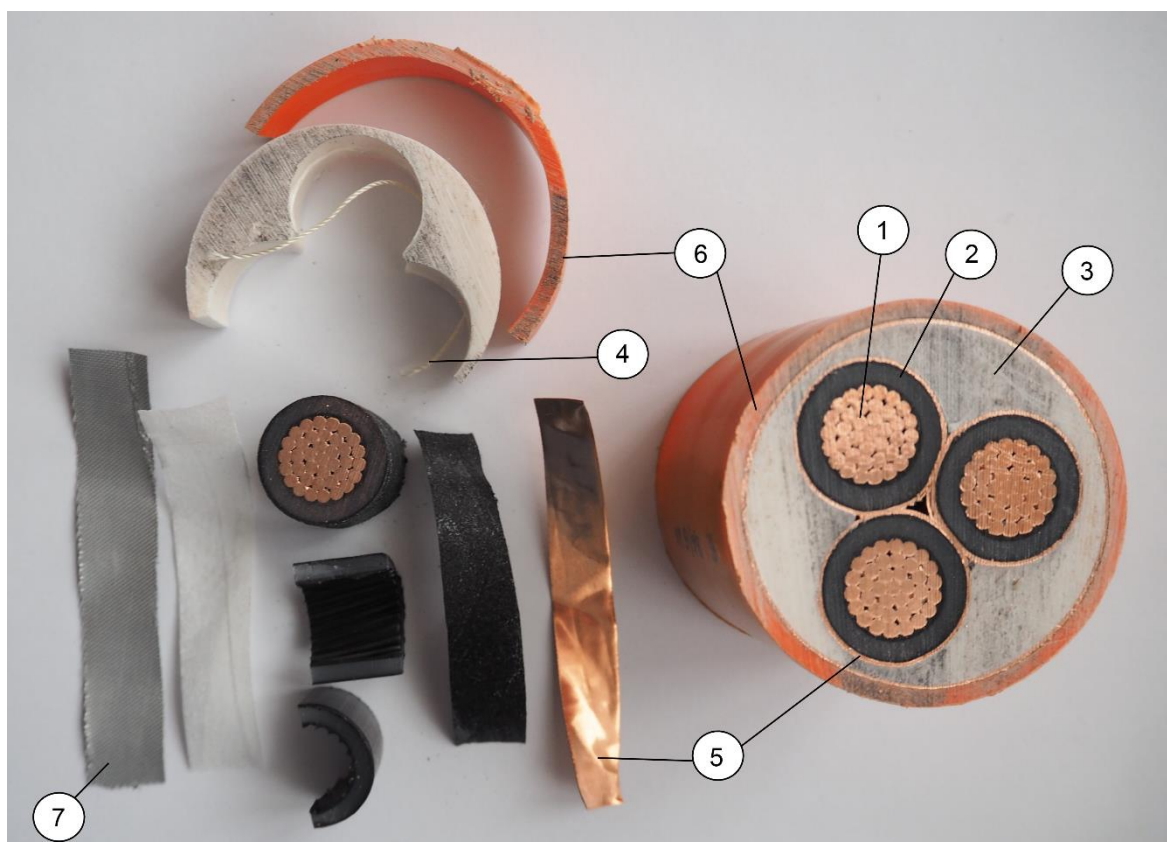
tzn. diagnostikovat materiál více metodami a zvolit takové metody, které poskytují úplné, nezkreslené a všestranné informace o chování materiálu. Jedním z hlavních hledisek při výběru diagnostických metod jsou samozřejmě i náklady na provedení diagnostik, možnost realizace a jejich důležitost [51].

Existuje celá řada diagnostických metod pro hodnocení izolačních materiálů, které se používají pro zjištění základních vlastností až po speciální metody, které se většinou specializují na stanovení konkrétního materiálového parametru. Mezi metody pro zjištění základních vlastností/parametrů patří: měření elektrické pevnosti, rezistivity, určení ztrátového činitele a permitivity [51]. U silových kabelů je důležité i měření částečných výbojů, které mohou mít vliv hlavně na žilovou izolaci.

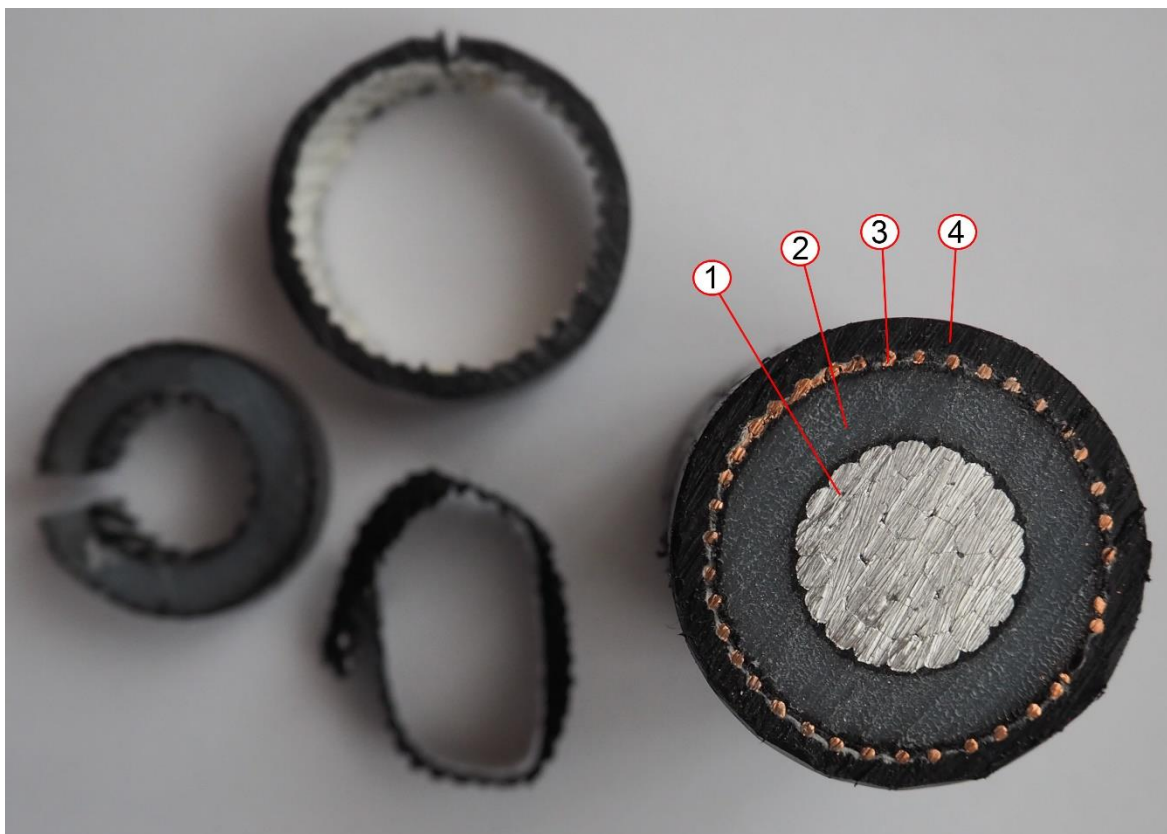
5 Praktická část

V rámci praktické části byly k měření vybrány dva kabely s odlišnou konstrukcí a tvořené odlišnými materiály. První kabel (dále kabel č. 1) začleňuje HFFR plášť a druhý kabel (dále kabel č. 2) je opatřen PVC pláštěm. Podrobnější popis jednotlivých složek kabelů uvádí Obr. 7 a Obr. 8. Podle literatury [52] bylo zjištěno, že se v kabelu č. 2 nachází textilní FR páska z jedné strany obsahující bezhalogenový retardér hoření, která je nedýmavá. Podle zmíněné literatury lze určit i materiál pláště, kterým je směs LLDPE/EVA s retardérem hoření ATH.

