

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Šíření tepla v synchronním stroji

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: Petr SYNEK
Osobní číslo: E11B0092K
Studijní program: B2644 Aplikovaná elektrotechnika
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Název tématu: Šíření tepla v synchronním stroji
Zadávající katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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

1. Proveďte rozbor jednotlivých podsystémů synchronního stroje.
2. Popište izolační systémy synchronního stroje a zaměřte svojí práci na nové elektroizolační systémy.
3. Popište způsoby šíření tepla v elektrických strojích. Proveďte návrh výpočtu oteplení statorového svazku a vinutí.
4. Vyhodnoťte vliv tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

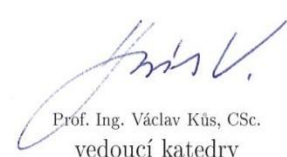
1. Mentlík V., Trnka P., Trnková M., Šašek L.: Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, Praha, BEN 2011.
2. Šavel J.: Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice, BEN 2005 Hak J., Ošlejšek O.: Výpočet chlazení elektrických strojů 1. díl, Brno 1973.
3. List V., Hak J. a kol., a. Elektrotechnika II - elektrické stroje, část 1. Praha, SNTL, 1969.
4. Ondruška E., Maloušek A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.
5. Internetové zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tetjana Tomášková
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na popis jednotlivých podsystémů synchronního stroje, jak s vyniklými póly, tak hladkým rotorem, jeho izolačních systémů, se zaměřením na nové elektroizolační systémy. Dále popisuje způsob šíření tepla v elektrických strojích s návrhem výpočtu oteplení statorového svazku a vinutí. Závěr práce obsahuje vyhodnocení vlivu tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy a možnost zlepšení odvodu tepla z elektroizolačních systémů.

Klíčová slova

Synchronní stroj, izolační systémy, vakuově tlaková impregnace (VPI), resin-rich (RR), záření, kondukce, konvence.

Abstract

This bachelor thesis is aimed at description of single synchronous machine's subsystems, as with salient poles and a smooth rotor, its insulating systems with a view to new electroinstallation systems. next is described kind of heat dispersion in electrical machines with a plan of calculation of stator winding warming.the end of this thesis include evaluation of heat attributes of material influence to electroinsulating systems and the opportunity to improve heat dissipation of electrical insulation systems .

Key words

Synchronous machine , insulation systems , vakuum pressure impregnation (VPI), resin-rich (RR), radiation , conduction, convention.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2015

Petr SYNEK

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí bakalářské práce paní Ing. Tetjane Tomáškové za cenné rady, připomínky, metodické vedení práce a za čas, který mi věnovala

Děkuji také za pomoc panu Ing. Radimovi Janákovi, který mě seznámil s prací v grafickém programu.

Obsah

Obsah	8
Seznam symbolů a zkratk	10
Úvod	12
1. Podsystemy synchronního stroje	13
1.1 Magnetický podsystem synchronního stroje.....	14
1.1.1 Magnetický obvod rotoru synchronního stroje.....	15
1.1.2 Magnetický obvod statoru synchronního stroje.....	15
1.1.3 Vzduchová mezera	16
1.1.4 Ztráty v magnetickém obvodu.....	16
1.2 Elektrický podsystem synchronního stroje	17
1.2.1 Tlumící vinutí.....	17
1.2.2 Budící vinutí.....	18
1.2.3 Statorové vinutí.....	18
1.2.4 Ztráty ve vinutí.....	18
1.3 Chladicí podsystem synchronního stroje	19
1.3.1 Přirozené chlazení	20
1.3.2 Vlastní chlazení	20
1.3.3 Cizí chlazení	20
1.3.4 Průtahová ventilace	21
1.3.5 Povrchové chlazení.....	21
1.3.6 Oběhové chlazení.....	21
1.3.7 Kapalinové chlazení	21
1.3.8 Přímé chlazení plynem.....	21
1.3.9 Chlazení stroje s vyniklými póly	23
1.3.10 Chlazení stroje s hladkým rotorem	23
1.3.11 Rozdělení chladicího prostředí	23
1.4 Dielektrický podsystem	24
1.4.1 Rezistivita	24
1.4.2 Elektrická pevnost.....	24
1.4.3 Ztrátový činitel.....	25
1.4.4 Dielektrické ztráty.....	25
1.4.5 Elektrická vodivost	25
1.4.6 Relativní permitivita	26
1.4.7 Polarizace	26
1.4.8 Teplotní klasifikace izolantů	26
1.5 Mechanický podsystem.....	27
2. Izolační systémy	28
2.1 Izolační systémy pro nízkonapěťové stroje	28

2.2	Izolační systémy pro vysokonapěťové stroje.....	29
2.2.1	<i>Resin-Rich</i>	30
2.2.2	<i>Vakuově tlaková impregnace</i>	31
3.	Šíření tepla a ná okrajově vrh oteplení synchronního stroje	32
3.1	Šíření tepla	32
3.1.1	<i>Sálání</i>	32
3.1.2	<i>Vedení</i>	32
3.1.3	<i>Proudění</i>	33
3.1.4	<i>Kombinované sdílení tepla</i>	33
3.2	Návrh výpočtu oteplení statorového vinutí statorového svazku.....	34
3.2.1	<i>Návrh na výpočet oteplení statorového vinutí</i>	34
3.2.2	<i>Návrh výpočtu oteplení statorového svazku</i>	36
4.	Vyhodnocení vlivu tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy	36
	Závěr	37
	Seznam literatury	38
	Přílohy	42
	Příloha 1. – Hlavní izolace vodičů.....	42
	Příloha 2. – Izolační materiály podle tříd	43
	Příloha 3. – Výběr z používaných elektroinstalačních materiálů	44

Seznam symbolů a zkratek

A	Průřez materiálu [m^2]
A_b	Činitel sálání [$W \cdot ^\circ C^{-4} \cdot m^{-2}$]
B	Amplituda sinusově se měnící indukce v části, kde se určují ztráty
C	Integrační konstanta
c	Měrné teplo [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_s	Relativní sálání [-]
D_e	Vnější průměr statoru [m]
E	Intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
E_p	Elektrická pevnost [$V \cdot m^{-1}$]
F_m	Magnetomotorická síla [A]
f	Frekvence [Hz]
G	Hmotnost části [kg]
I	Efektivní hodnota proudu [A]
k	Činitel, řád vyšší harmonické
k_p	Činitel respektující zvětšení ztrát [-]
l	Délka [m]
l_z	Střední délka závitů [m]
N	Počet závitů zapojených do serie
ΔP	Tepelný tok [W]
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe [W]
ΔP_j	Joulovy ztráty [W]
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty [W]
$p_{1,0}$	Měrné ztráty elektrotechnické oceli pro $B = 1$ T a $f = 50$ Hz
$p_{1,5}$	Měrné ztráty při $B = 1,5$ T a $f = 50$ Hz
R	Elektrický odpor [Ω]
S	Stálý průřez materiálu [m^2]
S_p	Tloušťka izolace v místě průřezu [mm]
s	Průřez vodiče [m^2]
$tg\delta$	Ztrátový činitel [-]
U_m	Magnetické napětí [A]

U_p	Průrazné napětí [kV]
ε	Permitivita [-]
ε_r	Relativní permitivita [-]
Θ_t	Absolutní teplota sálajícího tělesa [°C]
Θ_0	Absolutní teplota okolí [°C]
Λ	Magnetická vodivost [H]
λ	Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}$]
μ	Permeabilita materiálu [-]
μ_0	Permeabilita vakua [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
μ_r	Relativní permeabilita [-]
ρ	Měrný odpor vodiče [$\Omega\cdot\text{m}^{-1}$]
ρ_v	Element magnetické indukce
Φ	Magnetický tok [Wb]
σ	Proudová hustota [$\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$]
ϑ	Teplota předmětu [°C]
ϑ_0	Počáteční teplota předmětu [°C]
ϑ_Δ	Oteplení předmětu [°C]
ω	Úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
$\omega_{(x)}$	Hustota tepelného toku [$\text{V}\cdot\text{cm}^{-3}$]

Úvod

Teplota je v oboru elektrických točivých strojů velmi sledovaný parametr. V tomto oboru je snahou získat co nejpřesnější informace o vzniku tepla, jeho intenzitě, sdílení v jednotlivých segmentech stroje a jeho účincích na materiály, ze kterých se stroj skládá. I kdy lze teplotu změřit je v některých případech nutné teplotní pole modelovat. Jednou z těchto metod je metoda konečných prvků.

Vzniklé teplo je třeba odvádět, k tomu se používá chladicí médium. Volba způsobu chlazení a chladicího média je závislá na parametrech stroje, hospodárnosti, prostoru vymezeném pro stroj, předpokládaného prostředí, kde bude plnit svoji funkci a jeho pořizovací ceně. Další důležitou vlastností je intenzita používání a účinnost vlastního chlazení.

