

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Materiály izolačních systémů točivých strojů a diagnostika jejich
vlastností

Autor práce: **Petr Kvasnička**
Vedoucí práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

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

Jméno a příjmení: **Petr KVASNIČKA**
Osobní číslo: **E18B0147P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Materiály izolačních systémů točivých strojů a diagnostika jejich vlastností**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište systém hlavní drážkové izolace velkých točivých strojů.
2. Popište technologie výroby materiálů pro izolační systém velkých točivých strojů.
3. Popište technologie výroby hlavní izolace ve velkých točivých strojích.
4. Popište diagnostické metody pro hodnocení stavu izolačních materiálů a izolačního systému velkých točivých strojů.
5. Připravte vzorky různých izolačních materiálů použitelných jako hlavní izolace velkých točivých strojů.
6. Navrhněte diagnostický systém a experiment pro porovnání klíčových vlastností vyrobených vzorků.


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:


- [1] Hauschild, W. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2019
- [2] Küchler, A. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2018
- [3] Stone, G.C. Electrical insulation for rotating machines, Wiley-IEEE Press 2014
- [4] Mentlík, V. et al.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008,, 1.vydání, ISBN 978-80-7300-232-9
- [5] Kreidl, M. a kol.: Diagnostické systémy, ČVUT Praha 2001

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

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


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


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



V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Práce je zaměřena na seznámení se základními vlastnostmi izolačních systémů a následné diagnostické metody těchto vlastností. Popsány jsou také, nejčastěji používané izolační materiály jako je slída, tříslložkové kompozity a seznámení s nanodielektriky. Závěrem práce je experiment zaměřený na měření dielektrických vlastností polovodivých pásek, které jsou součástí hlavního izolačního systému stroje a chrání před částečnými výboji.

Klíčová slova

Izolační systém, točivé stroje, kompozitní materiály, drážková izolace, hlavní izolace, VPI, Resin-Rich, polymerní materiály, částečné výboje, diagnostika, polovodivé pásky

Abstract

The work is focused on the introduction to the basic properties of insulation systems and subsequent diagnostic methods of these properties. Also described are the most commonly used insulating materials such as mica, ternary composites and an introduction to nanodielectrics. The second part of the work is an experiment aimed at measuring the dielectric properties of semiconductive tapes, which are part of the main insulation system of the machine and protect against partial discharges.

Key Words

Insulation system, rotating machines, composite materials, groove insulation, main insulation, VPI, Resin-Rich, polymer materials, partial discharges, diagnostics, semiconductive tapes

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Josefu Piherovi Ph. D nejen za cenné rady a motivaci při vedení bakalářské práce, ale také za možnost aktivního se zapojení na katedře materiálů a technologií. Veliké díky patří také mé rodině za obrovskou podporu a trpělivost během celých studií.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Historický vývoj izolačních systémů.....	- 2 -
2 Vlastnosti izolačních materiálů	- 3 -
2.1 Teplotní klasifikace izolačních systémů	- 3 -
2.2 Elektrické vlastnosti	- 4 -
2.2.1 Elektrická vodivost	- 4 -
2.2.2 Rezistivita	- 4 -
2.2.3 Izolační odpor	- 4 -
2.2.4 Elektrická pevnost.....	- 4 -
2.2.5 Dielektrické ztráty.....	- 5 -
2.2.6 Ztrátový činitel.....	- 5 -
2.2.7 Permittivita.....	- 5 -
3 Materiály izolačních systémů	- 6 -
3.1 Kompozitní materiály.....	- 6 -
3.2 Dvousložkové kompozitní materiály	- 7 -
3.3 Třísložkové kompozitní materiály	- 8 -
3.3.1 Nosná složka	- 8 -
3.3.2 Plnivo	- 8 -
3.3.3 Pojivo.....	- 10 -
3.4 Polymerní nanokompozitní materiály	- 10 -
3.4.1 Výroba nanokompozitů.....	- 10 -
3.5 Polymerní nanodielektrika	- 12 -
3.5.1 Sférické anorganické nanočástice	- 12 -
3.5.2 Interkalovaná dielektrika	- 13 -
3.6 Nejčastěji zkoumané epoxidové nanokompozitní systémy.....	- 13 -
3.7 Kompozitní materiál s nanoplňiví a mikroplňivy SiO ₂	- 15 -
3.8 Využití nanokompozitů	- 16 -
4 Izolační systémy elektrických točivých strojů	- 17 -
4.1 Nízkonapěťové izolační systémy	- 17 -

4.1.1	Ochrana vodičů	- 17 -
4.1.2	Drážková izolace.....	- 17 -
4.1.3	Impregnace.....	- 17 -
4.2	Vysokonapět'ové izolační systémy.....	- 18 -
4.2.1	Drážková izolace.....	- 18 -
4.2.2	Technologie VPI	- 19 -
4.2.3	Technologie Resin Rich.....	- 23 -
4.2.4	Porovnání VPI a resin rich.....	- 24 -
5	Hodnocení stavu izolačních systémů.....	- 26 -
5.1	Částečné výboje.....	- 26 -
5.1.1	Působení vnitřních částečných výbojů.....	- 26 -
5.1.2	Omezení částečných výbojů na statorových tyčích	- 27 -
5.1.3	Metody měření částečných výbojů	- 29 -
5.2	Absorpční a resorpční charakteristiky	- 30 -
5.2.1	Redukované resorpční křivky	- 31 -
5.2.2	Polarizační index.....	- 31 -
5.2.3	Metody měření odporu.....	- 31 -
5.3	Měření ztrátového činitele a permitivity	- 32 -
5.3.1	Metoda Scheringova můstku	- 32 -
5.3.2	Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát.....	- 32 -
6	Experimentální část	- 33 -
6.1	Výroba vzorků.....	- 33 -
6.2	Diagnostický systém	- 34 -
6.2.1	Postup měření	- 35 -
6.3	Výsledky měření	- 35 -
6.3.1	Vzorek A.....	- 35 -
6.3.2	Vzorek B	- 37 -
6.3.3	Vzorek C	- 39 -
6.3.4	Vzorek čisté pryskyřice	- 41 -
6.4	Zhodnocení experimentu.....	- 43 -

Zhodnocení a závěr	I
Literatura.....	III

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
R	Izolační odpor	[Ω]
ρ	Rezistivita	[$\Omega \cdot \text{cm}$]
γ	Konduktivita	[$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε	Permitivita	[$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_r	Relativní permitivita	[-]
E_0	Permitivita vakua	[$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
E_p	Elektrická pevnost	[$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]
λ	Tepelná vodivost	[$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
$Tg \delta$	Ztrátový činitel	[-]
μ_R	Relativní permeabilita	[-]
D	Elektrická indukce	[$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$]
E	Intenzita elektrického pole	[$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]

Úvod

Elektrické točivé stroje se skládají ze dvou hlavních částí – rotoru a statoru. Stator je složený ze statorových plechů, vlastního vinutí a nosné konstrukce stroje. Statorové plechy jsou voleny s ohledem na typ požadovaného stroje. Pro stroje napájené střídavým napětím využíváme svazky navzájem izolovaných plechů s vysokým elektrickým odporem a vysokou magnetickou vodivostí. Vysoký odpor je volen kvůli snížení ztrát vířivými proudy, které jsou jinak relativně výrazné. Právě takovéto požadavky splňují křemíkové izotropní plechy, které jsou v praxi označovány jako dynamové plechy. Pro stroje napájené stejnosměrným napětím potřebujeme magneticky měkkou ocel, která má vysokou permeabilitu μ_R a úzkou hysterezní smyčku. Rotor je pohyblivá část složená z hřídele, vzájemně izolovaných plechů s drážkami. Konstrukce stroje se neobejde bez izolačního systému, jehož hlavním úkolem je oddělit různé napěťové potenciály stroje. Dnes máme dva základní technologické postupy pro výrobu izolačních systémů, které splňují požadavky na provoz stroje – Resin Rich a Vacuum pressure impregnation (VPI).

Pro návrh elektrického stroje, je tudíž velice důležité dbát na správnou volbu izolačních systémů jako je druh použitého materiálu. V dnešní době je potřeba, aby zařízení bylo z ekonomického, konstrukčního a do budoucna i ekologického hlediska výhodné. Jedním ze způsobů, jak dosáhnout takového cíle je neustálé zmenšování izolačních systémů. Jejich zmenšováním nesmí dojít ke snížení výkonu a izolace by měla vydržet stejné, ba naopak i větší provozní namáhání. Provozním namáháním je myšleno mechanické namáhání, vlhkost, stárnutí izolace, částečné výboje a další. Takového zmenšování lze docílit například pomocí nanodielektrických materiálů, kterým se postupem času dostává větší pozornosti.

1 Historický vývoj izolačních systémů

Z počátku vývoje izolačních systémů se jednalo pouze o čistě přírodní látky jako je slída, guma, mramor či smůla. Takové materiály byly extrahovány přímo z rostlin, minerálů nebo jiných anorganických látek. Následně neprobíhaly žádné speciální úpravy, a tudíž měly znatelně horší elektrické a mechanické vlastnosti, které ovlivňovaly výsledné izolační schopnosti, proto nebylo možné dosáhnout takových výkonů jako dnes. Toto období je v článku [1] označováno jako „První generace“.

Ve 20. století probíhají vysoké investice do inovace izolačních materiálů a začíná takzvaná „Druhá generace“ [1]. Investování do kvalitnějších materiálů zapříčinila větší poptávka po elektrických strojích a elektrické energii. Elektrické stroje se stávají běžnou součástí našich životů. Následkem je, že se na trh se dostávají polymery a syntetické materiály jako jsou pryskyřice, izolační laky, impregnovaná izolační vlákna a kompozity. Obecně jsou to materiály lehce vyrobitelné, cenově výhodné s dobrými izolačními a elektrickými vlastnostmi. Díky jejich kvalitním izolačním vlastnostem a relativně lehké vyrobitelnosti se staly široce používanými ve všech elektrických strojích i v extrémních podmínkách.

Dnes, ve 21. století, jsou na elektrické stroje kladeny mnohem větší nároky. Mezi požadavky na moderní točivé stroje řadíme zvětšení výkonu při stejné celkové velikosti izolačního systému, řešení problému se stárnutím izolace, akumulace prostorového náboje, pulzní namáhání nebo obrácení polarity v kombinovaných polích [1]. Také jeden z důvodů je stálý nárůst poptávky po obnovitelných zdrojích energie. V neposlední řadě jsou kladeny požadavky i na ekologii. Z těchto důvodů, se investuje do nanodielektrických materiálů, jejichž příprava probíhá přidáním nanoplnidla do polymerní matrice. Takovým způsobem lze znatelně zlepšit elektrické, mechanické i tepelné vlastnosti. Období je nazýváno „Třetí generace“ [1].

2 Vlastnosti izolačních materiálů

Hlavní účel izolačních materiálů je oddělení vodivých částí s různým elektrickým potenciálem. Jak je popsáno v literatuře [2, 3], každý izolační materiál musí splňovat určité elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti.

Jako nejdůležitější požadavek jsou brány v úvahu elektrické vlastnosti. Diagnostikovány jsou vlastnosti jako elektrická vodivost, izolační odpor a rezistivita, elektrická pevnost, vhodná elektrická permitivita a malé dielektrické ztráty. Dále musí splňovat požadované tepelné vlastnosti odpovídající určeným teplotním třídám. Takovými vlastnostmi jsou tepelná odolnost, nehořlavost, vysoká tepelná vodivost a malá teplotní roztažnost. Nesmí se zapomínat také na důležitost mechanických vlastností. Kterými je myšlena vysoká pevnost v tahu, pružnost, ohebnost i odolnost vůči vibracím. V neposlední řadě je důležité brát v úvahu možnost navlhnutí a jiných chemických účinků.

2.1 Teplotní klasifikace izolačních systémů

Při návrhu izolačního systému elektrického stroje je důležité si uvědomit v jakých provozních teplotách bude stroj namáhán. Podle této informace se následně bude volit typ izolačního materiálu, který bude použit. Klasifikace je daná normou ČSN EN 60085 ed. 2., která definuje maximální teplotu, po kterou může být izolace v dlouhodobém provozu. Norma také definuje elektroizolační materiál (EIM), elektroizolační systém (EIS), stanovený index tepelné odolnosti (ATE) a relativní index tepelné odolnosti (RTE). Dále uvádí zkušební postupy pro tepelné hodnocení [4]. Rozdělení lze vidět v následující tabulce

Tabulka 1

Tabulka 1 Teplotní klasifikace izolačních systémů (převzato z [4])

ATE nebo RTE [°C]		Tepelná třída [°C]	Písmenné označení
≥ 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	N
≥ 220	<250	220	R

≥ 250 (a)	< 275	250	-
(a) Třídy nad 250 se musí zvyšovat o přírůstky 25°C.			

2.2 Elektrické vlastnosti

Jak již bylo řečeno, mezi tyto vlastnosti patří elektrická vodivost, rezistivita a izolační odpor, elektrická pevnost materiálu, dielektrické ztráty, ztrátový činitel a permitivita. V následujících odstavcích se obecně seznámíme s jednotlivými vlastnostmi.

2.2.1 Elektrická vodivost

Jiným názvem konduktivita, je značená symbolem γ [$S \cdot m^{-1}$]. Prakticky je to převrácená hodnota měrného elektrického odporu neboli rezistivity ρ [$\Omega \cdot m$]. Je zapříčiněna volnými nosiči elektrického náboje, příměsemi, vlhkostí a prachovými částicemi a dalšími znečištěními.

Elektrická vodivost pevných izolačních materiálů se navíc dělí na vnitřní vodivost elektronovou a iontovou [2, 6], kdy vždy převažuje jeden typ nad druhým. Vedle vnitřní vodivosti se nesmí zapomenout na vodivost povrchovou, ta je zapříčiněna již zmíněnými volnými nosiči elektrického náboje ve vlhkosti apod.

Z pohledu elektroizolační techniky potřebujeme izolační materiály nejlépe s nulovou vodivostí, což není v praxi reálné, a proto uvažujeme nenulovou vodivost [2].

2.2.2 Rezistivita

Je označována symbolem ρ , vyjadřuje hodnotu používanou pro porovnávání izolačních materiálů. Podle literatury [2], je rezistivita definována jako hodnota rovna odporu krychle o hraně 1 m daného materiálu, protéká-li proud mezi dvěma jejími protilehlými stěnami. Výsledná jednotka je $\Omega \cdot m$, v praxi je používáno převážně $\Omega \cdot cm$.

2.2.3 Izolační odpor

Izolační odpor je okamžitá hodnota odporu vypočítána z přiloženého napětí a procházejícího proudu, pomocí Ohmova zákona [2]. Čistě pomocí této hodnoty nelze srovnávat různé materiály, je potřeba provést vztažení na rozměry zkoušeného materiálu.

2.2.4 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost materiálu je důležitá vlastnost, která má za úkol oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. Jedná se o vlastnost, která je nejdůležitější pro návrh

elektrického stroje a dá se ovlivnit správnou volbou materiálu a jeho tloušťkou. Elektrickou pevnost neovlivňuje jenom druh materiálu, ale velkou roli hrají také vnější vlivy a velikost přiloženého elektrického pole.

2.2.5 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou přeměny energie uvnitř materiálu na tepelnou energii. V literatuře se uvádí definice, že pro použití izolantu je rozhodující, kolik elektrické energie se díky dějům odehrávajícím se v jeho struktuře po jeho zatížení elektrickým polem změní v jeho objemu za jednotku času v nejčastěji tepelnou energii [2].

2.2.6 Ztrátový činitel

Také označován pomocí $\operatorname{tg} \delta$, v praxi používáno jako „Tangenta“. Jedná se o velikost ztrátového úhlu δ . Ve střídavém elektrickém poli se zpožďuje časový průběh elektrické indukce za průběhem intenzity elektrického pole, velikost tohoto zpoždění je označováno jako $\operatorname{tg} \delta$ [2]. Je to parametr, který je nejdůležitější při měření dielektrických ztrát ve střídavém poli.

2.2.7 Permittivita

Permittivitu definujeme jako poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a s vakuem pomocí vzorce (1). Relativní permittivita popisuje chování dielektrika v elektrickém poli neboli jeho schopnost se polarizovat. Jak uvádí [4], permittivitu lze také vyjádřit pomocí elektrické indukce a intenzity elektrického pole pomocí vzorce (2).