Z diagnostických metod byly vybrány širokopásmová dielektrická spektroskopie (BDS) a simultánní termická analýza (STA). Metoda BDS je důležitá pro zjištění relativní permitivity, která je důležitým dielektrickým parametrem. STA je termická analýza umožňující předpovědět chování materiálu při zvyšující teplotě (simulace stavu před i při požáru) v laboratorních podmínkách. Tyto metody byly zvoleny kvůli důležitosti dielektrických vlastností a odolnosti izolačních materiálů při vzniku požáru.



Obr. 7: Vzorek kabelu č. 1: 1 – Cu složené jádro, 2 – XLPE izolace, 3 – HFFR výplňová směs, 4 – fixační provázek, 5 – stínění z Cu fólie, 6 – HFFR plášť, 7 – FR páska.



Obr. 8: Vzorek kabelu č. 2: 1 – Al složené jádro, 2 – XLPE izolace, 3 – stínění z Cu drátků, 4 – PVC plášť.

5.1 Širokopásmová dielektrická spektroskopie (BDS)

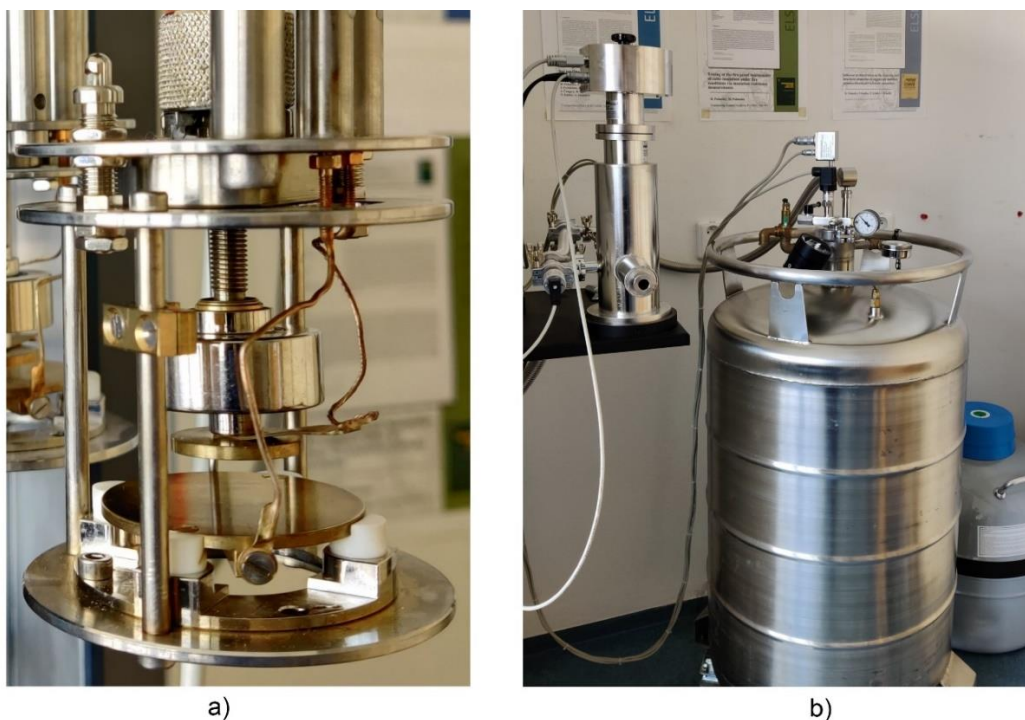
BDS je komplexní diagnostická metoda umožňující komplexní analýzu dielektrika, přičemž za důležitý zjišťovaný parametr je považována relativní permitivita. Základem metody je dielektrická spektroskopie (DS), která slouží obecně k měření vybraných dielektrických parametrů v závislosti na frekvenci. Vybrané dielektrické parametry jsou např. relativní permitivita ϵ' a měrná elektrická vodivost γ . DS pracuje primárně s proudem a napětí (resp. amplitudou a fázovým posunem). Pracovní oblast ve frekvenčním pásmu je pro DS velmi rozsáhlá, protože začíná v řádu μHz a končí v řádu THz [53].

BDS je komplexní vyhodnocovací technika pro detailní vyšetřování chování polymerních materiálů a odvozených kompozitů (včetně nanokompozitů) ve střídavém elektrickém poli. Frekvenční rozsah je od 10^{-6} Hz do 10^{12} Hz, což jí zvyhodňuje oproti ostatním metodám pro určování dynamického chování materiálů v elektrickém poli. Jednou z největších výhod je možnost provádět měření pod vlivem různých teplot, tlaků a okolních stavů působících na měřený vzorek [53]. V rozsahu frekvencí od 10^{-6} Hz do 10^7 Hz, do které

spadá i náš případ, se využívá metody deskového kondenzátoru, kdy je zkoumaný vzorek vložen mezi plošné elektrody a lze pro něj stanovit jeho kapacitu podle vztahu (3). V uvedeném vztahu je zavedena komplexní permitivita ε^* , kde ε' a ε'' jsou reálná a imaginární složka permitivity, C_0 je kapacita při vyplnění prostoru vakuem, C^* je komplexní kapacita měřeného vzorku závislá na frekvenci. Reálnou složku komplexní permitivity lze považovat za míru kapacity měřeného vzorku a imaginární část za míru dielektrických ztrát způsobených střídavým elektrickým polem [54].

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \frac{C^*(\omega)}{C_0} \quad (3)$$

K měření poskytnutých vzorků byl využit přístroj od německé společnosti Novocontrol Technologies. Použitý elektrodový systém je dvouelektrodový (typ ZGS Alpha Active Sample Cell) viz Obr. 9. Použitý elektrodový systém je výhodný pro měření dielektrických vlastností pevných materiálů. K získání teplotních závislostí zjišťovaných parametrů bylo využito doplňkové zařízení k BDS, kterým je tzv. kryostat zajišťující řízenou změnu nebo udržování teploty během průběhu měření (Quatro CryoSystem). Veškeré technické specifikace jednotlivých komponentů přístroje jsou dostupné na webu výrobce [55].



Obr. 9: Měřicí aparatura k širokospektrální analýze: a) detail elektrodové systému bez vzorku, b) elektrodový systém zasunut v kryostatu.

