

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Točivé stroje a jejich izolační systémy

Kopie zadání bakalářské práce 1/2

Kopie zadání bakalářské práce 2/2

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje izolačnímu systému točivých elektrických strojů. Práce pojednává o točivých elektrických strojích, jejich rozdělení, principy a konstrukcemi. Dále se věnuje vlastnostem izolačních materiálů (elektrická pevnost, rezistivita, relativní permitivita, dielektrické ztráty, ztrátový činitel $\text{tg}\delta$), popisuje výbojovou činnost vznikající u vedení strojů. Popisuje a porovnává hlavní výrobní technologie izolací točivých elektrických strojů Resin – Rich a VPI a materiály použité pro jejich výrobu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Točivý elektrický stroj, izolace, elektrická pevnost, rezistivita, permitivita, ztrátový činitel $\text{tg}\delta$, VPI, Resin - Rich, plniva, pojiva, nosné materiály

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with insulation system of electrical rotating machines. The work discusses the rotating electrical machines, their classification, principles and structures. Further, the work deals with the properties of insulating materials (dielectric strength, resistivity, relative permittivity, dielectric loss, dissipation factor $\tan\delta$). The thesis describes the partial discharge activity in the machines. The work compares the main production technology of rotating electrical machines insulation - Resin - Rich and VPI and also materials which are used for their production.

KEY WORDS

Rotating electrical machines, insulation, dielectric strength, resistivity, permittivity, dissipation factor $\tan\delta$, VPI, Resin - Rich, fillers, binders, core materials

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Ondřejovi Krpalovi, za podporu při psaní bakalářské práce, za technické rady, připomínky a konzultace.

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

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

V Plzni

.....

Podpis

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ELEKTRICKÉ TOČIVÉ STROJE	11
1.1 KONSTRUKCE	11
1.2 PRINCIP.....	11
1.3 STEJNOSMĚRNÉ TOČIVÉ STROJE.....	13
1.3.1 Konstrukce	13
1.3.2 Rozdělení stejnosměrných motorů.....	14
1.4 STŘÍDAVÉ TOČIVÉ STROJE.....	15
1.4.1 Synchronní točivé stroje.....	15
1.4.2 Asynchronní točivé stroje.....	16
1.5 ROZDĚLENÍ TOČIVÝCH STROJŮ PODLE VÝKONU.....	16
2 VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	16
2.1 ELEKTRICKÁ PEVNOST	17
2.2 REZISTIVITA	18
2.3 RELATIVNÍ PERMITIVITA.....	18
2.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL TGA A DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	19
2.5 TEPLOTNÍ KLASIFIKACE IZOLANTŮ	20
3 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	21
4 IZOLACE NÍZKONAPĚŤOVÝCH TOČIVÝCH STROJŮ	22
4.1 IZOLACE VODIČŮ	22
4.2 IZOLACE DRÁŽEK.....	22
4.3 IMPREGNACE	23
5 IZOLACE VYSOKONAPĚŤOVÝCH TOČIVÝCH STROJŮ	24
5.1 VINUTÍ VN TOČIVÝCH STROJŮ.....	24
5.2 RESIN RICH.....	27
5.2.1 Použité materiály pro RR.....	27
5.2.2 Postup výroby.....	28
5.3 VACUUM PRESSURE IMPREGNATION	29
5.3.1 Použité materiály pro VPI.....	29
5.3.2 Postup výroby.....	30
5.4 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ VPI A RESIN RICH	31
6 PLNIVA, POJIVA, NOSNÉ MATERIÁLY	31
6.1 NOSNÁ SLOŽKA	31
6.2 PLNIVO	32
6.3 POJIVO	32
ZÁVĚR	33
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35

Seznam symbolů a zkratek

C	Kapacita kondenzátoru s daným dielektrikem; Kondenzátor [F]
C_0	Kapacita vakuového kondenzátoru [F]
ČSN	České technické normy
E	Intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
E_p	Elektrická pevnost [$kV \cdot mm^{-1}$]
I	Proud [A]
NN	Nízkonapětové
Q	Činitel jakosti
R	Rezistor [Ω]
RR	Resin Rich
U	Napětí [V]
U_p	Průrazné napětí [V]
VN	Vysokonapětové
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
d	Tloušťka izolace [m]
f	Frekvence [Hz]
p	Počet pól párů
n	Jmenovité otáčky
n_s	Otáčky stroje
s	Skluz [%]
t	Čas [s]
ε	Permitivita
ω	úhlová rychlost
$tg\delta$	Ztrátový činitel
μ_R	Relativní permeabilia

Úvod

Točivé elektrické stroje jsou zařízení určené k přeměně energie. Jsou-li zapojeny v motorickém režimu, přeměňují elektrickou energii na energii mechanickou. Druhou variantou je režim generátorický, kde dochází k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Toto zapojení je pro lidstvo životně důležité, jelikož dnes je téměř vše poháněno elektrickou energií. Proto jsou na tyto stroje kladeny vysoké nároky při výrobě a provozu a to hlavně v oblasti jejich izolace. Důvodů je několik, po ekonomické a konstrukční stránce je trendem vyrábět co nejtenčí izolační vrstvy s dostatečnými elektroizolačními a mechanickými vlastnostmi pro bezproblémový chod stroje. Se zmenšováním izolace souvisí celkové zmenšení stroje, při stejném jmenovitém výkonu. K eliminaci poškození izolace, které způsobuje například mechanické namáhání, částečné výboje, stárnutí izolace, vlhkost, Joulovy ztráty a další nežádoucí vlivy, jsou dnes izolace vyráběny složitými výrobními postupy a to pomocí technologie Resin – Rich a VPI (Vacuum Pressure Impregnation).

Obsah této práce bude zaměřen na popis a rozdělení točivých elektrických strojů, jejich konstrukci a principy činnosti. Dále bude popsána výroba izolace výše zmíněnými technologiemi, od použitých materiálů, jejich vlastností (elektrická pevnost, rezistivita, relativní permitivita, dielektrické ztráty, ztrátový činitel $\tan \delta$), časovou náročnost, účinnost takto upravených izolací, až po porovnání těchto technologií a určení jejich kladů a záporů a vhodnosti použití.

1 Elektrické točivé stroje

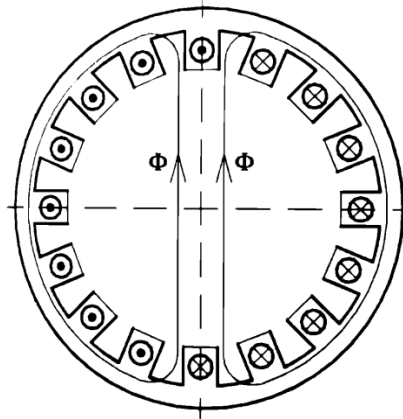
1.1 Konstrukce

Elektrický točivý stroj se skládá ze dvou hlavních částí, statoru a rotoru. Stator je pevná část stroje složená z nosné konstrukce stroje, statorových plechů a statorového vinutí. Statorové plechy volíme dle typu stroje. Pro stejnosměrné stroje používáme magneticky měkkou ocel, které mají velkou permeabilitu μ_R a úzkou hysterezní smyčku. Pro střídavé stroje používáme svazky navzájem izolovaných plechů s co nejvyšším elektrickým odporem ke snížení ztrát vířivými proudy, dále je kladen důraz na co nejvyšší magnetickou vodivost. Tyto podmínky nejlépe splňují křemíkové izotropní plechy, dříve nazývané dynamové plechy. Statorové vynutí je realizováno pomocí navzájem izolovaných měděných vodičů, které jsou uloženy v drážkách statoru. Rotor pohyblivá část stroje je složen z hřídele, rotorových vzájemně izolovaných plechů s drážkami s podobnými vlastnostmi jako mají plechy statorové a rotorové vinutí řešené hliníkovými tyčemi vedenými drážkami plechů. Mechanická konstrukce dle velikosti stroje je složena z kostry stroje tj. nosnou částí, chladícího žebrování, čel s ložisky, patkami, přírubami, svorkovnicí, ventilátorem. [1]

