

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Perspektivní materiály izolačního systému elektrických
strojů**

vedoucí práce: Ing. Josef Pihera Ph.D.

autor: Tomáš Havel

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš HAVEL**
Osobní číslo: **E08B0204P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Perspektivní materiály izolačního systému elektrických strojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte rešerši současného stavu izolačních materiálů a jejich použití v elektrických točivých strojích.
2. Proveďte rešerši perspektivních materiálů, zejména nanomateriálů, a jejich vlastností vhodných pro použití v izolačním systému elektrických točivých strojů.
3. Na základě rešerší porovnejte vlastnosti současných a perspektivních materiálů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

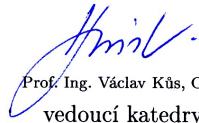
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na materiály používané v izolačním systému elektrických točivých strojů. Dále na perspektivní materiály, zejména nanokompozitní materiály, které mají vhodné vlastnosti pro použití v izolačním systému elektrických točivých strojů.

Klíčová slova

Izolanty, izolační systém elektrických točivých strojů, slída, zpracování slídy, slídové pásy, kompozity, nanokompozity, nanoplňniva.

Novel Insulating Materials of electrical device

Abstrakt

The presented bachelor thesis is focussed on materials used in insulation system of electric rotating machines. Further on perspective materials, especially nanocomposite materials which have suitable properties for use in insulation system of electric rotating machines.

Key words

Insulants, insulation system of electrical rotating machines, mica, processing mica, mica tape, composite, nanocomposite, nanofillers.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 7.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefovi Piherovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radimovi Zahradníčkovi ze společnosti ŠKODA ELECTRIC a.s. a panu Jiřímu Stauberovi ze společnosti BRUSH SEM s.r.o. za poskytnutí materiálových listů.

V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM VELIČIN A JEJICH DEFINICE	10
1 ROZDĚLENÍ IZOLANTŮ	11
1.1 DRUHY IZOLANTŮ	11
1.2 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ DO TEPLOTNÍCH TŘÍD	11
2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ	15
2.1 NÍZKONAPĚŤOVÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY	15
2.2 VYSOKONAPĚŤOVÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY	16
2.2.1 <i>Technologie Resin-Rich</i>	16
2.2.2 <i>Technologie VPI</i>	17
3 MATERIÁLY PRO IZOLAČNÍ SYSTÉM ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ	18
3.1 SLÍDA	18
3.1.1 <i>Druhy slídy vhodné pro elektroizolační účely</i>	18
3.1.2 <i>Způsoby zpracování slídy do slídového papíru</i>	19
3.1.3 <i>Mikanity</i>	20
3.1.4 <i>Materiály z rekonstruované slídy</i>	20
3.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	21
3.3 VYBRANÉ KOMERČNĚ POUŽÍVANÉ OHEBNÉ SLÍDOVÉ PÁSKY A FÓLIE	22
3.4 NOMEX [®]	25
3.5 KAPTON [®]	26
4 PERSPEKTIVNÍ MATERIÁLY	27
4.1 NANOTECHNOLOGIE	27
4.2 NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY	27
4.2.1 <i>Typy nanokompozitů</i>	28
4.2.2 <i>Nanoplňiva a nanokompozitní systémy</i>	30
4.2.3 <i>Vlastnosti nanokompozitů</i>	32
4.2.4 <i>Nanokompozity s nízkým obsahem plniva</i>	36
4.2.5 <i>Shrnutí</i>	38
5 ZÁVĚR	39
SEZNAM POUŽITÉ A CITOVANÉ LITERATURY	40

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na izolační materiály a jejich použití v elektrických točivých strojích a na perspektivní materiály, jejichž vlastnosti jsou vhodné pro použití v izolačním systému elektrických točivých strojů v blízké budoucnosti.

V úvodu je provedeno rozdělení materiálů do jednotlivých teplotních tříd, dále jsou popsány nízkonapěťové a vysokonapěťové systémy a technologie jejich výroby. Hlavní náplní práce je popis vlastností samotných izolačních materiálů, jejich použití v elektrických točivých strojích a technologie jejich výroby. V současné době se jedná především o slídové pásy a fólie. Proto je také podrobněji popsána technologie jejich výroby a popis několika komerčně používaných zástupců.

Poslední část je věnována nanomateriálům, především polymerovým nanokompozitům, které se jeví perspektivně pro praktické použití v příštích letech. Je popsáno, z čeho se nanokompozity skládají, jejich struktura, problematika nanoplňiv a přehled hlavních vlastností těchto materiálů.

Seznam veličin a jejich definice

Relativní permitivita..... ϵ_r [-]

- charakterizuje vlastnosti izolantu a je měřítkem jeho polarizace. Velikost relativní permitivity závisí na druhu polarizace, na vnitřní stavbě dielektrika a na polarizovatelnosti atomů a molekul. Může se měnit v závislosti na teplotě a kmitočtu, popřípadě i na intenzitě elektrického pole. Hodnota relativní permitivity se vzrůstajícím kmitočtem klesá, na rozdíl od závislosti na teplotě, kdy může dojít k nárůstu i poklesu. [2]

Ztrátový činitel..... $\text{tg}\delta$ [-]

- udává míru dielektrických ztrát a přímo souvisí se ztrátovým úhlem $\text{tg}\delta$, což je úhel doplňující fázový úhel φ do 90° . Ztrátový činitel je tedy vyjádřením množství ztrát, ke kterým dojde při polarizaci dielektrika, v důsledku vodivosti a ionizace. [25]

Elektrický pevnost..... E_p [V/m]

- je to schopnost materiálu odolávat vnějšímu působení elektrického pole do doby, než dojde k čistě elektrickému nebo tepelnému průrazu. Je ovlivněna mnoha faktory, jako např. kmitočtem, teplotou, dobou působení elektrického pole, čistotou, rychlostí nárůstu elektrického napětí atd. [25]

Rezistivita..... ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]

- též měrný elektrický odpor, udává odpor vodiče jednotkové délky (1 m) a jednotkového průřezu (1 m^2) při teplotě 20°C . [2]

Tepelná vodivost..... λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

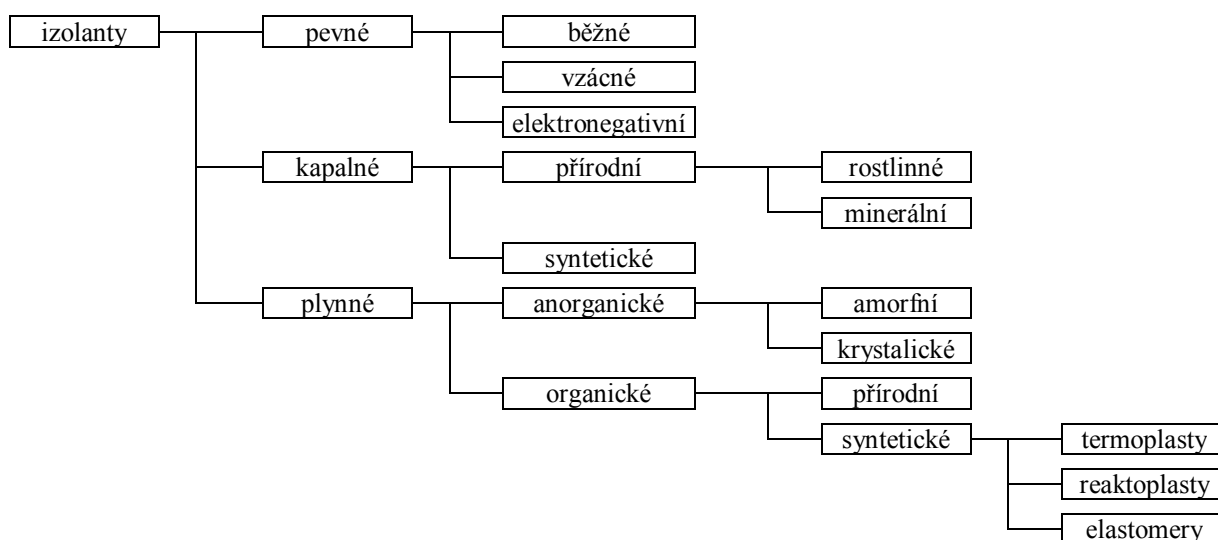
Hustota..... ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

1 Rozdělení izolanů

Elektroizolační materiál - látka se zanedbatelně nízkou elektrickou vodivostí, nebo kombinace takových látek, používaná v elektrických zařízeních k oddělení vodivých částí.

Elektroizolační systém - izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů s přidruženými vodivými částmi, použitá v elektrickém zařízení.

1.1 Druhy izolanů



Obr. 1.1 Rozdělení izolanů, převzato z [3]

1.2 Rozdělení materiálů do teplotních tříd

Významným faktorem při provozu zařízení je provozní teplota. Teplota je převládajícím činitelem způsobujícím stárnutí izolace. Klasifikace izolačních materiálů podle ČSN EN 60085 je provedena rozdělením do teplotních tříd. I tento systém se vyvíjí a stupnice zdokonaluje. Teplotní třídou je maximální hodnota teploty, pro kterou je materiál vhodný v provozu. [1]

Tab. 1.1 Teplotní klasifikace izolačních materiálů, převzato z [1]

Relativní index teplotní odolnosti RTE [°C]	Teplotní třída [°C]	Předchozí označení
< 90	70	
> 90 - 105	90	Y
> 105 - 120	105	A
> 120 - 130	120	E
> 130 - 155	130	B
> 155 - 180	155	F
> 180 - 200	180	H
> 200 - 220	200	
> 220 - 250	220	
> 250	250	

pozn.: Relativní index teplotní odolnosti (RTE) udává teplotu ve stupních Celsia, při níž má materiál po předpokládanou dobu svého života uspokojivé vlastnosti v porovnání se známým standardním materiálem.

Dřívější písmenné označení již není vyhovující, díky zvyšujícím se nárokům na teplotní odolnost. [1]

Příklady izolačních materiálů pro jednotlivé teplotní třídy:

Materiály teplotní třídy 70: Organické materiály, papír, dřevo, bavlna. Jsou levnější a nezatěžují životní prostředí. V tomto stavu se používají zřídka. [1]

Materiály teplotní třídy 90 (Y): Papír, dřevo, bavlna, hedvábí, spolu s běžnými impregnanty (oleje, asfalty, šelak). Z plastů polyvinylchlorid jako izolace vodičů. [1]

Materiály teplotní třídy 105 (A): Organické materiály bavlna, hedvábí, dřevo, papír s vhodným impregnantem nebo lakovány. Jako impregnanty se používají šelak, celulózové a asfaltové laky. Dále se používají lepenky, lepicí pásky na bázi papíru, akrylátu v kombinaci s papírem, dále lakovaná polyesterová tkanina, tvrzená bavlněná tkanina s fenolickou pryskyřicí používaná jako konstrukční materiál ve výrobě elektrických strojů. [1]

Materiály teplotní třídy 120 (E): Používají se organické materiály - tvrzený papír, nebo tvrzená tkanina, přírodní tkanina v kombinaci s fenolformaldehydovou pryskyřicí.

Tvrzený papír a tvrzená tkanina s fenolformaldehydovou pryskyřicí se používají jako konstrukční materiál s menší mechanickou pevností na izolace, oddělovací desky, podložky. Desky z tvrzené tkaniny s krezolformaldehydovou pryskyřicí mají výborné kluzné vlastnosti a jsou vhodné na výrobu mechanicky a elektricky namáhaných součástek.

