

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Plzeň, 2017

Ing. Tetjana Tomášková

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektrotechnika

Zlepšování parametrů vysokonapět'ových zařízení

Školitel: **doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**

Datum státní doktorské zkoušky: 27.06.2014

Datum odevzdání práce: 01.03.2017

V Plzni, 2017

Ing. Tetjana Tomášková

Prohlášení

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Plzni 2017

.....
Ing. Tetjana Tomášková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému školiteli doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, korekturu a připomínky při psaní této práce, ale také za trpělivou a stálou péči věnovanou po dobu celého mého studia.

Dále bych ráda poděkovala všem svým kolegům z Katedry technologií a měření za podporu, motivaci, pomoc při měření, ochotu a vstřícnost, s kterou mi byli vždy nápomocni.

Ráda bych poděkovala také Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. z Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky za ochotu a podnětné rady.

Za profesionální rady, poskytnutí informací a materiálu z praxe děkuji Ing. Jiřímu Stauberovi a Ing. Petru Krupauerovi z BRUSH SEM s.r.o.

Také bych ráda na tomto místě poděkovala svému nadřízenému Ing. Vladislavovi Kemkovi, Ph.D., díky němuž jsem měla dostatek prostoru a času k vypracování této práce.

A v neposlední řadě chci poděkovat také své rodině za podporu po celou dobu mého studia.

V Plzni 2017

.....
Ing. Tetjana Tomášková

Zlepšování parametrů vysokonapět'ových zařízení

Předkládaná práce se zabývá problematikou zlepšování tepelné bilance elektrických točivých strojů. Shrnuje současné poznatky z oboru chlazení elektrických strojů a způsobů šíření a odvádění tepla. Dále je zde uvedena nezbytná teorie z oborů hydromechaniky, aeromechaniky a termomechaniky.

V první, úvodní, kapitole je pozornost zaměřena na stručný popis elektrických točivých strojů a aktuální řešení elektroizolačních systémů (EIS) elektrických točivých strojů. Druhá kapitola popisuje ztráty v elektrických strojích, jejich vznik a možnou eliminaci. Třetí kapitola je zaměřena na chlazení točivých elektrických strojů, jsou zde uvedeny různé způsoby chlazení a je provedena analýza různých chladicích médií. V čtvrté kapitole jsou formulovány cíle disertační práce. V následující kapitole jsou popsány možnosti ovlivnění tepelné bilance elektrických točivých strojů pomocí plniv s vyšším součinitelem tepelné vodivosti a také popsán provedený experiment, kde je zkoumána jedna z variant jak ovlivnit odvod ztrátového tepla stroje pomocí zvýšení teplotní vodivosti elektroizolačního systému využitím plniv s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

V závěru je proveden analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje, který byl konfrontován s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měřením.

145 stran

77 obrázků

21 tabulek

63 rovnic

KET, FEL, ZČU 2017

Improving the parameters of high-voltage equipment

Dissertation thesis is targeting improvement the thermal balance of electrical rotating machines. It summarizes the current knowledge in the field of cooling of electrical machines and ways of transfer of heat in them. There is also shown the necessary theory in the fields of hydrodynamics, aerodynamics and thermodynamics.

In the first introductory chapter, attention is focused on a brief description of electrical rotating machines and the latest developments of electrical insulation systems (EIS) of rotating electric machines. The second chapter describes the losses in electrical machines, their origin and possible elimination. The third chapter focuses on the cooling of rotating electrical machines, there are different ways of cooling and the analysis of different cooling media. In the fourth chapter are presented the goals of the dissertation thesis. The following section describes the possibilities of influencing the heat balance rotating electrical machine using fillers with high thermal conductivity and also describes an experiment in which it examined one of the options to influence dissipate heat by increasing the thermal conductivity of electroinsulation system with a higher thermal conductivity.

In the conclusion is discussed analytical thermal proposal of the electric rotating machine, which was confronted with the results of finite element analysis and measurement.

145 pages

77 pictures

21 tables

63 equations

KET, FEL, ZČU 2017

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratek	9
1 Aktuální řešení elektroizolačních systémů elektrických točivých strojů	16
1.1 Elektroizolační systém Resin - Rich	17
1.2 Elektroizolační systém vakuově-tlakové impregnace.....	17
2 Ztráty v elektrických točivých strojích	20
2.1 Joulovy ztráty ve vinutí.....	21
2.2 Ztráty v železe	23
2.3 Mechanické ztráty	29
3 Chlazení elektrických točivých strojů	30
3.1 Způsoby chlazení točivých elektrických strojů.....	31
3.2 Porovnání chladicích médií	32
3.2.1 Chlazení vzduchem	32
3.2.2 Chlazení kapalinou.....	33
3.2.3 Chlazení pomocí vodíku, hélia, kapalného dusíku	33
3.2.4 Vliv tepelných vlastností materiálu na odvod ztrátového tepla	35
4 Cíle disertační práce.....	36
5 Ovlivnění tepelné bilance elektrických točivých strojů pomocí plniv s vyšším součinitelem tepelné vodivosti	37
5.1 Výroba vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3	37
5.2 Měření tepelných vlastností	40
5.2.1 Výroba zařízení na měření tepelných vlastností materiálů	41
5.2.2 Měření součinitele tepelné vodivosti	42
5.3 Měření elektrických vlastností.....	44
5.3.1 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě.....	44
5.3.2 Měření absorpčních a resorpčních proudů	47

5.3.3	Měření vnitřní rezistivity	50
5.3.4	Měření elektrické pevnosti	50
5.4	Měření mechanických vlastností	51
6	Ověření vlivů zvýšení součinitele tepelné vodivosti EIS při návrhu elektrického točivého stroje pomocí MKP.....	52
6.1	Analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě	53
6.1.1	Specifikace synchronního motoru.....	54
6.1.2	Výpočet oteplení budícího vinutí.....	56
6.1.3	Výpočet oteplení statorového vinutí (oteplení induktu)	62
6.2	Ověření analytického tepelného návrhu pomocí MKP	75
6.2.1	Okrajové podmínky v MKP.....	75
6.3	Výsledky modelování EIS	78
7	Přínosy disertační práce	86
8	Závěr.....	88
9	Citovaná literatura.....	90
	Publikační činnost autora	105
	Funkční vzorek.....	108
	Přílohy.....	109

Seznam symbolů a zkratek

$u(t)$	napětí	(kV/ μ s)
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
P_{mech}	mechanický výkon stroje	(W)
ΔP_{celk}	celkové ztráty	(W)
ΔP_{Cu}	Joulovy ztráty ve vinutí	(W)
ΔP_h	hysterezní ztráty v železe	(W)
ΔP_v	ztráty vířivými proudy v železe	(W)
ΔP_{vent}	ventilační a mechanické ztráty	(W)
ΔP_{mag}	ztráty vířivými proudy	(W)
ΔP_i	dielektrické ztráty	(W)
P_1	příkon stroje	(W)
η	účinnost stroje	(%)
Q	množství tepla	(J)
R	odpor vodiče	(Ω)
i	okamžitá hodnota proudu	(A)
t	doba průchodu proudu	(s)
I_{ef}	efektivní hodnota proudu	(A)
σ	proudová hustota	(A/m ²)
S	průřez vodiče	(m ²)
m	počet fází	(-)
R_1	odpor vodiče statoru	(Ω)
R_2	odpor vodiče rotoru	(Ω)
Φ_σ	střední siločáry rozptylového magnetického toku	(Wb)
Φ	střední siločáry hlavního magnetického toku	(Wb)
B	velikost magnetické indukce	(T)
B_{max}	maximální indukce	(T)
B_r	remanentní indukce	(T)
$\Delta p_{1,0}$	měrné ztráty magnetických plechů	(W)
f	kmitočet magnetování	(Hz)
β	koeficient charakterizující materiál	(-)

m_{Fe}	hmotnost magnetického obvodu	(kg)
$\Delta P_{přid}$	přídavné ztráty	(kW)
ΔP_{po}	povrchové ztráty	(kW)
D_l	vnitřní průměr statoru	(m)
α	koeficient pólového krytí	(-)
l_e	délka (statoru/rotoru) paketu	(m)
k_0	koeficient povrchových ztrát	(-)
Q	počet drážek induktu	(-)
n	otáčky	(ot/min)
t_{dl}	drážková rozteč	(m)
β	koeficient povrchových ztrát	(-)
B_δ	magnetická indukce vzduchové mezery	(T)
k_c	Carterův činitel	(-)
$\Delta P_{p1,2}$	povrchové ztráty v zubech	(W)
n	otáčky	(ot/min)
$B_{p1,2}$	velikost indukce nasycení v zubech	(T)
$m_{j1,2}$	hmotnost zubů (statoru/rotoru)	(kg)
ΔP_v	ztráty vířivými proudy v železe	(W)
U_{ef}	efektivní hodnota indukovaného napětí	(V)
R	elektrický odpor materiálu	(Ω)
A_m	koeficient mechanických ztrát	(-)
v	obvodová rychlost rotoru	($m \cdot s^{-1}$)
L_r	délka rotoru	(m)
$\tan \delta$	ztrátový činitel	(-)
ρ_v	vnitřní rezistivita	($\Omega \cdot m$)
E_p	elektrická pevnost	(kV/mm)
R_m	pevnost v tahu	(MPa)
σ	pevnost v ohybu	(MPa)
A_k	vrubová houževnatost	($kJ \cdot m^2$)
$\text{grad } T$	jednotkový teplotní gradient (1K)	($K \cdot m^{-1}$)
T	teplota	(K)
q_v	tepelný tok uvolněný vnitřními zdroji	($W \cdot m^{-2}$)
ρ	hustota	($kg \cdot m^{-3}$)

t	čas	(s)
a	součinitel teplotní vodivosti	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
c_p	měrná tepelná kapacita	($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
g	tíhové zrychlení	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
α_{konv}	součinitel přestupu tepla	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
c_v	objemové měrné teplo vzduchu	($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)
ρ	hustota	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
β	teplotní objemová roztažnost	(K^{-1})
ν	kinematická viskozita	($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$)
η	dynamická viskozita média	($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)
v	charakteristickou rychlost	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
l	charakteristický délkový rozměr	(m)
P	celkové množství energie (zářivý tok)	(W)
S	povrch pevné látky (plocha)	(m^2)
E	intenzita vyzařování	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
I_φ	směrová intenzita vyzařování	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
$d\omega$	elementární prostorový úhel	(sr)
dE_φ	intenzita vyzařování v určitém směru	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
φ	úhel	(rad)
L_φ	plošná zářivost	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
$q_{sáláním}$	hustota tepelného toku sáláním (zářením)	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
ε	poměrná emisivita materiálu	(-)
C	Stefan-Boltzmanova konstanta	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
$T_{sáláním}$	absolutní teplota sálajícího povrchu	(K)
T_o	absolutní teplota okolí (vzdáleného)	(K)
S	zdánlivý výkon	(MVA)
P	činný výkon	(kW)
n	otáčky	(ot/min)
m	počet fází	(-)
U_s	sdržené napětí	(V)
U_f	fázové napětí	(V)
$\cos\varphi$	účinník	(-)
f	frekvence	(Hz)
p	počet pólů	(-)

Q	počet drážek statoru	(-)
I_I	proud statoru (fázový proud)	(A)
A	proudová obvodová hustota	(A·m ⁻¹)
α_k	součinitel přestupu tepla poddrážkového kanálu do chladícího vzduchu	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
v_k	rychlost vzduchu v poddrážkovém kanálu	(m·s ⁻²)
d_{hk}	hydraulický průměr kanálu	(m)
α_o	součinitel přestupu tepla proražených otvorů do chladícího vzduchu	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
v_o	rychlost vzduchu v proražených otvorech	(m·s ⁻²)
d_{ho}	hydraulický průměr otvorů	(m)
a_δ	součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
z	pomocný součinitel	(-)
d_{hax}	uvažovaný hydraulický průměr vzduchové mezery	(m)
R_I	tepelný odpor z vodiče přes izolaci do zubu rotoru	(K·W ⁻¹)
d_{iz}	tloušťka izolace	(m)
d_{vz}	vzduchová mezera mezi izolací a zubem rotoru	(m)
l_I	vzdálenost tepelného uzlu od izolace do zubu rotoru	(m)
S_{iz}	plocha styku vodiče s izolací následně s rotorem	(m ²)
λ_{iz}	součinitel tepelné vodivosti izolace	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{vz}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{Fe}	součinitel tepelné vodivosti rotoru	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
R_2	tepelný odpor ze zubu rotoru do vzduchové mezery	(K·W ⁻¹)
l_2	vzdálenost tepelného uzlu od povrchu rotoru	(m)
l_r	délka rotoru	(m)
S_2	plocha (tepelný tok z uzlu k povrchu rotoru)	(m ²)
S_s	plocha součtem povrchu zubu a povrchu klínu	(m ²)
α_δ	součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
R_3	tepelný odpor ze zubu rotoru do poddrážkového kanálu	(K·W ⁻¹)
l_3	vzdálenost od uzlu ke stěně poddrážkového kanálu	(m)
l_r	délka rotoru	(m)
S_3	plocha od uzlu ke stěně poddrážkového kanálu	(m ²)
d_{hk}	hydraulický průměr kanálu	(m)
α_k	součinitel přestupu tepla z poddrážkového kanálu	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

R_4	tepelný odpor z mědi do proražených otvorů	$(K \cdot W^{-1})$
l_r	délka rotoru	(m)
S_4	plocha stěn proražených otvorů	(m^2)
α_o	součinitel přestupu tepla povrchu otvorů	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
$\Delta \vartheta_{rv}$	střední oteplení rotorového vinutí	(K)
$\Delta P_{Cu/lr/dr}$	ztráty na drážky a délky rotoru	(W)
$R_{výsl}$	výsledný tepelný odpor	$(K \cdot W^{-1})$
R_{123}	součet tepelných odporů R_1 a R_{23}	$(K \cdot W^{-1})$
R_{23}	Paralelní kombinace tepelných odporů R_2 a R_3	$(K \cdot W^{-1})$
$\Delta \vartheta_{rv}$	střední oteplení rotorového vinutí	(K)
$\Delta P_{Cu/lr/dr}$	ztráty na drážky a délky rotoru	(W)
T_{rv}	střední teplota rotorového vinutí	(°C)
R_1	tepelný odpor z vinutí do ventilačního kanálu	$(K \cdot W^{-1})$
R_2	tepelný odpor z mědi do vzduchové mezery	$(K \cdot W^{-1})$
R_3	tepelný odpor z mědi do zubu	$(K \cdot W^{-1})$
R_4	tepelný odpor ze vzduchu do vzduchové mezery	$(K \cdot W^{-1})$
R_5	tepelný odpor ze zubu do ventilační štěrbin	$(K \cdot W^{-1})$
R_6	tepelný odpor z plechů zubu do plechů jha	$(K \cdot W^{-1})$
R_7	tepelný odpor z plechů jha do ventilačního kanálu	$(K \cdot W^{-1})$
R_8	tepelný odpor z plechů jha na vnější obvod	$(K \cdot W^{-1})$
$R_{\check{c}}$	tepelný odpor z čel vinutí do vzduchu	$(K \cdot W^{-1})$
T_0	teplota okolí	(K)
$\Delta \vartheta_1$	oteplení na začátku chladicího kanálu	(K)
$\Delta \vartheta_2$	oteplení na začátku paketu	(K)
$\Delta \vartheta_3$	oteplení na konci chladicího kanálu	(K)
$\Delta \vartheta_4$	oteplení na konci paketu	(K)
$\Delta \vartheta_{o\check{c}}$	oteplení čela	(K)
ΔP_{Fej}	ztráty ve jhu	(W)
ΔP_{Fez}	ztráty v zubu	(W)
ΔP_{Cud}	Joulové ztráty ve vinutí	(W)
$\Delta P_{\check{c}}$	Joulové ztráty v čelech vinutí	(W)
EP	epoxidová pryskyřice	
PET	polyetyléntereftalát	
PEN	polyetylénnafthalát	
PTFE	polytetrafluorethylen	

Al_2O_3	oxid hlinitý
SiO_2	oxid křemičitý
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
EIS	elektroizolační systém
SW	software Finite Element Method Magnetics
EMM	
MKP	Metoda Konečných Prvků
Gr	Grashofovo kritérium
Nu	Nusseltovo kritérium
Pr	Prandtlovo kritérium
Pe	Pécletovo kritérium
Re	Reynoldsovo kritérium
St	Stantonovo kritérium

Úvod

Zvýšení účinnosti elektrických točivých strojů je dlouhodobým trendem v oblastech jejich dalšího vývoje. Účinnost závisí na velikosti vzniknuvších ztrát, kde ztráty samozřejmě představují vznik ztrátového tepla. Výpočet oteplení jednotlivých částí elektrických točivých strojů při různých provozních stavech je nedílnou součástí jejich návrhu. Účelem tepelného návrhu je zjištění, zda při provozu stroje nestoupne teplota některé z jeho částí nad dovolenou hodnotu. Teplotu je možno měřit, avšak v některých případech je nezbytné teplotní pole modelovat např. pomocí metody konečných prvků (MKP).

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. 300 MVA (BRUSH SEM s.r.o.), avšak na rozdíl od předchozích typů s relativně jednoduchým vzduchovým chlazením. Proto na elektroizolační systémy těchto strojů jsou kladeny vysoké požadavky na teplotní odolnost. Dále se požaduje, aby byla jejich konstrukce a výroba co nejjednodušší a aby vykazovaly vysokou provozní spolehlivost. Svou roli hrají i velikost stroje, způsoby dopravy a cena. Právě nízká pořizovací cena a nízké provozní náklady jsou důvodem tohoto trendu. Z výše popsanych důvodů je tato práce zaměřena na problematiku elektrických točivých strojů.

Vzhledem k povaze tématu, kterým se tato práce zabývá, je rozdělena do samostatných kapitol. V první úvodní kapitole je pozornost zaměřena na stručný popis elektrických točivých strojů a aktuální řešení (EIS) elektrických točivých strojů. Druhá kapitola popisuje ztráty v elektrických strojích, jejich vznik a možnou eliminaci. Třetí kapitola je zaměřena na chlazení točivých elektrických strojů. Jsou zde uvedeny různé způsoby chlazení a je provedena analýza různých chladicích médií. V čtvrté kapitole jsou uvedeny cíle disertační práce. V následující kapitole jsou popsány možnosti ovlivnění tepelné bilance elektrických točivých strojů pomocí plniv s vyšším součinitelem tepelné vodivosti a také popsán experiment, kdy je zkoumána jedna z variant jak ovlivnit odvod ztrátového tepla stroje pomocí zvýšení teplotní vodivosti elektroizolačního systému prostřednictvím oxidu hlinitého s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti. V závěru byl konfrontován analytický tepelný návrh turbogenerátoru chlazeného vzduchem s dvěma axiálními ventilátory sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy MKP a měřením.

1 Aktuální řešení elektroizolačních systémů elektrických točivých strojů

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

Elektroizolační systémy stejnosměrných a synchronních strojů jsou za normálních provozních podmínek zatíženy konstantně (elektrické namáhání konstantní), jinak je to při poruchových stavech. Asynchronní stroje, které jsou napájené z měniče frekvence, tvoří s polovodičovými měniči systém, ve kterém se většina fyzikálních dějů odehrává za jiných podmínek (proměnné elektrické namáhání), než u samotného stroje napájeného ze sítě. Při procesu přeměny energie objevují se nové děje svázané s vysokými spínacími frekvencemi a vysokými strmostmi veličin (např. napětí ($u(t)$) až 10 kV/ μ s [1]), dále děje, které byly konstrukčními úpravami v průběhu vývoje omezené, mohou být těmito frekvencemi znovu posíleny a ve velké míře mohou ovlivnit elektromagnetické a elektrostatické děje nejen v elektroizolačních systémech. Vlivem polovodičových měničů na elektroizolační systémy asynchronních motorů se zabývá [1], [2], [3], [4].

Při mechanickém namáhání elektroizolačních systémů, může se jednat o vibrace, pnutí vlivem tepelné roztažnosti materiálu nebo dynamické namáhání (např. přechodný děj, zkrat) [5], [6], [7].

Tepelné vlastnosti elektroizolačních materiálů elektrických točivých strojů jsou důležité s ohledem na jejich změny při zpracování (např. doba vytvrzování) a také, zejména, na jejich změny v provozních podmínkách (např. aktuální zatížení), kdy se v závislosti na teplotě mohou měnit vlastnosti fyzikální i chemické, což může vést až ke strukturálním změnám. Teplota při bezporuchovém provozu elektrických točivých strojů nemůže překračovat teplotní třídu elektroizolačních materiálů dle ČSN EN 60085 ED. 2 (330250), kde je uvedena mezní či hraniční teplota, při níž izolace bez porušení plní svou funkci po dobu své plánované nebo požadované doby života (viz Příloha I).

Elektroizolační systémy mohou být tvořeny izolací vodičů (provedení zakódováno do písemných symbolů [6]), vyložení drážky drážkovou izolací [8], [9], [10] a impregnanem [6], [11]. Dále, elektroizolační systémy točivých elektrických strojů mohou být provedeny technologií Resin – Rich (BRUSH SEM s.r.o.) a

technologii vakuově tlakové impregnace ((angl. VPI - Vacuum Pressure Impregnation) ŠKODA ELECTRIC a.s.). Obě techniky využívají izolační materiál, který je tvořen třísložkovým izolačním systémem (nosná složka, izolační bariéra, pojivo) [6], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Obecně elektroizolační systémy elektrických točivých strojů jsou složeny ze slídy, epoxidové pryskyřice (případně polyesterová pryskyřice nebo silikonová pryskyřice) a skleněné tkaniny nebo jiných materiálů (jako např. polyesterové fólie). Materiály, které jsou nejčastěji používané k výrobě z elektroizolačních systémů (např. slída $\lambda = 0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ až $\lambda = 0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$, epoxidová pryskyřice $\lambda = 0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$, skleněná vlákna $\lambda = 0,8 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$), mají relativně nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti [18], [19], [20] (součinitel tepelné vodivosti a způsoby šíření tepla jsou popsány v Příloze II).

1.1 Elektroizolační systém Resin - Rich

Při výrobě izolačního systému Resin – Rich nosnou složku tvoří skleněná tkanina, nebo mohou být použity i jiné materiály, jako jsou např. aramidová vlákna nebo fólie, polyetyléntereftalát (PET) nebo polyetylénaftalát (PEN). Dielektrickou bariérou je nejčastěji slídový papír. Ten se používá ve dvou formách – kalcinovaný a nekalcinovaný. Obě formy mají za jistých okolností mírně odlišné vlastnosti [6], [21]. Izolační bariéra může být tvořena i jiným materiálem, například Kaptonem, (polyimid, který vznikne bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu a aromatického diaminu [6], [9]). Jako pojivo se používají různé syntetické pryskyřice, např. reaktoplastické bezrozpouštědlové novolakové nebo cykloalifatické epoxidové, polyuretanové, polyesterové či silikonové. Výchozí elektroizolační předimpregnovaný materiál (částečně předtvrzený materiál v „B“ stavu) se dodává jako polotovar. Jeho zpracováním se na vinutí elektrického stroje vytvoří izolační vrstva, která bude mít požadovanou tloušťku. Takto připravená část vinutí klade se přímo do drážek elektrického stroje. Po pospojování připravených částí vinutí a dohotovení čel může vinutí plnit svoji funkci.

1.2 Elektroizolační systém vakuově-tlakové impregnace

Technologie vakuově tlakové impregnace může být rozdělena na dva druhy Global VPI (jedná se o celkovou impregnaci statoru) a Individual VPI (vytvřují

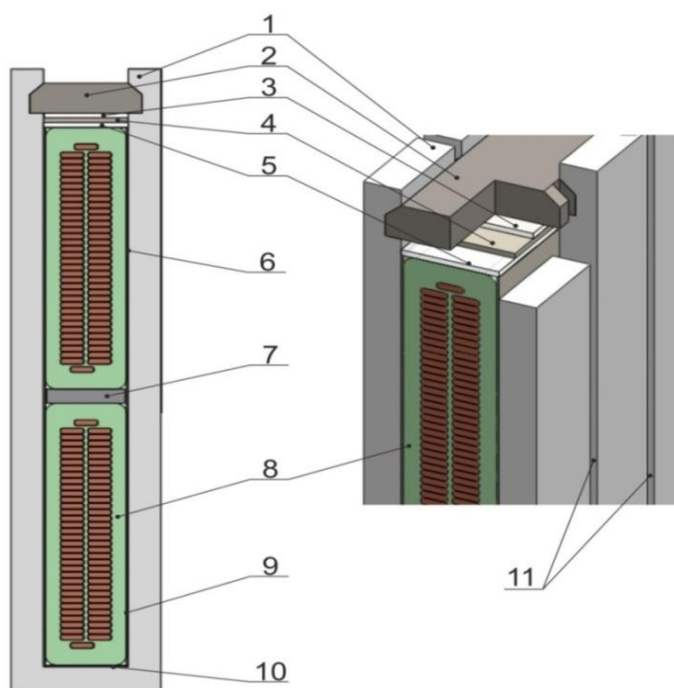
jednotlivé tyče zvlášť) [11], [21], [22]. Při výrobě izolačního systému VPI základem je páska z nekalcinované slídy (izolační bariéra), která je díky větším částicím (velikost částic od 0,04 mm do 2 mm [6], [23]) a větší pórovitosti (až 50 % objemu jsou malé póry [24]) více nasákavá. Nosnou část tvoří bavlněná nebo skleněná tkanina, případně i plastová nebo polyamidová fólie. Jako pojivo mohou být použity bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice. Tyč vinutí se po nanesení izolační pásky vloží do pece, kde se vysuší. Následně se uloží do vakuově tlakového impregnačního zařízení. V další fázi se po dosažení vakua VPI zařízení zaplaví impregnační pryskyřicí. Vinutí ve VPI zařízení ode dna zaplaví impregnantem a po zrušení vakua přetlakem dosáhne dokonalého prostoupení impregnantu izolační páskou. Dobu impregnace a velikost tlaku ovlivňují faktory závislé na nasákavosti, tloušťce a počtu vrstev izolační pásky a také na druhu pryskyřice. Zbytky impregnantu jsou pak odčerpány zpět do zásobníků a ochlazeny na skladovací teplotu. Konečnou fází impregnace je vytvrzení při případném kontinuálním otáčení tak, aby impregnant nevytekl.

Výhoda VPI technologie je zřejmá, při celkové impregnaci statoru je zaručena homogenita, která nemá v porovnání s ostatními technologiemi konkurenci. Protože technologie VPI zaručují vysoký stupeň prosycení kompozitu pojivem, a tak uvnitř elektroizolačního systému je značně omezena vnitřní výbojová činnost, která může způsobit degradaci izolačního materiálu. Dnes jsou technologické procesy Resin – Rich a VPI velmi dobře zvládnuté, ale výbojovou činností je vhodné za provozu elektrického točivého stroje monitorovat [6], [25], [26]. Dále VPI zajišťuje kromě celkového zpevnění i ochranu proti vibracím a vlhkosti. Mezi nevýhody technologie VPI může být považována nemožnost opravy jednotlivých tyčí vinutí bez poškození a v případě VPI zařízení pro velké stroje i počáteční velká finanční investice.

Prvním krokem při montáži statorového vinutí synchronního stroje (Obr. 1, Obr. 26) je založení páskové výplně (vločky) na dno drážky, která pomáhá vyrovnávat např. nerovnosti vzniklé při výrobě magnetického obvodu nebo statorového vinutí. Jako materiál vločky se používá např. „polovodivá“ hmota na bázi silikonu [11], [27]. Potom následuje vkládání vinutí opatřeného hlavní izolací (elektroizolačním systémem) do drážky. Důležité je zabránit vzniku tlaku, který by vedl k poškození elektroizolačního systému, proto mezi stěnu drážky a tyč se vkládá drážková izolace např. NE a NEN, která se vyrábí spojením polyesterové folie a polyesterové rohože polyesterovým lepidlem (tepelné třídy F) [28]. Na drážkovou izolaci jsou kladeny

vysoké požadavky z hlediska elektrických, mechanických, tepelných i chemických vlastností. Po osazení dolních tyčí následuje mezipolohová izolace např. sklotextitová vložka, potom se založí vrchní poloha tyčí a drážka se vyplní sklolaminátovým vlnovcem [29]. Poslední operací je zasunutí sklolaminátového klínu [11], [29].

Na Obr. 1 je principiální schéma statorové drážky synchronního stroje, kde lze vidět tyč synchronního stroje, která může být vyrobena VPI technologií nebo technologií Resin – Rich (BRUSH SEM s.r.o.).



1 – svazek plechů; 2 – drážkový klín; 3 – přítlačný díl; 4 – drážkové péro; 5 – přítlačný pásek;
6 – boční vložky; 7 - mezivložka; 8 – elektroizolační systém; 9 – páskové výplně; 10 – pásková výplň na
dno drážky; 11 – radiální kanály statoru;

Obr. 1 Principiální schéma průřezu drážkou statoru synchronního stroje

Velmi důležitým parametrem, který má být pozorován za provozu elektrického točivého stroje je provozní teplota [6], [30], [31], [32], [33]. Z důvodu teplotní degradace elektroizolačního materiálu může docházet k delaminaci (vznik mezer mezi jednotlivými vrstvami izolace, pokles mechanické pevnosti) [34] [35] [36]). Za standardních provozních podmínek, časem a s působením teploty, se mohou měnit vlastnosti pojiva, protože slídový papír a skleněná tkanina mají vysokou tepelnou

odolnost [34], [35] [37]. Monitorování teploty má velký význam z důvodu znalosti aktuálního stavu elektrického stroje, také z důvodu, že jevy spojené se stárnutím způsobují přídatné ztráty, což se projevuje zvýšením teploty.

2 Ztráty v elektrických točivých strojích

Energie (příkon P_I) dodaná do elektrického točivého stroje se v něm přeměňuje na mechanický P_{mech} výkon, při této přeměně však vznikají i ztráty. Vzniklé ztrátové teplo je nutno odvádět, aby nedošlo k poruchovému stavu nebo k trvalému poškození elektrického stroje. Z tohoto důvodu je velmi důležité mít přehled o tom, jaké ztráty a kde v určitém elektrickém točivém stroji vznikají. Ztrát vznikajících při činnosti elektrického stroje je více a mohou být zejména tvořeny:

- Joulovými ztrátami (ΔP_{Cu}), které vznikají při činnosti elektrického stroje ve vodičích uložených v drážkách na rotoru a statoru a dalších vodivých částech stroje (nazývané elektrické),
- magnetickými ztrátami (ΔP_{Fe}) ve feromagnetických částech stroje, nacházejících se ve střídavém magnetickém poli (hysterezní a ztráty vířivými proudy),
- dielektrickými ztrátami (ΔP_i) v elektroizolačních materiálech, nacházejících se ve střídavém elektrickém poli,
- mechanickými ztrátami (ΔP_m) např. způsobené třením v ložiskách, třením o vzduch, třením na kartáčích nebo kroužcích a
- ventilačními ztrátami (ΔP_{vent}).

Ztráty v elektrických točivých strojích se mění se změnou zatížení a podle toho mohou být dále rozděleny na ztráty, které se při změně zatížení mění úměrně kvadrátu zatěžovacího proudu I^2 (A) (např. Joulovy ztráty ve vinutí) dále na ztráty, které proudu I (A) přímo úměrné (např. ztráty třením ve sběrném ústrojí a část budicích ztrát) a ztráty, které se zatížením mění minimálně při bezporuchovém provozu, konstantním napětí a otáčkách stroje (např. ztráty v železe, dielektrické, mechanické).

Při návrhu elektrických točivých strojů se ke zmíněným ztrátám mohou přidat také např. ztráty v budiči, v regulačních odporech, ve ventilátorech, vodních, případně olejových čerpadlech.

Některé ztráty v elektrických točivých strojích při výpočtu nebo při měření nemohou být určeny přesně, proto jsou zanedbávány (tvoří jen malé procento

celkových ztrát) nebo mohou být připočítány k vypočteným (naměřeným) ztrátám. Tyto ztráty se obecně nazývají ztrátami přídavnými. Jedná se např. o vyjádření rozptylových toků, vířivých proudů v elektrických vodičích vinutí apod. Hodnoty přídavných ztrát podle druhu strojů můžeme najít v odpovídajících normách (např. ČSN EN 60 034-2 (35 0000), ČSN 350301 350301)).

