

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nový nanokompozitní materiál

Originál (kopie) zadání BP/DP

Zadání strana 2

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá kompozitními materiály, jejich využitím v elektrotechnice a to především jako izolačních materiálů a dále pak možnostmi modifikace kompozitních materiálů pomocí nanoplňiv. Teoretická část shrnuje základní poznatky o kompozitních materiálech. Dále se zabývá využitím kompozitů v elektrotechnice a izolační technice elektrických zařízení. U elektroizolačních kompozitních materiálů s polymerní matricí se práce zabývá rovněž možnostmi obohacení o nanopřířady. Praktická část práce je zaměřena na nalezení optimálního množství plniva SiO_2 v impregnačním laku EpoxyLite 3750 LV a následné možnosti modifikace tohoto materiálu polyamidovou a polyimidovou nanovlákninou.

Klíčová slova

Kompozitní materiál, nanokompozit, izolace, polymer, epoxydová pryskyřice, EpoxyLite 3750 LV, SiO_2 , nanočástice, polyamid, polyimid, ztrátový činitel, permitivita.

Abstract

This diploma thesis deals with composite materials, their use in electrical engineering, mainly as insulating materials and also with the possibilities of modification of composite materials with nanofillers. The theoretical part summarizes basic knowledge about composite materials. It also deals with the use of composites in electrical engineering and insulation technology of electrical equipment. In the case of electro-insulating composite materials with a polymer matrix, the thesis also deals with possibilities of enrichment with nanoparticles. The practical part is focused on finding the optimal amount of filler SiO₂ in the impregnation lacquer EpoxyLite 3750 LV and the subsequent possibilities of modification of this material with polyamide and polyimide nanofibres.

Key words

Composite material, nanocomposite, insulation, polymer, epoxy resin, EpoxyLite 3750 LV, SiO₂, nanoparticles, polyamide, polyimide, loss factor, permittivity

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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.5.2017

Tomáš Eis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukášovi Harvánkovi za cenné rady při experimentální části této diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 CO JSOU KOMPOZITNÍ MATERIÁLY?	12
1.2 MATRICE	13
1.2.1 Polymerní matrice	13
1.2.2 Kovové matrice	13
1.2.3 Keramické a sklokeramické matrice	14
1.3 VÝZTUŽ	14
1.3.1 Vlákenné výztuže	15
1.3.2 Částicové výztuže	18
2 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V KONSTRUKCI ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	20
2.1 KOMPOZITY JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICE	20
2.1.1 Vyztužený beton	20
2.1.2 FRP kompozity	21
2.2 KOMPOZITY JAKO IZOLAČNÍ MATERIÁLY	21
3 POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V ELEKTROIZOLAČNÍ TECHNICE	22
3.1 POLYMERNÍ MATRICE	22
3.1.1 Termoplastické polymery	22
3.1.2 Termosetické polymery	22
3.1.3 Epoxidová pryskyřice	23
3.1.4 Polyetylen	24
3.1.5 Polyvinylchlorid (PVC)	24
3.1.6 Synergický efekt při použití nanočástic, multi-core model	25
3.1.7 Nanokompozitní plniva	26
3.2 ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁLY	27
3.2.1 Impregnovaný papír jako kompozitní izolační systém	27
3.2.2 Materiály izolačních desek	28
3.2.3 FRP jako izolační materiály	28
3.3 VYUŽITÍ KOMPOZITŮ V IZOLACI TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	29
3.3.1 Systém resin-rich	29
3.3.2 Systém VPI	30
3.3.3 Porovnání systému VPI a resin-rich	31
4 MOŽNOSTI MODIFIKACE VYBRANÉHO MATERIÁLU NANOPŘÍSAĐOU	32
4.1 VÝROBA VZORKŮ	32
4.1.1 Vzorky pro nalezení optimálního množství SiO_2	32
4.1.2 Vzorky s nanovlákninami	33
4.2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ	34
4.2.1 Měření ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ a relativní permitivity ϵ_r v závislosti na teplotě	34
4.2.2 Absorpční a resorpční charakteristiky	35
4.2.3 Měření dielektrické pevnosti	37
4.3 URČENÍ OPTIMÁLNÍHO PLNĚNÍ	37
4.4 MOŽNOSTI VYUŽITÍ NANOVLÁKNIN	40
ZÁVĚR	42

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

C	[F]	kapacita
E_p	[kV·mm ⁻¹]	elektrická pevnost
FRP		fibre reinforced plastics
T	[°C]	teplota
p_{i1}	[-]	minutový polarizační index
p_{i10}	[-]	desetiminutový polarizační index
VPI		vakuum pressure impregnation
$\text{tg } \delta$	[-]	ztrátový činitel
ϵ_r	[-]	relativní permitivita
v	[%]	variační koeficient
ρ_v	[$\Omega \cdot \text{m}$]	vnitřní rezistivita

Úvod

Inženýrské materiály jsou základem technologie, ať už se jedná o strukturální, elektronické, tepelné, elektrochemické, biomedicínské nebo jiné využití. Historie lidské civilizace se vyvíjela od doby kamenné až do moderní elektronické doby. Každá z jednotlivých epoch dějin je charakterizována určitým pokrokem v materiálech. Od kamene a železa jsme se posunuly až k polovodičům, polymerům a kompozitním materiálům. [1]

V průběhu posledních dvou desetiletí zaznamenala nanotechnologie významný pokrok ve vývoji nanočástic s výhodnými vlastnostmi a umožnila tak další rozvoj v odvětvích jako je např. uchovávání energie, biotechnologie, letectví, automobilový průmysl nebo elektronika. Pojem nanokompozit označuje vícefázový materiál, pro který je alespoň v jedné fázi alespoň jeden z rozměrů v řádu nanometrů. Vývoj polymerních nanokompozitů je oproti kompozitům z keramiky a kovu cenný zvláště kvůli jejich rozmanitým a unikátním vlastnostem. Disperze anorganických nanočástic v polymerní matici vede ke zlepšení vlastností a chemické vazby mezi polymerem a plnivem vedou ke zlepšení kompatibility materiálů a podporují unikátní vlastnosti polymerní matrice. [2]

Práce se zabývá kompozitními materiály, jejich využitím v elektrotechnice a to převážně v izolační technice. Experimentální část práce je orientována na výrobu nového nanokompozitního materiálu.

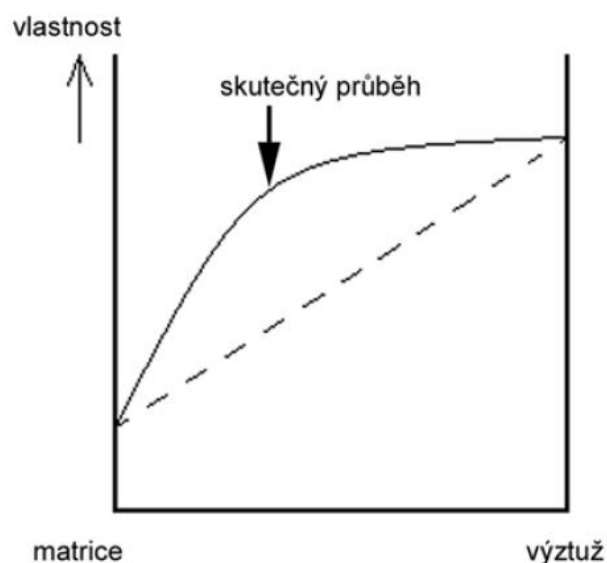
1 Kompozitní materiály

1.1 Co jsou kompozitní materiály?

Pojmem kompozitní materiály označujeme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází. Tyto fáze se velmi liší svými chemickými, fyzikálními i mechanickými vlastnostmi. Jedna fáze kompozitu bývá spojitá, tuto fázi nazýváme matrice. Nespojitou fází kompozitu nazýváme výztuž. Tyto fáze mohou být dále doplněny o aditiva, pigmenty nebo plniva. [1][3]

Spojením jednotlivých složek kompozitu, které mají mnohdy výrazně odlišné vlastnosti, vznikne nový materiál, jehož výsledné vlastnosti převyšují vlastnosti jednotlivých složek nad rámec pouhého poměrného sečtení, jak je patrné na Obr. 1.1. Tento efekt se nazývá synergický a je způsoben vlastnostmi na rozhraní materiálů. [1][3]

Abychom o vícefázovém materiálu hovořili jako o kompozitním, musí splňovat další



Obr. 1.1: Synergické chování složek kompozitu [3]

podmínky. Základní z nich je, že podíl výztuže přesáhne 5%. Další podmínkou jsou odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti matrice a výztuže. Třetí podmínka je technologická, kompozit musí být připraven smícháním složek. Díky těmto podmínkám se mezi kompozity neřadí např. plast obsahující malá množství barviv (sazí, oxidů), ani slitina kovů, ve které došlo vlivem technologie k částečnému vyloučení pevné fáze. [4]

Použití kompozitních materiálů s sebou přináší řadu výhod. Pro řadu aplikací je nejdůležitější nízká hmotnost. Ta je důležitá v dopravě, u sportovního náčiní ale i v elektrotechnických aplikacích (lopatky větrných elektráren). Mezi další výhody můžeme zařadit pružnost, snadnou údržbu, dlouhou životnost nebo flexibilitu designu. [5]

Přestože se použití kompozitních materiálů zdá velmi výhodné, můžeme nalézt i jednu nevýhodu. Tou je potřeba přesného dodržování technologických postupů při výrobě. Výsledný produkt ovlivňuje poměr matrice a výztuže, orientace vláken i parametry prostředí při vytvrzování. [1]

1.2 Matrice

Matrice v kompozitním materiálu je spojitá složka. Jejím hlavním účelem je držet výztuž pohromadě a ve správné pozici. Matrice rovněž poskytuje mechanickou a chemickou ochranu, distribuuje napětí a udává elektrické vlastnosti materiálu. [7]

1.2.1 Polymerní matrice

Nejčastěji používané matrice jsou v současné době polymerní. Jejich vlastnosti se výrazně liší podle toho, zda se jedná o termoplast nebo o reaktoplast. Nejpoužívanější jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a z termoplastů převažují polypropyleny (PP) a polyimidy (PI). [8]

Termoplastové matrice jsou obecně výhodnější. Umožňují výrobu vyztužených desek, které lze následně za tepla dále tvarovat. Snazší výroba termoplastu vede k nízké ceně kompozitu a to i při složitých tvarech. Mezi další výhody patří dobrá dimenzionální stabilita, malý obrus, houževnatost. Termoplastické matrice se často využívají s uhlíkovou, skleněnou nebo aramidovou výztuží.

Reaktoplastové matrice jsou nejrozšířenější konstrukční kompozity. Vytvrzování reaktoplastické pryskyřice je závislé na typu pryskyřice. Důležitá charakteristika vytvrzovacího procesu je doba gelace. Po uplynutí této doby dojde k přeměně viskózní pryskyřice v tuhou hmotu. Reaktoplasty vyztužené skleněnými vlákny mají malý modul pružnosti, proto se používají spíše v kombinaci s vlákny uhlíkovými, bórovými, keramickými, aramidovými nebo kovovými. [7][8][9]

1.2.2 Kovové matrice

Kovové matrice se od polymerních výrazně liší. Jsou elektricky i tepelně vodivé, nehořlavé, tvárné. Lze je snadno spojovat a tvarovat a jsou mechanicky velmi odolné. Nejčastěji se používají slitiny hliníku, možné je i použití hořčíku nebo titanu. Výztuž bývají bórová, křemíková, nebo uhlíková vlákna. Kvalita kompozitu je velmi závislá na výrobním procesu. Je potřeba pečlivě volit takové postupy, při nichž nedojde k poškození

výztuže. Kompozity s kovovou maticí lze sice vyrábět z tavenin, ale většinou se volí metody výroby z prášku, např. slinování. Mnohdy jde o dvoufázový proces, kdy se nejprve vyrobí jednoduchá páska a poté se vytvářejí složitější tvary a struktury. [8][9]

1.2.3 Keramické a sklokeramické matrice

Největší předností keramických matic je vysoká teplotní odolnost. Vyznačují se rovněž dobrou pevností v tahu. Nevýhodou je pak vysoká křehkost. Problematické je u těchto matic rovněž spojování s materiálem výztuže. Teplotní roztažnost materiálů a výztuže by se neměla příliš lišit. V případě, že je součinitel teplotní roztažnosti vláken vyšší než matrice, může při vysokých teplotách dojít k oddělení vláken od matrice. Naopak při nízkého hodnotě součinitele teplotní roztažnosti vláken vzniklá vysoká tahová napětí mohou vést ke vzniku trhlin. Nejběžněji používané materiály pro teplotně odolné matrice jsou karbidy, nitridy a oxidy hliníku, křemíku nebo hořčíku. Výztuže mohou být z molybdenu, wolframu nebo niobu. [7][8][9]

Sklokeramické matrice stojí na pomezí mezi polymerními a keramickými maticemi. Sklokeramika je vyráběna kontrolovanou krystalizací, obsahuje tedy jak krystalickou, tak amorfní fázi. Výhod oproti keramické matici spočívá v nižších nárocích na teplotu tavení. Díky tomu je možné používat technologie výroby jako je např. sintrování i v kombinaci s výztužemi, které by vysokou teplotu potřebnou pro sintrování keramiky nevydržely (např. SiC vlákna, která začínají degradovat při teplotě nad 1100°C). Nejčastěji se vyztužuje uhlíkovými nebo keramickými vlákny. [7][10]

1.3 Výztuž

Jedná se o nespojitou fázi kompozitu. Oproti maticí má lepší mechanické a fyzikální vlastnosti (pevnost, modul pružnosti, tvrdost, aj.). Kvůli výhodným vlastnostem výztuže je kompozit většinou vytvářen. Výhodné vlastnosti by nebyly natolik patrné v jiné formě nebo by jiné uspořádání nemuselo být vůbec vhodné pro dané aplikace kvůli dalším materiálovým vlastnostem.