PET folie v kombinaci s elektrotechnickou lepenkou se používá jako drážková izolace pro nízkonapěťové stroje. [1]

Materiály teplotní třídy 130 (B): V této teplotní třídě se používají již většinou anorganické materiály, tj. skleněná vlákna, azbest, nebo sulfátový papír v kombinaci s fenolickými pryskyřicemi nebo některými upravenými asfalty. [1]

Skleněný laminát s epoxidovým pojivem se běžně používá k izolačním či konstrukčním účelům. Materiál z polyesterové pryskyřice a skleněné rohože pro větší mechanické zatížení, než tvrzený papír a lepicí pásy v kombinaci PET/akrylát na ovíjení namáhaných izolací.

Materiály teplotní třídy 155 (F): Tyto materiály se skládají ze skleněných vláken, slídového papíru, PET, PEN folie, aramidového papíru a epoxidových nebo polyesterových pryskyřic. Kompozitní materiály ze skleněné tkaniny s epoxidovým pojivem nebo pojivem na bázi polyesterů se používají na konstrukční prvky namáhané mechanicky i elektricky – stroje a přístroje (i vn). Nízkoviskózní epoxidová pryskyřice na bázi bifenolu pro impregnování vinutí točivých strojů technologií VPI a lak z modifikovaného polyesteru na vinutí transformátorů a motorů odolný proti kyselinám, olejům a žíravinám. Dále izolační systém na bázi slídového papíru, skleněných vláken a Nomexu[®] pro izolování vinutí motorů. [1]

Materiály teplotní třídy 180 (H): Silikonové pryskyřice, modifikované epoxidové pryskyřice, dále aramidy, polyimidy, polyestery, slídové materiály, skleněné tkaniny. Kompozit – jedna součást obvykle dodává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo. Slídový papír, skleněná tkanina a silikonový elastomer pro izolace pro izolace vodičů, izolace konců vinutí cívek pro vysokonapěťové rotační stroje. Systém na bázi kalcinovaného slídového papíru, epoxidové pryskyřice a polyimidové folie se používá na izolace vysoce teplotně namáhaných vinutí motoru. Materiál na bázi slídového papíru, skleněných vláken a Nomexu[®] pro izolace motorů. [1]

Materiály teplotní třídy 200: Sklo, azbest a aramidové papíry, většinou se silikonovými pojivy. Impregnační lak na bázi polyestralkydů pro vinutí motorů. [1]

Materiály teplotní třídy 220: Sklo ve formě vláken, azbest, aramidové papíry a silikonová pojiva. Použití pro izolaci přívodů a spojů vinutí, pro vinutí motorů, na dodatečnou ochranu kabelů. Aromatický polyamid na izolování závitů cívek a přepážek transformátorů, izolaci vývodů motorů. [1]

Materiály teplotní třídy 250: Jedná se o polyimidy a aramidy s obchodními názvy (Kapton[®] a Nomex[®]), polytetrafluorethylen, nebo materiály třídy 220 s novými pojivy, používají se silikonová pojiva. Používá se pro prostředí s vysokou teplotou a radiací. Polyimidová fólie slouží i jako bariera proti záření ve vysokonapěťových izolačních systémech. [1]

Dále existují ještě materiály mimo teplotní třídu, jedná se hlavně o materiály pro speciální aplikace, které vyžadují vyšší teplotní odolnost, než je stanovenou teplotními třídami, nebo i o materiály s teplotní odolností ležící mezi hodnotami teplot jednotlivých teplotních tříd.

V případě vysokoteplotních materiálů to jsou polyimidy (Kapton[®]), které mají krátkodobou teplotní odolnost až 450 °C a hlavně celá řada keramických izolantů. [1]

2 Izolační systémy elektrických točivých strojů

2.1 Nízkonapěťové izolační systémy

Nízkonapěťové izolační systémy se skládají z izolace vodičů, vyložení drážek (ochrana izolace vodičů proti poškození) a impregnantu.

Izolace vodičů je tvořena lakem, opředěním a ovinutím bavlnou, skleněnými vlákny, kombinací pevné i nanášené izolace. Závisí na výšce pracovního napětí a její funkci ve stroji. Provedení izolace se při označování vodičů značí písmennými symboly. Jednotlivá písmena ve značení vodičů mají následující význam:

1. písmeno označuje charakter vodiče (L- lakovaný vodič, O – vodič pro ovinutí)
2. místo značí L pro měď a A pro hliník
3. písmeno charakterizuje materiál (B- bavlněná příze, K- skleněná příze, E- PET folie, L- elektroizolační lak, P- neimpregnovaný papír, a další)
4. místo je vyhrazeno pro zvláštní označení (N- několikanásobné ovinutí, A- zvláštní provedení)

U pravoúhlých vodičů je za tímto písmenným označením ještě číselné označení charakterizující jejich rozměr a přírůstek způsobený izolací.

Vyložení drážky chrání vlastní vodič před poškozením o stěnu drážky. Vyrábí se z drážkové lepenky a kombinované drážkové izolace, nebo Nomexu[®].

Impregnace se u těchto systémů provádí obvykle namáčením nebo zaplavováním. Impregnační laky mají různé složení. Pro máčení se používají například jednosložkové polyesterové pryskyřice, které umožňují rychlé vytvrzení při nízkých teplotách pro třídu 180. Pro zaplavování za rotace laky z polyesterimidové pryskyřice, které se vytvrzují elektrickým proudem a UV zářením, třída 180. Pro zalévání volných prostor při stavbě elektrických zařízení se používají dvousložkové polyuretanové látky. Ty po vytvrzení mají tvrdé gumy s teplotní odolností do 130°C. [1]

2.2 Vysokonapěťové izolační systémy

Vysokonapěťové izolační systémy točivých strojů se dělají dvojí technologií. Tyto technologie značně rozdílné, každá má svoje specifika, výhody i nevýhody. V současné době se používá systém Resin-Rich a Vakuum Pressure Impregnation (VPI). Hlavní rozdíl je v potřebě náročného a tedy drahého zařízení potřebného pro VPI. Resin-Rich potřebuje pouze přesné přípravky pro vytvrzování. VPI je náročnější hlavně pokud jde o velké stroje (turboalternátory). Výhodou u VPI je úspora materiálu až o 6% a homogennost systému. Pokud je vinutí technologií VPI proimpregnováno v celku, prakticky neexistuje možnost opravy. Řešením je impregnovat jednotlivé části zvlášť. U Resin-Rich není problém vadnou částku vyměnit. Která technologie je lepší nelze tedy jednoznačně říci. [1]

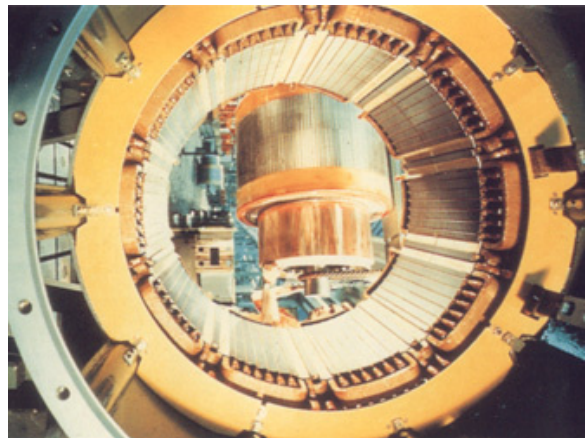
2.2.1 Technologie Resin-Rich

Základem této technologie je tříložkový kompozit, jako nosná část je použita **skleněná tkanina**. Tloušťka této tkaniny je 0,14 mm, pokud je skleněná tkanina tvořena stáčenými vlákny. Čím je tkanina tenčí, tím větší vzniká prostorová rezerva a možnost úspory při výrobě strojů. Proto je novější technologii umožněno vlákna nestáčet, ale rovnat do roviny, tím se dosáhne tloušťky 0,12 mm. Mechanické vlastnosti materiálů u obou postupů zůstávají stejné, ale elektrická pevnost u nového způsobu úpravy skleněné tkaniny je o 7% vyšší, další předností jsou nižší dielektrické ztráty.

Izolační bariéru tvoří **kalcinovaný slídový papír**, který je hutný, pevnější a méně nasákvavý. Pojivem pro tyto složky je reaktoplastická bezrozpouštědlová novolaková nebo cykloalifatická **epoxidová pryskyřice**. Materiál se dodává suchý, nelepivý, ve stavu částečně přetvrzeném a s co nejlepším skladovatelností.

Jeho tloušťka je od 0,15 do 0,2 mm. Na připravený základ vinutí se vytvoří potřebná vrstva materiálu podle napětí stroje.

Vytvrzení probíhá ve formách umožňujících stlačení izolace na předepsaný rozměr při teplotách 160 až 170°C po dobu řádově jedné hodiny (závisí na druhu pryskyřice a tloušťce izolační trubky). Používají se tzv. latentní tvrdidla na bázi komplexů amínů fluoridu boritého. Následné ochlazování musí být



Obr. 2.1 Izolační systém zpracovaný technologií Resin-Rich, převzato z [9]

pozvolné. Poté se musí izolace řádně vysušit. Po vyjmutí tyče vinutí – cívky z formy je připravena bez dalších úprav k montáži do stroje.

Izolace vykazuje velmi dobrou elektrickou pevnost, i ostatní požadované vlastnosti. [1]

2.2.2 Technologie VPI

Vakuově tlaková impregnace (Vacuum pressure impregnation). V tomto systému je základním materiálem savá slídová páska, která se prosytí impregnantem. Tato technologie nachází uplatnění především v trakčních motorech, kdy potřebujeme dokonalý impregnační systém zpevňující vinutí, který musí mít výborné izolační a teplotní vlastnosti. Technologie je díky použití bezrozpouštědlových pryskyřic šetrná k životnímu prostředí.

Savý izolant, který tvoří základ, se skládá ze tří komponent. Nosnou část tvoří skleněná tkanina, nebo fólie, zpravidla polyimidová. Pojiva je jen do sedmi procent. Prioritní je savost materiálu, neboť potřebujeme, aby i při větším počtu vrstev (více než 10) došlo k dokonalému proimpregnování všech vrstev. Dobré savosti se dosáhne použitím nekalcinované slídy, která má i požadované mechanické vlastnosti – ohebnost a minimální pevnost v tahu při ovíjení. Minimální pevnost materiálu je 80 N na centimetr šířky.

Impregnantem jsou bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové či silikonové pryskyřice. Mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti a lze je použít pro třídy 180 (H) a 200. Doba vytvrzení je relativně krátká. Impregnace se provádí ve vakuově těsné nádobě s možností ohřevu a chlazení. Zpracované izolované vinutí se musí nejdříve vysušit při teplotě nad 100 °C po dobu přibližně 20 hodin. Poté je předmět umístěn do impregnační nádoby, kde je vakuum (odstranění zbytku vlhkosti) a zaplaven ode dna. Pro dokonalou impregnaci je poté vakuum zrušeno a zavede se přetlak. Nakonec je předmět umístěn do sušárny, kde dojde k vytvrzení, přičemž několik prvních hodin se zařízení otáčí, aby nedošlo k navrstvení impregnantu ve spodní části. Vytvrzení v sušárně trvá až 20 hodin a je velice energeticky náročné. Lze impregnovat elektrické zařízení celé, nebo i jeho části. [1,8]



Obr. 2.2 Nádobu pro technologii VPI, převzato z [8]

3 Materiály pro izolační systém elektrických točivých strojů

3.1 Slída

Polykrystalický minerál s výrazně vrstevnatou strukturou, vyskytující se v přírodě v mnoha modifikacích, patří k nejlepším a nejpoužívanějším izolantům v elektrotechnice a to i do budoucna. Využití nachází především ve vysokonapěťové izolační technice. Velkou výhodou slídy jsou její stálé, prakticky neměnné vlastnosti, až do její kalcinační teploty (při této teplotě ztrácí materiál vázanou vodu). Po překročení kalcinační teploty se skokově mění vlastnosti a materiál je nepoužitelný.