Pro výpočet celkových ztrát může být použit zjednodušený vztah [4], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48]:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_{vent} + \Delta P_i \quad (1)$$

kde:

ΔP_{celk}	celkové ztráty	(W)
ΔP_{Cu}	Joulovy ztráty ve vinutí	(W)
ΔP_h	hysterezní ztráty v železe	(W)
ΔP_v	ztráty vířivými proudy	(W)
ΔP_{vent}	ventilační ztráty	(W)
ΔP_i	dielektrické ztráty	(W)

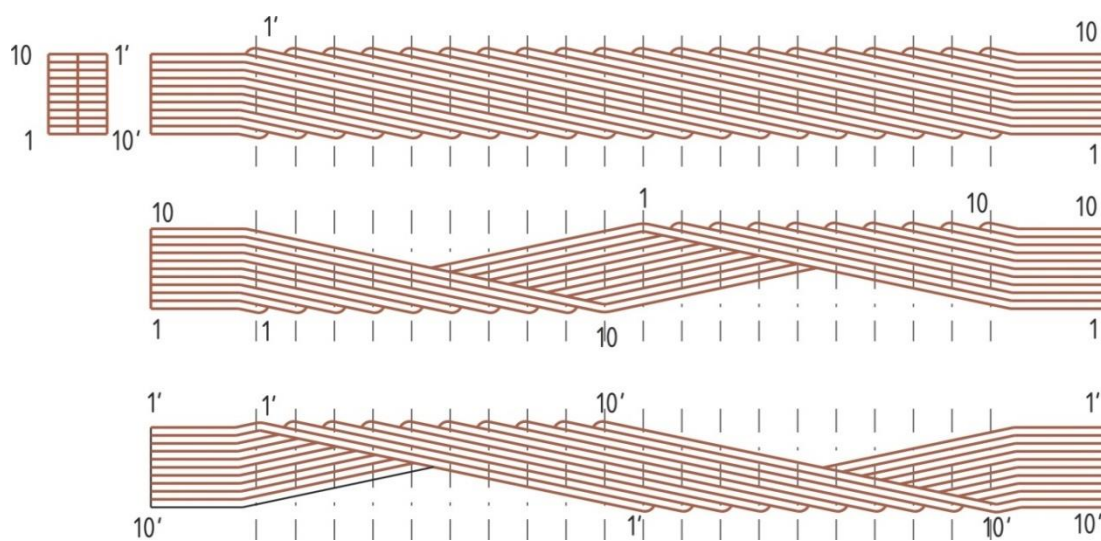
2.1 Joulovy ztráty ve vinutí

Točivé stroje velkých výkonů řadově stovek MVA téměř bez výjimek pracují s permutovaným tyčovým vinutím. Permutované tyčové vinutí je tyč skládající se z několika vodičů malého průřezu, které jsou vzájemně izolované, a každý dílčí vodič projde všemi polohami výšky, což lze pozorovat na Obr. 2. Použitím vodičů malého průřezu místo masivních lze také zmenšit ztráty vířivými proudy a zabránit se tak vzniku vyrovnávacích proudů (všechny vodiče rovnoměrně zatíženy magnetickým tokem) [39], [40], [42], [43], [44], [46], [47], [48], [49]. Nejrozšířenější mezi permutovaným tyčovým vinutím je Reobelova transpozice (Obr. 2). Způsobů provedení permutovaných tyčových vinutí je mnoho a mohou se lišit mírou kompenzace magnetických polí způsobujících ztráty [11], [38], [39], [40], [46].

Při průchodu proudu vinutím vznikají ztráty Joulovy, které jsou dány odporem vinutí. U vinutí je důležitý i tvar jednotlivých cívek. Čela cívky leží mimo magnetický obvod, neindukuje se do nich proto napětí a pouze spojují dvě aktivní strany cívky. V čelech vznikají ztráty (oteplují se), které vedou ke snížení účinnosti stroje. Kromě toho se zvětšuje hmotnost mědi, narůstá délka stroje, což vede k nárůstu ceny stroje. Proto při návrhu strojů je kladen důraz, aby byla délka čel minimální při dodržení minimální

a pokud možno konstantní vzdálenosti mezi nimi a to jak z důvodu izolačních, tak i ventilačních [11], [38], [39], [40], [42], [46], [48], [50], [51]. Z toho důvodu se používá evolventní tvar čel vinutí.

Ve vinutí kromě Joulových ztrát (stoupají asi o 0,4 % [42] na každý stupeň oteplení) vznikají také ztráty vířivými proudy. Při výpočtu odporu vinutí do empirického vzorce je dosazován Emdeho činitel [48], který respektuje ztráty vznikající ve vinutí vířivými proudy indukovanými rozptylovými magnetickými toky.



Obr. 2 Schematické zobrazení provedení Reobelovy tyče

Vířivé proudy se sčítají se střídavým proudem, což vede k nerovnoměrnému rozdělení proudové hustoty ve vodičích. Ztráty vířivými proudy mohou vzniknout také v železných konstrukcích, do kterých se indukují rozptylové magnetické toky, tyto ztráty nelze přesně určit, proto při výpočtech je uvažována větší hodnota Emdeho činitelů. Oba druhy ztrát mohou dosáhnout velmi velkých hodnot, proto se některé vodiče dělí na dva nebo tři paralelní odstavce nad sebou (Permutovaná tyčová vinutí (Obr. 2)). Následkem vzrůstu měrného odporu vodiče přídavné ztráty klesají s oteplením, proto rozdělení proudu po průřezu daného vodiče je rovnoměrnější. Hodnoty oteplení vinutí mohou být závislé na způsobu chlazení, druhu chladiva a metodice měření [6], [30], [31], [32], [33]. Korekci hodnot oteplení je nutno provést s ohledem na pracovní podmínky motoru (teplota okolí nad 40 °C, nadmořská výška nad 1000 m [11], [52], [53] (viz Příloha IX)). Velikost Joulových ztrát bývá podle výkonu stroje v rozmezí od 1,6% až do 8% [42] celkového výkonu. Přeměna

elektrické energie v teplo je dána Joulovým zákonem, podle kterého je možné určit množství tepla Q [39], [41], [42], [43], [44], [46], [51], [54]:

$$Q = R \int_0^t i^2 dt \quad (2)$$

kde:

Q	teplo	(J)
R	odpor vodiče	(Ω)
i	okamžitá hodnota proudu	(A)
t	doba průchodu proudu	(s)

Joulovy ztráty lze určit z vztahu [38], [39], [40], [42], [43], [44], [48], [55]:

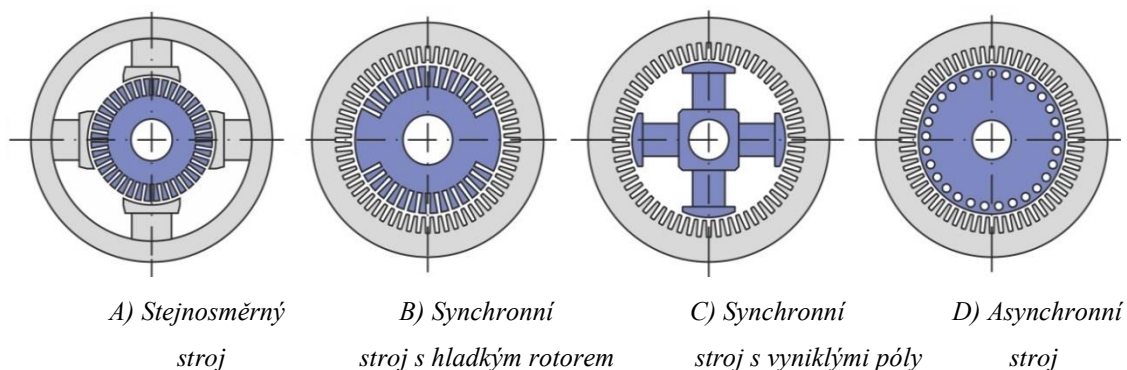
$$\Delta P_{Cu} = m \cdot (R_1 + R_2) \cdot I_{ef}^2 \quad (3)$$

kde:

ΔP_{Cu}	Joulovy ztráty ve vinutí	(W)
m	počet fází	(-)
R_1, R_2	odpor vodiče (stator/rotor)	(Ω)
I_{ef}	efektivní hodnota proudu	(A)

2.2 Ztráty v železe

Magnetický obvod je tvořen vzduchovou mezerou a železem (magnetická ocel) s přídavkem křemíku (vysoký elektrický odpor, nízké hysterezní ztráty i ztráty vířivými proudy) [38], [41], [46], [48], [49]. Na následujícím Obr. 3 jsou znázorněny magnetické obvody stejnosměrného, synchronního (s hladkým rotorem a s vyniklými póly) a asynchronního stroje.



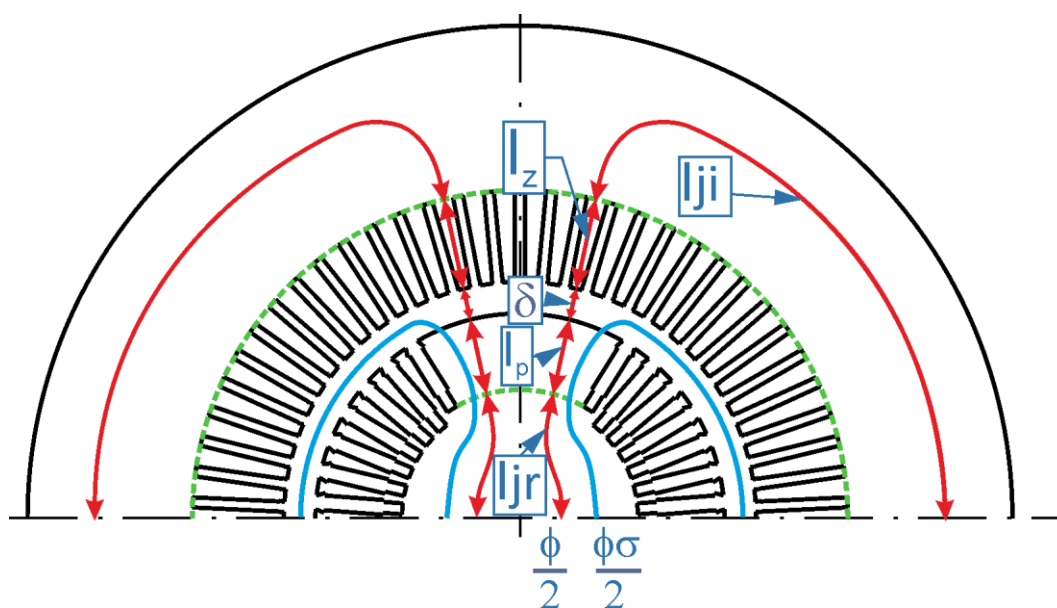
Obr. 3 Schematické zobrazení magnetických obvodů elektrických točivých strojů

Magnetické obvody stejnosměrných a synchronních strojů s konstantním magnetickým tokem mohou být buzeny permanentními magnety. Synchronní stroje s permanentními magnety jsou principiálně stejné jako klasické synchronní stroje. Rozdílem mezi klasickými synchronními stroji a synchronními stroji s permanentními magnety je buzení (permanentní magnety vytvářejí své vlastní, konstantní magnetické pole). Synchronní stroj s permanentními magnety nepotřebuje stejnosměrné buzení, proto není potřeba přivádět přes kluzné kontakty (kroužky) buzení do rotoru, což vede ke zmenšení ztrát. Za nevýhody můžeme považovat to, že odpadá možnost regulace buzení. Existují různé stroje s permanentními magnety a každý typ stroje má své specifické vlastnosti [41], [46], [56], [57].

U stejnosměrného stroje prochází póly a statorem stejnosměrný tok, jinak je to u střídavých strojů. Rotor synchronního stroje může být tvořen hřídelí, magnetickým jhem, póly s budícím vinutím, tlumičem a kroužky pro přívod budícího proudu a ventilátorem (pokud se nejedná o přirozenou ventilaci stroje). Magnetické jho synchronního stroje je aktivní částí stroje, protéká jím stejnosměrný magnetický tok a může být masivní, zatímco část elektrického stroje, kde se indukují elektrické napětí (statorový plechový svazek a drážky) musí být vždy lištěný. Rotor turboalternátoru je odlišný od rotoru synchronních strojů s vyniklými póly, vykováný z kvalitní chromniklové oceli s dalšími přísadami (např. molybden, vanad), vyznačuje se dobrými magnetickými vlastnostmi a vysokou mechanickou pevností [46]. Rotor synchronního stroje někdy z důvodů konstrukčních nebo technologických může být vyroben jako lištěný [46], [48]. U asynchronních strojů, např. s klecí nakrátko, magnetický tok vychází ze statorových zubů (stažený plechový svazek) přes vzduchovou mezeru do rotorových zubů (stažený plechový svazek), potom přes rotorové zuby znovu do vzduchové mezery a uzavře se přes statorové zuby. Tento tok se nazývá hlavním magnetickým tokem. Póly a jhem prochází kromě hlavního toku ještě tok rozptylový (Obr. 4).

Při průchodu střídavého toku vznikají v železe ztráty a ty je nutno omezit (při průchodu stejnosměrného toku ztráty magnetováním nevznikají). Střídavým magnetováním vznikají ztráty, způsobené natáčením magnetických dipólů uvnitř materiálů, které se mění v magnetických obvodech na teplo [6], [41], [49]. Jejich velikost se udává ztrátovým číslem, které udává celkové ztráty v železe při kmitočtu 50 Hz [41], [46]. Materiál s malým ztrátovým číslem má malou mechanickou pevnost a naopak. Velikost ztrát v železe závisí na magnetickém využití stroje a obvykle se

pohybuje 1% až 3% jmenovitého výkonu [42].



Obr. 4 Schématické zobrazení středních siločár hlavního Φ a rozptylového magnetického toku Φ_{σ} v synchronním stroji

V souvislosti s ději probíhajícími při střídavé magnetizaci v materiálu je možné ztráty v železe rozdělit na tři složky a to na ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy a ztráty přídavné.

2.2.1 Hysterezní ztráty

Železo se magnetizuje podle magnetizační křivky (hysterezní smyčka) od nulové indukce do největší indukci (B_{max}). Při odmagnetování na remanentní indukci (B_r) se do sítě vrátí energie daná určitou plochou a ztráty za celý kmit jsou dané plochou hysterezní smyčky, proto jsou úměrné kmitočtu [48]. Proto pro vyjádření závislosti hysterezních ztrát na indukci se používá Steinmetzův empirický exponent [48], [58], [59]. Hysterezní ztráty v elektrických strojích vznikají jako důsledek magnetické hystereze při magnetování feromagnetika a závisí na ploše hysterezní smyčky, velikosti frekvence a kvadrátu magnetické indukce. Hysterezní ztráty je možné určit podle vztahu [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [46], [48], [49], [55]:

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot (k_d \cdot B^2 \cdot m_{Fe}) \quad (4)$$

kde:

ΔP_{Feh}	hysterezní ztráty v železe	(W)
$\Delta p_{1,0}$	měrné ztráty použitého železa	(W)
f	kmítočet magnetování	(Hz)
β	koeficient charakterizující materiál	(-)
k_d	koeficient zohledňující nehomogenní tok	(-)
B^2	velikost magnetické indukce	(T)
m_{Fe}	hmotnost magnetického obvodu	(kg)

2.2.2 Přídavné ztráty

Při výpočtech nebo při měření jednotlivých ztrát se zavádí přídavné ztráty $\Delta P_{přid}$ (kW). Tyto ztráty se připočítávají k vypočteným a naměřeným ztrátám. Přídavné ztráty mohou být vyvolány např. rozptylovými magnetickými toky nebo toky vyšších harmonických [1], [2], [3]. Přídavné ztráty mohou být odhadnuty jako 0,3 % zdánlivého výkonu [51].

2.2.3 Ztráty vířivými proudy

Ztráty vířivými proudy vznikají jako důsledek elektrické vodivosti feromagnetických materiálů a jsou způsobeny indukovaním napětí v materiálu. V jednotlivých částech elektrického zařízení (např. magnetický obvod statoru, pólové nástavce, kostra, štíty, zuby statoru nebo rotoru) se tvoří smyčky, ve kterých se indukuje napětí úměrné časové změně toku, který jimi prochází. Ztráty vířivými proudy vznikající v magnetickém obvodu, mohou být omezené zvýšením elektrického odporu materiálu. Toho lze docílit např. přidáním křemíku (materiál se zvýšenou rezistivitou) a prodloužením dráhy vířivým proudům se současným zmenšením průřezu (složení magnetického obvodů z tenkých plechů, navzájem izolovaných). Vinutí může být uloženo v drážkách otevřených a musí být zajištěno drážkovými klíny, které musí být nekovové (např. pertinax, texgumoid, sklotextit [9], [12], [46]), aby se do nich neindukovalo elektrické napětí a nevznikala klec nakrátko. Otevřené drážky jsou velmi výhodné, protože umožňují vkládat do drážky předem vytvarované a vytvrzené cívky. Mezi nevýhody otevřených drážek patří např. to, že se musí počítat

s vlivem drážkové harmonické na průběh magnetické indukce a na velikost vířivých proudů. Proto, u strojů menších rozměrů a tam, kde je malá vzduchová mezera (např. asynchronní), jsou používané drážky polouzavřené a vinutí se musí do drážek zakládat po vodičích a následně v drážce se cívka formuje.

Při otáčení rotoru s vyniklými póly (např. synchronní stroj) vznikají vlivem drážkování změny magnetického toku, tyto změny vyvolávají v pólových nástavcích také vířivé proudy. Vířivé proudy v pólových nástavcích neproniknou hlouběji do pólu, ale uzavírají v tenké vrstvě na jeho povrchu, proto mohou být nazývané povrchové ΔP_{po} (kW) [48] (povrch železného jádra a vzduchová mezera (5)).

$$\Delta P_{po} = \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot l_e \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (t_{dl} \cdot \beta \cdot B_\delta \cdot k_c \cdot 1000)^2 \quad (5)$$

kde:

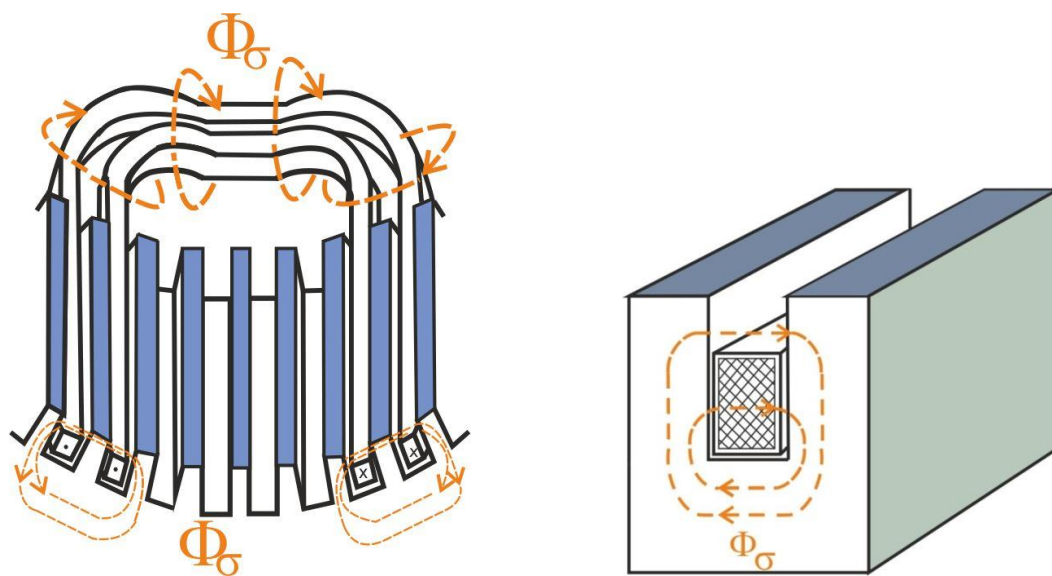
D_1	vnitřní průměr statoru	(m)
α	koeficient pólového krytí	(-)
l_e	délka (statoru/rotoru) paketu	(m)
k_0	koeficient povrchových ztrát	(-)
Q	počet drážek induktu	(-)
n	otáčky	(ot/min)
t_{dl}	drážková rozteč	(m)
β	koeficient povrchových ztrát	(-)
B_δ	magnetická indukce	(T)
k_c	Cartérův činitel	(-)

Povrchové ztráty lze omezit např. zvýšením elektrického odporu materiálu (např. ocel, litina, železo) nebo výrobou pólového nástavce z plechů. Střídavým střídáním zubu a drážek statoru pod pólem (např. synchronní stroj) to střídavě zvětšuje a zmenšuje magnetické pole, což vede k indukovaní vířivých proudů. U asynchronního stroje v povrchu plechů statoru a rotoru při otáčení vznikají také povrchové ztráty, protože v drážce je menší indukce než v zubu (ztráty v zubech v důsledku pulzujícího magnetického toku):

$$\Delta P_{p1,2} \approx 0.11 \cdot \left(\frac{Q_{1,2} \cdot n}{1000} \cdot B_{p1,2} \right)^2 \cdot m_{j1,2} \quad (6)$$

kde:

$\Delta P_{p1,2}$	povrchové ztráty v zubech	(W)
Q	počet drážek	(-)
n	otáčky	(ot/min)
$B_{p1,2}$	velikost indukce nasycení	(T)
$m_{j1,2}$	hmotnost zubů (statoru/rotoru)	(kg)



A) Rozptyl kolem čel vinutí

B) Drážkový rozptyl drážky statoru

Obr. 5 Schématické zobrazení rozptylových magnetických toku Φ_σ v asynchronním stroji

Na Obr. 5 lze vidět drážkový rozptyl drážky statoru (prochází zuby statoru, kolem vodičů v drážkách a uzavírá se v drážce a i v samotném vodiči) a rozptyl kolem čel vinutí (mimo železo statoru) asynchronního motoru.

Dosažení sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře souvisí s požadavkem dosažení lichoběžníkového průběhu budícího magnetického napětí. Za tím účelem na každém okraji širokého zuby (pólový nástavec hladkého rotoru synchronního stroje) je prázdné drážka vhodného tvaru a rozměrů. Kromě toho krajní navinuté drážky mohou být uzavřené magneticky vodivým (např. ocelovým) klínem.

Vzduchová mezera by měla být co nejmenší, protože představuje velký magnetický odpor a tím narůstá odběr budícího proudu, ale velikost vzduchové

mezery nemůže být zase příliš malá z důvodu přesnosti uložení a tuhosti hřídele, nárůstu pulsací drážkové harmonické a s tím je spojen nárůst povrchových ztrát.

Vířivé ztráty lze vyjádřit vztahem [39], [40], [42], [43], [44], [46], [47], [49]:

$$\Delta P_v = \frac{U_{ef}^2}{R} \quad (7)$$

kde:

ΔP_v	ztráty vířivými proudy v železe	(W)
U_{ef}	efektivní hodnota indukovaného napětí	(V)
R	elektrický odpor materiálu	(Ω)

Ztráty vířivými proudy v železe jsou nejmenší v případě, kdy odpor materiálu bude co největší. S rostoucími otáčkami se zkracuje čas, za který proběhne změna toku. Následuje růst indukovaného napětí, což v praxi vede ke zvýšení ztrát. Pak pro ztráty vířivými proudy v železe je možné psát vztah [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [48], [49]:

$$\Delta P_v = B^2 \cdot f^2 \quad (8)$$

kde:

ΔP_v	ztráty vířivými proudy v železe	(W)
B	velikost magnetické indukce	(T)
f	kmitočet magnetování	(Hz)

2.3 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty vnikají třením otáčejících se částí elektrického točivého stroje o vzduch, ztráty třením v ložiskách, ztráty kompresoru nebo ventilátoru na vytvoření proudu chladicího vzduchu (ztráty ventilační). Ventilační ztráty, vznikají nejen ve ventilátorech ale ve všech částech, které působí jako ventilátor např. pólech, žebrech, ramenech. Tyto ztráty nezávisí na zatížení stroje, závisí však na rychlosti. Ztráty třením v ložiskách jsou u elektrického točivého stroje při stálé teplotě prakticky lineárně závislé na otáčkách, ale ztráty ventilační závisí na třetí mocnině otáček. Mechanické ztráty ΔP_m (kW):

$$\Delta P_m = A_m \cdot v \cdot D_1 \cdot \sqrt{L_r} \quad (9)$$

kde:

A_m	koeficient mechanických ztrát	(-)
v	obvodová rychlost rotoru	(m·s ⁻¹)

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (10)$$

D_1	vnitřní průměr statoru	(m)
L_r	délka rotoru	(m)

Vlivem mechanických ztrát na elektroizolační systémy elektrických točivých strojů se zabývá [1], [5], [11], [36], [38], [39], [40], [46], [48], [60].

Jak již bylo řečeno, životnost elektrického stroje závisí na použité izolace a životnost materiálů používaných na elektroizolační systémy závisí na tepelném, elektrickém a mechanickém namáhání (např. chvění, rozdílná tepelná roztažnost) ale i na okolních podmínkách (vlhkost, nečistoty, chemické látky), apod. Nejdůležitějším z těchto činitelů je teplota, které se musí ze stroje odvádět.

3 Chlazení elektrických točivých strojů

Chlazením elektrického stroje se rozumí odvod tepla, které ve stroji vznikne vlivem ztrát. Metody elektromagnetického návrhu elektrických zařízení jsou již dobře propracovány, ale metody a postupy užívané při návrhu chlazení jsou stále zdokonalované (např. použití metody konečných prvků [4], [50], [51], [54], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67]).

Výpočtáři chlazení užívají zjednodušené metody nebo dokonce postupy opírající se pouze o empirické znalosti. U některých elektrických strojů není věnována velká pozornost šíření tepla v dílčích částech a vychází se pouze ze zjednodušených předpokladů z oteplení stroje nebo druhu zatížení [11], [46], [48], [52], [53].

Problémem může být i to, že návrh ventilace stroje následuje zpravidla až po elektromagnetickém výpočtu a vzájemné sladění těchto požadavků přináší nutnost přistoupit ke kompromisu ve výkonových parametrech stroje. Proto je potřeba

provádět analýzu různých druhů chladicích medií, což může vést ke zdokonalení systému chlazení a ke vzniku prostoru pro další zvyšování užitečných hodnot elektrického zařízení.

3.1 Způsoby chlazení točivých elektrických strojů

Způsoby chlazení točivých elektrických strojů lze rozdělit podle mnoha různých hledisek [38], [39], [40], [46], [48], [54], [55], [61], [68], [69], [70]. U točivých elektrických strojů malého výkonu není vzniklé teplo příliš velké, dále tyto stroje mají příznivý poměr povrchu k objemu, proto k jejich chlazení stačí vlastní přenos tepla materiálu (způsoby šíření tepla v elektrických strojích točivých jsou popsány v následující kapitole) a použití chladicích žeber na plášti, v některých zdrojích je tento způsob chlazení nazýván **pasivním chlazením**. U zařízení s většími výkony (mají malý povrch v poměru k velikosti stroje), a tedy i ztrátami, je již nutné zajistit **aktivní chlazení**, které odpovídá provozním podmínkám. Pohyb chladicího média je uměle podporován např. ventilátorem či čerpadlem. Výhodou je lepší účinnost chlazení (použitelný u strojů vysokých výkonů), mezi nevýhody patří jeho větší složitost a určitá energie potřebná pro funkci.

Když ztrátové teplo odvádíme pomocí chladicího média, může být aktivní chlazení rozděleno podle jeho druhu na chlazení plynem a chlazení kapalinou. Jako chladicí médium mohou být použity plyny např. vzduch, vodík nebo kapaliny např. voda, olej. Chladicí médium je vháněno do chladicích kanálů, které mohou být rozmístěny ve statoru nebo v rotoru. Účinnost chlazení je závislá na počáteční energii proudícího média, dále na tvaru kanálů, kterými toto médium prochází.

Podle směru chladicího média v elektrických točivých strojích rozeznáváme tři základní typy chlazení: axiální, radiální a axiálně – radiální.

Oběh chladiva může být otevřený nebo uzavřený. Chlazení může být dále děleno na přímé a nepřímé chlazení. Přímým chlazením se rozumí odvod tepla z aktivních částí přímo na chladicí médium, zatímco při nepřímém chlazení je tento styk zprostředkován např. izolací vodičů.

Ventilační výpočet elektrického stroje vychází ze základních zákonů hydromechaniky a jedná se o řešení proudění chladicího média skrz geometrii elektrického stroje. Zde je potřeba zdůraznit, že při návrhu různých strojů (např. hydrogenerátoru nebo turbogenerátoru) jsou kladeny jiné nároky na intenzitu a

způsoby chlazení, např. při výpočtu chlazení turbogenerátorů je důležité, aby se teplo odvedlo i ze střední části dlouhého rotoru i statoru.

K základním ventilačním výpočtům se používají tyto vztahy [55], [42], [50], [68], [71]: rovnice kontinuity, Bernouilliho rovnice, Eulerova ventilační rovnice.

3.2 Porovnání chladicích médií

Při návrhu elektrických točivých strojů je nutno znát vlastnosti různých druhů chladicích médií, jejich výhody a nevýhody, proto dále následuje porovnání chladicích médií.

3.2.1 Chlazení vzduchem

Jak již bylo řečeno, oběh chladiva může být otevřený nebo uzavřený. Otevřené provedení elektrických strojů umožňuje vstup chladicího studeného vzduchu přímo z okolního prostředí, ohřátý vzduch pak opět vystupuje ven do okolí, což může být považováno za výhodu, naopak nevýhodou je pak znečištění stroje okolním prostředím. Z bezpečnostních důvodů je další nevýhodou skutečnost, že teplo je rozptýlováno přímo v prostorech, ve kterých je motor umístěn.

Při uzavřeném provedení elektrických strojů vzduch cirkuluje pouze uvnitř samotného stroje nebo v uzavřeném okruhu mezi strojem a výměníkem tepla. Vzduch pak předává teplo chladnějším částem stroje, např. jeho vnější kostře nebo vzduch ohřátý ve stroji odevzdává své teplo ve výměníku tepla, který je součástí chladicího vzduchového okruhu. Do stroje se tak opět navrácí ochlazený vzduch. Hlavní nevýhodou v tomto případě mohou být považovány poměrně velké rozměry výměníku tepla, který zvyšuje prostorové nároky a stíží, případnou manipulaci se strojem.

Turbogenerátory s přímým chlazením, kde statorové tyče mají duté vodiče chlazené přímo chladicím médiem (např. vodík, voda). Teplo generované v statorových tyčích je přenášeno přímo do chladicího média a elektroizolační systémy nemohou ovlivnit účinnost chladicího systému, což klade větší nároky na vlastnosti chladicího média. U turbogenerátorů s nepřímým chlazením, kde stator je chlazen chladicím médiem (např. vzduch) nepřímo a elektrické ztráty (ztrátové teplo) generované v statorových tyčích prochází přes stěnu elektroizolačního systému, se projevuje snaha o zlepšení stávajících nebo hledání nových elektroizolačních

materiálů.

3.2.2 Chlazení kapalinou

Ztrátové teplo může být odváděno pomocí kapaliny. Kapalinové chlazení můžeme rozdělit podle druhu použité chladicí kapaliny. V praxi se nejčastěji používá voda (patří mezi nejrozšířenější) nebo olej. Dále kapalinové chlazení lze rozdělit na nepřímé a přímé. Přímé chlazení elektrických točivých strojů kapalinou se používá výhradně v provedení s uzavřeným chladicím okruhem. Chlazení stroje je tak zajištěno pomocí cirkulace množství chladiva, které zůstává neměnné. Hlavní výhodou kapalinového chlazení je zejména větší měrná tepelná kapacita běžně používaných kapalin. Měrná tepelná kapacita vody při 0 °C se rovná 4180 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [72] a vzduchu - 1003 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [73]. Voda má řádově vyšší hodnoty koeficientu přestupu tepla v porovnání se vzduchem (Tab. 2), což je považováno za výhodu. Mezi nevýhody chlazení vodou můžeme považovat např. náklady s vodním hospodářstvím, výrobu tyčí a jejich zapojením do chladicího systému.

Chlazení olejem se u točivých elektrických strojů nevyskytuje tak často, protože olej má v porovnání s vodou velkou řadu nevýhod. Olej má vyšší viskozitu a s ní se pojí větší tlakové ztráty a nižší hodnoty koeficientu přestupu tepla (Tab. 2). Nižší měrná tepelná kapacita oleje (při 0 °C 2000 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [74]), která vede k vyššímu oteplení v chladicím okruhu. Ekologická likvidace a ekologická nebezpečnost, jakož i hořlavost olejů jsou další nevýhody olejů. Mezi výhody olejů patří jejich dobré elektroizolační schopnosti.

Chlazením elektrických točivých strojů kapalinou se zabývá [54], [46], [65], [66], [75], [76], [77], [78], [79].

3.2.3 Chlazení pomocí vodíku, hélia, kapalného dusíku

Chlazení elektrických strojů může být i pomocí jiných plynů než je vzduch, nejčastěji se jedná o vodík, hélium, kapalný dusík či kapalné helium (uplatňuje se zejména u strojů s nízkoteplotními supravodiči [54], [71], [80], [81]. Výhodou používání vodíku a hélia je nízká viskozita a vysoká tepelná vodivost.