Výztuže lze dělit z několika hledisek. [9]

Podle velikosti výztuže:

- makrokompozity (řádově mm) – využívány především ve stavebnictví
- mikrokompozity (řádově μm) – největší význam ve strojírenství
- nanokompozity (řádově nm)

podle tvaru výztuže:

- částicové
 - sférické částice (izometrické)
 - destičkové částice (anizometrické)
- vláknové
 - s kontinuálními vlákny
 - s krátkými vlákny

podle orientace výztuže:

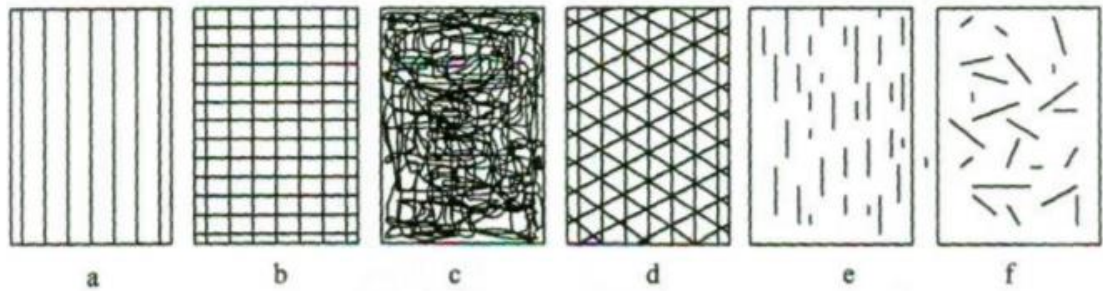
- preferovaná
- náhodná

1.3.1 Vláknové výztuže

Vlákna jsou vždy pevnější než materiál v kompaktní formě. Se zmenšujícím se průřezem pevnost dále roste. V tenkých vláknech jsou rozměry defektů minimální a z pravidla výhodněji orientované ve směru osy vlákna. Většinou se jedná jen o mikroskopické trhlinky a dutinky. Velmi vysoké pevnosti dosahují whiskery. Jedná se o krátké monokrystaly o průměru řádově nm, které neobsahují žádné defekty. Přesto jsou vláknové kompozity převážně mikrokompozity s průměry od 5 do 20 μm . V případě menších průměrů nebo nanokompozitů mohou nastat technologické problémy s prosycením matrice. [10][11]

Vlákna pro kompozity jsou nejčastěji skleněná, uhlíková, keramická, kovová a polymerní. Podle možnosti použití lze rozlišit vlákna pro polymerní matrice (uhlíková, polymerní, skleněná) a vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová).

Vláknové výztuže mohou mít různou orientaci. Kontinuální vlákna lze uspořádat jednosměrně, dvouose, víceose nebo nahodile. Krátká vlákna můžeme uspořádat přednostně nebo nahodile. Příklady uspořádání jsou uvedeny na Obr. 1.2. [11]



Obr. 1.2 Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací. [11]

Elementární monovláknna jsou sdružována v prameny, ze kterých se pak dále zpracovávají různé polotovary. [7]

- Sekané prameny – určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí
- mletá vlákna – mletím lze získat krátká vlákna z křehkých materiálů
- rovingy – sdružené prameny s malým počtem zákrutů (méně než 40/m), slouží převážně pro výrobu tkanin a prepregů
- příze – vzniká zkrucováním pramenů, používá se pro výrobu technických tkanin
- rovingové tkaniny – významnou charakteristikou je gramáž (g/m^2)
- hybridní tkaniny – kombinace různých druhů tkanin, např. aramidová+uhlíková vlákna
- rohože – netkané textilie tvořené nahodile uspořádanými kontinuálními vlákny nebo sekanými prameny větší délky
- prepregy – jedná se o role nebo kotouče obsahující rovingy, tkaninu, nebo rohož předvytvrzenou polymerní maticí.

1.3.1.1 Skleněná vlákna

Amorfni vlákna. Mají silikátový základ (SiO_2) s příměsí oxidů dalších kovů (Al, Ca, Mg, Pb, B). Vlastnosti vláken v podélném i příčném směru lze považovat za shodné. Při

sdužování vláken do pramenů může dojít k vzájemnému poškození, které dokáže zhoršit pevnost až na polovinu. Proto je nutné před dalším zpracování vlákna opatřit ochranným povlakem. Pro textilní zpracování se vlákna lubrikují vosky a mazivy. Pro kompozitní díly se vlákna opatřují přípravky pro zlepšení adheze k polymeru. Můžeme rozlišit mnoho druhů skel pro výrobu skleněných vláken. Z hlediska elektrotechniky jsou významná křemenná vlákna, která mají nízkou relativní permitivitu jako polymerní aramidová vlákna, ale mají oproti nim až o dva řády nižší ztrátový činitel při vysokých frekvencích. Dále pak např. tellurové sklo, které má velký index lomu světla a je tak vhodné pro optická vlákna a laserovou techniku. [10][11]

1.3.1.2 Uhlíková vlákna

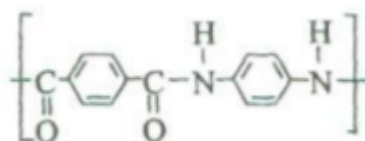
Krystalická vlákna. Aromatické roviny jsou orientovány ve směru podélné osy vlákna, díky tomu jsou vysoce anizotropní. V kolmém směru k rovinám šesterečné mřížky působí pouze Van der Waalovy vazby. Oproti tomu v aromatických rovinách jsou atomy vázány pevnými kovalentními vazbami. Mění se jak koeficient teplotní roztažnosti, tak tepelná a elektrická vodivost. Vhodnou orientací vláken lze měnit vlastnosti výsledného kompozitu a dosáhnout např. minimální teplotní roztažnosti v širokém rozsahu teplot.

Uhlík vytváří při kontaktu s kovem galvanický článek. Z toho důvodu by měly být kompozity s uhlíkovými vlákny odděleny od kovu nevodivým materiálem, např. kompozitem se skleněnými vlákny.

Oproti skleněným vláknům jsou ta uhlíková křehčí. Pro výrobu tkanin je potřeba menších průměrů, aby byla dosažena potřebná ohebnost. Stejně jako u skleněných vláken se i povrch uhlíkových vláken upravuje jak pro zvýšení odolnosti, tak pro zlepšení adheze k polymerní matici. [10][11]

1.3.1.3 Polymerní vlákna

Krystalická vlákna. Jejich velkou předností je malá hustota a velká pevnost v tahu. Pro kompozitní konstrukce by měly mít mechanické vlastnosti srovnatelné se skleněnými vlákny. Běžná polymerní vlákna (PA, PET, PAN) však mají pevnost i pružnost v tahu výrazně nižší. Vhodnými konstrukčními polymerními vlákny jsou aromatické polyamidy (aramidy, APA). Strukturální vzorec je uveden na Obr. 1.3



Obr. 1.3 strukturální vzorec aromatického polyamidu [9]

Vysoké pevnosti dosahují aramidová vlákna díky orientaci lineárních molekul v podélném směru. Aramidová vlákna pro textilní zpracování není třeba upravovat vzhledem k velké odolnosti, ale upravují se pro lepší adhezi vláken k matrici.

Další polymery, ze kterých se vyrábí vláknové výztuže, jsou např. PEI, PBI, PI. [11]

1.3.1.4 Keramická vlákna

Mají větší hustotu než uhlíková a polymerní vlákna. Jsou tepelně i chemicky odolné. Vlákna na bázi karbidu křemíku (SiC) jsou levná díky dobré dostupnosti výchozích surovin. Používají se s uhlíkovými, kovovými a keramickými matricemi v leteckém průmyslu a pro výrobky používané za vysokých teplot. Kontinuální vlákna oxidu hlinitého (Al_2O_3) a whiskery nitridu křemíku (Si_3N_4) jsou elektricky nevodivé a velmi odolné proti opotřebení. [10]

1.3.1.5 Přírodní vlákna z rostlin

Vlákna vytvářená na bázi rostlinných produktů. Používají se zejména celulózová vlákna, konopná vlákna, sisal, juta, bavln, len nebo bambus. Pro použití v kombinaci s nepolární matricí se vlákna modifikují polární složkou. Využívají se především v automobilovém průmyslu. Tento typ výztuže je levný, lehký a šetrný k výrobním prostředkům. [12]

1.3.2 Částicové výztuže

Částice se do matrice přidávají pro zlepšení tuhosti. Jejich velikost by neměla být příliš velká, aby negativně neovlivnily pevnost materiálu. U malých částic může naopak docházet k problémům s rovnoměrným rozptýlením částic v matrici. [112]

Oproti vláknové výztuži je podíl částicové výztuže v matrici výrazně nižší, bývá od několika málo procent do pár desítek procent. Částice bývají proti vláknům orientovány více nahodile. Většinou se využívají ke zlepšení konkrétních vlastností matrice nebo materiálu, např. zvýšení tuhosti, lepší teplotní stabilita, úprava tepelné a elektrické vodivosti. [14]

1.3.2.1 Výztuže polymerních matric

V kombinaci s polymerní matricí se užívají převážně anorganické částice. Částicové kompozity mají oproti čistému polymeru větší tvarovou stálost za tepla, menší tepelnou roztažnost a lepší tepelnou vodivost. Jedná se převážně o hlinitokřemičitany jako je mastek, kaolin, nebo slída a uhličitany, např. vápenec. [11]

Můžeme rozlišit dva typy částic podílející se na zlepšení vlastností pryskyřice – plniva a aditiva.

Plniva mohou tvořit až několik desítek % objemu. Tvarově mohou být izometrická (sférická) a neizometrická. Sférická plniva omezují náchylnost k praskání matrice. Mohou být plná nebo dutá. Jejich velikost by neměla být příliš velká, aby nedošlo ke snížení pevnosti materiálu. Z nesyfických plniv jde převážně o jehličky a destičky. Ty kromě vyztužení mohou polymer i zpevňovat.

Oproti plnivům přidání samotného aditiva do polymeru z něj nedělá kompozit. Aditiva neplní funkci výztuže, ale spíše omezují některé nežádoucí vlastnosti matrice. Může jít např. o separační činidla k lepšímu oddělení od forem při výrobě, pigmenty a barviva, nebo prostředky na snížení smrštění a snazší tvarování, které vyplňují různé trhlinky v materiálu. [14]

1.3.2.2 Výztuže keramických a kovových matric

Za účelem zpevnění a vyztužení kovové matrice se používají keramické nanočástice. Jedná se o různé syntetické oxidy, karbidy a nitridy. V kombinaci s keramickou matricí se užívají jehličkovité částice nebo whiskery. [11]

2 Využití kompozitních materiálů v konstrukci elektrických zařízení

Kompozitní materiály jsou důležité pro konstrukci elektrických zařízení. Některé možné způsoby využití uvádí například [15] [15] [17] a to

- Listy větrných turbín,
- prvky přenosové soustavy,
- desky plošných spojů,
- skladování vyhořelého jaderného paliva,
- radiační štít
- izolace elektrických zařízení

2.1 Kompozity jako konstrukční materiály v elektrotechnice

Použití materiálů je vázáno na specifické vlastnosti. Jak je patrné z výše uvedených příkladů, kompozitní materiály jsou vhodné pro využití jako konstrukční materiály.

2.1.1 Vyztužený beton

Materiálem pro stavbu některých prvků elektráren, rozveden, ale třeba i kontejnerů pro skladování jaderného paliva je železobeton. [16]

Železobeton je kompozitní materiál skládající se z betonové matrice, která má sice vysokou pevnost v tlaku, ale nízkou pevnost tahu. Výztuží jsou železné nebo ocelové pruty, které naopak mají výbornou pevnost v tahu. Aby byla výztuž dostatečně chráněna proti korozi, musí být pokryta vrstvou betonu minimálně o tloušťce 5 cm. [16]

Ve stavebnictví se v posledních letech rovněž objevuje trend nahrazování železné výztuže jinými materiály, jako jsou například polymery, skleněná nebo uhlíková vlákna. Tyto materiály jsou sice mnohdy dražší, ale mají i plno výhod. Hlavní výhodou pro konstrukce staveb je, že nekorodují, díky tomu je vyšší životnost kompozitního materiálu. Je zde ale i další výhodou pro některé aplikace a tou je neutralita v magnetickém poli, která je důležitá například pro budovy obsahující silné elektromagnety pro magnetickou rezonanci. [18]

2.1.2 FRP kompozity

Kromě těžkých stavebních prvků v elektrotechnice jsou rovněž potřeba konstrukční prvky pevné a zároveň lehké. I zde jde vhodné použít kompozitní materiály. Požadované vlastnosti splňují FRP kompozity. Jedná se o polymerní matrice vyztužené vlákny, typicky aramidovými, uhlíkovými, nebo skleněnými. [18]

Prvním takovým materiálem byl bakelit. Jde o reaktoplast vyráběný polykondenzací fenolu a formaldehydové pryskyřice. Výsledná hmota se před tvarováním obohacuje o různé většinou přírodní vláknové výtzuže. Bakelit se v minulosti hojně využíval v domácnostech jak v různých přístrojích, tak např. pro elektroinstalační prvky. [20]

Dnes se již využívá celá řada polymerních matric a vláknových výtzuží. Listy turbín větrných elektráren jsou konstruovány ze skleněných vláken, aramidová vlákna se používají např. pro desky plošných spojů nebo pro jádra transformátorů. [20][21]

FRP kompozity lze využít rovněž jako vodiče. Kabely vytvořené z uhlíkových vláken s polymerní matricí se používají ve výtazích výškových budov. Oproti ocelovým kabelům vykazují lepší vodivost a mnohem nižší hmotnost. [223]

2.2 Kompozity jako izolační materiály

Používané polymerní matrice kompozitních materiálů jsou vhodné díky svým elektroizolačním vlastnostem jako základ izolačních materiálů. Podrobněji se touto problematikou zabývá následující kapitola.

3 Použití kompozitních materiálů v elektroizolační technice

Kombinací rozdílných dielektrických materiálů lze vytvořit vysoce kvalitní izolační systémy. Běžně používané kompozity organických a anorganických materiálů jsou FRP kompozity, pásy na bázi slídy, křemičitany a slídy smíchané se syntetickými pryskyřicemi jako je například epoxydová pryskyřice používané k izolaci elektrických strojů a další. V transformátorech a kapacitorech se můžeme setkat se systémy olejem nebo voskem impregnovaného papíru. Nedávno vyvinutá jednoosá polyethylenová páska (UOPE) vykazuje výbornou kompatibilitu s oleji a zároveň výborné mechanické vlastnosti. Takovéto kompozitní izolační systémy využívají výhod jednotlivých materiálů a díky tomu je možné vytvářet systémy s lepšími teplotními, mechanickými a elektrickými vlastnostmi. [24]

3.1 Polymerní matrice

Polymerní organické izolační materiály používané v elektrotechnice mají velkou molekulovou hmotnost a skládají se z více polymerních složek spojených kovalentní vazbou. Tyto složky mohou být jak jednoduché atomy, tak složité molekuly. Polymer je získán reakcí dvou reakčních funkčních skupin, monomerů, za určitých podmínek.

Polymery lze třídit dle různých hledisek, jedním z nich je jejich reakce na teplo, zde rozlišujeme dvě skupiny materiálů, termoplasty a termosety.