1.2 Princip

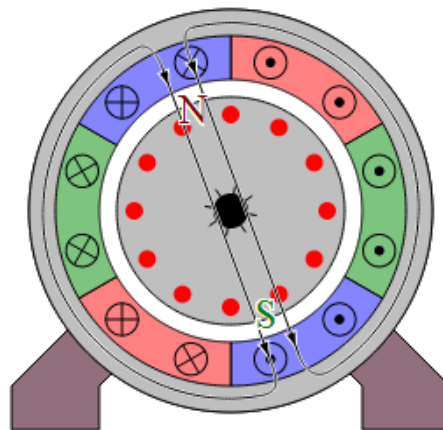
Základním principem elektrických točivých strojů je přeměna energie. Takovýto stroj může být zapojen ve dvou režimech. Motorický režim, který slouží k přeměně elektrické energie na pohybovou energii, tj. dochází ke spotřebě elektrické energie a generátorický režim sloužící k přeměně pohybové energie na elektrickou energii, tj. dochází k výrobě elektrické energie. Točivé stroje rozdělujeme na několik druhů, podle druhu napájení, stejnosměrné, střídavé, jednofázové, vícefázové, typu konstrukce, synchronní a asynchronní. [1]

Základem točivých strojů je točivé magnetické pole. Toto pole získáváme konstrukcí statoru. Pokud by v drážkách statoru bylo uloženo vinutí dle *Obr.1.1* a statorové vinutí bylo napájeno střídavým proudem, magnetický tok by byl uzavírán podél vertikální osy statoru s pulzujícím charakterem, ovšem zde ještě nevzniká točivé magnetické pole. [1], [2], [6]



Obr.1.1 Jednofázové vinutí statoru, převzato z [1]

Pro vznik točivého pole je zapotřebí druhého vinutí statoru, kolmého k prvnímu vinutí, které bude napájeno harmonickým proudem posunutým o 90° , díky tomu vznikne pole ne pulzující, ale točivé. Zde musí být dodržena podmínka, že obě vinutí musí mít stejnou amplitudu a musí být na sebe kolmé, při porušení by sice vzniklo pole točivé, avšak ne s kružnicovým průběhem, nýbrž s eliptickým, který je nežádoucí. V praxi se nepoužívá dvoufázové vinutí, ale vinutí třífázové, které je vůči sobě posunuto o 120° a taktéž napájeno takto posunutými harmonickými proudy. Toto točivé magnetické pole indukuje napětí na rotoru, kde pokud je uzavřené vinutí rotoru (záleží na druhu stroje) začne téct proud, který vytvoří magnetické pole rotoru. Tyto pole se začnou navzájem ovlivňovat a dojde k elektromagnetickému momentu. [1], [2], [6]



Obr.1.2 Třífázové statorové vinutí, převzato z [23]

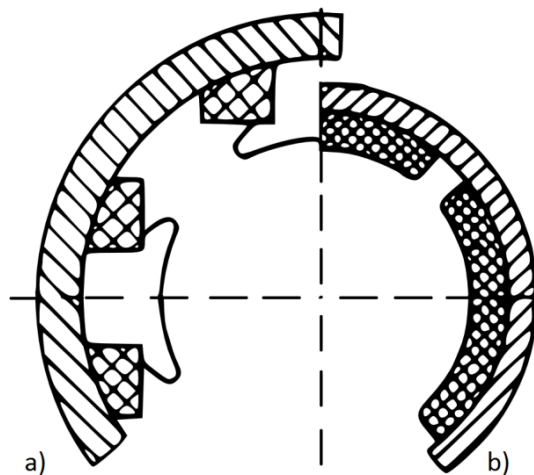
1.3 Stejnoseměrné točivé stroje

Historicky nejstarší motory, původně využívané jako generátory stejnosměrného proudu. V současné době se tyto motory používají převážně v robotice a v regulovaných pohonech. [1]

1.3.1 Konstrukce

Stejnoseměrné motory mají stejnou základní stavbu jako ostatní motory a to stator, pevnou část a rotor, část pohyblivou, zde je navíc komutátor a sběrné kartáče. [1], [3], [4]

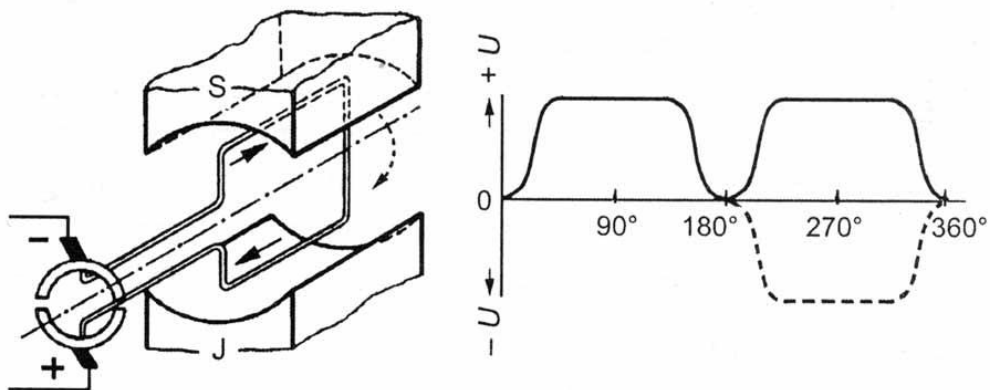
U stejnosměrných motorů máme dva druhy provedení statoru, první stator s permanentními magnety a stator s izolovanými dynamoplechy s drážkami v níž vedou cívky. [1], [3], [4]



Obr.1.3 Stator s a) buzením, b) permanentními magnety [4]

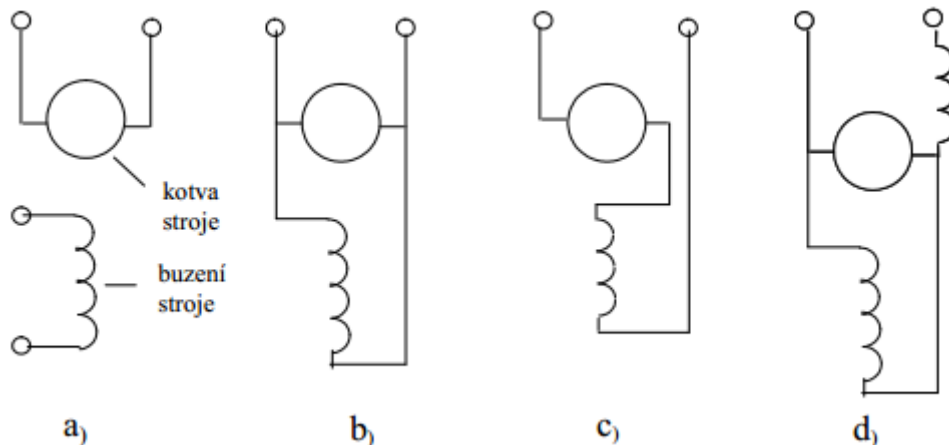
Rotor neboli kotva je složen ze svazků izolovaných plechů, v jejichž drážkách vedou cívky vinutí, které jsou napojeny na měděné, vzájemně izolované lamely komutátoru, který slouží k usměrnění proudu.[1], [3], [4]

Stejnoseměrné motory se neobejdou bez **komutátoru**, ten slouží k usměrnění proudu. Při pohybu rotoru dochází k indukci střídavého proudu na vinutí rotoru. Konce cívek jsou vyvedeny na lamely komutátoru *Obr.1.4*. Směr proudu se mění tehdy, když závit cívky je vychýlen mezi póly statoru. Na komutátor umístěný na hřídeli dosedají sběrné kartáče, které jsou připevněné na statoru motoru. Lamely komutátoru se pohybují společně s cívkami na rotoru, na které jsou přivedeny. Pomocí sběrných kartáčů je proud přiváděn nebo odváděn. [1], [3], [4]



Obr.1.4 Komutátor, převzato z [3]

1.3.2 Rozdělení stejnosměrných motorů



Obr.1.5 Zapojení stejnosměrných strojů, převzato z [4]

- a) cizí buzení stroje
- b) derivační (paralelní) stroje
- c) sériové buzení stroje
- d) kompaundním buzením stroje

1.4 Střídavé točivé stroje

Stroje na střídavý proud dělíme dle počtu fází, jednofázové a třífázové, dále na synchronní, asynchronní a komutátorové. Rozdělení dle přeměny energie je stejné jako u stejnosměrných strojů, pouze s tím rozdílem, že synchronní generátory nazýváme alternátory. [1], [2]

1.4.1 Synchronní točivé stroje

Synchronní generátory dělíme dle pohonu na turboalternátory a hydroalternátory. Turboalternátory mají hladký rotor se 2 nebo 4 póly. Hydroalternátory mají rotor s vyniklými póly v rozmezí 4 až 80 pólů. Z daného vztahu můžeme vypočítat rychlost otáček za minutu. [1], [2]

$$n = t \cdot \frac{f}{p}, \quad (1.1)$$

kde n – počet otáček [-],
 t – čas [s],
 f – frekvence sítě [Hz],
 p – počet pól párů [-].