Ventilační ztráty, případně výkon vynakládaný na oběh daných plynů v chladicím okruhu, jsou proto nižší, než v případě chlazení vzduchem [54]. Plynem

muže být vyplněn i celý vnitřek uzavřeného stroje, což může být považováno za výhodu. Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti různých látek jsou uvedeny v Tab. 1. [46], [51], [82], [83], [84].

Tab. 1 Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti

Látka	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Suchý vzduch	0,027
Vodík	0,18
Helium	0,14 – 0,17
Voda	0,6
Transformátorový olej	0,13 – 0,16
Měď	395
Hliník	201 - 270
Železný plech příčný směr	1
Železný plech podélný směr	50 - 80
Ocel (0,2 %)	50
Železo	30 - 53

Vodík u velkých generátorů koluje pouze v uzavřeném okruhu, eventuálně vnitřkem dutých vodičů statorového vinutí, které má ochladit. Vodík má vyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti (Tab. 1) a součinitel přestupu tepla (Tab. 2) a vysokou měrnou tepelnou kapacitu $14\,300$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) [85]. Součinitel přestupu tepla konvekcí závisí na vlastnostech a na rychlosti proudění dané tekutiny a také na tvaru povrchu, který je obtékán (tepelné vlastnosti materiálu, způsoby šíření tepla a metody využívané k tepelným analýzám podrobněji popsané v Příloze II této práce).

Tab. 2 Hodnoty součinitelů přestupu tepla nucenou a přirozenou konvekcí

Látka	α_{konv} (nucenou konvekcí) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	α_{konv} (přirozenou konvekcí) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
Plyny	25 - 250	2 - 25
Kapaliny	50 – 20 000	50 – 1 000

Z toho plyne nízký tepelný odpor na mezní laminární vrstvě těsně u povrchu ochlazovaného úseku (např. izolačního systému). Součinitel přestupu tepla vody je při stejné rychlosti 570 x větší než u vzduchu a výsledný chladicí účinek vody je asi 50 x větší než v případě vzduchu (voda musí proudit pomaleji s ohledem na hydraulické ztráty) [46], [50], [68].

Přes dobrou účinnost tohoto způsobu chlazení jsou tu i nevýhody, např. jde o složité plynové hospodářství a problémy s utěsněním strojů. V porovnání se

vzduchem, vodík a hélium unikají netěsnostmi snáze než vzduch. Protože je vodík ve směsi se vzduchem výbušný, musí být stroj konstruován jako výbuchu odolný. Součinitel přestupu tepla narůstá s tlakem, avšak zvýšením tlaku lineárně narůstají ventilační ztráty, což je další nevýhodou.

V minulosti se turbogenerátory od cca 80 MW běžně vyráběly s vodíkovým a od cca 230 MW s kombinovaným chlazením (voda a vodík). Vývoj metod navrhování umožnil výrobu turboalternátorů vzduchem chlazených až do výkonu cca 250 MW, ale nemalé zásluhy na tom má i vývoj elektroizolačních materiálů používaných na elektroizolační systémy (např. izolace menší tloušťky, lepší přestup ztrátového tepla z vodiče do jeho okolí, vyšší teplotní třídy).

3.2.4 Vliv tepelných vlastností materiálu na odvod ztrátového tepla

Složitost chlazení a ventilace elektrických točivých strojů je dána skutečností, že elektrický stroj představuje kompromis mezi výkonem a rozměrem. Tepelný a ventilační výpočet elektrického točivého stroje podstatně ovlivňuje dimenzování jak aktivních, tak i konstrukčních částí a již v etapě elektromagnetického návrhu stroje je třeba získat přehled o chlazení stroje za různých pracovních podmínek. Pojem chlazení elektrických točivých strojů obecně zahrnuje metody používané v elektrických strojích k odvodu ztrátového tepla z míst jeho vzniku ven ze stroje. Teplota je důležitým parametrem, kterému je v elektrotechnice věnována značná pozornost. Jedná se o významný degradační faktor, který ovlivňuje spolehlivost izolačních materiálů a systémů. Zdůrazníme jednu z možností jak zlepšit odvod tepla z elektroizolačních systémů a zároveň zvýšit výkon vysokonapěťových elektrických zařízení (např. turboalternátorů), což je zdokonalování ventilačních systémů (výhody a nevýhody spojené se zdokonalováním ventilačních systémů byly popsány výše). Firma BRUSH SEM s.r.o. provedla analýzu vlivu chlazení na aktivní materiály stroje. Spotřeba aktivních materiálů stroje je svázána se způsobem a intenzitou chlazením. Při stejném chladivu a způsobu chlazení (například nepřímé chlazení vzduchem), lze optimálním řešením chladicího okruhu stroje snížit váhu aktivních materiálů i o desítky procent. Při intenzivním chlazení (např. rotor a magnetický obvod vodíkem a statorové vinutí vodou) může být váha aktivních materiálů nižší až o 80% - ve srovnání s nepřímým chlazením vzduchem. Intenzivní chlazení (voda a vodík) umožňuje realizovat stroje mezních výkonů (nad 1000 MW).

Dalším možným řešením jak zlepšit odvod tepla z elektroizolačních systémů a zároveň zvýšit výkon vysokonapěťových elektrických zařízení je využití mikro a nanoplňiv s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti v elektroizolačních systémech [9], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95]. Toto řešení nevyžaduje náročné konstrukční úpravy a může mít významný vliv. A proto cílem (následující kapitola 4) této disertační práce je nejen navrhnout postup zlepšení odvodu tepla z elektroizolačních systémů, ale i vyrobit vzorky elektroizolačního systému s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti, ověřit tyto předpoklady na reálním stroji a spočítat ekonomický dopad.

4 Cíle disertační práce

Cíle disertační práce budou navazovat na teoretické znalosti, které byly popsány výše. Tato dizertační práce si vytyčuje následující cíle:

- definovat problematické oblasti při teplotních analýzách elektrických točivých strojů;
- navrhnout, vyrobit, otestovat a zprovoznit zařízení na měření tepelné vodivosti materiálů;
- ve spolupráci s výzkumnými institucemi a s průmyslem navrhnout a připravit experimentální vzorky elektroizolačních systémů pro VN izolaci točivých strojů se zvýšenou tepelnou vodivostí;
- matematicky a fyzikálně popsat u nových dielektrických materiálů existující velmi zajímavou a výraznou součinnost mezi teplotními závislostmi relativní permitivity a ztrátového činitele;
- provést analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě;
- vytvořit tepelný model elektrického točivého stroje pomocí metody konečných prvků k vyšetření teplotního pole;
- konfrontovat analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měřením;

- následně určit ekonomický přínos nového elektroizolačního systému s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

5 Ovlivnění tepelné bilance elektrických točivých strojů pomocí plniv s vyšším součinitelem tepelné vodivosti

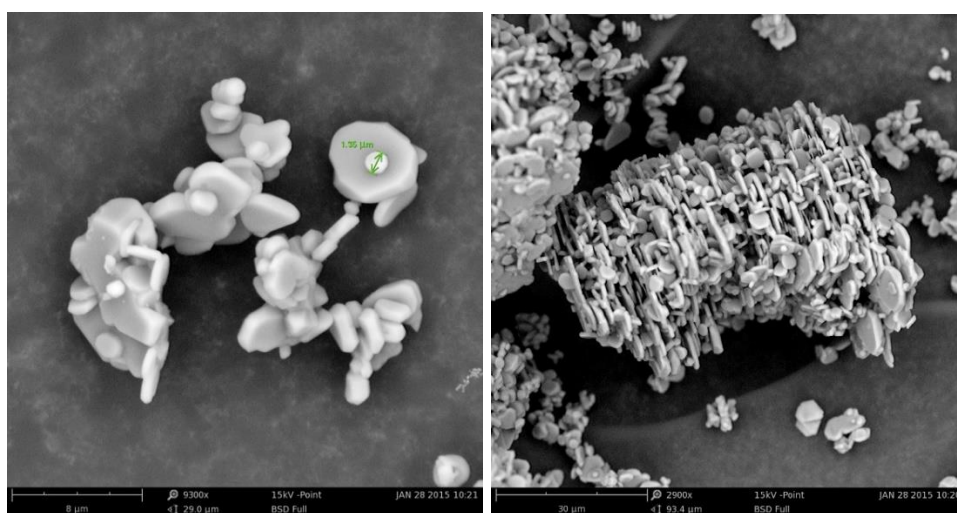
Elektroizolační systémy na bázi slídy a jejich uplatnění ve vysokonapěťových elektrických točivých strojích byly vyvíjeny a optimalizovány v průběhu posledních 60. let. Zvýšením tepelné vodivosti elektroizolačního systému může být urychlen přestup tepla od vinutí do chladicího média. Zvýšení tepelné vodivosti je možné docílit přidáním plniva s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti, v této práci pomoci přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3 do elektroizolačního systému. Hodnota součinitele tepelné vodivosti oxidu hlinitého se obvykle v různých zdrojích uvádí od $20 (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ až $40 (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ [18], [96]. Výzkumy zaměřené na rozvoj kompozitních materiálů s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti jsou a byly prováděny např. [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103]. Řada těchto prací, které se zabývaly zvyšováním tepelné vodivosti, byly spíše teoretické bez možnosti aplikace ve VN technice z důvodu zhoršení elektroizolačních vlastností výsledného materiálu nebo používáním pro VN techniku nevhodných plniv (z mnoha důvodů, např. cena).

Před analýzou vlivu tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy, musíme znát způsoby šíření tepla a to **vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací, zářením)** [42], [45], [62], [104], [105], [106], [107], [82], [83], [84], [108], [109], [110], [111], [112], (viz Příloha II).

5.1 Výroba vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3

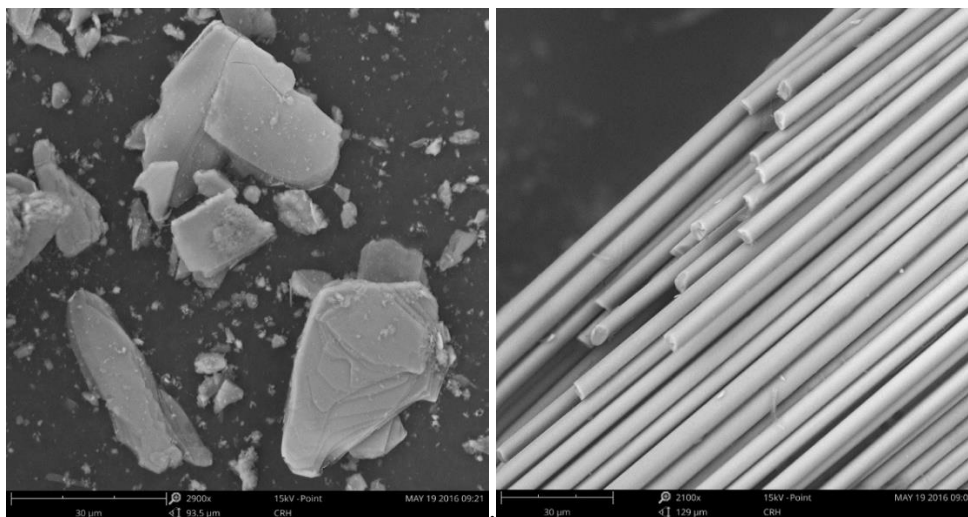
Na základě výše popsaných úvah byly vyrobeny dvě sady vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3 . První sada vzorků byla vyrobena z epoxidové pryskyřice s obchodním názvem EPOXYLITE 3750 LV s přidáním částic mleté slídy, skleněné tkaniny a částic oxidu hlinitého Al_2O_3 (2%, 4 %, 6%, 8%, 10% hmotnostního poměru). Na výrobu další sady vzorků byla použita epoxidová pryskyřice s obchodním názvem EPOXYLITE TSA 220 (s přidáním částic mleté slídy, skleněné tkaniny a částic oxidu hlinitého Al_2O_3 v množství 2%, 4%, 6%, 8% a 10% hmotnostního poměru).

Epoxidové pryskyřice s obchodním názvem EPOXYLITE 3750 LV a EPOXYLITE TSA 220, které pro experiment byly poskytnuty společnosti Škoda Electric a.s. [113] a jsou používány k výrobě elektrických zařízení metodou vakuově tlakové impregnace (angl. VPI - Vacuum Pressure Impregnation). Aplikace těchto epoxidových pryskyřic v experimentu byla konzultována se zástupci společnosti Škoda electric a.s., kteří doporučili optimální metodu vytvrzovacího procesu dle technických listů. Oxid hlinitý byl dodán společností Sigma Aldrich [114] s obchodním názvem Aluminum oxide activated, basic, Brockmann I, v podobě bílého prášku se specifickou povrchovou plochou $150 \text{ m}^2/\text{g} \pm 10\%$. Skleněná tkanina a mletá slída pro experiment byla dodaná společností COGEBI a.s. [115]. Velikost částic oxidu hlinitého ((přibližně $90 \mu\text{m} - 140 \mu\text{m}$), Obr. 6), částic mleté slídy ((přibližně $80 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$), Obr. 7 a)) a průměr skleněných vláken ((přibližně $10 \mu\text{m}$, Obr. 7 b)) byl určen pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).



Obr. 6 Velikost částic oxidu hlinitého

Forma na výrobu vzorků byla vyrobena na ze dvou ocelových plátů (tloušťka 10 mm, délka 140 mm, šířka 140 mm), mezi které jsou upevněné dva polytetrafluorethylenové (PTFE) pláty (tloušťka 10 mm, délka 123 mm, šířka 120 mm) a mezi tyto pláty byla umístěna vrstva silikonového kaučuku, který sloužil jako těsnění a zároveň určoval výšku vzorků (tloušťka 1 mm, délka 100 mm, šířka 100 mm).



a) částice mleté slídy

b) průměr skleněných vláken

Obr. 7 Velikost částic mleté slídy a průměr skleněných vláken

Prvním krokem experimentu bylo přesné zvážení částice mleté slídy a částice oxidu hlinitého a umístění do sušárny po dobu 24 hodin. Dalším krokem bylo vysušení a zahřátí PTFE plátu na teplotu 160 °C v případě epoxidové pryskyřice EPOXYLITE 3750 LV a na 165 °C v případě epoxidové pryskyřice EPOXYLITE TSA 220.

Potom následovalo vmíchání částic mleté slídy a částic oxid hlinitý do epoxidové pryskyřice v kádince na elektromagnetické míchačce a následné zahřátí. Ohřev byl prováděn za stálého míchání na teplotu (cca 100 °C) pro dosažení optimální viskozity epoxidové pryskyřice. Následně byl do pryskyřice vložen ultrazvukový hrot (vše probíhalo v kádince), čímž bylo dosaženo lepší dispergace částic mleté slídy a částic oxidu hlinitého v epoxidové matrici. Po dokonalé dispergaci plniv ve směsi epoxidové pryskyřice a odstranění bublin byla zvýšena teplota na 160 °C v případě epoxidové pryskyřice EPOXYLITE 3750 LV a na 165 °C v případě epoxidové pryskyřice EPOXYLITE TSA 220. Tyto teploty nastartují proces síťování a zvyšování viskozity, což je nezvratný přechod z tekutého do gelového stavu (gelace). Předpokládáme, že se po dobu gelace epoxidové pryskyřice částice slídy a oxidu hlinitého zachytí se mezi polymerní řetězce, což může zajistit rovnoměrné rozptýlení v matrici. Doba gelace pro EPOXYLITE 3750 LV je 2 min až 8 min a pro EPOXYLITE TSA 220 je 2 min až 4 min.

Po této době jsou připravené směsi nality do předehřáté formy (ohřáta na stejnou teplotu), kdy na dně formy byla předem umístěna skleněná tkanina (nosič

výsledného kompozitu). Zahřátí PTFE plátu na tuto teplotu bylo navrženo a s úspěchem otestováno z důvodu dodržení správné doby gelace (aby se zabránilo usazení plniv). Potom následovalo umístění formy do pece (vytvrzování). Vzorky vyrobené z epoxidové pryskyřice EPOXYLITE 3750 LV byly vytvrzovány při teplotě 160 °C po dobu 4 hodin. Vzorky vyrobené z epoxidové pryskyřice EPOXYLITE TSA 220 byly vytvrzovány při teplotě 165 °C po dobu 12 hodin. U epoxidové pryskyřice při vytvrzování dochází k chemickým reakcím, majícím za následek síťování, díky kterému dochází k trvalému vytvrzení.

Kromě vzorků výše popsanych vzorků byly také připraveny vzorky z čisté modifikované epoxidové pryskyřice (bisphenol A) s tvrdidlem obsahujícím methylhexahydrophthalic anhydrid, methylnetrahydrophthalic anhydrid a hexahydrophthalic anhydrid [116]. Do dalších sad byly přidány pouze částice oxidu hlinitého Al_2O_3 . Výsledky jsou pro porovnání uvedeny v Příloze IV.

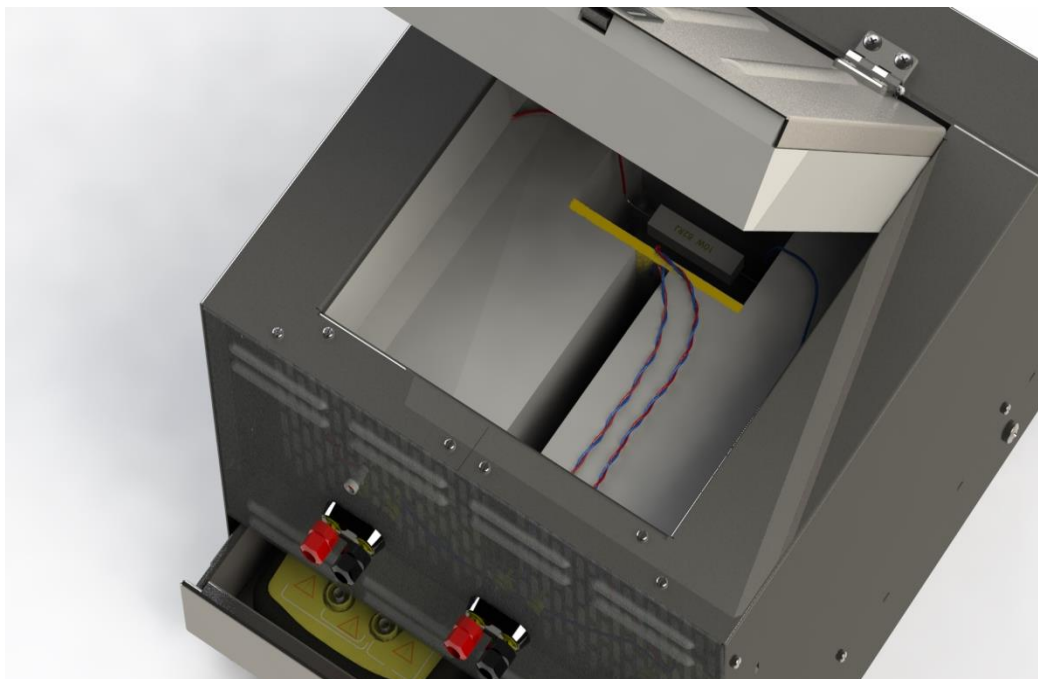
5.2 Měření tepelných vlastností

Měření teploty patří mezi velmi důležité součásti diagnostiky elektrických strojů. Měření teploty v elektrických strojích založeno na základních fyzikálních zákonech, ale vzhledem ke konstrukci elektrických strojů mohou zde vzniknout i problémy (např. mechanické síly při otáčení motoru, elektromagnetické síly ve vinutí, přesnost výsledků měření teploty, zničení teplotních čidel, vyvedení teplotních čidel z rotující části k měřicímu zařízení). Vzniklo několik výpočetních metod pro určení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik elektrického stroje. Tyto metody mají ale i nevýhody, např. relativní přesnost výpočtů, což při návrhu elektrických strojů mohou být tyto metody dostačující, ale při teplotních optimalizacích elektrických strojů nelze měření teploty nahradit (viz Příloha III).

V této části disertační práce je pozornost věnována měření součinitele tepelné vodivosti vyrobených experimentálních vzorků izolačních systémů. Z důvodu ověření jak měřícího zařízení, tak i metody vyhodnocovací, bylo nezbytné po kalibraci vzorkem o známé tepelné vodivosti provést měření na materiálu známých vlastností, a proto byl zvolen standardní materiál Relanex 45.011 [117] s katalogovou hodnotou součinitele tepelné vodivosti $\lambda = 0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$. Tento materiál je používán v elektroizolačních systémech Resin Rich s odpovídající tepelní třídou F (155°C). Poté bylo možné přejít k měření vyrobených vzorků.

5.2.1 Výroba zařízení na měření tepelných vlastností materiálů

Za účelem měření průchodu tepla materiálem bylo vytvořeno zařízení, které lze vidět na Obr. 8.

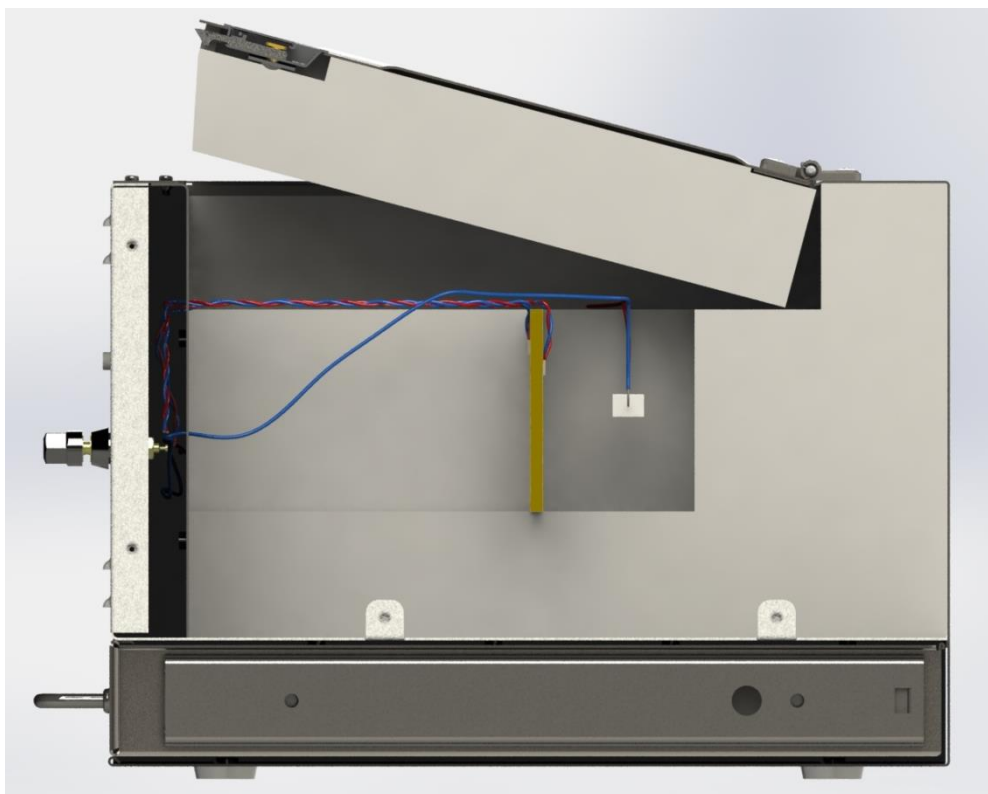


Obr. 8 Zařízení na měření tepelných vlastností materiálů

Polystyren je tepelným izolantem s hodnotou součinitele tepelné vodivosti $0,04 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ [46], [51], [82], [83], [84], proto byl použit na výrobu šesti stěn kvádru a který tvořil základ zařízení na měření tepelných vlastností materiálů. Konstrukce zařízení byla vyrobena z austenitické nerezové oceli.

Do zadní části zařízení je umístěn (tak, aby se nedotýkal stěn) tepelný zdroj (elektrický odpor, Obr. 9). Vývody jsou protaženy stěnami ven, tak aby bylo možno připojit zdroj napětí a nedocházelo k tepelným ztrátám. Měřicí tepelná čidla se připojí k opačným povrchům vzorku a vývody od čidel opět se vyvedou ven.

Tím byla měřicí aparatur připravena a mohlo začít měření.



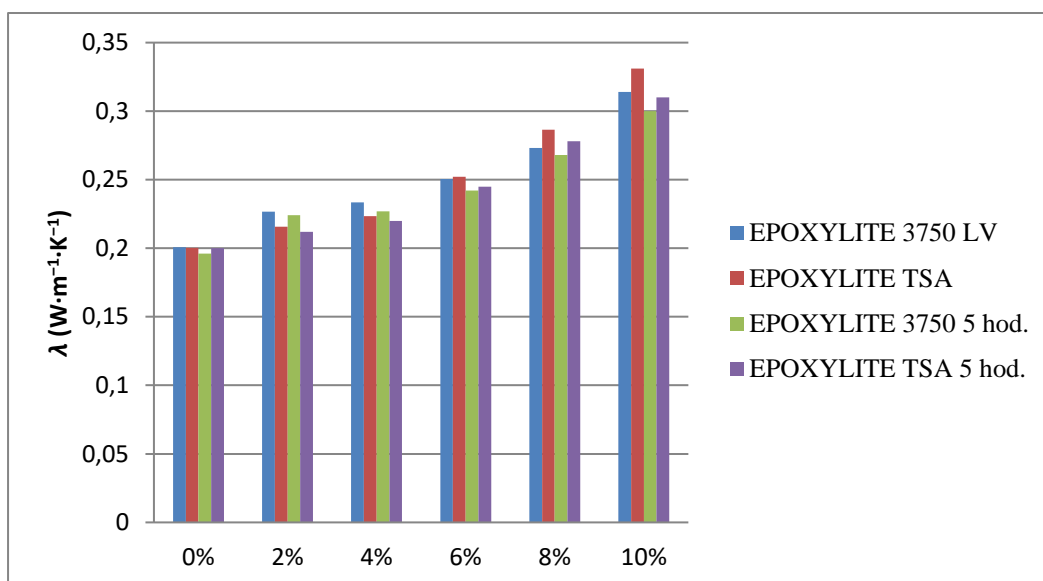
Obr. 9 Zařízení na měření tepelných vlastností materiálů (řez)

Poměry tepelné vodivosti polystyrenu k měřeným vzorkům jsou velké, proto můžeme uvažovat, že většina tepla produkovaného rezistorem prochází vzorkem. Tepelný výkon rezistoru (spočítaný z napětí a proudu) je roven uvolněné energii (teplu) za daný čas. Tento výkon P prochází vzorkem o ploše povrchu S a tloušťce d , při teplotním rozdílu Δt na vnitřní a vnější straně vzorku. Jako referenční materiál byl zvolen Relanex 45.033A, na kterém byla realizována měření pro kalibraci a také ověření vyhodnocovací metody.

5.2.2 Měření součinitele tepelné vodivosti

Měření součinitele tepelné vodivosti bylo prováděno v souladu s normou ČSN 72 7012-1 (727012) a ISO 22007-2:2015. Tyto normy uvádí deskovou metodu a podmínky jejího užití pro stanovení součinitele tepelné vodivosti zkušebních vzorků v ustáleném tepelném stavu.

Obecně platí, že výsledná hodnota součinitele tepelné vodivosti je tím větší, čím je větší tepelná vodivost jednotlivých složek kompozitního materiálu.



Obr. 10 Součinitel tepelné vodivosti vzorků plněných Al₂O₃
(EPOXYLITE 3750 LV, EPOXYLITE TSA)

Hodnota součinitele tepelné vodivosti roste s přidáním Al₂O₃ dle předpokladu, viz Obr. 10. Zvýšení součinitele tepelné vodivosti je způsobeno větší vodivostí přimíslených částic Al₂O₃. Je předpoklad, že tyto částice během přechodu matrice ze stavu gelace do stavu vytvrzení zaujímají v matici určité pozice vzhledem k základní matici. Tyto pozice jsou tvořeny určitými „klastry“ polymerního řetězce, který je vytvořen během růstu polymerního řetězce. Částice Al₂O₃ během vytvrzovacího procesu „trvale uvíznou“ v polymeru. To, že byl postupně vytvořen technologicky správný postup dispergace mikro plniva v připravených vzorcích dokladují níže uvedené analyzované dielektrické vlastnosti připravených vzorků. Částice Al₂O₃ tedy dle předpokladu netvoří delší řetězce, které by významně negativně ovlivnily dielektrické vlastnosti. Jak je známo, součinitel tepelné vodivosti závisí na schopnosti látky přenášet tepelný pohyb z jedné částice na druhou, tedy čím více částic Al₂O₃ materiál obsahuje, tím je větší součinitel tepelné vodivosti. Kromě výše uvedeného způsobu vedení tepla, probíhá šíření tepla i přímo polymerním řetězcem, skleněnými vlákny i částicemi slídy. V pevných elektricky nevodivých látkách lze šíření tepla vysvětlit tím, že částice (látka je tvořena elektrony, protony a neutrony) se více rozkmitají a předávají část své energie sousedním částicím.

Na Obr. 10 je znázorněn i součinitel tepelné vodivosti po 5 hodinách dotvrzování vzorků při teplotě 130 °C. Součinitel tepelné vodivosti po 5 hodinách dotvrzování má mírně nižší hodnoty v porovnání s výsledky měření před dotvrzením.

To může být způsobeno vlhkostí v mikroskopických dutinkách vzorku před dotvrzováním. Vlhkost materiálu může ovlivnit hodnotu součinitele tepelné vodivosti, rosteli vlhkost materiálu, zvětšuje se i součinitel tepelné vodivosti [118], [119]. Dalším možným vysvětlením je i změna matrice, která po dotvrzení mírně změnila své vlastnosti.

Součinitel tepelné vodivosti skupiny materiálů - nevodičů - se obecně zvětšuje se vzrůstající teplotou. Při vyšších teplotách je tepelnou excitací přítomno v materiálu více volných nosičů, které mohou předávat tepelnou energii. Elektroizolační systémy vysokonapěťových strojů jsou provozovány při vyšších teplotách (nad 155 °C). Lze předpokládat, že samotný součinitel teplotní vodivosti bude vykazovat teplotní závislost, zjištění tohoto faktu bude předmětem dalšího výzkumu.

5.3 Měření elektrických vlastností

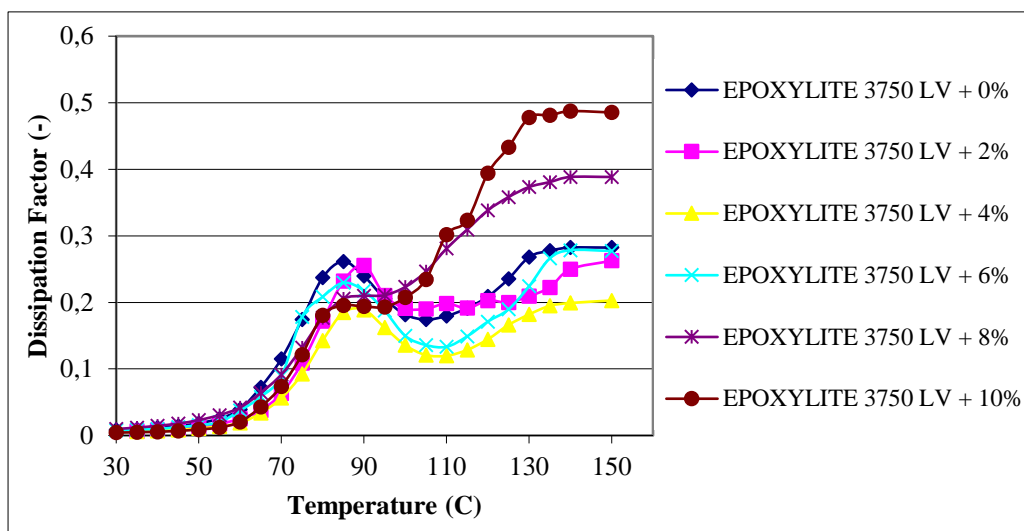
V předchozím textu byly popsány modifikace elektroizolačního systému pomocí přídavku mikro a nano plniv.

V této části disertační práce pomocí měření na vyrobených vzorcích (měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě, absorpčních a resorpčních proudů, vnitřní rezistivity, elektrické pevnosti) bude ověřeno jak Al_2O_3 ovlivní dielektrické vlastnosti. Vzorky byly také analyzovány pomocí dielektrické spektroskopie (viz Příloha VII).