3.1.1 Termoplastické polymery

Termoplastické polymery po zahřátí měknou a s ochlazováním se opět vrací do pevného stádia. Zahřívání a ochlazování může být na tyto materiály v určitém rozmezí teplot aplikováno opakovaně, aniž by nějak ovlivnilo jejich vlastnosti. Do této kategorie spadají polymery převážně s lineární strukturou. K elektroizolačním účelům se podle [24] používají polyetylen (PE), polyvinylchlorid (PVC), polypropylen (PP) a polyamid (PA). Průmyslové aplikace těchto materiálů odpovídají jejich vlastnostem. Tyto materiály mají poměrně nízkou teplotní odolnost a jejich vlastnosti se s rostoucí teplotou rychle zhoršují.

3.1.2 Termosetické polymery

Tyto polymery měknou při prvním zahřátí. Díky tomu se změní jejich struktura. Tento proces nazývá vytvrzení polymeru. Všechny monomery s jednou funkční skupinou vedou při polymerizaci na lineární strukturu a tím pádem vytvoření termoplastu. Monomery s více funkčními skupinami umožní jejich sesíťení a tím vznik termosetu. Toho bývá docíleno přidáním dalších aditiv, příkladem mohou být vulkanizační činidla aj.

Teplotní, mechanické a elektrické vlastnosti termosetických polymerů se výrazně odlišují. Všechny materiály však mají společné, že po vytvrzení se materiál teplotně velmi stabilizuje. Příkladem těchto polymerů jsou pryskyřice jako polyesterová pryskyřice, fenolová pryskyřice, silikonová pryskyřice a nejčastěji používaná epoxidová pryskyřice. Dále se v elektroizolační technice používají různé druhy gum, přírodní i syntetické. Ve vysokonapěťových kabelech se jedná třeba o XPLE – cross-linked polyethylene. [24]

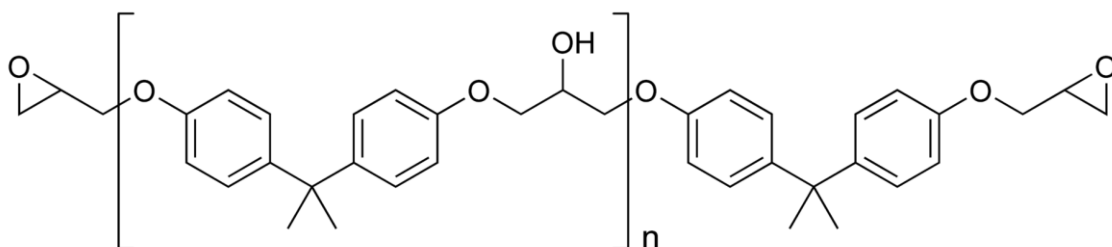
3.1.3 Epoxidová pryskyřice

Epoxidové sloučeniny jsou složeny z více než jedné molekuly epoxidové skupiny, která je dána atomem kyslíku spojeným s dvěma atomy uhlíku. Epoxidové pryskyřice jsou často smíchávány s různými vytvrzovacími činidly a dalšími přípravky ke zlepšení flexibility. Nejdůležitější EP používaná jako elektroizolační materiál je Bisphenol-A-Epoxyresin, který se připravuje reakcí acetonu a fenolu.

Pro vytvrzování se do epoxidu přidává velké množství anhydridů karboxylových kyselin a další zpevňující činidla. S těmito přísadami jsou teploty vytvrzení často vyšší než 100°C a doba vytvrzení může trvat i 24 hodin. V kombinaci s dusíkatými činidly lze naopak dosáhnout započetí vytvrzovacího procesu i za pokojové teploty. Díky tomu lze vytvářet různé druhy epoxidových pryskyřic s různými vlastnostmi.

Plnivem pro EP matrice jsou nejčastěji anorganické substance, například oxid křemičitý nebo oxid hlinitý.

Epoxidy jsou nepolární. Mají vysoké hodnoty stejnosměrné rezistivity a nízkou hodnotu ztrátového činitele v porovnání s polárními látkami jako je např. PVC. Při teplotách nad 100°C se tyto vlastnosti začínají rychle zhoršovat. Průběh ztrát v závislosti na teplotě je u epoxidu provázen typickým zvlněním, to je dáno polarizačními ztrátami. [24]

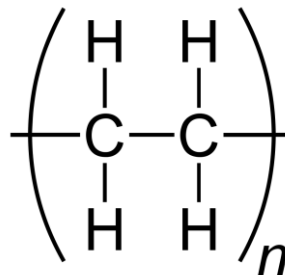


Obr. 3.1: Strukturální vzorec Bisphenol-A-Epoxyresin [25]

3.1.4 Polyetylen

Polyetylen má velmi špatné tepelné vlastnosti. Používá se k izolaci kabelů. Extruze probíhá při teplotách okolo 200°C. Na této teplotě polyetylen zmenší svůj objem až o 15%. Proto musí být následně velmi opatrně ochlazován. Vlastnosti polyetyleny lze vylepšit, XLPE – sesíťovaný polyetylen - dokáže odolávat kontinuální teplotní zátěži 90°C a krátkodobě dokonce vydrží až 250°C.

Na rozdíl od špatných teplotních vlastností má PE výborné elektroizolační vlastnosti. Jako nepolární dielektrikum má velmi nízký ztrátový činitel. Rovněž hodnota relativní permitivity je velmi nízká. PE má i vysokou rezistivitu. Síťováním pomocí silikonového oleje se povedlo vyrobit izolaci kabelů odolávající napětí nad 500kV. Nevýhodou je však snížená odolnost proti chemickému stárnutí. [24]

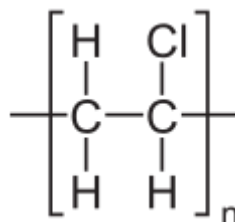


Obr. 3.2: Strukturální vzorec polyetyleny [26]

3.1.5 Polyvinylchlorid (PVC)

PVC je polární dielektrikum. Je to velmi tvrdý, křehký a teplotně nestabilní materiál. Z toho důvodu musí být doplněno o další přísady, aby mohlo být použito jako izolační materiál. Kompozity na bázi PVC obsahují změkčovače, stabilizátory a další plniva. Často se tyto materiály používají jako izolace nízkonapěťových kabelů, buď přímo jako izolace, nebo jako vnější ochranná vrstva. Takováto směs může obsahovat 68% PVC, 28% plastifikátoru, 3% stabilizátoru a 1% dalších aditiv. Stabilizátory slouží ke zlepšení odolnosti PVC hlavně proti vlivům počasí, zvláště proti degradaci vlivem UV záření. Dvoumocné olovo-sulfáty se používají ke zlepšení teplotní odolnosti, trojmocné pak ke zlepšení elektroizolačních vlastností. Pro zvýšení mechanické odolnosti je možné přidat malé množství plniva z křídý nebo keramiky. Mezi aditivy mohou být různé vosky pro zlepšení extruze. [24]

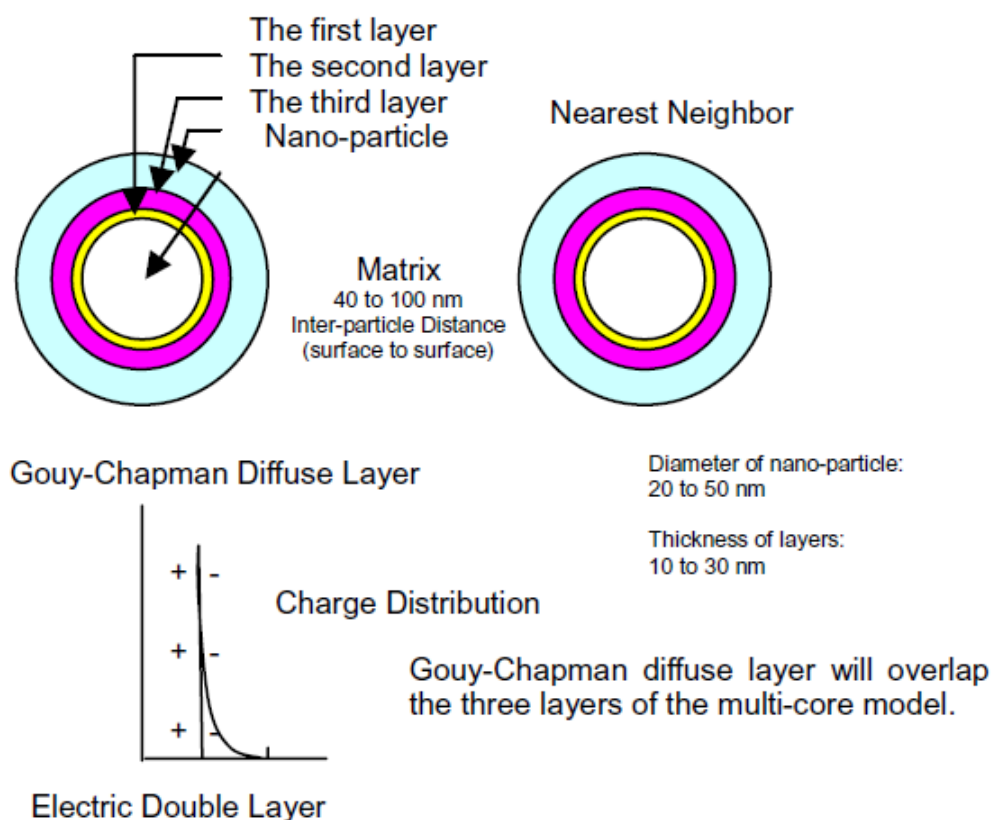
PVC má velké dielektrické ztráty, což jej omezuje striktně na nízkonapěťové aplikace.



3.1.

Obr. 3.3: Strukturální vzorec PVC[27]

Jak již bylo zmíněno výše, pro výsledné vlastnosti kompozitního materiálu je velmi důležitá synergie matrice a výztuže. Ten charakterizuje chování na rozhraní materiálů. Pro popis chování anorganického nanoplniva kulovitého tvaru umístěného v polymerní pryskyřici byl dle [27] vytvořen tzv. multi-core model. Jak jej můžeme vidět na obrázku Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Multi-core model. [27]

Model se skládá ze 4 hlavních vrstev:

1. Vázaná vrstva (první vrstva)
2. Hraniční vrstva (druhá vrstva)
3. Volná vrstva (třetí vrstva)
4. Gouy-Chapmanova vrstva

První vrstva odpovídá přechodové vrstvě pevně vázané k organické a anorganické substanci pomocí vazebních činitelů jako je silan.

Druhá vrstva je hraniční oblastí skládající se s polymerních řetězců silně vázaných a interagujících s první vrstvou a povrchem anorganické částice. Tloušťka této vrstvy může být 2 ž 9 nm. To může korespondovat se síťováním v polymeru.

Třetí vrstva je oblast volných vazeb a interakcí s druhou vrstvou. Je charakterizována odlišnými konformacemi v řetězci, dobrou pohyblivostí řetězců a dokonce volnými nebo krystalickými fázemi v polymerní matici.

Poslední vrstva je elektrická dvojvrstva, někdy nazývaná Gouy-Chapmanova difuzní vrstva. Ta je charakterizována formováním dipólového momentu. [27]

3.1.7 Nanokompozitní plniva

V souvislosti s polymerními maticemi se dostávají do popředí převážně 3 materiály. Prvním z nich jsou uhlíková vlákna. Ta obsahují fullereny ve tvaru trubic. Uhlíkové nanotrubic jsou šestiúhelníkového tvaru. Výsledný kompozit dosahuje výborného modulu pružnosti, pevnosti v tahu přesahující pevnost ocele a zároveň vykazuje velmi nízkou hmotnost, která je nižší než např. u hliníku. [29]

Další významným materiálem jsou částice oxidu křemičitého. Jedná se o tvrdou a křehkou látku, chemicky velmi odolnou. Využitím křemíkových nanočástic v PE matici se zabývá práce [30]. Výsledky ukazují, že absorpční proudy jsou závislé na tvaru částic plniva. Vnitřní rezistivita je zase závislá na hodnotě přiloženého napětí, pro menší hodnoty napětí vykazuje obohacená pryskyřice vyšší rezistivitu, ta se ale s napětím snižuje a pro hodnotu 500V je již obohacená pryskyřice horší. Pro vysoké hodnoty frekvence obohacená pryskyřice vykazuje nižší hodnoty permitivity.

Třetím důležitým materiálem je oxid hlinitý. Ten je charakteristický vysokou tvrdostí a tepelnou odolností. Jako nanoplnivo byl použit rovněž v experimentu [30] jako oxid křemičitý. Stejně jako SiO_2 je závislý na tvaru částic a rezistivita se měnila v závislosti na napětí. Při nízkém napětí byla hodnota rezistivita nepatrně lepší než u vzorků s SiO_2 .

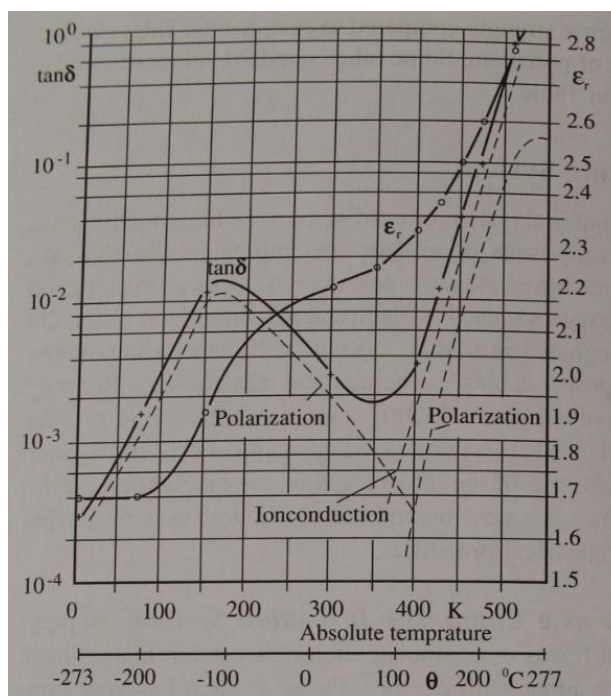
3.2 Elektroizolační materiály

Následující kapitola se zabývá některými konkrétními kompozitními elektroizolačními systémy.

3.2.1 Impregnovaný papír jako kompozitní izolační systém

Impregnovaný papír je jeden z nejdříve používaných kompozitních materiálů ve vysokonapěťové technice. Samotný papír má velice špatné dielektrické vlastnosti, ale po impregnaci olejem anebo jiným impregnantem se tyto vlastnosti významně zvýší. Papír obsahuje ve své struktuře mikrodutinky o poloměru 10^{-1} až 10^{-2} μm . Díky nim se zvětší efektivní povrch papíru a ten je tím pádem velmi nasávkavý.