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P = \varepsilon_0 \cdot (1 + \kappa) \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (2)$$

Celková permittivita ε (3) se dá vypočíst jako násobek permittivity vakua ε_0 a relativní permittivity ε_r . Velikost permittivity vakua je udaná konstantní veličina o velikosti $\varepsilon_0 = 8,885 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (3)$$

3 Materiály izolačních systémů

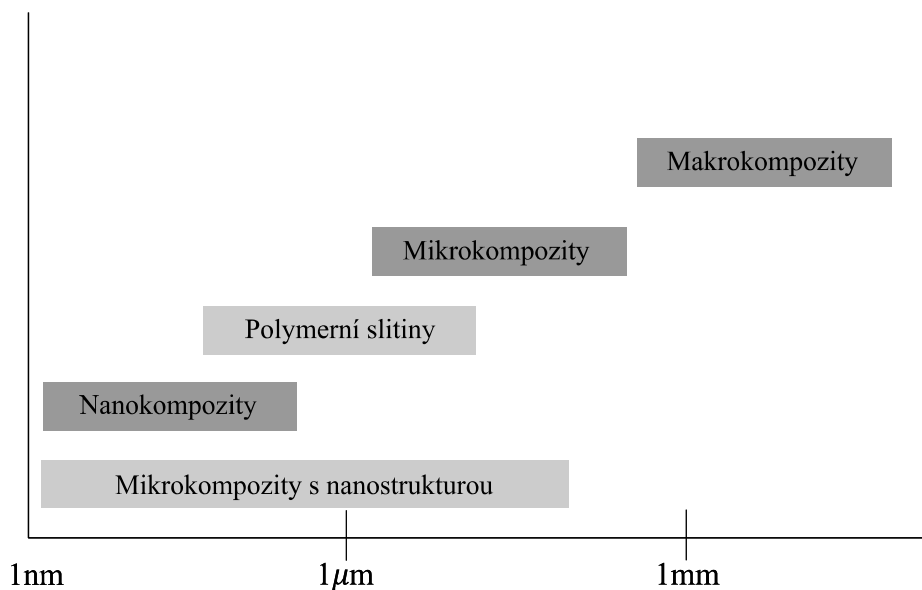
3.1 Kompozitní materiály

Materiály splňující malý rozměr a zároveň velmi dobré vlastnosti jako je vysoký měrný odpor, vysokou dielektrickou pevnost a nízké dielektrické ztráty se nazývají kompozitní materiály. Od těchto materiálů, se očekává, že budou účinně vylepšeny izolační vlastnosti základní pryskyřice.

V dnešní době izolační systémy používají tříšložkové kompozitní systémy, které mají většinou jako pojivo epoxidovou pryskyřici. Plnivem bývá skelná tkanina, PET nebo jiná syntetická folie a nosnou složku převážně zastupuje rekonstruovaná slída. Elektrické vlastnosti takového kompozitu lze charakterizovat s vnitřní rezistivitou $\rho_v = 10^{13} \Omega \cdot m$, ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta = 0,0015$ a elektrickou pevností $E_p = 35 \text{ kV/mm}$ [19].

Jelikož prvně zmiňované kompozitní materiály nemohou splňovat všechny požadované vlastnosti a nepoužíval by makroskopickou anorganickou bariéru, začaly se uvažovat nanokompozitní materiály [19]. Od těch je požadováno celkové zlepšení izolačních parametrů však závisí na vlastnostech nanovláken. Vlastnostmi jako je typ nanovláken, chemické úprava, velikost, tvar a velikost plniva. Podle výzkumu z článku [20] zjistili, že přidáním hydrofobního oxidu křemičitého byla zvětšena odolnost vůči „stromovému“ průrazu ve srovnání se základní epoxidovou pryskyřicí, a navíc má i větší pevnost.

Kompozitní materiál je tvořený z několika materiálů, přičemž každý může mít jiné fyzikální a chemické vlastnosti. Jejich spojením je vytvořen materiál s lepšími vlastnostmi, který lze využít v místech, kde nestačí jednotlivé komponenty [2]. Jako plniva se většinou používají anorganické částice, které jsou složeny z materiálů jako je kalcit, oxid křemíku, hliník, hořčík a slída. Plniva ve výsledku mění původní mechanické vlastnosti jako jsou pružnost, houževnatost, tvrdost a hustota. Rozměrově se kompozity dělí na nano (částice délky nebo průměru v řádech desítek nm), mikro (velikosti částic nebo vláken od $100 \mu\text{m}$ až $102 \mu\text{m}$) a makro [17]. Grafické rozdělení velikostí kompozitních materiálů lze pozorovat v obrázku 1.



Obr. 1 Grafické srovnání velikostí kompozitních materiálů (zdroj: [17])

3.2 Dvousložkové kompozitní materiály

Mezi takové kompozitní materiály patří slída. Slída je polykrystalický minerál s vrstevnatou strukturou vyskytující se v přírodě. Je jedním z nejvíce rozšířených izolačních materiálů v elektrotechnice, především pro vysokonapěťové účely. Čistá slída z muskovitu má velice dobré elektrické vlastnosti ($\epsilon_r = 7$, $\tan \delta < 1\%$, $E_p = 50 \dots 150 \text{ kV/mm}$) [6].

Kašovina, ze které je tvořena výsledná páska, je zpracována chemickým, tepelným nebo mechanickým způsobem. Důležitým parametrem je kalcinační teplota. To je teplota, při které materiál začne ztrácet vázanou vodu a začnou se měnit její vlastnosti. Elektroizolační slídové materiály se dělí do dvou skupin – mikanity a remikanity.

Podle prací [2, 8, 16], ve kterých jsou popsány technologie výroby slídových pásek jsou mikanity vyrobené ze štípané slídy. Taková slída je následně pomocí gravitace nebo ručně přemísťována na pás. Nevýhodná je pak nerovnoměrně rozložená slída ve výsledném výrobku. Dále také popisují výrobu remikanitů, kdy je využívána takzvaná rekonstruovaná slída, která je rozmělnována na malé částičky a pomocí papírenských technologií je vyroben kalcinovaný nebo nekalcinovaný papír.

Jako materiál je používána slída “Muskovit” (draselná slída), jejíž kalcinační teplota podle [2] je mezi 700 °C až 800 °C. Dalším materiálem je pak “Flogopit”, který má větší tepelnou vodivost s kalcinační teplotou, která se pohybuje mezi 900 °C až 1000 °C [2].

3.3 Třísložkové kompozitní materiály

Takovýto kompozit je složen ze tří základních částí – plniva, pojiva a nosného materiálu. Spojení těchto prvků nám zvýší výsledné izolační vlastnosti systému, jako jsou elektrická pevnost, odolnost vůči mechanickému namáhání, odolnost vůči chemickým látkám, odolnost proti navlhnutí atd. Je to nejdůležitější část izolačních systémů dnešních strojů.

Polyimid, obchodním názvem Kapton, je termoplast používaný zejména v oblastech s vysokými teplotními, elektrickými a mechanickými nároky. Takový materiál vyniká svou nízkou elektrickou a tepelnou vodivostí. Je vyztužován dlouhými vlákny SiC (karbid křemíku), skleněnou tkaninou anebo čedičovými vlákny. Nejčastěji je používán v kombinaci se skleněnou tkaninou nebo slídou. Jeho aplikací lze snížit hmotnost až o 5 % s nárůstem výkonu o 8 %. Relativní permitivita má velikost $\epsilon_r = 3$ až 3,5, ztrátový činitel nabývá hodnot $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ a rezistivita $\rho_v = 1,5 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$, elektrická pevnost $E_p = 7,7 \text{ kV/mm}$ pro materiál o tloušťce 1 mm a 5,2 kV/mm při tloušťce 3 mm [2].

3.3.1 Nosná složka

Nosná složka je hlavní konstrukční částí. Jejím hlavním účelem je zajistit mechanické vlastnosti. Mezi používané materiály je řazena – skleněná tkanina, bavlněná tkanina, slídový papír, polyesterová rouna, polyesterová, polyetylenftalátová (PEN) anebo polyetylenraftalátová (PET) fólii [2,9]. Nejčastěji používaná je skleněná tkanina kvůli jejím izolačním vlastnostem a jednoduchosti. Její permitivita se pohybuje od 3,7 až do 16 a elektrická pevnost po zpracování se pohybuje okolo 40 kV/m [9].

3.3.2 Plnivo

Hlavním účelem plniva je zajištění elektroizolačních vlastností kompozitu. Samotné plnivo tvoří až 80 % z celkového použitého kompozitu. Důležité je, aby plnivo a pojivo bylo kompatibilní. Během zpracování, nesmí dojít k nežádoucí chemické reakci. Mezi nejčastěji používaná plniva se řadí materiály na bázi slídy – kalcinovaný slídový papír nebo nekalcinovaný slídový papír [2,9]. Materiály upravené tímto způsobem se prodávají pod obchodními názvy jako je Cogemica, Isomica, Micamat, Romica a Samica.

Jako další plniva, popsaná v [14], jsou používány materiály, mezi které je zařazen například tavený křemen, sklo, písek, kapton nebo porcelán. Relativní permitivitu lze zlepšit křemičitanem zirkoničitým, oxidem titaničitým nebo síranem barnatým. Odolnost vůči elektrickému oblouku a plazivým proudům lze zvýšit plnivy typu: bauxit, magnezit nebo trihydrát oxidu hlinitého [14].

3.3.2.1 Zpracování slídy

Vytvořený slídový papír je buď kalcinovaný anebo nekalcinovaný. Podle technologie výroby je rozděleno na zpracování chemickým (Bardetovým) způsobem anebo mechanickým (Heymannovým) způsobem [2, 8, 16]. Slída je zpracována papírenskými technologiemi, je rozmělněná na jemné zrna a papírenskými stroji zpracována. Pro výrobu papíru není potřeba žádného dalšího pojiva, jelikož částice uvnitř slídového papíru drží pospolu díky Van der Waalsovým silám (odpudivé a přitažlivé interakce mezi molekulami).

Kalcinovaný slídový papír

K výrobě je používána draselná slída, pro jejíž rozmělnění je používána termochemická nebo termomechanická metoda. Kalcinovaný papír má vyšší elektrickou pevnost a pevnost v tahu oproti nekalcinovanému papíru. Je hůře impregnovatelný, a proto se využívá převážně pro izolační systémy vyrobené pomocí technologie resin rich.

Termochemická metoda, podle [2, 8, 16], spočívá v zahřívání slídového krystalu po dobu 20 minut při 800 °C, tímto způsobem slída ztrácí téměř 50 % krystalické vody. Zpracovaná slída je nasypána do 1 % roztoku uhličitanu sodného, následně pomocí prudkého ochlazení dojde k rozrušení krystalické struktury a objem slídy je několikanásobně zvětšen. Dalším krokem je ponoření do 5 % roztoku kyseliny chlorovodíkové. Reakcí na kyselinu vzniká v kádi oxid uhličitý, který naruší strukturu slídy a tím dojde k chemickému rozmělnění. Získaná rozmělněná slída se tzv. “vypere”, aby byl odstraněn chlorid sodný. Následně je získaná slída přivedena do sedimentačních kádí, kde jsou pomocí gravitačních síly odděleny částičky, které již nelze rozmělnit a vibračním třízením se dojde k separaci správných velikostí. Částičky jsou o desetínách až setinách milimetru. Kašovina, přiváděná na papírenské stroje, obsahuje okolo 10 % slídy a 90 % vody.

Termomechanická metoda, popsána v literaturách [2, 8, 16], začíná zahřátím slídy v peci po dobu 20 minut a končí prudkým ochlazením. Pak dochází k takzvanému částečnému rozmělnění slídy. Částečně rozmělněná slída je přivedena do dezintegrátoru, kde dochází ke druhému rozmělnění. Po druhém rozmělnění je slída přesunuta do sedimentačních kádí, kde probíhá třízení za pomoci vibrací. Hotová slídová kašovina je přivedena na papírenské stroje, kde dochází k finálovému zpracování do papírové podoby.

Nekalcinovaný slídový papír

Takovýto papír je velmi dobře impregnovatelný, a proto vyhovuje spíše izolačním systémům VPI [2, 8,16]. Velikosti rozmělněných částic jsou v rozmezí 0,04 mm až 0,2 mm. Pro výrobu je využívána hydromechanická metoda [2, 8,16], která probíhá bez použití

přidaných chemikálií. Proud vody nese slídu, která prudce naráží na rotující kotouče. Tímto způsobem dochází k rozmělnění slídy na částičky. V sedimentačních kádích opět za pomoci vibrací probíhá roztržení malých a velkých částiček. Jako u kalcinovaného papíru je výsledná kaše přiváděna na papírenské stroje.

3.3.3 Pojivo

Hlavním úkolem je spojit všechny části kompozitu (prosytit je) a po vytvrzení a zpracování zajistit stejný tvar, přenos sil a celkovou ochranu kompozitu. Jako pojiva jsou používány reaktoplasty a termoplasty. Mezi ty jsou řazeny epoxidové pryskyřice, nenasyčené, polyesterové pryskyřice, fenolické pryskyřice a vinylesterové pryskyřice [2].

Pro izolační systémy elektrických strojů jsou nejvíce rozšířené epoxidové pryskyřice. Vyznačují se výbornými mechanickými vlastnostmi, rozměrovou stálostí a přilnavostí, avšak jsou mnohem dražší než nenasyčené polyesterové pryskyřice.

3.4 Polymerní nanokompozitní materiály

Polymerní nanokompozity, mají svůj původ u mikrokompozitů a plněných pryskyřic. Velký pokrok v jejich vývoji způsobila poptávka po nanotechnologiích. Je zkoumáno vnitřní rozhraní mezi použitými látkami, které má značný vliv na výsledný objem použitého materiálu. Vědní disciplína, která se soustředí na porozumění této problematice, tu byla už před nanotechnologiemi a nese název „Koloidní věda“ [18].

Nejčastější studované polymerní matrice jsou na bázi epoxidů nebo polyfenolů. Avšak používané jsou i termoplasty, jako například polystyren nebo polyamid. Kvůli mechanickým, tepelným vlastnostem a také odolnosti vůči agresivnímu prostředí se preferují nanokompozity na bázi epoxidů. Používaná nanoplňiva jsou vrstevnaté silikáty (jíly) a anorganické oxidy – SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 nebo ZnO [19].

Při použití nanokompozitů v dielektrické a elektrické izolaci, je největší důraz kladený na průrazné napětí dielektrika. U polymerů by se měla pohybovat až na hranici 10 MV/cm (=1 GV/m) při pokojové teplotě, avšak v praxi je tato hodnota mnohem nižší a záleží na vnitřních nehomogenitách [20]. Nanoplňiva by měla mít vliv na zvýšení hodnoty průrazného napětí v praxi.

3.4.1 Výroba nanokompozitů

Kompozitní materiál je složen z alespoň dvou různých druhů materiálu. V místě kontaktu dochází k takzvanému rozhraní. Aby systém byl stabilní, je důležité, aby bylo vzájemné pnutí na rozhraní co nejmenší.

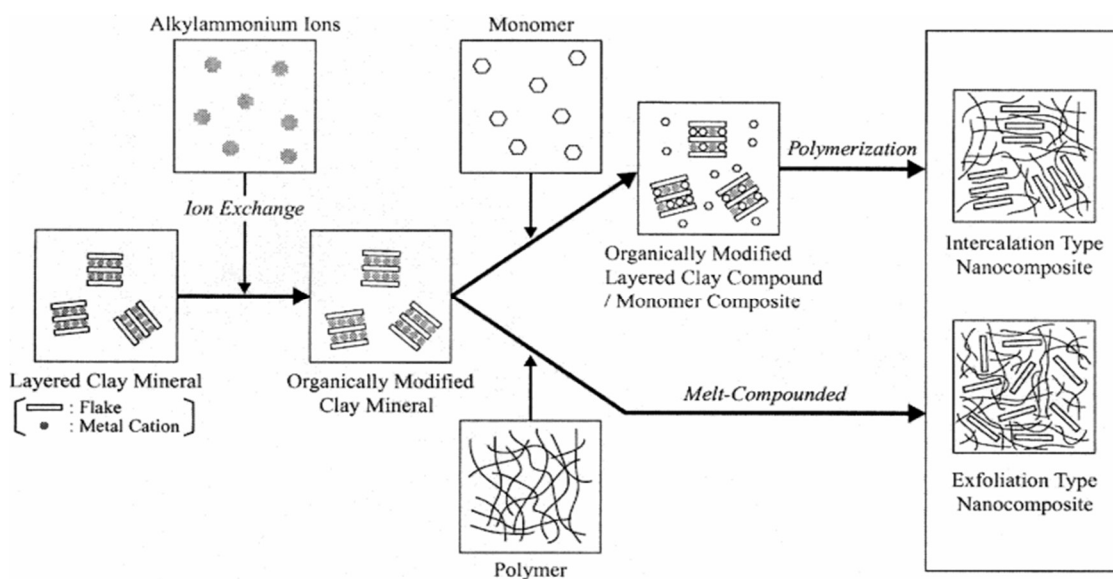
Základem zpracování je homogenní rozptýlení nanoplňiva v polymerní matrici, kdy se zároveň pevně spojí s okolním polymerem. Jelikož organické polymery a anorganická plniva jsou téměř nemísitelná, je tedy důležité vhodně zvolit druh lepidla.

Pro výrobu byly “vypůjčené” techniky z chemie. Používají se 3 hlavní metody – Interkalační metoda, Sol-gel metoda a metoda přímého rozptýlení nanoplňiv [18].

Právě první nanokompozit, vytvořený Toyotou [18], byl na bázi polyamid-jíl (Nylon-6 Clay hybrid) a využíval právě interkalační metodu. Avšak v dnešní době je zajímavá metoda Sol-gel, jelikož by mohla být po pár úpravách snadno použitelná v průmyslu [18].

3.4.1.1 Interkalační metoda

Pomocí této metody se interkalují monomery nebo polymery mezi vrstvy anorganických vrstvených látek, čímž jsou rozptýleny do polymeru v průběhu polymerace [20]. Tuto metodu rozdělujeme na další tři metody. Interkalace polymeru nebo pre-polymeru z roztoku, kdy do rozpouštědla (voda, chloroform nebo toulén) je ponořen vrstvený křemičitan. Po smíchání polymerní řetězce interkalují a vytlačí rozpouštědlo do mezivrstvy křemičitanu [20]. S odstraněním rozpouštědla vznikne nanokompozit. Druhá metoda, In-situ, je způsobena teplem, organickým iniciátorem nebo katalyzátorem fixovaným prostřednictvím kationtové výměny uvnitř mezivrstvy před ponořením [20]. Poslední metoda, interkalace tavením, je šetrnější k životnímu prostředí, jelikož neobsahuje žádné organické rozpouštědlo. Metoda je prováděna nad bodem měknutí polymeru zahrnující žihání, míchání a organicky vrstvené křemičitanu [20]. Oproti ostatním metodám je vhodnější pro průmyslové využití, a navíc umožňuje využít i polymery, které ostatní metody nedokážou zpracovat.