Tedy rychlost u turboalternátorů jsou $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ nebo $1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Dalším rozdílem mezi hydroalternátory a turbogenerátory, je provedení rotoru. Turboalternátory mají vodorovnou osu rotace, přičemž u hydroalternátorů závisí osa rotace na konstrukci vodní turbíny, kde ve většině případů bývá ve svislé poloze a jejich průměr činní až 20 m. [1], [2]

1.4.1.1 Synchronní kompenzátor

Synchronní kompenzátor je stroj pracující na prázdno, buď s velkým budícím proudem tj. přebuzen, v tomto případě dodává do sítě jalový výkon. Druhou variantou je podbuzení, tj. odebírá jalový výkon. Jejich výkony dosahují až 100 MVA. [1], [2]

1.4.2 Asynchronní točivé stroje

Rozdíl mezi synchronním a asynchronním strojem je, že u asynchronních strojů rychlost rotoru nedosahuje stejné rychlosti jako je rychlost točivého pole statoru, vzniká zde takzvaný skluz. [1], [2]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100, \quad (1.2)$$

kde s – skluz [%],

n_s – otáčky stroje [-],

n – jmenovité otáčky [-].

U asynchronních strojů dělíme konstrukci rotoru, takzvaně kotva na krátko a kroužková kotva. Kotva na krátko neboli také klecová, má v drážkách rotorových plechů nalisované neizolované vodivé tyče, které tvoří “klec“. Kotva kroužková má v drážkách rotoru vedené vinutí vodičů. Na rotoru jsou kromě rotorových plechů ještě sběrné kroužky. [1], [2]

1.5 Rozdělení točivých strojů podle výkonu

- drobné: do 0,5 kW
- malé: od 0,5 kW do 15 kW
- střední: od 15 kW do 100 kW
- velké: vyšší než 100 kW [5]

2 Vlastnosti izolačních materiálů

K nejdůležitějším vlastnostem izolačních materiálů patří co největší elektrická pevnost a rezistivita (někdy udávaná jako měrný elektrický odpor), malá relativní permitivita a nízký ztrátový činitel. Tyto vlastnosti je třeba hlídat na úkor provozních podmínek, jako jsou frekvence, teplota, tlak, vlhkost a další. Izolační materiály měli také disponovat dobrými mechanickými vlastnostmi, např. pevnost a houževnatost. Těchto mnoho vlastností nelze najednou dosáhnout u jednoduchého izolantu, proto využíváme kompozitní materiály, kde kombinací několika izolačních materiálů dosáhnou co nejlepších požadovaných vlastností. [7], [8]

2.1 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je schopnost izolantu odolávat namáhání elektrickým polem. Dosáhne-li intenzita elektrického pole kritické velikosti, dojde u izolantu k poškození, tomuto jevu říkáme průraz u pevných izolantů a přeskok u kapalných a plyných izolantů. U pevných izolantů je tento jev nevratný. U plyných izolantů dochází k obnovení izolačních vlastností po skončení výboje. Kapalně izolanty se obnoví po své době regenerace, avšak při přeskoku vznikají v kapalině škodlivé produkty, které zhoršují izolační vlastnosti. Napětí, při kterém nastává průraz nebo přeskok, nazýváme průrazné napětí. Hodnotu intenzity elektrického pole odpovídající tomuto napětí nazýváme elektrická pevnost. Následující vzorec popisuje vztah průrazného napětí a tloušťky izolace v místě průrazu. [7], [8], [9]

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (2.1)$$

kde E_p – elektrická pevnost [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$],
 U_p – průrazné napětí [V],
 d – tloušťka izolace [m].

Průraz u pevných izolantů rozlišujeme na průraz čistě elektrický, tepelný a elektromechanický. Při **čistě elektrickém průrazu**, elektrony během své volné dráhy získávají energii od elektrického pole, kterou nadále předávají látce v okamžiku, když jsou touto látkou zabrzděny. Pokud v tu chvíli převažuje nárůst energie nad jejím útlumem, vzniká čistě elektrický průraz. Velikost elektrické pevnosti u tohoto průrazu není závislá na tloušťce izolantu, teplotě ani na době působení napětí. Podstatou **tepelného průrazu** je vývin tepla izolovaného materiálu, zdrojem tepla jsou dielektrické nebo Jouleovy ztráty. Pokud není zajištěn dostatečný odvod tepla a izolant je vystaven neustále narůstající teplotě, dojde k tepelnému průrazu. **Elektromechanický průraz** nastane tehdy, je-li izolant vystaven dlouhodobě elektrickému poli. Struktura izolantu je narušena elektrochemickými procesy, dochází k pozvolnému klesání elektrické pevnosti. [7], [8], [9]

2.2 Rezistivita

U izolantů nás zjišťujeme izolační odpor, vnitřní rezistivitu a povrchovou rezistivitu. **Izolační odpor** je udáván v $[\Omega]$ (naměřené hodnoty v řádech $M\Omega$) a udává poměr stejnosměrného napětí na elektrodách a celkového proudu po připojení napětí. **Vnitřní rezistivita**, odpor toku elektrického proudu skrz materiál. Jednotkou pro tuto veličinu je $[\Omega \cdot m^{-1}]$. Vnitřní rezistivita nebývá závislá na přiloženém napětí, je úměrná tloušťce materiálu a nepřímo úměrná měřené ploše sondy, kterou protéká proud. **Povrchová rezistivita** $[\Omega]$ určuje poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty v povrchové vrstvě izolantu. U izolantů se snažíme dosáhnout co nejvyšší rezistivity, která se pohybuje u dobrých izolantů v řádech $10^{12} \Omega m$ a vyšších. [10], [11], [12]

2.3 Relativní permitivita

Dříve označována jako dielektrická konstanta patří mezi hlavní parametry, které charakterizují chování izolantů v elektrickém poli. Relativní permitivita je definována vztahem (4), jedná se tedy o kapacitu kondenzátoru s daným dielektrikem v poměru s kapacitou vakuového kondenzátoru. [13]

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (2.2)$$

kde ε – permitivita [-],

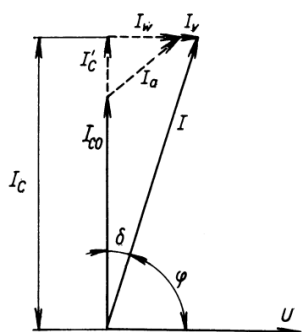
C – kapacita kondenzátoru [F],

C_0 – kapacita vakuového kondenzátoru [F].