Z elektroizolačního hlediska lze papír popsat jako kombinaci vzduchových mezer a celulózového dielektrika. Tomu odpovídají i hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele, které jsou nižší než u čisté celulózy. Průběhy těchto veličin v závislosti na teplotě jsou znázorněny na obrázku Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Průběh ztrátového činitele a relativní permitivity papíru v závislosti na teplotě. [24]

Impregnační papíru olejem nebo jiným impregnantem se vzduchové dutinky, dřívě naplněné vlhkým vzduchem, zaplní impregnačním činidlem. Tento nový kompozitní materiál má odlišné hodnoty ztrát i permitivity. Tyto vlastnosti jsou silně ovlivněny sušicím procesem, stupněm impregnace a stavem impregnačního činidla.

Ve vysokonapěťových kondenzátorech se kompozit na bázi papíru ještě doplňuje o složku polypropylenu, který má vyšší odolnost vůči elektrickému namáhání. [24]

3.2.2 Materiály izolačních desek

Izolační deskové materiály mají využití jak v nízkonapěťových aplikacích jako jsou rozvaděče nebo transformátory. Po správném vytvarování mohou poskytovat jak mechanickou ochranu, tak izolaci živých částí.

Desky jsou vyrobeny z vrstev papíru a stlačeny dohromady pomocí syntetické pryskyřice. Tyto materiály jsou známé jako tvrzené papíry a mohou být vyráběny i v jiných formách, např. válcových a jiných tvarů. Elektrické vlastnosti se liší v závislosti na typu použité pryskyřice i na jejím obsahu. Tvrzený papír je odolnější vůči elektrickému namáhání než čisté polymerní pryskyřice nebo porcelán, jeho vlastnosti jsou ale výrazně ovlivněny teplotou a to již od 20°C. Výhodou je, že tyto systémy si zachovávají své mechanické vlastnosti až do teplot kolem 120°C a jsou odolné vůči olejům. [24]

Další typ deskové izolace je tvořen vrstveným sulfáto-celulózovým papírem. Není použito žádné pojivo a jednotlivé vrstvy jsou spojeny stlačením za vysoké teploty. Elektrické vlastnosti takové desky jsou srovnatelné s kvalitními papíry. Relativní permitivita je 2,7 a po impregnaci minerálním olejem může dosahovat elektrické pevnosti až 100kV/mm. [**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**]

Dalším takovýmto syntetickým deskovým materiálem je Bakelit, zmíněný již v kapitole 2.1.2.

3.2.3 FRP jako izolační materiály

První takto vyrobený izolační materiál byl představen již roce 1915. Šlo o fenolovou pryskyřici vyztuženou azbestovými vlákny. V roce 1943 byly vyvinuty GFRP – glass fiber reinforced plastics – plasty zesílené skleněnými vlákny, matricí byla nesaturovaná polyesterová pryskyřice. Díky vysoké mechanické a elektrické odolnosti se další vývoj zaměřoval právě na tyto elektroizolační materiály. Dnešní GFRP používají jako matrice jak termosetické pryskyřice jako je epoxidová, fenolová, silikonová, vinylesterová, polyester a polyimidová, tak řadu termoplastů. [24]

3.3 Využití kompozitů v izolaci točivých elektrických strojů

Izolační systémy elektrických strojů lze rozdělit na vysokonapěťové a nízkonapěťové.

Nízkonapěťové systémy tvoří izolace vodičů, vyložení drážek a impregnant. Izolace vodičů závisí na pracovním napětí a jejich využití ve stroji. Může být tvořena smaltem, ovnutím bavlnou, skleněnými vlákny, nebo jinou kombinací pevné i nanášené izolace. Vyložení drážky chrání vodič před poškozením o stěnu drážky, může být vyrobeno z lepenky nebo například Nomexu. Nízkonapěťové systémy se impregnují obvykle máčením, zaplavováním nebo zakapáváním. Impregnační laky jsou různého složení, např. jednosložkové polyesterové pryskyřice, polyesterimidové pryskyřice nebo dvousložkové polyuretanové látky. [, 21]

Vysokonapěťové systémy jsou vyráběny dvojí technologií. Jedná se o metody zvané resin-rich a VPI. Obě metody jsou dosti rozdílné a přináší jak různé výhody, tak i nevýhody a omezení v provedení, materiálech i aplikaci. [**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**]

3.3.1 Systém resin-rich

Název resin-rich lze volně přeložit jako systém, který již obsahuje pryskyřici. Jedná se v podstatě o tříložkový kompozit. Výchozí předimpregnovaný materiál je ve formě polotovaru obvykle s 30 – 40 % pojiva. Na připravené vodivé části se z tohoto polotovaru vytvoří kompaktní izolační vrstva o požadované tloušťce. Takto připravené vinutí se dále vkládá do stroje.

Nosná část je tvořena skleněnou tkaninou ze stáčených vláken. Běžná tkanina má tloušťku 0,14mm. Novější technologie spočívá v použití vláken srovnaných do roviny. Díky tomu klesne tloušťka na 0,12mm. Takto vyrobený materiál vykazuje stejné mechanické vlastnosti jako stáčená vlákna. Elektrická pevnost tohoto materiálu je však až o 7% vyšší a zároveň vykazuje nižší dielektrické ztráty. [17, 31]

Izolační bariéra bývá nejčastěji tvořena kalcinovaným slídovým papírem, který je proti nekalcinovanému hutnější, pevnější a méně nasákový. Pojivo, které váže obě složky dohromady, může být např. reaktoplastické, novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Materiál je dodáván v tzv. B stavu, tj. částečně vytvrzený. To je velmi důležité, aby byl suchý, nelepivý a bylo možné jej skladovat co nejdéle. Výsledný materiál má tloušťku většinou od 0,15 do 0,2 mm. [17]

Resin-rich izolaci lze navíjet dvojím způsobem. Buď kontinuálně, kdy se materiál ve formě pásky navíjí po celé délce tyče i v čelech, nebo lze zvolit diskontinuální způsob. Při něm je rovná část tvořena foliovým materiálem a páska je použita v čelech. V obou

případech se nanáší materiálu o něco více, jelikož je při navíjení snížena tloušťka pásky díky stlačení. [17,31]

Vytvrzování pryskyřice je prováděno ve formách, které umožňují stlačení na požadovaný rozměr. Pro tento způsob se využívá katalyzátorů přidávaných do pryskyřice řádově v jednotkách %. Ty mají za úkol způsobit započetí polymerní reakce při dosažení určité teploty. Tato vlastnost je velmi důležitá i pro skladování materiálu.

Při dosažení gelační teploty dojde k uzavření forem a stlačení na požadovaný tvar. Přesné vystižení tohoto momentu je velmi důležité. Jakmile začne probíhat reakce, stlačení již není možné. Krátce před dosažením gelace je možné předformovat izolaci nižším tlakem. Samotné vytvrzení závisí na typu použité pryskyřice a tloušťce izolace. Většinou probíhá při teplotách 160 – 170 °C po dobu řádově hodin. Důležitý je proces ochlazování. To musí být dostatečně pozvolné, aby nedošlo k defektům kvůli rozdílné rychlosti chladnutí jádra a izolace. V extrémních případech by mohlo dojít i k oddělení jádra od izolace. Takto zhotovená cívka je připravena k zasazení do stroje. [17]

3.3.2 Systém VPI

Systém VPI – vakuum pressure impregnation – vakuově tlaková impregnace. Základem tohoto systému je slídová páska, která je při impregnačním procesu prosycena impregnantem. Tato technologie se používá v aplikacích, kde je potřeba dosáhnout dokonalého impregnačního systému, který zpevní vinutí při dobrých izolačních i tepelných vlastnostech, jako jsou například trakční motory.

Základem tohoto systému by měl být savý izolant, který je stejně jako u resin-rich tříslůžkový kompozitní materiál. Nosná složka může být tvořena skelnou tkaninou, polyesterovým rounem nebo polyimidovou folií. Pojivo obsahuje jen malou část kompozitu. Zpravidla ho bývá do 7% a musí být dále kompatibilní s impregnantem. Důležitým parametrem je savost materiálu, jelikož musí dojít k dobrému prosycení mnohdy až 10 vrstev pásky. Z tohoto důvodu se používá nekalcinovaná slída, která je hrubšího zrnění. Ta splňuje i další požadavky, jako je ohebnost a pevnost v tahu, aby nedošlo k porušení materiálu při navíjení.

K impregnaci pásky se používají bezrozpouštědlové pryskyřice, jako je epoxidová, polyesterová a silikonová pryskyřice. Ty vykazují dobré elektrické a mechanické vlastnosti, mají krátkou vytvrzovací dobu a jsou šetrné k životnímu prostředí. Tyto pryskyřice lze použít pro teplotní třídy 180(H) a 200.

Tento systém je náročný na technologii. Impregnace probíhá v tlaku a vakuotěsném kotli se zásobníkem impregnantu. Impregnace začíná sušením pro odstranění vlhkosti, následně je odstraněn zbytek těkavin a vlhkosti vakuováním v kotli, následuje zaplavení

impregnantem a střídání vakua přetlakem. Po vyjmutí z kotle jsou předměty vysušeny a následně vytvrzovány za normálního tlaku. Touto metodou lze impregnovat jak celky, tak části elektrických zařízení. [17]

3.3.3 Porovnání systému VPI a resin-rich

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.4.2 technologie VPI je velmi náročná na technologické zařízení, zvláště pokud se jedná o velké stroje, jako jsou turboalternátory.

Předností VPI je homogenita systému. Zatímco u technologie resin-rich může docházet k nehomogenitám, u VPI nejsou. VPI navíc umožňuje zkrácení cívek při zachování výkonu a tím celkovou úsporu materiálu až o 6%.

Z hlediska následné údržby systému, technologie VPI prakticky neumožňuje opravy, na rozdíl od resin-rich, kde lze snadno vyjmout a vyměnit. [17]

4 Možnosti modifikace vybraného materiálu nanopřísadou

Hlavním cílem experimentální části bylo nalezení optimálního plnění pryskyřice oxidem křemičitým SiO_2 . Pro tuto práci byla vybrána epoxydová pryskyřice EpoxyLite 3750LV, katalogový list s podrobnými specifikacemi této pryskyřice je v příloze D. Po nalezení tohoto optimálního byly dále zkoumány možnosti využití polyamidových a polyamidových nanovláknin v kombinaci s touto pryskyřicí o daném plnění SiO_2 aditivem.

4.1 Výroba vzorků

Aby bylo možné zkoumat vlastnosti nového kompozitního materiálu, bylo nutné nejprve vyrobit několik sad vzorků. Vzhledem k časové náročnosti výroby a následného měření a zároveň potřebě mít dostatečně velký soubor pro měření hodnot byly vyrobeny sady po pěti kusech. Vzorky jsou čtvercové o hraně délky 100mm a tloušťce cca 1mm. Dalším požadavkem na vzorky byla rovnoměrnost rozvrstvení pryskyřice, minimalizace nečistot a vzduchových bublin a především rovnoměrná disperze nanočástic SiO_2 .

4.1.1 Vzorky pro nalezení optimálního množství SiO_2

Pro nalezení optimálního množství plniva bylo vyrobeno celkem 8 sad vzorků. První sada je referenční, obsahující pouze čistou pryskyřici. Další sady obsahují aditivum v koncentraci 0,25%; 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,5% a 3%.

Postup výroby jedné sady byl následující:

1. Alespoň den předem bylo dáno aditivum do pece se sušičkou k vysušení.
2. Odvážení cca 85g pryskyřice. Toto množství odpovídá potřebě pryskyřice na 5 vzorků po 15g a dostatečné rezervě pro manipulaci při výrobě. Vzhledem k dobré viskozitě nemusela být pryskyřice předem zahřívána.
3. Zahřátí pryskyřice na 80°C pro snížení viskozity na minimum. (20-30 min)
4. Navážení daného množství SiO_2 nanočástic.
5. Rozmíchání nanočástic v pryskyřici. (6h, 600 ot/min)
6. Vakuování pryskyřice. Intenzivním rozmícháváním vzniklo v pryskyřici nadměrné množství vzduchových bublin, které bylo potřeba odstranit, aby nesnižovali kvalitu vyrobených vzorků. (3-4h, 60 ot/min)

7. Rozežhátí pece a teflonových podkladů na 110°C.
8. Nalítí vzorků do forem. Každý vzorek obsahuje 15g pryskyřice. Formu tvoří teflonový podklad a víko a silikonový rámeček, který přilepený k podkladu pomocí silikonové pasty. Rámeček je čtvercový a svými rozměry 100x100x1mm definuje výsledný rozměr vyrobeného vzorku.
9. Nahřátí vzorků na 110°C pro zvýšení viskozity. Po nahřátí nalitých vzorků následuje kontrola rozlité ve formách, případné opravy, odstranění případných vzduchových bublin.
10. Předvytvrzení vzorků při teplotě 135°C. Přibližně po 45 min pryskyřice dosáhne stavu gelace a formy mohou být zakryty horním dílem.
11. Vytvrzování 6h, 140°C.
12. Dotvrzení 2h, 180°C.

Jelikož sada vzorků čisté pryskyřice neobsahuje nanočástice, byly při výrobě této sady vynechány kroky 4 a 5. Rovněž doba vakuování mohla být zkrácena, jelikož pryskyřice bez intenzivního míchání neobsahuje velké množství navázaných vzduchových bublin. Ohledně vytvrzování pryskyřice je datasheet [32] benevolentní. Jedinou podmínkou pro řádný průběh všech chemických dějů je nepřesáhnout v první hodině vytvrzování teplotu 140°C. Další parametry záleží spíše na dalších přidaných materiálech a technologických možnostech výroby. Je možné vytvrzování urychlit při tvrzení a do 160°C. V případě potřeby je možné pryskyřici dále dotvrzovat v rozsahu teplot 160-180°C. K této možnosti bylo při výrobě přistoupeno s ohledem na následující měření vlastností materiálů.

4.1.2 Vzorky s nanovlákninami

K ověření využití nanovláknin byla vyrobena jedna sada vzorků pro každou z nich. Postup přípravy pryskyřice je shodný jako při přípravě vzorků bez tkanin, odlišuje se až následná vlastní výroba vzorků.

Příprava tkaniny probíhá v následujících krocích:

1. Nastřihání čtverců o hraně 80mm.
2. Vakuování tkaniny. Po dobu míchání pryskyřice (8-9h) při teplotě 110°C.

Výroba vzorků s vlákninou probíhá následovně:

1. Nalítí 9g pryskyřice do formy.
2. Vložení tkaniny. Rozložení tkaniny, odstranění záhybů a případných vzduchových bublin.
3. Dolítí 6g pryskyřice. Tkanina by měla být dobře zalita v pryskyřici.
4. Po zahřátí na 110°C případné opravy vzorků, lepší usazení vlákniny do pryskyřice.

Vzhledem k tomu, že ani jeden typ nanovlákniny nemá speciální teplotní požadavky na vytvrzování, je postup vytvrzení shodný s postupem pro vzorky bez nanovláknin.