Obr. 2 Proces interkalace a exfoliace polymerních nanokompozitů (převzato z [20])

3.4.1.2 Sol-gel metoda

Hlavním znakem je, že tato metoda vyrábí anorganické nebo kompozitní organicko-anorganické materiály za relativně nízkých teplot [20]. A v zásadě spočívá v hydrolyze základních molekulárních prekurzorů a následné polykondenzace do skleněné podoby. Při pokojové teplotě, kdy probíhá vytvoření skleněné sítě, dokáže zpracovat anorganické a organické přísady. Do budoucna, díky vývoji této metody, se očekává, že bude klíčovou technologií.

3.5 Polymerní nanodielektrika

Existují dvě hlavní třídy polymerních nanodielektrik [21]:

- sférické anorganické nanočástice v termoplastických, elastomerových nebo termosetových polymerech;
- interkalované a syntetické jíly, slídy a jiné vrstvené anorganické látky s termoplastickými, elastomerovými nebo termosetovými polymery.

3.5.1 Sférické anorganické nanočástice

Používané nanočástice [21]:

- SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, ZnO, Si₃N₄, BN a další oxidy a nitridy;
- velikost se pohybuje až do 100nm.

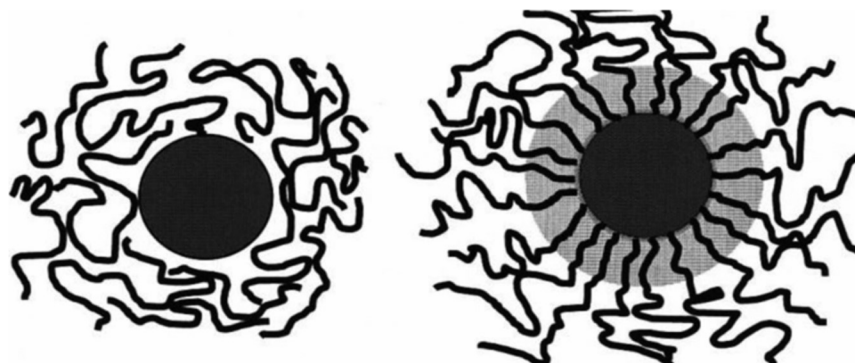
Využívané polymery [21]:

- termoplasty (polyethylen, polypropylen a další polymery);
- silikon a jiné elastomery;
- epoxidy a jiné termosety.

Klíčové faktory při výrobě [21]:

- stechiometrie nanočástic;
- nepřítomnost či přítomnost a tloušťka spojovacího činidla;

- příprava (sušení atd.), rovnoměrnost disperze, způsob míchání;



Obr. 3 Schematické znázornění sférické anorganické nanočástice v polymerní matici (převzato z [21])

3.5.2 Interkalovaná dielektrika

Používané nanočástice [21]:

- syntetické a přírodní jíly, slídy a jiné vrstvené anorganické látky;
- tloušťka až 100 nm a délka 0,5 μm až milimetry.

Využívané polymery [21]:

- celá řada polymerů používaných sférickými anorganickými nanočásticemi.

Klíčové faktory při výrobě [21]:

- disperze částic navržených pro interkalaci;
- termodynamická stabilizace pomocí povrchově aktivní látky nebo kompatibilizačních chemikálií;
- přidání monomeru nebo polymeru (s kompatibilizátorem nebo bez něj);
- odstranění vody nebo polárního rozpouštědla.

3.6 Nejčastěji zkoumané epoxidové nanokompozitní systémy

Tabulka 1 Souhrn (zdroj: [22])

	Epoxid	Plnivo	Plnění	Úprava	Závěry
1	bisephenol-A	TiO ₂ , 15 nm, jehlicovitý tvar	5 % hm.	neznámá	vyšší odolnost proti

3 MATERIÁLY IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ

		SiO ₂ , 12 nm, kulový tvar			částečným výbojům
		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 % OLMS + 63,5 % hm.		nižší tepelná roztavnost
3	EPON 828	trisilanolphenylPO SS [EN]	5 % hm.	neznámá	zvýšení doby do průrazu
	Jeffamine D400 aliphatic diamine				zlepšení odolnosti proti koroně (ve srovnání s čistým epoxidem)
4	DGEBA (diglycidyl ether bisephanolu 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

	methyl hexahydrophthalic anhydrite				na teplotě a frekvenci
	tetraethylammoni um bromide (TEAB)				
6	biphenol epoxid	jíl (vrstvené silikáty)	10 % hm. (TiO ₂)	neznámá	vzrůst doby do průrazu
					pokles permitivity při nižších frekvencích
		TiO ₂ , 23 nm			snížení prostorového o náboje

3.7 Kompozitní materiál s nanoplňivi a mikroplňivy SiO₂

V článku [23] je věnována pozornost vlivu tepelných vlastností materiálu na izolační systémy vysokonapěťových točivých strojů. Požadavkem experimentu je zlepšit tepelné a elektrické vlastnosti epoxidových kompozitních materiálů za pomoci nanoplňiva a mikroplňiva křemíku. SiO₂ má lepší tepelnou vodivost $\lambda = 1,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a bude doplněn k elektrickým izolačním systémům s tepelnou vodivostí $\lambda = 0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, kterou se snaží zvýšit [23].

Jako matrice (pojivo) byla použita epoxidová pryskyřice DEGBA, které má dobré dielektrické vlastnosti, chemickou odolnost a další mechanické vlastnosti. Použité tvrdidlo bylo Laromin C260 a pro modifikaci oxidu křemičitého byl použit produkt Aerosil R 974.

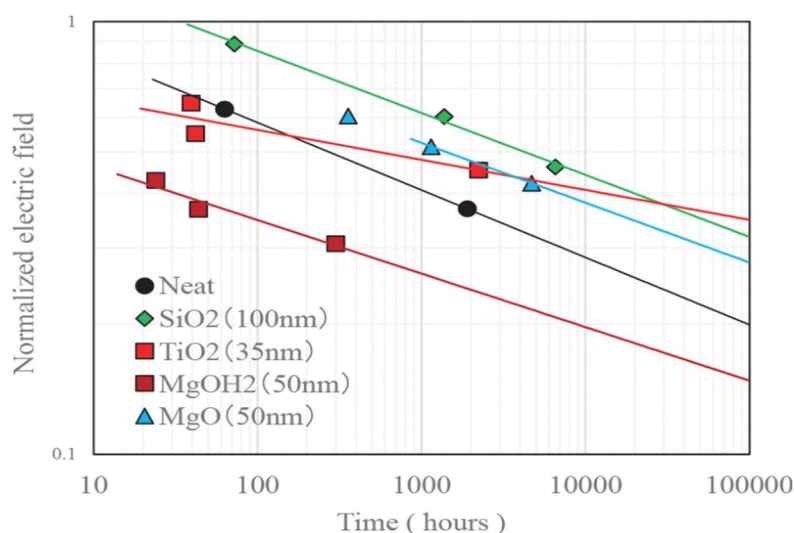
Pro pokus byly vyrobeny dvě sady vzorků s přidaným hydrofobního nano a mikroplňivem oxidu křemičitého. Vzorky byly porovnány se sadou vzorků bez oxidu křemičitého. Nanočástice mají velikost přibližně 10 nm a mikročástice přibližně 40 μm – 60 μm .

Výsledkem byla lepší tepelná vodivost u vzorku s mikroplňivy oproti vzorku s nanoplňivem. Dielektrická pevnost mezi vzorky není příliš rozdílná, ale vzorek s nanočásticemi má lepší objemový odpor a ztrátový činitel v závislosti na teplotě. U vzorku s hydrofobními částicemi

došlo ke zlepšení absorpčního proudu, objemového odporu, dielektrické pevnosti i tepelné vodivosti [23].

3.8 Využití nanokompozitů

Tento článek [24] zkoumá vlastnosti nanokompozitů s epoxidovým nebo slídovým izolačním systémem vysokonapěťových točivých strojů. Projekt je rozdělen do dvou částí. Jedna zkoumá účinky nanočástic naplněných epoxidovou pryskyřicí, aby se maximalizoval izolační výkon nanokompozitu a druhá část je zaměřená na vývoj výrobního procesu izolačního systému. Prvně byla testovaná jednoduchá pryskyřice a následně byly testovány čtyři druhy nanokompozitů naplněné nanočásticemi SiO_2 , TiO_2 , MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Na obrázku 3 lze vidět výsledky testu životnosti. Kromě $\text{Mg}(\text{OH})_2$ vykazují všechny vzorky mnohem lepší životnost než základní vzorek [24]. Nejlépe v testu obstál TiO_2 , který má nejlepší životnost (viz obr. 4).



Obr. 4 Výsledek testu životnosti (převzato z [24])

4 Izolační systémy elektrických točivých strojů

Izolační systémy jsou rozděleny do dvou základních kategorií z hlediska velikosti pracovního napětí na nízkonapěťové a vysokonapěťové. Ačkoliv je práce zaměřená na vysokonapěťové systémy, považují za důležité se zmínit i o nízkonapěťových systémech.

4.1 Nízkonapěťové izolační systémy

Takový systém je rozdělen do třech základních částí. Izolace vodičů, drážková ochrana a celková impregnace vinutí.

4.1.1 Ochrana vodičů

Základním způsobem provedení takové ochrany je na holý vodič nanese vrstva laku či smaltu. Další možností je opředení vodiče bavlnou, skelnými vlákny nasycenými pryskyřicí či PVC a dalších materiálů. Možné je také provedení kombinace nanášeného materiálu z pevné izolace [2].

4.1.2 Drážková izolace

Jedná se o přídavnou izolaci, která slouží k ochraně před poškozením izolace vinutí o stěnu drážky. Základními používanými materiály je například drážková lepenka, Nomex, vícevrstvé ohebné materiály, či kombinace materiálů. Důležitými vlastnostmi jsou elektrická pevnost, vysoký izolační odpor a mechanické vlastnosti [2].

4.1.3 Impregnace

Při výrobě stroje se jedná o poslední operaci, která vytváří izolační povlak, zvyšuje elektrickou i mechanickou pevnost a chrání použité materiály před navlhnutím. Před použitím impregnačního materiálu je nutné provést důkladné vysušení impregnované části. Impregnace používají tři technologické postupy, jimiž je máčení, zaplavování a zakapávání. Pro každý způsob je používán jiný impregnační materiál. Pro máčení se používají jednosložkové polyesterové pryskyřice neobsahující styren [2]. Pro máčení a zaplavování za rotace se používá nenasycená polyesterimidová pryskyřice. Pro zakapávání je používán roztok polyesterimidové pryskyřice ve styrenu a pro zalévání jsou používány dvousložkové polyuretanové látky [2].

4.2 Vysokonapět'ové izolační systémy

Během provozu točivých strojů má vinutí tendenci vibrovat a ohýbat se, takové chování následně dokáže způsobit nežádoucí poruchu. Aby nedocházelo k nežádoucímu pohybu vinutí v drážkách stroje, musí být vinutí pevně upevněno v drážkách magnetickými klíny. Před uložením vinutí do drážek stroje, musí být správně vytvarováno a izolováno. Izolace je prováděna jedním ze dvou způsobů rozděleným podle technologického postupu – Vacuum pressure impregnation (dále VPI) a resin-rich.

4.2.1 Drážková izolace

Drážky jsou vykládány přídatnou izolací, aby se předešlo poškození izolace vodičů o stěny drážky. Mezi používané materiály patří asi nejrozšířenější Nomex, drážková lepenka vícevrstvé ohebné materiály nebo jejich kombinace [2]. Nejdůležitějšími vlastnostmi drážkové izolace je vhodná elektrická pevnost, vysoký izolační odpor a vhodné mechanické, tepelné a chemické vlastnosti. Souhrn používaných materiálů je vidět v tabulce 2.

Nomex® je syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu – aramidu. Zpracování částic probíhá papírenskými technologiemi do podoby papíru. Ten je následně pomocí kalandrování dále zpevňován při velmi vysokých teplotách. Výsledný materiál odolává vysokým teplotám až do 220 °C, má výborné elektrické vlastnosti jako $E_p = 40 \text{ kV/mm}$, $\epsilon_r = 2,5$ a ρ_v v řádech 10^{16} , dále má vysokou pevnost v tahu, je samozhášivý a nehořlavý, působením tepla netaje, odolává účinkům chemikálií, rozpouštědel a záření [2]. Zachovává si kvalitní vlastnosti i při dlouhodobému vystavení vysokým teplotám, tudíž je vhodný pro aplikaci v elektrických strojích. Lze jej vhodně kombinovat a laminovat do více vrstev s jinými materiály a na povrch lze nanášet různé pryskyřice pro vhodné lepší spojení s jinými materiály.

Drážková lepenka je vyráběna se sulfátové buničiny, sběrového papíru, bavlněných a lněných hadrů. Její tloušťka se pohybuje v rozměrech od 0,1 do 0,6 mm. Lze se také setkat s obyčejnou lepenkou, vyráběnou ze sběrového papíru s obsahem až 15 % anorganických látek v tloušťkách 1 až 3 mm, lepenkou lesklou anebo transformátorovou lepenkou, která vyniká svojí savostí [2].

Vícevrstvé ohebné materiály mají obvykle jako základní materiál polyetyléntereftalátovou fólii (E), ke které se přidávají další materiály [2]:

- skelná tkanina (S);
- polyimidová folie (K);

4 IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ

- aramidový papír (L);
- polyesterová rohož (N);
- elektrotechnická lepenka (P);
- slídový papír (R).

V závorkách je uvedená zkratka pro rozeznání složení materiálu. Pro představu, v literatuře [2], je uveden materiál NEN 300/190 – polyesterová rohož (N), polyetylénterftalátová rohož (E) (tloušťka středové vrstvy 190 μm), polyesterová rohož (N) a celková tloušťka izolace je 300 μm .

Tabulka 2 Shrnutí používaných materiálů pro drážkovou izolaci

Materiál	Výrobce	Tloušťka	Tepelná vodivost [W/mK]	Dielektrická pevnost [kV/mm]	Ref.
Nomex 410	DuPont	0.25 mm	0.139 při 180 °C	33	[25]
ThermaVolt	3M	0.25 mm	0.23 při 180 °C	36	[26]
CeQuin I	3M	0.25 mm	0,195 při 180 °C	1.8	[26]
TufQUIN 120	3M	0.25 mm	0.184 při 180 °C	2	[26]
6640 NMN	ZhongCheng	0.25 mm	-	13	[27]
NHN (6650)	ZhongCheng	0.25 mm	-	9	[27]
Mylar A	Müller Ahlhorn	0.012-0.5 mm	-	73	[28]
Hostaphan	Müller Ahlhorn	0.012-0.35 mm	-	73	[28]
DyTerm N2S	Coveme	0.25 mm	-	15	[29]
DyTerm N3D	Coveme	0.25 mm	-	12	[29]
Ajedium PEEK film KT-825	Solvay	0.15 mm	-	16.5	[30]
PEI-PET-PAI laminate	Solvay	0.19 mm	-	14.3	[30]
6641 DMD	NIDE	0.25 mm	-	10	[31]
INSUTEK 6021	Harwana	0.25 mm	-	7.3	[32]

4.2.2 Technologie VPI

Základním a hlavním materiálem pro technologii VPI je vysoce savá slídová páska z nekalcinovaného slídového papíru, která je během impregnace vysoce prosycená. Používaný je takzvaný tříslůžkový kompozit, který je složen z nosné složky, pojiva a plniva. Plnivo zastává funkci takzvané dielektrické bariéry. Tříslůžkové kompozity používá jak technologie VPI, tak technologie resin rich [7].

Hlavním impregnačním materiálem je bezrozpouštědlová epoxidová pryskyřice. Alternativou je silikonová nebo polyesterová pryskyřice. Hlavním důvodem používání jsou

4 IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ

velmi dobré elektrické a mechanické vlastnosti a jejich vhodné využití pro vysoké teplotní třídy 180(H) a 200(N). Důležitá vlastnost je také soudržnost [2, 8-12], jelikož oproti technologii resin rich neobsahuje žádná tvrdidla.

Savá část je složena ze tří komponentů [2]:

- skleněná tkanina (nebo různé typy syntetických fólií, či polyesterové rouno);
- pojivo (obsah max 7 % z celkové hmotnosti kompozitu, použité pouze pro mechanické účely a pojivo musí být kompatibilní s následně použitým pojivem při závěrečném zpracování);
- slídový papír (vyrobený z muskovitu).

Savost pásky je velmi důležitá vlastnost, jelikož potřebujeme dokonale prosytit více vrstev na sobě, a to více než 10 (obvykle nanesené s polovičním překrytím). Z toho důvodu používáme nekalcinovaný slídový papír [2, 8-12], který mimo velmi dobrou savost navíc splňuje izolační a mechanické vlastnosti jako je ohebnost a minimální pevnost v tahu při odvíjení. Minimální pevnost materiálu je $80 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Izolační systémy se jmenovitým napětím mezi vodiči 11-25 kV jsou dimenzovány pro provozní napětí 3,5-2,0 kV/mm. Pro jmenovitá napětí nad 11 kV se téměř výlučně používají slídové pásy se skelnou nosnou tkaninou. Pro napětí nad 13,8 kV se používají dvousložkové impregnační laky na bázi epoxidové pryskyřice bisfenolu A a anhydrid karboxylové kyseliny jako tvrdidlo, kvůli nízké viskozitě a relativně vysoké teplotě pro aplikaci – až $65 \text{ }^\circ\text{C}$ [12].