Relativní permitivita udává schopnost izolantů se polarizovat. Látky s relativní permitivitou pod 2,5 bereme jako nepolární, látky s větší hodnotou označujeme látky polární. [13]

2.4 Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ a dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou nežádoucím efektem, jelikož dochází k přeměně části elektrické energie, která je dodána vnějším elektrickým obvodem, v teplo, což způsobuje stárnutí izolace. Ztrátový úhel δ vyjadřuje míru ztracené energie v izolantu, která je přeměněná na teplo. Vektor proudu předbíhá vektor napětí o úhel $\frac{\pi}{2} - \delta$. [8], [14], [15], [16]



- I_{C0} – kapacitní proud ideálního dielektrika
- I'_C – kapacitní (jalová) složka absorpčního proudu
- I_a – absorpční proud vyvolaný pomalými polarizacemi
- I_w – činná složka absorpčního proudu
- I_v – vodivostní (prosakující) proud
- I – proud dielektrika se ztrátami

Obr.2.1 Fázorový diagram dielektrika, převzato z [15]

K určení velikosti ztrátového úhlu využíváme náhradního zapojení, kde nahradíme dielektrikum za sériové nebo paralelní zapojení kapacitoru a rezistoru Obr.2.2. Pro $\text{tg}\delta$ (převrácená hodnota $\text{tg}\delta$ se nazývá Q, činitel jakosti) dostáváme tento vztah. [8], [14], [15], [16]

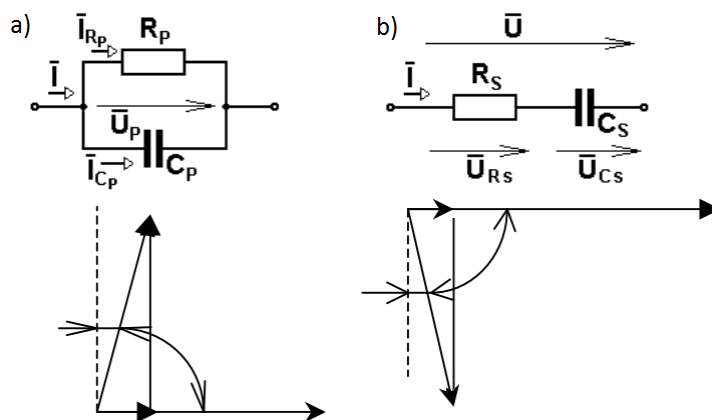
$$\text{tg}\delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p}, \quad (2.4)$$

kde $\text{tg}\delta$ – ztrátový činitel [-],

ω – úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

C – kondenzátor [F],

R – rezistor [Ω].



Obr.2.2 a) Paralelní zapojení RC, b) Sériové zapojení RC, převzato z [16]

2.5 Teplotní klasifikace izolantů

Důležitým faktorem u návrhu točivých strojů je provozní teplota stroje. Toto je stanoveno v normě ČSN EN 60085 ed. 2. Teplotní třída udává maximální teplotu, které může být vystavena izolace v dlouhodobém provozu. [5]

Třída Y (do 90 °C) - neimpregnované látky - bavlna, hedvábí, papír, PVC, polyamidové vlákniny a pod.,

Třída A (do 105 °C) - impregnované látky jako je bavlna, hedvábí, papír, folie z acetátu
celulózy, vulkánfibr aj.

Třída E (do 120 °C) - tvrzené bavlněné tkaniny, tvrzený papír, polyvinylformalové emailované dráty aj.,

Třída B (do 130 °C) - slída, skleněné vlákniny, azbest, výlisky s minerálním pojivem aj.,

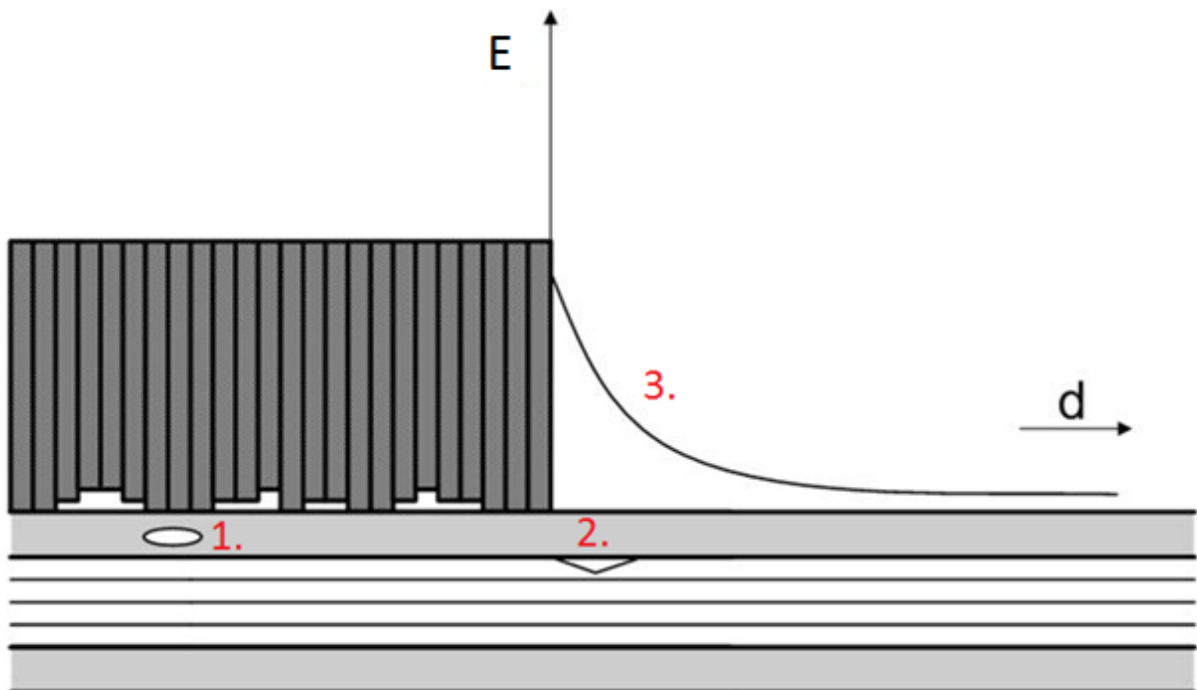
Třída F (do 155 °C) - slída, skleněné vlákniny, azbest, upravené např. epoxidovými pryskyřicemi,

Třída H (do 180 °C) - silikonové elastomery s pojivy jako silikonová pryskyřice,

Třída N (do 200 °C) a R (do 220 °C) - slída, porcelán sklo a křemen ve spojení s anorganickými pojivy. [5]

3 Částečné výboje

Částečné výboje mohou nastat v místech, kde jsou dielektrické vlastnosti izolačních materiálů nehomogenní. V těchto místech bývá zvýšená intenzita lokálního elektrického pole. Částečné výboje nezpůsobují celkový průraz izolačního systému. Ke svému vývinu potřebují tyto výboje určitý objem plynu. Ten se nejčastěji vyskytuje v dutinkách izolace nebo na rozhraních izolací. Částečný výboj nastane tehdy, když intenzita lokálního elektrického pole nehomogenity překročí průraznou intenzitu pole. Délka trvání výboje bývá menší než 1 μs . Částečné výboje významně ovlivňují vlastnosti izolačních systémů a snižují jejich životnost a spolehlivost. Působí na izolační systémy elektrickými, chemickými, tepelnými a erozivními vlivy. Částečné výboje rozdělujeme dle jejich místa výskytu, na tyto tři hlavní skupiny. První **vnější částečné výboje**, jsou výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení, např. doutnavé a korónové výboje. Druhé **vnitřní částečné výboje**, jsou výboje v plynech, které jsou obklopeny pevnými a kapalnými dielektriky, např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku. Poslední **povrchové částečné výboje** se vyskytují v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, např. klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážek točivých strojů. [7], [17]



Obr.3.1 Částečné výboje, 1.) v dutině izolace, 2.) u přehybu vodičů v roeblově tyči, 3.) u výstupu z drážky rotoru, převzato z [18]

4 Izolace nízkonapěťových točivých strojů

Izolační systém u malých točivých strojů se skládá z izolace vodičů, izolací drážek a impregnantu.