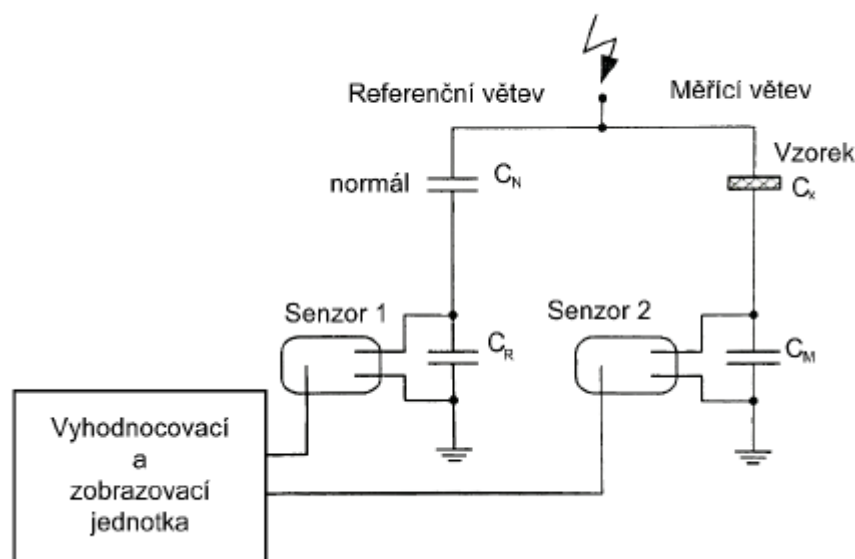
4.2 Měření vybraných vlastností

Aby bylo možné určit optimální plnění pro danou pryskyřici, bylo nutné pro všechny sady vzorků změřit vybrané dielektrické vlastnosti. Na vzorkách byly změřeny absorpční a resorpční proudy, ze kterých lze následně určit polarizační indexy a vnitřní rezistivita. Dalším měřením bylo určení teplotní závislosti ztrátového činitele a relativní permitivity. Na závěr byla provedena rovněž jedna destruktivní zkouška a to změření elektrické pevnosti. Všechny zkoušky proběhly podle požadavků příslušných norem ČSN IEC 93, ČSN IEC 250 a ČSN EN 60243-1 ed. 2.

4.2.1 Měření ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ a relativní permitivity ϵ_r v závislosti na teplotě

Relativní permitivita je nejdůležitější charakteristikou dielektrika. Lze ji vyjádřit jako poměr kapacity kondenzátorů s daným dielektrikem a dielektrikem vakuum. Při polarizaci dielektrika ve střídavém poli je důležitou charakteristikou rovněž ztrátový úhel δ . Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ lze v praxi použít pro rychlé posouzení kvality dielektrika. Obecně lze říci, že dobrý izolační materiál má ztráty menší než 10^{-3} . Tento pohled je však velmi zjednodušený. Hodnota ztrátového činitele se mění v závislosti na napětí, teplotě i frekvenci. [17]

K měření těchto veličin se v dnešní době používá automatických můstků, které vycházejí z principu Sheringerova můstku a umožňuje zobrazit $\text{tg}\delta$, C_x , U a další veličiny. Schéma takového můstku je znázorněno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát. Převzato z [17]

nemusí být úplně vyvážen, protože měří fázový úhel mezi napětími na nízkonapěťových impedancích. Napětí na kondenzátorech C_M a C_R je pomocí senzorů 1 a 2 digitalizováno a následně přenášeno do počítače. Z měření těchto dvou napětí je určen jak ztrátový činitel, tak hodnota kapacity vzorku C_X . [17]

Pro měření zvoleného dielektrika byl použit automatický můstek s elektrodoým systémem od firmy Tettex Instruments. Měření bylo provedeno v rozmezí teplot 30 – 150 °C.

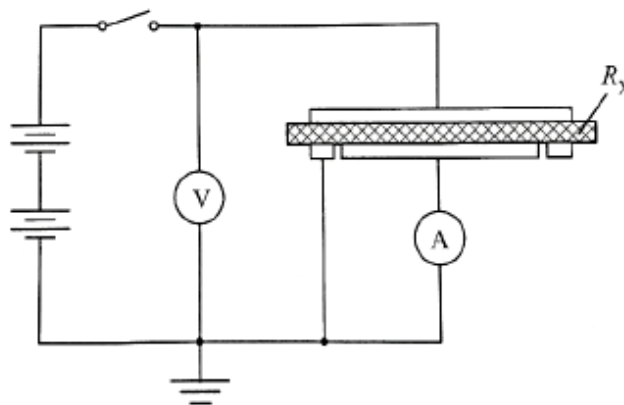
4.2.2 Absorpční a resorpční charakteristiky

Z výsledků měření absorpční a resorpční charakteristiky lze určit mnoho parametrů izolantu, jako například izolační odpor R_x , vnitřní a povrchovou rezistivitu ρ_v a ρ_p nebo polarizační indexy pi_1 a pi_{10} . Tyto charakteristiky byl měřeny voltampérovou metodou využívající tříelektrodoý měřicí systém.

Izolační odpor R_x je poměr stejnosměrného napětí přivedeného na elektrody a celkového proudu mezi elektrodami v daném čase po připojení napětí.

Vnitřní odpor je poměr stejnosměrného napětí mezi elektrodami a ustáleného proudu mezi elektrodami.

Vnitřní rezistivita ρ_v je pak poměr intenzity elektrického pole a hustoty ustáleného vnitřního proudu. Vypočte se z měřených hodnot na základě vnitřního odporu a parametrů elektrodového systému podle rovnice 4.1. [17]



Obr. 4.2: Voltampérová metoda pro měření odporu izolantů. Převzato z [Chyba! Nenalezen

$$\rho_v = R_x \cdot \frac{A}{h} \quad [\Omega \cdot m] \quad (4.1)$$

kde ρ_v je vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot m$], R_x je vnitřní odpor [Ω], A je efektivní plocha měřené elektrody [m^2] a h je průměrná tloušťka vzorku.

Polarizační index vyjadřuje podíl absorpčních proudů. Jednominutový polarizační index pi_1 je podílem proudu v 15. a 60. sekundě. Desetiminutový polarizační index pi_{10} je pak podílem proudů v první a desáté minutě. Polarizační indexy se vypočtou podle vzorce 4.2

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad [-] \quad (4.2)$$

kde R_x , R_x jsou odpory v 15. a 60. vteřině [Ω], i_{15} , i_{60} jsou absorpční proudy a i_{∞} jsou vodivostní ustálené proudy [A].

Převažuje-li v izolantu hodnota ustáleného vodivostního proudu, blíží se hodnota polarizačního indexu 1. To nastává hlavně u znečištěné a navlhle izolace. Naopak u suché izolace se více uplatňuje složka i_a a vodivostní proud je malý. Díky tomu je hodnota polarizačního indexu vyšší.

K měření těchto parametrů byl použit tříelektrodový měřicí systém s napěťovým zdrojem High Voltage Supply 240A Keithley a počítačem řízený Solid State Electrometer 610C. Použité napětí bylo 500V. Před měřením vnitřního odporu je rovněž nutné neutralizovat

povrchové a vnitřní náboje. Z toho důvodu byly vzorky umístěny alespoň 16h předem mezi uzemněné měděné elektrody.

4.2.3 Měření dielektrické pevnosti

Norma ČSN EN 60243-1 ed. 2 [32] zabývající se dielektrickou pevností a průrazným napětím uvádí požadavky na zkoušky E_p . Elektrická pevnost záleží na intenzitě i délce trvání přiloženého napětí.

Můžeme rozlišit různé typy napěťových zkoušek právě na základě intenzity napětí, tvaru signálu a délce expozice. K určení elektrické pevnosti byla zvolena krátkodobá zkouška s rychlým nárůstem napětí. K průrazu má dojít mezi 10. a 20. vteřinou měření. Dále je uvedena řada zkoušeného napětí 100V, 200V, 500V, 1000V, 2000V atd. z níž se vybere vhodná hodnota nárůstu zkoušeného napětí.

Z hlediska četnosti měření je minimum stanoveno na 5 průrazů. Pokud je po 5 průrazech rozptyl hodnot příliš velký (některá hodnota se odlišuje od průměru o více než 15%) je provedeno dalších 5 měření a E_p je určena průměrem hodnot z těchto 10 měření. **[Chyba! nalezen zdroj odkazů.,32]**

Kvůli vysokým hodnotám průrazného napětí vzorků byl elektrodový systém ponořen do olejové lázně, aby se zamezilo možnému přeskoku napětí vzduchem.

4.3 Určení optimálního plnění

Na všech vyrobených vzorcích bylo změřeno 5 veličin charakterizujících vlastnosti dané izolace. K určení optimálního plnění je nutné výsledky pro jednotlivá plnění porovnat a vybrat, které je nejlepší. Vzhledem k tomu, že se jedná o elektrickou izolaci, byla jako nejdůležitější parametr zvolena elektrická pevnost E_p . Naměřené hodnoty elektrické pevnosti jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty elektrické pevnosti

vz.	0%	0.25%	0.50%	0.75%	1%	1.25%	1.50%	3%
E_p (kV/mm)	37.00	38.58	40.97	45.23	41.11	41.11	38.79	38.03
σ	1.24	2.73	3.76	4.31	3.44	3.44	2.32	3.09
v	3.3%	7.1%	9.2%	9.5%	8.4%	8.4%	6.0%	8.1%

Další změřenou vlastností je hodnota ztrátového činitele $\text{tg}\delta$. Naměřené hodnoty v rozsahu teplot 30-150°C jsou vidět v tabulce Tab. 4.2. Přehled pro vybrané teploty 30, 90 a 150°C je uveden v tabulce Tab. 4.3.

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty ztrátového činitele v závislosti na teplotě

T(°C)	0%	0.25%	0.50%	0.75%	1%	1.25%	1.50%	3%
30	0.0054	0.0032	0.0038	0.0038	0.0033	0.0041	0.0042	0.0044
40	0.0069	0.0037	0.0044	0.0044	0.0038	0.0048	0.0049	0.0053
50	0.0111	0.0048	0.0061	0.0060	0.0052	0.0071	0.0072	0.0077
60	0.0389	0.0136	0.0164	0.0175	0.0156	0.0242	0.0191	0.0198
70	0.1184	0.0496	0.0545	0.0491	0.0590	0.0644	0.0461	0.0476
80	0.2705	0.1354	0.1466	0.1406	0.1663	0.1510	0.1209	0.1275
90	0.5713	0.3144	0.3570	0.3680	0.4033	0.3322	0.2894	0.3150
100	1.0250	0.6372	0.7812	0.8602	0.7993	0.7316	0.7124	0.7642
110	1.1405	0.8560	0.9218	1.1612	1.1675	0.9980	1.1362	1.2748
120	1.5083	0.9026	0.8602	1.0740	1.3492	0.9076	1.0440	1.1868
130	2.4975	1.1822	1.0482	1.3126	1.9454	1.0848	1.0720	1.2334
140	3.9525	1.6986	1.5130	1.9980	3.0474	1.5968	1.4922	1.7738
150	6.0400	2.5440	2.2602	3.1240	4.5522	2.6420	2.3418	2.6380

Vzhledem k velkému množství dat byl dále výběr zúžen na 3 vybrané teploty, 30°C, což byla nejnižší společná teplota pro všechna měření. Vybraná pryskyřice je v praxi používána k izolaci elektrických strojů. Vzhledem k tomu byla jako další referenční hodnota zvolena teplota 90°C, která odpovídá provozní teplotě takové izolace. Jako poslední byla vybrána teplota 150°C, která je společná nejvyšší měřené teplota. Možnosti měřicího přístroje i materiálu by sice umožňovaly i vyšší teploty, ale při dané tloušťce materiálu a přitlaku na vzorek se vzorky při vyšším teplotním namáhání začaly mírně deformovat. Na tomto menším vzorku dat je rovněž ukázán rozptyl hodnot jednotlivých vzorků.

Tab. 4.3: Srovnání ztrát na vybraných teplotách

T(°C)	0%	0.25%	0.50%	0.75%	1%	1.25%	1.50%	3%
30	0.0054	0.0032	0.0038	0.0038	0.0033	0.0041	0.0042	0.0044
v	9%	19%	8%	6%	16%	24%	13%	11%
90	0.5713	0.3144	0.3570	0.3680	0.4033	0.3322	0.2894	0.3150
v	16%	27%	13%	8%	14%	28%	25%	14%
150	6.0400	2.5440	2.2602	3.1240	4.5522	2.6420	2.3418	2.6380
v	27%	46%	35%	43%	32%	64%	64%	48%

Společně se ztrátami byla změřena rovněž hodnota relativní permitivity ϵ_r v závislosti na teplotě. Výsledky tohoto měření ukazuje tabulka Tab. 4.4 resp. Tab. 4.5 pro vybrané teploty.

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty relativní permitivity v závislosti na teplotě

T(°C)	0%	0.25%	0.50%	0.75%	1%	1.25%	1.50%	3%
30	3.470	3.039	3.248	3.178	2.941	3.314	3.371	3.521
40	3.546	3.103	3.306	3.234	3.016	3.377	3.436	3.591
50	3.652	3.178	3.383	3.309	3.179	3.468	3.527	3.681
60	3.992	3.373	3.603	3.547	3.511	3.746	3.765	3.915
70	4.693	3.757	4.020	3.945	4.096	4.145	4.067	4.236
80	5.948	4.361	4.658	4.720	5.067	4.918	4.612	4.811
90	8.093	5.446	5.732	5.849	6.785	6.122	5.511	5.773
100	13.280	7.574	7.953	8.010	10.285	8.187	7.061	7.291
110	25.333	12.531	15.007	14.857	17.913	14.471	11.940	12.466
120	37.114	20.500	24.651	27.766	29.513	26.208	22.718	23.791
130	45.535	28.255	32.592	38.229	42.115	36.204	34.470	46.426
140	50.736	34.427	38.829	46.234	47.862	44.158	43.466	42.913
150	54.011	41.148	43.923	51.183	52.176	50.477	49.139	48.816

V tomto případě již z důvodu přehlednosti nejsou uvedeny hodnoty rozptylu. Ten však přibližně odpovídá rozptylu při měření ztrát.

Tab. 4.5: Srovnání permitivity na vybraných teplotách

T(°C)	0%	0.25%	0.50%	0.75%	1%	1.25%	1.50%	3%
30	3.470	3.039	3.248	3.178	2.941	3.314	3.371	3.521
90	8.093	5.446	5.732	5.849	6.785	6.122	5.511	5.773
150	54.011	41.148	43.923	51.183	52.176	50.477	49.139	48.816

Poslední dva změřené parametry materiálu jsou polarizační index a vnitřní rezistivita. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.6.