5.1.1 Příprava vzorku a průběh měření

Před začátkem samotného měření bylo nutné si připravit vzorek zvoleného polymerního materiálu. Hlavním problémem měření kabelové izolace (plášťové izolace) je její zakřivení již z výroby, tzn. průřez kabelu je kruhový, ale pro přesně měření je potřeba mezi měřicí elektrody vložit vzorek plošný. Z tohoto důvodu byl vzorek plášťového materiálu ponechán přes noc zatížen, aby se částečně kompenzoval tvar z výroby. Dalším úskalím bylo utažení elektrod, protože ovládací program, kterým se obsluhuje BDS přes počítač, vyžaduje zadání přesné tloušťky materiálu. Aby nedošlo ke zkreslení výsledků, tak je potřeba se vyvarovat přílišnému utažení elektrod, které by vedlo ke zmenšení tloušťky vzorku jeho stlačením. Cela elektrodového systému i s upevněným vzorkem se vloží do komory kryostatu s tepelným čidlem a spustí se měření.

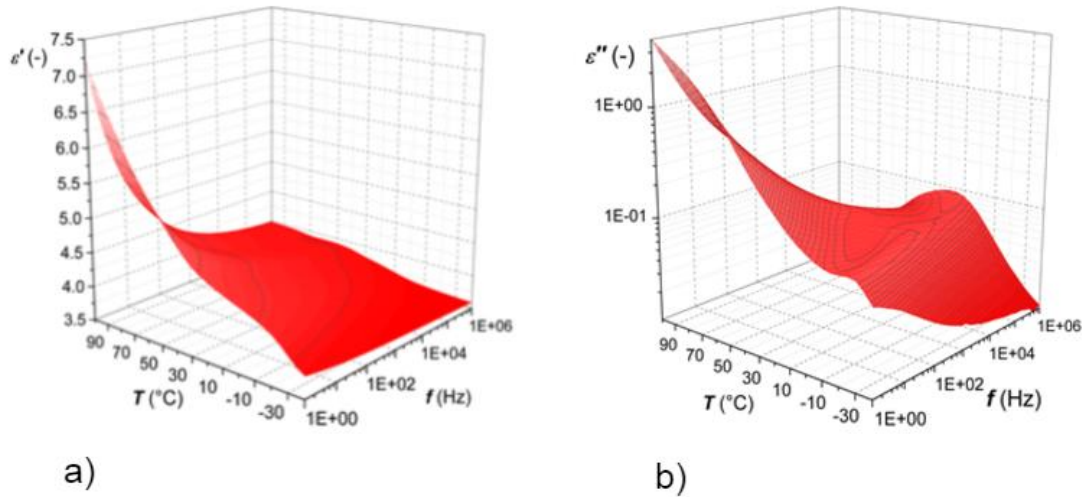
5.1.2 Naměřené hodnoty

V případě hodnocení elektroizolačních materiálů je důležitým parametrem komplexní permitivita, která je definována vztahem (4), kde ε' a ε'' jsou reálná a imaginární část permitivity. Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je definován vztahem (5) a jedná se o poměr imaginární a reálné části [51].

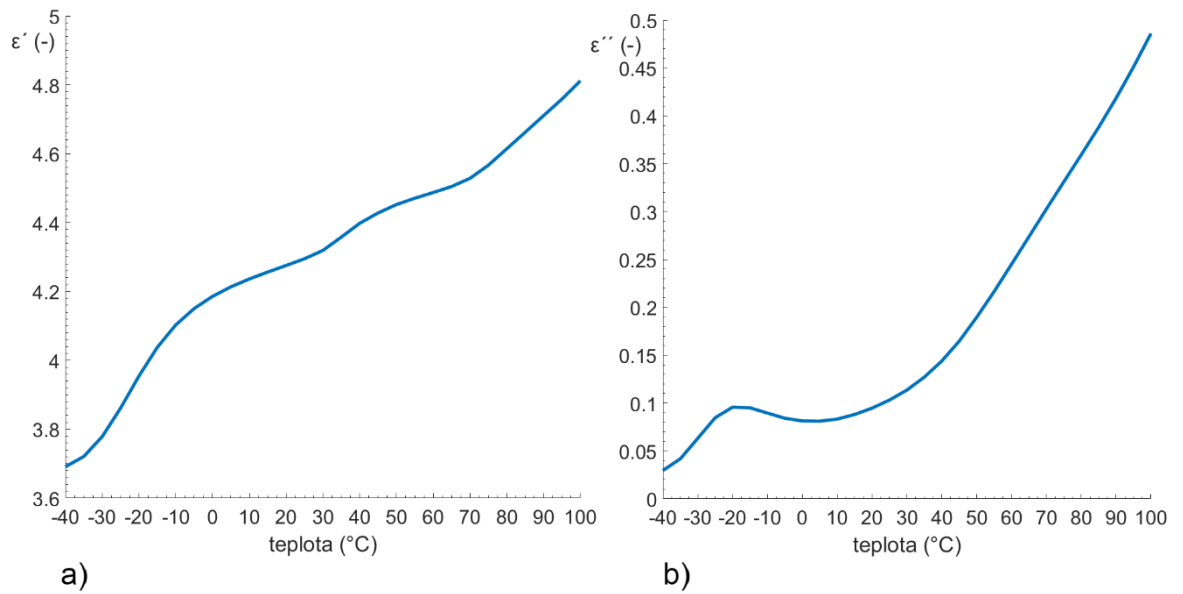
$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (5)$$

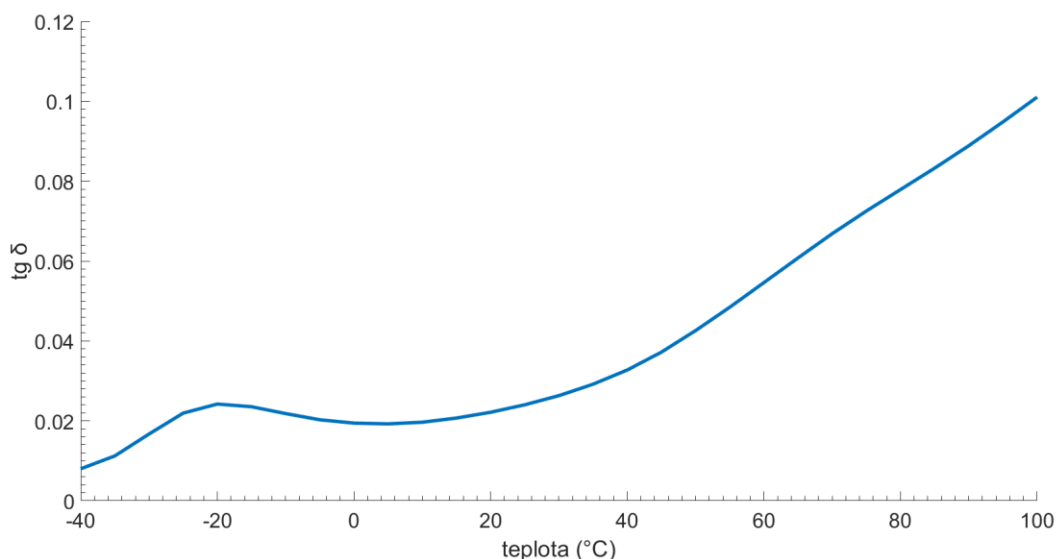
Měřicí elektrody byly použity o průměru 20 mm. Průměrná tloušťka vzorku materiálu činila 1,7 mm. Měřicí napětí použité během měření bylo 1 V_{rms}. Měřicí rozsah teplot byl v rozmezí od -40 °C do 100 °C s krokem 5 °C. Z hlediska frekvenčního rozsahu započalo měření při 1 MHz a skončilo na hodnotě 1 Hz. Obr. 10 uvádí teplotně-frekvenční závislosti reálné a imaginární části permitivity HFFR materiálu.