4.1 Izolace vodičů

Izolace vodičů je závislá na velikosti napětí a umístěním ve stroji. Skládá se z vrstvy laku, opředení a ovinutí bavlnou, skleněnými vlákny, dalšími materiály a kombinací pevné a nanášené izolace. [8]

4.2 Izolace drážek

Drážky stroje jsou vykládány izolací z důvodů předejití poškození izolace vodičů o stěny drážek. Na tyto izolace se používají drážkové lepenky, vícevrstvé ohybné materiály, Nomex® a různé kombinace materiálů. **Drážkové lepenky** se vyrábějí ze sběrového papíru, sulfátové buničiny a bavlněných a lněných hadrů. Lepenka je leštěná a hlazená s tloušťkou 0,1 – 0,6 mm. Dále se používají obyčejné lepenky, transformátorové lepenky a lesklé lepenky. Obyčejné lepenky vyráběné taktéž ze sběrového papíru, obsahující až 15% anorganických látek, o tloušťkách 1 – 3 mm. Lepenky transformátorové jsou vyrobeny ze sulfátové buničiny o 45% nasákavosti (impregnovatelné olejem). **Vícevrstvé plošné izolanty** jsou materiály složené z několika vrstev, zde je přehled používaných materiálů. [8]

E – polyetylentereftalátová fólie (většinou základní materiál)

S – skleněná tkanina

K – polyamidová fólie

L – aramidový papír

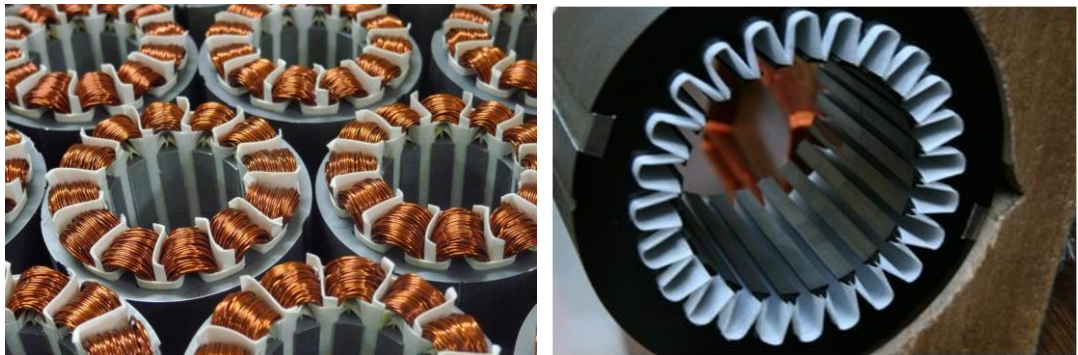
N – polyesterová rohož

P – elektrotechnická lepenka

R – slídový papír

Pomocí těchto písmen dostáváme výsledné složení izolantu + celkovou tloušťku izolace/tloušťku středové vrstvy jednotky v μm . [8]

Nomex® byl vyvinut počátkem 60. let 20. století a do prodeje se dostal v roce 1967 americkou firmou DuPont. Jedná se o syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částic aramidů. Nomex se zpracovává do podoby papíru, který je dále válcován za vysokých teplot mezi několika válci (kalandrován). Vyznačuje se vysokou tepelnou odolností, až do 220 °C a výbornými elektrickými vlastnostmi: elektrická pevnost $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, relativní permitivita 2,5 a vnitřní rezistivita v řádu 10^{16} . Fyzikální vlastnosti: nehořlavý, po odstranění zdroje ohně samozhášivý, netaje působením tepla, odolný vůči chemikáliím, rozpouštědlům a záření, má vysokou pevnost v tahu, odolnost proti natržení. Vhodný pro nanášení pryskyřic, tedy velice vhodný pro vícevrstvé plošné izolanty. [8]



Obr.4.1 Izolace drážek vinutí, převzato z [20], [21]

4.3 Impregnace

Jedním z aspektů bezproblémového provozu stroje je ochrana vinutí proti negativním vnějším mechanickým a elektrickým vlivům, proti chemickým a biologickým látkám a proti vlhkosti. U malých točivých strojů se používá impregnace zakapáváním, máčením a zaplavováním. Pro technologii zakapáváním se používají roztoky nenasyčených polyesterimidových pryskyřic ve styrenu, jejichž elektrická pevnost je $80 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Pro máčení se používají jednosložkové polyesterové pryskyřice bez styrenu s elektrickou pevností $120 - 150 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. U technologie zaplavování se používají laky na bázi nenasyčených polyesterimidových pryskyřic, které se vytvrzují ultrafialovým zářením a elektrickým proudem s elektrickou pevností $80 - 100 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. [8], [19]



Obr.4.2 Navinuté pakety namočené v impregnantu, převzato z [19]

5 Izolace vysokonapětových točivých strojů

5.1 Vinutí VN točivých strojů

U vysokonapětových strojů je z elektrických a magnetických důvodů snaha umístit vinutí do co nejuzavřenějších drážek, avšak v takovém případě by byla konstrukce a následné vkládání vinutí do drážek velice ekonomicky a výrobně náročné. Z tohoto důvodu se dnes vinutí tvaruje a izoluje před vložením do otevřených drážek statoru, které jsou následně uzavřeny magnetickými klíny. Dříve se používali tyto druhy vkládání vinutí. [22]

Prošívání (protahované) vinutí, do uzavřené drážky byla vložena izolační trubka, která byla vyložena ocelovými jehlami, které byly posléze postupně vyndávány a nahrazovány vodičem vinutí, tímto se zajistilo spořádaného uspořádání vodičů. Nevýhodou této metody byla velikost ocelových jehel, které musely mít o několik procent větší průměr než vodič vinutí, aby nedocházelo k problémům s nedostatkem místa při vkládání, bohužel toto bylo příčinou částečných (dříve známy jako doutnavých) výbojů, proto se tato metoda používala jen u strojů do napětí 6 kV. Výhodou naopak bylo vinutí bez pájených míst, tudíž nedocházelo zde k nehomogenitám na spojích cívky. [22]

Vinutí s cívkami ve tvaru U, opět vkládáno do uzavřených drážek. Jednalo se o polotvarované cívky z profilových vodičů předem izolované. Takto přetvarované cívky se vložily do drážek statoru a na druhém konci se pomocí šablon zahnulý, zapájely a zaizolovaly. Toto řešení mělo výhodu oproti prošívání metodě v rámci vyplnění drážky statoru, díky čemuž nedocházelo k částečným výbojům a nebylo zde napěťové omezení. Nevýhodou byla četná pájená místa na čelech vinutí, která způsobovala značnou poruchovost stroje. [22]

Vinutí s cívkami ve tvaru Z, byla upravená metoda vkládání cívek ve tvaru U. Zde se nevkládalo vinutí do uzavřených, nýbrž do otevřených drážek. Vinutí bylo v celku, kde jedno čelo bylo zahnuto dolů a druhé směrem nahoru, odtud tvar Z. Celé vinutí bylo před izolováno, pouze čelo, které bylo vkládáno do drážky, bylo izolováno až po zasunutí vinutí. Výhoda spočívala v téměř hotovém vinutí již při vkládání do drážky, díky čemuž zde nebyly pájené spoje, jako u metody s cívkami ve tvaru U. Nevýhodou bylo poměrně velké otevření drážky. [22]