Pro oba výše zmíněné parametry, relativní permitivitu a ztrátový činitel, je patrný velký nárůst s rostoucí teplotou izolace. Hodnota tg δ je při provozní teplotě stroje 90°C je již v rozmezí 0,3-0,4 což není příliš dobré. Při teplotách nad 150°C dokonce pro některé vzorky hodnota roste v řádu jednotek.

Tab. 4.6: Polarizační indexy a vnitřní rezistivita

-	0%	0.25%	0.50%	0.75%	1%	1.25%	1.50%	3%
ρ_i	1.419	2.060	1.971	1.960	1.684	1.943	2.133	2.098
ν	1.5%	7.6%	2.5%	1.5%	19.7%	3.6%	5.3%	8.8%
$\rho_{i_{10}}$	1.365	1.778	1.717	1.712	1.528	1.737	1.825	1.878
ν	3.2%	6.9%	1.3%	0.7%	16.0%	2.4%	3.5%	9.7%
$\rho_v (\Omega \cdot m)$	6.97E+10	2.04E+11	1.47E+11	1.41E+11	5.01E+12	1.08E+11	1.87E+11	1.62E+11
ν	7.6%	49.8%	18.6%	9.3%	144.4%	27.7%	26.7%	39.6%

Polarizační indexy vybraného dielektrika jsou mírně pod hodnotou 2, což lze ještě považovat za celkem dobrý izolační materiál. Navíc je patrné že po přidání nanočástic se hodnota oproti čistému vzorku zvyšuje o 0,4-0,5.

Ze všech výše uvedených měření je patrné, že se po obohacení nanopřísadou vlastnosti vybrané pryskyřice výrazně zlepšily. Přesto však výsledky nejsou jednoznačné. Jako optimální plnění bylo nakonec zvoleno 0,75%, které vykazuje nejlepší hodnotu elektrické pevnosti při relativně dobrém rozptylu hodnot. Ztráty sice nejsou nejlepší, ale při teplotě 90°C, kterou lze uvažovat jako provozní, jsou výsledky měření nejkonzistentnější. Hodnoty polarizačních indexů jsou pro všechna plnění podobná a toto měření jen podporuje fakt, že se vlastnosti po přidání nanopřísadu zlepšují. Vnitřní rezistivita vychází sice o řád lépe pro plnění 1% než pro všechna ostatní, ale vzhledem k velkému rozptylu hodnot nelze tento výsledek považovat za směrodatný.

4.4 Možnosti využití nanovláknin

Ve chvíli, kdy bylo určeno optimální plnění pryskyřice nanopřísadou, byly provedeny další experimenty. Jejich cílem bylo určit, zda se daná pryskyřice již obohacená o silikové nanočástice hodí k vytvoření kompozitní izolace za použití nanovláknin. K tomuto účelu byly vybrány polyamidové a polyamidové tkaniny.

Vzhledem k nižší vypovídací hodnotě a zároveň vysoké časové náročnosti nebyly již na těchto vzorkách změřeny polarizační indexy ani vnitřní rezistivita. Srovnání vzorků pryskyřice obohacené pouze o siliku s dalšími materiály s tkaninami je patrné z následujících tabulek i z grafu Graf 4-1.

Tab. 4.7: Srovnání ztrát vzorků s nanovlákninami

T (°C)	0,75%	0,75% + PA	0,75% + PI
30	0.0038	0.0055	0.0043
90	0.3680	0.2104	0.1382
150	3.1240	2.8180	1.9160

Tab. 4.8: Srovnání relativní permitivity vzorků s nanovlákninami

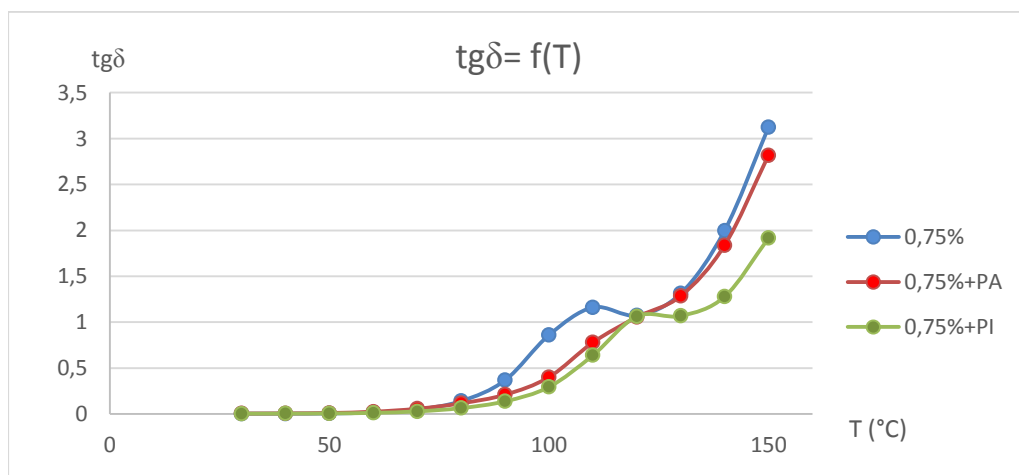
T (°C)	0,75%	0,75% + PA	0,75% + PI
30	3.178	3.303	3.304
90	5.849	5.426	4.689
150	51.183	35.759	34.120

Relativní permitivita i ztráty se po přidání nanovláknin výrazně zlepšily, zvláště pak při vyšších teplotách, jak ukazují tabulky Tab. 4.7 a Tab. 4.8. Pro tyto parametry se zdá, že PI vlákna je výhodnější.

Tab. 4.9: Srovnání elektrické pevnosti vzorků s nanovlákninami

vz.	0,75%	0,75% + PA	0,75% + PI
E_p (kV/mm)	45.23	48.96	46.40
σ	4.31	5.58	5.36
v	9.5%	11.4%	11.6%

Elektrická pevnost se rovněž mírně zlepšila, jak je patrné z tabulky Tab. 4.9 avšak vzorky s PI v tomto případě dopadly hůře než PA. To bylo způsobeno špatnou kvalitou dodané tkaniny, která se více projevila až při měření elektrických průrazů.

Graf 4-1: Závislost ztrátového činitele na teplotě pro vzorky s plněním 0,75% SiO₂ a s nanovlákninami

Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá využitím kompozitních materiálů v konstrukci elektrických zařízení. Ačkoli lze kompozity využívat jako konstrukční materiály, největší perspektiva těchto materiálů je v použití jakožto izolantů, jelikož je možné kombinovat rozdílné vlastnosti jednotlivých složek.

Dobrou perspektivu v tomto směru mají rovněž nanokompozity. Použitím různých přísad lze vyrobit kvalitnější izolační materiály s dalšími výhodnými vlastnostmi. Díky tomu lze například výrazně snížit celkovou tloušťku elektrické izolace elektrických zařízení a tím u velkých strojů rovněž výrazně snížit rozměry i cenu. V kabelovém průmyslu lze s výhodou využít aditiva, která budou působit jako retardéry hoření.

Experimentální část práce je zaměřena na možnosti využití nanočástic k vylepšení elektroizolačního materiálu. Vlastnosti zvolené epoxydové pryskyřice byly postupně měněny přidáváním nanočástic oxidu křemičitého od 0,25% až do 3%. Pro všechny plnění se vybrané dielektrické vlastnosti (vnitřní rezistivita, polarizační indexy, relativní permitivita, ztrátový činitel, elektrická pevnost) zlepšili. Jako nejdůležitější parametr byla zvolena elektrická pevnost, ta se pro plnění 0,75% zlepšila přibližně o 15%.

Pro vzorky s plněním 0,75% SiO₂ byly dále zkoumány možnosti využití nanovláknin. Konkrétně šlo o polyamidovou a polyimidovou textilii. S polyamidem se následně elektrická pevnost zlepšila téměř o dalších 10%. Polyimid tak dobré zlepšení nepřinesl i přes to, že by měl naopak vykazovat výrazně lepší elektroizolační vlastnosti než PA. To bylo dáno nízkou kvalitou dodané textilie.

Další možnosti výzkumu v této oblasti bych viděl hlavně ve zkoumání možnosti uplatnění dalších kombinací materiálů. Konkrétně pro tento experiment by bylo vhodné navázat podrobnějším zkoumáním disperze částic oxidu křemičitého v kombinaci s dalšími nanotkaninami i konvenčními izolačními materiály a následně navázat použitím takto obohacené pryskyřice ve stroji a zkoumat vlastnosti mimo laboratorní podmínky. Pokud by se tato kombinace ukázala jako výhodná, bylo by možné začít hledat cenově a časově přijatelné možnosti přípravy a zavedení do průmyslové výroby.

Seznam literatury a informačních zdrojů

1. Chung, Deborah D. L. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
2. NAZERAN, Nastaran a Jafarsadegh MOGHADDAS. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application. Journal of Non-Crystalline Solids [online]. 2017, 461, 1-11 [cit. 2017-05-10]. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.037. ISSN 00223093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022309317300510>
3. Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
4. Havel Composites [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
5. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Historie. [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
6. What Is a Composite Material? [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://www.thoughtco.com/what-is-a-composite-820406?_ga=2.86111320.1351902579.1493934878-1747242615.1492934337
7. Gay D.: Reinforced Plastics. Matériaux composites, Hermes, Paris, 1997
8. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Matrice. [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>
9. BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
10. Ptáček, Luděk. Nauka o materiálu. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s ISBN 80-7204-568-3
11. Glass-ceramic - Wikipedia [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Glass-ceramic>
12. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Vlákna. [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
13. Kompozitní materiály [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
14. https://www.irsm.cas.cz/materialy/oddeleni/5/bulletin/2006_bulletin.pdf
15. Kompozitní materiály [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf

16. Introduction to FRP Composites [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://composite.about.com/od/applications/a/Introduction-To-Frp-Composites.htm>
17. MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
18. Železobeton – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezobeton>
19. Reinforced_concrete – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Reinforced_concrete
20. Bakelite – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bakelite>
21. BARNES, R.H. a E.V. MOROZOV. Structural optimisation of composite wind turbine blade structures with variations of internal geometry configuration. *Composite Structures* [online]. 2016, 152, 158-167 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.05.013. ISSN 02638223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822316304688>
22. Nomex – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nomex>
23. KONE UltraRope - The benchmark in high-rise technology and innovation [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://download.kone.com/ultrarope/index.htm?rdrsrc=/ultrarope&rdrtrg=http://download.kone.com/ultrarope/index.htm>
24. ARORA, Ravindra. a Wolfgang. MOSCH. High voltage and electrical insulation engineering. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-60961-3.
25. Epoxy – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>
26. Polyethylene – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>
27. Polyvinyl_chloride – Wikipedie [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride
28. TANAKA, T. Dielectric nanocomposites with insulating properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2005, 12(5), 914-928 [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522186. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1522186/>

29. S. Anandhan a S. Bandyopadhyay. Polymer Nanocomposites: From Synthesis to Applications, Nanocomposites and Polymers with Analytical Methods, Dr. John Cuppoletti (Ed.), ISBN: 978-953-307-352-1, InTech, Dostupné z:
<http://www.intechopen.com/books/nanocomposites-and-polymers-with-analyticalmethods/polymer-nanocomposites-from-synthesis-to-applications>
30. PLESA, ILONA, FLORIN CIUPRINA, PETRU V. NOTINGHER a DENIS PANAITESCU. *INORGANIC NANOFILLER EFFECTS ON RESISTIVITY AND ABSORPTION CURRENTS IN LOW DENSITY POLYETHYLENE NANOCOMPOSITES* [online]. , 8 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://revue.elth.pub.ro/upload/91012304IPLESA_pp277_284.pdf
31. COGEBI a.s.: *RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí točivých strojů třídy F (155 °C)* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf
32. ČSN EN 60243-1 ED. 2. Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech. 2. 2014.

Přílohy

Příloha A – Naměřené hodnoty relativní permitivity

Tab. 0.1 Hodnoty relativní permitivity pro čisté vzorky

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	průměr
30	3.545	3.734	3.199	3.4017	3.469925
40	3.62	3.805	3.284	3.4732	3.54555
50	3.719	3.905	3.397	3.585	3.6515
60	4.058	4.285	3.577	4.047	3.99175
70	4.7	5.034	3.995	5.044	4.69325
80	5.932	6.402	4.946	6.51	5.9475
90	7.878	8.473	6.872	9.15	8.09325
100	13.381	12.758	11.486	15.493	13.2795
110	26.855	29.213	18.87	26.393	25.33275
120	37.196	51.944	25.266	34.049	37.11375
130	45.293	68.398	29.607	38.841	45.53475
140	49.579	79.916	33.336	40.113	50.736
150	55.462	81.016	37.001	42.566	54.01125

Tab. 0.2 Hodnoty relativní permitivity pro 0,25%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.444	2.594	3.053	3.395	2.709	3.039
40	3.496	2.645	3.112	3.466	2.797	3.1032
50	3.563	2.707	3.181	3.544	2.894	3.1778
60	3.762	2.871	3.369	3.761	3.1	3.3726
70	4.225	3.012	3.73	4.209	3.607	3.7566
80	4.855	3.399	4.317	4.892	4.341	4.3608
90	5.899	4.041	5.286	6.236	5.767	5.4458
100	7.965	5.253	7.102	8.704	8.848	7.5744
110	16.636	7.665	11.525	14.046	12.782	12.5308
120	29.411	9.787	18.777	27.853	16.672	20.5
130	38.533	11.084	24.131	47.595	19.93	28.2546
140	44.196	12.084	28.124	65.629	22.101	34.4268
150	51.725	13.672	31.613	83.877	24.854	41.1482

Tab. 0.3 Hodnoty relativní permitivity pro 0,5%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.392	3.254	3.257	2.808	3.529	3.248
40	3.454	3.313	3.318	2.857	3.589	3.3062
50	3.536	3.395	3.392	2.924	3.67	3.3834
60	3.768	3.645	3.596	3.093	3.915	3.6034
70	4.198	4.116	4.01	3.389	4.388	4.0202
80	4.833	4.79	4.645	3.915	5.109	4.6584
90	5.852	5.941	5.805	4.792	6.269	5.7318
100	7.926	7.666	8.473	6.974	8.726	7.953
110	15.578	12.132	16.921	12.381	18.025	15.0074
120	28.096	24.621	24.388	15.253	30.896	24.6508
130	36.236	40.446	29.574	17.845	38.859	32.592
140	42.058	53.947	33.065	20.381	44.696	38.8294
150	46.116	63.749	36.203	22.966	50.579	43.9226