3.1.1 Druhy slídy vhodné pro elektroizolační účely

- **Muskovit**

Světlý až bezbarvý, draselná slída - kyselý křemičitan hlinitodraselný, charakteristické hodnoty: $\epsilon_r = 6 \div 7$, $\text{tg}\delta = 1 \div 3 \cdot 10^{-4}$, $\rho_v = 10^{13} \div 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ a $E_p = 60 \text{ kV/mm}$, tepelná vodivost $0,3 \div 0,56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$, hustota $2,7 \div 3,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Maximální provozní teplota 600°C , kalcinační teplota $700 \div 800^\circ\text{C}$. [1,19]

- **Flogopit**

Tmavý, červenohnědý až šedý minerál, hořečnatá slída - kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý. Charakteristické hodnoty: $\epsilon_r = 5 \div 6$, $\text{tg}\delta = 1 \div 5 \cdot 10^{-5}$, $\rho_v = 10^{10} \div 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ a $E_p = 45 \text{ kV/mm}$, tepelná vodivost $0,5 \div 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$, hustota $2,6 \div 2,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Maximální provozní teplota 900°C , kalcinační teplota $900 \div 1000^\circ\text{C}$. [1,19]



Obr. 3.1 Slídový papír z muskovitu (vlevo) a z flogopitu (vpravo), převzato z [7]

3.1.2 Způsoby zpracování slídy do slídového papíru

Převážná část slídy se zpracovává buď chemickým (Bardetovým) nebo mechanickým (Heymannovým) způsobem do tzv. slídového papíru – remiky (rekonstruované slídy). Slída se rozmělní na jemné částičky a zpracovává na papírenských strojích. Vzhledem k charakteru rekonstruované slídy není možné její využití jako samostatného izolantu, ale používá se ve formě kompozitů, v nichž je nutná nosná složka a pojivo. Takto zpracovaná remika se vyrábí jako fólie či pásy a využívá se zejména jako hlavní izolační systém elektrických strojů.

Rozdíl mezi těmito technologiemi je v elektroizolačních vlastnostech a porositě slídového papíru. Nekalcinovaný způsob má větší porozitu, kalcinovaný má lepší elektroizolační vlastnosti. Tyto rozdíly jsou důležité pro použití slídového papíru v různých aplikacích. [19]



Obr. 3.2 Slídové pásy, převzato z [7]

Bardetův (chemický) způsob

Tímto způsobem se připravuje **kalcinovaný** slídový papír. Slídový krystal se zahřívá 20 minut při 800°C, tím ztratí 50% své krystalické vody. Následně se rychle zchladí v roztoku uhličitanu sodného. Prudkým zchlazením se poruší krystalická struktura a dojde až k osminásobnému zvětšení objemu. Poté se surovina ponoří do roztoku kyseliny solné. Tím se struktura slídy totálně naruší a dojde k jejímu chemickému rozmělnění. Získané částičky se vyperou, aby se odstranila kyselina solná. Tyto částičky o velikostech 0,04 až 0,8 mm se poté zpracovávají na papírenských strojích. Vzniklý slídový papír je hutný, méně nasákový s lepšími mechanickými vlastnostmi. [1]

Heymannův (mechanický) způsob

Tímto způsobem se získává **nekalcinovaný** slídový papír. Jedná se o hydromechanický způsob zpracování slídy. Rozštěpení slídy se provádí tak, že slída nesená silným proudem vody naráží na překážku a tím je rozmělněna. Tento proces probíhá v hydrodezintegrátorech. Získaná srnka mají velikost 0,04 až 2 mm. Následuje oddělení hrubých a nejjemnějších částic na vibračních a sedimentačních zařízeních. Větší částice se vracejí zpět k rozštěpení. Při této technologii se nepoužívají žádné chemikálie. [1,19]

3.1.3 Mikanity

Jedná se o materiály, jejichž podstatou jsou původní, nezměněné slídové listky.

Komutátorový mikanit je vyrobený ze slídových lístků a šelakového pojiva zpracováno slisováním. Používá se jako mezilamelová izolace v méně namáhaných komutátorech.

Formikanit je materiál vyrobený ze stejných komponent. Vlastnostmi ohebný, za zvýšené teploty tvárný a lepkavý. Používá se k výrobě komutátorových manžet. Vytvrzení se provádí při 130 °C za zvýšeného tlaku.

Ohebný mikanit se skládá ze slídových lístků, kalcinovaného slídového papíru a skleněné tkaniny. Tyto složky jsou spojeny pojivem. Materiál je za normálních teplot ohebný a tvárný. Používá se k izolování oblých částí strojů a prokládání vodičů pro třídu 130 (B). Vytvrzení se provádí po impregnaci celého vinutí.

Mikafolium je materiál vyrobený ze slídových lístků a speciálního celulóзовého papíru vzájemně spojeno šelakem. Používá se na izolování satorového i rotorového vinutí elektrických strojů ve třídě 130 (B) do napětí 6 kV. Vytvrzení probíhá za zvýšené teploty a tlaku v lisu. [1]

3.1.4 Materiály z rekonstruované slídy

Do této skupiny patří materiály z nosného materiálu, slídového papíru a pojiva. Technické detaily pojiv jsou tajemstvím každého výrobce a v katalozích je nenajdeme.

Pro mezilamelovou izolaci komutátorů se používá materiál ze slídového papíru a epoxidového pojiva. Zpracovává se slisováním do formy tvrdých desek broušených na přesnou tloušťku. Pro izolování vinutí strojů do 24 kV se pro třídu 155 (F) používá materiál s epoxidovou pryskyřicí, skleněnou tkaninou a slídovým papírem. Pro trakční motory třídy 180 (H) se používá materiál ze slídového papíru, skleněné tkaniny a silikonové pryskyřice. Vytvrzení se provádí po impregnaci vinutí, zároveň při jejím vytvrzování. Při výrobě točivých strojů třídy 155 (F) pro vyplňování technologických volných prostor se používá materiál vyrobený ze slídového papíru a modifikované epoxynovolakové pryskyřice slisováním za zvýšené teploty a tlaku do formy ohebných kompaktních desek. K izolování drážek, prokládání vodičů a izolování oblých součástí strojů pro třídu 155 (F) se používá slídový papír z obou stran polepený skleněnou tkaninou prosyceno modifikovanou epoxidovou pryskyřicí. Zpracování materiálu probíhá za studena nebo za mírného ohřevu, vytvrzení probíhá zároveň s vytvrzením celého vinutí. [1]

3.2 Kompozitní materiály

Tato poměrně široká skupina materiálů je v oblasti elektrických točivých strojů velmi využívána. Jedná se o třísložkové materiály. Nosnou složku tvoří skleněná tkanina, papír, bavlněná tkanina nebo polyimidová, polyesterová, PEN nebo PET fólie. Jako pojivo se používají nejčastěji epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice. Funkci plniva zastává v elektroizolační technice slídový papír. Použitelné jsou tyto materiály po vytvrzení.

Vyrábějí se nejčastěji ve formě pásek nebo fólií. V praxi se používají následující varianty:

Tvrzené skleněné tkaniny – nosným materiálem je skleněná tkanina, nejlepší vlastnosti mají výrobky s 70% až 80% obsahem skleněné přize. Mají výborné elektrické i mechanické vlastnosti, $\epsilon = 4$ až 5, $\text{tg } \delta = 0,05$, $E_p = 10$ až 15 kV/mm. Jednotlivé druhy se liší použitým pojivem, tím je epoxidová pryskyřice, polyestery; silikonová pryskyřice a polyimidové materiály – mají velmi dobré elektrické vlastnosti.

Tvrzené papíry (kartit) – jejich různé varianty se liší jak v elektrických tak mechanických vlastnostech podle použité pryskyřice. Teplotní odolnost je řadí do třídy 120 (E). Jako pojivo se používá fenolformaldehydová pryskyřice. Vlastnosti: $\text{tg } \delta = 0,06$ až 0,1, $E_p = 8$ až 10 kV/mm.

Tvrzené tkaniny – mají dobré mechanické a kluzné vlastnosti. Jsou vhodné pro výrobu ložisek. Existují různé varianty lišící se jemností tkaniny, pojivem a tedy i vlastnostmi. Teplotní odolnost 120 (E), elektrické vlastnosti o něco horší, než u kartitů. Pojivem je opět fenolformaldehydová pryskyřice. $E_p = 4$ až 5 kV/mm. [1]

Tab. 3.1 Přehled jednotlivých složek slídových pásek kompozitu slídy, skla a pryskyřice [28]

	Jednotky	Slída	E-glass	EP nebo UP pryskyřice
Elektrická pevnost při 20°C	kV/mm	60 – 200	10 – 40	20 – 45
Tepelná vodivost	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0,25 – 1,7	1,0	0,12 – 0,2
Rezistivita	$\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{14} - 10^{17}$	$> 10^{10}$	$10^{13} - 10^{16}$
Mechanické vlastnosti		↓	↑	↔
Bod tání nebo teplota skelného přechodu	°C	1200	840	80 – 180

pozn.: EP = Epoxidová pryskyřice

UP = Nenasycená polyesterová pryskyřice

3.3 Vybrané komerčně používané ohebné slídové pásky a fólie

- **Relanex 45.033**

Relanex 45.033 je za normální teploty ohebný, za tepla tvárný a lepivý, teplem tvrditelný elektroizolační materiál. Je vyroben z nekalcinovaného slídového papíru Remika® (muskovit) a skleněné tkaniny, vzájemně spojeno epoxynovolakovou pryskyřicí.

Relanex 45.033 se používá pro izolování cívek a tyčí vinutí elektrických točivých strojů, pracujících v podmínkách tepelné izolační třídy 155°C s provozním napětím do 24 kV. Cívky se izolují ovíjením páskou obvykle s polovičním překrytím v potřebném počtu vrstev nebo se ovinou folií jejich drážkové části. Izolace se vytvrzuje v lisu za zvýšené teploty a tlaku.

Vlastnosti:

Vnitřní odpor: min. $1 \cdot 10^{13} \Omega \cdot m$

Ztrátový činitel $\tan \delta$ ($E = 1 \text{ kV/mm}$):

při teplotě	23 °C	max. 0,01
	130 °C	max. 0,04
	155 °C	max. 0,10

Elektrická pevnost: min. $35 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ (měřeno na vzorku o tloušťce cca 0,25 mm) [15]

Tepelná vodivost: cca $0,2 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Pevnost v ohybu: min. 150 MPa

- **Remikapor 46.012**

Remikapor 46.012 je při pokojové teplotě flexibilní izolační materiál, založený na kalcinovaném slídovém papíru Remika® (muskovit), vyztužen aramidovými vlákny a skelnou tkaninou, vázané spolu nízkým množstvím silikonové pryskyřice.