Obr. 10: Teplotně-frekvenční závislost komplexní permitivity: a) reálná část, b) imaginární část.



Obr. 11: Teplotní závislost komplexní permitivity při frekvenci 50 Hz: a) reálná část, b) imaginární část.



Obr. 12: Teplotní závislost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ při frekvenci 50 Hz.

V energetické praxi je důležité sledovat chování materiálu při frekvenci 50 Hz, na které je provozována distribuční síť v České republice. Na Obr. 11 je vidět závislost permitivity na teplotě při frekvenci 50 Hz. Zvolený teplotní rozsah postihuje teploty, v kterých je materiál teoreticky použitelný. Interval běžných provozních teplot je však od 20 °C do 50 °C. V tomto teplotním rozsahu se reálná část permitivity pohybuje v rozmezí 4,275 do 4,452 a imaginární část permitivity od 0,95 do 0,19. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ se v intervalu provozních teplot pohybuje od 0,01 do 0,1.

5.2 Simultánní termická analýza (STA)

Termické analýzy, jenž jsou definovány podle literatury [56] takto: „*Soubor metod zkoumání závislosti materiálu na měnící se teplotě (oteplování/zchlazování).*“ Nejpoužívanější termické analýzy jsou TG (termogravimetrie), DTA (diferenční termická analýza) a DSC (diferenční skenovací kalorimetrie). U metody TG je sledovanou vlastností hmotnost v závislosti na teplotě. DTA sleduje rozdíl teplot mezi vzorkem a standardem a v průběhu analýzy DSC se měří entalpie a tepelný tok. Podrobnější popis těchto a dalších metod je uveden v literatuře [57]. Vzhledem k cenové a časové náročnosti samostatně realizovaných jednotlivých zkoušek se dnes využívá metody STA (simultánní termická analýza), během které je měřeno více vlastností materiálu najednou. Použité metody jsou označeny zkratkou např. TG/DSC apod.

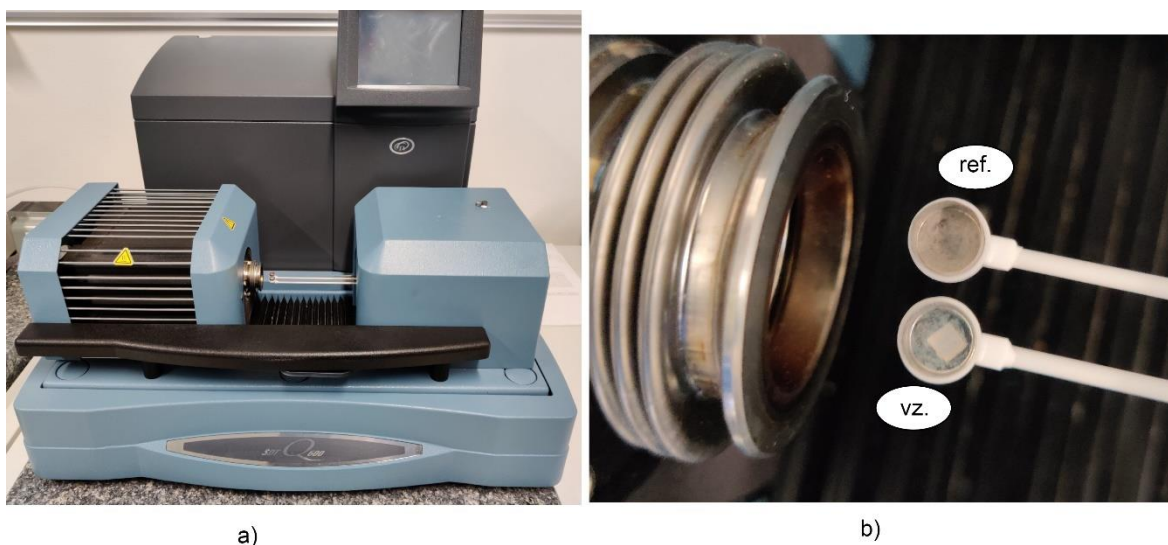
Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je metoda měřící rozdíl tepelného toku mezi kelímkem, ve kterém je umístěn vzorek a mezi prázdným kelímkem. Během provedených analýz je standardně udržována konstantní rychlost změny teploty. Tato metody slouží k určování teploty tavení a teploty skelného přechodu. Pomocí této metody lze porovnávat různé polymerní materiály a provádět jejich komplexní analýzu včetně hodnocení tepelné historie a oxidační stability [50, 57]. Termogravimetrie (TG) sleduje změny hmotnosti v závislosti na teplotě. Metoda je vhodná na analýzu aditiv v polymerech a určení množství těkavých látek a navlhavosti vzorku [50, 57].

Jako přístroj umožňující provedení termické analýzy byl použit přístroj od americké společnosti TA Instruments (typ SDT Q600) viz Obr. 13a, který je konstruován pro měřící metodu TG/DSC. Teplotní rozsah přístroje je možné nastavit od laboratorní teploty až do 1500 °C. Maximální hmotnost vzorku je 200 mg. Přístroj umožňuje využít různých atmosfér při měření vzorku, např. vzduch, dusík. Veškeré další specifiky přístroje jsou uvedena na webových stránkách výrobce [58].