V tabulce 3 jsou shrnuty vlastnosti používaného izolačního systému na bázi slídové pásy Cogemica VPI Tape 609R 16-24 a epoxidového laku Veropal 590-1K5 pro jmenovité napětí 16-17kV. Páska je složena z muskovitového papíru spojeného s malým množstvím speciálního epoxidu a tkaného skla. Páska je suchá a pružná, nelepící a vysoce savá. Je kompatibilní s většinou dnešních pryskyřic pro VPI technologii [12].

Tabulka 3 vlastnosti izolačního systému Cogemica VPI Tape 609R 16-24

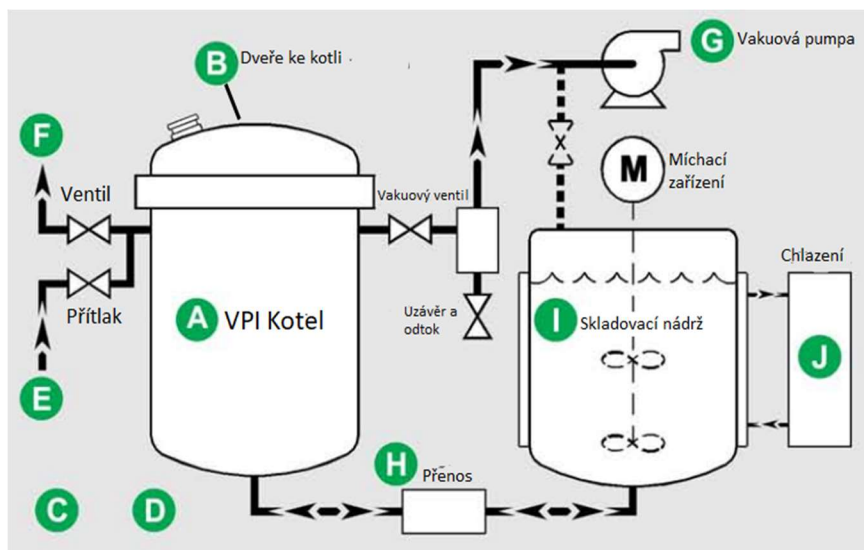
Parametr	Data sheet	Jednotka
Tloušťka	0,135±0,03	mm
Celková hmotnost	195±13	g/m ²
Obsah slídy	160±10	g/m ²
Obsah skelné tkaniny	11±3	g/m ²

Těkavé látky	0,5	%
Tuhost	<40	N/m
Pevnost v tahu	>80	N/cm
Propustnost vzduchu	<500	s/100cm ²

4.2.2.1 Zpracování VPI

Technologie VPI umožňuje dva způsoby zpracování [2, 8-12], a to metodou VIW (Vacuum impregnated winding) nebo VIB (Vacuum impregnated bar). Impregnační zařízení je složeno z vakuotěsného a tlakotěsného kotle s ohřívacím a chladícím zařízením, zásobníku impregnantu (obr. 5) a sušárny (do 200 °C). Rozdíl mezi VIW a VIB je, že metodou VIW je celé vinutí impregnováno naráz. Požití metody VIW je nevýhodné při poruše, kdy je potřeba převinout celé vinutí. U metody VIB je vždy impregnovaná každá tyč zvlášť, tím zajistíme, že při poruše lze vyměnit pouze jedno vinutí. Druhá zmiňovaná metoda je ale ekonomicky a časově náročnější.

Před samotnou impregnací musí být izolovaná část důkladně vysušená při teplotě vyšší než 100 °C po dobu 20 minut [2, 8-12]. Následně je objekt přesunut do impregnační nádoby (kotle), kde za pomoci vakua jsou odstraněny přebytečné vodní páry a nežádoucí plyny. Následně je kotel zaplaven ohřátým impregnantem ode dna. Impregnované zařízení je během procesu otáčeno, aby nedošlo k navrstvení ve spodní části. Po naplnění nastane přetlak, který podpoří proces absorpce impregnantu do pásy, tento proces trvá zhruba 1 hodinu. Naimpregnovaná je nechaná, aby odkapala a následně přemístěná do sušárny, kde dojde k vytvrzení kompozitu za normálního tlaku při proudění horkého vzduchu příslušného teplotě dané pryskyřice. Vytvrzení trvá až 20 hodin a je energeticky dost náročné.



Obr. 5 Schéma VPI zařízení (převzato a přeloženo z [13])

4.2.2.2 Používaná pryskyřice VPI

V následující tabulce 4 a tabulce 5 jsou pryskyřice vyhledatelné na trhu.

Tabulka 4 Impregnační pryskyřice od výrobce Silent Czech pro technologii máčněním nebo VPI – trakční motory [zdroj: 15]

Název	Pryskyřice	Reaktivní rozpouštědlo	Tepelná třída	Viskozita při 20 °C	Použití a vlastnosti
Damisol 3312-2	Polyesterová	vinyltoulen	H	900 mPa.s	Vysoce namáhané stroje
Damisol 3340	Polyesterimidová	vinyltoulen	H	300 mPa.s	Motory pro trakční stroje
Damisol 3551	Silikonová	není	C	1.300 mPa.s	Motory pro vysokorychlostní vlaky

Tabulka 5 Impregnační pryskyřice od výrobce Silent Czech pro technologii máčněním nebo VPI – vysokonapěťové stroje [zdroj: 15]

Typ	Pryskyřice	Reaktivní rozpouštědlo	Tepelná třída	Viskozita při 20 °C	Použití a vlastnosti
DAMISOL 3308	Polyesterimidová	Styren	H	150 mPa.s	Pro stroje do 15kV
DAMISOL 3309	Polyesterimidová	Vinyltoulen	H	170 mPa.s	Pro stroje do 15 kV
DAMISOL 3307	epoxid-anhydrid	není	F	300-500 mPa.s	Pásy Samicapor s katalyzátorem pro celkovou a individuální VPI

DAMISOL 3313	epoxidová	není	H	1000 mPa.s	Stroje do 14kV, jednosložková
-----------------	-----------	------	---	------------	----------------------------------

4.2.3 Technologie Resin Rich

Technologie Resin Rich se od VPI jak již plyne z názvu liší tím, že je bohatá na pryskyřici. U této metody se obsah pojiva pohybuje mezi 30 až 40 % celkové hmotnosti použitého kompozitu, kdežto u VPI se pohybuje okolo 6-7 %. Základní částí je tříslložkový kompozitní materiál, jehož matici (nosnou část) tvoří skleněná vlákna. Tkanina je tvořena stáčenými vlákny (tloušťka zhruba 0,14mm), avšak pomocí technologií lze vlákna srovnat do roviny (tloušťka zhruba 0,12mm). V případě srovnání vláken dojde k úspoře materiálu a zároveň se až o 7 % sníží dielektrické ztráty a zvýší se elektrická pevnost. Používaným plnivem bývá před impregnovaný kalcinovaný slídový papír, tvořící izolační bariéru. Je hutný, pevnější a méně nasákavý. Poslední a třetí složkou je pojivo. Tím je reaktoplastická bezropouštědlová novolaká nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Takto vytvořený tříslložkový kompozit se dodává v předtvrzeném stavu (tzv. B stav), aby se jeho aplikace zjednodušila. V některých případech je prokládán separační fólií, aby nedocházelo k slepení jednotlivých částí. Tloušťka hotového materiálu se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,20 mm. Tento způsob je vhodný pro izolaci velkých elektrických točivých strojů, kdy celá tyč může být izolována páskou jednoho druhu nebo je na rovné části použit jiný druh než v čele. [2, 9-11, 14]

4.2.3.1 Zpracování resin rich

Existují 2 způsoby technologie navinutí pásky na tyč, popsané v [2, 9-11, 14]. Diskontinuální technologie, kdy čela jsou ovijena páskou a rovinná část je tvořena fólií (část která je v drážce). Nevýhodou je menší elektrická pevnost na přechodu fólie-páska, z toho důvodu je vhodnější pro menší stroje. Izolační vrstva se nanáší silnější, z důvodu stlačení v dalších krocích. Kontinuální (spojité) navíjení spočívá v tom, že páska je navíjena s překrytím a to třetinovým, polovičním nebo dvoutřetinovým po celé délce tyče i čelech vinutí, toto řešení je vhodné pro velké stroje. Ovinutí se provádí s určitým tahem, díky čemuž je zajištěna kvalita navinuté vrstvy. Jelikož nanášená páska je lepivá, není možné dodatečné dotažení pásky.

Po ovíjení následuje krok vytvrzování, které probíhá v lisech při zvýšené teplotě a tlaku, je potřeba, aby byla před vytvrzováním odstraněna přebytečná vlhkost a nedocházelo ke

slepování izolace. V první řadě se předejde formě s vloženým vinutím zhruba na 100 °C, kdy pojivo začíná gelovatět. Aby se nám izolace a forma v žádném případě nespojila, vyplníme prostor mezi nimi pomocí separační folie. Během gelace se spojují všechny složky izolace a ve formě zároveň dochází k dotažení na požadované rozměry. Jakmile se dotáhne na požadovanou velikost, tak proces pokračuje zvýšením teploty na 160-170 °C a dojde ke konečnému vytvrzení. Vytvrzení může trvat i 60 minut, avšak závisí na použité pryskyřici a tloušťce. V posledním kroku se vytvrzená část musí pozvolně ochlazovat, aby nedošlo k mechanickému pnutí uvnitř materiálu a izolační vrstvy. Po pozvolném ochlazení se vrchní část ovine polovodivými páskami s polovičním překrytím a výstupy z drážek jsou také odstupňovány polovodivými vrstvami. Tímto lze eliminovat vznik výbojové činnosti. Výhodné je, že takto připravenou cívku lze v případě poruchy vyměnit bez potřeby servisu. Nevýhodou naopak může být výskyt nehomogenit a potřeba přesných forem. [2, 10, 14]

4.2.4 Porovnání VPI a resin rich

Rozdíly jsou hlavně v náročnosti a pořizovací ceně zařízení potřebných pro výrobu. Pořizovací cena výrobních zařízení pro technologii VPI je vyšší, a vyplatí se spíše pro sériově vyráběné stroje. Izolační systém VPI vykazuje homogenní vlastnosti, které technologie resin rich nemá, rozdílné vlastnosti jednotlivých částí vinutí se u této technologie projevují hlavně při použití diskontinuálního ovíjení tyčí vinutí.

Další rozdíly jsou v používaných izolačních materiálech. Technologie VPI využívá vysoké savosti pásy s malým obsahem pojiva (přibližně do 7 až 8 %) vyrobené z nekalcinovaného slídového papíru, pro dostatečné prosycení impregnačním lakem. Technologie resin-rich používá izolační materiály nejčastěji na bázi kalcinovaného slídového papíru, s obsahem pojiva 30 až 40 %, kde nosnou složku tvoří skleněná tkanina nebo PEN, PET (PETP) fólie. Po vytvrzení hlavní izolace obou izolačních systémů resin-rich i VPI je obsah pryskyřice kolem 25–30 %. Pro jednodušší představu a shrnutí je vytvořena následná tabulka 6. [2]

Tabulka 6 Porovnání technologií VPI a Resin Rich

	Resin rich	VPI	
		VIW	VIB
Technické zařízení	Vytvrzovací formy a pece	Vakuotěsné impregnační zařízení a kotel	
Náročnost výroby	Jednodušší přípravky	Vyšší cena náročného zařízení	

4 IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ

Montáž	Po vytvrzení tyčí	Před vytvrzením a impregnací	Po vytvrzení jednotlivých tyčí
Rozměry stroje	Neomezeny	Omezeny rozměry impregnačního kotle	
Možnost oprav	Možnost oprav jednotlivých tyčí	Obtížná	Možnost výměny tyčí
Použitelnost	Větší stroje, kusová výroba	Menší stroje, sériová výroba	Větší stroje, sériová výroba
	Pro vyšší jm. napětí	Pro nižší jm. napětí(15kV), nevhodné pro Roeblovy tyče	
Vlastnosti izolace	Vysoká dielektrická pevnost	Homogenní systém, lepší izolační vlastnosti a odvod tepla	
Výhody	Snadná opravitelnost, možnost testování jednotlivých tyčí	Hermetizace vinutí, lépe odolává dynamickým silám	
	Nižší investice do zařízení	Rychlost	
Nevýhody	Vytlačení přebytečné pryskyřice při lisování	Nemožnost opravy	Časová náročnost
	Pro každý stroj jiná vytvrzovací forma, časově náročnější	Vysoké pořizovací náklady	Nejnákladnější z technologií
	Možnost výskytu nehomogenit	Nutnost skladování a chlazení impregnantu Drahé a složité zařízení	

5 Hodnocení stavu izolačních systémů

5.1 Částečné výboje

Částečné výboje jsou takové výboje, které částečně přemost'ují izolaci mezi vodiči nebo elektrodami o různých potenciálech [3]. Obvykle jsou důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci, na povrchu izolace nebo v okolí vodičů.

Vyskytují se jako výbojové impulzy s dobou trvání kratší než 1 μ s. Takové výboje pak negativním způsobem významně ovlivňují vlastnosti izolačního systému jako je životnost a spolehlivost [3, 5, 33]. Na izolační systémy působí elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými vlivy. Izolační systémy statorových vinutí generátoru obsahují vždy tzv. dutinky, které jsou naplněny plynem s permitivitou blízkou jedné, permitivita pevné izolace je ϵ_r krát větší. Během působení elektrického pole je plyn v dutinkách namáhán ϵ_r krát větším gradientem než pevná izolace (elektrická pevnost izolace je mnohem větší než elektrická pevnost plynu). Z tohoto důvodu dochází k průrazům při nižším napětí, než je průrazné napětí izolace. Napětí, při němž dojde k průrazu plynu v dutinkách je dáno Paschenovým zákonem.

Obecné rozdělení částečných výbojů podle místa výskytu [3]:

- **Vnitřní částečné výboje** – výboje v plynech obklopené pevným či kapalným dielektrikem (výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku);
- **vnější částečné výboje** – částečné výboje v plynech, v okolí elektrod s malým průměrem, zakřivených ploch (doutnavé a korónové výboje);
- **povrchové částečné výboje** – v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika (klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky v toč. strojích, průchodkách atd..).

5.1.1 Působení vnitřních částečných výbojů

Částečné výboje způsobují svými ať už přímými nebo nepřímými účinky chemické a fyzikální změny v izolantu [3]. Přítomnost výbojů způsobuje degradaci a selhání dlouhodobě namáhaných izolačních systémů. Tyto změny jsou nevratné. Degradace je především způsobena chemickou reakcí a bombardování stěn dutiny částicemi, které dopadají na povrch izolantu [3].

Částečné výboje vedou k vytváření krystalků uvnitř dutinek, které se postupně zvětšují. Zvětšování krystalů vede k zvýšení aktivity lokálních částečných výbojů a v dielektriku se

tvorí prohlubně. V těchto prohlubních začíná růst tzv. stromeček který následně vede až k průrazu izolace. Tomuto jevu se říká elektrické „stromování“ [33].

Pevné produkty uvnitř dutinek mají krystalický tvar a jsou složeny z kyseliny šťavelové, jejich vznik se začíná projevovat až po stovkách hodin působení malých výbojů [33].

Růst takzvaného „stromečku“, znamená postupné rozšiřování vodivé cesty uvnitř materiálu vlivem částečných výbojů. Jeho růst, rozdělen do několika fází, je vidět na obrázku 5.



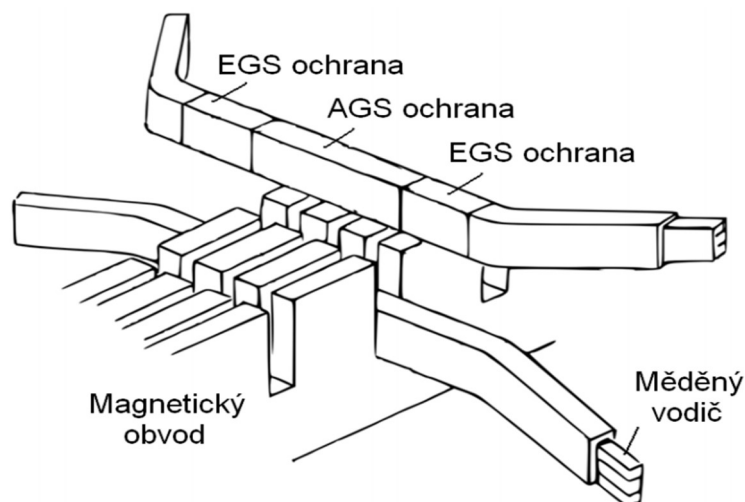
Obr. 5 Fáze růstu elektrického stromečku (zdroj: [3])

První fázi je schopná detekovat pouze velmi citlivá technika a nastává v okamžiku počátku růstu. Druhá fáze začíná po vytvoření první větve, ze které následně rostou další menší větve ve směru uzemněné elektrody. Fáze končí po dosažení elektrody, avšak průraz se nekoná, jelikož vedlejší větve jsou malé a mají příliš malou vodivost. Ty mají v hlavních částech průměr okolo 10 μm a ve špičkách méně než 1 μm [33]. Třetí fáze začíná prvním dosažením elektrody a končí totálním průrazem. V této části se kanálky stromečku rozšiřují na hodnoty mezi 60 μm až 150 μm [33].