Remikapor 46.012 je vhodný pro izolační systémy trakčních motorů, pro tepelnou izolační třídu 180 (H) a 220, které se používají pro technologii vakuově tlakové impregnace (VPI). Izolace se nanáší ručně nebo pomocí stroje s 50% přesahem v dostatečném množství vrstev. Konečné vlastnosti izolace závisí na použité impregnační pryskyřici a následném vytvrzování. Remikapor je kompatibilní se všemi běžně užívanými silikonovými pryskyřicemi. Minimální průrazné napětí je 1,5 kV, pevnost v tahu min. 80 N/10 mm. [16]

- **Calmicafab[®] H 3411**

Calmicafab[®] H 3411 se skládá z vyztuženého slídového papíru z kalcinovaného muskovitu, skelné tkaniny na obou stranách, a vysoce teplotně odolného epoxidonovolakového termosetu pro vysoké teploty až do 180 °C.

Calmicafab[®] H 3411 je velmi flexibilní materiál, který má po vytvrzení v horkém lisu vynikající dielektrické, tepelné, mechanické a chemické vlastnosti. Vzhledem k zesílené slídě a dvojité vrstvě skelné tkaniny má velmi dobré tepelné a mechanické vlastnosti (pevnost v tahu ≥ 150 N/10mm). Používá se k izolaci tyčí a cívek u vzduchem nebo nepřímo plynem chlazených strojů. Předehřívací cyklus při minimálním tlaku ($< 0,3$ N/mm²) v závislosti na velikosti cívky je dán od 20 minut při 135 °C do 5 minut při 160 °C. [17]

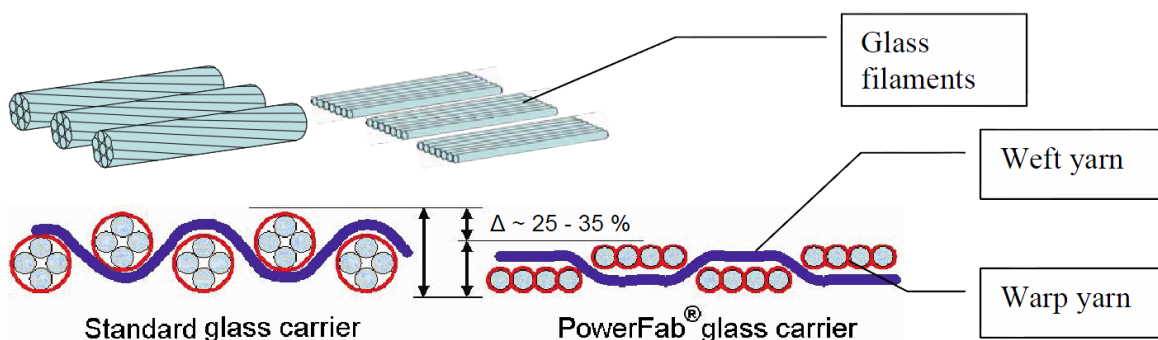
- **Samicatherm[®] a Novomikaband[®]**

Jedná se o materiály pro hlavní izolaci izolačního systému Resin-Rich. Dodávají se s různými druhy nosičů, jako je skelná tkanina, polyesterová fólie, atd., s rozdílným obsahem pryskyřice. Používají se hlavně ve vysokonapěťových strojích (až do nejvyšších napětí), ale také jako izolace pólových, rotorových a trakčních cívek. Pro své zvláště dobré dielektrické vlastnosti je použit slídový papír vyrobený ze slídy muskovit. Materiál Samicatherm[®] se používá také pro izolaci čel cívek vysokonapěťových strojů. [20]

- **Powerfab[®]**

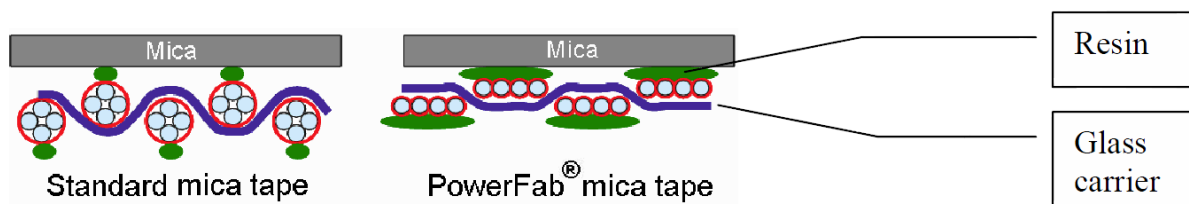
Powerfab[®] je nový typ slídových pásek vyvinutý společností Isovolta, který využívá skelnou tkaninu jako nosič pro vysokonapěťové izolační materiály v systému Resin Rich (Calmicafab[®]) a VPI (Porofab[®]).

Skelná tkanina používaná v této technologii je tenčí v porovnání se skelnou tkaninou, kterou v současnosti používají všichni výrobci slídových pásek, a přitom má stejnou



Obr. 3.3 Rozdíl v tloušťce mezi standardní a Powerfab[®] skelnou tkaninou, převzato z [28]

hmotnost. Je to způsobeno novou výrobní technologií skelné tkaniny. Skleněné nitky již nejsou zohýbané, ale jsou položeny vedle sebe (paralelně), jak je ukázáno na obrázku 3.3. Každé vlákno je pokryto koncovou vrstvou (na obrázku 3.3 v červeném kroužku). Díky paralelnímu uspořádání vláken vzniká v kritické oblasti méně prázdných míst (viz obrázek 3.4). [28]



Obr. 3.4. Zvětšená kontaktní oblast pro pojící pryskyřici a redukováná tloušťka slidových pásek Powerfab[®], převzato z [28]

Porovnání parametrů standardních a Powerfab[®] izolantů:

	Slída [%]	Pryskyřice [%]	Skelná tkanina [%]	λ [W/mK]	E_{pmax} [kV/mm]	Teplotní třída	d [mm/18kV]	TTC [W/m ² K]
RR Standard	54	36	10	0,25	2,75	155	3,8	66
Calmicafab [®] (RR)	57	33	10	0,27	3,4	155-180	3,1	87
Calmicafab [®] (RR)	57	33	10	0,27	3,7	155-180	2,8	96
VPI Standard	62	28	10	0,28	2,75	155	3,8	74
VPI Standard	62	28	10	0,28	3,0	180	3,6	78
Porofab [®] (VPI)	67	22	10	0,365	3,5	180	3,0	122
Porofab [®] (VPI)	68	22	10	0,365	4,0	180	2,6	140

Tab. 3.1 Parametry pro standardních a Powerfab[®] izolantů s různým elektrickým napětím, převzato z [28]

3.4 Nomex®

Obchodní název pro syntetický izolační materiál, vyrobený z vláken a částic aromatického polyamidu – aramidů. Nomex® je stále více používaným materiálem. Aramidové částice se zpracovávají běžnými papírenskými technologiemi do podoby papíru, který se poté zpevňuje kalandrováním (zušlechťovací proces, při kterém se na plošné textilie působí tlakem otáčejících se válců, jejich silným tlakem dochází ke zploštění původního kruhového profilu vlákna). Kalandrováním lze ovlivnit lesk, hladkost a omak materiálu v širokém rozsahu. Kalandry také slouží k odstranění vlhkosti, neboť probíhá při vysokých teplotách. Nomex® velmi dobře odolává vysokým teplotám až do 220 °C, má výborné elektrické vlastnosti ($E_p = 40 \text{ kV/mm}$, $\epsilon_r = 2,5$, ρ_v v řádu $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$) a vysokou pevnost v tahu, je samozhášivý a nehořlavý, odolává chemikáliím, rozpouštědlům a záření, působením tepla netaje. Snáší se s minerálními i syntetickými oleji používanými v transformátorech a je krajně snášlivý se systémy na bázi laků a pryskyřic používanými v elektrotechnice. Zachovává si výborné vlastnosti i při dlouhodobém vystavení účinkům vysokých teplot.

Proto je používán v elektrických strojích a to v elektroizolační technice jak točivých strojů (vodiče, cívky, drážky, vývody motorů a generátorů), tak transformátorů (izolace závitů, vrstev, přívodů), ale i v jiné elektrotechnické výrobě (kostry cívek, tvarované součástky, aj.).

Další výhodou je možnost laminování do více vrstev nebo i v kombinaci s jinými materiály. Na jeho povrch se dají dobře nanášet různé pryskyřice, které Nomex® spojí s jinými materiály. S těmi tvoří tuhé nebo ohebné kombinované izolanty, které se používají například pro drážkovou izolaci (přídavná izolace, chránící vinutí před poškozením o stěny drážky).

Nomex® se dodává v různých tloušťkách a provedeních, které se liší způsobem zpracování (kalandrovaný a nekalandrovaný materiál). Ve vysokonapěťových strojích se používá verze obsahující 50% slídy jak v nekalandrovaném, tak i v kalandrovaném provedení. [1]



Obr. 3.5 Nomexová izolační páska, převzato z [3]

3.5 Kapton®

Polyimidový materiál dodávaný ve formě fólií. Má výborné fyzikální, chemické a elektrické vlastnosti: $\epsilon_r = 3$ až $3,5$, $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$, $\rho_v = 1,5 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ a $E_p = 7,7 \text{ kV/mm}$ (při tloušťce 1 mm) v širokém teplotním rozsahu, zejména při zvláště vysokých teplotách. Teplotní odolnost je 250°C po dobu 8 let, 300°C po dobu 3 měsíce, krátkodobě může pracovat při teplotách od -120°C do $+350^\circ\text{C}$. Uplatňuje se ve zvláště teplotně namáhaných případech izolování vinutí elektrických strojů. Jeho aplikací lze na příklad snížit hmotnost vinutí trakčních strojů až o 5% při zvýšení výkonu až o 8%.¹ Působením tepla netaje, nehoří, odolává organickým rozpouštědlům. Je choulostivý na mechanické poškrábání, proto se používá ve spojení s jinými materiály, které ho chrání. [1]



Obr. 3.6 Kapton®, převzato z [5]

¹ MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*, str. 215

4 Perspektivní materiály

4.1 Nanotechnologie

Využívání struktury a vlastností nanočástic je převratnou a vysoce moderní technologií, využitelnou ve velké škále oborů a odvětví lidské činnosti.

Jako nanotechnologie se obecně označuje technický obor, který se zabývá tvorbou a využíváním technologií v měřítku řádově nanometrů (obvykle cca 1-100 nm), tzn. 10^{-9} m, což je přibližně tisícina tloušťky lidského vlasu. Nanotechnologie je v podstatě nauka o materiálech o rozměrech nanometrů. [10]

Nanomateriály lze rozdělit do těchto skupin:

- a) nanopráškové materiály, nanočástice, kvantové tečky, nanovlákna,
- b) kompozitní materiály obsahující nanočástice,
- c) materiály s uhlíkovými nanotrubicemi nebo fullereny,
- d) tenké vrstvy, nanovrstvy, nanopovlaky,
- e) nanostrukturní kovy a slitiny,
- f) nanokeramika,
- g) polymerové nanokompozity, polymerové nanomateriály. [11]

Zatím nejzajímavějším užitím těchto materiálů jsou **polymerová** kompozitní dielektrika, která jsou plněna malým množstvím nanoplniv, jejichž rozměry jsou v řádu jednotek či desítek nanometrů. Při těchto rozměrech často dochází k dramatickým změnám vlastností, které jsou zapříčiněny tím, že hlavní roli přestávají hrát samotné makroskopické materiály, ale určujícími se stávají jejich fázová rozhraní. Nezanedbatelný vliv na funkční vlastnosti má průběh zpracování i obsah nečistot a příměsí. [12]

4.2 Nanokompozitní materiály

Ve výkonové elektrotechnice je pozornost zaměřena na nanokompozity, od kterých se očekává výrazné zlepšení vlastností a to jak elektrických, tak mechanických. Nanokompozity jsou materiály složené ze dvou nebo více různých složek, z nich alespoň jedna se v materiálu vyskytuje ve formě částic o velikostech jednotek až desítek nanometrů.