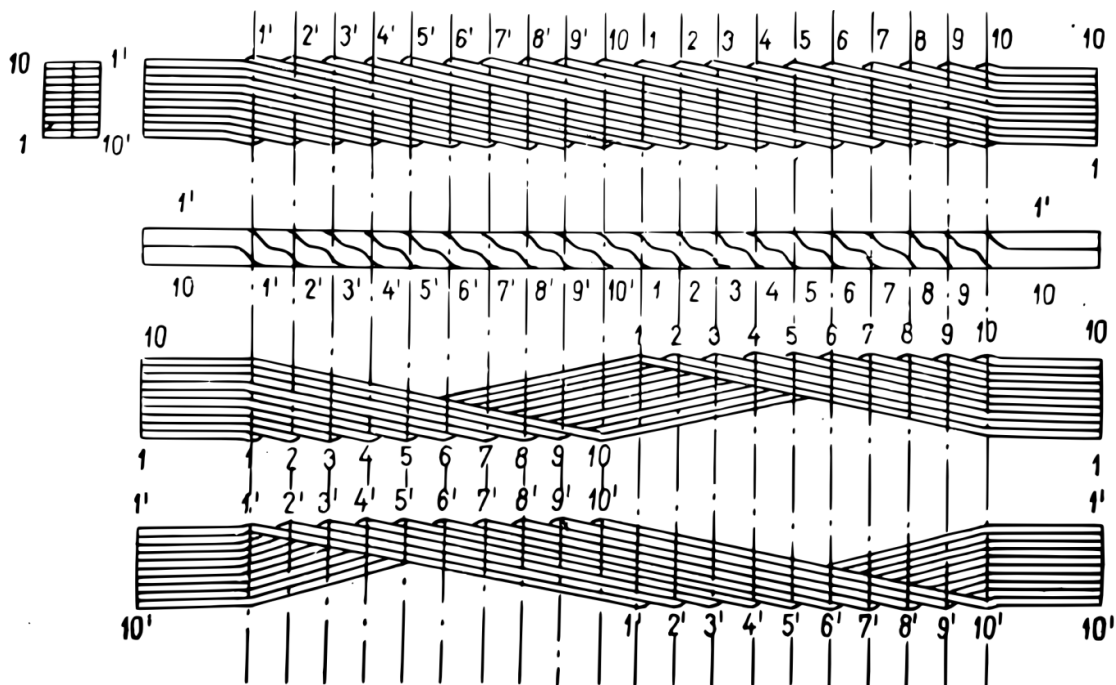
Tyto metody se již víceméně nepoužívají, protože byly navrženy pouze pro jednovrstvá vinutí, setkáme se s nimi pouze výjimečně nebo při opravách strojů. Nyní se používají metody.

Vinutí z vodičů kruhového průřezu (vsypávání), metoda kde se cívka navíjí strojně zlomocí šablon, které odpovídají výsledným velikostem požadované cívky. Při navíjení je nutno dodržet aby nedošlo k překřížení vodičů. Před vkládáním cívky se vyloží drážka statoru izolační páskou, poté se cívka vloží do statoru a postupně se začnou vkládat jednotlivé vodiče nebo malé svazky do drážky statoru. Mezi každou vrstvou se vsypané vodiče stlačí, aby došlo k co největšímu vyplnění drážky statoru. Při vícevrstevném vinutí se mezi vrstvy vkládá vložka ve tvaru U. Po vsypání posledních vodičů, se uzavře drážka drážkovým klínem. Tato metoda je vhodná pro menší stroje o výkonech okolo 100 kW, jelikož cívky mají malou mechanickou pevnost a proudové rázy způsobují jejich dynamické namáhání. Také napětí by nemělo přesáhnout 1 kV, protože izolace drážek při vyšších napětích nedosahuje dostatečné elektrické pevnosti. [22]

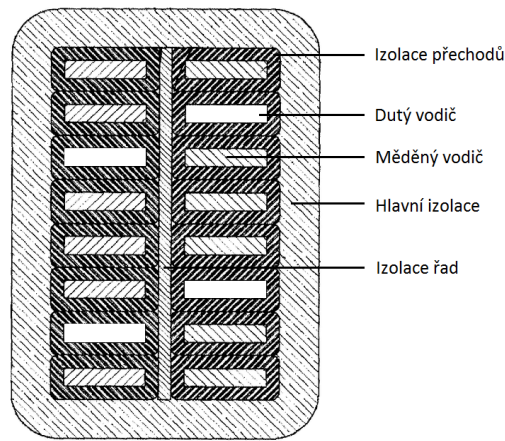
Vinutí z profilových vodičů, metoda vhodná pro stroje pracující s napětím nad 1 kV. Pro vinutí cívky se používají měděné vodiče obdélníkového průřezu, takto tvarované vodiče jsou skládány na sebe nebo po šířce drážky. Při velkém počtu závitů mohou být vodiče ležící vedle sebe zapojeny do série, kde v čele vinutí dojde k záměně jedné vrstvy do druhé. Musí být dodržena dostatečná izolace profilových vodičů, jelikož

nejprve je vinutí zaizolováno a až poté tvarováno do výsledného tvaru cívky. Do napětí kolem 3,5 kV se používá vsypávání, kde drážka je vyložena izolací, podobně jako u vodičů s kruhovým průřezem a profilové vodiče se vkládají postupně. U vyšších napětí se vkládají hotové celé cívky, které jsou již pokryty drážkovou izolací. Po vložení cívky se drážka opět uzavře magneticky vodivým klínem. Jelikož je tato metoda používána u strojů, pracujících v řádech tisíců voltů, je třeba dbát na správné dimenzování drážkové izolace, aby se předešlo částečným výbojům. [22]

Tyčová vinutí, metoda pro největší točivé stroje, nejčastěji používaná u turbogenerátorů a hydroalternátorů, popřípadě u asynchronních strojů o výkonech v řádech MW. Využívají se skroucené (permutované) měděné tyče, všechny vzájemně izolované. Nejpoužívanější jsou umělé tzv. **Roeblovy tyče**, jejichž hlavním využitím je snížení ztrát vířivými proudy a zabránění vnitřním vyrovnávacím proudům. Základním principem těchto tyčí je, že všechny vodiče projdou alespoň jednou všemi polohami výšky tyče *Obr.5.1*. Tyto tyče jsou dimenzovány na velké proudy, a proto je potřeba zavedení vnitřního chlazení tyčí. To je řešeno několika způsoby, průběžné prokládání vodičů dutými vodiči, nebo mohou být všechny vodiče duté. Další možností je vložit mezi sloupce vodičů profilové trubky z odporového materiálu, sloužící k průtoku chladiva. [22]



Obr.5.1 Úplný závit Roeblovy tyče, převzato z [22]



Obr.5.2 Řez Roeblovou tyčí [24]

U vysokonapěťových točivých strojů jsou kladeny vyšší nároky na izolační systém, než u nízkonapěťových strojů. Zde se používají dvě výrobní technologie a to Vacuum preassure impregnation (VPI), lze přeložit jako vakuově tlaková impregnace a technologie Resin rich.

5.2 Resin Rich

Resin Rich, jak již vyplývá z českého překlad, jedná se o technologii, kdy použitý materiál již obsahuje pryskyřici.

5.2.1 Použité materiály pro RR

Základ pro tuto technologii tvoří tříložkový kompozit s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem s 30 - 40 % pojiva. Užitím tohoto polotovaru vzniká na izolovaných částech kompaktní izolace o požadované tloušťce stěny. Takto připravené části se nechají vytvrdit ve speciálních formách a jsou připraveny na vložení do drážek stroje. **Nosná část** je tvořena nejčastěji skleněnou tkaninou typu E (bezalkalické sklo) nebo polyethylenovou fólií. Skleněná tkanina se dříve vyráběla pomocí stáčených skleněných vláken, dnes se používají vlákna rovinná, kde se výsledná tloušťka nosného materiálu pohybuje okolo 0,12 mm. Jako **izolační část** slouží slídový nekalcinovaný nebo kalcinovaný papír. Ten je spojen s nosnou částí **pojivem**, nejčastěji pomocí reaktoplastické bezropouštědlové novolakové nebo cykloalifatické epoxidové pryskyřice. Takto složený kompozit je dodáván v předtvrzeném stavu (tzv. B stav), popřípadě aby nedošlo k slepení částí, při navíjení se prokládá separační fólií. Tloušťka takto upraveného materiálu je 0,15 - 0,2 mm. [8], [29]

5.2.2 Postup výroby

Navíjení probíhá dvojitým způsobem a to kontinuálně nebo diskontinuálně. **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 pásy. [8], [29]



Obr.5.3 a) Kontinuální navíjení páskou, b) diskontinuální navíjení fólií, převzato z [25], [26]