Tab. 0.4 Hodnoty relativní permitivity pro 0,75%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	2.839	3.265	3.504	3.515	2.767	3.178
40	2.885	3.327	3.559	3.584	2.816	3.2342
50	2.949	3.409	3.639	3.672	2.878	3.3094
60	3.137	3.643	4	3.882	3.074	3.5472
70	3.581	3.992	4.333	4.301	3.519	3.9452
80	4.49	4.616	5.038	4.917	4.539	4.72
90	5.63	5.681	6.018	5.951	5.963	5.8486
100	7.95	8.22	7.891	7.521	8.47	8.0104
110	14.948	16.593	14.989	12.643	15.114	14.8574
120	24.386	27.998	30.557	29.168	26.722	27.7662
130	30.518	35.376	40	49.437	35.814	38.229
140	34.491	41.448	48.841	66.347	40.043	46.234
150	37.582	44.586	54.877	75.488	43.383	51.1832

Tab. 0.5 Hodnoty relativní permitivity pro 1%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	2.393	3.163	2.807	3.005	3.339	2.941
40	2.439	3.202	2.843	3.179	3.418	3.016
50	2.498	3.255	3.292	3.319	3.531	3.179
60	2.624	3.435	3.951	3.754	3.792	3.511
70	3.013	3.897	5.01	4.323	4.238	4.096
80	3.599	4.656	6.757	5.262	5.06	5.067
90	4.446	6.045	10.236	6.633	6.567	6.785
100	6.251	8.464	19.928	8.262	8.518	10.285
110	8.597	12.721	36.312	15.642	16.294	17.913
120	10.553	16.394	48.752	34.435	37.429	29.513
130	15.010	18.763	60.466	53.790	62.547	42.115
140	16.724	19.909	62.948	63.790	75.941	47.862
150	19.243	20.691	68.182	70.190	82.576	52.176

Tab. 0.6 Hodnoty relativní permitivity pro 1,25%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.674	3.657	2.395	3.288	3.554	3.3136
40	3.746	3.714	2.438	3.357	3.632	3.3774
50	3.851	3.802	2.495	3.447	3.746	3.4682
60	4.168	4.086	2.622	3.693	4.162	3.7462
70	4.744	4.533	2.809	4.033	4.604	4.1446
80	5.882	5.365	3.19	4.689	5.462	4.9176
90	7.639	6.551	3.888	5.767	6.767	6.1224
100	10.697	8.641	4.903	7.887	8.805	8.1866
110	18.982	16.367	6.307	14.865	15.835	14.4712
120	38.345	31.005	7.49	22.83	31.369	26.2078
130	55.537	42.533	8.284	29.627	45.039	36.204
140	69.792	50.465	9.241	35.221	56.069	44.1576
150	78.373	58.379	10.559	40.035	65.039	50.477

Tab. 0.7 Hodnoty relativní permitivity pro 1,5%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.588	3.594	3.446	2.931	3.294	3.3706
40	3.647	3.663	3.53	2.984	3.358	3.4364
50	3.732	3.755	3.639	3.064	3.447	3.5274
60	4.01	4.03	3.904	3.225	3.658	3.7654
70	4.363	4.374	4.26	3.404	3.932	4.0666
80	5.014	4.996	4.845	3.773	4.432	4.612
90	6.145	6.015	5.868	4.347	5.182	5.5114
100	8.125	7.597	7.053	5.715	6.817	7.0614
110	16.785	11.706	10.308	9.626	11.276	11.9402
120	30.799	23.39	23.484	12.946	22.972	22.7182
130	39.319	37.857	46.702	14.47	34.001	34.4698
140	46.829	47.049	65.875	15.717	41.862	43.4664
150	49.534	53.589	77.544	17.369	47.658	49.1388

Tab. 0.8 Hodnoty relativní permitivity pro 3%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.26	3.782	3.599	3.601	3.362	3.5208
40	3.349	3.833	3.673	3.671	3.428	3.5908
50	3.43	3.913	3.776	3.766	3.519	3.6808
60	3.601	4.175	4.038	4.011	3.751	3.9152
70	3.808	4.535	4.398	4.364	4.076	4.2362
80	4.243	5.197	5.032	4.93	4.652	4.8108
90	5.046	6.286	6.083	5.829	5.621	5.773
100	6.646	8.157	7.484	6.833	7.333	7.2906
110	11.908	15.034	12.958	8.913	13.515	12.4656
120	18.491	28.224	26.917	19.517	25.808	23.7914
130	23.336	94.174	38.354	41.079	35.187	46.426
140	26.312	44.936	47.091	55.82	40.407	42.9132
150	30.3	49.532	50.611	69.289	44.347	48.8158

Tab. 0.9 Hodnoty relativní permitivity pro 0,75%+PA

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.507	3.317	3.621	3.060	3.012	3.303
40	3.560	3.381	3.666	3.123	3.062	3.358
50	3.657	3.493	3.750	3.197	3.126	3.445
60	3.835	3.766	3.918	3.347	3.302	3.634
70	4.120	4.220	4.175	3.733	3.539	3.957
80	4.624	5.054	4.666	4.111	4.027	4.496
90	5.430	6.419	5.502	4.933	4.847	5.426
100	6.700	8.379	6.737	6.260	6.069	6.829
110	8.416	14.175	8.357	8.516	8.957	9.684
120	13.627	21.466	13.481	14.476	14.075	15.425
130	24.094	28.269	25.148	20.866	17.844	23.244
140	34.465	34.935	34.285	24.658	20.802	29.829
150	44.019	39.869	44.297	27.489	23.123	35.759

Tab. 0.10 Hodnoty relativní permitivity pro 0,75%+PI

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	3.154	3.508	3.396	3.443	3.018	3.304
40	3.203	3.529	3.430	3.495	3.069	3.345
50	3.258	3.582	3.484	3.564	3.128	3.403
60	3.375	3.706	3.595	3.710	3.239	3.525
70	3.554	3.908	3.774	3.948	3.417	3.720
80	3.849	4.271	4.120	4.324	3.728	4.058
90	4.404	4.914	4.808	5.005	4.316	4.689
100	5.309	6.055	6.003	6.098	5.387	5.770
110	6.508	7.563	7.172	7.550	7.235	7.206
120	9.991	12.299	9.947	10.912	11.063	10.842
130	16.522	21.766	20.439	22.084	18.867	19.936
140	22.257	27.800	30.000	33.527	26.294	27.976
150	26.328	33.527	36.553	42.212	31.980	34.120

Příloha B – Naměřené hodnoty ztrát

Tab. 0.11 Hodnoty ztrát pro čisté vzorky

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	průměr
30	0.00495	0.00532	0.00621	0.00520	0.00542
40	0.00621	0.00649	0.00827	0.00656	0.00688
50	0.00991	0.00989	0.01330	0.01130	0.01110
60	0.03680	0.03640	0.02660	0.05580	0.03890
70	0.11900	0.12300	0.08160	0.15000	0.11840
80	0.29200	0.29600	0.21900	0.27500	0.27050
90	0.63700	0.64300	0.41300	0.59200	0.57125
100	1.16000	1.42000	0.60100	0.91900	1.02500
110	1.19000	1.67000	0.54200	1.16000	1.14050
120	1.65000	1.65000	0.72300	2.01000	1.50825
130	2.69000	2.46000	1.33000	3.51000	2.49750
140	4.25000	3.65000	2.41000	5.50000	3.95250
150	6.27000	6.10000	3.64000	8.15000	6.04000
160	8.70000	10.70000	5.00000	11.80000	9.05000

Tab. 0.12 Hodnoty ztrát pro 0,25%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00397	0.00241	0.00325	0.00372	0.00244	0.00316
40	0.00461	0.00273	0.00373	0.00438	0.00280	0.00365
50	0.00620	0.00371	0.00482	0.00568	0.00383	0.00485
60	0.01490	0.01320	0.01320	0.01580	0.01110	0.01364
70	0.06100	0.02760	0.04530	0.05440	0.05980	0.04962
80	0.16500	0.08600	0.12700	0.13800	0.16100	0.13540
90	0.41300	0.19600	0.27500	0.37000	0.31800	0.31440
100	0.95400	0.33400	0.56300	0.85500	0.48000	0.63720
110	1.19000	0.36300	0.72800	1.15000	0.84900	0.85600
120	1.04000	0.25600	0.61000	0.97700	1.63000	0.90260
130	1.49000	0.27600	0.59800	0.84700	2.70000	1.18220
140	2.22000	0.41700	0.78600	1.04000	4.03000	1.69860
150	3.70000	0.64000	1.14000	1.62000	5.62000	2.54400
160	5.52000	0.96000	1.77000	2.81000	7.24000	3.66000

Tab. 0.13 Hodnoty ztrát pro 0,5%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00392	0.00351	0.00391	0.00324	0.00438	0.00379
40	0.00456	0.00402	0.00459	0.00367	0.00509	0.00439
50	0.00639	0.00546	0.00636	0.00510	0.00720	0.00610
60	0.01800	0.01530	0.01620	0.01360	0.01900	0.01642
70	0.05830	0.04800	0.05750	0.04240	0.06620	0.05448
80	0.14500	0.12300	0.15900	0.12500	0.18100	0.14660
90	0.37100	0.29500	0.38900	0.28600	0.44400	0.35700
100	0.95100	0.67300	0.76800	0.51400	1.00000	0.78120
110	1.17000	1.14000	0.70800	0.42100	1.17000	0.92180
120	1.08000	1.16000	0.59800	0.34300	1.12000	0.86020
130	1.38000	1.16000	0.78800	0.36300	1.55000	1.04820
140	2.04000	1.38000	1.18000	0.53500	2.43000	1.51300
150	3.04000	1.90000	1.76000	0.83100	3.77000	2.26020
160	4.47000	2.75000	2.72000	1.23000	6.11000	3.45600

Tab. 0.14 Hodnoty ztrát pro 0,75%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00353	0.00398	0.00417	0.00389	0.00325	0.00376
40	0.00414	0.00461	0.00473	0.00446	0.00387	0.00436
50	0.00564	0.00632	0.00659	0.00596	0.00532	0.00597
60	0.01370	0.01840	0.02560	0.01470	0.01490	0.01746
70	0.04550	0.05010	0.05930	0.04580	0.04460	0.04906
80	0.14400	0.13900	0.15200	0.12200	0.14600	0.14060
90	0.39600	0.37000	0.37800	0.31800	0.37800	0.36800
100	0.93700	0.81700	0.90300	0.86400	0.78000	0.86020
110	1.17000	0.91400	1.26000	1.54000	0.92200	1.16120
120	1.28000	0.73400	1.19000	1.43000	0.73600	1.07400
130	2.07000	0.92500	1.38000	1.40000	0.78800	1.31260
140	3.56000	1.43000	2.06000	1.86000	1.08000	1.99800
150	5.72000	2.10000	3.05000	3.15000	1.60000	3.12400
160	8.11000	3.26000	4.06000	4.69000	2.21000	4.46600

Tab. 0.15 Hodnoty ztrát pro 1%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00260	0.00346	0.00427	0.00303	0.00337	0.00335
40	0.00284	0.00383	0.00484	0.00361	0.00388	0.00380
50	0.00364	0.00494	0.00662	0.00511	0.00544	0.00515
60	0.00829	0.01490	0.01730	0.01871	0.01890	0.01562
70	0.04120	0.05810	0.05440	0.07140	0.07000	0.05902
80	0.12400	0.16800	0.16400	0.19136	0.18400	0.16627
90	0.32000	0.35800	0.42200	0.46056	0.45600	0.40331
100	0.55100	0.58300	1.04000	0.89725	0.92500	0.79925
110	1.04000	0.80200	1.82000	1.06560	1.11000	1.16752
120	2.00000	1.40000	1.43000	0.91816	0.99800	1.34923
130	3.06160	2.46000	1.62000	1.19540	1.39000	1.94540
140	4.80480	3.85000	2.70000	1.77240	2.11000	3.04744
150	6.89350	5.45000	4.22000	2.84750	3.35000	4.55220

Tab. 0.16 Hodnoty ztrát pro 1,25%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00472	0.00484	0.00233	0.00397	0.00458	0.00409
40	0.00553	0.00568	0.00259	0.00473	0.00554	0.00481
50	0.00798	0.00856	0.00354	0.00709	0.00846	0.00713
60	0.02780	0.02500	0.01060	0.02160	0.03590	0.02418
70	0.08430	0.07130	0.03100	0.05610	0.07940	0.06442
80	0.19300	0.16900	0.09010	0.13800	0.16500	0.15102
90	0.41800	0.39000	0.17700	0.31200	0.36400	0.33220
100	0.94100	0.94000	0.25300	0.68400	0.84000	0.73160
110	1.51000	1.24000	0.26000	0.78000	1.20000	0.99800
120	1.56000	1.09000	0.24100	0.64700	1.00000	0.90760
130	1.90000	1.40000	0.34600	0.68800	1.09000	1.08480
140	2.89000	2.04000	0.56700	0.95700	1.53000	1.59680
150	5.27000	3.26000	1.01000	1.46000	2.21000	2.64200

Tab. 0.17 Hodnoty ztrát pro 1,5%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00495	0.00420	0.00435	0.00340	0.00408	0.00420
40	0.00585	0.00490	0.00511	0.00401	0.00487	0.00495
50	0.00863	0.00685	0.00742	0.00606	0.00727	0.00725
60	0.02380	0.01980	0.01930	0.01460	0.01790	0.01908
70	0.06040	0.04880	0.04680	0.03240	0.04190	0.04606
80	0.16500	0.12700	0.11900	0.08570	0.10800	0.12094
90	0.41400	0.29800	0.28900	0.20700	0.23900	0.28940
100	0.99600	0.65700	0.81900	0.41600	0.67400	0.71240
110	1.29000	1.15000	1.78000	0.43100	1.03000	1.13620
120	1.21000	1.09000	1.81000	0.27000	0.84000	1.04400
130	1.72000	1.04000	1.66000	0.24000	0.70000	1.07200
140	2.73000	1.38000	2.19000	0.31800	0.84300	1.49220
150	4.43000	1.99000	3.53000	0.50900	1.25000	2.34180
160	6.51000	2.63000	5.29000	0.74800	1.85000	3.40560

Tab. 0.18 Hodnoty ztrát pro 3%

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.00362	0.00502	0.00446	0.00462	0.00447	0.00444
40	0.00469	0.00582	0.00522	0.00547	0.00533	0.00531
50	0.00676	0.00816	0.00764	0.00773	0.00804	0.00767
60	0.01530	0.02300	0.02000	0.01920	0.02130	0.01976
70	0.03180	0.05930	0.04850	0.04530	0.05310	0.04760
80	0.08460	0.15400	0.13700	0.12500	0.13700	0.12752
90	0.24100	0.35700	0.33700	0.32100	0.31900	0.31500
100	0.51500	0.87100	0.83400	0.84600	0.75500	0.76420
110	0.64400	1.22000	1.32000	2.13000	1.06000	1.27480
120	0.45900	1.11000	1.14000	2.41000	0.81500	1.18680
130	0.39100	1.51000	1.27000	2.14000	0.85600	1.23340
140	0.48900	2.50000	1.82000	2.79000	1.27000	1.77380
150	0.76000	3.63000	2.75000	4.02000	2.03000	2.63800