5.3.1 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě

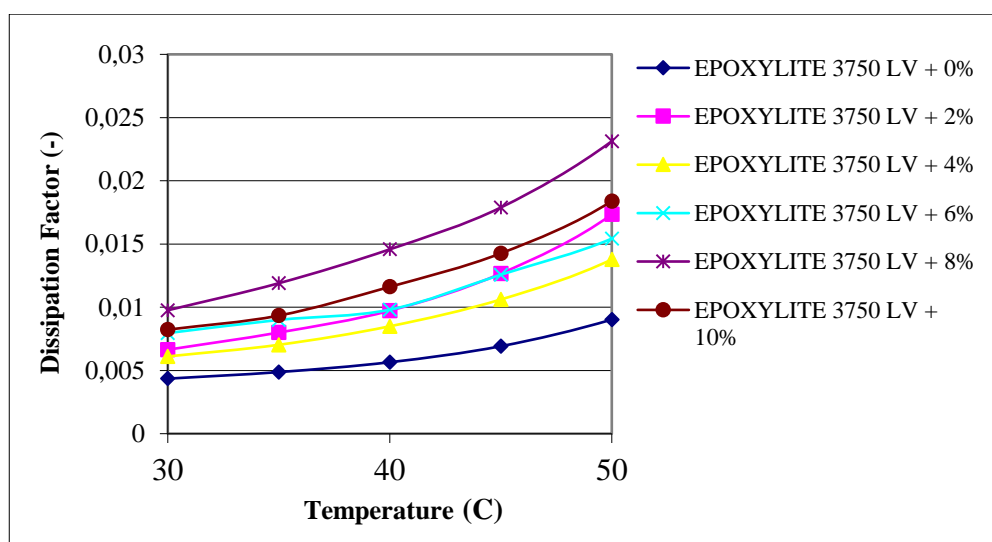
Dle předpokladu, je možné zvýšit hodnotu tepelné vodivosti vzorku s přidáním Al_2O_3 . Toto zvýšení nesmí být na úkor dielektrických vlastností vzorku, které se mohou výrazně zhoršit. Měření závislosti $\tan \delta$ na teplotě bylo provedeno v souladu s normou IEC 60250. Měření závislosti $\tan \delta$ na teplotě byla provedena při napětí 500 V a frekvenci 50 Hz. Z grafu na Obr. 11 měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě od 110 °C do 150 °C je vidět, že vzorky vyrobené s epoxidové pryskyřice EPOXYLITE 3750 LV s přidáním 8% Al_2O_3 mají stejný průběh jako vzorky s přidáním 10% Al_2O_3 , mají největší hodnoty $\tan \delta$. Vyrobené vzorky jsou vícesložkové nehomogenní materiály a již svou podstatou přispívají ke zvětšení dielektrických ztrát, pohyb volných a vázaných nosičů ve vzorcích a polarizační mechanismy jsou dalšími možnými příčinami vedoucími ke zvýšení $\tan \delta$ u vzorku s větším množstvím oxidu

hlinitého. Dále zde můžeme sledovat stejný trend chování u vzorku s přidáním 6% a 2% kde pozorujeme nižší hodnoty $\tan \delta$. Vzorky s přidáním 4% Al_2O_3 mají nejnižší hodnoty $\tan \delta$. Vzorky vyrobené bez přidání Al_2O_3 paradoxně nemají nejnižší hodnoty $\tan \delta$ (100 °C – 150 °C).



Obr. 11 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě od 110 °C do 150 °C (EPOXYLITE 3750 LV)

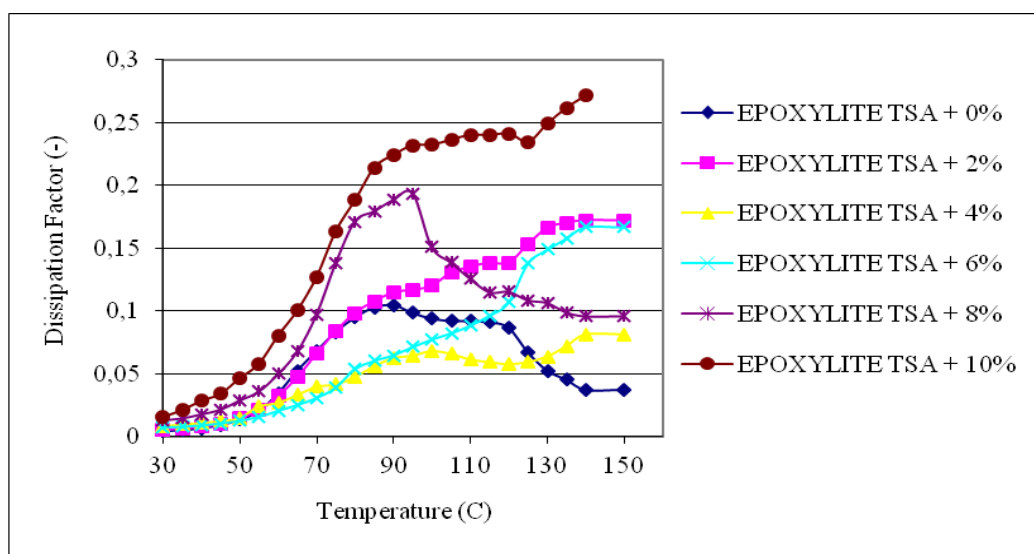
Dále bude věnována pozornost oblasti grafu (Obr. 12) od 30 °C do 50 °C, na kterém můžeme vidět, že nejnižší hodnoty $\tan \delta$ má vzorek vyrobený z čisté pryskyřice EPOXYLITE 3750 LV.



Obr. 12 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě od 30 °C do 50 °C (EPOXYLITE 3750 LV)

Zajímavé výsledky můžeme vidět v grafu na Obr. 13 měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě od 30 °C do 150 °C, kde je vidět že vzorky vyrobené s epoxidové pryskyřice

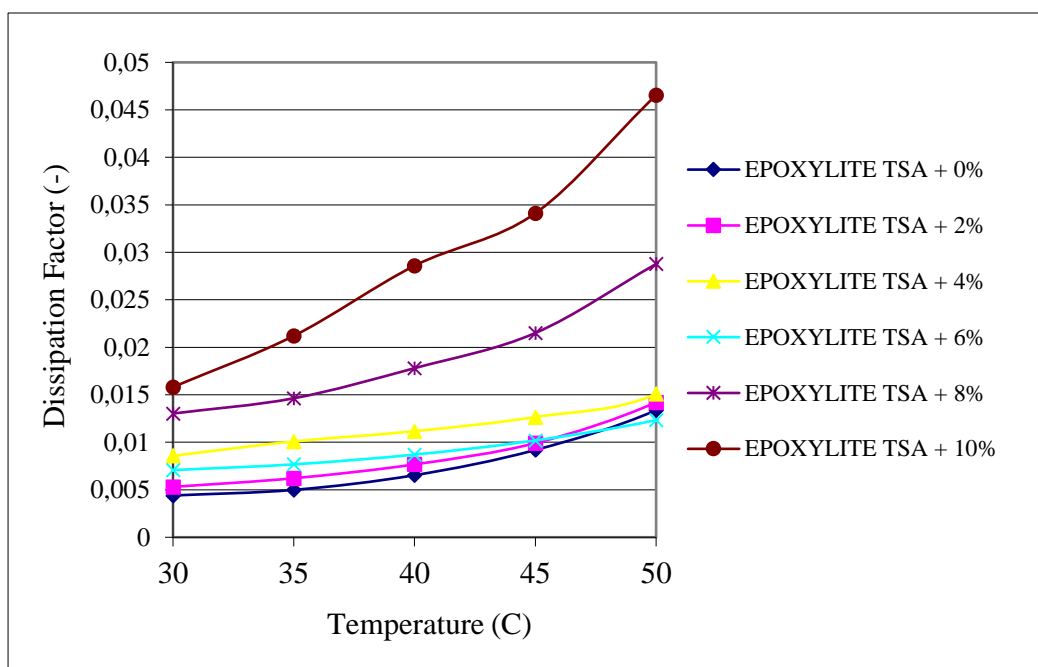
EPOXYLITE TSA s přidáním 10 % Al_2O_3 mají nejvyšší hodnoty $\tan \delta$. Vzorky s 8 % Al_2O_3 od 90°C vykazují pokles $\tan \delta$, stejně jako vzorky bez Al_2O_3 . Podstatné je, že vzorky bez přidaného Al_2O_3 nemají nejnižší hodnoty $\tan \delta$ v oblasti 90°C – 115°C. **Z toho plyne možnost optimalizace tepelné vodivosti a dielektrických vlastností výsledného kompozitu.** Dále na Obr. 13 můžeme sledovat stejný trend chování u vzorků s plněním 6 % a 2 %. Tyto vzorky mají v uvedené oblasti nízkou hodnotu $\tan \delta$. Vzorky s 4 % Al_2O_3 mají nejnižší hodnoty $\tan \delta$.



Obr. 13 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě od 110°C do 150°C (EPOXYLITE TSA)

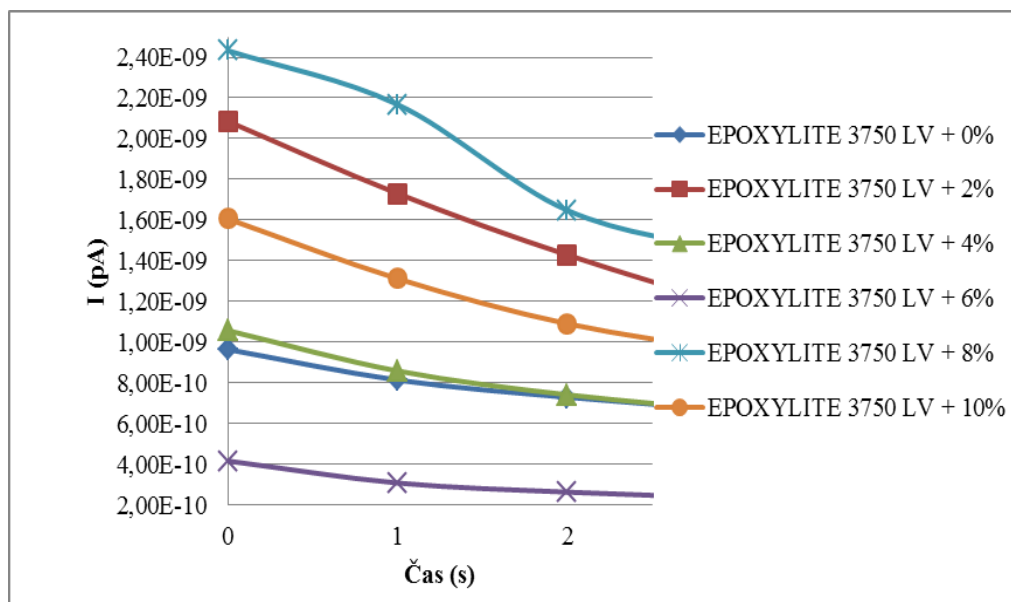
Dále bude věnována pozornost oblasti grafu (Obr. 14) od 30°C do 50°C, na kterém můžeme vidět, že nejnižší hodnoty $\tan \delta$ má vzorek vyrobený z čisté epoxidové pryskyřice EPOXYLITE TSA. Větší hodnoty $\tan \delta$ dle předpokladu mají vzorky s přidaným Al_2O_3 .

Z grafů na Obr. 11 až Obr. 14 (měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě) je vidět, že vliv plniv na teplotní závislost $\tan \delta$ je do teploty 90°C minimální.

Obr. 14 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě od 30 °C do 50 °C (EPOXYLITE TSA)

5.3.2 Měření absorpčních a resorpčních proudů

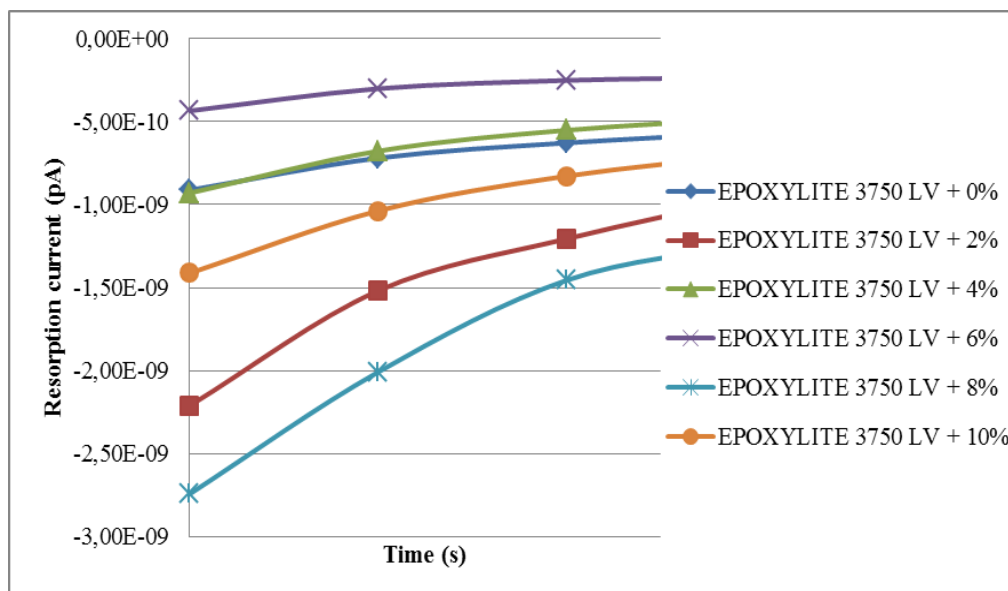
Dále byly měřeny absorpční a resorpční proudy při napětí 500 V (Obr. 15 – Obr. 18).



Obr. 15 Absorpční proud (EPOXYLITE 3750 LV)

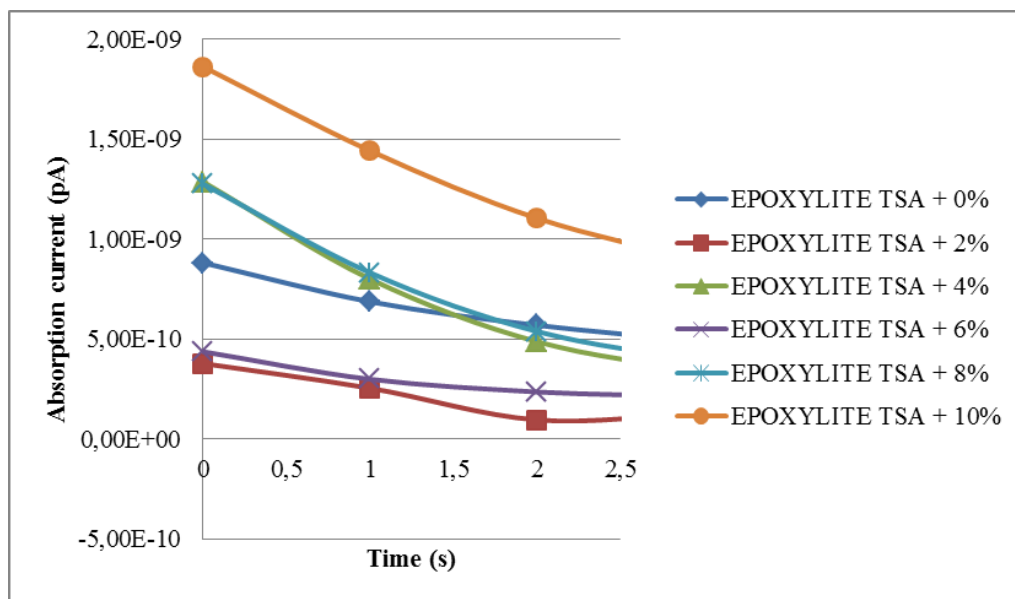
Z Obr. 15 je patrný větší podíl pomalých polarizací pro vzorky s větším

množstvím plniva oxidu hlinitého (10% a 8%), což je způsobeno větším obsahem polárních částic v kompozitu. Naopak paradoxně nízká koncentrace plniva 2% Al_2O_3 v matrici EPOXYLITE 3750 LV (Obr. 15) vykazuje rychlejší pokles absorpční křivky.

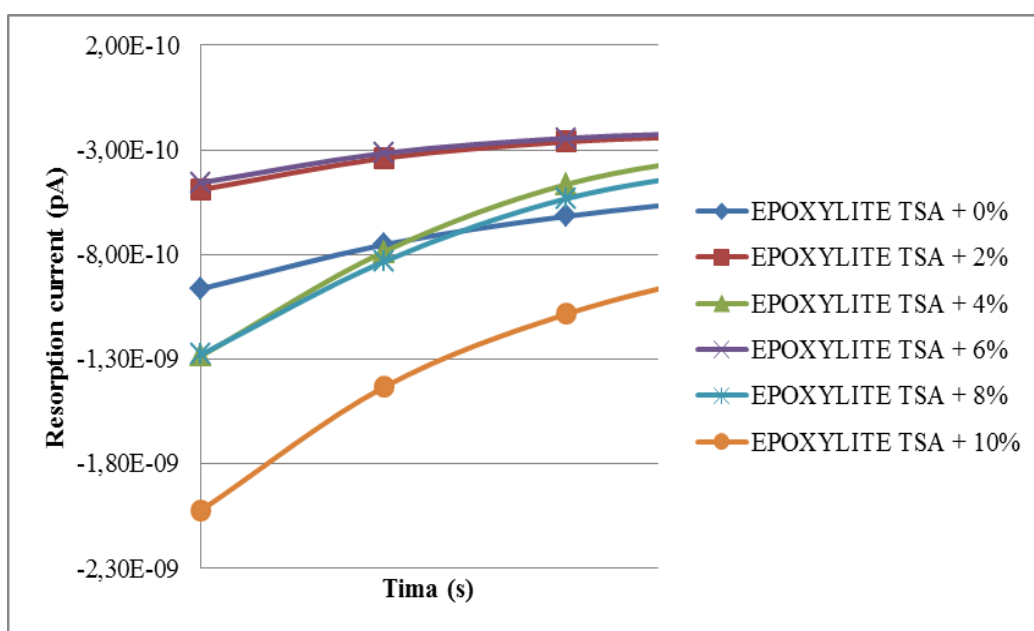


Obr. 16 Resorpční proud (EPOXYLITE 3750 LV)

Z Obr. 17 je patrný větší podíl pomalých polarizací u vzorku s větším množstvím plniva oxidu hlinitého 10%, což může být způsobeno nerovnoměrným rozptýlením plniva a vzniku shluků částic Al_2O_3 . Dále z Obr. 17 lze sledovat méně polarizačních mechanismů pro vzorky s 2% a 6% Al_2O_3 v matrici EPOXYLITE TSA 220. Rozdíl permitivit mezi mikro plnivem Al_2O_3 , které má vyšší permitivitu než neplněný EP, což může vést ke zvětšení podílů polarizace. O tom, jaký průběh polarizačních proudů (v materiálu probíhá polarizačních mechanismů více) rozhoduje struktura dielektrika, hromadění volných nosičů náboje např. na rozhraních nehomogenit, nečistot nebo vzduchových dutin. Vzrůstá-li polarizace látky, rostou dielektrické ztráty.



Obr. 17 Absorpční proud (EPOXYLITE TSA)



Obr. 18 Resorpční proud (EPOXYLITE TSA)

Resorpční proudy (Obr. 16, Obr. 18) mohou být dále použity pro stanovení redukovaných resorpčních křivek [6]. Hodnocení vlastností elektroizolačního materiálu je založeno na lineární kompenzaci resorpčních proudů. Čím vyšší je sklon redukovaných resorpčních křivek elektroizolačního materiálu, tím má lepší izolační vlastnosti.

5.3.3 Měření vnitřní rezistivity

Výsledky měření absorpce při 500 V, byly použity k výpočtu vnitřní rezistivity ρ_v ($\Omega \cdot m$) (IEC 60093:1980). Tab. 3 obsahuje výsledky měření vnitřní rezistivity. Nejvyšší hodnotu vnitřní rezistivity mají vzorky vyrobené z EPOXYLITE TSA 220 s 2% a 4% Al_2O_3 a tomu odpovídá i menší vodivost daného vzorku. Vzorky vyrobené z EPOXYLITE 3750 LV s 4% Al_2O_3 mají nejvyšší hodnotu vnitřní rezistivity v porovnání se vzorky vyrobenými s EPOXYLITE 3750 LV.

Tab. 3 Měření vnitřní rezistivity vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3

Vzorek	ρ_v ($\Omega \cdot m$)
EPOXYLITE 3750 LV + 0%	7,26E+14
EPOXYLITE 3750 LV + 2%	3,76E+14
EPOXYLITE 3750 LV + 4%	2,00E+15
EPOXYLITE 3750 LV + 6%	4,84E+14
EPOXYLITE 3750 LV + 8 %	3,09E+14
EPOXYLITE 3750 LV + 10%	4,46E+14
EPOXYLITE TSA 220 + 0%	9,07E+15
EPOXYLITE TSA 220 + 2%	2,09E+16
EPOXYLITE TSA 220 + 4%	2,13E+16
EPOXYLITE TSA 220 + 6%	8,81E+15
EPOXYLITE TSA 220 + 8 %	2,70E+15
EPOXYLITE TSA 220 + 10%	9,87E+15

Nejnižší hodnoty vnitřní rezistivity mají vzorky vyrobené z EPOXYLITE 3750 LV s 2%, 8% a 10% Al_2O_3 v porovnání s jinými vzorky. Vzorky vyrobené s EPOXYLITE TSA 220 mají větší hodnoty vnitřní rezistivity v porovnání s EPOXYLITE 3750 LV.

5.3.4 Měření elektrické pevnosti

Elektrická pevnost E_p (kV/mm) vyjadřuje odolnost EIS vůči elektrickému poli. Elektrické pole způsobuje polarizaci dielektrika, což vede ke zvětšení koncentrace volných nábojů a jejich pohyblivosti. V případě zvyšování intenzity elektrického pole,

dojde k tzv. průrazu dielektrika. Vytvoří se vodivá cesta, kterou mohou procházet značné proudy, což u pevných materiálů způsobí nevratné změny struktury.

Měření elektrické pevnosti vzorků bylo v souladu s normou ČSN EN 60243-1 ed. 2 (346463). Tab. 4 obsahuje výsledky měření elektrické pevnosti vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3 .

Tab. 4 Měření elektrické pevnosti vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3

Vzorek	E_p (kV / mm)
EPOXYLITE 3750 LV + 0%	25
EPOXYLITE 3750 LV + 2%	24
EPOXYLITE 3750 LV + 4%	24,5
EPOXYLITE 3750 LV + 6%	22,8
EPOXYLITE 3750 LV + 8%	18,8
EPOXYLITE 3750 LV + 10%	16,4
EPOXYLITE TSA + 0%	29
EPOXYLITE TSA + 2%	26,9
EPOXYLITE TSA + 4%	25
EPOXYLITE TSA + 6%	21,3
EPOXYLITE TSA + 8%	18,2
EPOXYLITE TSA + 10%	17

5.4 Měření mechanických vlastností

Měření mechanických vlastností vzorků bylo v souladu s normami ISO 179-1:2010, ISO 8256:2004, ISO 178:2010, ISO 844:2014.

Tab. 5 obsahuje výsledky měření mechanických vlastností vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3 .

Výsledky měření mechanických vlastností (pevnost v tahu, pevnost v ohybu, vrubová houževnatost viz Tab. 5) vzorků ukazují, že mechanické vlastnosti nejsou závislé na množství plniva a nevýznamný pokles těchto vlastností může být způsoben při výrobě, protože vzorky byly vyrobeny v laboratorních podmínkách (ne průmyslová výroba).

Tab. 5 Měření mechanických vlastností s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3

Vzorek	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Vrubová houževnatost ($kJ \cdot m^2$)
EPOXYLITE 3750 LV + 0%	130	300	12,3
EPOXYLITE 3750 LV + 2%	129,4	300,5	13,5
EPOXYLITE 3750 LV + 4%	128,5	228,3	12,6
EPOXYLITE 3750 LV + 6%	129,8	226,2	14,5
EPOXYLITE 3750 LV + 8%	130,3	300,2	12,8
EPOXYLITE 3750 LV + 10%	129,4	227,9	12,9
EPOXYLITE TSA + 0%	129,9	300	14,9
EPOXYLITE TSA + 2%	129,9	228,7	13,2
EPOXYLITE TSA + 4%	128,7	229,8	13,8
EPOXYLITE TSA + 6%	130,3	300,7	14,5
EPOXYLITE TSA + 8%	129,2	300,2	14,3
EPOXYLITE TSA + 10%	127,7	229,4	13,9

6 Ověření vlivů zvýšení součinitele tepelné vodivosti EIS při návrhu elektrického točivého stroje pomocí MKP

V této části disertační práce je pozornost věnována návrhu synchronního točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě. V této kapitole je uveden zjednodušený postup sestavení tepelného obvodu budícího vinutí rotoru a náhradního tepelného obvodu statoru s drážkou, v které je uloženo vinutí. Zjednodušování vyplývá z použití návrhu výpočtu tepelných obvodů jako pomůcky pro principiální pochopení souvislosti konstrukce elektrického točivého stroje, způsobu chlazení a způsobu šíření tepla, ale ne jako podklad pro výrobu takového stroje. Tepelné obvody byly sestaveny pro turboalternátor chlazený vzduchem pomocí [11], [38], [39], [40], [41], [46], [50], [51], [52], [68], [120], [121].

Ověření analytického tepelného návrhu bylo provedeno pomocí metody konečných prvků v COMSOL Multiphysics (software pro řešení fyzikálních polí). Tento způsob modelování umožňuje stanovení rozložení oteplení a tepelných toků v jednotlivých částech navrhovaného elektrického stroje. Rovněž je možné detailně

prozkoumat rozložení teplot v nejkritičtějších místech (např. permutované tyčové vinuti, čela vinutí). V současné době je modelování fyzikálních úloh pomocí metody konečných prvků (MKP) běžnou součástí pro podporu konstrukce elektrických strojů [4], [50], [51], [54], [61], [62], [63], [65], [66], [67] [76], [122].

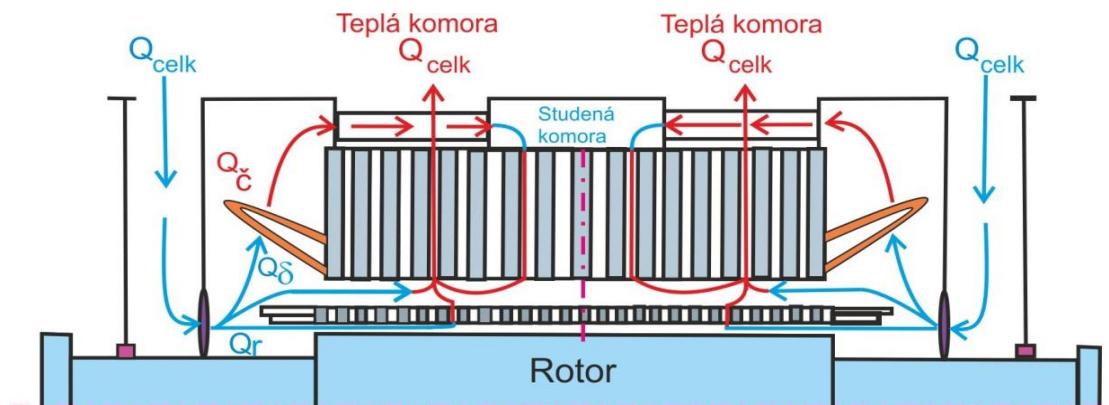
6.1 Analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě

Tepelný výpočet většinou navazuje bezprostředně na výpočet ventilační, z něhož přejímá velikosti průtoku chladiva a jejich rozdělení v navrhovaném stroji [46], [50], [51], [55], [61], [68], [69], [70], [123]. Z dílčích průtoků se pak určuje rychlost proudění v jednotlivých místech, z nichž se potom odvozuje chladicí účinek. Cílem tepelného výpočtu je zjištění středního a maximálního oteplení stroje jednotlivých částí elektrického točivého stroje. V elektrických strojích jde o izolaci a části k ní bezprostředně přiléhající, oteplení těchto míst nesmí přesáhnout hodnotu odpovídající tepelné odolnosti použitého materiálu. Když tato hodnota bude překročena, je nutno upravit ventilační výpočty nebo snížit ztráty v daném místě, což může vést k nižšímu využití stroje a zpravidla i větším rozměrům, hmotnosti a následně i ceně stroje.

Tepelný výpočet elektrického točivého stroje vychází z matematického modelu z údajů a konstant specifikujících konkrétní výpočet [38], [39], [69], [123]. Mnoho parametrů při tepelných výpočtech nelze přesně stanovit, protože mohou být závislé např. na vlastnostech použitých materiálů, konstrukčním uspořádání ale i na technologickém postupu zpracování. Mezi tyto parametry mohou patřit např. **tepelná vodivost**, součinitel přestupu tepla, **velikost a lokalizace uvažovaných ztrát**. Sdílení tepla v ustáleném stavu probíhá trojrozměrně a v tomto rozložení nelze řešit tepelné toky analyticky, převádí se trojrozměrné proudění na jednorozměrný matematický model, zavádí se tzv. tepelná síť [4], [45], [46], [47], [50], [51], [56], [69], [77], [120], [123]. Tepelný výpočet je řešením tepelných obvodů s předpokladem ekvivalentního chování tepelného a elektrického obvodu, a proto lze s výhodou využívat pro jejich řešení obdobné zákony (např. Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony).

6.1.1 Specifikace synchronního motoru

Schematické zobrazení turbogenerátoru chlazeného vzduchem s dvěma axiálními ventilátory bylo znázorněno pomocí [39], [51], [110], [50], [48].



Q_{celk} - celý objem vzduchu; Q_r - velikost procházejícího vzduchu přes rotor; Q_{δ} - velikost procházejícího vzduchu vzduchovou mezeru; Q_{ϵ} - velikost procházejícího vzduchu přes čela statorového vinutí;

Obr. 19 Schematické zobrazení turbogenerátoru chlazeného vzduchem s dvěma axiálními ventilátory

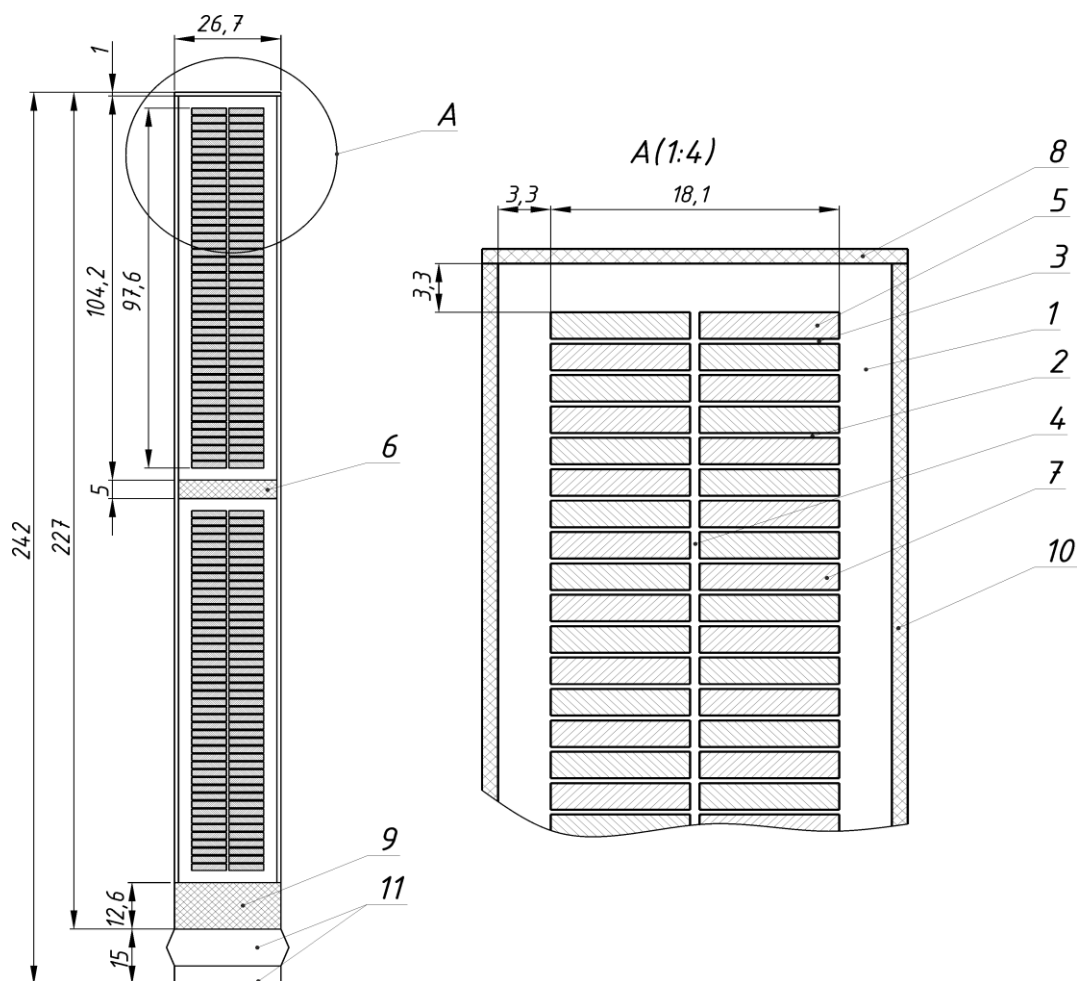
Z Obr. 19 je patrné rozdělení proudícího vzduchu přes rotor, vzduchovou mezeru a zbylé množství vzduchu bude procházet přes čela vinutí dále potrubím obcházejícím „teplou“ komoru do „studené komory“. Dále zde můžeme vidět, že ventilačními radiálními kanály protéká v části „studené“ komory jen část vzduchu, ale „teplou“ komorou protéká celý objem vzduchu.