5.1.2 Omezení částečných výbojů na statorových tyčích

Kvůli dosažení maximální provozní spolehlivosti je potřeba se soustředit na zlepšení intenzity elektrického pole na izolovaných vinutích. V současnosti se pro ochranu povrchu izolovaných tyčí před povrchovými (klouzavými) výboji používají dvě metody – ovinutí polovodivou páskou a nátěry laky snižující vodivost ve směru od magnetického obvodu stroje. Nátěry jsou velmi efektivní, avšak mají jednu hlavní nevýhodu. A to takovou, že ochrannou vrstvu nelze nanést zcela rovnoměrně, a tudíž vznikají místa s tenčí vrstvou. V takovém místě je namáhání větší a postupem času dochází k “odprašování” laku a materiál začne degradovat [34, 35].

Cívky vinutí jsou opatřeny vnější ochranou proti koruně v drážkové části (AGS) a ochranou proti koruně u výstupu vinutí v čele (EGS) viz obrázek 7.



Obr. 7 Schéma uložení statorového vinutí a ochrany (zdroj: [37])

5.1.2.1 Vnější ochrana v drážkové části AGS

Taková ochrana je vyráběna ve formě pásek, laků, tmelů, ale i desek nebo vlnovců [35, 36]. Hlavní funkcí je eliminovat částečné výboje v drážkové části stroje v místech s plynovými mezerami. Zamezuje vzniku výbojů v místech s nerovnostmi na povrchu, které vznikají při výrobě nebo vibracemi při provozu. U strojů chlazených vzduchem vytváří částečné výboje ozon, který spolu s dusíkem vytváří kyseliny, které jsou zdravotním rizikem, ale také oslabují materiály. Z těchto důvodů se povrch cívek ovíjí polovodivou páskou nebo lakuje. Z dlouhodobého hlediska se upřednostňují pásy před lakováním, jelikož z dlouhodobého hlediska mají mnohem lepší vlastnosti [35, 36].

5.1.2.2 Vnější ochrana u výstupu z drážek EGS

Ochrana u výstupu (EGS), se používá z důvodu vysokého gradientu elektrického pole, v jehož důsledku vznikají částečné výboje, které postupně degradují materiály [35, 36]. Nerovnoměrnému rozložení elektrického pole také napomáhá špatný stav izolačního systému, vlhkost, nečistoty nebo stárnutí materiálu. Aby se velikost gradientu snížila, používají se laky a pásy s nelineární voltampérovou charakteristikou.

Jako EGS ochranu se používají opět polovodivé pásy, které jako nosič používají polyesterovou tkaninu. Druhou možností jsou laky nebo modifikovaná fenolická pryskyřice. Oproti AGS, kde se jako plnivo používá grafit, EGS používají SiC plnivo (Karbid křemíku).

Takové plnivo splňuje požadavek nelineárního průběhu voltampérové charakteristiky. Takové pásy jsou vhodně pro teplotní třídy do F (155 °C) [35].

Na obrázku 8 je vidět poškozené statorové vinutí hydroalternátoru. Viditelné bílé čáry se objevují na přechodu polovodivého povlaku a povlaku z karbidu křemíku. V daném místě došlo z důvodu špatného nanesení, vlivu ozonu a částečných výbojů k vymizení povlaku. Oproti tomu na obrázku 9, je vidět již úplně zničený polovodiivý povlak.



Obr. 8 Částečně porušený povlak (zdroj: [38])



Obr. 9 Úplně zničený povlak (zdroj: [38])

5.1.3 Metody měření částečných výbojů

Metody jsou obecně rozdělovány do dvou skupin – globální a lokální. Globální metoda je zaměřená na celkové zhodnocení částečných výbojů v celém izolačním systému, přičemž lokální metody mají za úkol lokalizovat zdrojové místo výbojů.

5.1.3.1 Globální galvanická metoda

V literatuře [3] je detekce částečných výbojů popsána jako měření proudových impulzů, jejichž velikost lze měřit vhodnými obvody a následně vyhodnotit velikost částečných výbojů. Tato off-line metoda je tedy založená na snímání proudových impulzů s pomocí měřicí impedance. Na impedanci se v průběhu měření vytvářejí úbytky napětí, způsobené vazebním kondenzátorem, které odpovídají zdánlivému náboji jednotlivých částečných výbojů. Jejím účelem je tudíž převést proudové pulzy vyvolané výboji na výstupní napěťové pulzy vedené do měřicího zařízení. Již zmíněný vazební kondenzátor, je velice důležitá část měřicího obvodu, jejíž úkolem je do obvodu dodat náboj potřebný ke kompenzaci přechodové změny napětí při působení částečném výboji [3].

Dále jsou v [3] popsány výhody a nevýhody galvanické metody. Mezi výhody patří vysoká citlivost měření, vysoká výpovědischopnost, bezpečí zkoušence, a navíc i

použitelnost pro on-line diagnostiku. Mezi nevýhodami najdeme vysokou citlivost na okolní rušení (elektromagnetické vlny vysílačů i vlivy prvků zapojených v obvodu).

5.1.3.2 Lokalizační metody měření částečných výbojů

Lokalizační metody podle [3] jsou založené na snímání elektromagnetického pole, které vyzařují částečné výboje.

Jednou z lokalizačních metod je pomocí induktivně vázané sondy. Provedení popsané v [3] popisuje snímač, který je přiložen nad drážku vinutí a spolu s magnetickým obvodem statoru a vodičem vinutí stroje vytváří proudový transformátor, kdy v cívce sondy se indukují pulzy vyvolané dobíjecími proudy částečných výbojů. Pro měření jednotlivých tyčí vinutí se používá diferenciální elektromagnetická sonda, kterou tvoří dva sériově spojené induktivní snímače. Pro on-line diagnostiku je vhodná kapacitní drážková sonda, ovšem musí být do stroje zabudována už při výrobě, kdy je vložena do statorových drážek pod klíny. Snímá vysokofrekvenční elektromagnetické pulzy, které generují částečné výboje. Dalším snímačem, který je schopný lokalizovat částečný výboj je LEMKE sonda. Literatura [3] popisuje snímač, který je tvořen plošnou kapacitní nebo lineární induktivní sondou zapojenou na vstup rychlého diferenciálního zesilovače. Výstupní signál je zobrazován na osciloskopu.

Mezi speciální metody můžeme dále zařadit měření pomocí akustické sondy. Slouží k přímé lokalizaci částečných výbojů a jedná se spíše pro orientační informace. Dnešní sondy využívají spojení optického a akustického. Mikrofon sondy je namířen na předpokládané místo výbojů a na obrazovce je viděna četnost výbojů.

5.2 Absorpční a resorpční charakteristiky

V literatuře [2,3] je tímto názvem popsána problematika, které poskytuje informace o jedněch z nejdůležitějších parametrů stavu izolantu. Těmito charakteristikami se zjišťuje izolační odpor (R_x), vnitřní (ρ_v) a povrchová (ρ_p) rezistivita, polarizační indexy P_{i1} a P_{i10} a další parametry, kterými jsou redukované resorpční křivky (RRK) a plochy pod absorpčními i resorpčními křivkami. Způsoby a metodami měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů se zabývá norma ČSN IEC 93 „Metody měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů“ a ČSN IEC 167 „Zkušební metody na stanovení izolačního odporu tuhých elektroizolačních materiálů“.

5.2.1 Redukované resorpční křivky

Z resorpčních charakteristik měřeného proudu získáme velice cenný parametr, který je nazýván redukováná resorpční křivka (RRK). Jedná se o matematické zpracování resorpčních charakteristik pomocí rovnic (6) a (7):

$$x = \ln(t) - \ln(15) \quad (6)$$

$$y = ABS [\ln(i_t) - \ln(i_{15})] \quad (7)$$

kde x, y jsou transformované souřadnice (-)

t je čas (s)

i_t je okamžitý proud v čase t [A]

i_{15} je proud v patnácté sekundě [A]

Výsledným parametrem pro hodnocení vlastností izolačních systémů jsou směrnice jejich lineárních náhrad [2]. Čím větší má daný izolant větší směrnici redukové křivky, tím má lepší izolační vlastnosti, a naopak se zmenšující se směrnici má horší izolační vlastnosti.

5.2.2 Polarizační index

Další z důležitých parametrů, které získáme měřením odporů, jsou polarizační indexy. Ty využívají pro popis časovou změnu absorpčního proudu. Pro popis materiálu se používá jednodeminutový index p_{i1} a desetiminutový index p_{i10} . Tyto indexy se vypočítají pomocí vztahu (8), přičemž se jedná o hodnoty v čase po přiložení napětí.

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad (8)$$

kde R_{60}, R_{15} jsou odpory v 60 a 15 sekundě [Ω]

i_{15}, i_{60} jsou absorpční proudy [A]

Hodnocení izolačního materiálu pak spočívá ve výsledné hodnotě polarizačního indexu. U navlhle a znečištěné izolace je tento index blízký jedné. Oproti tomu u suché izolace je index mnohem vyšší.

5.2.3 Metody měření odporu

Literatura [2] rozděluje metody na přímé a porovnávací. Přímá metoda využívá konstantního napětí přiloženého na neznámý odpor a následným vypočtením protékajícího proudu. Porovnávací metoda určuje poměr neznámého odporu a známého odporu v odporníku opět při konstantním napětí.

Voltampérová metoda, přímá metoda, je doporučena pro měření vnitřní a povrchové rezistivity. Využíván je stejnosměrný zdroj napětí o běžných hladinách 100, 250, 500, 1000

V, ovšem vždy záleží na měřeném materiálu. Výsledný odpor je pak dopočítán pomocí Ohmova zákona.

Pro nepřímé měření je nejčastěji používána metoda Wheatsonova můstku, který, jak již bylo zmíněno, porovnává hodnotu neznámého odporu se známým referenčním odporem vysoké hodnoty. Podle [2] se tato metoda nehodí pro měření, kde proud tekoucí vzorkem je časově závislý a pro kvalitní izolanty.

5.3 Měření ztrátového činitele a permitivity

Z uvedených informací v [2], je principem všech měřících metod určení prvků náhradního schématu dielektrika. Pro získání objektivních informací je důležité měřit $\text{tg } \delta$ a ϵ_r v závislosti na napětí, teplotě a frekvenci. Doporučení a postupy k měření těchto vlastností popisuje dále norma ČSN IEC 250. Nejpoužívanější metodou pro měření $\text{tg } \delta$ je metoda zapojení Scheringova můstku. Dále jsou využívány také automatické můstky anebo metoda širokopásmové spektroskopie (BDS), která je popsána v kapitole 6.2.

5.3.1 Metoda Scheringova můstku

Můstek je sestaven z dvou hlavních částí – vysokonapěťové části a části sloužící k vyvažování můstku. Galvanické oddělení obou částí tvoří vzorek v elektrodovém systému a kapacitní normál, který je proveden jako vysokonapěťový kondenzátor o kapacitě až 100pF, se zanedbatelnými ztrátami $\text{tg } \delta < 10^{-5}$ a plynným dielektrikem. Před každým vlastním vyvážením můstku je nutné provést eliminaci parazitních kapacit regulátorem. Pomocí kapacitní a odporové dekády vyvážíme můstek. Vyrovnání indikuje nulový indikátor N. Pro vyrovnaný můstek pak platí rovnice (9) a (10).

$$C_S = C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (9)$$

$$\text{tg } \delta = \omega \cdot R_S \cdot C_S = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (10)$$

5.3.2 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát

Vychází z klasického principu již zmíněného Scheringova můstku a slouží k automatickému zobrazení požadovaných veličin [2, 3]. Oproti klasickému můstku, který je založen na vyvažování, je měřený fázový úhel mezi dílčími napětími na nízkonapěťových impedancích. Ztrátový úhel $\text{tg } \delta$ je pak určen z fázového úhlu mezi napětími, která jsou na nízkonapěťových kondenzátorech. Digitalizované signály jsou následně zpracovány v počítači pomocí Fourierovy transformace.

6 Experimentální část

Pro práci byl zvolen experiment, zabývající se ochranou proti částečným výbojům. Testovaným subjektem jsou polovodivé pásy. Cílem je zjistit dielektrické vlastnosti jednotlivých vzorků, analyzovat polarizační děje a jejich následné porovnání.

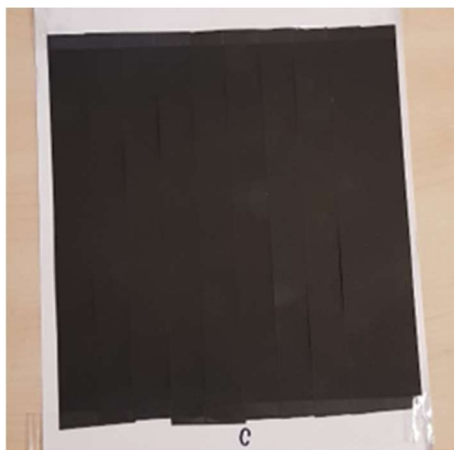
Polovodivé pásy mají za úkol chránit vinutí před výboji na povrchu vodičů a teplem vznikajícím uvnitř vodičů. Jak již bylo zmíněno, potřebujeme chránit vinutí v drážkové části i v částech ohnutých, kde vinutí vystupuje ze stroje. Tato polovodivá vrstva má za úkol rozložit napětí a omezit skokové změny, které se objevují na konci vodiče. Hlavním cílem těchto ochran je tedy zabránit vzniku zkratu mezi povrchem izolace a statoru v místech se vzduchovou mezerou.

6.1 Výroba vzorků

Jelikož se jedná se o tajné vzorky, které z důvodu tajemství nebylo možné detailně popsat a ani jmenovat výrobce, dále budou zmiňovány jako vzorek A, B nebo C. Pro experiment byly dodány tři druhy polovodivých pásek a jedna pryskyřice.

Průběh přípravy:

1. Polovodivé pásy s polovičním překrytím byly nastříhány o délce a šířce 20 cm. (viz obr. 10)
2. Na takto připravené pásy bylo nanášeno cca 20ml pryskyřice a rovnoměrně rozetřeno (viz obr. 11)
3. V dalším kroku je vzorek vložen do teflonového papíru a zatěžkán (viz obr. 12). Strany jsou zajištěny před výtokem pryskyřice.
4. Zatěžkaný vzorek byl následně přemístěn do pece, kde probíhalo po dobu 10hodin při 145 °C vytvrzení.
5. Příklad hotového vzorku viz obr. 13.
6. Pro měření dielektrických vlastností byl vzorek následně upraven na velikost 4x4cm.



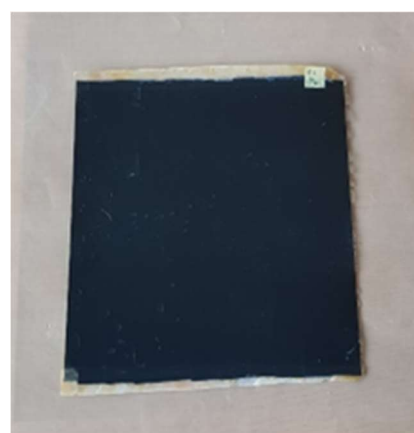
Obr. 10 Přípravený pásy



Obr. 11 Pásy s rozetřenou pryskyřicí



Obr. 12 Před vytvrzením



Obr. 13 Vytvrzený vzorek

6.2 Diagnostický systém

Cílem měření bylo zjištění jejich dielektrických vlastností v elektrickém poli. Pro měření byl použit o zařízení BDS analyzátor (viz obr. 13). Použité zařízení je schopné měřit dielektrickou, vodivostní a elektrochemickou impedanční spektroskopii. Všechny metody v zásadě měří impedanční spektrum $Z^*(\omega)$ vzorku vloženého mezi dvě nebo více elektrod. Naměřená spektra jsou následně vyhodnocována buď pomocí dielektrické a vodivostní spektroskopie anebo elektrochemickou spektroskopii. V našem případě je důležitá první zmíněná, a to dielektrická a vodivostní spektroskopie. Tímto způsobem se snažíme získat informace o komplexní permitivitě $\epsilon^*(\omega)$ anebo vodivostní $\sigma^*(\omega)$ spektrum. Díky zadaným rozměrům vzorku je také jednoduché získat komplexní impedanci $Z^*(\omega)$.

6.2.1 Postup měření

Jelikož měření probíhá ve frekvenčním pásmu $1 \cdot 10^{-1}$ až $1 \cdot 10^7$ Hz, při teplotách 20 až 100 °C a konstantním střídavém napětí 1 V. Je potřeba celé frekvenční pásmo proměřit vždy na konstantní teplotě, proto musí být pro měření dostupný dusík.

Přístroj pokaždé nastaví konstantní teplotu, na které je proměřena frekvenční závislost, po odměření je teplota zvýšená o 5 °C. Frekvence je tedy měřená již ve zmíněném rozsahu od $1 \cdot 10^{-1}$ až $1 \cdot 10^7$ Hz, důležité je přidat frekvenci 50 Hz. Pro měření je potřeba do programu zadat tloušťku měřeného vzorku, aby byly umožněny další výpočty.

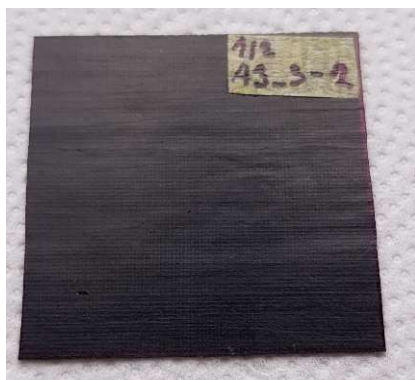
6.3 Výsledky měření

Následují podkapitoly s výsledky měření jednotlivých vzorků. Zpracovány byly závislosti reálné a imaginární permitivity, ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ a $\text{tg } \phi$.