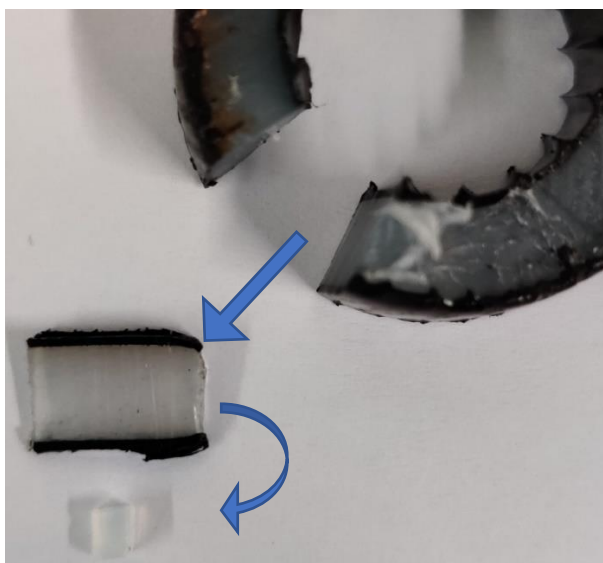
5.2.1 Příprava vzorku a průběh měření

U vzorku kabelu č.1 je zkoumána žilovou izolaci z XLPE a PVC plášť a u druhého vzorku kabelu je analyzována také žilová izolace z XLPE a HFFR směs (výplňová a plášťová izolace). Vzorky byly připraveny z jednotlivých vrstev kabelové izolace vyříznutím a poté byly odstraněny okraje vrstev, které mohou být ovlivněny ochrannými, polovodivými, separačními a dalšími tenkými vrstvami. Podle předchozích měření a zažitých laboratorních postupů byly připravovány vzorky o hmotnosti 9 mg, aby se co nejvíce eliminovalo možné zkreslení výsledků způsobené měřením vzorků s odlišnými hmotnostmi. Pomocí průběžného vážení postupně zmenšovaného vzorku na přesných analytických vahách Radwag XA20/2X byla kontrolována hmotnost vzorků, až bylo dosaženo ideálně požadované hmotnosti 9 mg. Poměr velikosti mezi výchozím vzorkem žilové izolace a vzorkem pro měření je vidět na Obr. 14. Po přípravě vzorků se z přístroje vyndá platinový kelímek, který je potřeba důkladně vyčistili pomocí štětce od předešlého měření. V přístroji se nachází kelímky dva, ale pouze do jednoho je vkládán vzorek a druhý slouží jako referenční a slouží k určení poměru ztráty hmotnosti (viz Obr. 13b). Použitý přístroj je ovládán pomocí speciálního softwaru v PC. Po vytvoření optimální procedury analýzy a jejího spuštění proběhne měření automaticky. Měření se prováděla ve vzduchové

atmosféře při objemovém průtoku vzduchu 100 ml/min. Rychlost ohřevu byla 10 °C/min a teplotní rozsah byl od laboratorní teploty až do teploty 700 °C.



Obr. 13: Analyzátor SDT Q600: a) pohled na celý přístroj, b) vahadla s Pt kelímky (ref. – referenční kelímek, vz. – kelímek pro vložení vzorku).

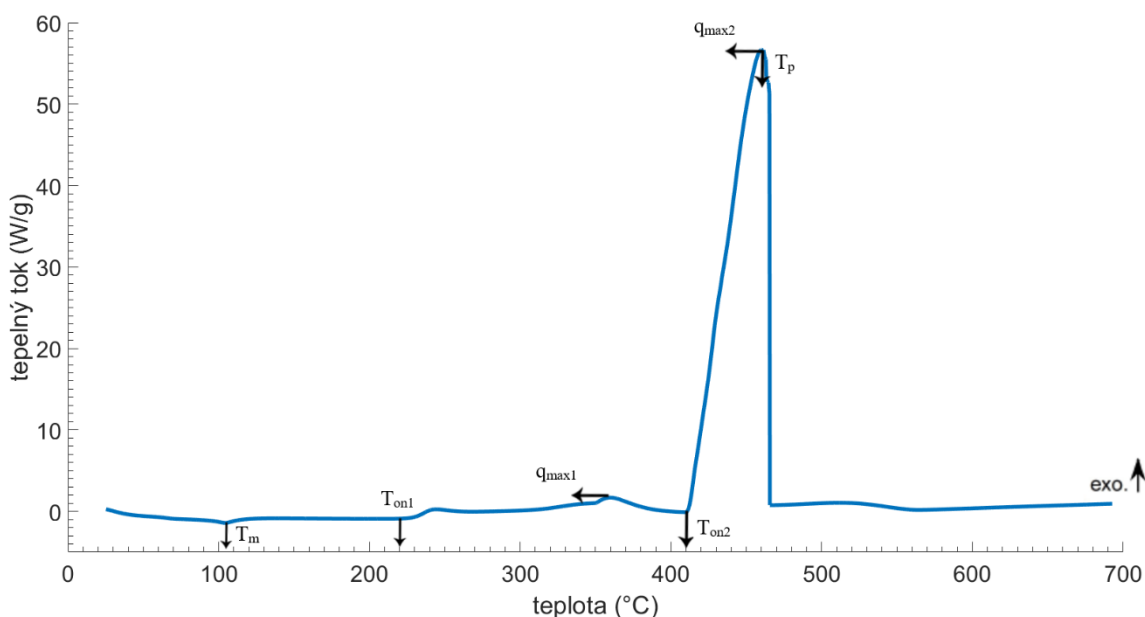


Obr. 14: Poměr velikostí vzorku XLPE připraveného k provedení STA.

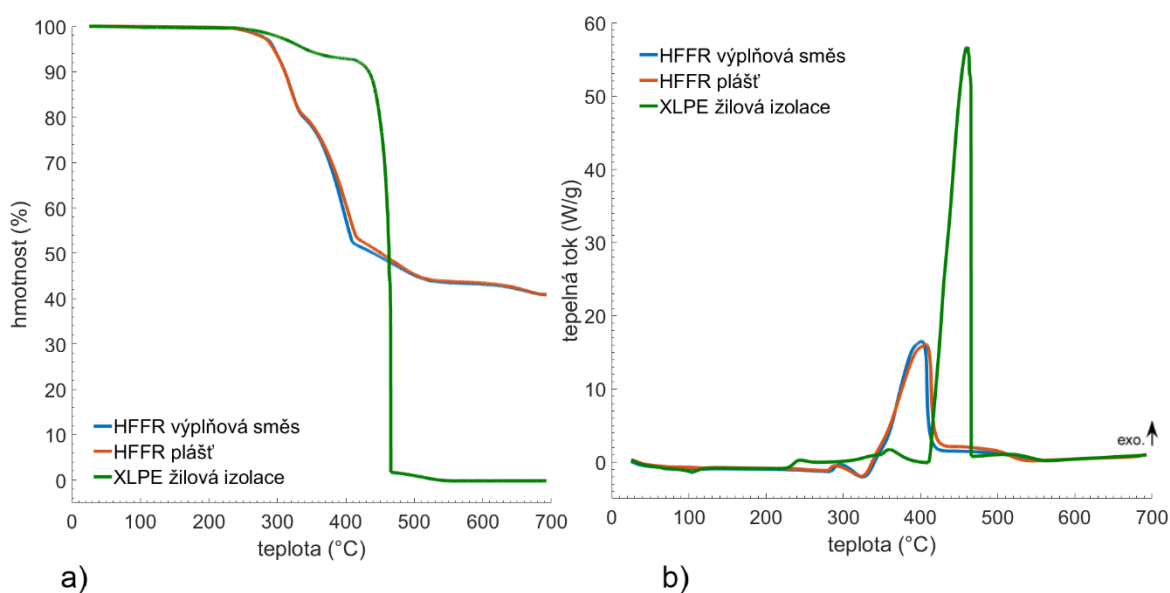
Na základě analýz obou žilových izolací je možné tvrdit, že se jedná pravděpodobně o stejný materiál, který je použit u obou kabelů. U kabelu č.2 bylo navíc zjištěno, že výplňová směs a plášť obsahují totožný HFFR materiál, který se pouze liší u pláště přidanými pigmenty zaručujícími oranžový odstín pláště kabelu.