Tab. 6 Specifikace synchronního stroje

Veličina	Hodnota	Jednotka
Zdánlivý výkon S	202	(MVA)
Činný výkon P	161600	(kW)
Otáčky n	3000	(ot/min)
Počet fází m	3	(-)
Sdružené napětí U_s	15750	(V)
Fázové napětí U_f	9093	(V)
Účinit $\cos \phi$	0,8	(-)
Frekvence f	50	(Hz)
Počet pólů	2	(-)
Počet drážek statoru Q	66	(-)
Proud statoru (fázový proud) I_l	7405	(A)
Proudová obvodová hustota A	124850	(A·m ⁻²)

Tab. 6 obsahuje základní parametry, které byly zvoleny nebo vypočteny pro elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného turbogenerátoru, pomocí [39], [51] [110] [50] [48]. Příloha VIII této práce obsahuje výkres celého synchronního stroje (příční řez) a úseku statoru pro výpočet oteplení (šířka a výška), dále výkres rotoru a vyražených otvorů ve vodiči rotoru včetně podrážkového kanálu.

Bylo zvoleno tyčové vinutí ($n_d = 2$) s permutovanou (Roebelovou) tyčí, tomu odpovídá pro napětí 15750 (V) následující uspořádání vodičů a izolace v drážce statoru (viz Obr. 20).



1 - Izolace proti železu; 2 - Izolace lamely (oboustranná); 3 - Izolace krajní lamely; 4 - Izolace mezi sloupci lamel; 5 - Vypln chybějící lamely; 6 - Mezivrstva; 7 - Holý vodič; 8 - Vložka na dno; 9 - Vložka pod klín; 10 - Vložka vůle na šířku; 11 - Klín a krček;

Obr. 20 Uspořádání izolace a vodičů v drážce statoru

Tepelné zatížení vzduchem chlazeného turbogenerátoru bylo stanoveno podle vzorců (3), (4), (5), (6), (7), (8), Tab. 7.

Tab. 7 Tepelná zatížení synchronního stroje

Veličina	Hodnota	Jednotka
Joulové ztráty ve vinutí statoru ΔP_{CuI}	224,3	(kW)
Joulové ztráty v budícím vinutí ΔP_{Cub}	421,5	(kW)
Ztráty v zubech statoru ΔP_{Fez}	105,7	(kW)
Ztráty v jádře induktu statoru ΔP_{Fej}	628	(kW)
Povrchové ztráty ΔP_{po}	8,2	(kW)
Přídavné ztráty $\Delta P_{přid}$	606	(kW)
Mechanické ztráty ΔP_m	607,1	(kW)

6.1.2 Výpočet oteplení budícího vinutí

Rotor turbogenerátoru je zásadně odlišný od rotoru synchronních strojů s vyniklými póly. Jeho základem je hřídel z kvalitní chromniklové oceli s dalšími přísadami, např. molybden, vanad [46]. Vyznačuje se dobrými magnetickými vlastnostmi a vysokou mechanickou pevností. Na rotoru se na dvou třetinách obvodu vyfrézují drážky pro založení budícího vinutí. Vinutí je zajištěno proti silovým účinkům odstředivých sil drážkovými klíny (např. bronzové [38], [39], [40], [46]). Drážkové klíny mohou být přerušované, aby se mezi nimi vytvořila mezera pro výstup chladícího vzduchu z poddrážkových kanálů, přebírají vedení proudu přilehající zuby (viz Příloha VIII). Výpočet oteplení budícího vinutí byl proveden pomocí [51], [124].

Součinitel přestupu tepla poddrážkového kanálu do chladícího vzduchu:

$$\alpha_k = 3,6 \cdot \frac{v_k^{0,8}}{d_{hk}} \quad (11)$$

kde:

α_k	součinitel přestupu tepla poddrážkového kanálu do chladícího vzduchu	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
v_k	rychlost vzduchu v poddrážkovém kanálu	$(m \cdot s^{-2})$
d_{hk}	hydraulický průměr kanálu	(m)

Součinitel přestupu tepla proražených otvorů do chladícího vzduchu:

$$\alpha_o = 3,6 \cdot \frac{v_o^{0,8}}{d_{ho}} \quad (12)$$

kde:

α_o	součinitel přestupu tepla proražených otvorů do chladicího vzduchu	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
v_o	rychlost vzduchu v proražených otvorech	$(m \cdot s^{-2})$
d_{ho}	hydraulický průměr otvorů	(m)

Výpočet součinitele přestupu tepla do vzduchové mezery:

$$\alpha_\delta = Nu \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d_{hax}} \quad (13)$$

kde:

α_δ	součinitel přestupu tepla do vzduch. mezery	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
Nu	Nusseltovo číslo	$(-)$

$$Nu = 0,0288 \cdot Re_z^{0,8} \cdot (1 + 0,619 \cdot z^2)^{0,4} \quad (14)$$

Re_z	Reynoldsovo číslo pro axiální proudění	$(-)$
z	pomocný součinitel	$(-)$
λ_{vzd}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
d_{hax}	uvažovaný hydraulický průměr vzduch. mezery	(m)

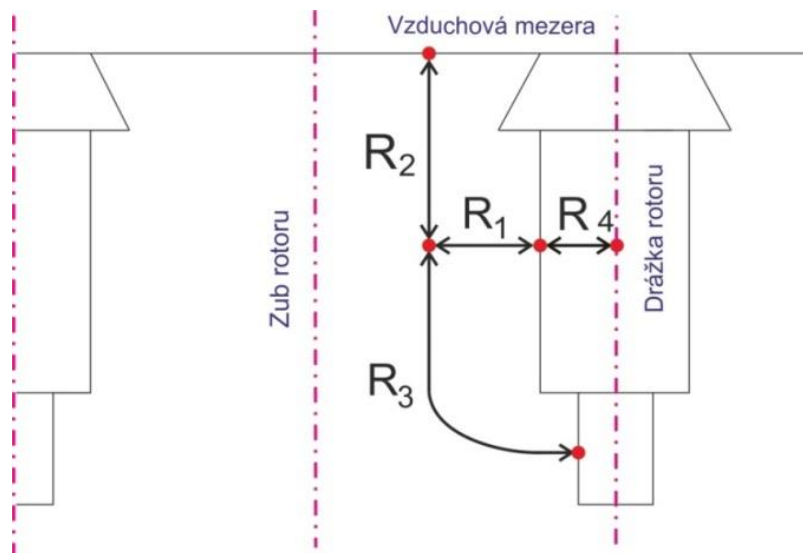
Tab. 8 obsahuje hodnoty součinitelů přestupu tepla ((11), (12), (13)).

Tab. 8 Hodnoty součinitelů přestupu tepla

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel přestupu tepla podrážkového kanálu do chladicího vzduchu α_k	140	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
Součinitel přestupu tepla proražených otvorů do chladicího vzduchu α_o	120	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
Výpočet součinitele přestupu tepla do vzduchové mezery α_δ	130	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

Tepelné odpory (určení vychází z Obr. 21) jsou počítány na 1 (m) délky rotoru

a jednu polovinu drážky (jedna boční stěna), předpokládáno, že teplo šíří symetricky na obě strany drážky a po celé délce rotoru. Elektrický odpor vodičů je závislý na teplotě tohoto vodiče (s teplotou elektrický odpor narůstá).



R_1 - tepelný odpor z vodiče přes izolaci do zubu rotoru; R_2 - tepelný odpor přestupu tepla ze zubu rotoru do vzduchové mezery mezi rotorem a statorem; R_3 - tepelný odpor přestupu tepla ze zubu do poddrážkového kanálu; R_4 - tepelný odpor přestupu tepla z mědi rotorového vinutí do proražených otvorů v mědi vodičů;

Obr. 21 Tepelné odpory na rotoru turbogenerátoru

R_1 je tepelný odpor přestupu tepla z vodiče přes izolaci do zubu rotoru:

$$R_1 = \frac{d_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{iz}} + \frac{d_{vz}}{\lambda_{vz} \cdot S_{iz}} + \frac{l_1}{\lambda_{Fe} \cdot S_{iz}} \quad (15)$$

kde:

R_1	tepelný odpor z vodiče přes izolaci do zubu rotoru	(K·W ⁻¹)
d_{iz}	tloušťka izolace	(m)
d_{vz}	vzduchová mezera mezi izolací a zubem rotoru	(m)
l_1	vzdálenost tepelného uzlu od izolace do zubu	(m)
S_{iz}	plocha styku vodiče s izolací následně s rotorem	(m)
λ_{iz}	součinitel tepelné vodivosti izolace	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{vz}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{Fe}	součinitel tepelné vodivosti rotoru	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)

R_2 je tepelný odpor přestupu tepla ze zubu rotoru do vzduchové mezery mezi

rotorem a statorem:

$$R_2 = \frac{l_2}{\lambda_{Fe} \cdot S_2} + \frac{l_r}{\alpha_\delta \cdot S_s} \quad (16)$$

kde:

R_2	tepelný odpor ze zuby rotoru do vzduchové mezery mezi rotorem a statorem	$(K \cdot W^{-1})$
l_2	vzdálenost tepelného uzlu od povrchu rotoru	(m)
l_r	délka rotoru	(m)
S_2	plocha, kterou prochází tepelný tok z pomyslného uzlu k povrchu rotoru	(m^2)
S_s	plocha součtem poloviny povrchu zuby rotoru a třetiny povrchu klínu	(m^2)
α_δ	součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
λ_{Fe}	součinitel tepelné vodivosti rotoru	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$

R_3 je tepelný odpor přestupu tepla ze zuby do podrážkového kanálu:

$$R_3 = \frac{l_3}{\lambda_{Fe} \cdot S_3} + \frac{l_r}{\alpha_k \cdot d_{hk}} \quad (17)$$

kde:

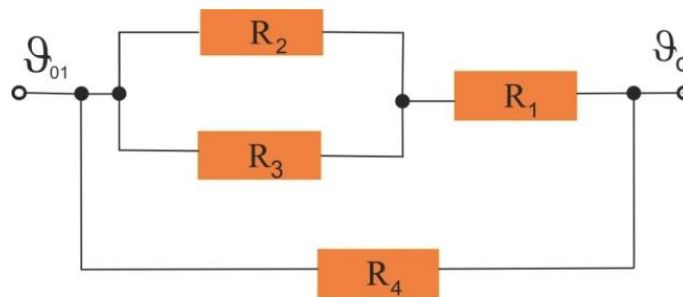
R_3	tepelný odpor ze zuby rotoru do podrážkového kanálu	$(K \cdot W^{-1})$
l_3	vzdálenost od uzlu ke stěně podrážkového kanálu	(m)
l_r	délka rotoru	(m)
S_3	plocha od uzlu ke stěně podrážkového kanálu	(m^2)
d_{hk}	hydraulický průměr kanálu	(m)
α_k	součinitel přestupu tepla z podrážkového kanálu do chladícího vzduchu	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
λ_{Fe}	součinitel tepelné vodivosti rotoru	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$

R_4 je tepelný odpor přestupu tepla z mědi rotorového vinutí do proražených otvorů v mědi vodičů:

$$R_4 = \frac{l_r}{\alpha_o \cdot S_4} \quad (18)$$

kde:

R_4	tepelný odpor z mědi do proražených otvorů	(K·W ⁻¹)
l_r	délka rotoru	(m)
S_4	plocha stěn proražených otvorů	(m ²)
α_o	součinitel přestupu tepla povrchu otvorů	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)



R_1 - tepelný odpor z vodiče přes izolaci do zubu rotoru; R_2 - tepelný odpor přestupu tepla ze zubu rotoru do vzduchové mezery mezi rotorem a statorem; R_3 - tepelný odpor přestupu tepla ze zubu do podrážkového kanálu; R_4 - tepelný odpor přestupu tepla z mědi rotorového vinutí do proražených otvorů v mědi vodičů;

Obr. 22 Náhradní tepelný obvod budícího vinutí

Po určení tepelných odporů může být sestaven náhradní tepelný obvod (Obr. 22, kde G_{01} je oteplení vzduchu ve ventilačním kanálu v okolí zubu, G_o je oteplení vzduchu v okolí proražených otvorů).

$R_{výsl}$ výsledný tepelný odpor:

$$R_{výsl} = \frac{R_4 \cdot R_{123}}{R_4 + R_{123}} \quad (19)$$

kde:

$R_{výsl}$	výsledný tepelný odpor	(K·W ⁻¹)
R_4	tepelný odpor z mědi do proražených otvorů	(K·W ⁻¹)
R_{123}	součet tepelných odporů R_1 a R_{23}	(K·W ⁻¹)

R_{23} paralelní kombinace tepelných odporů R_2 a R_3 ($K \cdot W^{-1}$)

Následně může být vypočítáno střední dovolené oteplení rotorového vinutí:

$$\Delta \vartheta_{rv} = \Delta P_{Cu/lr/dr} \cdot R_{vysl} \quad (20)$$

kde:

$\Delta \vartheta_{rv}$ střední oteplení rotorového vinutí (K)

$\frac{K}{\Delta P_{Cu/lr/dr}}$ ztráty na drážky a délky rotoru (W)

orek

ci

hod

not

dov

olen

ého

$$\Delta P_{Cudr/1m/dr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{Cudr/1m}}{N_{dr}} \quad (21)$$

$\Delta P_{Cudr/1m}$ ztráty na 1 (m) délky rotoru (W)

N_{dr} počet navinutých drážek rotoru (-)

R_{vysl} výsledný tepelný odpor ($K \cdot W^{-1}$)

oteplení je nutno provést s ohledem na pracovní podmínky elektrického točivého stroje (teplota okolí (nad 40 °C) a nadmořskou výšku (nad 1000 m)) a platné normy (viz Příloha IX).

Střední teplota rotorového vinutí:

$$T_{rv} = \Delta \vartheta_{rv} + 40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (22)$$

kde:

$\Delta \vartheta_{rv}$ střední oteplení rotorového vinutí (K)

T_{rv} střední teplota rotorového vinutí (°C)

Tab. 9 obsahuje výsledky výpočtů tepelných odporů, střední dovolené oteplení rotorového vinutí a střední teplotu rotorového vinutí (vzorce (11 - 22)).

Podle hodnoty teploty rotorového vinutí může být určena odpovídající třída izolace (viz Příloha I). $T_{rv} = 130 \text{ } ^\circ\text{C}$, což je hodnota odpovídající použití izolace třídy F.

Tab. 9 Výsledky výpočtů oteplení budícího vinutí

Veličina	Hodnota	Jednotka
Tepelný odpor z vodiče přes izolaci do zubu rotoru R_1	0,0566	(K·W ⁻¹)
Tepelný odpor ze zubu rotoru do vzduchové mezery R_2	0,1727	(K·W ⁻¹)
Tepelný odpor ze zubu do podrážkového kanálu R_3	0,2209	(K·W ⁻¹)
Tepelný odpor z vinutí do proražených otvorů v mědi R_4	0,1309	(K·W ⁻¹)
Výpočet paralelní kombinace odporů R_2 a R_3	0,0969	(K·W ⁻¹)
Součet odporů R_1 a R_{23}	0,1535	(K·W ⁻¹)
Paralelní kombinace R_4 a R_{123} ($R_{výsl}$)	0,0707	(K·W ⁻¹)
Ztráty v drážkách ΔP_{Cudr}	324612	(W)
Ztráty na 1 [m] délky rotoru $\Delta P_{Cudr/1m}$	70721	(W)
Ztráty na jednu polovinu drážky $\Delta P_{Cudr/1m/0,5dr}$	1263	(W)
Střední dovolené oteplení rotorového vinutí $\Delta \vartheta_{rv}$	89,225	(K)
Střední teplota rotorového vinutí T_{rv}	130	(°C)

6.1.3 Výpočet oteplení statorového vinutí (oteplení induktu)

Výpočet oteplení vybraného úseku statoru s radiálními kanály vychází z předpokladu rovnoměrného rozložení tepelných a chladících podmínek v celém elektrickém stroji. A proto z celého statoru s radiálními kanály byl vybrán úsek příslušný jedné drážkové rozteči a polovině rozteče radiálního kanálu. Výpočet oteplení vybraného úseku statoru s radiálními kanály obsahuje i výpočet ztrát, které v něm vznikají. Ve výpočtu, pro zjednodušení, není zohledněno šíření tepla mezi drážkovou částí a čelní částí vinutí, z důvodů samostatných výpočtu a za předpokladu, že oteplení čelní a drážkové části vinutí bude mít podobné hodnoty, případně bude se lišit v jednotkách stupňů Kelvinů (Celsia).

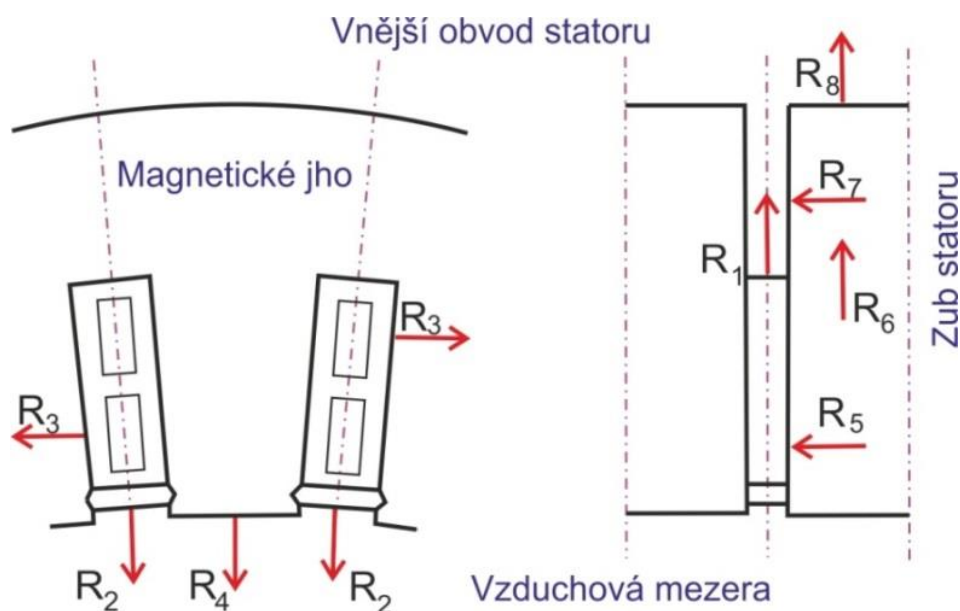
Postup výpočtu oteplení induktu převzat z [38], [51]. Dále pro výpočet byly potřebné následující hodnoty součinitelů tepelné vodivosti, které byly převzaty z [38], [39], [46], [50], [51], [123], [125], Tab. 10.

Velikost vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace, které vznikají při technologii výroby izolace δ_{vzd} se rovnala 0,0001 (m).

Tab. 10 Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti použité izolace λ_{iz}	0,2	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Součinitel tepelné vodivosti vzduchu λ_{vzd}	0,026	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Součinitel tepelné vodivosti plechů v radiálním směru statoru λ_{Fer}	29	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Součinitel tepelné vodivosti plechového svazku v axiálním směru statoru λ_{Feax}	1	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)

Schematické zobrazení stroje na Obr. 19 a Obr. 23 budou použity k výpočtu součinitele přestupu tepla, který následně bude použit pro výpočet tepelných odporů.



R_1 – tepelný odpor z vinutí do ventilačního kanálu; R_2 – tepelný odpor z mědi do vzduchové mezery; R_3 – tepelný odpor z mědi do zubu; R_4 – tepelný odpor ze vzduchu do vzduchové mezery; R_5 – tepelný odpor ze zubu do ventilačního otvoru; R_6 – tepelný odpor z plechů zubu do plechů jha; R_7 – tepelný odpor z plechů jha do ventilačního kanálu; R_8 – tepelný odpor z plechů jha na vnější obvod statoru;

Obr. 23 Úsek statoru turbogenerátoru pro výpočet oteplení

Dále zde můžeme vidět, že ventilačními radiálními kanály protéká část vzduchu, ale „teplou“ komorou protéká celý objem vzduchu. Rychlost proudění a s ní také součinitel přestupu tepla bude v každé části odlišný, z toho důvodu a z důvodu doporučení a závěru v [51] výsledná hodnota součinitele přestupu tepla bude určena jako aritmetický průměr těchto dvou hodnot.

Korekční součinitel se určuje graficky z [70] a je funkcí podílu výšky zubu a hydraulického průřezu kanálu a je shodný pro „studený“ i „teplý“ kanál.

Součinitel přestupu tepla v oblasti zubů:

$$\alpha_z = (33 \cdot \sqrt{v} - 22) \cdot \varepsilon_t \quad (23)$$

kde:

α_z	součinitel přestupu tepla v oblasti zubů	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
v	rychlost proudění v oblasti zubů	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
v_{zsk}	„studená“ komora	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
v_{ztk}	„teplá“ komora	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
ε_t	korekční součinitel	(-)

Součinitel přestupu tepla ze zubů do ventilačního kanálu:

$$\alpha_z = \frac{\alpha_{kzsk} + \alpha_{kztk}}{2} \quad (24)$$

kde:

α_z	součinitel přestupu tepla ze zubů do ventilačního kanálu	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
α_{zsk}	„studená“ komora	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
α_{ztk}	„teplá“ komora	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$

Součinitel přestupu tepla ze zubů do magnetického jha:

$$\alpha_j = \frac{\alpha_{kjsk} + \alpha_{kjtk}}{2} \quad (25)$$

kde:

α_z	součinitel přestupu tepla ze zubů do magnetického jha	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
α_{jsk}	„studená“ komora	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
α_{jtk}	„teplá“ komora	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$

Tab. 11 obsahuje hodnoty součinitelů přestupu tepla získané pomocí vzorců (23 - 25) [51], [70].

Tab. 11 Hodnoty součinitelů přestupu tepla

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel přestupu tepla ze zubů do ventilačního kanálu		
„studená“ komora α_{zsk}	225,211	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
„teplá“ komora α_{ztk}	180,063	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
aritmetický průměr α_z	202,637	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
Součinitel přestupu tepla ze zubů do magnetického jha		
„studená“ komora α_{jsk}	112,780	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
„teplá“ komora α_{jtk}	88,137	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
aritmetický průměr α_j	100,308	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

Pokud by bylo možné nalézt materiály s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti, klesly by tepelné odpory a tím by bylo možné navýšit využití stroje, zmenšit rozměry stroje (např. menší vrstva izolace) a tím ovlivnit i cenu stroje. **A proto v této části práce bude proveden výpočet tepelných odporů induktu s hodnotou součinitele tepelné vodivosti izolace $\lambda_{iz} = 0,2$ (W·m⁻¹·K⁻¹), $\lambda_{iz} = 0,26$ (W·m⁻¹·K⁻¹), $\lambda_{iz} = 0,6$ (W·m⁻¹·K⁻¹) pomocí vzorců (26 - 33) a výsledky jsou uvedené v Tab. 12.**

R_I je tepelný odpor na cestě z vinutí statoru do ventilačního (radiálního) kanálu:

$$R_I = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot o_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot o_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot o_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} \quad (26)$$

kde:

R_I	tepelný odpor na cestě z vinutí statoru do ventilačního (radiálního) kanálu	(K·W ⁻¹)
δ_{iz}	velikost vrstvy izolace	(mm)
δ_{vzd}	velikost vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace (vznikají při technologii výrovy izolace)	(mm)
λ_{iz}	součinitel tepelné vodivosti použité izolace	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{vzd}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
o_{iz}	obvod izolace	(mm)

\check{s}_k	šířka radiálního kanálu	(mm)
α_z	součinitel přestupu tepla v oblasti zubů	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

R_2 je tepelný odpor na cestě z vodiče statoru do vzduchové mezery:

$$R_2 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{h_{kl}}{\lambda_{kl} \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} \quad (27)$$

kde:

R_2	tepelný odpor na cestě z vodiče do vzduch. mezery	(K·W ⁻¹)
δ_{iz}	velikost vrstvy izolace	(mm)
δ_{vzd}	velikost vzduch. vrstviček mezi vrstvami izolace	(mm)
h_{kl}	výška klinu	(mm)
λ_{iz}	součinitel tepelné vodivosti použité izolace	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{vzd}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{kl}	součinitel tepelné vodivosti klinu	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
\check{s}_d	šířka drážky statoru	(mm)
α_δ	součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

R_3 je tepelný odpor na cestě z vinutí statoru do zubu:

$$R_3 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot o_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot o_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{s_{z3}}{2}}{\lambda_{Fer} \cdot o_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (28)$$

kde:

R_3	tepelný odpor na cestě z vinutí statoru do zubu	(K·W ⁻¹)
δ_{iz}	velikost vrstvy izolace	(mm)
δ_{vzd}	velikost vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace (vznikají při technologii výroby izolace)	(mm)
s_{z3}	šířka zubu	(mm)
λ_{iz}	součinitel tepelné vodivosti použité izolace	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{vzd}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ_{Fer}	součinitel tepelné vodivosti plechů v radiálním směru	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)

\check{s}_p	rozdělení plechového svazku na pakety o zvolené šířce	(mm)
o_{iz}	obvod izolace	(mm)

R_4 je tepelný odpor na cestě ze zubu do vzduchové mezery:

$$R_4 = \frac{\frac{h_z}{2}}{\lambda_{Fer} \cdot \check{s}_{z2} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot \check{s}_{z1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (29)$$

kde:

R_4	tepelný odpor na cestě ze zubu do vzduchové mezery	(K·W ⁻¹)
h_z	výška zubu	(mm)
λ_{Fer}	součinitel tepelné vodivosti plechů v radiálním směru	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
\check{s}_p	rozdělení plechového svazku na pakety o zvolené šířce	(mm)
\check{s}_{z2}	šířka zubu	(mm)
\check{s}_{z1}	šířka zubu	(mm)
α_δ	součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

R_5 je tepelný odpor na cestě ze zubu do ventilačního (radiálního) kanálu:

$$R_5 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{\lambda_{Feax} \cdot \check{s}_{z3} \cdot h_z} + \frac{1}{\alpha_z \cdot \check{s}_{z3} \cdot h_z} \quad (30)$$

kde:

R_5	tepelný odpor na cestě ze zubu do vent. kanálu	(K·W ⁻¹)
h_z	výška zubu	(mm)
λ_{Feax}	součinitel tepelné vodivosti plechů v axiálním směru	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
\check{s}_p	rozdělení plechového svazku na pakety o zvolené šířce	(mm)
\check{s}_{z3}	šířka zubu	(mm)
α_z	součinitele přestupu tepla ze zubů do vent. kanálu	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

R_6 je tepelný odpor na cestě ze zubu do jha:

$$R_6 = \frac{\frac{h_z}{2}}{\lambda_{Fer} \cdot \check{s}_{z4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{h_j}{2}}{\lambda_{Fer} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (31)$$

kde:

R_6	tepelný odpor na cestě ze zubu do jha	$(K \cdot W^{-1})$
h_z	výška zubu	(m)
h_j	výška jha statoru	(m)
λ_{Fer}	součinitel tepelné vodivosti plechů v radiálním směru	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
\check{s}_p	rozdělení plechového svazku na pakety o zvolené šířce	(mm)
\check{s}_{j1}	šířka jha statoru	(mm)
\check{s}_{z4}	šířka zubu	(mm)

R_7 je tepelný odpor na cestě ze jha do ventilačního (radiálního) kanálu:

$$R_7 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{\lambda_{Feax} \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_j} + \frac{1}{\alpha_j \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_j} \quad (32)$$

kde:

R_7	tepelný odpor na cestě ze jha do ventilačního (radiálního) kanálu	$(K \cdot W^{-1})$
h_j	výška jha statoru	(m)
λ_{Feax}	součinitel tepelné vodivosti plechů v axiálním směru	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
\check{s}_p	rozdělení plechového svazku na pakety o zvolené šířce	(mm)
\check{s}_{j2}	šířka jha statoru	(mm)
α_j	součinitel přestupu tepla ze zubů do magnetického jha	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

R_8 je tepelný odpor na cestě ze jha na vnější obvod statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_j}{2}}{\lambda_{Fer} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (33)$$

kde:

R_8	tepelný odpor na cestě ze jha na vnější obvod statoru	$(K \cdot W^{-1})$
h_j	výška jha statoru	(m)
λ_{Fer}	součinitel tepelné vodivosti plechů v radiálním směru	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
\check{s}_p	rozdělení plechového svazku na pakety	(mm)
\check{s}_{j3}	šířka jha statoru	(mm)
\check{s}_{j4}	šířka jha statoru	(mm)
$\alpha_{\check{c}}$	součinitele přestupu tepla čel vinutí	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

Postup výpočtu okolních teplot uvažovaného úseku byl proveden pomocí [2], [3].

$\Delta \mathcal{G}_{01}$ je oteplení vzduchu ve ventilačním kanálu v okolí zubu:

$$\Delta \mathcal{G}_{01} = \Delta \mathcal{G}_{02} + \frac{\Delta P_{F_{ez}} + \Delta P_{C_{ud}}}{2 \cdot c_v \cdot Q_{rot}} \quad (34)$$

kde:

$\Delta \mathcal{G}_{01}$	oteplení vzduchu ve ventilačním kanálu v okolí zubu	(K)
$\Delta \mathcal{G}_{02}$	oteplení vzduchu ve vzduchové mezeře	(K)
$\Delta P_{F_{ez}}$	ztráty v zubech statoru (ztráty v železe)	(kW)
$\Delta P_{C_{ud}}$	ztráty v drážkové části vinutí induktu	(kW)
c_v	objemové měrné teplo vzduchu	$(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$
Q_{rot}	množství chladiva procházející rotorem	$(m^3 \cdot s^{-1})$

$\Delta \mathcal{G}_{02}$ je oteplení vzduchu ve vzduchové mezeře:

$$\Delta \mathcal{G}_{02} = \frac{\Delta P_p + \Delta P_{C_{ub}}}{c_v \cdot Q_{rot}} \quad (35)$$

kde:

$\Delta \mathcal{G}_{02}$	oteplení vzduchu ve vzduchové mezeře	(K)
ΔP_p	povrchové ztráty	(kW)
$\Delta P_{C_{ub}}$	Joulovy ztráty v budícím vinutí	(kW)
c_v	objemové měrné teplo vzduchu	$(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$
Q_{rot}	množství chladiva procházející rotorem	$(m^3 \cdot s^{-1})$

$\Delta \mathcal{G}_{04}$ je oteplení vzduchu ve ventilačním kanálu v okolí jha:

$$\Delta \mathcal{G}_{04} = \Delta \mathcal{G}_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rot}} \quad (36)$$

kde:

$\Delta \mathcal{G}_{04}$	oteplení vzduchu ve ventilačním kanálu v okolí jha	(K)
$\Delta \mathcal{G}_{02}$	oteplení vzduchu ve vzduchové mezeře	(K)
ΔP_{Fez}	ztráty v zubech statoru (ztráty v železe)	(kW)
ΔP_{Cud}	ztráty v drážkové části vinutí induktu	(kW)
ΔP_{Fej}	ztráty v jádře induktu statoru (ztráty v železe)	(kW)
c_v	objemové měrné teplo vzduchu	(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)
Q_{rot}	množství chladiva procházející rotorem	(m ³ ·s ⁻¹)

$\Delta \mathcal{G}_{03}$ je oteplení vzduchu vystupujícím z ventilačního kanálu:

$$\Delta \mathcal{G}_{03} = \Delta \mathcal{G}_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rot}} \quad (37)$$

kde:

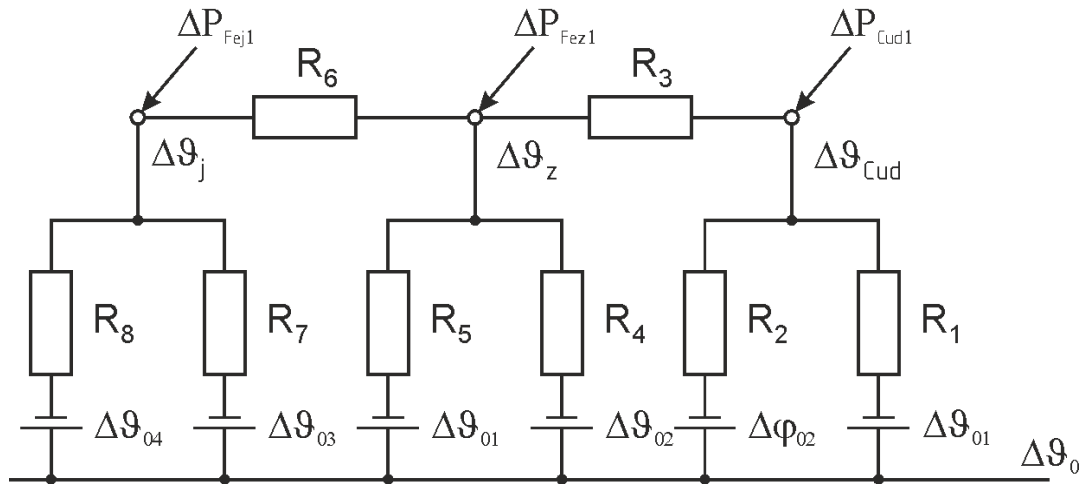
$\Delta \mathcal{G}_{03}$	oteplení vzduchu vystupujícím z ventilačního kanálu	(K)
$\Delta \mathcal{G}_{02}$	oteplení vzduchu ve vzduchové mezeře	(K)
ΔP_{Fez}	ztráty v zubech statoru (ztráty v železe)	(kW)
ΔP_{Cud}	ztráty v drážkové části vinutí induktu	(kW)
ΔP_{Fej}	ztráty v jádře induktu statoru (ztráty v železe)	(kW)
c_v	objemové měrné teplo vzduchu	(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)
Q_{rot}	množství chladiva procházející rotorem	(m ³ ·s ⁻¹)

Náhradní tepelné schéma uvažovaného úseku statoru je na Obr. 24. Ve schématu jsou naznačeny tři uzly:

- $\Delta \mathcal{G}_{Cud}$ (K) oteplení vinutí v drážkové části,
- $\Delta \mathcal{G}_z$ (K) oteplení zubů,

- $\Delta \vartheta_j$ (K) oteplení jha statoru.