Matrice

Matrice má v kompozitu funkci nosného média, je v ní rozptýleno plnivo a matrice drží celý výrobek pohromadě. Také ale chrání plnivo před mechanickým, či chemickým poškozením. Snad nejdůležitější funkcí matrice je ale přenos vnějšího mechanického napětí

na částičky plniva. Jako matrice se používají některé druhy polyetylénů, polyamidů, polypropylénů, EVA kopolymer a epoxidové nebo silikonové pryskyřice. [22]

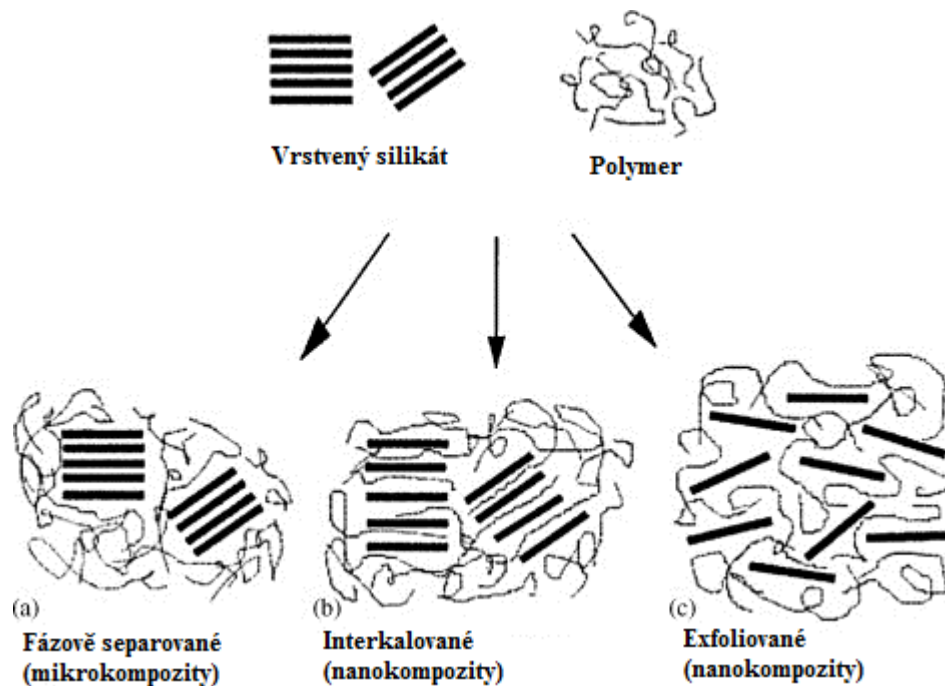
Plnivo

Plniva se do kompozitů přidávají za účelem zlepšení vlastností, jak mechanických, tak elektrických nebo tepelných. Jejich mechanické vlastnosti bývají totiž mnohem lepší než mechanické vlastnosti matrice, a to často o několik řádů. Matrice na plnivo přenáší veškeré, anebo alespoň naprostou většinu vnějšího mechanického zatížení. Plnivy jsou jíly, křemičitany a oxidy hliníku, i dalších kovů. [22]

4.2.1 Typy nanokompozitů

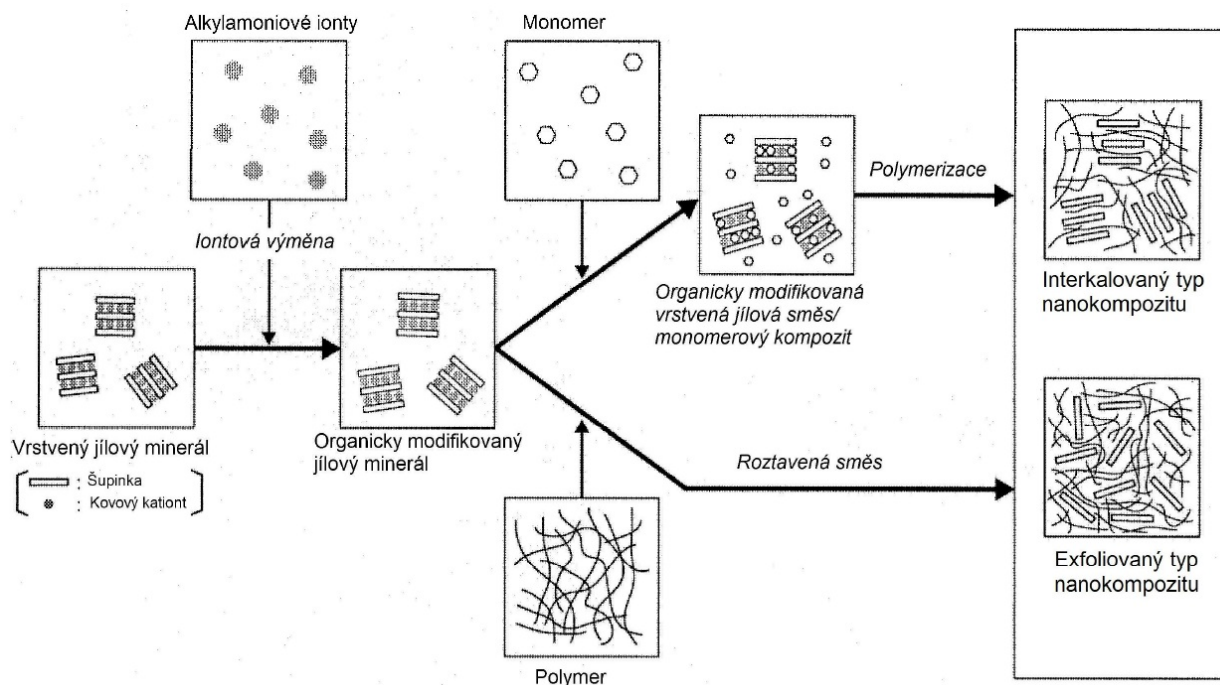
V závislosti na uspořádání vrstev nanoplňiva v polymeru se rozlišují tři základní typy rozložení vrstveného silikátu v polymerní matrici (obr. 4.1):

- **Fázově separované (mikrokompozity)** - částice nanoplňiva jsou v polymerní matrici rozptýleny se zachovanou vrstevnatou strukturou o velikosti mikrometrů.
- **Interkalované (nanokompozity)** - molekuly polymeru pronikají v pravidelném krystalickém uspořádání mezi vrstvy nanoplňiva, které zvětší svůj objem, ale stále zůstává pohromadě.
- **Exfoliované (nanokompozity)** - jednotlivé vrstvy nanoplňiva jsou zcela odděleny a rozptýleny v polymerní matrici v daných vzdálenostech. [23]



Obr. 4.1 Struktura nanokompozitů polymer/vrstvený silikát, převzato z [24]

Tvorbu nanokompozitu lze z termodynamického hlediska považovat za dvoustupňový proces - oddálení vrstev silikátu a solvataci nově vzniklého povrchu polymerem. Ztráta entropie polymerního klubka vměstnaného mezi vrstvy je přibližně kompenzována ziskem z jejich oddalování. [6]



Obr. 4.2 Proces interkalace a exfoliace u polymerních nanokompozitů, převzato z [25]

I přesto, že chování nanodielektrik ještě není plně objasněno a mnoho studií si odporuje v jejich interpretaci, panuje všeobecné přesvědčení, že by nanokompozity mohly vést k izolantům s podstatně vylepšenými vlastnostmi. [18]

4.2.2 Nanoplňiva a nanokompozitní systémy

Nanoplňiva značnou měrou zlepšují elektrické a dalších vlastností, zvláště tepelnou vodivost, koeficient tepelné roztažnosti a tepelné odolnosti. Přestože jsou nanovýplně obsaženy v malém množství (jednotky hmotnostních procent), mají v porovnání s klasickými výplněmi podstatně větší povrch. Tloušťka vrstvy je kolem 1 nm a příčné délky těchto vrstev mohou být od 30 nm do několika mikrometrů i více.

Nejčastěji používaná nanoplňiva mají velikost do 100 nm. Patří mezi ně jíly a anorganické oxidy - zvláště SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , vrstvené silikáty, montmorilonit či více komplikované částice (např. nanotrubky, POSS – polyhedral oligomeric silsesquioxane). Jíly jsou obecnou skupinou fylosilikátů, mezi nejpoužívanější patří montmorilonit. Tento jíl je možné mísit pouze s hydrofilními polymery. Vysoká pronikavost polymeru způsobuje rozrušení a možné rozštípnutí křemičitých vrstev. Následkem tohoto jevu vzniká produkt blízky expandovanému nanokompozitu, skládající se z jednotlivých křemičitých vrstev rozptýlených v polymerovém základě. Ve struktuře materiálu se nachází nanočástice jako kulové objekty, navíc častokrát s radikálně paprscitým uspořádáním. Zásadní příčinou změn ve vlastnostech kompozitů, které jsou plněny nanoplňivou, je velmi velká povrchová oblast připojená k vnitřnímu rozhraní při dostatečně malém plnění. Pravděpodobně se nové vlastnosti projevují za podmínky podobnosti velikosti plňiva a polymerového řetězce.

Důležité při přípravě nanokompozitů je odstranění nečistot a zbytkových sloučenin předchozích chemických reakcí, dále také snaha o co možná nejrovnoměrnější rozptýlení nanočástic v matrici. Aby se ukázalo, jak se budou nanovýplně ovlivňovat s polymerovými matricemi, je nutné prozkoumat tzv. multijaderný model. [12,13,21]

Tab. 4.1 Nejčastěji zkoumané epoxidové nanokompozitní systémy, převzato z [21]