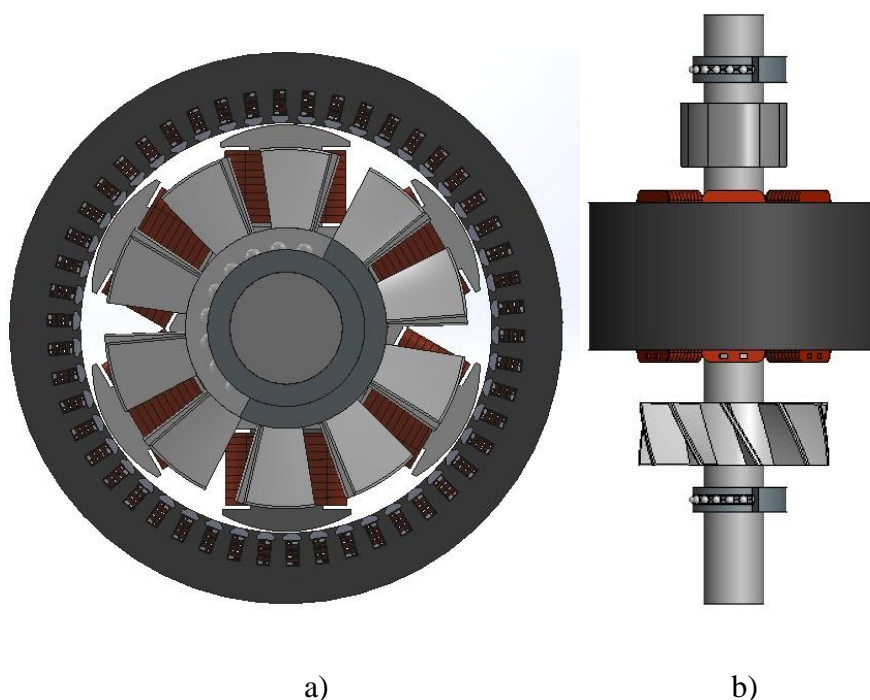
Výkony elektrických točivých strojů (např. hydrogenerátorů, turbogenerátorů) odpovídají poptávce ze strany energetiky. V současnosti je v oblasti výroby turbogenerátorů zájem o stroje s menšími výkony max. 350 MVA [6]. To klade požadavky na teplotní odolnost elektroinstalačních materiálů zejména těch izolačních.

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na šíření tepla v elektrických strojích. Aby bylo možné zabývat se šířením tepla v synchronních strojích, provede se rozbor jednotlivých podsystémů. Ten bude proveden v první kapitole. Druhá kapitola je zaměřena na popis izolačních systémů synchronního stroje, s hlavním zaměřením na nové elektroinstalační systémy. Ve třetí kapitole se nachází popis způsobů šíření tepla v elektrických strojích a návrh výpočtu oteplení statorového svazku a vinutí. V závěrečné čtvrté kapitole se dopracujeme k vyhodnocení toho, jaký mají tepelné vlastnosti materiálu vliv na elektroizolační systémy.

1. Podsystemy synchronního stroje

Mezi hlavní využití synchronních strojů patří přeměna mechanické energie na energii elektrickou. Jsou tedy využívány jako alternátory, zdroje střídavého elektrického proudu. Jejich další využití se nachází v přeměně elektrické energie na energii mechanickou, zde se nazývají synchronní motory. V elektrických sítích slouží ke kompenzaci účinníku, výrobě jalové energie, pod názvem kompenzátory. Před jejich nahrazením polovodičovými měniči byly používány jako synchronní konvertory k přeměně střídavého elektrického proudu na stejnosměrný elektrický proud, anebo ze stejnosměrného elektrického proudu na střídavý elektrický proud. Jejich využití jako zdroje kmitočtu, středofrekvenční alternátory, bylo také nahrazeno polovodičovými měniči.

Na obrázku 1.1 se nachází synchronní stroj s vyniklými póly bez mechanického krytu. Jednotlivé komponenty budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.



a) čelní pohled, b) pohled shora

Obr. 1.1 Synchronní stroj s vyniklými póly, bez mechanického krytu.

Synchronní stroje se skládají z podsystemu mechanického, magnetického, elektrického, ventilačního a dielektrického. V této kapitole popíšeme jednotlivé podsystemy tak, abychom osvětlili jejich složení a funkci v synchronním stroji. Následně se zaměříme na základní seznámení se vznikem ztrát v těchto podsystemech. Teplem, vzniklým v důsledku ztrát, se budeme zabývat ještě ve třetí kapitole

1.1 Magnetický podsystem synchronního stroje

Magnetický podsystem se skládá z částí elektrického stroje, které mu umožní uzavření magnetického obvodu. Magnetický obvod je složen z magnetického obvodu statoru, magnetického obvodu rotoru a vzduchové mezery. Přes magnetický obvod se uzavírá magnetický tok stroje. Pro magnetický tok [1 - 3], [7] Φ [Wb] platí Hopkinsonův zákon, je tedy dán součinem magnetomotorické síly F_m [A] obvodu a Λ magnetické vodivosti obvodu [H]. [2]

$$\Phi = F_m \Lambda \quad (1.1)$$

V uzavřeném magnetickém obvodu je magnetomotorická síla dána součtem magnetických napětí U_m [A], jednotlivých částí obvodu, potřebných k protlačení magnetického toku. [2]

$$F_m = \sum U_m \quad (1.2)$$

Magnetická vodivost je dána permeabilitou hmoty μ [-] a délkou l [m] části obvodu, po jejíž celé délce lze předpokládat stálý průřez S [m²]. [2]

$$\Lambda = \mu \frac{S}{l} \quad (1.3)$$

Permeabilita hmoty je součinem relativní permeability μ_r [-] a permeability vakua μ_0 [H.m⁻¹]. [2]

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.4)$$

$$\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \quad (1.5)$$

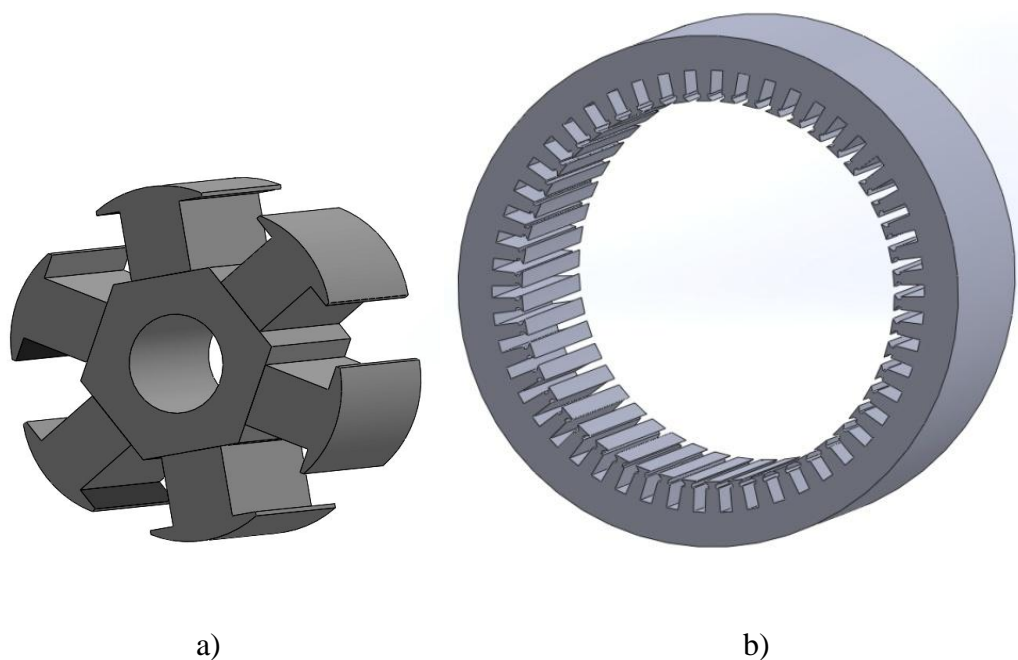
1.1.1 Magnetický obvod rotoru synchronního stroje

Magnetický obvod rotoru s vyniklými póly se skládá ze dvou sousedních pólů rotoru a magnetového kola. Soustavu zubů u hladkého rotoru si lze představit jako jeden velký pól. Rotor je tvořen soustavou pólů rotoru, v případě malých strojů se může jednat o permanentní magnety. Póly rotoru mohou být vyrobeny z masivního kovu. Tvar pólu udává především sinusový průběh proudu.

Magnetickým materiálem používaným na póly je ocelolitina a kovaná ocel. Pro hladký rotor se používá chromniklová ocel s přísadou molybdenu.

1.1.2 Magnetický obvod statoru synchronního stroje

Magnetický obvod statoru se skládá ze zubů statoru a jha statoru, je složen z dynamických plechů, vzájemně izolovaných, do jejichž drážek je uloženo statorové vinutí.



a) Rotor s vyniklými póly, b) Stator s drážkami na statorové vinutí

Obr. 1.2 Komponenty magnetického obvodu synchronního stroje s vyniklými póly,

1.1.3 Vzduchová mezera

Vzduchová mezera musí být co nejmenší. S rostoucí velikostí vzduchové mezery roste magnetický odpor, to se projeví na potřebě většího budícího proudu. Šířku vzduchové mezery určuje potřebná vůle mezi rotorem a statorem. Je třeba brát v úvahu přesnost uložení a tuhost hřídele. Podstatná je i mezera mezi sousedními póly, k omezení rozptylového toku. Čím jsou póly blíže u sebe, tím je větší rozptylový tok. [2], [3]

1.1.4 Ztráty v magnetickém obvodu

Ve střídavém magnetickém poli vznikají v železe ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Železo se magnetuje z nulové hodnoty indukce na maximální hodnotu indukce. Při odmagnetování na remanentní hodnotu indukce se část energie vrátí do sítě. Převážná část energie se při odmagnetování ztratí. Ztráta energie, která vznikne za jeden kmit, je dána plochou hysterezní smyčky. Ty se při každém kmitu opakují. Z toho vyplývá, že velikost hysterezních ztrát je závislá na kmitočtu. Závislost ztrát na indukci se vyjadřuje podle Steinmetze empiricky exponentem 1,4 až 1,8 [2], [7]. S potřebou vyššího sycení železa je vyšší exponent. Hysterezní ztráta se vztahuje k jednotce objemu, anebo hmotnosti. [2]