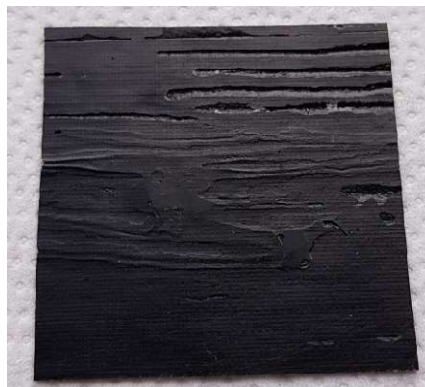
Měření reálné složky komplexní permitivity ϵ' , nám udává vlastní relativní permitivitu materiálu, která je mírou kapacitního charakteru [2]. Imaginární část ϵ'' je pak mírou ztrát vzniklých v dielektriku namáhaném střídavým elektrickým polem [2]. Ztrátový činitel $\text{Tg}(\delta)$, je poměrem imaginární a reálné části permitivity.

6.3.1 Vzorek A

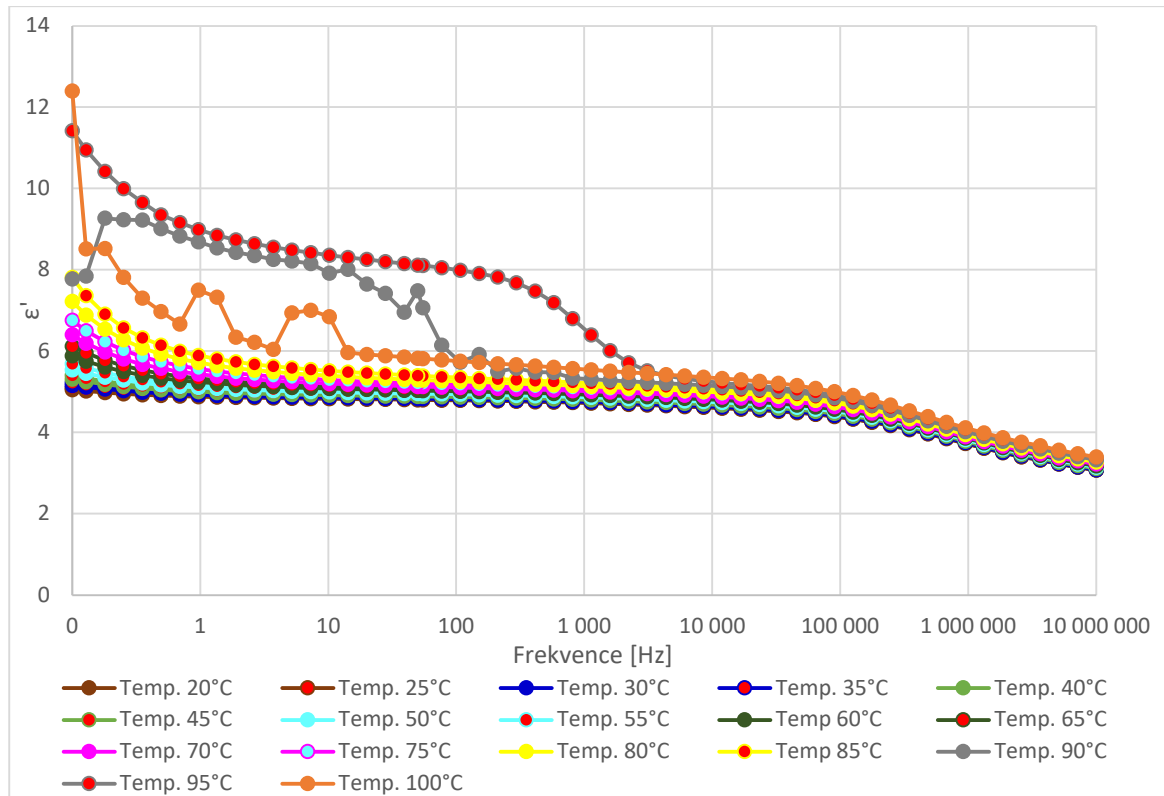
Měřený vzorek typu A, viz obrázek 14 a 15. Skokové změny, které se projevují u 90 °C a 100 °C, stejně tak jako lze pozorovat na zbylých grafech, můžeme přisuzovat přepínání rozsahu. Důležitou vlastností pro provoz materiálu je, že relaxační polarizace posunuta až do vyšších frekvencí a v provozní frekvenci 50 Hz je ϵ' relativně konstantní (viz graf 1). Zajímavý fakt je posunutí „peaku“, relaxační polarizace při 95 °C na 1000 Hz.



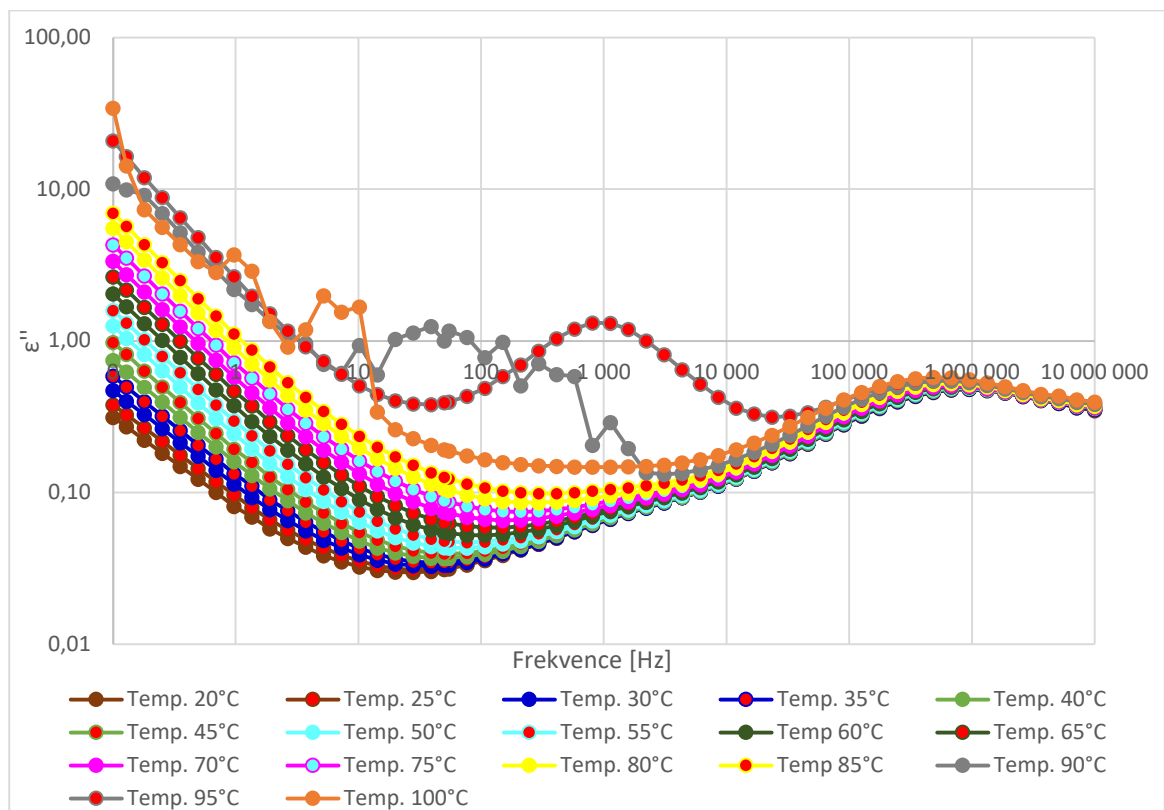
Obr. 14 Měřený vzorek A – přední strana



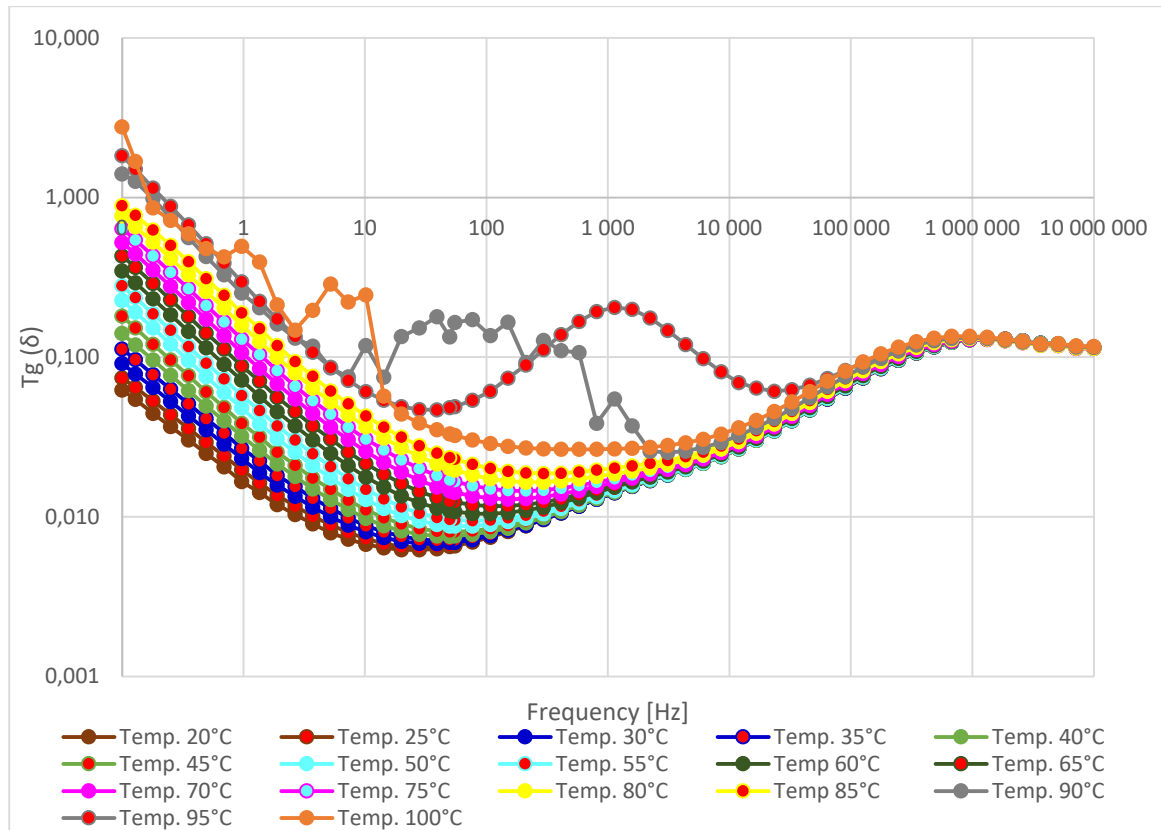
Obr. 15 Měřený vzorek A – zadní strana



Graf 1 Závislost reálné permitivity na frekvenci – vzorek A



Graf 2 Závislost imaginární permitivity na frekvenci – vzorek A



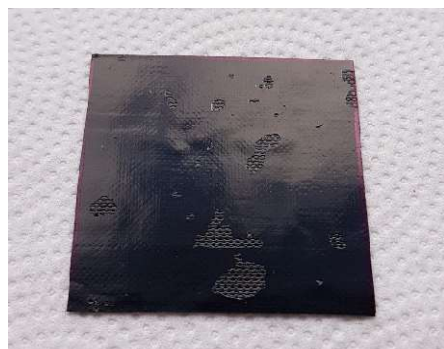
Graf 3 Závislost ztrátového činitele na frekvenci – vzorek A

6.3.2 Vzorek B

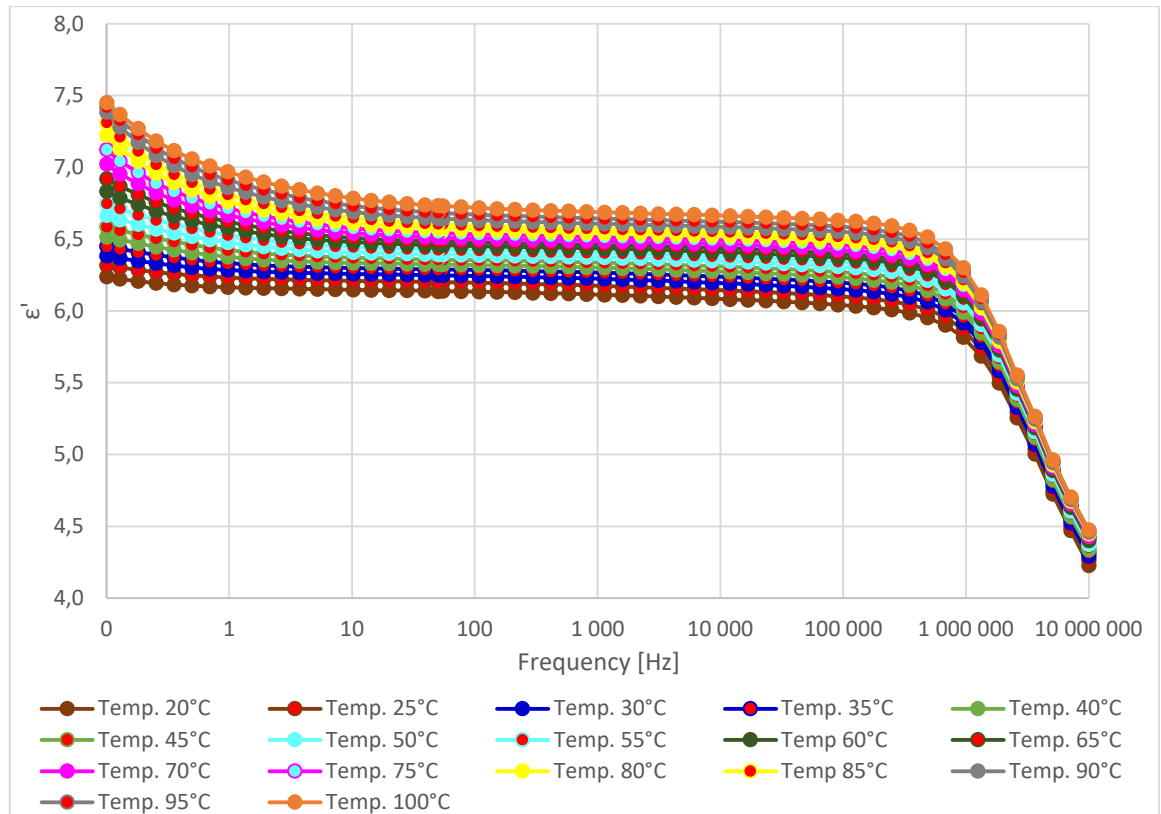
Měřený vzorek typu B viz obrázek 16 a 17. U grafu 4, pozorujeme konstantní hodnoty ϵ' okolo provozní frekvence 50 Hz. Důležitá je opět posunutá relaxační polarizace, která se začíná projevovat opět ve vysokých frekvencích, vyšších než materiál A. V grafu 5 vidíme velice nízké ztrátové hodnoty v okolí provozní frekvence. Navíc lze krásně pozorovat v oblasti nižších frekvencích, do zhruba 10 Hz vodivostní ztráty.