Tyto hodnoty představují oteplení jednotlivých částí uvažovaného úseku statoru a budou představovat neznámé proměnné ve výpočtu.



Obr. 24 Náhradní tepelné schéma uvažovaného úseku statoru pro výpočet oteplení

Pomocí metody uzlových napětí byly sestavené rovnice pro nalezení neznámých oteplení.

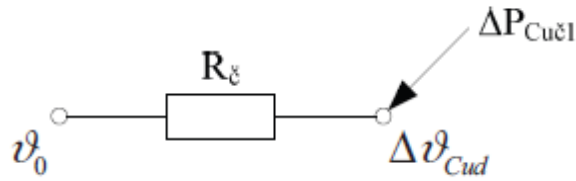
$$\frac{\Delta \vartheta_{Cud} - \Delta \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\Delta \vartheta_{Cud} - \Delta \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\Delta \vartheta_{Cud} - \Delta \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (38)$$

$$\frac{\Delta \vartheta_z - \Delta \vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\Delta \vartheta_z - \Delta \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\Delta \vartheta_z - \Delta \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\Delta \vartheta_z - \Delta \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fz1} \quad (39)$$

$$\frac{\Delta \vartheta_j - \Delta \vartheta_z}{R_6} + \frac{\Delta \vartheta_j - \Delta \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\Delta \vartheta_j - \Delta \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fj1} \quad (40)$$

Výsledky řešení této soustavy rovnic jsou v Tab. 12.

Náhradní tepelný obvod čel vinuti je velmi jednoduchý, viz Obr. 25.



Obr. 25 Náhradní tepelné schéma čel vinutí

Výpočet součinitele přestupu tepla čel vinutí α_{ξ} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$):

$$\alpha_{\xi} = Nu \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d_h} \quad (41)$$

kde:

α_{ξ}	součinitele přestupu tepla čel vinutí	($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
Nu	Nusseltovo číslo	(-)
λ_{vzd}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
d_h	hydraulický průměr tyče vinutí	(m)

Pro výpočet byl zaveden součinitel tepla (fiktivní) α_{ξ}' ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), který zohledňoval technologické vlivy výroby čel (vzduchové vrstvičky v izolaci):

$$\alpha_{\xi}' = \frac{\alpha_{\xi} \cdot \lambda_{vzd}}{\lambda_{vzd} + \delta_{vzd} \cdot \alpha_{\xi}} \quad (42)$$

kde:

α_{ξ}'	součinitele přestupu tepla čel vinutí (fiktivní)	($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
α_{ξ}	součinitele přestupu tepla čel vinutí	($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
λ_{vzd}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
δ_{vzd}	velikost vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace (vznikají při technologii výroby izolace)	(m)

Výpočet tepelného odporu mezi čely a okolím R_{ξ} :

$$R_{\xi} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot o_{\xi} \cdot l_{\xi}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot o_{\xi} \cdot l_{\xi}} + \frac{1}{k_{\xi} \cdot \alpha_{\xi}' \cdot o_{\xi} \cdot l_{\xi}} \quad (43)$$

kde:

R_{ε}	tepelný odpor mezi čely a okolím	(K·W ⁻¹)
δ_{iz}	velikost vrstvy izolace	(m)
δ_{vzd}	velikost vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace	(m)
k_{ε}	činitel zmenšení plochy vlivem vložek a úvazků v čelech	(-)
α_{ε}'	součinitele přestupu tepla čel vinutí (fiktivní)	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
o_{ε}	obvod tyče čela vinutí	(m)
l_{ε}	obvod tyče čela vinutí	(m)

Střední hodnota oteplení byla určena jako vážený průměr obou oteplení, protože rozdíl oteplení drážkové a čelní části nebyl velký:

$$\Delta U_{Custř} = \frac{\Delta U_{Cud} \cdot l_d + \Delta U_{\varepsilon} \cdot l_{\varepsilon}}{l_d + l_{\varepsilon}} \quad (44)$$

kde:

$\Delta \vartheta_{Custř}$	střední hodnotu oteplení statorového vinutí	(K)
$\Delta \vartheta_{Cud}$	oteplení vinutí v drážkové části	(K)
$\Delta \vartheta_{\varepsilon}$	oteplení vinutí v čelech	(K)
l_d	délka vodiče v drážkové části induktu	(m)
l_{ε}	obvod tyče čela vinutí	(m)

Střední teplota statorového vinutí $\Delta \vartheta_{Cu}$ (°C):

$$T_{Cu} = \Delta U_{Custř} + 40 \quad (45)$$

Účelem tepelných výpočtů je zjištění střední a maximální oteplení jednotlivých částí elektrických zařízení, které jsou v bezprostředním styku s izolací elektrického točivého stroje. Jak již bylo popsáno, s rostoucím zatížením roste oteplení aktivních částí, což může vést ke zvýšenému namáhání izolace. Střední teplota statorového vinutí $\Delta \vartheta_{Cu}$ °C se liší o 3,98 °C v případě, že hodnota součinitele tepelné vodivosti použité izolace z 0,2 (W·m⁻¹·K⁻¹) bude zvýšena na 0,26 (W·m⁻¹·K⁻¹). Další variantou bylo zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti použité izolace z 0,2 (W·m⁻¹·K⁻¹) na 0,6 (W·m⁻¹·K⁻¹) a výsledkem bylo snížení o 8,9 °C střední teploty statorového

vinutí.

Teplota rotorového vinutí $T_{rv} = 130$ °C, což odpovídá třídě izolace F.

Tab. 12 Výsledky výpočtů oteplení statorového vinutí (oteplení induktu)

Veličina	Jednotka	Hodnota		
		$\lambda_{iz} = 0,2$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\lambda_{iz} = 0,26$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\lambda_{iz} = 0,6$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
R_1	(K·W ⁻¹)	13,10	11,06	7,23
R_2	(K·W ⁻¹)	99,66	92,51	79
R_3	(K·W ⁻¹)	2,69	2,20	1,26
R_4	(K·W ⁻¹)	11,75	11,75	11,75
R_5	(K·W ⁻¹)	2,11	2,11	2,11
R_6	(K·W ⁻¹)	25,97	25,97	25,97
R_7	(K·W ⁻¹)	0,61	0,61	0,61
R_8	(K·W ⁻¹)	10,43	10,43	10,43
$R_{\check{c}}$	(K·W ⁻¹)	0,04	0,037	0,033
Q_{rot}	(m ³ ·s ⁻¹)	3,5	3,5	3,5
$\Delta \mathcal{G}_{Cud}$	(K)	44,46	42,80	35,35
$\Delta \mathcal{G}_z$	(K)	31,02	30,65	29,47
$\Delta \mathcal{G}_j$	(K)	41,32	41,31	41,28
$\Delta \mathcal{G}_{01}$	(K)	6,622	6,622	6,622
$\Delta \mathcal{G}_{02}$	(K)	5,209	5,209	5,209
$\Delta \mathcal{G}_{03}$	(K)	15,647	15,647	15,647
$\Delta \mathcal{G}_{04}$	(K)	11,841	11,841	11,841
$\Delta \mathcal{G}_{\check{c}}$	(K)	58,70	54,30	48,42
$\Delta \mathcal{G}_{Custř}$	(K)	51,75	47,77	42,85
T_{Cu}	(°C)	91,75	87,77	82,85

Z výše popsaných výpočtů lze předpokládat, že přidáním vhodných plniv by bylo možné výrazně zvýšit tepelnou vodivost elektroizolačních systémů, zlepšit odvod tepelných ztrát a tím i zatížit stroj větší hodnotou proudu a proto v následující kapitole bude ověřen analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje pomocí MKP.

6.2 Ověření analytického tepelného návrhu pomocí MKP

Tepelné poměry v elektrickém točivém stroji dnes je možné modelovat, kromě výše popsané metody náhradní tepelné sítě, také pomocí metody konečných prvků (MKP). Níže popsané příklady byly vypočítány pomocí metody konečných prvků v COMSOL Multiphysics (software pro řešení fyzikálních polí).

6.2.1 Okrajové podmínky v MKP

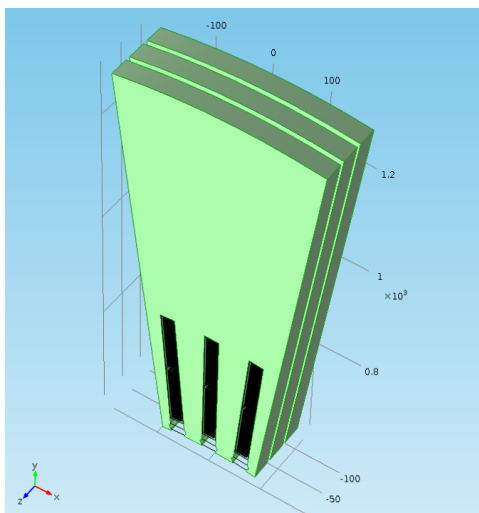
Obecně mají termické analýzy dvě základní okrajové podmínky, které mají být stanoveny: Dirichletovu jedná se o nastavení teploty okolního vzduchu a Neumanovu jedná se o určení součinitele prostupu tepla (Obr. 27).

Tab. 13 Materiálové vlastnosti

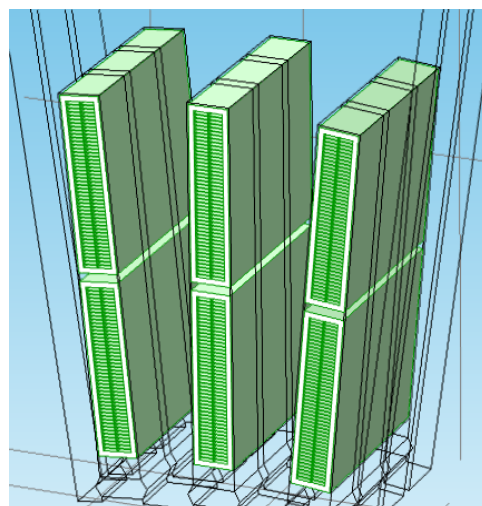
Materiál	Součinitele tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Statorové vinuti	$\lambda = 385$	390	8900
Statorové jádro (rad. směr)	$\lambda = 45$	460	7900
Statorové jádro (ax. směr)	$\lambda = 4,36$	460	7900
Rotorové jádro	$\lambda = 45$	460	7900-
Vzduch	$\lambda = 0,03$	1000	1,3

V programu COMSOL Multiphysics byly nadefinované materiály, které jsou použité při stavbě reálného synchronního stroje (např. měď, železné plechy viz Tab. 13). Část modelu synchronního stroje vytvořeného pomocí MKP je vidět na Obr. 26 - Obr. 28 (výpočet byl proveden pro celý stroj).

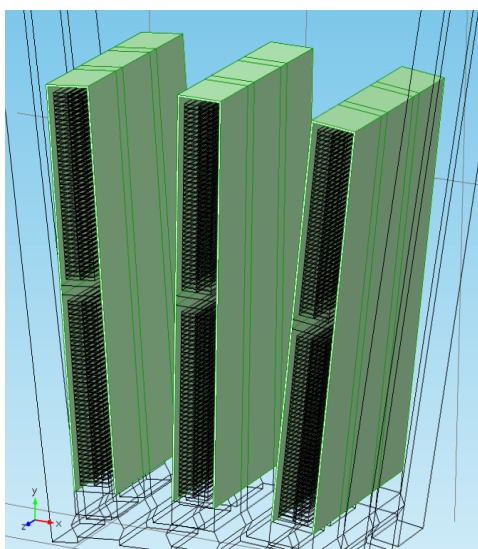
Metoda konečných prvků je založena na diskretizaci spojitého problému do určitého konečného počtu prvků (měli by mít co nejjednodušší geometrický tvar) - vytvoření určitého fyzikálního modelu oblasti. Parametry daného modelu jsou určovány z vlastností jednotlivých uzlů, což je místo spojení jednotlivých elementárních prvků.



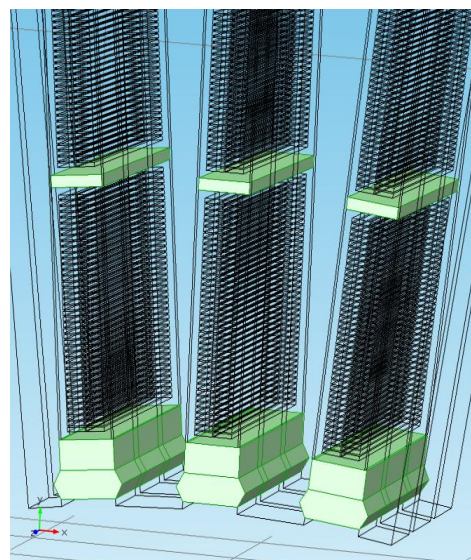
a) Statorové plechy;



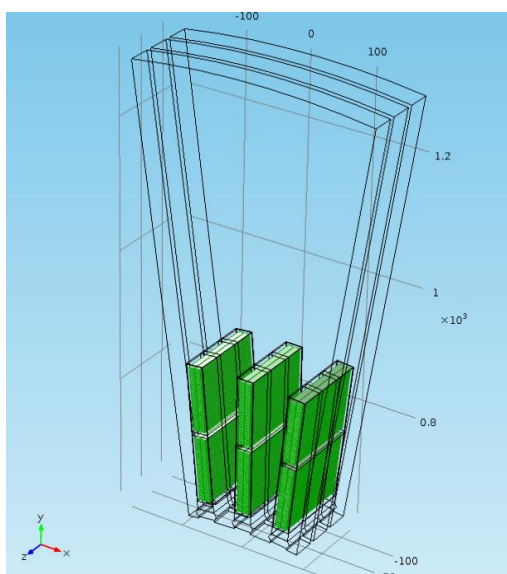
b) EIS;



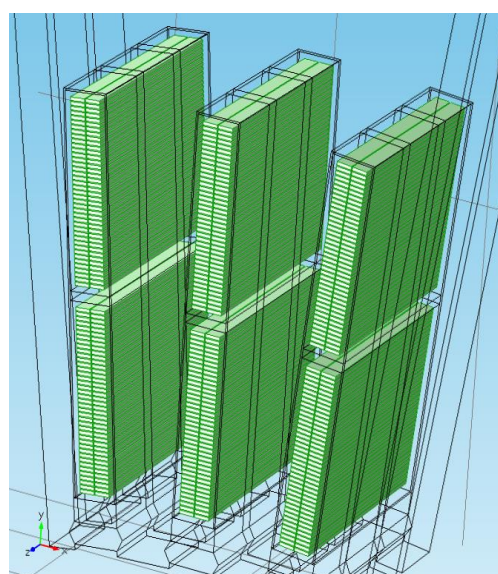
c) Drážková izolace NEN;



d) Sklotextit (vložka, vlnovec, klin)



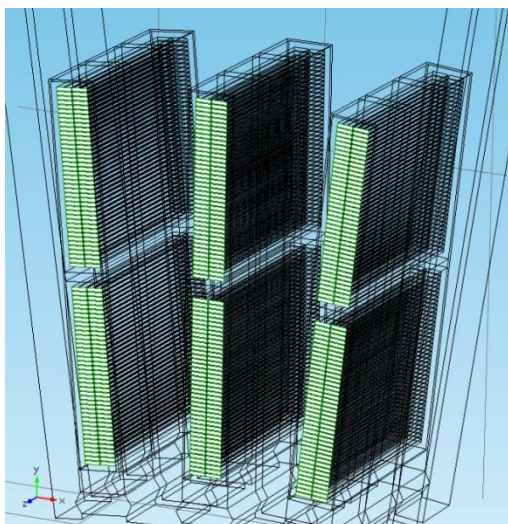
e) Měď;



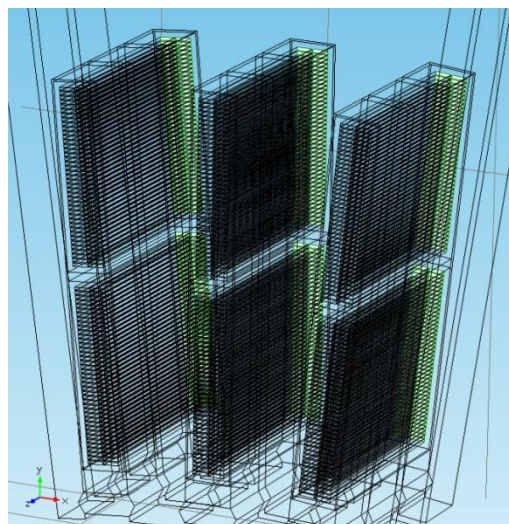
f) Měď (detail drážka statoru);

Obr. 26

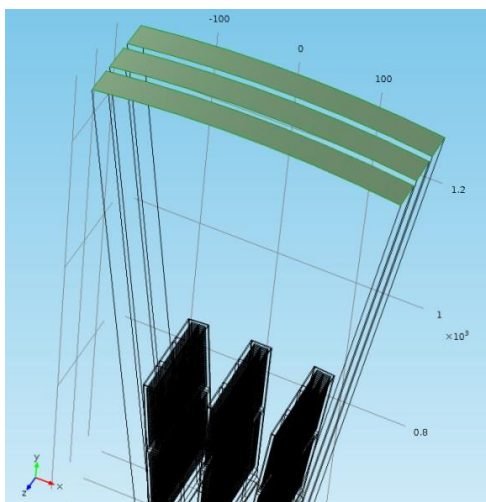
Synchronního stroje - import geometrie, přiřazení materiálových vlastností



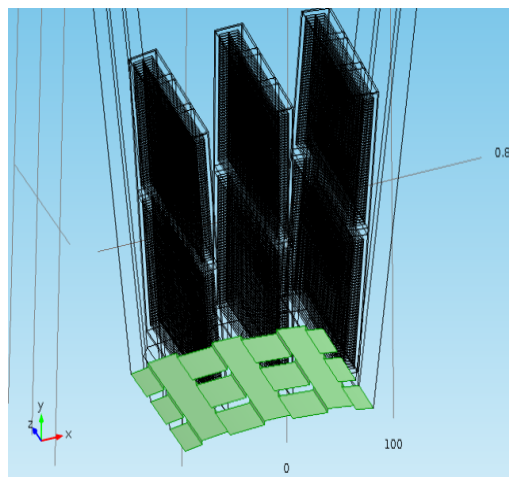
a) GND;



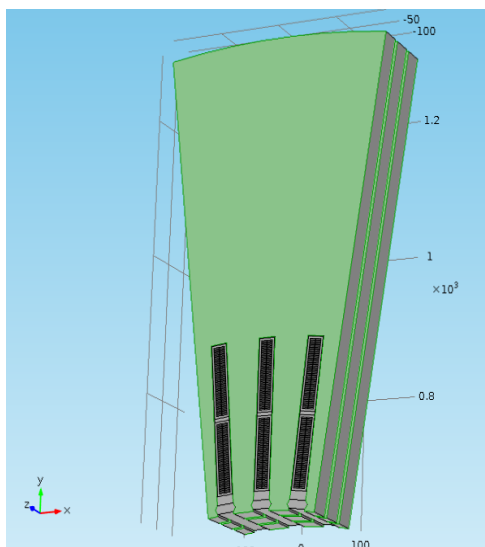
b) Proud ($I = 7405 \times 3$);



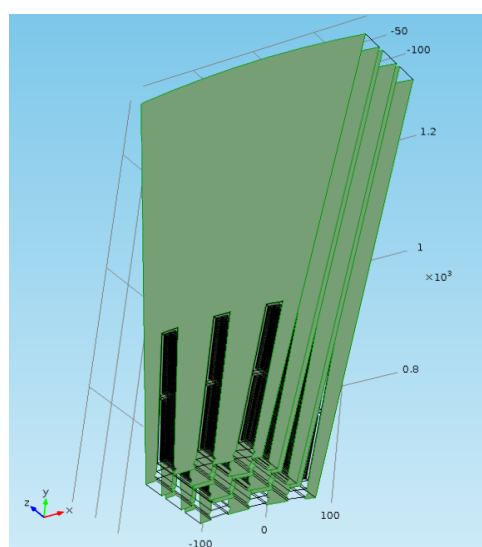
c) Chlazení statoru nahoře;



d) Chlazení statoru dole;



e) Chlazení balení



f) Chlazení statorových plechu;

Obr. 27

Model synchronního stroje MKP COMSOL Multiphysics (přiřazení okrajových podmínek jednotlivým oblastem)

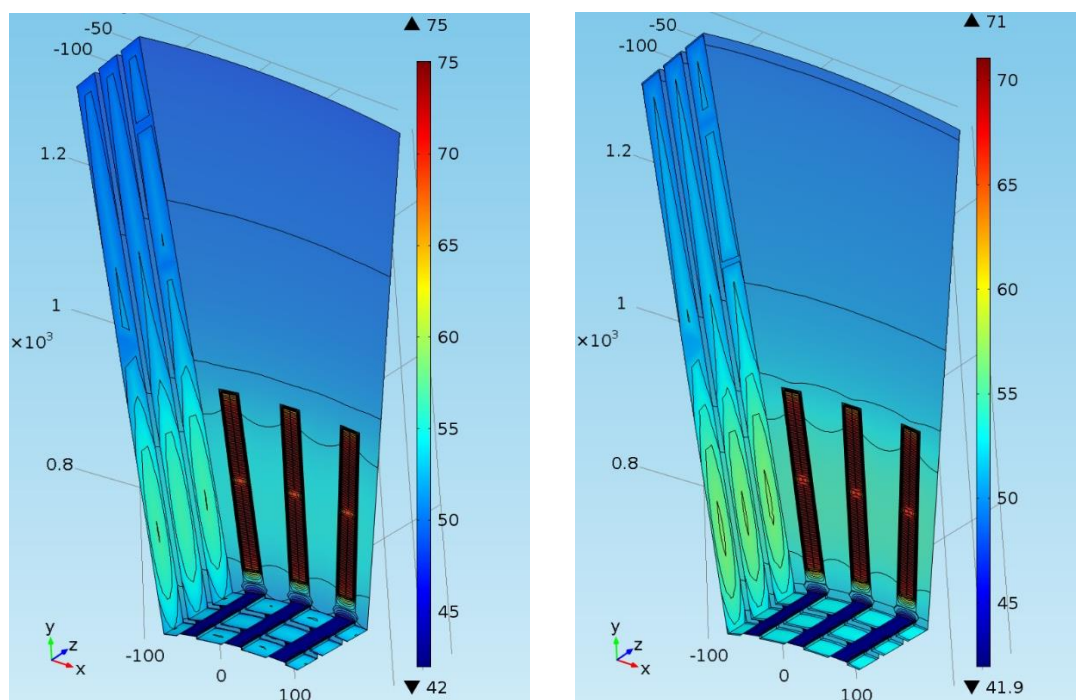
Na Obr. 27 je přiřazení okrajových podmínek jednotlivým oblastem modelu synchronního stroje MKP COMSOL Multiphysics.

Pokud jsou elementy dostatečně malé lze výpočetní problém převést ze soustavy diferenciálních rovnic na soustavu lineárních rovnic. Počet rovnic je roven počtu elementů. Čím více je v modelu elementů, tím bude výpočet přesnější, ale také bude mnohem náročnější na výpočetní výkon počítače. Rozdělení synchronního stroje na menší symetrické části, urychlí výpočet. Bohužel, toto zjednodušení nelze provést při studiu komplexní termické analýzy. Z pohledu šíření teploty musí být proveden komplexní model synchronního stroje.

6.3 Výsledky modelování EIS

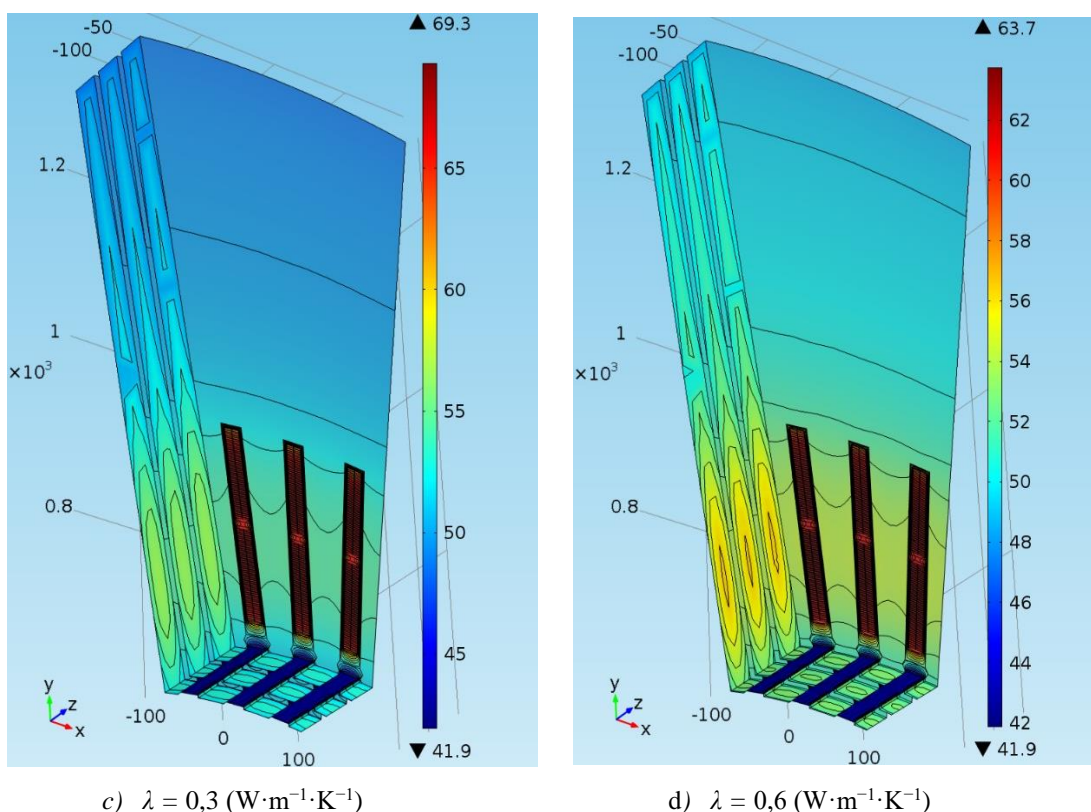
Výsledky počítačové simulace pro různé hodnoty součinitelů tepelné vodivosti izolačního materiálu jsou uvedeny níže.

Obr. 28 znázorňuje rozložení tepelného pole ($^{\circ}\text{C}$) statoru synchronního stroje pro hodnoty součinitelů tepelné vodivosti od $0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ do $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$. Modelováním rozložení teplotního pole se změnou součinitele tepelné vodivosti byl ověřen předpoklad, že mikroplniva mohou ovlivnit tepelné vlastnosti materiálu.



a) $\lambda = 0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$

b) $\lambda = 0,26 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$



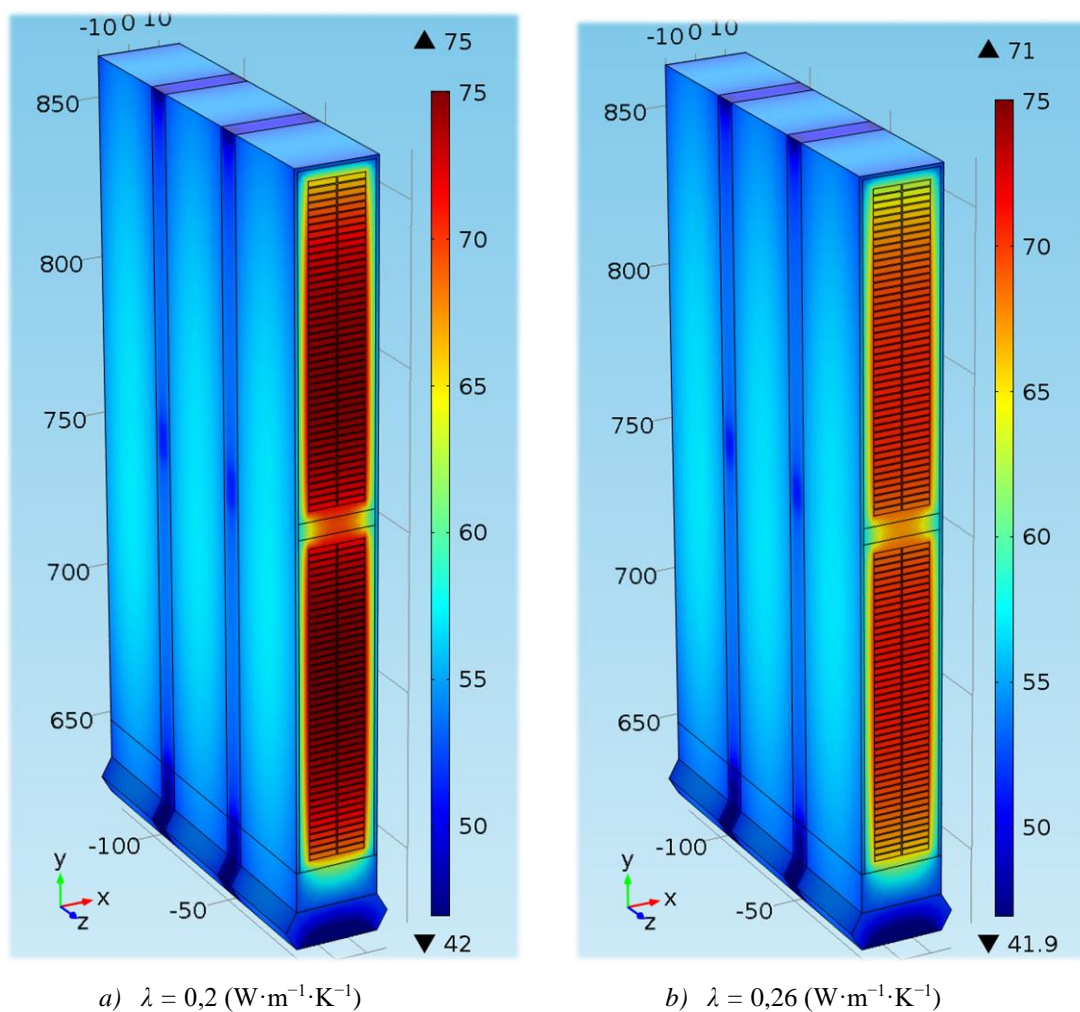
Obr. 28 Model synchronního stroje MKP COMSOL Multiphysics

($\lambda = 0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$, $\lambda = 0,26 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$, $\lambda = 0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$, $\lambda = 0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$)

Na Obr. 29 a na Obr. 30 je znázorněno rozložení teploty na drážkové rozteči statoru elektrického točivého stroje. Vinutí je dvouvrstvé složené z Reobelových tyčí (Obr. 2). Parametry izolačního materiálu, odpovídají typickým hodnotám materiálů používaných jako hlavní izolace generátorů (tvořen skleněnou tkaninou (nosná složka), epoxy-novolakovou pryskyřicí (pojivo) a standardním slídovým papírem).