Tab. 0.19 Hodnoty ztrát pro 0,75%+PA

T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.0059	0.0055	0.0057	0.0050	0.0053	0.0055
40	0.0077	0.0070	0.0070	0.0061	0.0069	0.0069
50	0.0132	0.0119	0.0105	0.0093	0.0108	0.0111
60	0.0271	0.0305	0.0227	0.0201	0.0262	0.0253
70	0.0613	0.0701	0.0482	0.0548	0.0527	0.0574
80	0.1130	0.1510	0.1060	0.0972	0.1170	0.1168
90	0.1970	0.2650	0.1910	0.1930	0.2060	0.2104
100	0.3710	0.5360	0.3540	0.3520	0.3950	0.4016
110	0.7890	0.9940	0.8250	0.6580	0.6310	0.7794
120	1.2500	1.1700	1.4200	0.7820	0.6540	1.0552
130	1.4500	1.8500	1.5000	0.8340	0.7920	1.2852
140	1.8400	2.8300	2.1000	1.1500	1.2700	1.8380
150	2.6200	4.3400	3.2400	1.8700	2.0200	2.8180

Tab. 0.20 Hodnoty ztrát pro 0,75%+PI

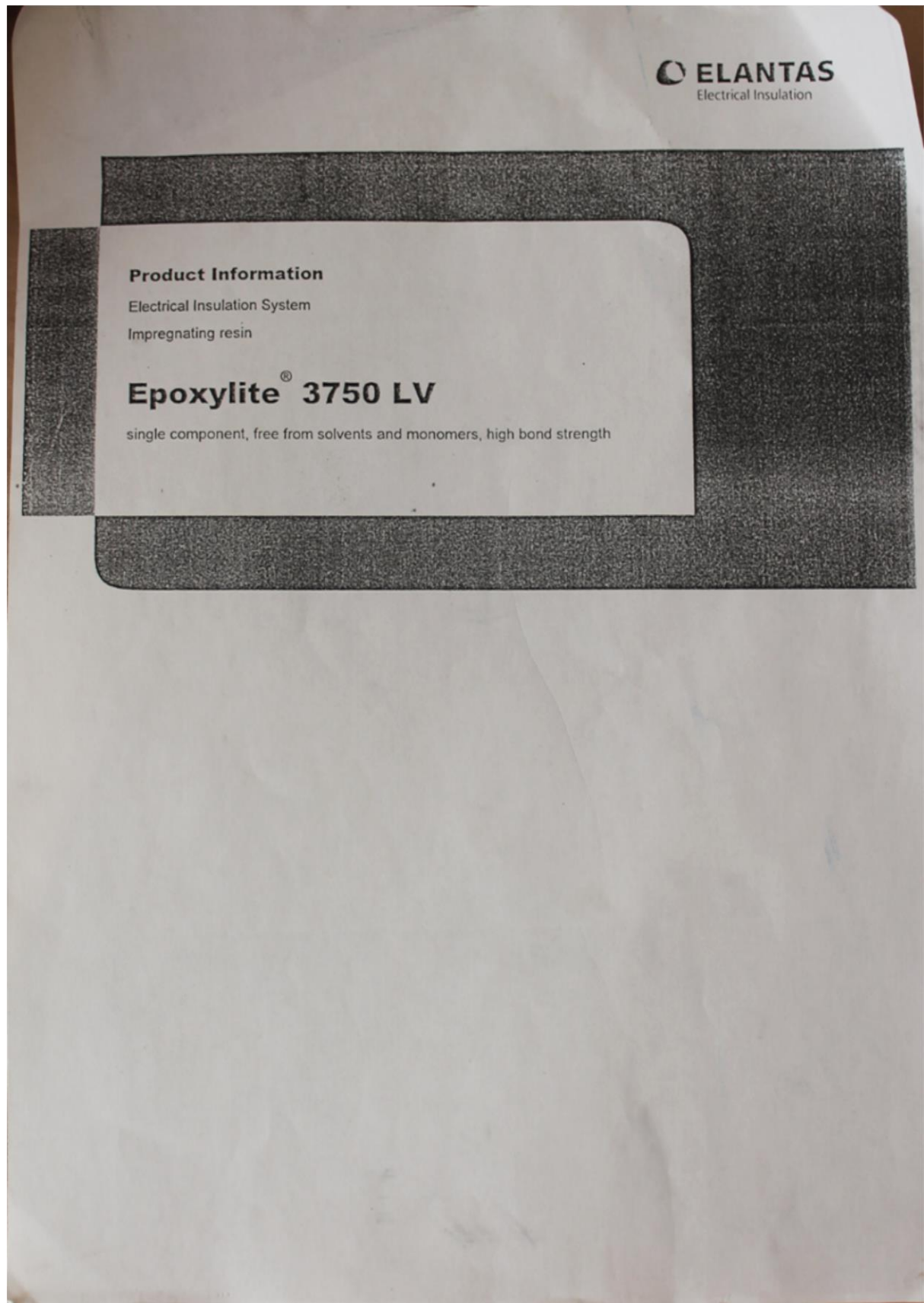
T	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5	průměr
30	0.0039	0.0046	0.0044	0.0044	0.0040	0.0043
40	0.0044	0.0052	0.0050	0.0051	0.0047	0.0049
50	0.0057	0.0070	0.0067	0.0067	0.0061	0.0064
60	0.0117	0.0148	0.0128	0.0135	0.0116	0.0129
70	0.0250	0.0354	0.0279	0.0301	0.0245	0.0286
80	0.0583	0.0771	0.0643	0.0688	0.0561	0.0649
90	0.1180	0.1550	0.1470	0.1450	0.1260	0.1382
100	0.2410	0.3120	0.3470	0.3000	0.2710	0.2942
110	0.5180	0.6690	0.6850	0.7160	0.6090	0.6394
120	0.8620	1.0200	1.2300	1.2800	0.9270	1.0638
130	0.7980	1.0400	1.2300	1.3000	0.9760	1.0688
140	0.8320	1.4800	1.4900	1.4400	1.1500	1.2784
150	1.2300	2.3300	2.1400	2.1400	1.7400	1.9160

Příloha C – Naměřené hodnoty průrazů

Tab. 0.21: Naměřené hodnoty průrazů

		1	2	3	4	5	průměr
0%	Up	36.87	35.11	42.46	39.65	51.01	
	d	1.01	0.91	1.16	1.13	1.339	
	Ep	36.61	38.58	36.60	35.09	38.10	37.00
0.25%	Up	40.01	54.68	45.69	40.07	60.6	
	d	1.07	1.303	1.298	1.096	1.456	
	Ep	37.53	41.96	35.20	36.56	41.62	38.58
0.50%	Up	37.80	39.95	45.04	52.9	51.65	
	d	1.10	0.986	1.079	1.259	1.12	
	Ep	34.46	40.52	41.74	42.02	46.12	40.97
0.75%	Up	42.11	57.13	50.8	47.32	48.21	
	d	1.12	1.234	1.126	0.925	1.052	
	Ep	37.73	46.30	45.12	51.16	45.83	45.23
1%	Up	41.49	44.95	51.71	49.25	54.18	
	d	1.20	1.068	1.191	1.191	1.227	
	Ep	34.52	42.09	43.42	41.35	44.16	41.11
1.25%	Up	45.81	47.46	47.72	52.15	50.05	
	d	1.26	1.302	1.407	1.43	1.305	
	Ep	36.36	36.45	33.92	36.47	38.35	36.31
1.50%	Up	55.48	48.48	49.26	44.61	57.6	
	d	1.34	1.266	1.304	1.266	1.396	
	Ep	41.40	38.29	37.78	35.24	41.26	38.79
3%	Up	37.91	4.20E+01	4.32E+01	4.27E+01	4.97E+01	
	d	1.11	1.151	1.127	1.128	1.143	
	Ep	34.03	36.50	38.32	37.85	43.44	38.03
PA	Up	51.84	48.108	67.104	62.256	67.584	
	d	1.22	1.062	1.382	1.056	1.365	
	Ep	42.49	45.30	48.56	58.95	49.51	48.96
PI	Up	53.05	51.816	61.476	59.868	58.356	
	d	1.19	1.268	1.087	1.297	1.334	
	Ep	44.69	40.86	56.56	46.16	43.75	46.40

Příloha D – Katalogový list EpoxyLite 3750 LV





Product description

EpoxyLite® 3750 LV is a mono-component Epoxy impregnating resin with the advantages of low processing viscosity and high bond strength at higher temperatures. The very good penetration of this material into the windings ensures a real complete impregnation.

EpoxyLite® 3750 LV can be used for machines in thermal class H. UL (Underwriters Laboratories) have registered the product under File-No. E 204181.

Areas of application

- motors of all sizes
- transformers
- different kinds of coils

Processing methods

EpoxyLite® 3750 LV can be processed by dip-coating as well as by the vacuum-pressure impregnating procedure (VPI).

The following pretreatment will be recommended: The workpieces should be free from matter that might affect the hardening process of the impregnating resin adversely. This would cover oils and grease (from plate packages), waxes and paraffins, which are used as a lubricant for drawing-in wires.

Before impregnation the workpieces should be preheated up to 135° C (for VPI-procedure up to 120° C), then cooled down to 50° C (for VPI-procedure 50 to 65° C). Otherwise the stability of the impregnation bath's content will deteriorate.

When dip-coating is used, the workpieces will be dipped into the resin until bubbling stops, then follows the drainage for 20 to 30 minutes.

Using the VPI-procedure it will be necessary to set the workpieces under vacuum (1 to 3 mbar) at least for 30 minutes, in some cases for 1 hour. After elapse of this time the EpoxyLite® 3750 LV is transferred from the storage tank into the vacuum chamber while maintaining a vacuum and the entire workpieces are covered with resin.

Subsequently, the vacuum chamber is filled with nitrogen or dry air to a pressure of 5 to 6 bar. The holding time at pressure depends on the size of the workpieces to be impregnated. In practice, pressure holding periods of 30 to 90 minutes have proved sufficient.

After relieving the pressure and transferring the impregnating resin back to the storage tank, the excessive resin is allowed to drip off from the workpieces for about 30 minutes, before the impregnating resin is finally cured at elevated temperatures.

Curing conditions

At the beginning of the drying process, an object temperature of 155 to 160° C should not be surpassed during the first 1 -2 hours. Due to the ensuing lower stability of the hardener contained in EpoxyLite 3750® LV, higher temperatures could lead to an insufficient hardening of the material.

After these 1-2 hours of curing at a maximum temperature of 160° C have expired, curing / tempering at higher temperatures can be started. It is recommended to use a final curing / tempering at an object temperature of 180° C at least one hour - if permitted regarding the other insulating materials used.

If a post-curing at higher temperatures should not be permitted due to the other insulating materials used, then it will be recommended to cure as follows:

- 4 to 6 hours at 140° C or
- 3 to 4 hours at 165° C

The start of the curing time is counted from that moment on when the winding itself has reached the temperature specified (object temperature).

Shelf life

EpoxyLite 3750® LV has a minimum storage life of 12 months in tightly closed original containers at temperatures below 25° C and in dry, controlled surroundings.

It will be necessary to follow the instructions of the Material Safety Data Sheet (MSDS) of this product.



Properties of component as supplied

Property	Value	Unit
Shelf life at 23 °C	12	months
Appearance/Colour	clear, amber	-
Flow time at 23°C, Beck-test V 22 following ISO 2431	-	s
Viscosity at 23°C, Beck-test V 18 following DIN 53019	400 ± 100	mPa.s
Density at 23 °C, Beck-test S 11 following ISO 2811-2	1,12 ± 0,01	g/cm ³

Gel time and curing conditions

Temperature	100	120	130	140	150	160	°C
Gel time, Beck-test H 17b-1 initial value when produced						8 ± 2	min
Curing time, selectable				4 - 6		3 - 4	hr

Mechanical properties in cured condition

Test criterion	Condition	Value	Unit
Condition in thick layer, Beck-test M1 following IEC 60464 part 2	Upper side	-	-
	Under side	-	-
	Interior	-	-
Bond strength, Beck-test M2 following 61033, method A (Twisted Coil)	23 °C	-	N
	155 °C	-	
	180 °C	-	

Temperature index

Test criterion	Condition	Value
Proof voltage, Beck-test M 15 following IEC 60172 (Twisted Pair)	1000 V	190
Bond strength, Beck-test M 16 following IEC 60290 (Helical Coil)	20-22 N	-

Dielectrical properties in cured condition

Test criterion	Condition	Value	Unit
Volume resistivity after water immersion, Beck-test M 5 following IEC 60464 part 2	Initial value	10 ¹⁵	Ω·cm
	7 d storing	-	
Volume resistivity at elevated temperatures, Beck-test M 13 following IEC 60464 part 2	155 °C	-	Ω·cm
	180 °C	-	
Electrical strength after water immersion, Beck-test 6b following IEC 60464 part 2	Initial value	190	kV/mm
	24 h storing	-	
Electrical strength at elevated temperatures, Beck test M 6a following IEC 60464 part 2	155 °C	-	kV/mm
	180 °C	-	
Temperature at relative permittivity tangδ=0,1 Beck-test M 3b following IEC 60250	50 Hz, 1 V	-	°C
	1 kHz, 1 V	-	
	10 kHz, 1 V	-	

Effect of liquid chemicals, including water

Test criterion	Condition	Value	Unit
Resistance to vapour of solvents, storage 7 days, Beck-test M 7 following IEC 60464 part 2	Acetone	-	-
	Xylene	-	
	Methanol	-	
	Hexane	-	
	Carbon disulphide	-	
Water absorption, Beck-test M9 following ISO 62	at 23 °C	-	mg
	0,5 h at 100 °C	-	
Effect of liquid chemicals after 7 days storing, Beck-test M 10 following ISO 175	Ammonia solution 10 %	-	mg
	Acetic acid 5 %	-	
	Sodium hydroxide 1 %	-	
	Hydrochloric acid 10 %	-	
	Sulfuric acid 30 %	-	
	Iso-octane	-	
	Toluol	-	
	Transformer oil	-	
	BecFluid® 9902	-	
	Solution of detergent	-	

<p>Our advice in application technology given verbally, in writing and by testing corresponds to the best of our knowledge and belief, but is intended as information given without obligo, also with respect to any protective rights held by third parties. It does not relieve you from your own responsibility to check the products for their suitability to the purposes and processes intended. The application, usage and processing of the products are beyond our reasonable control and will completely fall into your scope of responsibility. Should there nevertheless be a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. Naturally, we assume responsibility for the unobjectionable quality of our products, as defined in our General Terms and Conditions.</p>

Manufacturing site: ELANTAS Italia S.r.l., Strada Antolini, 1, I-43044 Collecchio (PR), Italy
www.elantas.com