Diskontinuální (nespojité) navíjení je řešeno za pomoci fólie, která je nanášena pouze na rovnou část vinutí (v drážce). Čela jsou zvlášť ovinuta páskou, nevýhodou tohoto řešení je menší elektrická pevnost na přechodu fólie a pásy, tento způsob je vhodnější pro menší stroje. Izolace je navíjena do požadované tloušťky, plus několik procent navíc, z důvodu stlačení v další fázi výroby. **Vytvrzení** probíhá ve speciálních lisech při zvýšené teplotě a tlaku, zde dochází k zesíťování pryskyřice. V izolaci se může vyskytnout vlhkost, která musí být před výsledným vytvrzením odstraněna. Proto musí být izolace vysušena před následným lisováním, aby nedošlo ke slepení izolace při vysoušení, použije se separační fólie. V prvním kroku se forma přehřeje a částečně stlačí, jakmile dosáhne vinutí teploty 100 °C, začne probíhat gelace pryskyřice, dojde ke spojení všech složek izolace, poté se forma dotáhne na požadovanou tloušťku. Po dotažení formy se zvýší teplota na 160 – 170 °C, při které dojde ke konečnému vytvrzení, tato teplota se udržuje přibližně hodinu, závisle na druhu použité pryskyřice a množství vrstev izolace. Poslední fází je **ochlazování**, to musí být dostatečně pozvolné, aby nedocházelo k nehomogenitám zapříčiněným různým chladnutím izolace a vinutí. Aby nedocházelo k přilepení lisované izolace a formy, používá se separační fólie. Po vychladnutí je izolace ovinuta polovodivou páskou jedním ovinem s polovičním překrytím, dále jsou upraveny i výstupy z drážek, taktéž polovodivými páskami nebo

polovodivými laky. Toto opatření slouží k eliminaci částečným výbojů. Tyto polovodivé vrstvy mohou být nanесeny a po vytvrzení izolace nebo mohou být vytvrzeny spolu s izolací. Takovéto vinutí je připraveno k vložení do drážek stroje. [8], [29]

5.3 Vacuum Pressure Impregnation

Vacuum Pressure Impregnation, česky vakuově tlaková impregnace, zde je použitý materiál zpracováván při vakuu a za vysokého tlaku.

5.3.1 Použité materiály pro VPI

Pro výrobu touto technologií je hlavním materiálem vysoce **savá slídová páska**, vyrobená z nekalcinovaného slídového papíru, která je při impregnaci vysoce nasycena impregnantem. **Nosná složka** je zde zastoupena skleněnou tkaninou, polyesterovým rounem nebo syntetickou fólií. **Pojiva** se u této technologie využívá pouze minimálně, daný kompozit obsahuje maximálně 7 % pojiva a to pouze k mechanickému zpracování pásky, navíc musí být kompatibilní s následně použitým ipregnantem, aby se předešlo vzájemnému napadení ve finálním zpracování. Hlavním faktorem je savost použité pásky, aby i při vyšším počtu vrstev došlo k prosycení každé vrstvy při impregnaci. Základem dobré savosti je nutnost použití nekalcinované slídy, která disponuje vyšší hrubostí zrnění a je tedy vhodná pro toto využití. Dále musí tato páska mít dostatečné mechanické a izolační vlastnosti, ohebnost, minimální pevnost v tahu materiálu při navíjení, kde nesmí dojít k porušení slídového papíru, minimální pevnost materiálu musí být $80 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$. Důležitá je též soudržnost nosné části a slídového papíru, na rozdíl od technologie Resin Rich neobsahuje VPI žádná tvrdidla, díky čemuž je doba skladovatelnosti vyšší. **Impregnanty** používající se pro tuto technologii jsou nízkomolekulární bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny. Tyto pryskyřice disponují dobrými elektrickými a mechanickými vlastnostmi s relativně krátkou vytvrzovací dobou, vhodné pro použití v teplotních třídách 180(H) a 200(N). [8], [27]

5.3.2 Postup výroby

Tato technologie je vhodnější na impregnování celků, avšak lze impregnovat i části stroje. Používáme dvě metody výroby VPI systémů. Prvním druhem je **VIW (Vacuum Impregnated Winding Method)**, zde je impregnováno celé statorové vinutí jako jeden celek, nevýhodou této metody je nemožnost opravy jednotlivých poškozených částí stroje, vždy nutno celkové převinutí. Druhou metodou je **VIB (Vacuum Impregnated Bar Method)**, zde se impregnují jednotlivé tyče vinutí zvlášť. Základem impregnačního zařízení této technologie je kotel, který musí být vakuotěsný a tlakotěsný s ohřívacím a chladicím zařízením. Jeho velikost uvádí maximální rozměry pro impregnovanou část. Na ten je napojen zásobník impregnantu. Mezi kotlem a zásobníkem impregnantu jsou též ohřívací/chladicí zařízení. Poslední hlavní částí jsou sušárny, s teplotním rozsahem do 200 °C. [8], [27]



Obr.5.4 VPI linka, převzato z [27]

Postup impregnace je následující, nejprve je nutné část stroje určenou k impregnaci důkladně vysušit, sušení probíhá při 100 °C přibližně po dobu 20 hodin. Poté předmět přesuneme do impregnačního kotle, zde zavedeme vakuum a začneme kotel postupně zaplavovat ohřátým impregnantem ode dna. Za stálého míchání dochází k odplynění ne vakuu. Následně zrušíme vakuum a zavedeme po dobu jedné hodiny přetlak. Zde končí fáze impregnace, vypustíme zbylý impregnant a těleso přesuneme do sušárny. Nejdříve sušíme za mírného podtlaku, za účelem vyprcháání těkavých složek. Poslední fází je dosušení, které probíhá za atmosférického tlaku, při proudění horkého vzduchu. [8], [27]

5.4 Porovnání technologií VPI a Resin Rich

Obě výrobní technologie jsou velice rozdílné. Jejich rozdíly vyplývají převážně z technologické a časové náročnosti výroby. Technologie VPI je vhodnější pro sériovou výrobu a to z důvodu vysoké pořizovací ceny výrobní linky. Hlavními výhodami této technologie je, vysoká homogenita izolovaného vinutí, s tím spojená vysoká spolehlivost, minimalizace částečných výbojů, lepší odvod tepla, zmenšení velikosti stroje (menší rozměry izolace pro stejné vlastnosti než u Resin Rich) při zachování stejného výkonu stroje. Vysoká odolnost proti navlhání a chemickým vlivům. Celkové mechanické zpevnění vinutí, díky čemuž lépe odolává dynamickým silám. Hlavní nevýhodou je výše zmíněná cena, jelikož tato technologie je vhodná pro velké, vysokonapěťové stroje, jsou nutné dostatečné rozměry výrobní linky a ty se velice nepříznivě odrazí na pořizovací ceně. Další nevýhodou je velice obtížná oprava poškozených částí. Hlavní výhodou technologie Resin Rich je pořizovací cena a oproti VPI velice snadná možnost opravy poškozených částí. V dnešní době již převládá výrobní proces technologie VPI, hlavně díky celé řadě výhod oproti metodě Resin Rich. [8], [27], [28]

6 Plniva, pojiva, nosné materiály

Nejčastěji se s tímto složením setkáme u tříslučkových kompozitních materiálů. Každý z těchto prvků je velice důležitý pro výsledné vlastnosti systému, jako jsou vysoká elektrická pevnost, zvládnutí mechanického namáhání, odolnost vůči chemickým látkám, odolnost proti navlhání atd. Tyto tříslučkové kompozity jsou hlavními zástupci izolačních materiálů u dnešních točivých strojů. [8], [22]

6.1 Nosná složka

Nosná část tvoří konstrukční část celkové izolace. Jejím hlavním účelem je zajistit mechanické vlastnosti kompozitu. Pro nosnou část se používají tyto materiály: skleněná tkanina, bavlněná tkanina, papír, polyesterová fólie a polyesterová rouna, polyetylenftalátová (PEN) fólie a polyetylenfteraftalátová (PET) fólie. Sklo je polární látka, která vyniká svými izolačními vlastnostmi, jeho relativní permitivita se pohybuje od 3,7 až do 16, elektrická pevnost čistého skla dosahuje až $500 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, ovšem po zpracování se reálná hodnota pohybuje okolo $40 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. [8], [30], [22]