Obr. 29 a), b) představují rozložení tepelného pole ($^{\circ}\text{C}$) v případě zvýšení součinitele tepelné vodivosti z $0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$ na $0,26 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$.

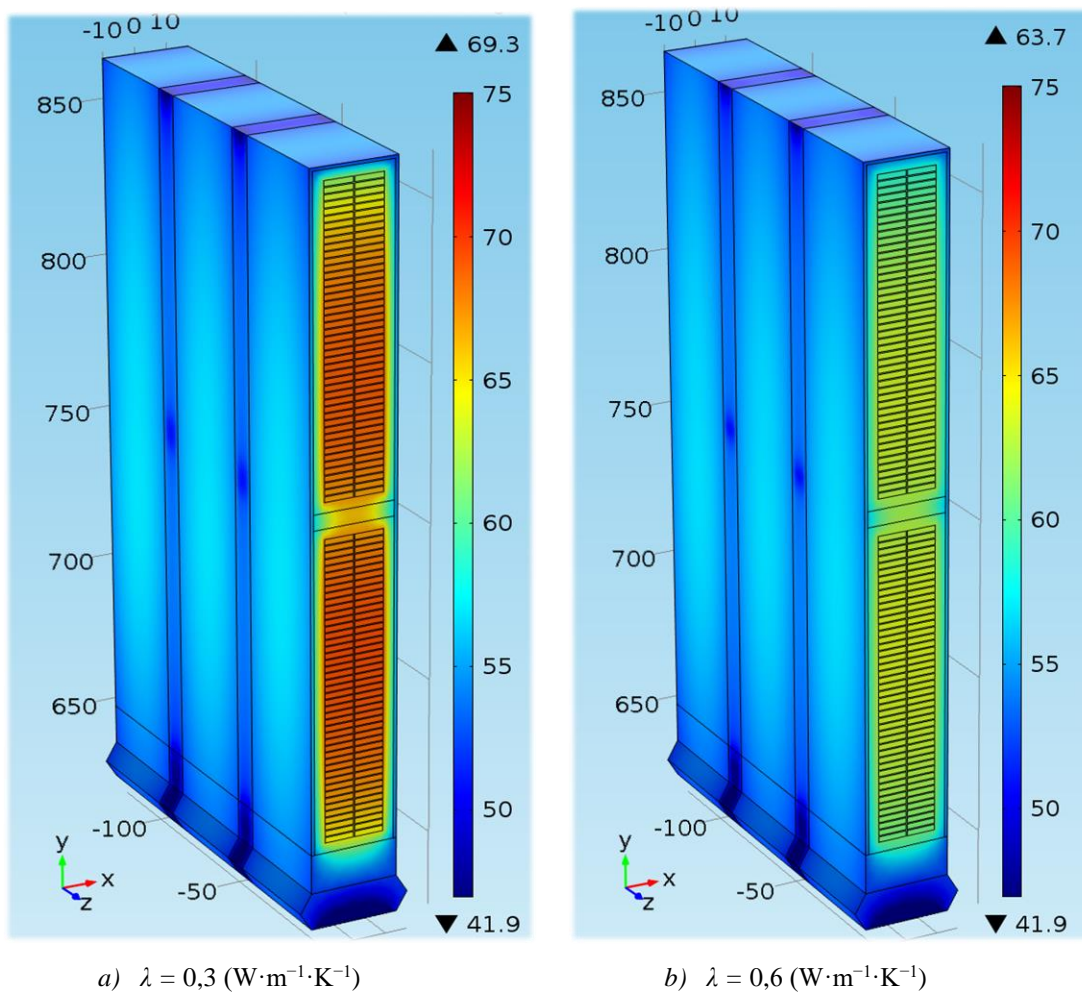
Rozdíl maximálních teplot ve variantě Obr. 29 a) a b) činí $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z vytvořeného modelu předpokládáme, že přidáním vhodných plniv by bylo možné zvýšit tepelnou vodivost elektroizolačních systémů.



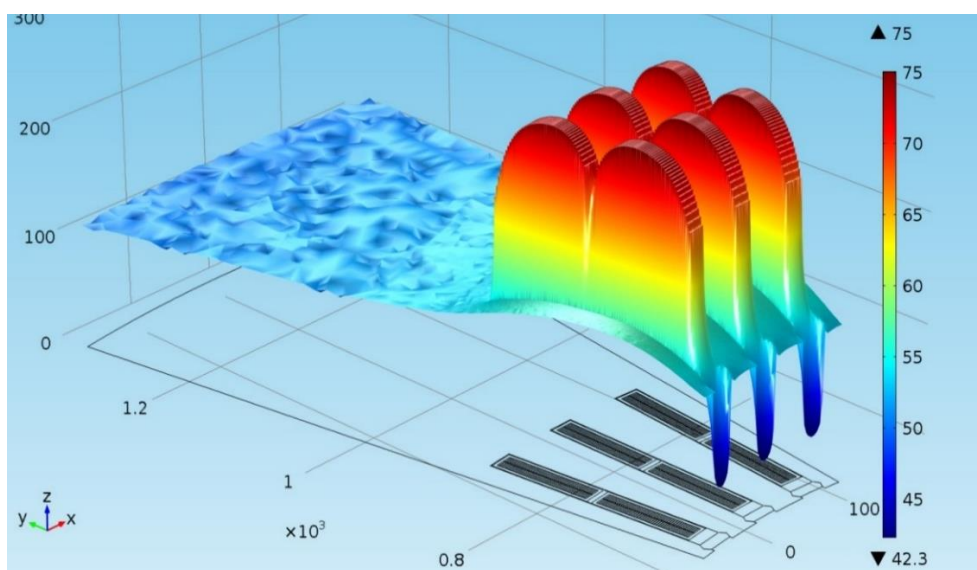
Obr. 29 Rozložení tepelného pole v případě zvýšení součinitele tepelné vodivosti z a) $\lambda = 0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$ na b) $\lambda = 0,26 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$

Obr. 30 a), b) představují rozložení tepelného pole ($^{\circ}\text{C}$) v případě zvýšení součinitele tepelné vodivosti z $0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$ na $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$.

Rozdíl maximálních teplot ve variantě Obr. 30 a) a b) činí $5,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i tento vytvořený model svědčí, že přidáním vhodných plniv by bylo možné výrazně zvýšit tepelnou vodivost elektroizolačních systémů.

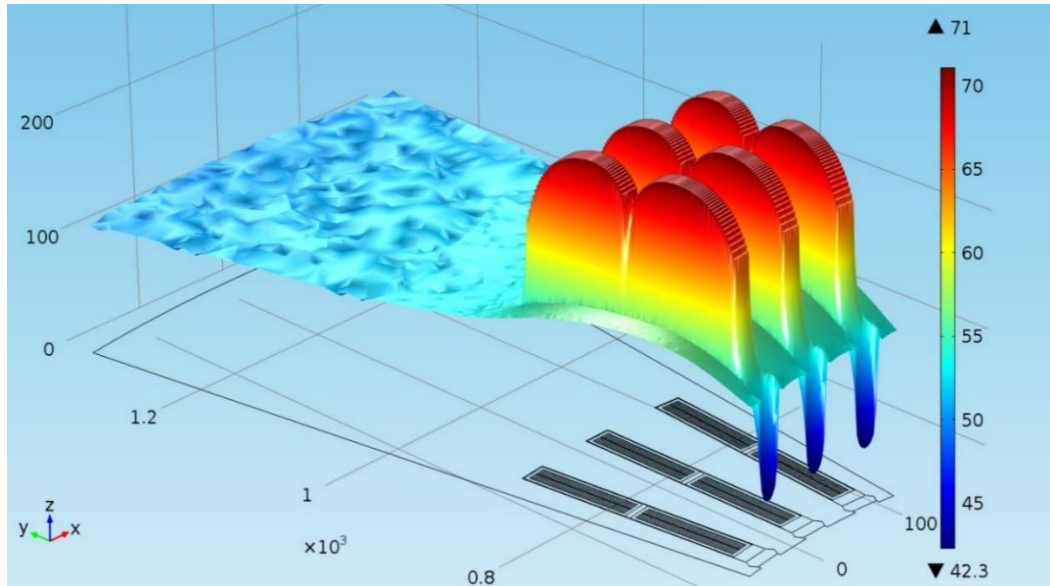


Obr. 30 Rozložení tepelného pole v případě zvýšení součinitele tepelné vodivosti z a) $\lambda = 0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$ na b) $\lambda = 0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$



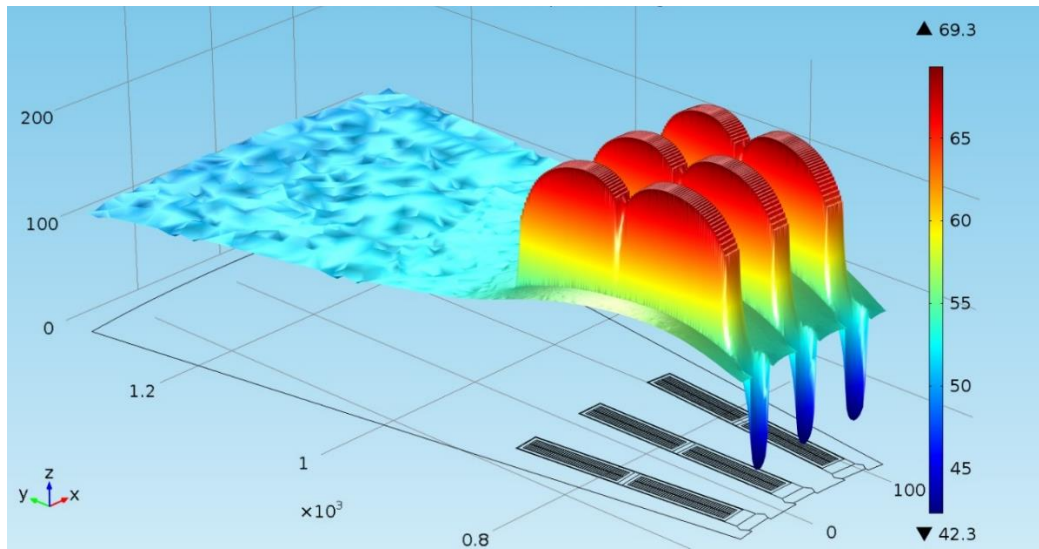
Obr. 31 Detail rozložení teploty statoru $\lambda = 0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$

Na Obr. 31 je detail rozložení teploty statoru, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$.



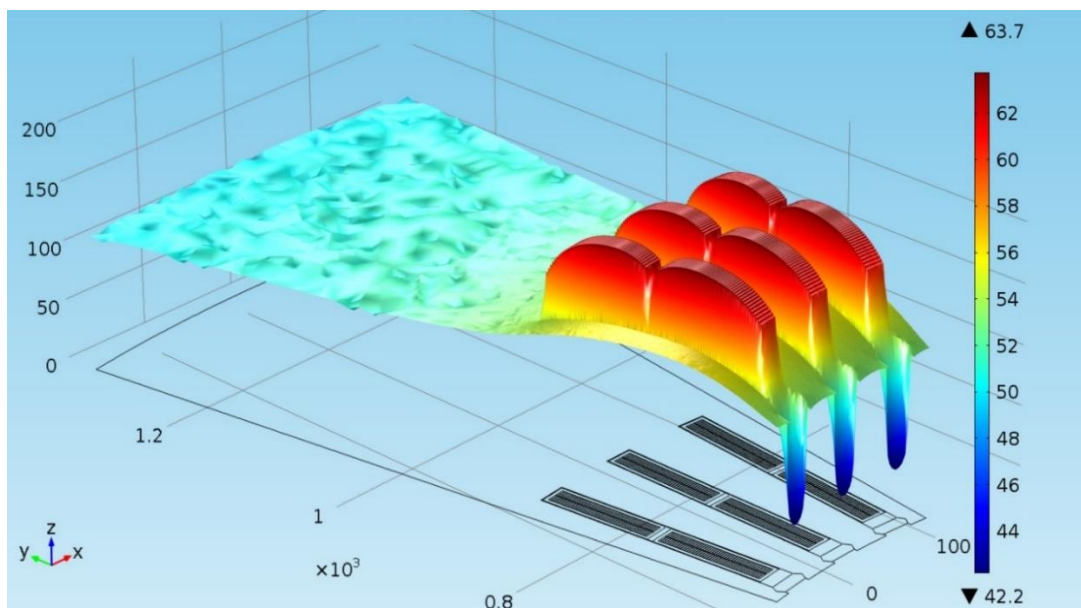
Obr. 32 Detail rozložení teploty statoru $\lambda = 0,26 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$

Na Obr. 32 je detail rozložení teploty pro jednu čtvrtinu stroje, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,26 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$.



Obr. 33 Detail rozložení teploty statoru $\lambda = 0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$

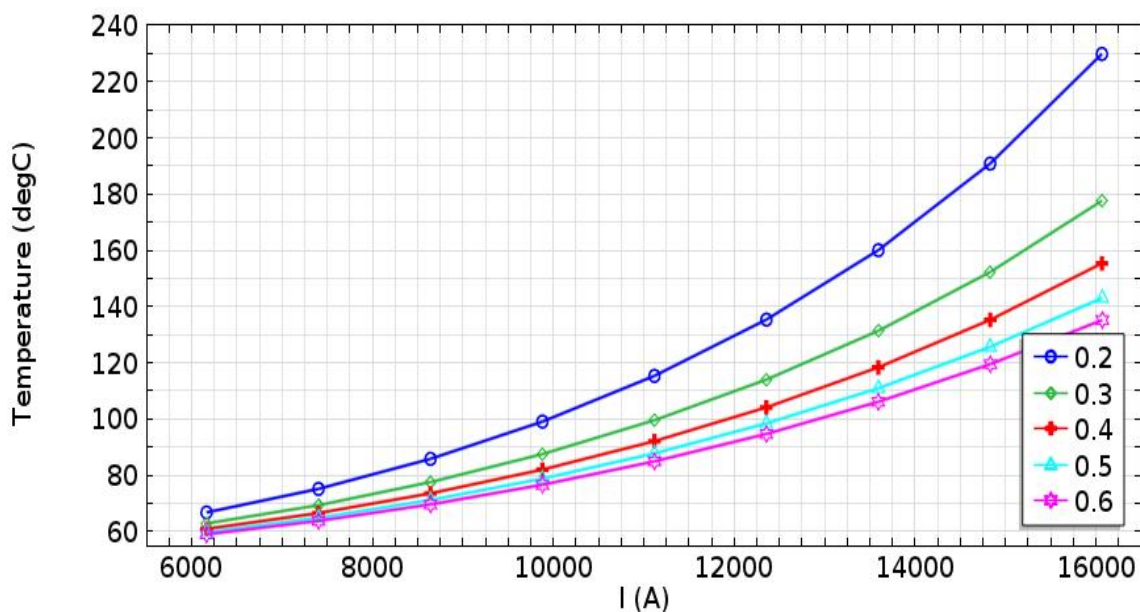
Na Obr. 33 je detail rozložení teploty pro jednu čtvrtinu stroje, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$.



Obr. 34 Detail rozložení teploty statoru $\lambda = 0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$

Na Obr. 34 je detail rozložení teploty pro jednu čtvrtinu stroje, výsledky jsou prezentovány pro EIS se **součinitelem tepelné vodivosti 0,6 (W·m⁻¹·K⁻¹)**.

Pomocí MKP COMSOL Multiphysics byl vytvořen také graf závislosti teploty na proudu (Obr. 35).



Obr. 35 Závislost teplot na proudu COMSOL Multiphysics

Hodnoty teploty v závislosti na změně hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly vypočítány v COMSOL Multiphysics, Tab. 14.

Tab. 14 *Hodnoty teploty v závislosti na změně hodnoty součinitele tepelné vodivosti*

Součinitele tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Teplota T ($^{\circ}\text{C}$)
0,2	75,11148
0,22	73,47969
0,24	72,14789
0,26	71,04866
0,28	70,11123
0,3	69,3022
0,32	68,59677
0,34	67,97619
0,36	67,42594
0,38	66,93499
0,4	66,49443
0,42	66,09643
0,44	65,73548
0,46	65,40648
0,48	65,10513
0,5	64,8281
0,52	64,57251
0,54	64,33594
0,56	64,11633
0,58	63,91188
0,6	63,72108

Jedním z cílů bylo vypočítání ekonomického přínosu nového elektroizolačního systému s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti. Hodnoty proudu použitých při modelování v COMSOL Multiphysics (Obr. 35) byly upraveny (aproximace funkce)

v software ORIGIN 8.1 z důvodu omezení chyb a následně použité na výpočet výkonů (zdánlivého S (MVA), činného P (KW)), výsledky obsahuje Tab. 15. Kromě zlepšení odvodu tepla z elektroizolačních systémů a zároveň zvýšení výkonu vysokonapěťových elektrických zařízení může být ovlivněna i částka zaplacená za odebranou elektřinu.

Tab. 15 Výsledky ekonomického přínosu nového elektroizolačního systému s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti

Veličina	Hodnota λ_{iz} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Fázový proud I_l	7405	8288	8880	9306	9628
Zdánlivý výkon S	202	226	242	254	263
Činný výkon P	161600	180800	193800	203100	210120
Sdružené napětí U_s	15750	15750	15750	15750	15750
Fázové napětí U_f	9093	9093	9093	9093	9093
Účinník $\cos\varphi$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
El. energie W	42456960	47436480	50843520	53202240	55036800
Cena	170676979	190694650	204390950	213873005	221247936

Při provozu elektrického zařízení o P (MW) po dobu $t =$ třiceti let (24 hodiny den, 365 dní v roce), tak množství vyrobené elektrické energie W (MWh) může být vypočítáno podle vzorce:

$$W = P \cdot t \quad (46)$$

Částka za vyrobenou elektřinu při provozu elektrického stroje s elektroizolačním systémem s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti bude vypočítána, když množství vyrobené elektrické energie W (MWh) bude vynásobeno cenou elektrické energie, která se pohybuje v roce 2016 zhruba okolo 4,02 koruny [126] (viz Tab. 15).

Výpočty jsou zjednodušené a nepředpokládají inflaci po dobu třiceti let, ale i přes to vidíme, že rozdíl je znatelný.

7 Přínosy disertační práce

Při volbě nových elektroizolačních systémů a při zdokonalování současných nelze opomenout např. provozní zkušenosti s dřívějšími elektroizolačními materiály dostupnost těchto materiálů a na to navazující poměrná výše nákladů pro udržení konkurenceschopnosti a v neposlední řadě ekologičnost a životnost.

Ve spolupráci s výzkumnými institucemi (s VUT v Brně a Brněnskou akademií věd, která je zaměřena na výzkum nanoplňiv (Příloha V a Příloha VI této práce) a jejich aplikace v elektroizolačních systémech) a s průmyslovými podniky (Kapitola 5 této práce), které dodaly jednotlivé složky kompozitních materiálů (částice mleté slídy, skleněná tkanina, částice oxidu hlinitého Al_2O_3). Byla zdokonalena výroba vzorků např. omezení shluků plniva pomocí ultrazvukového hrotu, použití různých druhů matic (EPOXYLITE 3750 LV, EPOXYLITE TSA 220), optimalizace doby dotvrzování, což bylo určeno jako jeden z cílů disertační práce. První sada vzorků byla vyrobena z epoxidové pryskyřice s obchodním názvem EPOXYLITE 3750 LV. Na výrobu další sady vzorků byla použita epoxidová pryskyřice s obchodním názvem EPOXYLITE TSA 220. Oxid hlinitý Al_2O_3 byl přidán v množství 2%, 4%, 6%, 8% a 10%. Následně byly na vzorcích provedeny měření tepelných, elektrických (měření ztrátového činitele závislosti na teplotě, absorpčních a resorpčních proudů, vnitřní rezistivity, elektrické pevnosti) a mechanických vlastností (pevnost v tahu, pevnost v ohybu, vrubová houževnatost viz Tab. 5) z důvodu ověření vlivu mikro plniva Al_2O_3 na celkové vlastnosti materiálu. Za účelem měření průchodu tepla materiálem bylo vytvořeno zařízení, které lze vidět na Obr. 8. a Obr. 9., což může být považováno za jeden z přínosů této práce i pro laboratoř dielektrických systémů KET, FEL. Hodnota součinitele tepelné vodivosti **roste plynule s přidáním většího množství Al_2O_3** (Obr. 10). Dále následovalo měření elektrických vlastností (Podkapitola 5.3 této práce), kde nebyly jednoznačné výsledky, ale za **nejlepší množství oxidu hlinitého lze považovat 2%, 4% a 6%** (toto množství zvýší tepelnou vodivost, ale nezhorší elektrické vlastnosti). Výsledky měření mechanických vlastností vzorků ukazují, že **mechanické vlastnosti nejsou závislé na množství plniva** a nevýznamný pokles těchto vlastností může být způsoben při výrobě, protože vzorky byly vyrobené v laboratorních podmínkách.

Jedním z cílů disertační práce bylo konfrontovat analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků (viz Kapitola 6 této práce) a měřením (viz Kapitola 5 této práce). Při tepelných výpočtech bylo zjištěno, že teplota statorového vinutí T_{Cu} °C se liší o 3,98 °C v případě, že hodnota součinitele tepelné vodivosti použité izolace z 0,2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) bude zvýšena na 0,26 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), což potvrzuje i model synchronního stroje v COMSOL Multiphysics. Další variantou bylo zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti použité izolace z 0,2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) na 0,6 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a výsledkem bylo snížení o 8,9 °C teploty statorového vinutí. Rozdíl maximálních teplot v COMSOL Multiphysics při zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti s 0,2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) na 0,6 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) činil 11,3 °C.

Z výše popsaných výpočtů (výsledky viz Tab. 12) a modelu v COMSOL Multiphysics (Obr. 28 – Obr. 34) lze předpokládat, že přidáním vhodných plniv je možné zvýšit tepelnou vodivost elektroizolačních systémů, zlepšit odvod tepelných ztrát, případně zatížit stroj větší hodnotou proudu.

Dalším z cílů disertační práce bylo určení ekonomického přínosu nového elektroizolačního systému s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti. Kromě zlepšení odvodu tepla z elektroizolačních systémů a zároveň zvýšení výkonu vysokonapěťových elektrických zařízení, využitím mikro a nanoplňiv v elektroizolačních systémech může být ovlivněna i částka za vyrobenou elektřinu (výpočet pomocí vzorce (46) a výsledky jsou uvedené v Tab. 15).

Za původní lze v práci považovat:

- výroba zařízení pro měření součinitele tepelné vodivosti;
- výroba experimentálních vzorků elektroizolačních systémů pro vn izolaci točivých strojů se zvýšenou tepelnou vodivostí;
- výpočet oteplení v konkrétních místech vinutí reálného generátoru;
- konfrontace analytického tepelného návrhu reálného generátoru (při použití EIS se zvýšenou tepelnou vodivostí) sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měřením;
- ekonomický přínos nového EIS s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

8 Závěr

Předložená dizertační práce se zabývá teplotní optimalizací elektrického točivého stroje. Teplota je důležitým parametrem, kterému je v elektrotechnice věnována značná pozornost. Jedná se o významný degradační faktor, který ovlivňuje spolehlivost izolačních materiálů a systémů.

V práci jsou popsány možnosti jak zlepšit odvod tepla z elektroizolačních systémů, např. zdokonalování ventilačních systémů a použití chladicího média, které má vyšší hodnoty měrné tepelné vodivosti, součinitele tepelné vodivosti a součinitele přestupu tepla např. chlazení vodíkem, které je ve většině případů kombinováno s přímým chlazením vodičů. Zde ale je potřeba připomenout i nevýhody vodíku např.: výbušnost ve směsi se vzduchem, dimenzování kostry stroje na určitý přetlak, jeho zvýšením lineárně narůstají i ventilační ztráty a nákladné vodíkové hospodářství, což může vést ke zvýšení ceny elektrického točivého stroje.

Tato práce v páté kapitole popisuje možnost použití mikroplniva Al_2O_3 , které má dobrou tepelnou vodivost pro zvýšení tepelné vodivosti elektroizolačního materiálu pro vysokonapěťové točivé stroje. Bude-li nalezen elektroizolační materiál s vyšší tepelnou vodivostí, klesnou tepelné odpory a tím by bylo možné navýšit využití stroje, zmenšit rozměry stroje. Toto řešení nevyžaduje náročné konstrukční úpravy a může vést k další zvyšování účinnosti stroje a ke změně ceny stroje (k ekonomickým úsporám). Na začátku stála metoda výroby vzorku s přidáním oxidu hlinitého, do které již byly zahrnuty zkušenosti a poznatky jak z jiných pracovišť, tak i z vlastní experimentální výroby (viz Příloha IV, Příloha V, Příloha VI). Za účelem měření tepelných vlastností (konkrétně součinitele tepelné vodivosti) bylo vytvořeno měřicí zařízení. Vzhledem k tomu, že se jednalo o nové zařízení, bylo nutné nejprve provést měření na materiálu o známých vlastnostech. Jako referenční materiál byl zvolen Relanex 45.033A, na kterém byla realizována měření pro kalibraci a také ověření vyhodnocovací metody. Podle očekávání součinitel tepelné vodivosti stoupá s přidáním většího množství Al_2O_3 (2%, 4%, 6%, 8% a 10%).

Určením nejlepší koncentraci plniva (2%, 4%, 6%), mohlo přistoupit k uskutečnění dalších cílů této disertační práce, konkrétně k návrhu elektrického stroje s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti pomocí MKP. Čímž byly potvrzeny předpoklady, že zvýšením tepelné vodivosti EIS lze stroj zatížit vyšší hodnotou proudu. Kromě výsledků modelování synchronního stroje s vyšší hodnotou součinitele

EIS tato práce obsahuje i výsledky modelování asynchronního motoru s vyšší hodnotou součinitele EIS (viz Příloha X).

Za účelem potvrzení výsledků návrhu stroje a našich předpokladu byl prostudován i dlouhodobý ekonomický dopad zvýšení součinitele tepelné vodivosti EIS.

Použitím mikroplniv lze zvýšit tepelnou vodivost EIS, ale mikroplniva mají i svoje nevýhody, např. přidání mikroplniv je nerovnoměrné rozložení elektrického napětí, také vlivem rozdílné permitivity oproti základnímu materiálu je elektrické pole deformované a nehomogenní. Elektrické napětí na nehomogenitách se rozdělí v opačném poměru relativních permitivit základního materiálu a mikroplniva. Dalším negativním vlivem je tvorba prostorového náboje na nehomogenitách a následný vznik mezivrstevových polarizací. V této práci jsou i výsledky experimentu s nanoplňivy, které mají pozitivní vliv na elektrické vlastnosti, ale zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti není významné. Nákladnost a tendence k aglomeraci stále patří k nevýhodám. Dalším nano materiálem, který může být přidán do EIS, jsou nanovlákná [127].

Problematika popsaná v této disertační práci může sloužit jako vodítko případně nástroj k dalšímu rozsáhlejšímu studiu a následnému zpracování a zdokonalování. Pozornost by se měla zaměřit především na zavedení teorie do praxe, což vyžaduje oslovení firem např. formou prezentaci výsledků na konferencích a workshopech.

9 Citovaná literatura

- [1] Bernat P, „Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor., Autoreferát doktorské disertační práce., školitel: Doc. Ing. Karel Chmelík,“ 2006. [Online]. Available: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/Disertacni_prace_autoreferat.pdf. [Přístup získán 01 06. 2016].
- [2] Kůs V, Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu., Praha: BEN technická literatura, 2002.
- [3] Kůs V., Nizkofrekvenční rušení, Plzeň: Zapadočeská univerzita v Plzni, 2003.
- [4] Pechánek R, Ventilační a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru, Autoreferát disertační práce k získání akademického titulu "Doktor" školitel doc. Ing. Josef Červený, CSc., Plzeň: Katedra Elektromechaniky a výkonové elektroniky ZČU v Plzni, 2011.
- [5] Jeřábek M, „Analýza vícefaktorového namáhání elektroizolačních materiálů, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová,“ 2009. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=1673 9. [Přístup získán 02 06. 2016].
- [6] Mentlík V, Dielektrické prvky a systémy, Praha: BEN technická literatura, 2006.
- [7] Svoboda M, Condition based management elektrických zařízení, vedoucí Diplomové práce doc. Ing. Pavel Trnka Ph.D., Zapadočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [8] Mentlík V., Trnka P., Vitoušová P., Pihera J, „Elektrické stárnutí složené izolace,“ [Online]. Available: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/42.pdf>. [Přístup získán 07. 06. 2016].
- [9] Tomášková T, Perspektivní kompozity pro elektrotechniku, vedoucí diplomové práce doc. Ing. Eva Kučerová, CSc., Plzeň: ZČU Plzeň, 2012, 2012.
- [10] „Společnost Ekobal Rožnov spol. s.r.o., Drážková izolace,“ [Online].

- Available: Společnost Ekhttp://www.ekobal-roznov.cz/?st=drazkove_izolace. [Přístup získán 08. 06. 2016].
- [11] Rok M, Aspekty oprav čel vinutí velkých točivých elektrických strojů, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., 2012.
- [12] Beseda J, Vytvrzovací postupy hlavní izolace velkých točivých strojů, Bakalářská práce, FEL, ZČU v Plzni, vedoucí Ing. Josef Pihera Ph.D..
- [13] Fanta P, Trísložkově kompozitní materiály pro elektrotechniku, Bakalářská práce, FEL/KET ZČU v Plzni, vedoucí M. Kutinec.
- [14] Glabavy V, Vytvrzování reaktoplastických hybridních systémů, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [15] „YM Machinery company., Vacuum Pressure Impregnation (VPI),“ [Online]. Available: [http://www.ymmie.com/html_products/Vacuum-Pressure-Impregnation-\(VPI\)-plant-562.html](http://www.ymmie.com/html_products/Vacuum-Pressure-Impregnation-(VPI)-plant-562.html). [Přístup získán 09. 06. 2016].
- [16] Ville Sihvo, „Insulation system in an integrated motor compressor., Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), supervisor Prof. Juha Pyrhönen LUT Energy Lappeenranta University of Technology Finland,“ [Online]. Available: [http://doria17-
kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/66332/isbn%209789522650122.pdf?sequence=1](http://doria17-
kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/66332/isbn%209789522650122.pdf?sequence=1). [Přístup získán 09. 06. 2016].
- [17] „Katalog výrobků Cogebi,“ [Online]. Available: <http://www.cogebi.com/index.php?l2=157&l3=162>. [Přístup získán 06. 2016].
- [18] Y. Y. S. S. A. J. B. R. L. A. F. N. Tari M., „A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators.,“ Published in: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & „ Page(s): 613 – 617. Proceedings Date of Conference: 23-25 Sept. 2003. Coil Winding Technology Conference, 2003.. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1247959. [Přístup získán 12 07 2016].
- [19] S. E. I. B. SOLUTIONS, „Technical bulletin,“ [Online]. Available: https://www.epoxies.com/_resources/common/userfiles/file/50-3182NC.pdf.