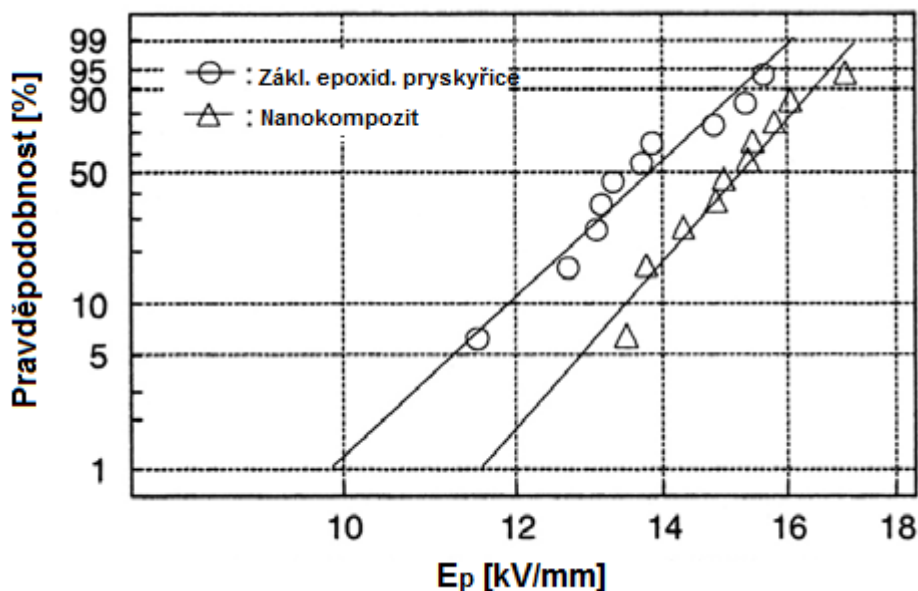
	Epoxid	Plnivo	Plnění	Úprava	Závěry
1	bisphenol-A	TiO ₂ , 15 nm, jehlicovitý tvar	5% hm.	neznámá	vyšší odolnost proti částečným výbojům
		SiO ₂ , 12 nm, kulový tvar			
		SiO ₂ , 40 nm, kulový tvar			
		nanorozměrný vrstvený silikát, interkalovaný			
2	diglycidyl ether of bisphenol-A	vrstvený silikát (OMLS)	5% hm.	vrstvený silikát modifikovaný quaternary alkyl ammonium ionty	vzrůst průrazného napětí u NMMC
	acid anhydride	OMLS + mikrooxid křemičitý (křemen) - NMMC	1,8% OMLS + 63,5% hm.		nižší tepelná roztažnost
3	EPON 828	trisilanolphenyl-POSS [EN]	5% hm.	neznámá	zvýšení doby do průrazu
	Jeffamine D400 aliphatic diamine				zlepšení odolnosti proti koruně (ve srovnání s čistým epoxidem)
4	DGEBA (diglycidyl ether bisphenolu A)	vrstvený silikát	cca 1% hm.	ošetřeno organickým interkalantem	zvýšená odolnosti proti působení částečných výbojů
	anhydride-type				
5	low molecular weight diglycidyl ether bisphenol-A	oxid hlinitý, 13 nm	1,5% hm.	neznámá	změny v rozložení tg δ v závislosti na teplotě a frekvenci
	methyl hexahydrophthalic anhydride				
	tetraethylammonium bromide (TEAB)				
6	biphenol epoxid	jíl (vrstvené silikáty)	10% hm. (TiO ₂)	neznámá	vzrůst doby do průrazu
		TiO ₂ , 23 nm			pokles permitivity při nižších frekvencích snížení prostorového náboje

4.2.3 Vlastnosti nanokompozitů

- **Elektrická pevnost**

Elektrická pevnost je jedním z nejdůležitějších vlastností dielektrik. Z měření [29] vyplývá, že nanokompozit epoxid – oxid titaničitý nevykazuje téměř žádnou změnu ve stejnosměrné krátkodobé elektrické pevnosti až do přidání nejméně 10 % hm. nanoplňiva. Oproti tomu stejný kompozit obsahující mikroplnivo vykazoval značné snížení elektrické pevnosti při zvyšujícím se obsahu mikroplniva z nulového obsahu. Z toho plyne, že nanokompozity mají ve srovnání s mikrokompozity na elektrickou pevnost pozitivní vliv. Nanokompozity epoxid – ZnO a epoxid – vrstvený křemičitan dle [14] také vykazují lepší elektrickou pevnost ve střídavém poli. Přidáním i velmi malého množství (do 1 % hm.) ZnO nanočástic do epoxidové pryskyřice se podstatně zvýší doba do průrazu. Elektrická pevnost nanokompozitu epoxid – vrstvený křemičitan je oproti základní pryskyřici o 10 % vyšší. To lze vysvětlit tím, že je růst průrazného „stromečku“ zpomalen, nebo je jeho rozšiřování blokováno částicemi nanoplňiva. Proto bude čas do průrazu vzrůstat. [14]

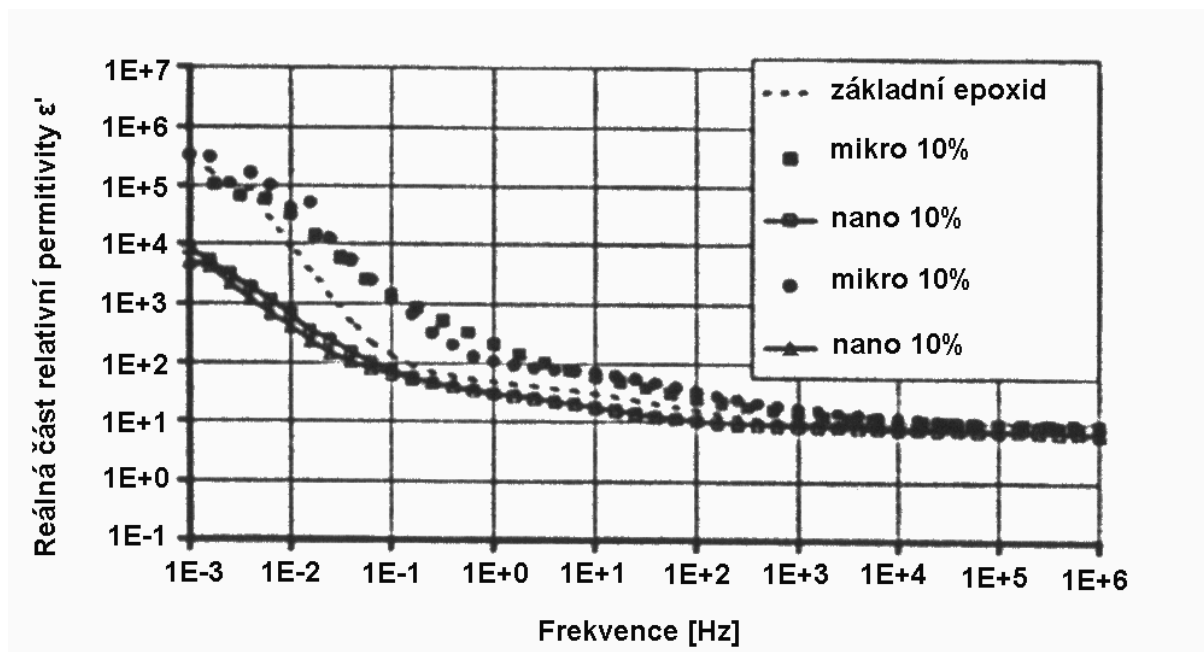
Dále bylo dokázáno [21], že po přidání 5% hm. SiO₂ do základní PE matrice došlo ke vzrůstu elektrické pevnosti ve srovnání s neplněným polymerem. Výsledky však nejsou u všech polymerů jednoznačné (např. polyamid, epoxidové pryskyřice a EVA kopolymer, či jednoduše popsitelné. [21]



Obr. 4.3 Weibullův diagram průrazné pevnosti epoxidové pryskyřice a nanokompozitu, převzato z [29]

• **Permitivita**

Permitivita roste při plnění polymerů anorganickými plnivými mikrometrických rozměrů o desítky procent. To je dáno mezivrstvou polarizací, protože plniva mají obvykle vyšší permitivitu, než neplněné polymery. Pokud je ale kompozit plněn nanočásticemi v řádech několika procent, je často pozorován pokles permitivity (viz obr. 4.4). Je však možné pozorovat i zvýšení hodnot, většinou v důsledku nedokonalostí jako nerovnoměrný rozptyl a hromadění nanoplňiv, nečistoty neúmyslně přimíchané během výrobního procesu, zbytky urychlovače tuhnutí a ředidla. Permitivita má klesající tendenci, jestliže nanostruktury zaujmají správné místo, což se připisuje omezení pohyblivosti polymerového řetězce nanočásticemi. [14,21]



Obr. 4.4 Srovnání permitivit epoxidového kompozitu neplněného, 10% mikro- a nano-plněného při 293 K, převzato z [14]

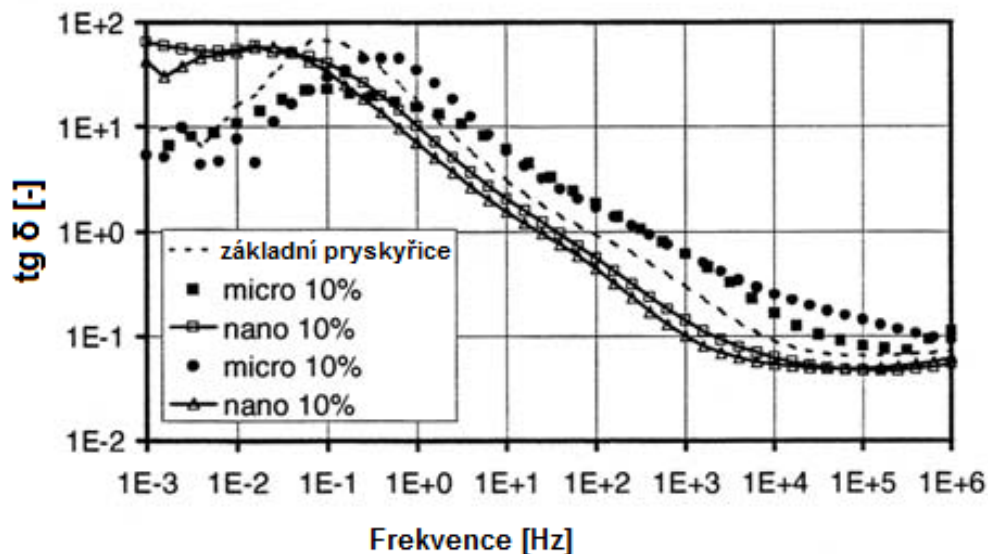
Tab. 4.2 Vliv nanoplňiv na relativní permitivitu, převzato z [29]

	Epoxid-Silikát		Epoxid-TiO ₂	Epoxid-TiO ₂	PA-Silikát
	20 °C	100 °C	23 °C	200 °C	RT
	60 Hz		1 kHz	> 1 kHz	50 Hz
Základní pryskyřice	4,1	6,1	5,68	> 8,49	4,36
Nano	3,7	3,8	4,50	8,49	4,07
Mikro	-		6,01	> základní pryskyřice	-

- **Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$**

Snížení $\text{tg } \delta$ v důsledku včlenění nanočástic bylo zjištěno u nanokompozitu epoxid - oxid titaničitý (TiO_2), zvláště pak při nízkých frekvencích a vysokých teplotách v důsledku vzestupu teploty skelného přechodu. Z obr. 4.5 je vidět, že v oblasti frekvencí menších než 0,1 – 1 Hz je $\text{tg } \delta$ oproti neplněné pryskyřici vyšší, poté už ale klesá až do vysokých frekvencí. Naopak křemičito - epoxidový nanokompozit (SiO_2) vykazuje nižší hodnoty $\text{tg } \delta$, než základní pryskyřice při síťovém kmitočtu a vyšší při frekvencích nad 100 kHz. Při nízkých frekvencích a slabých polích je pokles $\text{tg } \delta$ citlivý na přítomnost pohyblivých iontových nečistot a polárních radikálů s dipólovým momentem.