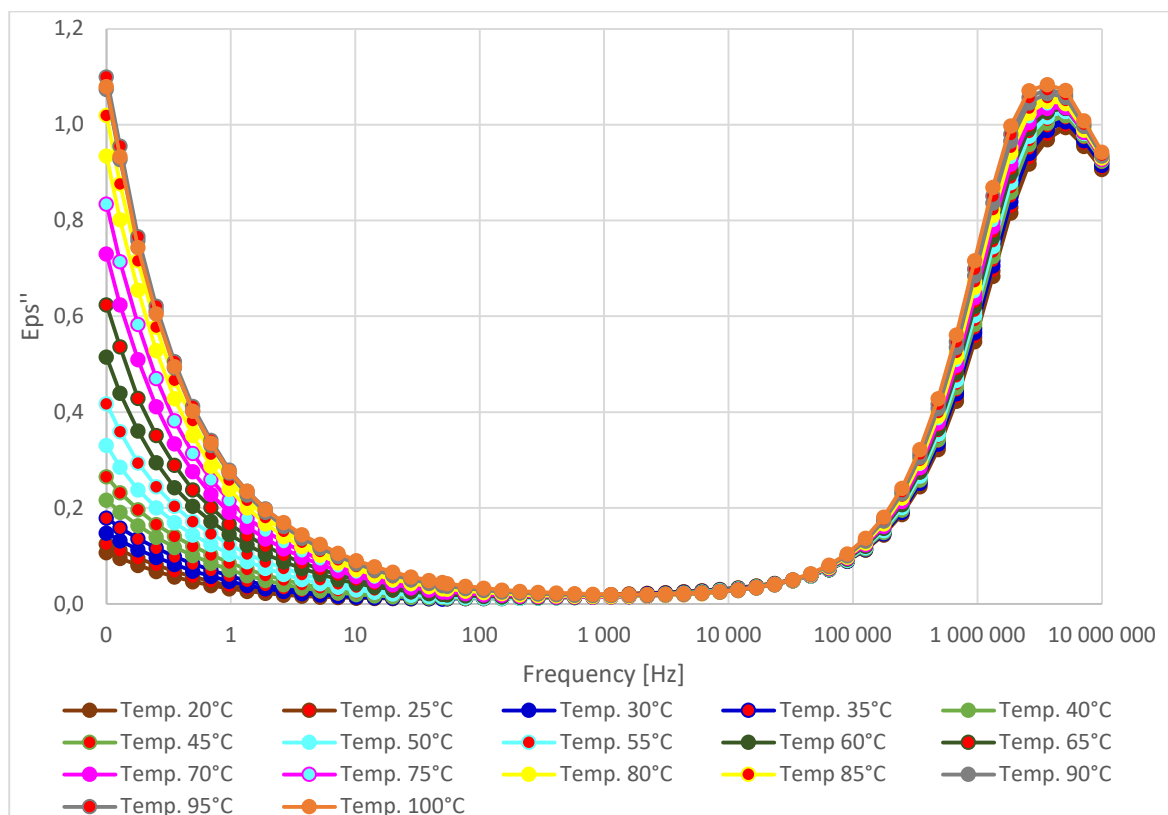
Obr. 16 Měřený vzorek B – přední strana



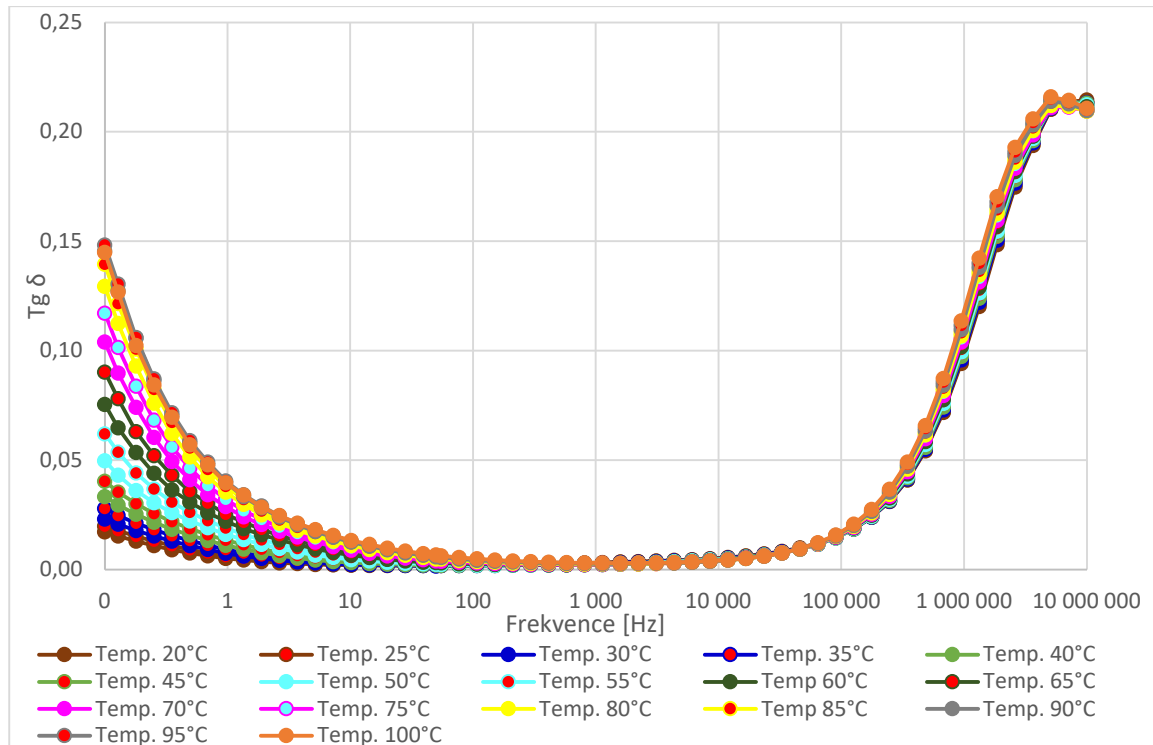
Obr. 17 Měřený vzorek B – zadní strana



Graf 4 Závislost reálné permitivity na frekvenci – vzorek B



Graf 5 Závislost imaginární permitivity na frekvenci – vzorek B



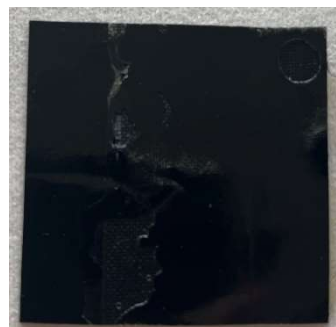
Graf 6 Závislost ztrátového činitele na frekvenci – vzorek B

6.3.3 Vzorek C

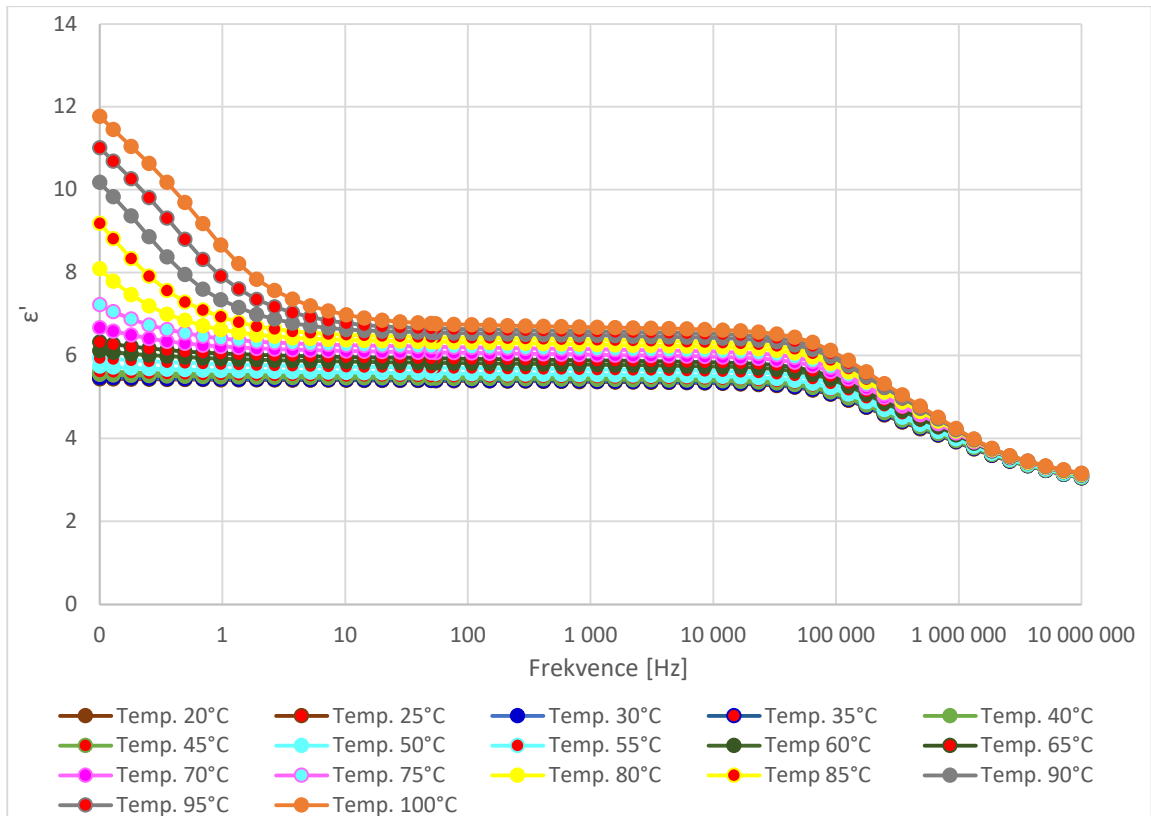
Měřený vzorek typu B viz obrázek 18 a 19. Závislost reálné permitivity, viz graf 7, je opět v mezích pracovní frekvence konstantní. Průběh dielektrických ztrát lze lépe pozorovat v grafu 9, kde je viditelné, jak s rostoucí teplotou se zvětšují ztráty a posouvá se lokální minimum od zhruba 10 Hz pro nejnižší teploty na 1000 Hz pro nejvyšší teploty. Stejně lze v grafu 8 pozorovat vodivostní ztráty, které s vyšší teplotou nabývají vyšších hodnot. Relaxační polarizace je stále posunutá do vyšších kmitočtů, podobně jako u vzorku A.



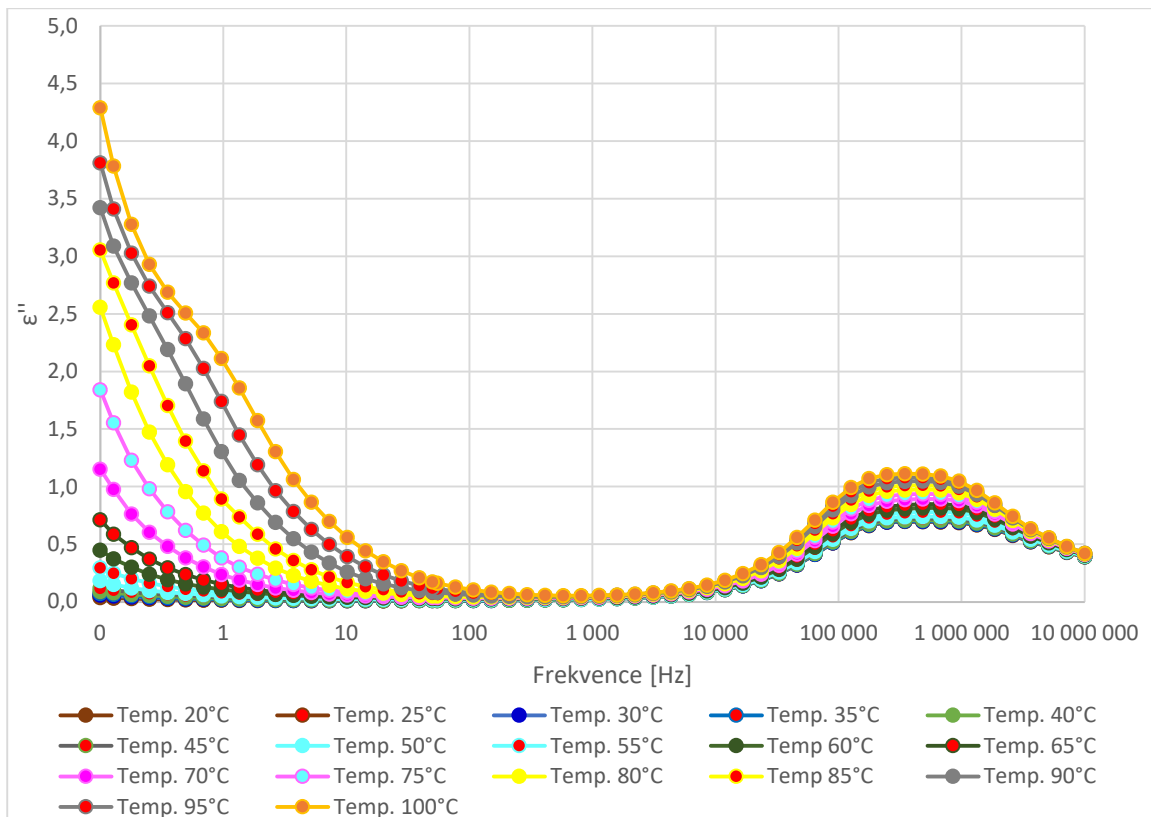
Obr 17 Měřený vzorek C – přední strana



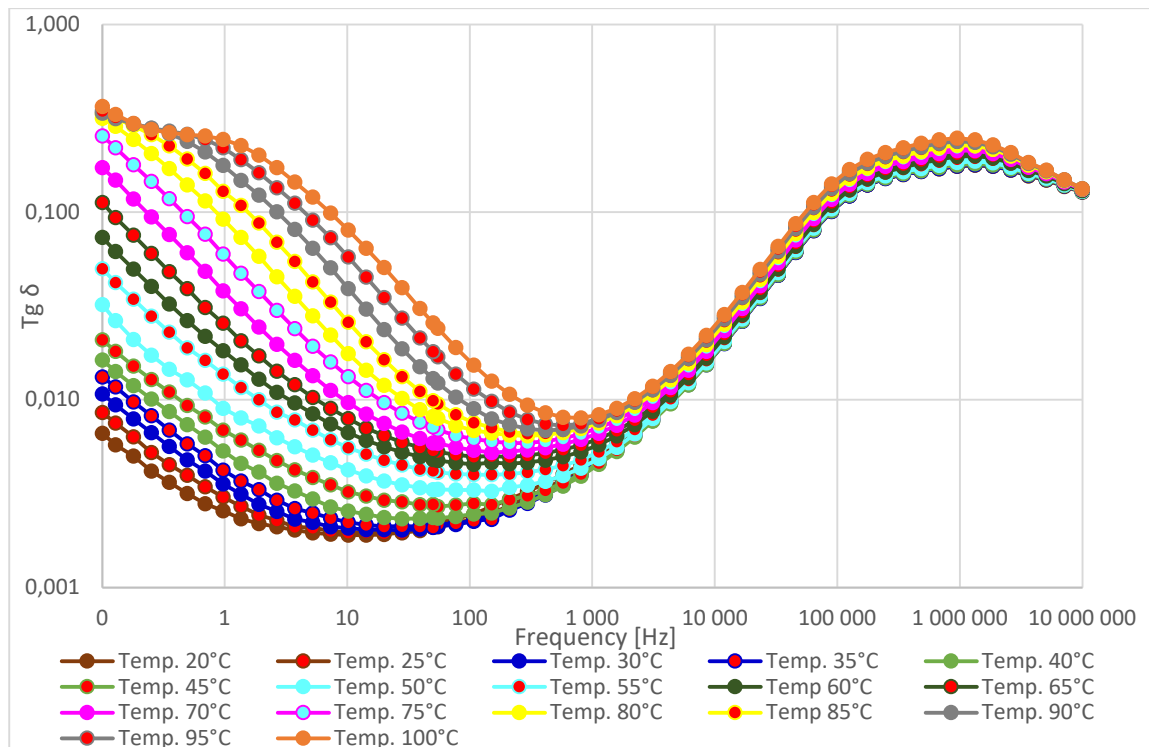
Obr 18 Měřený vzorek C – zadní strana



Graf 7 Závislost reálné permitivity na frekvenci – vzorek C



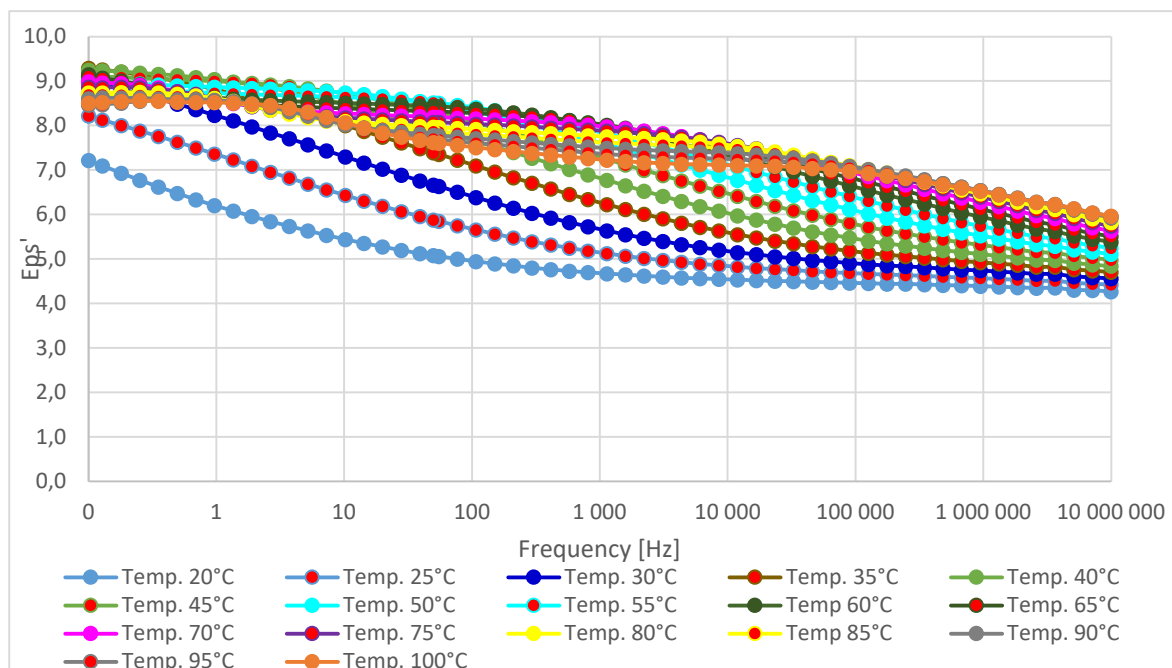
Graf 8 Závislost imaginární permitivity na frekvenci – vzorek C