Vířivé proudy se indukují do materiálu magnetického obvodu vlivem střídavého magnetického pole. Ztráty vířivými proudy jsou přímo závislé na frekvenci a nepřímo závislé na měrném odporu materiálu magnetického obvodu. Ke snížení vířivých ztrát se využívá zvýšení měrného odporu materiálu. Zvýšení měrného odporu dosáhneme přidáním křemíku. Podíl křemíku v oceli nemůžeme neustále zvyšovat, protože s vyšším poměrem křemíku se měkká ocel stává křehčí a plechy se lámou. Ztráty jsou dále závislé na rozměrech, proto je potřeba co nejvíce snížit rozměr hmoty, který je kolmý na směr indukce. To je důvodem, proč se magnetický obvod u střídavých strojů skládá ze svazku plechů. Čím je vyšší kmitočet, tím jsou plechy tenčí. [1]

Ztrátu v jednom kilogramu plechů při kmitočtu 50 Hz a indukci 1 T nazýváme ztrátovým číslem plechů. Ztráty v železe jsou nejmenší, je-li všude homogenní pole. [1]

Výpočet ztrát v železe je dán: [1]

$$\Delta P_{\text{Fe}} = p_{1,0} \cdot k_p \cdot G \cdot B^n \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \quad (1.6)$$

ΔP_{Fe} [W] jsou ztráty v železe, hysterezní a vířivé, $p_{1,0}$ [W.kg⁻¹] měrné ztráty použité elektrotechnické oceli pro $B = 1$ T a $f = 50$ Hz, G [kg] hmotnost části, k_p činitel respektující zvětšení ztrát vyšší harmonickou polí a změnou struktury elektrotechnické oceli během výroby [-], B [T] amplituda sinusově se měnící indukce v části, kde ztráty určujeme, $n = 5.69 \log p_{1,5}/p_{1,0}$, $p_{1,5}$ = měrné ztráty při $B = 1,5$ T a $f = 50$ Hz [W.kg⁻¹], f [Hz] frekvence. Výpočet můžeme provést i druhým způsobem, kdy zvlášť vypočítané vířivé a hysterezní ztráty sečteme. Tuto metodu můžeme využít, když známe jejich poměr pro elektrotechnickou ocel. [1 -3]

1.2 Elektrický podsystém synchronního stroje

Elektrický podsystém umožňuje průchod žádaného proudu elektrickým strojem. To je zabezpečeno vinutím. Materiál, ze kterého se vyrábí vinutí, musí mít dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Zároveň musí splňovat dobré mechanické vlastnosti jako je tvárnost, pevnost a možnosti spojení. Používaným kovem je elektrovodná měď s čistotou 99,9 %. Průřezy vodičů jsou voleny podle velikosti požadovaného výkonu stroje. Mimo statorového a rotorového (budícího) vinutí se u synchronních strojů setkáváme s vinutím tlumícím. V příloze se nachází tabulka používaných hlavních izolací vodiče. [3]

1.2.1 Tlumící vinutí

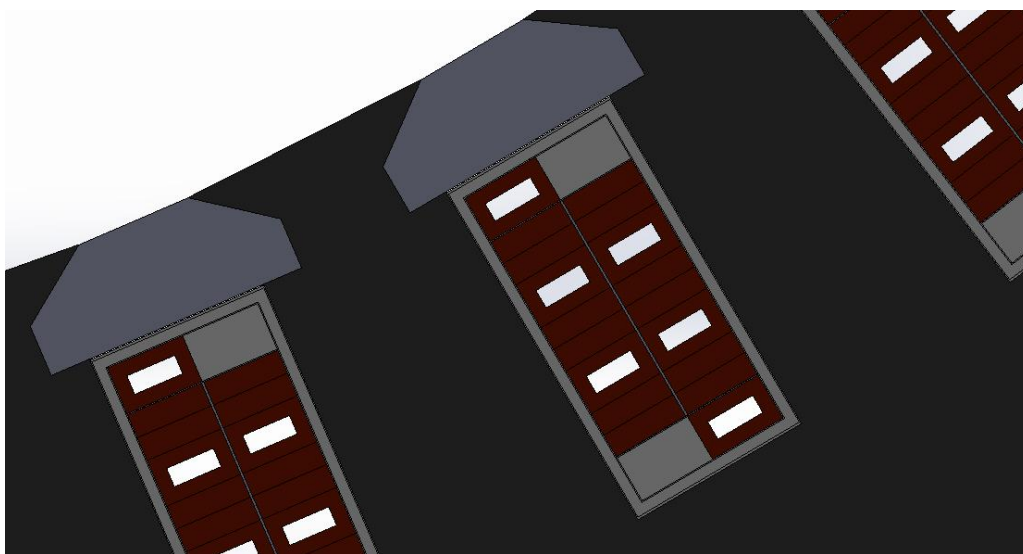
Tlumící vinutí má tvar klece nakrátko, klec je vytvořena z měděných tyčí, které jsou uloženy v polozavřených drážkách v pólových nástavcích. Tyče jsou spojeny s obloukovými měděnými pásy. U některých strojů mohou být některé tyče z mosazi. Tlumící vinutí má tlumit nesynchronní složky magnetického pole ve vzduchové mezeře, při změně zátěžového úhlu utlumit kývání rotoru kolem rovnovážné polohy a v případě, kdy synchronní stroj použijeme jako motor, slouží klec nakrátko k synchronnímu rozběhu. U synchronních strojů jsou tyče tlumící vinutí umístěny těsně pod povrchem pólů pólových nadstavců. [1 - 3]

1.2.2 Budící vinutí

Budící vinutí se navíjí kolem pólových nastavců pod póly, nebo do drážek v případě hladkého rotoru. Vinutí se vine z izolovaných vodičů. [3]

1.2.3 Statorové vinutí

Kromě tvaru pólu pólového nastavce se může sinusový průběh proudu u dvupólových strojů ještě upravit velkým počtem drážek a vhodným zkrácením kroku. U vícepólových strojů se to provádí zlomkovým počtem drážek na pól a fázi, vhodným zkrácením kroku a v některých případech zešíkmením drážek vinutí. Na obrázku 1.3 je výseč ze statoru, lze na ní vidět uložení statorové vinutí do statoru. V tomhle případě se jedná o otevřenou drážku, do ní se vkládá drážková izolace. Ta slouží k ochraně před poškozením vodiče o stěnu drážky. Poté se do drážky vloží vodič. Nad vodičem se nachází drážkový klín (světle šedý šestiúhelník). Klíny slouží k zajištění vinutí před dynamickými účinky proudu.



Obr. 1.3 Uložení statorového vinutí do statoru

1.2.4 Ztráty ve vinutí

Při průchodu proudu vodičem vzniká elektrická ztráta. Kdyby byl proud procházející vodičem rovnoměrně rozložen po průřezu vodiče, byla by ztráta minimální. Při střídavém proudu dochází k vytlačení proudových vláken od vlastního proudu vodiče i od proudů

sousedních vodičů. Vlivem vlastního pole je proud na povrchu vodiče hustší a uvnitř řidší. Tento jev se nazývá povrchový (skinefekt), je výraznější s vyšším kmitočtem. Značné ztráty vznikají v tlustých vodičích uložených do železa, dochází k jednovrstvému vytlačení proudu. Rozdělením každého vodiče v jeho výšce na polovinu se přídavné ztráty zmenší na čtvrtinu. ΔP_j [W] jsou Joulovy ztráty vzniklé průchodem efektivního proudu I [A] při odporu R [Ω]. Odpor vodiče je dán počtem závitů vinutí N zapojených do série, střední délkou jednoho závitu l_z [m], jeho průřezem s , teplotou vinutí ϑ [$^{\circ}\text{C}$], měrným odporem vodiče ρ [$\Omega\cdot\text{m}$] při teplotě ϑ_0 [$^{\circ}\text{C}$], konstantou pro měď 235 a pro hliník 245. [2], [7]

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 \quad (1.7)$$

$$R = k \sim \frac{N \cdot l_z \cdot \rho}{s} \cdot \frac{c + \vartheta}{c + \vartheta_0} \quad (1.8)$$

k nabývá hodnoty 1 pro stejnosměrné vinutí a větší jak 1 pro vinutí, kterým protéká střídavý proud. Činitel k pro vinutí, kterým prochází střídavý proud, má vyšší hodnotu, protože v něm jsou zohledněny ztráty vířivými proudy, indukovanými rozptylovými magnetickými toky. Vířivé proudy se sčítají se střídavým proudem. [2]

1.3 Chladicí podsystem synchronního stroje

Zabezpečení dostatečného chlazení je nedílnou součástí provozu stroje. Na efektivitě chlazení je závislá délka bezporuchového stavu elektrického stroje. Při provozu stroje ve vyšší teplotě, než je jeho provozní teplota, urychlí se stárnutí izolace. Podle Montsingera zvýšení provozní teploty u teplotní třídy A o 8°C , u teplotní třídy B o $8 \div 10^{\circ}\text{C}$ a u teplotní třídy H o 12°C , dochází ke zkrácení životnosti izolace stroje na polovinu [1]. Naproti tomu při udržování stroje v provozních teplotách nižších o ty samé hodnoty pro teplotní třídy, než je navržena izolace pro provozní teplotu, dojde k prodloužení životnosti izolace na dvojnásobnou dobu. U svislých strojů dochází k lepšímu chlazení než u vodorovných. Dochází k tomu vlivem souměrného proudění kolem celého povrchu. Pokud nestačí k odvodu

tepla povrch stroje, používají se k ochlazení kanálky, které jsou buď prováděny axiálně, nebo radiálně. Výhoda axiálních kanálek spočívá v neprodlužování stroje, zvětšuje se však jeho výška. Hlavní výhodou je to, že kanálky neprocházejí přes vrstvy izolace. U radiálních kanálek se mezi pakety plechových svazků vytvoří mezera. Stroj se tak prodlouží o celkový součet chladicích kanálek. Radiálními kanálky vzniká velká ochlazovací plocha. Na obrázku 1.4 jsou tři obrázky Roeblovy tyče, první je náčrtek a k němu je udělán popis. Druhý je složený z celých vodičů oproti třetímu, obsahujícímu dutý vodič, pro přímé chlazení chladičem. [2] [3]

Dále následuje popis a porovnání jednotlivých druhů chlazení elektrických točivých strojů a jejich kombinace [1 - 3].