Dále bylo zjištěno, že při frekvencích síťových a vyšších má včlenění nanočástic o vyšší permitivitě za následek kompozity, které mohou vykazovat velikost permitivity nižší, než základní polymer a obsažené nanočástice. To může být způsobeno upevněním nanočástic v matici, které umožňuje vznik disperze na rozhraních. Z praktického hlediska může být toto zjištění použito ke snížení jalového proudu, což je důležitý faktor například u kabelových izolací. [14,29]

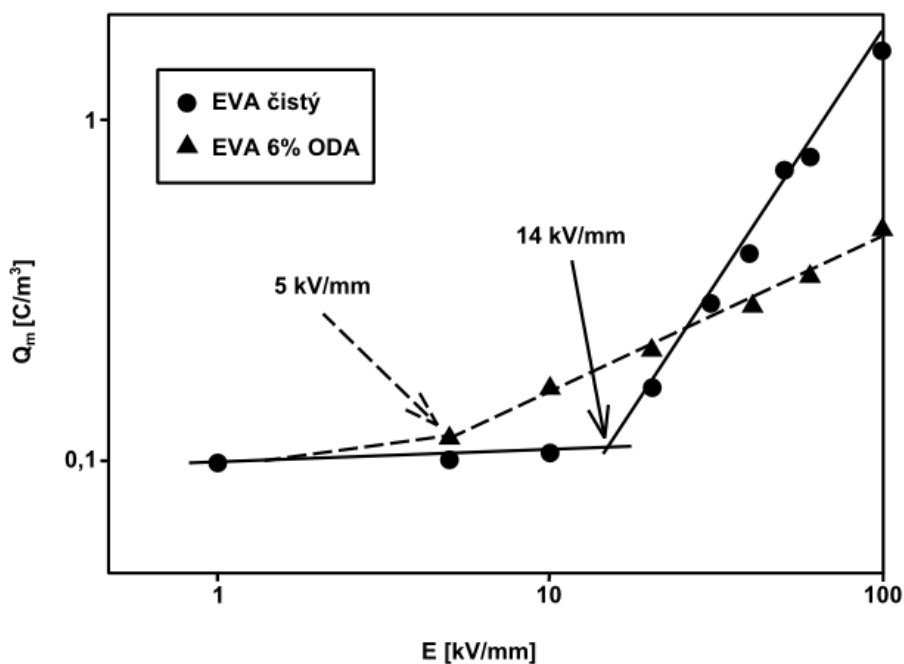


Obr. 4.5 Změna $\text{tg } \delta$ v závislosti na frekvenci v kompozitu epoxid - oxid titaničitý pro různá plnění při 293 K, převzato z [29]

- **Prostorový náboj**

Prostorový náboj byl zjištěn v nanokompozitech epoxid – oxid titaničitý, oxid hlinitý a ZnO, PP a EVA nanokompozitech s vrstvenými křemičitany a v nanokompozitech LDPE – oxid titaničitý. Podle článku [29] mají nanostruktury tendenci prostorový náboj snižovat. Elektrické pole prostorového náboje je při mikrorozměrech použitého plniva téměř dvojnásobné oproti nanoplňivu.

Obrázek 4.5 ukazuje vztah vstřikovaného náboje na působícím elektrickém poli v základním polymeru EVA a při 6% plnění. Při 6% plnění se díky přidání nanoplňiv náboj snižuje v silném poli a ve slabém poli se naopak zvyšuje. Tento jev je způsoben iontovými nečistotami v nanoplňivech a lze ho odstranit čištěním nanoplňiv. [12,14]



Obr. 4.6 Velikost prahu prostorového náboje základní pryskyřice EVA a jeho velikost při obsahu 6% nanoplňiva (ODA), převzato z [12]

- **Odolnost proti částečným výbojům**

Odolnost proti částečným výbojům je u nanokompozitů značně zvýšena. Toto chování způsobuje například vzájemná síla vazby mezi plnivem a matricí, prostor mezi plnivem, nebo objem matrice obklopené sousedním plnivem.

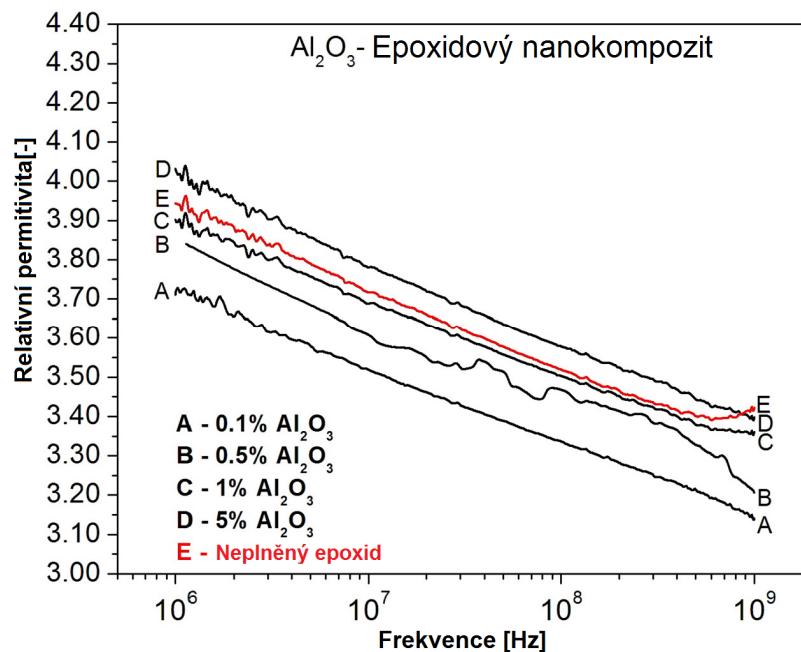
Odolnost proti částečným výbojům je známá u nanokompozitu polyamid - vrstvený křemičitan. Pro silikonové elastomerové nanokompozity byl pozorován podobný pozitivní efekt. [12]

4.2.4 Nanokompozity s nízkým obsahem plniva

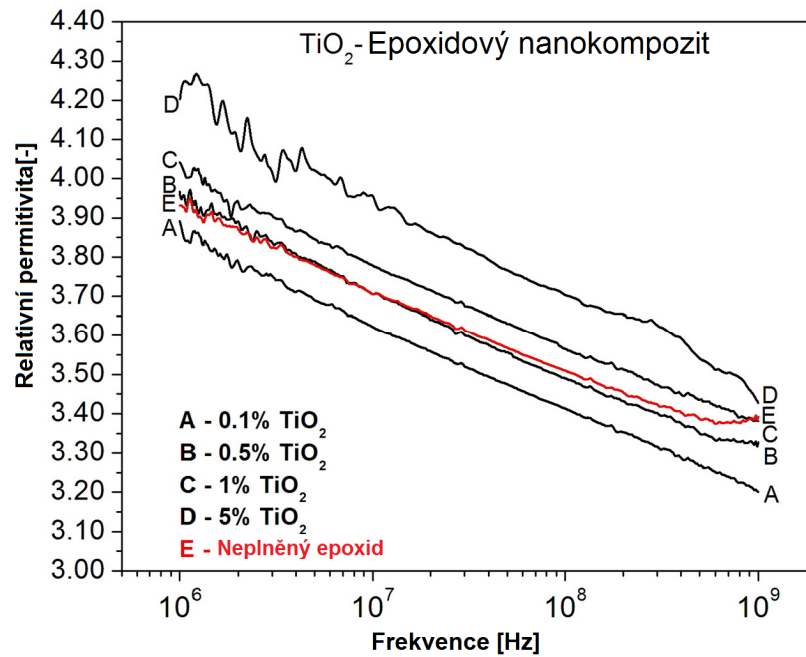
V článku [27] byly prezentovány výsledky měření permitivity a ztrátového činitele $\tan \delta$ u kompozitů z epoxidové pryskyřice s nanoplňivou Al_2O_3 a TiO_2 o průměrných velikostech 45 nm a 50 nm. Měřilo se s pěti různými plněními: 0.1%, 0.5%, 1% a 5% hm. v kmitočtovém rozsahu 1MHz-1GHz.

- **Permitivita**

Z výsledků měření (obr. 4.7 a 4.8) je patrný pokles relativní permitivity s rostoucí frekvencí, bez ohledu na koncentraci plniva. Dále je vidět, že až do určité koncentrace nanoplňiva je permitivita vzorků menší, než permitivita neplněné epoxidové pryskyřice. U Al_2O_3 je permitivita nižší do koncentrace plniva 1%, zatímco u TiO_2 jen do 0,1%. Tento rozdíl je dán nejspíše velkým rozdílem permitivit použitých nanoplňiv, kdy vzorek Al_2O_3 měl permitivitu přibližně 9, zatímco TiO_2 přibližně 100. Zvýšení počtu částic Al_2O_3 z 0,1% na 5% v epoxidové pryskyřici nepovede k významnému zvýšení permitivity nanokompozitu v porovnání s případem plniv TiO_2 . Tento účinek potvrzuje, že závislost na permitivitě nanoplňiv je minimální při malé koncentraci plniva a roste do hodnoty permitivity nanokompozitu, která nebude větší než u čisté epoxidové pryskyřice. Použitím nanoplňiv tedy redukuje permitivitu nanokompozitu pro specifická procenta plnidel. Díky těmto zjištěním je možné navrhnout nanokompozit v rozsahu 1MHz-1GHz o velmi nízké permitivitě. [25,27]



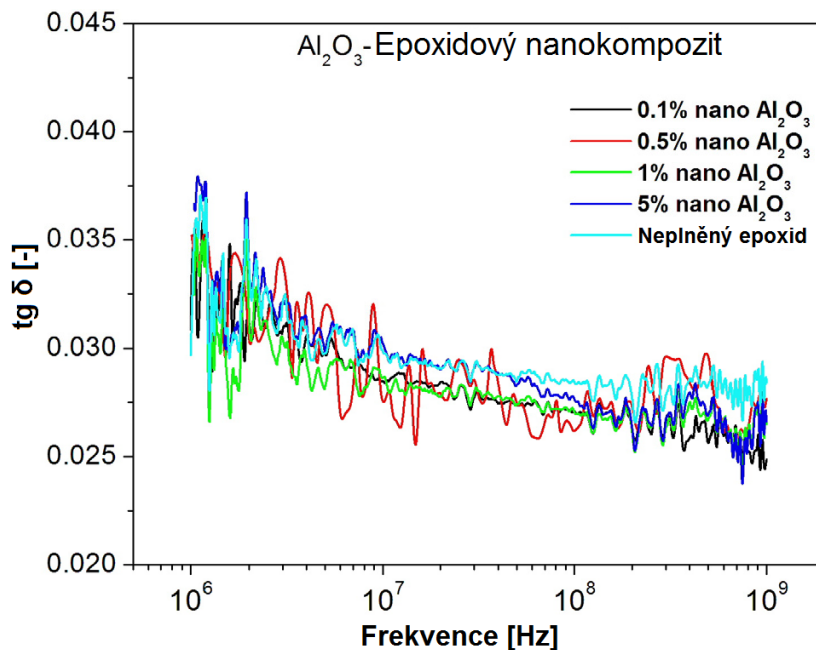
Obr. 4.7 Změny relativní permitivity v nanokompozitu plněném Al_2O_3 v závislosti na frekvenci, převzato z [27]



Obr. 4.8 Změny relativní permitivity v nanokompozitu plněném TiO₂ v závislosti na frekvenci, převzato z [27]