5.2.2 Naměřené hodnoty

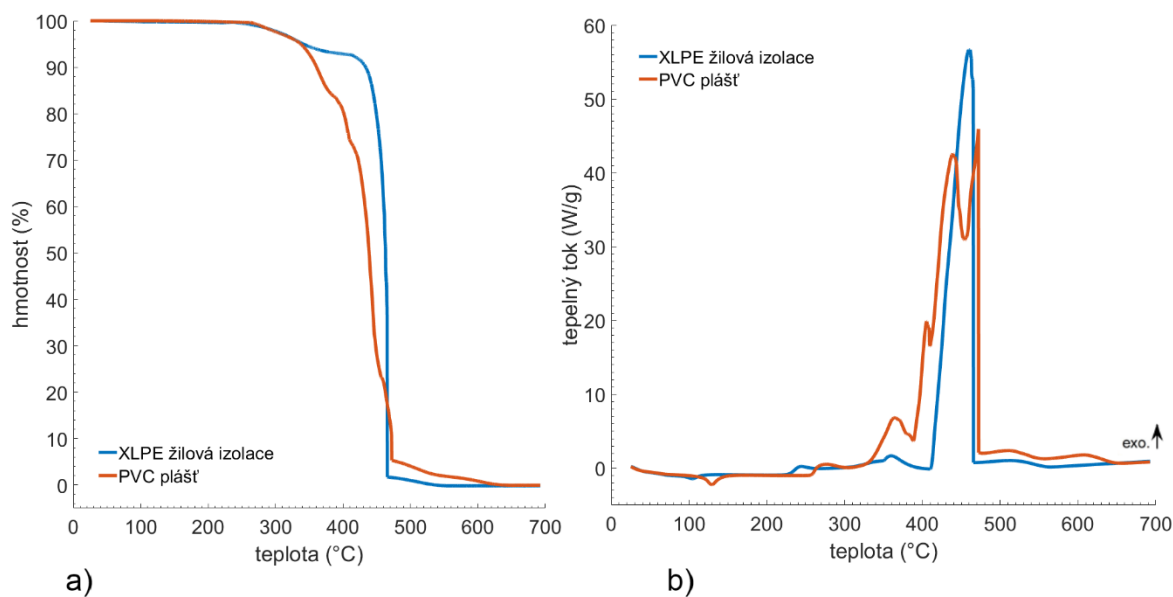
Termogramy testovaných polymerních materiálů jsou vyobrazena na Obr. 16 a Obr. 17. K vyhodnocení termických analýz slouží parametry: teplota tavení T_m , počáteční teplota prvního termo-oxidačního děje T_{on1} , počáteční teplota hlavního termo-oxidačního děje T_{on2} , maximální dosažený tepelný tok při těchto dějích q_{max1} a q_{max2} , a nakonec maximální teplota T_p , při které je dosaženo q_{max2} . Vyznačené parametry prezentuje Obr. 15. Přehledný souhrn hodnot sledovaných parametrů uvádí Tab. 5.



Obr. 15: Termogram XLPE izolace s vyznačenými sledovanými parametry.



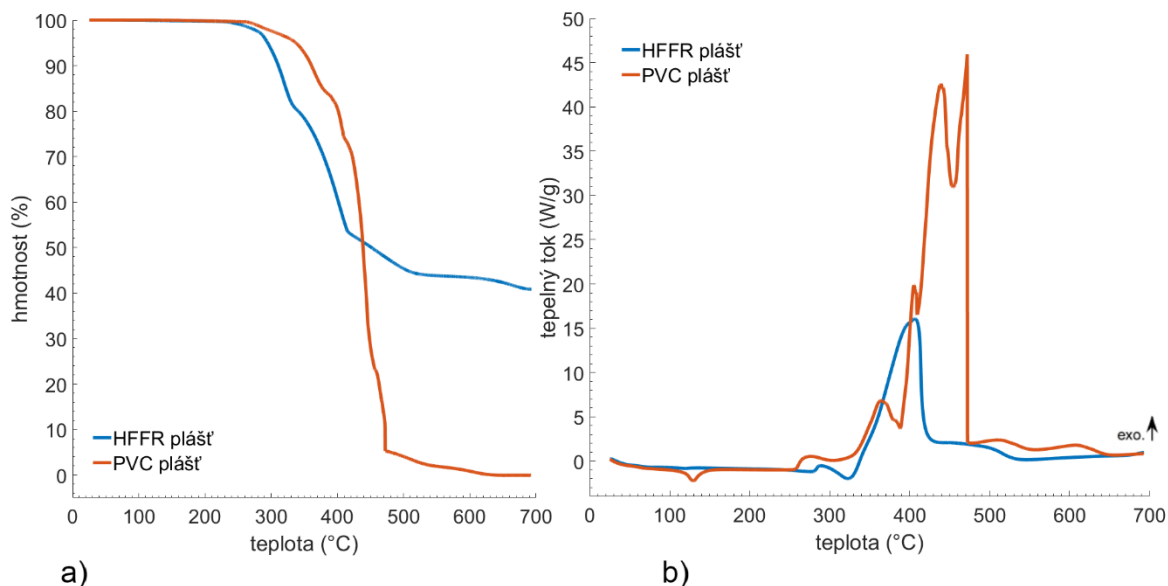
Obr. 16: Termogramy pro materiály z kabelu č. 1: a) průběh změny hmotnosti, b) průběh tepelného toku.



Obr. 17: Termogramy pro materiály z kabelu č.2–a) průběh změny hmotnosti, b) průběh změny tepelného toku.

Tab. 5: Přehled sledovaných parametrů termických analýz.

materiál	T_m (°C)	T_{on1} (°C)	q_{max1} (W/g)	T_{on2} (°C)	q_{max2} (W/g)	T_p (°C)
XLPE	106,2	221,7	1,678	410,4	56,65	459,9
PVC	129,6	237,3	6,764	314,7	45,93	471,9
HFFR	92,7	283,3	0,9166	327,3	16,07	406,5



Obr. 18: Termogramy plášťových materiálů testovaných kabelů: a) průběh změny hmotnosti, b) průběh tepelného toku.

Z výše uvedené Tab. 5 a Obr. 16b vyplývá, že hlavní rozdíl mezi materiály HFFR a XLPE je v teplotě hlavního termo-oxidačního děje, který se liší přibližně o 100 °C. Teploty tavení jsou pro všechny zkoumané materiály podobné, kdy nejvyšší teplotu tavení má PVC a je rovna přibližně 130 °C.

Na Obr. 18 je uvedeno porovnání průběhů změny hmotnosti tepelného toku pro plášťové materiály PVC a HFFR. Z uvedených termogramů je patrný rozdíl v koncové hmotnosti, kde z PVC nezůstalo téměř nic (tzn. proběhla termo-oxidace a kompletní degradace polymerního materiálu), tak HFFR materiál obsahoval výrazný podíl anorganický plniv, které po degradaci materiálu zůstaly a tvořily 41 % počáteční hmotnosti materiálu. Těchto 41 % odpovídá dehydratovanému retardéru hoření ATH.