1.3.1 Přírozené chlazení

Podstatou tohoto chlazení je odvádění tepla ze stroje sáláním a přirozeným prouděním vzduchu okolo stroje. Toto chlazení se používá u strojů s nižším výkonem.

1.3.2 Vlastní chlazení

K chlazení stroje dochází ventilátorem, který je přímo umístěn na rotoru stroje, nebo je rotorem stroje poháněn. Vlastní chlazení se používá u strojů, u kterých nestačí k odvodu tepla jejich povrch, ale s ventilátorem se dokážou ochladit sami.

1.3.3 Cizí chlazení

Ventilátor zabezpečující chlazení vzduchem je poháněn z jiného zařízení, než je hřídel stroje. V případě cizího chlazení se jedná i o chlazení stroje chladicím médiem vháněným dovnitř, zařízením nezávislým na chlazeném stroji. Tenhle způsob chlazení se využívá u velkých strojů, neschopných se uchládit vlastním ventilátorem, anebo u strojů kde se mění rychlost otáčení rotoru stroje v krátkých intervalech- Při poklesu otáček, se sníží rychlost průtoku chladiva, stroj se pak nedokáže ochladit sám.

1.3.4 Průtahová ventilace

Tento způsob chlazení předává vzniklé teplo vzduchu proudícím přes vnitřek stroje. Výhodou je neustále čerstvý vzduch. Nevýhodou je zanášení stroje nečistotami přinášnými z vnějšího prostředí proudem vzduchu.

1.3.5 Povrchové chlazení

Povrchové chlazení předává teplo do prostředí z povrchu stroje, aniž by chladicí médium vstupovalo do stroje.

1.3.6 Oběhové chlazení

Oběhové chlazení spočívá v uzavřeném okruhu chladiva. Ohřáté chladicí prostředí předává své teplo do kondenzátoru a vrací se okruhem zpět k odvedení dalšího tepla ze zahřátého povrchu. Z kondenzátoru se pak teplo odvádí druhým okruhem ven. Tento způsob chlazení má výhodu v tom, že se do něj nedostanou nečistoty, ovšem nevýhodou jsou větší nároky na prostor pro kondenzátor. Ohřáté chladivo se vyfukuje mimo stroj, případně pomocí kanálů mimo strojovnu. Druhý princip oběhového chlazení spočívá v tom, že proud vzduchu v uzavřeném okruhu odvádí teplo z míst stroje, kde dochází k většímu nárůstu teploty než v jiných částech, do míst, kde je teplota nižší. Tam dochází k ochlazení chladiva zahříváním chladnějších částí stroje. Dochází tak k rovnoměrnějšímu rozptýlení tepla ve stroji na co největší plochu, která se pak z povrchu stroje odvádí do jeho okolí.

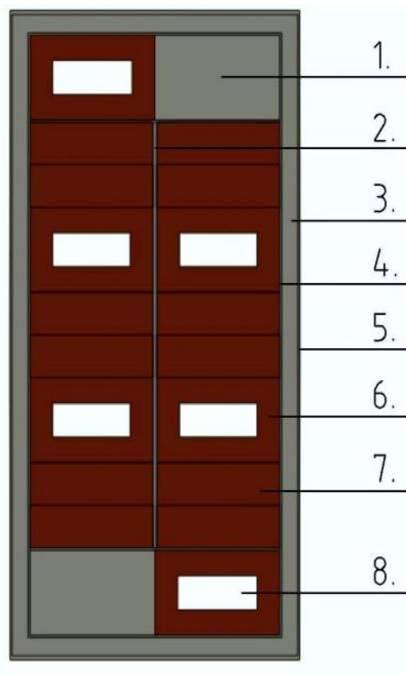
1.3.7 Kapalinové chlazení

I kapalinové chlazení má dva způsoby. V prvním dochází k ochlazení vlivem obtékání kapaliny kolem stroje nebo přímo ponořením do kapaliny. Druhou metodou je přímé chlazení kapalinou, to znamená, že chladicí kapalina proudí dutinou ve vodiči nebo cívce. Výhodou chlazení, kdy je jako médium použita voda, je velmi dobrá výměna tepla mezi povrchem zahřátého materiálu a chladicím prostředím. Nevýhodou jsou velké nároky na utěsnění.

1.3.8 Přímé chlazení plynem

Dochází k chlazení vinutí stroje plynem proudícím uvnitř vodičů nebo cívek. Nespornou výhodou tohoto způsobu chlazení je možnost zatěžovat vinutí větší proudovou hustotou.

Vzniklé teplo ve vinutí se mnohem lépe odvádí, dochází k přímému předávání tepla vinutí chladicímu médiu, aniž by muselo překonávat izolaci vinutí.



- 1) Epoxidový tmel
- 2) Středová izolace
- 3) Izolace páskou
- 4) Stažení skelnou tkanicí
- 5) Polovodiivá vrstva
- 6) Dutý vodič neizolovaný
- 7) Plný vodič izolovaný
- 8) Permutující vodič



b)



c)

a) nákres přímo chlazené tyče vzduchem s popisem, b) nepřímá chlazená tyč,

c) přímo chlazená tyč

Obr. 1.4 Příčný řez Roeblovou tyčí

1.3.9 Chlazení stroje s vyniklými póly

Výhodou stroje s vyniklými póly jsou jeho póly, které slouží jako ventilátor. U velmi pomaloběžných strojů dostačují k ochlazení stroje. Otevřené stroje pro nízké výkony si vystačí k ochlazení s prouděním vyvolaným otáčkami pólových nadstavců. Nevýhodou takto chlazených strojů jsou nečistoty, ty se tak dostanou do stroje. Výhodou jsou nulové ztráty, které by si vyžádalo připojení ventilátoru. Rychloběžné ventilátory jsou osazené ventilátory na obou dvou stranách magnetového kola. Má-li stroj delší magnetové kolo, jsou vhodnější ventilátory s šikmými lopatkami nebo šroubové ventilátory. Ty vhánějí chladivo do otvorů v magnetovém kole a mezi póly, tak aby chladily i statorové vinutí ve střední části stroje. Stroje pro větší výkony používá oběžné chlazení.

1.3.10 Chlazení stroje s hladkým rotorem

U stroje s hladkým rotorem, majícím na rotoru radiální kanálky, dochází k tomu, že se kanálky během provozu stroje chovají jako lopatky. Vytváří tak samoventilační účinek.

1.3.11 Rozdělení chladicího prostředí

Chladicí prostředí můžeme rozdělit na kapalná a plynná. Kapalná jsou především zastoupena vodou, používá se i olej, ten má horší viskozitu, to vyvolává potřebu většího tlaku pro oběh chladiva, tím rostou ztráty. U plynných prostředí je nejvyužívanější vzduch. Velký význam má i chlazení vodíkem, heliem a dusíkem. Vodík u velkých generátorů koluje pouze v uzavřeném okruhu, eventuálně vnitřkem dutých vodičů statorového vinutí, které má ochladit. Chlazení vodíkem a heliem je sice mnohem efektivnější, vlivem vyššího činitele tepelné vodivosti, ovšem oba prvky mnohem snadněji unikají netěsnostmi, tím vznikají velké nároky na utěsnění. Protože vodík ve směsi se vzduchem je výbušný musí být stroj konstruován jako výbuchu odolný.

1.4 Dielektrický podsystem synchronního stroje

Tato kapitola popisuje základní aspekty fyziky dielektrických materiálů [4 - 9].

Dielektrické materiály mají schopnost se polarizovat, vytvořit si vlastní elektrické pole poté, co jsou vloženy do elektrického pole. V dielektrickém podsystemu se využívá u elektrických strojů jejich jedné podmnožiny, a tou jsou izolanty. Izolantů se u elektrických strojů využívá pro jejich vynikající vlastnost vzájemného oddělení elektricky vodivých částí s odlišným potenciálem. Zde je tedy jejich hlavní funkcí zamezit průtoku elektrického proudu. Izolanty nemají schopnost se polarizovat po vložení do elektrického pole. Dále následuje popis vlastností, které charakterizují izolanty.

1.4.1 Rezistivita

Pro určení kvality izolantu a jeho stavu je důležité znát jeho povrchový a vnitřní měrný elektrický odpor. Povrchový měrný odpor je dán poměrem intenzity elektrického pole a hustoty proudu na povrchu izolantu. Vnitřní měrný odpor je dán poměrem elektrického pole a hustoty proudu uvnitř izolantu.

1.4.2 Elektrická pevnost

Izolant je namáhán silou elektrického pole, kterému je vystaven. V případě, že dojde k situaci, kdy je intenzita elektrického pole větší než pevnost izolantu, dojde k průrazu. V závislosti na době trvání průrazu se jedná o trvalý proud nebo výboj. U pevných izolantů dochází k destruktivnímu průrazu. U kapalných izolantů po výboji dojde k regeneraci izolačních vlastností izolantu. Ovšem během výboje dojde v izolantu k uvolnění části materiálu, což sníží jeho rezistivitu. U plyných izolantů dojde po výboji k obnovení jejich izolačních vlastností.