6.2 Plnivo

Plnivo je hlavní částí kompozitu, jeho zastoupení je až 80% z celkového použitého materiálu. Jeho hlavním účelem je zajištění elektroizolačních vlastností kompozitu. Při výrobě se musí dbát na kompatibilitu materiálů plniva a pojiva, aby nedošlo k chemické reakci. Nejčastěji používaná plniva jsou na bázi slídy. Rozlišujeme dva druhy upravené slídy, štípaná a rekonstruovaná. Pro plniva využíváme rekonstruované slídy, především kalcinovaný a nekalcinovaný slídový papír. Kalcinovaný papír vyniká zejména dobrými mechanickými vlastnostmi, oproti tomu nekalcinovaný slídový papír je více nasákavý. Zástupci takto upravených slídových papírů se prodávají pod názvy Cogemica, Isomica, Micamat, Romica a Samica. [8], [22]

6.3 Pojivo

Materiál někdy též známé jako matrice, zajišťuje spojení (prosycení) všech částí kompozitu. Po zpracování (vytvrzení) vznikne tvarově stálý výrobek. Hlavním účelem pojiva po zpracování je zajištění stálého tvaru, přenosu sil a celková ochrana kompozitu. Jako pojiva se používají reaktoplasty a termoplasty: epoxidové pryskyřice, nenasyčené polyesterové pryskyřice, fenolické pryskyřice a vinylesterové pryskyřice. [8], [22], [31]

Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o elektrických točivých strojích a jejich izolačních systémech. Nejprve popisuje obecnou konstrukci stejnou pro všechny druhy točivých strojů, rotor, stator a kostra stroje. Byly vysvětleny základní principy pro chod točivých strojů, pulzující elektrické pole při jednofázovém zapojení vinutí, točivé elektrické pole u vícefázových vinutí. Následovalo rozdělení dle napájecí soustavy na stejnosměrné a střídavé stroje. U stejnosměrných strojů byla popsána funkce komutátoru, bez kterého by nebylo možné provozovat tyto stroje. Střídavé točivé stroje byly rozděleny na synchronní a asynchronní stroje.

Od druhé části se práce věnuje izolačnímu systému točivých strojů, počínaje popisem potřebných vlastností izolačních materiálů, mezi které patří elektrická pevnost, vnitřní a povrchová rezistivita, relativní permitivita, dielektrické ztráty, ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ a v neposlední řadě teplotní třídy izolačních materiálů.

Následující část popisuje výskyt částečných výbojů. K těmto výbojům dochází při nehomogenitách v izolaci, nejčastěji v dutinách izolací nebo na rozhraní izolací. K částečnému výboji dojde tehdy, když intenzita lokálního elektrického pole nehomogenity překročí průraznou intenzitu pole. Částečné výboje mají degradační účinky na izolační systém stroje, z tohoto důvodu jsou kladeny vysoké nároky při výrobě izolačního systému stroje.

Tím se zabývá další část práce, zde je popsána nejdříve výroba izolačního systému u nízkonapěťových točivých strojů, izolace vodičů, drážek a impregnace. Zde postačují drážkové lepenky na bázi sulfátové buničiny a bavlněných a lněných hadrů nebo lepenky transformátorové. Více do hloubky je zde popsán izolační systém vysokonapěťových točivých strojů. Nejprve rozdělení výroby vinutí, od prošívaného vinutí, vinutí s cívkami ve tvaru U, vinutí s cívkami ve tvaru Z, kde tyto metody se dnes již mnoho nevyužívají. Dnes používané metody jsou: vsypávání vodičů kruhového průřezu (u menších strojů), vsypávání profilových vodičů a výroba tyčového vinutí (pro největší stroje). Největším zástupcem této kategorie jsou Roeblovy tyče, které jsou nejlépe přizpůsobeny k největšímu snížení ztrát vířivými proudy a s dostatečným chladičím systémem. Následuje popis výroby izolačního systému pro tyto vinutí a to pomocí technologií VPI a Resin-Rich. Jedná se o velmi rozdílné technologie, kde obě mají své klady a zápory, proto konec této kapitoly pojednává o procesu výroby a jejich následné srovnání.

Poslední část práce je věnována kompozitním materiálům a jejich složení používaných pro výše zmíněné výrobní procesy izolačních systémů VPI a Resin-Rich.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [2] PETROV, G. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [3] Stejnoseměrné stroje jak se o nich psalo kdysi ... [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/stejnosemerne-stroje>
- [4] MLČÁK, Tomáš, Václav VRÁNA a Stanislav KOCMAN. 12. STEJNOSMĚRNÉ STROJE. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY, VŠB - TU Ostrava. [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/12_stejnstr_sylab_bc_06.pdf
- [5] KONEČNÁ, Eva a Aleš RICHTER. ELEKTRICKÉ STROJE: Učební texty. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. [online]. Upravené vydání. Liberec, 2000 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/ele/El_Str1_h.pdf
- [6] VLADAŘ, Jaroslav a Jiří ZELENKA. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [7] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [8] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [9] ELEKTRICKÁ PEVNOST IZOLAČNÍCH FÓLIÍ [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_5.pdf
- [10] ŠEVČÍK, Antonín. IZOLAČNÍ A ZEMNÍ ODPOR. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.aos.sk/spe/seminare/archiv_1993_2008/www/Clanky/08/Sevcik08.pdf
- [11] YING, Liang, Chen YIXIN a Liu YUNPENG. The development of the three-electrode testing system for the volume resistivity of composite insulation materials. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z:

- <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6307332>
- [12] SUGIMOTO, Toshiyuki, Makoto ABE a Yoshio HIGASHIYAMA. Noncontact Surface Resistivity Measurement Using a Cylindrical Surface Potential Detector With a Corona Charger. [online]. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6248212>
- [13] A Simple Method for Measuring the Relative Permittivity of Printed Circuit Board Materials. [online]. 2001 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=974630>
- [14] VITNER, Petr. Měření ztrátového činitele izolace silových kabelů. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23877
- [15] Laboratorní cvičení z techniky vysokého napětí: Úloha č. 16: Ztráty v dielektriku – Scheringův můstek. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: home.pilsfree.net/pierre/K%20tisku/tvn-nav/Nav16.doc
- [16] KONDENZÁTORY. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://pandora.idnes.cz/part/2008/11/222/5/Kondenzatory>
- [17] Měření a charakter částečných výbojů (ČV) v točivých strojích. [online]. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.elektrotrh.cz/merici-technika/mereni-a-charakter-castecnych-vyboju-cv-v-tocivych-strojich-3>
- [18] KRPAL, Ondřej. Výbojová činnost ve vinutí synchronního stroje a její eliminace. 2011 [cit. 2013-05-04].
- [19] ŠIMON, Josef. Jak se dělá elektromotor. [online]. 2011 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42921.pdf> [20] <http://www.silent-czech.cz/ru/vyroba/vyroba-drazkovych-izolaci-vcetne-lemu/>
- [21] Statory. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.sopo.cz/cz/fotogalerie/45704206/>
- [22] SEQUENZ, Heinrich. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Vyd. 1. Překlad Josef Hapl, Vladimír Holub. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980, 310 s.
- [23] Polpaarzahl. [online]. 2009 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Polpaarzahl>
- [24] Stator Bar Components with High Thermal Conductivity Resins, Varnishes, and Putties - diagram, schematic, and image 02. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.faqs.org/patents/imgfull/20090174279_02
- [25] Winding. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.helmke.de/uk/service/wicklungen.html>
- [26] Materiály pro hlavní izolaci izolačních systémů Resin-Rich. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/c-materialy-pro-hlavni-izolaci-izolacnich-systemu-resin-rich/>
- [27] Vacuum Pressure Impregnation (VPI) Systems. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.wsf-industries.com/VPI.htm>
- [28] Mikovcová, P. Porovnání technologie Resin Rich a VPI pro izolační systémy [stat']. 2006.
- [29] HELGESON, Anders a Uno GAFVERT. Dielectric Response During Curing of a Resin-Rich Insulation System for Rotating Machines. [online]. 1999 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=651263>
- [30] Reliability of the Laminate from Advanced COPNA-Resin/E-Glass Fabrics System. [online]. 1997 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=554533>
- [31] Study on Hybrid Au–Underfill Resin Bonding Method With Lock-and-Key Structure for 3-D Integration [online]. 2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6449300>