Při hodnocení průběhu tepelného toku bylo zjištěno, že HFFR materiály použité v testovaném kabelu č. 1 se od PVC výrazně neliší co se týče počátku oblasti hlavního termo-oxidačního děje. Zásadně se ale liší v hodnotě maximálního tepelného toku, který je pro analyzovaný PVC přibližně 3krát větší než pro HFFR. Hodnota q_{max1} vypovídá o intenzitě uvolňování energie při dané teplotě (v daném čase). Množství uvolněné energie lze určit jako plochu pod křivkou hlavního termo-oxidačního děje. Výzkum zaměřený na materiály se snaží dosáhnout co nejmenší hodnoty, protože může docházet k uvolňování toxických i degradačních produktů. Snížení maxima tepelného toku a také celkové uvolněné energie v případě HFFR směsi oproti PVC dokazuje fungování materiálu s lepší oheň retardací. Další zlepšení by bylo možno dosáhnout kombinací různých retardéru hoření, které by účinkovaly v různých teplotních intervalech. Teplota, při které je dosaženo maximálního tepelného toku se vzájemně liší o 65 °C. Počáteční teploty prvního termo-oxidačního děje se liší o 46 °C viz Obr. 18b.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zpracování teoretického úvodu do problematiky elektroizolačních materiálů používaných v silových kabelech. U těchto kabelů byla provedena charakterizace, jejíž hlavní část představuje měření vedoucí ke zjištění vybraných dielektrických parametrů a termické analýzy určené pro získání prvotní představy o chování materiálů při zvýšených teplotách, např. při požáru. Měření byla realizována se zaměřením na seznámení se se základními principy použitých diagnostických metod.

V teoretické části je zpracován přehled přechodu od přírodních organických materiálů přes polymery až po kompozitní materiály s polymerní matricí, které se v současnosti uplatňují v izolačních materiálech nejčastěji. Často se využívají kompozity odvozené od PE a EVA. Podrobněji byly představeny čisté polymerní materiály používané dnes v elektroizolačních systémech a byly řešeny možnosti jejich modifikace, především se zaměřením na aditiva snižující jejich hořlavost. Podle odborné literatury byly popsány některé uskutečněné pokusy o zlepšení termických i dalších vlastností. Bylo konstatováno, že stále se nedospělo k takovým výsledkům, které by vedly ke zlepšení všech sledovaných vlastností a vždy je tak hledán určitý kompromis. Nejčastěji jsou zmiňovány studie týkající se začleňování retardéru hoření, což však často vede ke zhoršení především mechanických vlastností materiálu.

V praktické části jsou detailně popsány jednotlivé vrstvy běžných silových kabelů. Pro testování elektroizolačních materiálů těchto kabelů byly použity metody BDS a STA. Pomocí metody BDS byla určena relativní permitivita, která je jedním ze základních dielektrických parametrů materiálů. Jako poměr imaginární a reálné části permitivity byl vypočítán ztrátový činitel. Termická analýza použité v této bakalářské práci byly STA. Pomocí této analýzy bylo zkoumáno působení teploty na změnu hmotnosti a tepelného toku v zatěžovaných vzorcích polymerních materiálů. Použití zmiňovaných metod byly zaměřeno především na seznámení s postupy a principy těchto metod. Porovnáním plášťových materiálů se došlo k závěru, že se materiály HFFR a PVC příliš neliší co se týká počátečních teplot hlavního termo-oxidačního děje, ale výrazně se liší v maximálním tepelném tokem při tomto ději.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ENGINEERING, Electrical. *Electrical Cable Classification and Specification* [online]. 2013 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.anelectricalengineer.com/electrical-cable-classification-specification/>
- [2] SCHENK, Ferdinand a Kabelovna KABEX. Jak se dělá kabel. *Elektro* [online]. 2011, (7), s. 49-52. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-se-dela-kabel--9622>
- [3] REDAKCE ELEKTRO. Z historie kabelů. *Elektro* [online]. 2008, (1), s. 58-59 [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-kabelu--11642>
- [4] THUE, William. *Electric Power Cable Engineering*. 3rd ed. New York: CRC Press, 2012. ISBN 9781439856451.
- [5] LINHART, Roman. *Kabely a vodiče, kabelové soubory, spojovací a izolační materiál*. Praha: Merkur, 1988.
- [6] DOUGLAS, Steve. IS IT A CONDUCTOR OR A CABLE? *IAEI Magazine* [online]. 2016 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://iaeimagazine.org/magazine/features/is-it-a-conductor-or-a-cable/>
- [7] MORAVEC, Jan. Zpracování hliníku - od minerálu až po kabel. *oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/zpracovani-hliniku-od-mineralu-az-po-kabel>
- [8] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [9] NASSERI, Simin. *Bulk Deformation Processes in metal forming* [online]. 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/jacob-carey/bulk-deformation-processes-in-metal-forming-chapter-19-part-4-wire-and-bar-drawing>
- [10] MORAVEC, Jan. Izolování vodivých jader v kabelové technice. *oenergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/izolovani-vodivych-jader-v-kabelove-technice>
- [11] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Liberec: publi.cz, 2015. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/02.html>
- [12] SAMPISISTEMI. *Cable extrusion* [online]. 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: http://www.akte.co.rs/pdf_files/samp/Sampsistemi_ekstruzione_linije.pdf
- [13] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: ZČU Plzeň, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [14] CALLISTER. *Polymer Structures* [online]. 2016 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <http://www.looking-glass-blog.com/2016/07/callister-chapter-14-polymer-structure.html>
- [15] MORTON, Maurice. *Rubber Technology* [online]. Third Edit. B.m.: Kluwer Academic Publishers, 1999. ISBN 978-90-481-4010-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-2925-3
- [16] MOORE, G.F. *Electric Cables Handbook* [online]. Third Ed. B.m.: BlackWell Science, 1997. ISBN 9780632040759. Dostupné z: doi:10.1049/ep.1965.0093
- [17] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠNUPÁREK. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vydání. Brno: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [18] AMBROGI, V., C. CARFAGNA, P. CERRUTI a V. MARTURANO. *Additives in Polymers* [online]. 1st Editio. B.m.: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780323443982. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-44353-1.00004-X
- [19] MORAVEC, Jan. Nejdůležitější izolanty používané v kabelové technice - 1. díl: Plasty. *oenergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-04-27]. Dostupné