Elektrická pevnost je závislá na stupni nehomogenity elektrického pole, napětí na elektrodách, době působení elektrického pole a teplotě. Intenzita elektrického pole, během které dojde k průrazu, se nazývá elektrická pevnost E_p . Velikost napětí při průrazu označujeme jako průrazné napětí U_p . S je síla, tedy tloušťka izolace v místě průrazu.

$$E_p = \frac{dU_p}{dS} \quad (1.9)$$

Průraz u pevného izolantu může být elektrický, vzniklý nárazovou ionizací atomů izolantů, nebo tepelný, ten nastává u izolantů s velkým činitelem ztrát. Tepelný průraz probíhá pomalu, vzniká při nedostatečném odvádění tepla. K elektrickému průrazu dojde, jakmile elektrony s energií, kterou získají z elektrického pole, narazí do izolantu. Předají mu tak svoji energii, a je-li tato energie větší, než jakou má izolant schopnost utlumit, dojde k průrazu. K tepelnému průrazu dojde vlivem dielektrických a vodivostních ztrát. Ztráty se promění v teplo. Tímto zahříváním bude docházet ke zvýšení vodivosti a činitele ztrát. To povede k dalšímu nárůstu tepla. Jestli nenastane situace tepelné rovnováhy, nebude odváděno dostatečně teplo, které bude přijato, a neustálí se tak teplota, dojde k tepelnému průrazu. Čím je izolace tlustší, tím hůř se teplo odvádí.

1.4.3 Ztrátový činitel

$\text{tg}\delta$ udává míru ztrát, které se změní na teplo během polarizace dielektrika. Vyjadřuje zpoždění elektrické indukce za průběhem intenzity elektrického pole. Posuzuje se jím kvalita izolantu. Dobrým izolantem je materiál mající $\text{tg}\delta < 10^3$.

1.4.4 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty v pevných izolantech vznikají především vlivem vodivostních ztrát. Zahrnují v sobě jak ztráty proudem přes dielektrikum, tak jeho povrchovým proudem. Přínos dalších ztrát polarizací je značně závislý na druhu pevného izolantu, jeho materiálového složení a obsahu nečistot. Dielektrické ztráty vznikají jak ve stejnosměrném, tak střídavém poli. Jsou závislé na teplotě, frekvenci, intenzitě elektrického pole a ztrátovém čísle ($\epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$). Jak je vyjádřeno následným vztahem:

$$p_z = E^2 \omega \epsilon_t \text{tg}\delta \quad (1.10)$$

1.4.5 Elektrická vodivost

Ideální izolant by měl nekonečný odpor. Ve skutečnosti izolanty obsahují nečistoty a příměsi, které se nacházejí v izolantu volně, anebo jsou vázané jen slabou vazbou. Může se

jednat i o vlastní náboje izolantu. Při působení elektrického pole na izolanty dochází k malým posuvům volných nábojů. Množství volných nosičů (iontů) roste se vzrůstající teplotou. S tím, jak se zvyšuje teplota izolantu, dochází k dalšímu uvolňování nosičů. Je zde tedy velká závislost elektrické vodivosti na teplotě. Druhou významnou složkou je relativní permitivita ϵ_r . Vodivost můžeme rozdělit na elektronovou a iontovou. Elektronová vodivost izolantem je oproti iontové zanedbatelná. Začne-li se výrazně projevovat elektronová vodivost, znamená to, že se blíží průraz izolantu.

1.4.6 Relativní permitivita

Relativní permitivita je mírou polarizace. Jedná se o součin permitivity vakua a permitivity prostředí. Relativní permitivita udává míru zmenšení elektrické síly mezi náboji v látkovém prostředí. Velikost permitivity je závislá na druhu polarizace a na vnitřní stavbě dielektrika. Hodnota relativní permitivity klesá s narůstající frekvencí.

1.4.7 Polarizace

K polarizaci dochází vlivem působení vnějšího elektrického pole, do kterého bylo dielektrikum vloženo. Z hlediska synchronních strojů je důležitá deformační polarizace se silně vázanými nosiči elektrického náboje. Rozlišujeme tak polarizaci elektronovou, iontovou a pružnou dipólovou. Elektronová vodivost je založena na posuvu elektronu vůči jádru a není tepelně závislá. V iontové polarizaci existují určité dipólové momenty i bez přiložení vnějšího napětí. Po přiložení napětí dochází k posunutí iontů, tím se změní velikost jednotlivých dipólů a současně dojde ke změně jejich směru. Pružná dipólová polarizace je obdobou iontové polarizace vyskytující se v pevných látkách.

1.4.8 Teplotní klasifikace izolantů

Největší vliv na stárnutí izolantů má provozní teplota. To vedlo k vytvoření teplotních tříd. Teplotní třída je tedy klasifikací materiálu podle jeho provozní teploty. Index popisující hodnotu provozní teploty, při níž má izolační materiál během předpokládané doby životnosti dobré vlastnosti, se nazývá relativní index teplotní odolnosti (RTE) a udává se ve stupních Celsia. U elektroizolačních systémů je teplotní třída výslednicí průniků jednotlivých teplotních tříd komponentů systému.

Tabulka 1.1 – Označení teplotních tříd [5]

RTE [°C]	Teplotní třída	Písemné označení
< 90	70	
> 90 – 10	90	Y
> 105 – 120	105	A
> 120 – 30	120	E
> 130 – 155	130	B
> 155 – 180	155	F
> 180 – 200	180	H
> 200 – 220	200	
> 200 – 250	220	
> 250	250	

1.5 Mechanický podsystém synchronního stroje

Mechanický podsystém elektrického stroje se skládá z kostry, skříně svorkovnice, těsnění, ložisek, komutátoru. Kostra stroje musí odpovídat podmínkám prostředí, pro které je vyráběna. Musí být zabezpečená ochrana, aby se do stroje nemohlo dostat žádné živé zvíře nebo škůdce a poškodit jej. Další ochrana se zabývá vniknutím vody do stroje a kondenzací vody v něm. Tohle riziko se musí minimalizovat. Ložiska by měla být valivá a měla by mít kovové klece. Pro stroje s kuličkovými a válcovými ložisky by měla být dodávána mazací hlavice. Stroje musí být vybaveny těsněním, které brání vniknutí vlhkosti a nečistot podél hřídele do stroje.

ΔP_{mech} [W] - mechanické ztráty stroje s vyniklými póly: [1]

$$\Delta P_{\text{mech}} \approx 8p \left(\frac{n}{1000} \right)^3 (10D_e)^3 \sqrt{l} \quad (1.11)$$

D_e [m] – vnější průměr statoru, l [m] – délka statoru, n [min⁻¹] – otáčky, p – počet pólových dvojic.

2. Izolační systémy

Na elektroizolační systémy synchronních strojů jsou kladeny vysoké požadavky a to zejména na elektrickou a mechanickou pevnost dále na tepelnou odolnost, chemickou stálost.

2.1 Izolační systémy pro nízkonapěťové stroje

U nízkonapěťových točivých strojů [4 - 7] používáme izolaci vodičů, vyložení drážek a impregnant. U některých strojů může mít izolační materiál větší tloušťku, než je pro daný stroj potřeba, je to dáno technologickými podmínkami. Izolace musí být dosti pevná, tak zabráníme prodření, přetržení a dalšímu poškození během výroby nebo provozu. Pro izolaci vodičů využíváme především smalt. K dalším používaným izolačním materiálům pro vodiče patří opředení a ovinutí bavlnou, skleněnými vlákny a kombinací pevné a nanášené izolace. Materiál použitý k izolaci a počet vrstev se určí na základě požadované výšky pracovního napětí a funkce, k níž má sloužit. K ochraně vodiče vinutí uloženého v drážce se používá vyložení drážek. Jeho funkcí je chránit vodič, aby se nepoškodil o stěny drážek. Prostředky k tomu použité jsou drážkové lepenky, kombinované drážkové materiály anebo Nomexu®. Impregnace nízkonapěťových strojů se provádí převážně máčením, zaplavováním a zakapáváním.

Tabulka 2.1 – Používané impregnační materiály [10]

Impregnační materiál	Teplotní třída	Ep [kV/mm]	Aplikace	Vytvrzení
Jednosložková polyesterová pryskyřice	180	120 – 150	Máčení	Při nízké teplotě
Nenasycená polyesterimidová pryskyřice	180	80 – 100	Máčení, zaplavování za rotace	Elektrickým proudem
Nenasycená polyesterimidová pryskyřice ve styrenu	155	80	Zakapávání	–
Dvousložková polyuretanová látka	130	20 – 27	Zalévání	Za normální teploty

2.2 Izolační systémy pro vysokonapěťové stroje

Pro izolační systémy vysokonapěťových strojů používáme dva technologické způsoby, RR (Resin Rich) a VPI (Vacuum pressure impregnation) [4 - 7]. V obou případech jde o systém založený na třech složkách. Jedná se o nosnou složku, pojivo a izolační bariéru. Nosná složka určuje, jaké bude mít kompozit mechanické vlastnosti. Nejčastěji použitou složkou je skleněná tkanina. Skleněná vlákna mají několik typů vazby – látkovou, plátňovou, keprovou, whiskery či rouno. Další možností je použití aramidových vláken anebo fólie jako nosné složky (PEN a PET). Pojivo nám zajišťuje propojení všech složek kompozitního materiálu. Značně na něm závisí tepelná třída izolačního systému. Používaným materiálem je syntetická pryskyřice. Její modifikací je epoxidová, polyuretanová, polyesterová či silikonová pryskyřice. U epoxidové pryskyřice hrozí větší nebezpečí průrazu izolace.

Výslednou elektrickou pevnost zabezpečuje izolační bariéra. Izolační bariéra se vyrábí z rekonstruovaného slídového papíru (Kapton®). Podle způsobu ovinutí izolace páskem můžeme mluvit o kontinuálním a diskontinuálním provedení. Kontinuální je prováděno

průběžnou izolací jedním druhem pásky. Vytvrzení a lisování je v celé délce, nebo jen v rovné části. Diskontinuální je prováděno izolováním rovné části fóliovým materiálem a čela jsou navinuta páskou. Vytvrzení a lisování je prováděno v rovné části.