- **Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$**

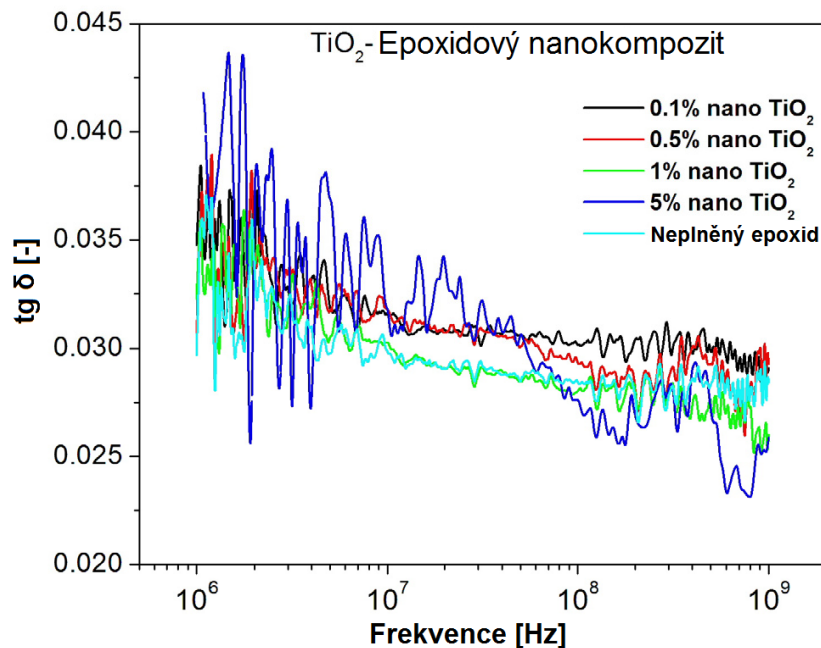
Dále byl měřen vliv plniva na $\text{tg } \delta$. Jak je vidět z obr. 4.9 a 4.10, hodnota ztrátového činitele značně kolísala, přesto je u nanokompozitu plněného Al₂O₃ patrné okrajové snížení hodnoty ztrátového činitele pro všechny koncentrace plniva. Důvodem je pravděpodobně pokles elektrické vodivosti v epoxidovém nanokompozitu se stoupající frekvencí, která způsobuje neschopnost nosičů náboje překročit tloušťku materiálu při vysokých frekvencích.



Obr. 4.9 Změny $\text{tg } \delta$ v nanokompozitu plněném TiO₂ v závislosti na frekvenci, převzato z [27]

Chování nanokompozitu s TiO_2 je mírně odlišné. Při nízkých frekvencích jsou hodnoty $\text{tg } \delta$ plněné epoxidové pryskyřice mírně vyšší, než u neplněného epoxidu. S rostoucí frekvencí lze toto chování pozorovat už jen u nanokompozitů s 0,1% a 0,5% plněním TiO_2 . Ztrátový činitel se vzrůstající frekvencí vždy posupně klesal.

Celkově lze říci, že změny mezi nanokompozity s různými plněními jsou nepatrné. Toto chování nanokompozitů se liší od mikrokompozitů, kde se hodnoty $\text{tg } \delta$ obvykle výrazně zvýší se zvyšujícím se podílem plniva [26,27]



Obr. 4.10 Změny $\text{tg } \delta$ v nanokompozitu plněném Al_2O_3 v závislosti na frekvenci, převzato z [27]

4.2.5 Shrnutí

Polymerové nanokompozity jsou díky svým výborným vlastnostem perspektivními dielektriky pro budoucí použití. Je však potřeba nejprve vyvinout vhodné laboratorní přístroje a průmyslové metody výroby, aby bylo možné získat reprodukovatelné a hodnověrné výsledky, které by se využily pro další výzkum v této oblasti. Potřebné je objasnit vzájemné působení mezi nanočásticemi a polymerovou maticí, což závisí na druhu materiálu nanočástice i samotného základu, druhu vazeb přemostřujících anorganické a organické látky, fyzických a chemických vlastnostech jejich povrchů. Dále pak zkoumání změn jejich mechanických a tepelných vlastností. [14]

5 Závěr

Cílem této práce bylo shrnout současný stav izolačních materiálů, použitelných v izolačním systému elektrických točivých strojů. Úvod obsahuje rozdělení materiálů a popis nízkonapětových a vysokonapětových izolačních systémů v elektrických strojích.

Dále už jsou rozebrány vlastnosti samotných materiálů. Jedná se především o slídu, protože slídový papír je v současné době nejpoužívanější složkou izolačních materiálů. Výroba slídového papíru probíhá buď mechanickým Heymannovým, nebo chemickým Bardetovým způsobem. V praxi jsou nejčastěji používanou skupinou materiálů tříslžkové kompozity, ze kterých se vyrábějí izolační pásy a fólie. Jsou složeny nejčastěji ze skelné tkaniny, slídového papíru a plnivem je pryskyřice. Používá se hlavně slídový papír z muskovitu. Z těchto materiálů má velmi dobré vlastnosti materiál Powerfab[®]. Výborné vlastnosti má také polyimidový Kapton[®] a především polyamidový materiál Nomex[®] na bázi aramidu, který má například elektrickou pevnost ještě mnohem větší, než Powerfab[®].

Následuje přehled nanomateriálů a nanoplňiv. Pro použití v silnoproudé elektrotechnice se díky svým vlastnostem jeví perspektivně především polymerové nanokompozitní materiály. Jedná se o druhou generaci plněné pryskyřice. Skládají se z matrice a plniva. Jako plniva se používají právě nanočástice, a to nejčastěji SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, ZnO, vrstvené silikáty, aj. Plnění je obvykle jen do 10% hmotnostních, přesto mají nanovýplně v porovnání s klasickými výplněmi podstatně větší povrch.

Pokud je nanokompozit proveden řádně, tzn. bez cizích nečistot nebo s nerovnoměrně rozvrstveným nanoplňivem, pak dochází oproti klasickým izolačním materiálům ke snížení permitivity. Stejně tak prostorový náboj mají nanostruktury tendenci snižovat. Snížení ztrátového činitele bylo pozorováno hlavně za vysokých teplot, odolnost proti částečným výbojům a elektrická pevnost je u nanokompozitů zvýšena. Vlastnosti nanokompozitů s nižší koncentrací plniva jsou známé teprve krátce, například díky měřením [27]. Jejich efektivní permitivita se zvyšuje se stoupající koncentrací plniv. Změny ztrátového činitele jsou mezi nanokompozity s nízkým obsahem plniv nepatrné.

Nanokompozitní materiály mají lepší jak elektrické, tak mechanické vlastnosti. Především větší tuhost, lepší tepelnou vodivost, koeficient tepelné roztažnosti a tepelné vodivosti. Velmi zásadní vliv na jejich vlastnosti má obsah nečistot a příměsí při jejich přípravě. Pro praktické použití jsou však zatím tyto materiály nedostupné, a to především díky vysokým cenám nanoplňiv a dosud nedokončenému výzkumu. V blízké budoucnosti se s nimi ale jistě setkáme.

Seznam použité a citované literatury

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] ŠAVEL, Josef. *Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha : BEN - technická literatura, 2004. 314 s. ISBN 978-80-7300-1.
- [3] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] Alibaba.com. *Nomex Insulation tape* [online]. 1999-2010 [cit. 2011-10-15]. Dostupné z: http://www.alibaba.com/product-gs/201277577/Nomex_Insulation_tape.html
- [5] Plastic Shims and Gaskets. *Kapton®*. [online]. 2006 [cit. 2011-10-16]. Dostupné z: http://www.plasticshimsandgaskets.co.uk/psg_apps/stage1/kapton.htm
- [6] PUFFR, Rudolf a Jiří BROŽEK. *Nanokompozity polyamidů s vrstevnatými silikáty*. [online]. 2009 [cit. 2012-5-30]. Dostupné z: www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_03_138-146.pdf
- [7] Thomex.com. *Mica Insulators*. [online]. 2000-2011 [cit. 2011-11-10]. Dostupné z: <http://www.thomex.com/ebrochures/ruby-mica/mica-insulators.html>
- [8] Inmanelectric.com *Vacuum Pressure Impregnation*. [online]. 2008 [cit. 2011-11-21]. Dostupné z: <http://www.inmanelectric.com/vacuum.html>
- [9] Diytrade.com. *Resin rich mica tape for motors*. [online]. 1999-2011 [cit. 2011-11-21]. Dostupné z: http://www.diytrade.com/china/4/products/419936/Resin_rich_mica_tape_for_motors.html
- [10] MICHNA, Štefan. *Nanotechnologie a nanomateriály*. [online]. Děčín, 2007-2012 [cit. 2011-12-06]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/nanotechnologie_a_nanomaterialy.pdf. Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J.E.Purkyně v Ústí nad Labem.
- [11] Nanotechnologie.cz. *Nomenklatura nanotechnologií* [online]. 2007 [cit. 2011-11-22]. Dostupné z: <http://www.nanotechnologie.cz/view.php?cislocclanku=2007080023>
<http://www.nanotechnologie.cz/view.php?cislocclanku=2007080023>
- [12] BOČEK, Jiří. *Nanomateriály v elektroizolační technice*. Plzeň, 2007. ISBN 978-80-7043-572-4. Západočeská univerzita v Plzni.

- [13] KLASNA, Zdeněk. *Možnosti aplikace nanomateriálů v silnoproudé elektrotechnice*. Plzeň, 2006. Bakalářská Práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] BOČEK, Jiří a Václav MENTLÍK. *Aspekty užití nanokompozitních dielektrik* [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/95.pdf>. Západočeská univerzita v Plzni.
- [15] COGEBI a.s. *Materiálový list Relanex 45.033, 45.033 S*
- [16] COGEBI a.s. *Materiálový list Remikapor 46.012*
- [17] ISOVOLTA Group *Materiálový list Calmicafab® H 3411*
- [18] RÁČEK, Tomáš. *Dielektrické vlastnosti epoxidové pryskyřice plněné nanočásticemi* [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29357. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] POLANSKÝ, Radek. *Přednášky z předmětu Materiály v silnoproudé elektrotechnice*. Plzeň, 2011. Fakulta elektrotechnická. Západočeská univerzita v Plzni.
- [20] SILENT-CZECH. *Slidové materiály* [online]. 2011-2012 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/>.
- [21] BOČEK, Jiří a Václav MENTLÍK. *Polymerní nanokompozitní dielektrika*. Plzeň, 2009. Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-80-7043-793-3.
- [22] MIŠKOLCI, Michal. *Polymerní nanokompozity pro interiérové části automobilů*. Brno, 2009. [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14998. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] ŽÁK, Luboš. *Aplikace nanoplňiv do termoplastu*. Brno, 2009. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14886. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] KILIARIS, P. a C.D. PAPASPYRIDES. *Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy*. Progress in Polymer Science [online]. 2009 [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670010000304>

- [25] SEDLÁČEK, Michal. *Vliv nanočástic na vlastnosti elektroizolačních materiálů*. Brno, 2009. [cit. 2012-05-30]. Dostupné z:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17707.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] NOVÁK, Petr. *Vlastnosti lakových kompozitních materiálu plněných mikro- a nanočásticemi*. Brno, 2011. [cit. 2012-05-30]. Dostupné z:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39792.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] SINGHA, S. a J. THOMAS. *Permittivity and tan delta characteristics of epoxy nanocomposites in the frequency range of 1 MHz-1 GHz*. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation [online]. 2008, roč. 15, č. 1 [cit. 2012-06-1]. ISSN 1070-9878. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4446731>
- [28] LADSTÄTTER, W., P. MAREK, W. GRUBELNIK a F. SENN. *New insulation technology impacts generator design*. Isovolta Group. 2006.
- [29] TANAKA, T. *Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties*. In IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. Říjen 2005. roč. 12, č. 5. [cit. 2012-06-1]. ISBN 1070-9878/05. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1522186>