- z: <https://oenergetice.cz/elektrina/nejdulezitejsi-izolanty-pouzivane-v-kabelove-technice-1-dil-plasty>
- [20] UNIVERSAL CABLE BERHAD. *XLPE Catalogue* [online]. 2019 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: http://www.ucable.com.my/images/products/UC_XLPE_Catalogue.pdf
- [21] CARLOMAGNO, Giovanni Maria, Carosena MEOLA a Giuseppe GIORLEO. *Cross-Linked Polyethylene* [online]. Vol. 1. B.m.: Taylor & Francis, 2005. Dostupné z: doi:10.1081/E-ECHP-120007720
- [22] MORAVEC, Jan. Izolanty používané v kabelové technice - 2. díl: Elastomery a elektroizolační laky. *oenergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/nejdulezitejsi-izolanty-pouzivane-v-kabelove-technice-2-dil-elastomery-a-elektroizolacni-laky>
- [23] PFAENDNER, Rudolf. *Polymer Additives* [online]. 1st ed. 2013. ISBN 9780470630327. Dostupné z: doi:10.1002/9781118480793.ch11
- [24] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Liberec: publi.cz, 2015. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [25] BASF. *Pigment Preparations that Run the Extra Mile*.
- [26] WYPYCH, George. *Handbook of fillers* [online]. 4th Ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2016. ISBN 978-1-895198-91-1. Dostupné z: doi:10.1016/b978-1-895198-91-1.50003-8
- [27] AL-MOSAWI, A. I. *Flammability of Composites* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2016. ISBN 9781782423430. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-78242-325-6.00014-1
- [28] PINKEROVÁ, M. a R. POLANSKÝ. Nové trendy v materiálech používaných pro izolaci a opláštění kabelů. *ElectroScope* [online]. 2012, (3). Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3_2012/r6c2c4.pdf
- [29] SAIN, M., S. H. PARK, F. SUHARA a S. LAW. Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2004, 83(2), s. 363-367. ISSN 01413910. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-3910(03)00280-5
- [30] U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Composite Materials Handbook-MIL 17*. Volume 1. B.m.: CRC Press, 1999. ISBN 9781566768269.
- [31] SAPUAN, S.M. *Composite Materials* [online]. Woburn: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780128025079. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-802507-9/00003-9
- [32] ARKEMA. HFFR (Halogen Free Flame retardant). *EVATANE resin from Arkema's ethylene copolymers family* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.evatane.com/en/applications/wire-and-cables/hffr/>
- [33] KISUMA. *Halogen free flame retardant* [online]. 2015 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.kisuma.com/applications/halogen-free-flame-retardants>
- [34] METLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Jaroslav HORŇÁK, Ondřej MICHAL a Pavel TOTZAUER. Nanokompozitní dielektrika – perspektivní materiály pro vysokonapěťovou elektroizolační techniku. *AZ Elektro* [online]. 2019 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://www.azcasopis.cz/veda-vyzkum-a-inovace/nanokompozitni-dielektrika-perspektivni-materialy-pro-vysokonapetovou-elektroizolacni-techniku>
- [35] VASUDEO RANE, Ajay, Krishnan KANNY, Vayyaprontavida Kaliyathan ABITHA, Shivendra S. PATIL a Sabu THOMAS. *Clay-Polymer Composites: Design of Clay Polymer Nanocomposite by Mixing* [online]. B.m.: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780323461610. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-46153-5.00004-5
- [36] WEIL, Edward D. a Sergei V. LEVCHIK. Flame retardants in commercial use or development for polyolefins. *Journal of Fire Sciences* [online]. 2008, 26(1), 5–43. ISSN 07349041. Dostupné z: doi:10.1177/0734904107083309

- [37] GALETKA, Martin. *Přenosová soustava elektrické energie* [online]. 2016 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [38] EON. *Přenosová a distribuční soustava* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-1-cast>
- [39] GOHZ.COM. *Difference between 50Hz and 60Hz frequency* [online]. 2015 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <http://www.gohz.com/difference-between-50hz-and-60hz-frequency>
- [40] INTERNATIONAL, Power Systems. *Guide of power frequencies* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://powersystemsinternational.com/our-guide-to-international-power-frequencies/>
- [41] NKT a CABLES. *Silové vodiče a kabely* [online]. 2019 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: https://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Silove_kabely_a_vodice_CZ-EN_2014.pdf
- [42] KABEX, Kabelovna. *Katalog* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://data.kabex.quonia.cz/ke-stazeni/KATALOG.pdf>
- [43] ŠENFELD, Jan. HFFR kabely z produkce nkt cables. *Sborník přednášek Elektro č.49* [online]. 2011 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/hffr-kabely-z-produkce-nkt-cables>
- [44] ALLKABEL. *Bezhalogenové oheň retardující a ohniodolné kabely* [online]. 2017 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <http://www.allkabel.eu/download-cz/>
- [45] WANG, Genlin, Pingkai JIANG a Zikang ZHU. Interface modification and characterization in linear low-density polyethylene highly loaded with aluminium hydroxide. *Polymer Composites* [online]. 2002, **23**(5), 691–696. Dostupné z: doi:doi:10.1002/pc.10469
- [46] LOU, Feipeng, Kai WU, Quan WANG, Zhongyu QIAN, Shijuan LI a Weihong GUO. Improved flame-retardant and ceramifiable properties of EVA composites by combination of ammonium polyphosphate and aluminum hydroxide. *Polymers* [online]. 2019, **11**(1). ISSN 20734360. Dostupné z: doi:10.3390/polym11010125
- [47] AKOVALI, G. *Plastic materials: chlorinated polyethylene (CPE), chlorinated polyvinylchloride (CPVC), chlorosulfonated polyethylene (CSPE) and polychloroprene rubber (CR)* [online]. B.m.: Woodhead Publishing Limited, 2012. Dostupné z: doi:10.1533/9780857096357.54
- [48] BIELINSKI, Dariusz a Mateusz IMIELA. Current trends in ceramifiable polymer composites development [online]. 2018, (August), 2–3. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.12598.55362
- [49] HENDERSON, Alex M. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Copolymers: A General Review. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 1993, **9**(1), 30–38. ISSN 08837554. Dostupné z: doi:10.1109/57.249923
- [50] POLANSKÝ, Radek. Přednáška ITE1 - Strukturální analýzy. In: . 2018.
- [51] METLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN ISBN 80-7300-189-6.
- [52] POLANSKÝ, R. a M. POLANSKÁ. Testing of the fire-proof functionality of cable insulation under fire conditions via insulation resistance measurements. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2015, **57**, 334–349. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2015.08.001
- [53] DESHMUKH, Kalim, Sowmya SANKARAN, Basheer AHAMED, Kishor K. SADASIVUNI, Khadheer S.K. PASHA, Deepalekshmi PONNAMMA, P. S. RAMA SREEKANTH a Kuppamma CHIDAMBARAM. *Dielectric Spectroscopy* [online]. B.m.: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780323461467. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-46140-5.00010-8

- [54] KREMER, F. a A. SCHÖNHALS. *Broadband dielectric spectroscopy* [online]. Berlin: Spr, 2003. ISBN 9783540434078. Dostupné z: <http://books.google.com/books?id=sdG4ywL3qMsC>
- [55] *NovoControl* [online]. 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.novocontrol.de/php/index.php>
- [56] LEVER, Trevor, Peter HAINES, Jean ROUQUEROL, Edward L. CHARLESLEY, Paul VAN ECKEREN a Donald J. BURLETT. ICTAC nomenclature of thermal analysis (IUPAC Recommendations 2014). *Pure and Applied Chemistry* [online]. 2014, **86**(4), 545–553. ISSN 13653075. Dostupné z: doi:10.1515/pac-2012-0609
- [57] KLOUŽKOVÁ, A., P. ZEMENOVÁ, J. KLOUŽEK a W. PABST. Termická analýza. *VŠCHT* [online]. 2012 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: [http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termická analýza.pdf](http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termická%20analýza.pdf)
- [58] *TA Instruments* [online]. 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.tainstruments.com/>
- [59] BODYCOTE. *Žihání na měkko* [online]. 2019 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/zihani-na-mekko/>
- [60] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/obalka-1.html
- [61] KABEX. Kabelovna Kabex, a. s. – kabely HFFR. *Elektro* [online]. 2010, (**10**), 45 s. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/kabelovna-kabex-a-s-kabely-hffr--10696>