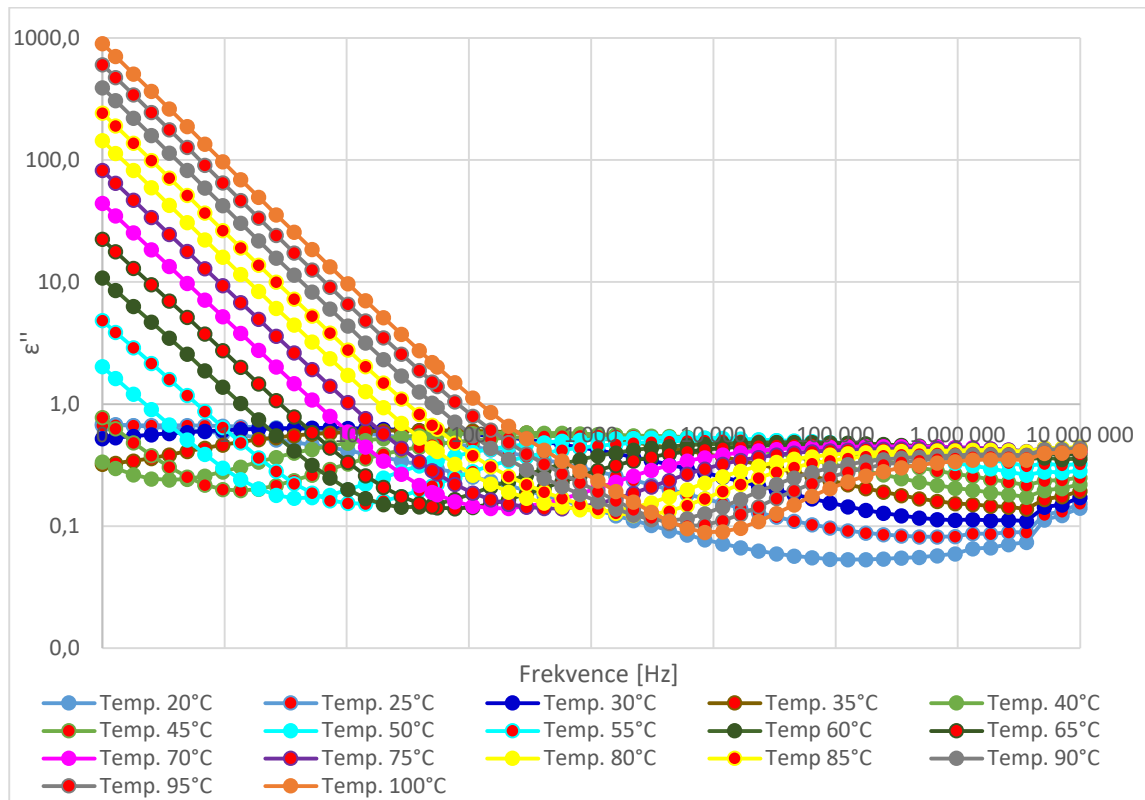
Graf 9 Závislost ztrátového činitele na frekvenci – vzorek C

6.3.4 Vzorek čisté pryskyřice

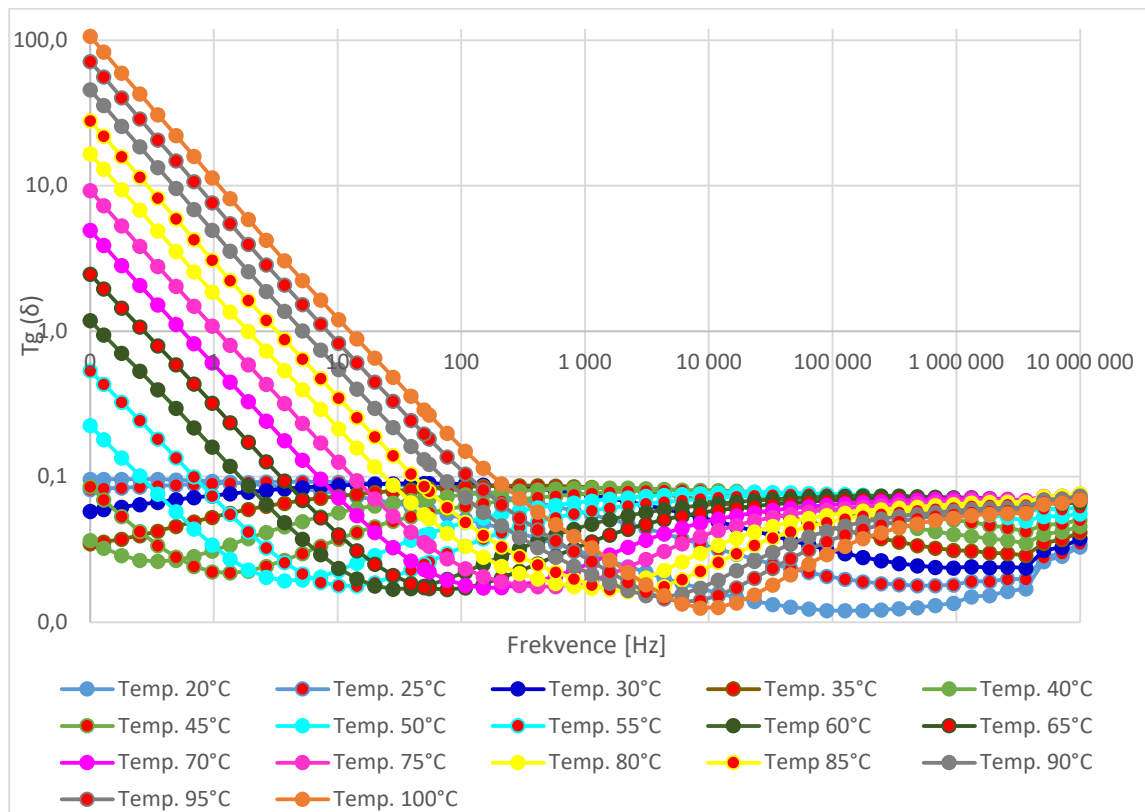
Vzorek čisté pryskyřice je stejných rozměrů jako vzorky s polovodivou páskou. Díky průběhům čisté pryskyřice lze pozorovat, jak která páška ovlivňuje dielektrické vlastnosti. Z grafu 11 jsou pozorovatelné, s teplotou rostoucí, vysoké ztráty, které jsou ve vzorcích A, B i C silně potlačeny.



Graf 10 Závislost reálné permitivity na frekvenci – čistá pryskyřice



Graf 11 Závislost imaginární permitivity na frekvenci – čistá pryskyřice



Graf 12 Závislost ztrátového činitele na frekvenci – čistá pryskyřice

6.4 Zhodnocení experimentu

Pro experiment byly použity tři různé materiály, ze kterých byly vyrobeny vzorky reprezentující polovodivé pásy. U všech vzorků vyšla velice podobná charakteristika závislosti relativní permitivity na frekvenci. Pro provozní frekvenci 50 Hz mají všechny materiály ustálenou hodnotu. U vzorku C, oproti ostatním, je vidět, že s rostoucí teplotou se v nižších frekvencích výrazně mění reálná permitivita. Relaxační polarizaci v grafech lze vidět jako tzv. „peak“ neboli lokální maximum. Je dobré, že právě tato polarizace je posunuta ve všech vzorcích mimo provozní frekvenci. U vzorku A a B tato polarizace začíná v okolí 100 000 Hz, kdežto u materiálu B je posunuta ještě téměř o jeden řád. Z grafů imaginární permitivity vidíme navíc projevující se vodivostní ztráty v nižších frekvencích. Tyto ztráty u vzorku B mají velmi malé hodnoty i pro vysoké teploty, kdežto u vzorku A se zvyšující se teplotou se vodivostní ztráty výrazně zvyšují. U vzorku C se začíná projevovat zvětšování těchto ztrát po oteplení na 45 °C, ovšem nedosahuje tak vysokých hodnot jako vzorek A.

Zhodnocení a závěr

Bakalářská práce byla rozdělena do dvou částí. První část je zaměřená na teoretické seznámení s problematikou izolačních systémů a druhá část na diagnostiku a porovnání vlastností připravených vzorků. Cílem teoretické části bylo provést rešeršní činnost zaměřenou na izolační systémy elektrických točivých strojů a hodnocení jejich stavu. Shrnuty byly nejdůležitější parametry materiálů, mezi které patří teplotní klasifikace izolantů a elektrické vlastnosti. Bylo zjištěno, že v dnešní době mezi nejčastěji používané izolační systémy patří kompozitní materiály. Z kompozitních materiálů jsou využívány tříložkové, které se skládají z pojiva, plniva a nosné složky. Mezi nejčastěji používané materiály stále patří jako plnivo slída, nosnou složkou je nejčastěji skelná tkanina a pojivem jsou epoxidové pryskyřice. Byly nalezeny články, které se zabývají polymerními nanodielektriky a technologiemi jejich výroby, kterou je sol-gel metoda a interkalační metoda. Zjištěno bylo, že používáním polymerních nanokompozitů nebo nanodielektrických materiálů dochází ke zlepšování elektrických, tepelných i mechanických vlastností. V budoucnu bude potřeba se zabývat oblastmi jako je optimalizace metod výroby a porozumění rozhraní mezi maticí a nanočásticí. Například podle článku [18], lze budoucnost vývoje izolačních materiálů sledovat dvěma pohledy. Podle vývoje technologie výroby, který bude poháněn lidskou zvědavostí a optimalizací procesů a druhý pohled, který se bude soustředit na udržitelnou společnost. Samotné nanokompozity by mohly navíc také sloužit jako náhražky kovů nebo k vývoji biomimetických¹ systémů. Důležitou částí práce bylo popsání hlavní drážkové izolace, kde byly zjištěny používané materiály a jejich základní vlastnosti. Hlavní izolační systém stroje je rozdělen podle technologie výroby na vakuum pressure impregnation (VPI) a resin rich. Popsány jsou oba způsoby výroby, vybrány používané materiály a následně porovnány jejich výhody a nevýhody. Bylo zjištěno, že hlavní rozdíl je převážně v savosti pásy a obsahu použité pryskyřice. Pro hodnocení stavu izolačního systému bylo nejvíce pozornosti dáno částečným výbojům, které postupem času negativně ovlivňují vlastnosti izolačních systémů. Mezi další způsoby hodnocení stavu bylo zahrnuto měření odporu, měření redukovaných resorpční křivek, které informují o kvalitě izolačního materiálu, měření polarizačního indexu, ztrátového činitele a permitivity.

¹ Biomimetika je věda zabývající se přírodními konstrukčními řešeními u živých organismů s cílem je napodobit (příkladem může být suchý zip).

Cílem praktické části bylo vytvoření vzorků reprezentující hlavní izolační systém. Vyrobeny byly vzorky polovodivých pásek, které chrání stroj před částečnými výboji. Pro experiment byla použita jedna pryskyřice a tři různé typy vodivých pásek. Proběhlo měření komplexní permitivity a ztrátového činitele v závislosti na frekvenci a teploty. Výsledkem experimentu bylo zjištění průběhů reálné a imaginární permitivity a ztrátového činitele. Z výsledků měření byly analyzovány polarizační děje při daných frekvencích v závislosti na jednotlivých materiálech.

Literatura

- [1] Li, S., Yu, S. & Feng, Y. Progress in and prospects for electrical insulating materials. High Volt. (2016) doi:10.1049/hve.2016.0034.
- [2] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN – Technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [3] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN – Technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] ČSN EN 60085-ed.2. Elektrická izolace – Tepelné hodnocení a značení. Praha: Český normalizační institut, Srpen 2008, 28s, Třídící znak 330250
- [5] KÜCHER, Andreas. High voltage engineering – Fundamentals – Technology – Application. Schweinfurt: VDI-Buch. ISBN 978-3-642-11992-7.
- [6] KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [7] JANDERA, Tomáš, 2015. Diagnostický systém kompozitních materiálů. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.
- [8] RENFUS, Tomáš, 2014. Porovnání elektrických vlastností kalcinovaného a nekalcinovaného slídového papíru. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Josef Sedláček CSc.
- [9] TUREK, Miroslav, 2013. Točivé stroje a jejich izolační systémy [online]. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Ondřej Krpal. Dostupné z <http://hdl.handle.net/11025/10485>
- [10] FEJT, Martin, 2014. Vliv ředění na vlastnosti epoxidové pryskyřice [online]. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Mentlík, CSc. Konzultant diplomové práce Ing. Zdeněk Křelovec. Dostupné z <http://hdl.handle.net/11025/12402>
- [11] ŽIVNÝ, Petr, 2013. Izolační systém resin rich pro vinutí generátorů. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Pihera Ph.D. Dostupné z <http://hdl.handle.net/11025/10072>
- [12] Bezdek, Z. New VPI Insulation System of High Voltage Stator Windings of Large Rotating Electrical Machines Based on Cogemica VPI Tapes and One-component Epoxy Impregnation Varnish. in Proceedings of the 2020 International Conference on

- Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika 2020 1–5 (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020). doi:10.1109/Diagnostika49114.2020.9214660.
- [13] Vacuum pressure impregnation [online] dostupné z <https://wsf-inc.com/vpi.html>
- [14] JANDERA, Tomáš, 2015. Diagnostický systém kompozitních materiálů. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.
- [15] Silent-Czech. Izolační materiály | Produkty | Silent Czech [online]. Valašské Meziříčí: eStarWeb, c2011 – 2021. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/>
- [16] HAVEL, Tomáš, 2012. Perspektivní materiály izolačního systému elektrických strojů. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Josef Pihera Ph.D.
- [17] Hornak, J., Mentlík, V., Trnka, P. & Šutta, P. Synthesis and Diagnostics of Nanostructured Micaless Microcomposite as a Prospective Insulation Material for Rotating Machines. Appl. Sci. 9, 2926 (2019).
- [18] T. Tanaka and T. Imai, "Advances in nanodielectric materials over the past 50 years," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 29, no. 1, pp. 10-23, January-February 2013, doi: 10.1109/MEI.2013.6410535.
- [19] MENTLÍK, V., TRNKA, P., HORNAK, J., MICHAL, O. & TOTZAUER, P. Nanokompozitní dielektrika – perspektivní materiály pro vysokonapěťovou elektroizolační techniku – A-Z ELEKTRO. (2019). Dostupné z <http://www.azcasopis.cz/veda-vyzkum-a-inovace/nanokompozitni-dielektrika-perspektivni-materialy-pro-vysokonapetovou-elektroizolacni-techniku>
- [20] T. Tanaka, G. C. Montanari and R. Mulhaupt, "Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, no. 5, pp. 763-784, Oct. 2004, doi: 10.1109/TDEI.2004.1349782.
- [21] CW Reed, „Polymer Nanodielectrics-Basic Concepts“, v IEEE Electrical Insulation Magazine, sv. 29, č. 6, s. 12-15, listopad-prosinec 2013, doi: 10.1109 / MEI.2013.6648748.
- [22] BOČEK, Jiří a Václav MENTLÍK. Polymerní nanokompozitní dielektrika. Plzeň, 2009. Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-80-7043-793-3.

- [23] T. Tomášková, L. Harvánek, P. Trnka, V. Mentlík, M. Sebok a M. Gutten, „Nový epoxidový kompozitní izolační materiál s nanoplňivou a mikroplňivou oxidu křemičitého s vyšší tepelnou vodivostí,“ 2016 Diagnostika elektrických strojů a Izolační systémy v elektrotechnice (DEMISEE), Papradno, Slovensko, 2016, s. 89-93, doi: 10.1109 / DEMISEE.2016.7530473.
- [24] H. Muto, „Dielektrický rozpad a vlastnosti částečného výboje nanokompozitů pro izolační systém epoxid / slída ve velkých rotačních strojích“, 2020 Mezinárodní sympozium o elektrických izolačních materiálech (ISEIM), Tokio, Japonsko, 2020, str. 45-48.
- [25] DuPont: Kapton® Polyimide films [online]. USA: DuPont. Dostupné z: <https://www.dupont.com/electronic-materials/kapton-polyimide-film.html>
- [26] 3M Science. Applied to life. [online]. USA: 3M. Dostupné z: <https://www.3m.com/>
- [27] ZhongCheng Insulating material: Insulating paper & Composite material [online]. China: Zhongcheng, 2010. Dostupné z: <https://www.zcinsulation.com/product/132/>
- [28] Müller Ahlhorn: Flexible electrical insulating materials [online]. Germany: Dietrich Müller, 2020. Dostupné z: <https://www.mueller-ahlhorn.com/faqs/flexible-electrical-insulating-materials/>
- [29] Coveme. The value of innovation: ELECTRICAL INSULATION [online]. Italy: COVEME, 2021. Dostupné z: <https://www.coveme.com/electrical-insulation/>
- [30] Solvay e-motors: Slot Liners and Slot Wedges [online]. Belgium: Solvay, 2021. Dostupné z: <https://www.solvay.com/en>
- [31] NIDE: Motor components [online]. China: Ningbo Nide Mechanical Equipment, 2020. Dostupné z: <https://www.nide-tech.com/Products/Motor-Components/>
- [32] Harwana INC.: Electrical Insulation Papers [online]. India: Harnawa, 2021. Dostupné z: <https://www.nide-tech.com/Products/Motor-Components/>
- [33] BARTÁK, Alexandr, Luděk MRAVINÁČ, Jacek NEUMAN, Jan Vařák. Diagnostika poruch izolací elektrických strojů. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:85ca11b0-d1d2-11e8-bbaa-005056827e52>
- [34] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Josef PIHERA a Roman HAMAR. Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky. Odbornecasopisy.cz [online]. 2008, 1-8. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38198.pdf>

- [35] KRPAL, Ondřej. Komplexní studie polovodivých ochran. Plzeň, 2014. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Eva Kučerová. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/14161>
- [36] BEJČEK, Jan. Materiály pro polovodivé ochrany a technologie jejich výroby. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ondřej Krpal. Dostupné z <http://docplayer.cz/195682044-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-katedra-technologie-a-mereni-bakalarska-prace.html>
- [37] A. Roberts, "Stress grading for high voltage motor and generator coils," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 26-31, July-Aug. 1995, doi: 10.1109/57.400761. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/400761>
- [38] G. C. Stone and R. Wu, "Examples of stator winding insulation deterioration in new generators," 2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China, 2009, pp. 180-185, doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252475. Dostupné z https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5252475?casa_token=ut0GPSsCQ6QAAAAA:cpvacaaCyBjmbcIGTgOLxy7U3a4ou2AvHKEa_Jjv2O-LETkJkBXXHdriGGP4rBjJLVc-e8Kh1U