2.2.1 Resin-Rich

Při výrobě elektroizolačního systému Resin-Rich [4 - 7] se vstupní předimpregnovaný materiál nachází ve fázi polotovaru s 30 – 40 % pojiva. Nosnou složku nám tu tvoří skleněná tkanina nebo PEN (polyethylenaphthalátová) fólie. Skleněná vlákna se skládají do roviny, vznikne tak tkanina o síle 0,12 mm. Starší metoda výroby tkaniny spočívá ve stáčení vláken, vzniká tak 0,14 mm silná tkanina. Mechanické vlastnosti skleněné tkaniny jsou stejné jak při skládání do roviny, tak při stáčení. Velkým rozdílem je úspora prostoru, a tím i úspora při výrobě stroje. Další rozdílem jsou nižší dielektrické ztráty a mírné navýšení elektrické pevnosti asi o 7 % u novějšího způsobu výroby skleněné tkaniny.

Izolační bariéru tvoří kalcinovaný slídový papír. Jeho výraznými vlastnostmi jsou hutnost, pevnost a menší savost. Jako pojivo zde slouží reaktoplastická bezrospouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Ta je dodávána suchá, nelepivá, v částečně předtvrzeném stavu (B stav). Tloušťka pojivého materiálu je 0,15 – 0,2 mm. Páska je navinuta kontinuálně nebo diskontinuálně. Způsob navinutí záleží na velikosti stroje. Síla vrstvy je dána velikostí napětí.

Při výrobě se dává více materiálu, počítá se s jeho stlačením. Výroba probíhá tak, že se všechny složky izolace taví při normálním tlaku. Ještě než dojde k přeměně složek kompozitního materiálu na gel, tak by mělo dojít k odplynění. V momentě, kdy se materiály izolace změní na gel, dojde k vytvrzení materiálu. K vytvrzení dochází ve formách, kde je izolace stlačena na potřebný rozměr. Během vytvrzování se forma utáhne a natěsno uzavře. K vytvrzování dochází při teplotách 160–170 °C zhruba během jedné hodiny. Přesná doba trvání je závislá na druhu pryskyřice a tloušťce izolace. V další části výroby dochází k pomalému ochlazování a vysušení izolace, během pomalého ochlazení se omezuje vznik prasklin vlivem mechanických sil uvnitř kompozitu.

2.2.2 Vakuově tlaková impregnace

Při použití technologii vakuově tlakové impregnace [4 - 7] tvoří nosnou část především skleněná tkanina nebo polyamidová fólie. Pojivo tu tvoří nekalcinovaná slídová páska. Savost je zde velmi důležitá. Je potřebná při větším počtu vrstev, jen tak může dojít k důkladnému proimpregnování všech vrstev.

Nekalcinovaná slída má dostatečné požadované vlastnosti, jako jsou ohebnost a minimální pevnost v tahu potřebná k ovíjení. Množství pojiva je do sedmi procent. Jako impregnant se používá bezrozpouštědlová, epoxidová, silikonová nebo polyesterová pryskyřice. Tato metoda je vhodná do strojů, kde vyžadujeme výborné izolační a tepelné vlastnosti. K impregnaci dochází ve vakuově těsné nádobě, kde je možnost ohřívání a ochlazování.

Základem výroby je dobře vysušené izolované vinutí, to probíhá zhruba dvacet hodin při teplotě vyšší jak 100 °C. Následuje vložení do impregnační nádoby, kde se odsátím vzduchu vytvoří vakuum. Poté dojde k zaplavení impregnantem. Následujícím krokem je zrušení vakua a vytvoření přetlaku. V poslední etapě se předmět vkládá do sušárny, tady dojde k sušení za mírného podtlaku. Ze začátku se zařízení několik hodin otáčí, aby nedošlo k navrstvení impregnantu jen ve spodní části. Vytvrzení probíhá při proudění vzduchu za normálního tlaku. Impregnovat je možné celé zařízení nebo jeho části. VPI je technologie výroby, při které je po vytvrzení homogenita vinutí vysoká. To zvyšuje životnost a spolehlivost stroje. Nevýhodou je značná energetická náročnost, neexistuje tu možnost opravy jednotlivých dílů.

3. Šíření tepla a návrh oteplení synchronního stroje

Před analýzou vlivu tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy, musíme znát způsoby šíření tepla a metody využívané k tepelným analýzám.

3.1 Šíření tepla

Ztráty vznikají v magnetickém obvodu, elektrických obvodech i v mechanických částech. Vzniklé ztráty se přemění v teplo, které zahřívá části elektrického stroje, kde vzniká, a jeho okolí. Teplo se předává přes chladicí povrch chladicímu prostředí. Intenzita předávání tepla v čase se označuje pojmem tepelný tok. Tepelný tok předává teplo směrem ze zdroje do chladnějšího okolí. Do okolí se teplo předává sáláním (zářením), vedením (kondukcí) a prouděním (konvekci) [1 - 3], [9].

3.1.1 Sálání

Sálání je sdílení tepla, při kterém se část energie změní v energii záření. Ta se pak šíří přímočaře do okolí. V okamžiku, kdy prochází záření druhým předmětem, dochází k jeho částečné přeměně na teplo. Řídí se Stefan-Boltzmannovým zákonem, ten popisuje tepelný proud sálání. [1 - 3]

$$P_S = SA(\theta_t^4 - \theta_o^4) \quad (3.1)$$

$$A = c_s 5,7 \cdot 10^{-8} \quad (3.2)$$

θ_t [°C] je absolutní teplota sálajícího tělesa, θ_o absolutní teplota okolí, A je činitel sálání absolutně černého tělesa, c_s je relativní sálání, jehož hodnoty se nacházejí v příručkách a pro elektrické stroje se počítá s rozmezím $c_s = 0,3$ až $0,85$.

3.1.2 Vedení

Vedení tepla probíhá na základě předávání kinetické energie mezi molekulami vzájemnými srážkami. Vedení tepla probíhá ve všech skupenstvích látek. Jak v plynných

a kapalných, tak pevných. Vedením se z povrchu předmětu odvádí teplo nejčastěji vzduchem. Vzduchem se odvede jen málo tepla, důvodem je malá schopnost vzduchu vést teplo. [1 - 3] Tepelný tok ΔP [W], kterým probíhá výměna tepla, se určí ze vzorce: [3]

$$\Delta P = \frac{\Delta\vartheta A_b \lambda}{l} \quad (3.3)$$

A [cm²] průřez pro průchod tepelného toku. Součinitel tepelné vodivosti λ [W.cm.°C] je pro většinu látek zjištěný experimentálně, tepelná vodivost kovů je závislá na jejich teplotě. Při vedení tepelného toku ze zdroje tepla do okolního prostředí vznikají teplotní spády. Možností, jak omezit tepelný spád, je mít co největší teplotní vodivost v materiálu, ve kterém dochází k zahřátí. Tepelný tok by měl procházet co nejkratší cestou l [cm]. Prochází-li izolací, měla by být její tloušťka co nejmenší. Izolace klade velký tepelný odpor. Teplotní spád se vypočítá úpravou z předchozí rovnice: [3]

$$\Delta\vartheta = \Delta PR = \frac{\Delta Pl}{A\lambda} \quad (3.4)$$

3.1.3 Proudění

Proudění probíhá v kapalném nebo plynném prostředí. Proudění vzniká přirozeným vztlakem podél zahřívajícího povrchu. Čím je větší teplota ohřívajícího povrchu, tím je větší proudění. Vedení a proudění nelze od sebe rozdělit, z toho důvodu se počítá a měří společně. Nuceným prouděním chladiwa se zvětší množství tepla odvedeného z povrchu. Aby bylo chlazení účinné, musí se chladivo pohybovat takovou rychlostí, že se stihne ohřát od zahřívajícího povrchu a odvést teplo pryč. U dobře navrženého stroje se rychlost proudění pohybuje do 30 l/s na 1 kW ztrát. [1 - 3].

3.1.4 Kombinované sdílení tepla

Šíření tepla v elektrických točivých strojích probíhá kombinací sálání, vedení a proudění. Teplo prochází různými tepelnými odpory. U točivých strojů převládá šíření tepla vedením

a konvencí do plynného nebo kapalného média. Teplo vzniklé ve vodiči se šíří tepelným tokem z vodiče přes vrstvy izolace a kovové části až ke vzduchové mezeře, kde se předá teplo proudícímu chladicímu médiu. Čím je místo předání tepla vzdálenější od vstupu chladiva do stroje nebo začátku okruhu, tím je teplota chladiva vyšší. K jeho oteplení dochází po celou cestu strojem od ostatních částí. Než se přeneseme teplo vzniklé ztrátami ve vodiči k chladivu, dochází k těmto teplotním ztrátám: teplotní spád mezi mědí vinutí a drážkou ve vrstvách izolace, teplotní spád v odporu železa zubů, teplotní spád mezi teploměrným povrchem a chladivem. Tak teprve dojde k oteplení chladiva ve vzduchové mezeře. Není nutné, aby docházelo k předávání tepla tímto směrem.

V případě, kdy je teplota kovových částí vyšší než teplota vinutí, předává se teplo do vinutí. Tato situace může vzniknout v případě, kdy dochází k přímému chlazení vodiče. Směr a počet cest teplotního toku je ovlivněn radiálními a axiálními větracími kanálky. Výpočet sdílení tepla elektrického stroje je značně obtížný vzhledem k počtu zdrojů tepla, ztrát a cest. Přesný výpočet probíhá ve výpočetních programech k tomu sestavených.

3.2 Návrh výpočtu oteplení statorového vinutí statorového svazku

Tepelný výpočet navazuje bezprostředně na výpočet ventilační (přejímá velikosti průtoku chladiva a jejich rozdělení v navrhovaném stroji). Cílem tepelného výpočtu je zjištění středního a maximálního oteplení stroje jednotlivých částí elektrického točivého stroje.

3.2.1 Návrh na výpočet oteplení statorového vinutí

Vinutí se skládají z vodičů, ty se chovají jako tělesa s vnitřním zdrojem tepla. V objemu tohoto vodiče se za jednotku času vytvoří množství tepla, odpovídající ztrátám q [W.m³]. [3]

$$q = \sigma^2 \rho \quad (3.5)$$

Hustota proudu σ [A.m⁻²] a ρ [Ω.m] měrný odpor vodiče při střední teplotě. Během výpočtu položíme bod x_0 do poloviny délky vodiče mezi čely vinutí. V bodě x_0 je podélný tepelný tok roven 0, s rostoucí vzdáleností od bodu x_0 se jeho hodnota lineárně zvětšuje. [3]

$$\omega_{(x)} = \frac{qAx}{A} = qx \quad (3.6)$$

A [m²] je konstantní průřez, l [m] je ½ délky vodiče v drážce statoru mezi čely vinutí, tepelný tok q [W.m³] ztráty vzniklé v části vinutí, x [m] je vzdálenost od poloviny délky vodiče v drážce statoru mezi čely vinutí. V místě x dochází k teplotnímu spádu, úměrnému velikosti tepelného toku. [3]

$$qx = -\lambda \frac{d\Delta\vartheta}{dx} \quad (3.7)$$

λ součinitel úměrnosti představuje součinitel tepelné vodivosti materiálu. Protože nás zajímá oteplení, musíme rovnici integrovat. Ještě před integrováním převedeme činitel úměrnosti na druhou stranu rovnice. [3]

$$\Delta\vartheta_{(x)} = \frac{q}{2\lambda} x^2 + C \quad (3.8)$$

Oteplení má parabolický průřez. [3]

$$\Delta\vartheta_{(x)} = \frac{q}{2\lambda} (l^2 - x^2) \quad (3.9)$$

Největší vnitřní oteplení je v bodě x_0 . [3]

$$\Delta\vartheta_{(x)} = \frac{q}{2\lambda} \quad (3.10)$$

Při výpočtu je třeba brát v úvahu počet vodičů.

3.2.2 Návrh výpočtu oteplení statorového svazku

Tepelná vodivost v lištěných plechových statorových svazcích je závislá na množství křemíku v plechách. Velký tepelný odpor vzniká mezi jednotlivými izolovanými plechy. Odpor nelze mezi jednotlivými izolovanými plechy přesně určit, je závislý na více faktorech (např.: slisování, velikost nanesené izolace). [1-3]

Pro svazek plechů, chlazený z obou stran vzduchovým médiem, kde se teplo odvádí čelními plochami je výpočet totožný s výpočtem oteplení statorového vinutí s jediným rozdílem. Velikost vzniklého tepla zde nevychází ze vzniku ztrát z měrného odporu a hustoty proudu. q je zde zastoupeno vzniklými ztrátami v objemové jednotce podle rovnice 1.6. [3]

4. Vyhodnocení vlivu tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy

Životnost elektroizolačních systémů je značně závislá na provozní teplotě. Jsou dvě základní tepelné vlastnosti materiálů, které se používají v elektroizolačních systémech, v konstrukci elektrických strojů. Tou první je schopnost odolávat vysokým teplotám, než dojde ke zničení izolace. Schopnost odolávat vysokým teplotám je dána silnou vazbou mezi atomy a počtem volných částic nečistot ve struktuře materiálu. Druhou vlastností je tepelná vodivost v izolačních materiálech. Čím je tahle vlastnost nižší, tím je to pro izolační materiály horší. Dochází tak k vyššímu teplotnímu odporu, a tím i většímu zahřívání izolace. Zadržené teplo se tak drží v lokálních místech, která jsou více tepelně namáhána. Tím se zvyšuje šance zničení izolačního materiálu vlivem tepelného průrazu. V místech, kde by mohla nastat nežádoucí výbojová činnost, například oblasti výstupů drážek, se používá polovodivých vrstev. Polovodivé vrstvy mohou být součástí izolace, nebo jako zvláštní vrstva nalepená nebo natřená na povrchu izolace.

Z výrobního hlediska, požadavků na co nejmenší velikost stroje, ať už z důvodu úspory materiálu a tím ceny za stroj, nebo úspory místa pro instalaci stroje, je dána snaha o dosažení co nejmenší tloušťky izolačního systému. S rostoucí tloušťkou se sice zvyšuje elektrická pevnost izolačního systému, ale také roste spotřeba materiálu na jednotlivé komponenty stroje

a zvyšuje se teplotní odpor izolantu. To vede k většímu zahřívání izolace. K snížení tloušťky izolace se lze dostat vytvořením nového izolačního materiálu nebo elektroizolačního systému, se zachováním potřebných parametrů (např. přidání nano nebo mikroplniv, které mají dobrou tepelnou vodivost) pro zvýšení tepelné vodivosti elektroizolačního materiálu pro vysokonapěťové točivé stroje. Výzkumy zaměřené na rozvoj kompozitních materiálů s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti jsou a byly prováděny např. [17 - 23]. Druhou možností je změna technologie výroby, jak se stalo u skleněné tkaniny, kde se stáčená vlákna začala rovnat do roviny[5].

U malých strojů může docházet k předimenzování izolace, důvod je technologický. Izolace musí být dostatečně silná, tak nedojde k jejímu poškození už při výrobě nebo stavbě stroje.

Závěr

Zadáním práce bylo zabývat se šířením tepla v synchronním stroji. Z toho důvodu jsem se na začátku věnoval popisu jednotlivých podsystémů, kde jsem se zaměřil na popis vzniku ztrát. Z první kapitoly je zřejmé, jaké parametry a veličiny nejvíce ovlivňují vznik ztrát. U elektrického podsystému to má za následky velikost proudu. Proudem vzniklé ztráty jsou zvětšeny jeho druhou mocninou. V magnetickém podsystému vychází ztráty především z obsahu plochy hysterezní smyčky a jsou přímou úměrou závislé na frekvenci. Následně jsem se věnoval možnostem, jaká jsou možnosti odvedení tepla z elektrického točivého stroje. V závěru první části jsem popsal, jak velikost provozní teploty může ovlivnit životnost izolačního podsystému. Jaký význam na tom má elektrická pevnost a teplotní vodivost izolace.

Následně jsem se zabýval současně používanými elektroizolačními systémy. Zjistil jsem, jak se elektroinstalační systémy pro elektrické stroje vyrábějí, z jakých materiálů jsou složeny, a jaké plní tyto materiály funkce v celém systému. Co se týče vysokonapěťových izolačních systémů, je metoda vakuově tlakové impregnace spolehlivější, izolace je homogenní. Ovšem má to i svoji cenu, tou je nemožnost opravy izolace když dojde k poruše a vyšší výrobní náročnost s vyšší cenou. Během zpracování kapitoly o šíření tepla jsem se seznámil s metodami jeho výpočtu.

K danému tématu bych se chtěl ještě jednou vrátit a podrobněji, pomocí metody modelování konečným počtem prvků, se zabývat šířením tepla elektrickým strojem. Dále bych se chtěl pomocí simulace dozvědět víc o změnách, v šíření a sdílení tepla v synchronních strojích, vlivem změny teplotní vodivosti na základě nanočástic a mikroplniv.

V kapitole vyhodnocení tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy jsme probrali vliv tloušťky izolace a tepelné vodivosti izolantu na oteplení vodiče. Aby byla cena stroje co nejnižší, musí se dbát na úsporu materiálu. Třeba tím, že se zmenší tloušťka izolace. Čím má izolant menší tloušťku, tím je vyšší riziko průrazu izolantu. Musí se dbát, aby u nového materiálu byla zachována stejná hodnota elektrické pevnosti. Další podmínkou je vysoká tepelná vodivost materiálu, aby nedocházelo k zahřívání izolace vlivem velkého teplotního spádu (odporu).

Seznam literatury

- [1] PETROV, G. N., Elektrické stroje 2, Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1982, 732 s.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958, 716 s.
- [3] Wiedemann, E., Kellenberger, W., Konstrukce elektrických strojů, Praha, SNTL, 1973.
- [4] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [5] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6
- [6] TOMÁŠKOVÁ, T., Perspektivní kompozity pro elektrotechniku, diplomová práce, ZČU Plzeň, 2012, vedoucí diplomové práce Doc. Ing Eva Kučerová, CSc.
- [7] KUČEROVÁ, E., Elektrotechnické materiály, ZČU, Plzeň 2002, ISBN 80-7082-940-0.
- [8] HASSDENTEUFEL J., Květ K., Elektrotechnické materiály, Praha 1967 SNTL
- [9] TOMÁŠKOVÁ T., .M. Svoboda, P. Trnka, "The influence of nano- and micro- fillers on heat transfer in electrical insulation system" Diagnostika'13 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, pp.148-151, Plzen, 2013, ISBN 978-80-261-0210-6
- [10] SILENT-CZECH [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/>
- [11] Katalog [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf
- [12] Katalog [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.cogebi.com/high-voltage-products>
- [13] Katalog [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/zvyseni-provozni-spolehlivosti-motoru-s-menici-s-rychlymi-spinacimi-prvky--12153>
- [14] Vacuum Pressure Impregnation (VPI) Systems. [online]. [cit. 2015-15-05]. Dostupné z: <http://www.wsf-industries.com/VPI.htm>
- [15] Katalog [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/428/CZ_SM112-180_110826.PDF
- [16] Katalog [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné

- z: http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Vysokoteplotni_izolacni_materialy.pdf
- [17] Toshikastu Tanaka, Masahiro Kozako, Kenji Okamoto, Toward High Thermal Conductivity Nano Micro Epoxy Composites with Sufficient Endurance Voltage, Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 2, No. 1, pp. 90~98, 2012.
- [18] Jae-Jun Park, Effect of Nano-silicate on the Mechanical, Electrical and Thermal Properties of Epoxy/Micro-silica Composite, Department of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Geumsan 312-702, Korea, Received April 17, 2012; Accepted May 7, 2012.
- [19] M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito J. Allison, R. Briitsch, A.Lutz, N.Frost, Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Conference, Berlin 2001, A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators, http://www.vonroll.eu/media/files/f_e_publicationen/AHVISITCTG.pdf, [online], [20. 01. 2014].
- [20] F. SAYSOUK, S. DIAHAM, M.-L. LOCATELLI, B. BELKERK, Y. SCUDELLER, V. SALLES, R. CHIARAC, F. TOCHE, Enhancement of Thermal Conduction of Polyimide/Boron Nitride Nanocomposites, 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Catalog Number CFP13CID-USB ISBN 978-1-4799-2596-4, pp. 543-546.
- [21] I. Preda, J. Castellon, M. Fréchet, S. Agnel, F. Gao, R. Nigmatullin, S. Thompson, N. Freebody, A.S. Vaughan, Thermal and Dielectric Properties of Clay/Epoxy nanocomposites with Low Percentage of Graphite Oxide, 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Catalog Number CFP13CID-USB ISBN 978-1-4799-2596-4, pp. 539-542.
- [22] Advanced NAno-Structured TApeS for electrotechnical high power Insulating Applications (ANASTASIA) [online], [cit. 17. 04. 2014] dostupné z: <http://www.ecs.soton.ac.uk/research/projects/819>
- [23] Xin Luo, Yong Zhang, Carl Zande, Murali Murugesan, Yu Cao, Lilei Ye, Johan Liu, Novel thermal interface materials: boron nitride nanofiber and indium composites for electronics heat dissipation applications, Received: 12 December 2013 / Accepted: 13 March 2014 / Published online: 21 March 2014, Springer Science+Business Media New York 2014, [online], [cit. 17. 04. 2014] dostupné z:

http://www.researchgate.net/publication/261409633_Novel_thermal_interface_material_s_boron_nitride_nanofiber_and_indium_composites_for_electronics_heat_dissipation_applications.

Přílohy

Příloha 1. – Hlavní izolace vodičů

Hlavní izolace vodičů [10]

Název	Teplotní třída	Složení	Charakteristické vlastnosti
Duroflex ® 120	E	modifikovaný polyvinylformal	mechanicky odolný
GL325 (OLEKA)	F	holý vodič, 2x páskovaný polyesterovou fólií + 2xpředěný skelným vláknem + polyesterimidový lak	vysoce teplotně odolný
Thermex® 220 GR2 + 2SILIX V180	H	modifikovaný polyimid + 2x opředěný skelným vláknem + polyesterimidový lak	vysoce tepelně odolný, vysoká flexibilita při zpracování
Thermex® 220 GR2 + 2DAGLAS V180	H	modifikovaný polyimid + 2x opředěný vláknem DAGLAS + polyesterimidový lak	vysoce tepelně odolný, vysoká flexibilita při zpracování
Daglas®	H	smíšené vlákno sklo/polyester, dále neimpregnované nebo impregnované: polyesterimidovou, silikonovou, epoxidovou pryskyřicí ve stavu B	-
Aramidový papír	H	aramidový papír Nomex®	-
Samicafilm®	H	pásky na bázi slídového papíru	-
Silix®	200	skelné vlákno impregnované: epoxidovou pryskyřicí, epoxidovou pryskyřicí ve stavu B	-
Polyamid	220	polyimidová fólie Kapton®	-

Příloha 2. – Izolační materiály podle tříd

Izolační materiály podle teplotních tříd [5]

Teplotní třída	Použité materiály
70	Organické materiály – bavlna, hedvábí, papír a dřevo. Bez další impregnace a úpravy.
90	Impregnované organické materiály – hedvábí, bavlna, papír a dřevo. Impregnant – šelak, asfalty a oleje.
105	Izolační materiál – bavlna, hedvábí, dřevo, papír, tkaniny jak přírodní, tak syntetické na bázi celulózy. Impregnované nebo lakované. Impregnant – šelak, olejové, celulózové a asfaltové látky.
120	Materiál – celulózový papír, tvrzený papír, tvrzená tkanina a buničina. Impregnant – fenolformaldehydová nebo fenolická pryskyřice.
130	Anorganické materiály – skleněná vlákna, azbest, sulfátový papír. Pojivo – materiál na bázi epoxidů a fenolických pryskyřic.
155	Skleněná vlákna, slídový papír, PET, PEN folie, aramidový papír. Pojivo – epoxidové a novolakové pryskyřice.
180	Aramidy, polyamidy, polyestery, slída a slídový papír. Pojivo – silikonová nebo modifikovaná epoxidová pryskyřice.
200	Sklo, azbest, aramidové papíry. Silikonová pojiva. Impregnační lak na bázi polyesteralkydů. Silikonová zalévací hmota.
220	Aramidové papíry, sklo ve formě vláken. Pojivo – silikonové.
250	Polyimidy, aramidové a PTFE polytetrafluoretylen. Slída, slídový papír se silikonovým pojivem.

Příloha 3. – Výběr z používaných elektroinstalačních materiálů

V této příloze jsou popsány elektroizolační materiály, které mohou být použity v synchronních strojích [5 - 8], [10 - 16].

Myoflex®

Myoflex® – jedná se o ohebný vícevrstvý izolační materiál využitelný pro nízkonapěťové stroje. Používá se jako drážková a fázová izolace. Myoflex® se skládá z kombinace materiálů polyesterové fólie, polyesterového rouna, lesklé lepenky, kalandrovaného a nekalandrovaného Nomexu®, Kaptonu® a slídového papíru Samica®. Použitelnost Myoflexu je při teplotách do 220 °C.

Nomex®

Nomex je nový materiál vyráběný z krátkých vláken a malých vláknitých částic aramidu. Ke zpracování aramidových částic dochází pomocí papírenských technologií. K jeho zpevnění se využívá kalandrování. Kalandrování je proces probíhající při vysokých teplotách, během kterého projde materiál mezi dvěma lesklými válci, ty na něj působí velkým tlakem. Tím dojde ke zploštění vlákna. Během procesu dojde k odstranění vlhkosti vlivem působení vysokých teplot.

Ve vysokonapěťových strojích se používá v kalandrovaném stavu, ale i nekalandrovaném s 50% obsahem slídy. Má tak lepší schopnost nasáknout impregnační složku. Nomex® se vyznačuje výbornou elektrickou pevností a vysokou tepelnou odolností. Mezi jeho další podstatné vlastnosti se řadí nehořlavost, pevnost v tahu a odolnost proti záření, rozpouštědlům a chemikáliím. Tyto vlastnosti si zachovává, i když je dlouhodobě vystavený vysokým teplotám. Na povrch Nomexu® se dá dobře nanášet pryskyřice. Vzhledem k těmto vlastnostem nachází své uplatnění u točivých strojů jako elektroizolační materiál. Izolují se jím vodiče, cívky a drážky.

Kapton®

Jedná se o polyimidový materiál ve formě fólie. Kapton je další materiál s vysokou tepelnou odolností, a to až do teploty 250 °C. Krátkodobě může pracovat v teplotním rozmezí -120 °C až 350 °C. Jeho využití se nachází především ve vinutí elektrických strojů. Je to nehořlavý materiál, odolný proti organickým rozpouštědlům. Jeho velkou slabinou je malá odolnost proti mechanickému poškození. Je tedy vhodné jej použít v kombinaci s jinými materiály, které ho budou chránit před tímto druhem poškození.

Srovnání elektroizolačních materiálů Nomex® a Kapton® [10].

Materiál	E_p [kV/mm]	ϵ_r	ρ_v [$\Omega \cdot \text{cm}$]
Nomex®	40	2,5	10^{16}
Kapton®	7,7	3 – 3,5	$1,5 \cdot 10^{17}$

Apical®

Apical je lepicí páska. Jejím složením je polyamidová folie a silikonové lepidlo. Materiál je určen do teplotní třídy 180, krátkodobě dokáže plnit funkci při teplotě do 350 °C. Má vysokou elektrickou pevnost. Používá se jako izolace magnetických jader, polohová izolace, na slepení samostatných cívek a ochranná bandáž vnější polohy vinutí.

Polyglas®

Polyglas® je skelná bandážovací páska složená z podélných skelných vláken, které jsou impregnovány pryskyřicí v B stavu. Nachází využití v bandážování kotev a rotorů, pro fixaci čel vinutí.

Mikanity

Základem tohoto materiálu jsou původní, nezměněné slídové lístky.

Komutátorový mikanit – jedná se o tvrdé kompaktní desky vzniklé slisováním slídových lístků a šelakového pojiva. Používá se jako mezilamelová izolace.

Formikanit – materiál skládající se ze slídových lístků a pojiva šelaku. Vytvrzuje se při 130 °C za zvýšeného tlaku. Je ohebný, při vyšších teplotách tvárný a lepidelný. Používáný k výrobě komutátorových manžet.

Ohebný mikanit – vyrobený ze slídových lístků, kalcinovaného slídového papíru, z obou stran obklopený skleněnou tkaninou, pojivem je zde polyvinylbutyralová pryskyřice. Ohebný a tvárný při normálních teplotách. Slouží k prokládání vodičů a izolování oblých částí strojů.

Mikafolium – jedná se o šelakem spojený kompozit z celulóзовého papíru a slídových lístků. Používá se při izolování statorového a rotorového vinutí.