- [Přístup získán 12 07 2016].
- [20] „Společnost AZoM.com (the A to Z of Materials),“ [Online]. Available: <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764..> [Přístup získán 12 07 2016].
- [21] Fukač P, Určování tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů, vedoucí Diplomové práce doc. Ing. Radek Polanský Ph.D., Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [22] Stone G, Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2004, p. 371..
- [23] G. C. STONE, E. A. BOULTER, L. CULBERT a H. DHIRANI, „Electrical Insulation for Rotation Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Prepare,“ *Power Engineering*, p. 371s., 2004.
- [24] P. Radek, „Materials in Electrical Engineering: A reference book for Erasmus students at FEE UWB,“ University of West Bohemia-Faculty of Electrical Engineering, 2012, 167s, Plzeň, 2012.
- [25] Van Breen H.J., Gulski, E., Smit, J.J., Verhaart, H. F A, Wout de Leeuw, Experience with on-line PD measurements on generators in frequency and time domain, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.31-35, Apr 2002.
- [26] Wan Yuan, Gong Chuangli, Wei Zhipeng, Deng Pengcheng, Li Yun, High Reliable Partial Discharge Online Monitoring System of Hydro-generator, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), vol.2, pp.320-323, Jan. 2011.
- [27] „Resin rich insulation systems for High-Voltage rotating machines,“ VON ROLL, [Online]. Available: <http://www.vonroll.com/>. [Přístup získán 2016 10 17].
- [28] Společnost Ekobal Rožnov spol. s r. o. , [Online]. Available: <http://www.ekobal-roznov.cz/cs/drazkove-izolace>. [Přístup získán 2016 10 18].
- [29] HOLOUBEK PROTECT a.s., [Online]. Available: <http://www.technicke-plasty.eu/sklotextit---desky>. [Přístup získán 2016 10 18].
- [30] Yang Xin-Yu; Chen Xi-Hong; Cheng Pei-Yuan; Wang Jian-Bo, Design of monitoring and Fault Diagnosis System on-line for certain gas turbo-generator

- set, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis CMD 2008, pp.226-228, April 2008.
- [31] Hongye, G., Lin, R, Design of wireless powered RF temperature monitoring system applied to the rotor of generators, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp.1-4, Aug. 2011.
- [32] Li Junqing, Li Heming, The stator thermo-hydraulic model of turbo-generators on varying load, International Conference on Electrical Machines and Systems, CEMS 2005, vol.3, pp.1928-1932, Sept. 2005.
- [33] Maughan, C.V., Reschovsky, J.M, Advances in motor and generator rotor health, Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp.1,4, June 2010.
- [34] Braun, J-M, Stone, G.C., Sedding, H.G, Application of dynamic mechanical analysis to endurance testing of generator stator bars, IEEE: International Symposium on Electrical Insulation, pp.469-472, Jun. 1992.
- [35] Laš V, Mechanika kompozitních materiálu, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [36] Polanský R, „Viskoelastické chování reaktoplastických kompozitních materiálů při mechanickém zatížení,“ *Viskoelastické chování reaktoplastických koElektrorevue*, sv. 12, č. 5, 2010.
- [37] Mitsui, H.; Yoshida, K.; Inoue, Y.; Kawahara, K, Mechanical Degradation of High Voltage Rotating Machine Insulation, IEEE: Transactions on Electrical Insulation , vol.EI-16, no.4, pp.351-359, Aug. 1981.
- [38] Kopylov I. P, Stavba elektrických strojů, Praha: SNTL, 1988.
- [39] Cigánek L, Stavba elektrických strojů, Praha: SNTL, 1958.
- [40] Wiedemann E., Kellenberger W, Konstrukce elektrických strojů, Praha: SNTL, 1973.
- [41] Konečná E., Richter A, „Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů., Elektrické stroje, Učební texty,“ Upravené vydání září 2000. [Online]. Available: http://www.mti.tul.cz/files/ele/EI_Str1_h.pdf. [Přístup získán 11 06. 2016].

- [42] Janda M, „Doktorská práce, Teplotní optimalizace elektrických strojů, Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Hana Kuchynková,“ VUT v Brně, 2008. [Online]. Available: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12781/DIS-janda.pdf?sequence=1>. [Přístup získán 11 06. 2016].
- [43] Pavelková N, „Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie,“ Produktový manažer ABB s. r. o., [Online]. Available: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37850. [Přístup získán 12 06. 2016].
- [44] Bartoš V, Teorie elektrických strojů, Plzeň: ZČU v Plzni, 2009.
- [45] Vlach R, „Thermal Phenomena in the Mechatronics systems,“ [Online]. Available: www.umt.fme.vutbr.cz/~rvlach/skripta.doc. [Přístup získán 12. 06. 2016].
- [46] Červený J, Stavba elektrických strojů I a II. [1] ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů I a II. Přednáškové texty., Plzeň: ZČU v Plzni, 2008.
- [47] Makki, Z., Janda M, „Analýza metod pro výpočet tepelných ztrát jednofázového vodiče,“ *Elektrorevue*, sv. 13, č. 4, 2010.
- [48] Petrov G. N, Elektrické stroje 2, Asynchronní stroje – Synchronní stroje, Praha: Academia Praha, Czech Translation, 1982.
- [49] Kučerová E, Elektrotechnické materiály, Plzeň: ZČU v Plzni, 2002.
- [50] Kolář J, Návrh synchronního generátoru, vedoucí diplomové práce Ing. Roman Pechánek, Ph.D., Plzeň: ZČU v Plzni, 2009.
- [51] Dostál J, Návrh turboalternátoru, vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Josef Červený, CSc., Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2011.
- [52] Mlčák T., Vrána V, „Elektrické stroje,“ Katedra elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava, 2008. [Online]. Available: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/8_ES_uvod_sylab_BC.pdf. [Přístup získán 12. 06. 2016].
- [53] Brom F, Návrh vzduchem chlazeného turboalternátoru, vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Červený, CSc., Plzeň: Katedra Elektromechaniky a výkonové elektroniky FEL/ZČU v Plzni, 2013.

- [54] Sikora M, Inovace systému chlazení točivých elektrických strojů s využitím CFD metod. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [55] Trnka Z, „Výpočet průběhu chladicího média v asynchronním motoru. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda Ph.D.,“ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. [Online]. Available:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38945. [Přístup získán 13. 06. 2016].
- [56] Tesárek R, Synchronní stroje s permanentními magnety. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Hruška, Ph.D., Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2013.
- [57] Černý O, „Výzkum perspektivních metod mikroprocesorového řízení pro trakční synchronní motor s permanentními magnety,“ Univerzita Pardubice Dopravní Fakulta Jana Pernera, 2009. [Online]. Available:
http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/37242/1/Disertacni_prace_Ing_Cerny.pdf. [Přístup získán 14. 06. 2016].
- [58] „A New Core Loss Model For Iron Powder Material by Christopher Oliver, Micrometals, Inc.,“ [Online]. Available:
<http://micrometals.info/appnotes/appnotedownloads/corelossupdate.pdf>. [Přístup získán 14. 06. 2016].
- [59] „King Fahd University of Petroleum & Minerals Electrical Engineering Department, EE-462 Electrical Machines, Experiment: Separation of hysteresis and eddy current losses in single phase transformers,“ [Online]. Available:
http://faculty.kfupm.edu.sa/ee/ajmal/0xx/ee462/EE_462_Experiment_01.pdf. [Přístup získán 15. 06. 2016].
- [60] Vrána V, „Elektrické stroje - rozdělení, druhy provedení, vlastnosti, dimenzování. Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava, Březen 2004 (poslední úprava: únor 2006),“ Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava, Březen 2004 (poslední úprava: únor 2006), [Online]. Available:
http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/rozvody_lomy/04_el_stroje.pdf. [Přístup

- získán 14. 06. 2016].
- [61] Potyš J, „Model proudění chladicího média v elektrickém stroji. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.,“ Brno 2012. [Online]. Available: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51359 .
- [62] Kolaja A, Výpočtové a experimentální modelování přímého chlazení statorového vinutí synchronního motoru vodou. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Vlach, Ph.D., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008.
- [63] Matoušek J, 2010. [Online]. Available: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27654 . [Přístup získán 14. 06. 2016].
- [64] Tampir J, Návrh synchronního generátoru, vedoucí diplomové práce Ing. Roman Pechánek, Ph.D., Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická, 2012.
- [65] Chlup J, „Model proudění chladicího média v synchronním stroji. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.,“ 2010. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26730 . [Přístup získán 14. 06. 2016].
- [66] Odvarka, E., Brown, N. L., Mebarki, A., Shanel, M., Narayanan, S., Ondrusek, C, „Thermal Modelling of Water-Cooled Axial-Flux Permanent Magnet Machine, Power Electronics, Machines and Drives,“ Odvarka, E., Brown, N. L., Mebarki, A., Shanel, M., Narayanan, S., Ondrusek, C., Thermal ModellingPEMD, 5th IET International Conference, Brighton, UK, 19-21 April 2010.
- [67] Funieru B., Binder A, „Thermal Design of a Permanent Magnet Motor used for Gearless Railway Traction, Industrial Electronics,“ Orlando FL, 2008.
- [68] Judas J, Ventilační výpočty v synchronním stroji. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D., Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 66 s. , 2012.

- [69] Hak J., Ošlejšek O, Výpočet chlazení elektrických strojů – 1. díl, Brno, 1973.
- [70] Ondruška E., Maloušek A, Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých, Praha: SNTL, 1985.
- [71] Sugimoto, H., Tsuda, T., Morishita, T., Hondou, Y., Takeda, T., Togawa, H., Oota, T., Ohmatsu, K, Development of an Axial Flux Type PM Synchronous Motor With the Liquid Nitrogen Cooled HTS Armature Windings, Applied Superconductivity, Virginia Beach VA, USA: IEEE Transactions, June 2007.
- [72] „Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita.“ [Online]. Available: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/molekulova-fyzika-a-termika/tepelna-kapacita-merna-tepelna-kapacita.php>. [Přístup získán 15. 06. 2016].
- [73] „Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita (vzduch).“ [Online]. Available: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>. [Přístup získán 15. 06. 2016].
- [74] „Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita ropných olejů.“ [Online]. Available: <http://www.oleje.cz/clanek/Dalsi-uzitecne-tabulky>. [Přístup získán 15. 06. 2016].
- [75] Borges, S.S., Cezario, C.A., Kunz, T.T, „Desing Water Cooled Electric Motors Using CFD and Thermography Techniques,“ Vilamoura, 6-9 Sept. 2008.
- [76] Liwei Song, Zijian Li, Jingyi Gao, Qingchu Zeng, Fuping Wang, „3D Thermal Analysis of Water Cooling Induction Motor used for HEV,“ Wuhan, 17-20 Oct. 2008.
- [77] Kral, C., Haumer, A., Bauml, T, „Thermal Model and Behavior of a Totally-Enclosed-Water-Cooled Squirrel-Cage Induction Machine for Traction Applications,“ Oct. 2008.
- [78] Ping Zheng, Ranran Liu, Thelin, P., Nordlund, E., Sadarangani, C, Research on the Cooling System of a 4QT Prototype Machine Used for HEV, Energy Conversion, IEEE Transaction, Volume : 23 , Issue:1, On page(s): 61., March 2008.
- [79] King, J.E., Kobuck, R.M., Repp, J.R, High Speed Water-cooled Permanent Magnet Motor for Pulse Alternator-based Pulse Power Systems, Victoria BC: Electromagnetic Launch Technology, 2008 14th Symposium, 10-13 June 2008.
- [80] Okazaki, T., Sugimoto, H., Takeda, T, Liquid Nitrogen Cooled HTS Motor for Ship Propulsion, Montreal, Que.: Power Engineering Society General Meeting,

2006. IEEE, 16-10-2006.
- [81] Matsuzaki, H., Kimura, Y., Morita, E., Ogata, H., Ida, T., Izumi, M., Sugimoto, H., Miki, M., Kitano, M, HTS Bulk Pole-Field Magnets Motor With a Multiple Rotor Cooled by Liquid Nitrogen, Applied Superconductivity, Virginia Beach VA, USA, Volume : 17 , Issue:2, On page(s): 1553: IEEE Transactions, Volume : 17 , Issue:2, On page(s): 1553, June 2007.
- [82] P. M. „FSI VUTv Brně. Energetický ústav. Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Termomechanika, Základy přenosu tepla,“ [Online]. Available: http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/15_Prenos.pdf.
- [83] „Sdílení tepla,“ [Online]. Available: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/bc05/07.sdileni.tepla.pdf>. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [84] K. K. Hassdenteufel J., Elektrotechnické materiály, Praha: SNTL, 1967.
- [85] Maximální měrná tepelná kapacita látky, [online], [cit. 27. 04. 2014] dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/1415-maximalni-merna-tepelna-kapacita-latky.html>, [Online]. Available: <http://fyzmatik.pise.cz/1415-maximalni-merna-tepelna-kapacita-latky.html>. [Přístup získán 16. 06. 2016].
- [86] Montanari G. C., Fabiani D., Palmieri F., Kaempfer D., Thomann R., Mulhaupt R, Modification of electrical properties and performance of EVA and PP insulation through nanostructure by organophilic silicates, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.11, no.5, pp. 754- 762, Oct. 2004.
- [87] Tanaka T, Dielectric nanocomposites with insulating properties, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.12, no.5, pp. 914-928, Oct. 2005..
- [88] M. Kozako, Y. Okazaki, M. Hikita, T. Tanaka, July 4-9, 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05568250>. [Přístup získán 15 06. 2016].
- [89] T. Tanaka, M. Kozako, K. 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.
- [90] B.-W. C. A. M. V. M. S. Albayrak S., Influence of nano-scaled zirconia particles on the electrical properties of polymer insulating materials, IEEE

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012.
- [91] Z. G. Y. M. K.-S. T. A. W. C. Li, Nano filler dispersion in polymer composites for electronic packaging, Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012.
- [92] G. R. S. K. A. Iyer G., Corona resistance of epoxy nanocomposites: experimental results and modeling, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.
- [93] M. F. S. S. R. M. A. S. V. H. C. J. C. L. B. Frechette, Surface resistance of epoxy-based composites to electrical discharge, Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Sympos, 2012.
- [94] M. K.Y.Lau, Polymer Nanocomposites in High Voltage Electrical Insulation Perspective, A Review: Malaysian Polymer Journal, 2011.
- [95] Novák P, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 79 s.. [Online]. Available: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8108/novak_petr_diplomova_prace.pdf?sequence=1. [Přístup získán 16 06. 2016].
- [96] S. C. Group, „Oxide Ceramics – Aluminum Oxide,“ [Online]. Available: <http://www.ceramtec.co.uk/ceramic-materials/aluminum-oxide/>.. [Přístup získán 14 07 2016].
- [97] M. K. K. O. Toshikastu Tanaka, „Toward High Thermal Conductivity Nano Micro Epoxy Composites with Sufficient Endurance Voltage,“ v Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 2, No. 1, pp. 90~98, 2012, 2012.
- [98] J.-J. Park, „Effect of Nano-silicate on the Mechanical, Electrical and Thermal Properties of Epoxy/Micro-silica Composite,“ v Department of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Geumsan 312-702, Received April 17, Accepted May 7, 2012, Korea, 2012.
- [99] K. Y. S. S. J. A. R. B. M. Tari, „Insulation and Electrical Manufacturing Conference, A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators,“ Berlin 2001. [Online]. Available: http://www.vonroll.eu/media/files/f_e_publicationen/AHVISITCTG.pdf. [Přístup získán 11 07 2016].

- [100] S. D. M.-L. L. B. B. Y. S. V. S. R. C. F. T. F. Saysouk, Enhancement of Thermal Conduction of Polyimide/Boron Nitride Nanocomposites, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena: IEEE Catalog Number CFP13CID-USB ISBN 978-1-4799-2596-4, pp. 543-546, 2013.
- [101] J. C. M. F. S. A. F. G. R. N. S. T. N. F. A. V. I. Preda, Thermal and Dielectric Properties of Clay/Epoxy nanocomposites with Low Percentage of Graphite Oxide, IEEE Catalog Number CFP13CID-USB : ISBN 978-1-4799-2596-4, pp. 539-542, 2013.
- [102] „Advanced NAno-Structured TApeS for electrotechnical high power Insulating Applications (ANASTASIA),“ [Online]. Available: <http://www.ecs.soton.ac.uk/research/projects/819>. [Přístup získán 11 07 2016].
- [103] Y. Z. C. Z. M. M. Y. C. L. Y. J. L. Xin Luo, „Novel thermal interface materials: boron nitride nanofiber and indium composites for electronics heat dissipation applications,“ 12 December 2013. [Online]. Available: http://www.researchgate.net/publication/261409633_Novel_thermal_interface_materials_boron_nitride_nanofiber_and_indium_composites_for_electronics_heat_dissipation_applications. [Přístup získán 11 07 2016].
- [104] „Firma ELCHEMCo, spol. s.r.o., Transport tepla v elektrotechnice,“ [Online]. Available: http://web.elchemco.cz/text_226.php. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [105] Š. D. Holeček O., „Sdílení tepla,“ [Online]. Available: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k11.sdileni.tepla.pdf>. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [106] K. R. Macháčková A., „Sdílení tepla, učební text, VŠB – Technická univerzita, Ostrava, ISBN 978-80-248-2576-2,“ [Online]. Available: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [107] V. V., „Elektrické teplo, VŠB – TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky,“ [Online]. Available: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [108] „12. Kapitola. Tepelné vlastnosti,“ [Online]. Available:

- http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_12.pdf. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [109] J. J., „Studium tepelných vlastností kompozitních materiálu, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Dušan Fojta, Ph.D.“ 2010.
[Online]. Available:
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13809/jir%c3%a1sek_2010_bp.pdf?sequence=1. [Přístup získán 17 06. 2016].
- [110] S. I., „Základy tepelného managementu, Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních Technologií, Ústav Mikroelektroniky,“ [Online]. Available:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/09a_tepelny_management.pdf. [Přístup získán 18 06. 2016].
- [111] J. H. L. I. / J. H. L. V., „Heat transfer text book third edition,“ [Online]. Available: <http://web.mit.edu/lienhard/www/ahttp131.pdf>.
- [112] I. Martinez, „Heat and mass transfer,“ [Online]. Available:
<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c11/Heat%20and%20mass%20transfer.pdf>. [Přístup získán 18 06. 2016].
- [113] „Společnost ŠKODA ELECTRIC a.s.,“ [Online]. Available:
<http://www.skoda.cz/en/contacts/skoda-electric-as/>. [Přístup získán 14 07 2016].
- [114] „Společnost Sigma Aldrich,“ [Online]. Available: www.sigmaaldrich.com. [Přístup získán 14 07 2016].
- [115] „Společnost Cogebi a.s.,“ [Online]. Available: <http://www.cogebi.com/>. [Přístup získán 14 07 2016].
- [116] „Smart technologies in the world of composites,“ 5M s.r.o., [Online]. Available: <http://www.5m.cz/en/>. [Přístup získán 7 9 2016].
- [117] „Relanex 45.011 COGEBI a.s.,“ [Online]. Available:
http://www.fkaeng.com/userfiles/45011RLX_cogebi1.pdf. [Přístup získán 4 11 2016].
- [118] J. a. k. FUKA, Termika a molekulová fyzika, Praha: SPN, 1968.
- [119] Ř. J. a. kol., Tepelné, technické a energetické vlastnosti budou, Praha: Grada, 2002.

- [120] P. J., „Analýza tepelných procesu metodou tepelných sítí, Diplomová práce Brno 2009, Fakulta Strojního Inženýrství, Ústav Mechaniky Teles, Mechatroniky a biomechaniky, Vedoucí práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.,“ 2009. [Online]. Available: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/h>. [Přístup získán 19 06. 2016].
- [121] V. V., „Elektrické stroje - rozdělení, druhy provedení, vlastnosti, dimenzování,“ Březen 2004 (poslední úprava: únor 2006). [Online]. [Přístup získán 10 07 2016].
- [122] H. V., Návrh synchronního generátoru a ověření parametru MKP, Plzeň: ZČU v Plzni, 2010.
- [123] H. J. a. k. List Vlastimil, Elektrotechnika II - elektrické stroje, část 1., Praha: SNTL, 1969.
- [124] T. V., Zvýšení oteplení rotoru vlivem povrchových ztrát, Plzeň: Výpočtový list 8H580710/2 Škoda Plzeň, 1990.
- [125] Š. J., Návrh turboalternátoru. Diplomová práce 2011 ZČU v Plzni, vedoucí práce Ing. Lukáš Bouzek, Plzeň: ZČU v Plzni, 2011.
- [126] „penize.cz,“ [Online]. Available: <http://www.penize.cz/bydleni/308044-cena-kwh-elektriny-2016-zjistete-kolik-a-za-co-platite>. [Přístup získán 10 10 2016].
- [127] „Nanotechnologie,“ Technická univerzita v Liberci , [Online]. Available: <https://nano.tul.cz/nanotechnologie>. [Přístup získán 26 10 2016].
- [128] H. J. a. kol., Světelná technika a osvětlování, Praha: FCC PUBLIC, ISBN 800-901985-0-3, 1995.
- [129] M. K. H. Janda, „Teplotní měření v elektrických strojích“.Elektrorevue ISBN 1213 – 1539, 2008/33 – 3. 9. 2008.
- [130] M. C. M. Šimko, Termovízia a jej využitie v praxe, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 978-80-8070-654-8, 2007.
- [131] M. Kraidl, Měření teploty – senzory a měřicí obvody, Praha: BEN, 2005.
- [132] T. T. P. Tomášková, „The influence of thermal properties of aluminum oxide on electrical insulating materials,“ v Electric Power Engineering 2014 Brno, 978-1-4799-3807-0/14/\$31.00 ©2014 IEEE, Brno, 2014.
- [133] S. M. T. P. Tomášková T., „The influence of nano- and micro- fillers on heat

- transfer in electrical insulation system,“ v Diagnostika '13 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, pp.148-151, Plzen, 2013, ISBN 978-80-261-0210-6, Plzeň, 2013.
- [134] „Electronic Properties of Material Conduction Problems and Solutions,“ [Online]. Available: http://drajput.com/notes/electronic_properties/thin_insulating_disc_mica.php. [Přístup získán 14 07 2016].
- [135] „Silica - Silicon Dioxide,“ [Online]. Available: <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>. [Přístup získán 14 07 2016].
- [136] Z. T. J. V. R. H. V. Ancik, „Modeling of Thermal Phenomena in Liquid Cooling System for Aircraft Electric Unit,“ IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011(99). p. 1 - 7. ISSN 0278-0046.
- [137] R. Pechanek a L. Bouzek, „Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics,“ v Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International , vol., no., pp.LS2e.4-1,LS2e.4-5, 4-6 Sept. 2012, 2012.
- [138] A. G. P. J. U. G. SanAndres U., „Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models,“ v Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.61, no.8, pp.4383,4391, Aug. 2014, 2014.
- [139] B. Y. L. P. Trigeol J. F., „Thermal modeling of an induction machine through the association of two numerical approaches,“ v 21, pp. 314-323, Jun. 2006, IEEE Trans. Energy Conversion.
- [140] P. M. C. C. M. M. O. S. K. T. Staton D., „Analytical thermal models for small induction motors,“ v Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on , vol., no., pp.1,6, 6-9 Sept. 2008, 2008.
- [141] T. J. V. R. H. V. Ancik Z., Modeling of Thermal Phenomena in Liquid Cooling System for Aircraft Electric Unit, IEEE Transactions on Industrial Electronics: 2011(99). p. 1 - 7. ISSN 0278-0046, 2011.
- [142] B. L. Pechanek R., „Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics,“ v Power Electronics and Motion Control

Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International , vol., no., pp.LS2e.4-1,LS2e.4-5, 4-6 Sept. 2012, 2012.

Publikační činnost autora

- [I] TOMÁŠKOVÁ, T. Zlepšování parametrů vysokonapěťových zařízení. In *Elektrotechnika a informatika 2012- část první*. Nečtiny: 2012. ISBN: 978-80-261-0120-8
- [II] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., TRNKA, P. The influence of nano- and micro- fillers on heat transfer in electrical insulation system. In *Diagnostika '13: international conference*. Pilsen: University of West Bohemia, 2013. s. 148-151. ISBN: 978-80-261-0210-6
- [III] TOMÁŠKOVÁ, T. Vliv tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy elektrických točivých strojů. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 159-162. ISBN: 978-80-261-0233-5
- [IV] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., TRNKA, P. Vliv nano- a mikroplniv na šíření tepla elektroizolačními systémy. *ElectroScope*, 2013, roč. 2013, č. 2, s. 1-8. ISSN: 1802-4564
- [V] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. *Diagnostika a Life-Cycle Management transformátorů 2013 - 2014*. ČEPS, a.s., 2013.
- [VI] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. *Analýza vlivů chodu transformátorů ČEPS*. ČEPS a. s., 2013.
- [VII] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., TRNKA, P. The influence of thermal properties of materials on electric insulating systems of electrical rotating machines. In *DESAM 2014 : Diagnostic of Electrical Machines and Materials, 3rd International Conference : Proceedings*. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 82-87. ISBN: 978-80-554-0888-0
- [VIII] TOMÁŠKOVÁ, T., TRNKA, P. The influence of thermal properties of aluminum oxide on electrical insulating materials. In *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Piscataway: IEEE, 2014. s. 421-425. ISBN: 978-1-4799-3806-3
- [IX] TOMÁŠKOVÁ, T. Využití kalorimetrie pro měření celkových ztrát elektrických zařízení. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1.*,

- Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 143-146. ISBN: 978-80-261-0367-7
- [X] SMÍTKA, V., TOMÁŠKOVÁ, T. Šíření tepla v elektroizolačních systémech elektrických točivých strojů s použitím nano- a mikroplniv. In Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1., Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 111-114. ISBN: 978-80-261-0367-7
- [XI] HARVÁNEK, L., TOMÁŠKOVÁ, T., MENTLÍK, V., TRNKA, P. Modification of epoxy resin used in high-voltage technology. In Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. s. 346-349. ISBN: 978-1-4673-6788-2
- [XII] TOMÁŠKOVÁ, T., TRNKA, P. The influence of thermal properties of materials on electric insulating systems of air-cooled turbogenerators. In Proceedings of the 2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE'15). Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4673-7172-8
- [XIII] HARVÁNEK, L., TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., MENTLÍK, V. Composites with nanosilica. In Proceedings of the International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2015). Piscataway: IEEE, 2015. s. 844-847. ISBN: 978-1-4799-8903-4
- [XIV] TOMÁŠKOVÁ, T., PECHÁNEK, R., KINDL, V. Benefits of upgrading insulating materials to operating temperature of induction motor. In Proceedings of the 17th European Conference on Power Electronics and Application (EPE ECCE Europe 2015). Piscataway, New Jersey: IEEE, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-90-75815-23-8
- [XV] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., SHLYKEVICH, A., TRNKA, P. Increase the thermal conductivity of high voltage electrical insulation systems. In Proceedings of the 17th European Conference on Power Electronics and Application (EPE ECCE Europe 2015). Piscataway, New Jersey: IEEE, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-90-75815-23-8
- [XVI] TOMÁŠKOVÁ, T., HARVÁNEK, L., TRNKA, P., MENTLÍK, V. Preparation new epoxy composite insulating material with higher thermal conductivity. In Proceedings of the 19th International Symposium on High

- Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0476-6
- [XVII] TOMÁŠKOVÁ, T. Měření teploty v elektrických točivých strojích. In *Elektrotechnika a informatika 2015*. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 107-110. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [XVIII] TOMÁŠKOVÁ, T., HARVÁNEK, L., TRNKA, P., MENTLÍK, V., SEBOK, M., GUTTEN, M. New epoxy composite insulating material with nano fillers and micro fillers of silica with higher thermal conductivity. In *Proceedings of International Conference on Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 89-93. ISBN: 978-1-5090-1249-7
- [XIX] TOMÁŠKOVÁ, T., SHLYKEVICH, A., HORNAK, J., TRNKA, P., GUTTEN, M. The high voltage electrical insulation systems with higher thermal conductivity. In *Proceedings of the 1st International Conference on Dielectrics*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 938-941. ISBN: 978-1-5090-2803-0
- [XX] TOMÁŠKOVÁ, T., ČEJKOVÁ, A., HARVÁNEK, L. Vliv tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy. *Electroscope*, 2016, roč. 2016, č. 2, s. 1-8. ISSN: 1802-4564
- [XXI] TOMÁŠKOVÁ, T., BLÁHA, Š., SHLYKEVICH, A., TRNKA, P., GUTTEN, M. Effect of micro-filler of aluminium oxide on the mechanical, electrical and thermal properties of electrical insulation systems. In *Proceedings of the 18th European Conference on Power Electronics and Application (EPE ECCE Europe 2016)*. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2016. s. 1-10. ISBN: 978-90-75815-25-2
- [XXII] TRNKA, P., ČEJKOVÁ, A., MENTLÍK, V., TOTZAUER, P., HARVÁNEK, L., TOMÁŠKOVÁ, T. Effect of inhibitors on thermal degradation of vegetable oils. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 343-346. ISBN: 978-1-5090-0908-4

Funkční vzorek

TRNKA, P., TOMÁŠKOVÁ, T. Zařízení pro měření tepelné vodivosti. ZČU v Plzni 2016. Jedná se o zařízení, které umožňuje měření tepelné vodivosti vzorků materiálů, zejména pak variant elektroizolačních materiálů (měření probíhá na plošných vzorcích materiálů).

Přílohy

Příloha I ČSN EN 60085 ED. 2 (330250)

ČSN EN 60085 ED. 2 (330250) dává návod k přiřazení tepelné třídy elektroizolačním materiálům (EIM) a elektroizolačním systémům (EIS). Jsou zde definovány základní pojmy, jako elektroizolační materiál, elektroizolační systém, kandidátský a referenční EIM a EIS, relativní index tepelné odolnosti (RTE), stanovený index tepelné odolnosti (ATE), tepelná třída. Je zde odkaz na zkušební postupy pro tepelné hodnocení EIM a EIS. Tepelné třídy označuje čísla rovnými nejvyšší teplotě ve stupních Celsia, pro které je elektroizolační materiál nebo systém může být použit. Označení pro tepelné třídy jsou následující:

Tab. 16 Přiřazení tepelných tříd

ATE nebo RTE (°C)	Tepelná třída (°C)	Předchozí označení*
≥ 90 – < 105	90	Y
≥ 105 – < 120	105	A
≥ 120 - < 130	120	E
≥ 130 – < 155	130	B
≥ 155 – < 180	155	F
≥ 180 – < 200	180	H
≥ 200 – < 220	200	N
≥ 220 – < 250	220	R
≥ 250**	250**	

*Je-li to požadováno, může být předchozí písmenné označení přidáno v závorce např. třída 180 (H). V případě omezeného prostoru, např. na štítku stroje nebo zařízení, mohou výrobkové technické komise zvolit použití pouze písmenného označení.

**Označení tepelných tříd nad 250 se musí zvyšovat o přírůstky 25°C a musí

být podle toho označeny.

Příloha II Způsoby šíření tepla

Šíření tepla je jedním ze způsobů přenosu energie (sdílení energie mezi molekulami a atomy (převod energie z místa s vyšší teplotou na místo s nižší teplotou)). Částice v systémech se přitom nepřemísťují, ale pouze si mezi sebou předávají energii po dobu relaxačních procesů, během nichž systém přejde do rovnovážného stavu.

Šíření tepla vedením (kondukcí)

K vedení tepla dochází v pohyblivých, nebo nepohyblivých látkách všech skupenství. Pro popis odvodu tepla se používají Fourierovy zákony. Rozlišujeme stacionární úlohy (časově neproměnné), které popisují ustálené stavy a nestacionární úlohy (časově proměnné), které řeší rozložení teploty při přechodných dějích.

První Fourierův zákon souvisí se znalostí teplotního pole a vyjadřuje, že hustota tepelného toku je úměrná zápornému gradientu teploty (vektory q a $\text{grad } T$ ležící na jedné přímce v opačném směru). Teplo se předává z místa vyšší teploty na místo s nižší teplotou, což je znázorněno na Obr. 36 (znaménko mínus v rovnici (47) respektuje opačný směr vektorů q a $\text{grad } T$ [39], [106], [111], [112]. Tento vztah nerespektuje proměnný čas, proto první Fourierův zákon platí pro stacionární vedení tepla.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T$$

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (47)$$

kde:

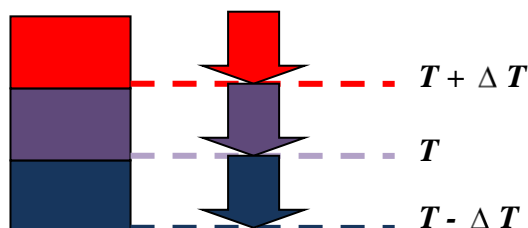
q	hustota tepelného toku	(W·m ⁻²)
x, y, z	prostorové souřadnice	(m)
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
$\text{grad } T$	jednotkový teplotní gradient (1 K)	(K·m ⁻¹)
T	teplota	(K)

Součinitel tepelné vodivosti je fyzikální parametr látky, který závisí na teplotě, tlaku a chemickém složení látky. Definicí lze říci, že vektor součinitele tepelné

vodivosti je množství tepla Q , které projde za jednotku času t (1 s) jednotkovou plochou izotermického povrchu S (1 m²), přičemž v tělese je jednotkový teplotní gradient (1 K), (vztah (48)) [106].

$$\lambda = - \frac{Q}{S \cdot t \cdot \text{grad } T} \quad (48)$$

Určení součinitelů tepelné vodivosti je bezproblémové, pokud se jedná o látku homogenní. Komplikovanější situace je u látek heterogenních. V takových případech je tepelná vodivost ovlivněna i technologií zpracování.



Obr. 36 Schematické zobrazení šíření tepla vedením z místa vyšší teploty na místo s nižší teplotou

Druhým Fourierovým zákonem nazýváme Fourierovu rovnici vedení tepla (vztah (49)), kterou použijeme při řešení vztahu, budeme-li uvažovat, že teplo se šíří tělesem v určitém čase (nestacionární vedení tepla). Nejčastěji používaný tvar Fourierovy (parciální diferenciální) rovnice vedení tepla [105], [106], [83], [108], [111], [112] je:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \quad (49)$$

kde: ∇^2 Laplaceův operátor

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (50)$$

T teplota (K)

x, y, z	prostorové souřadnice	(m)
q_v	tepelný tok uvolněný vnitřními zdroji	(W·m ⁻²)
ρ	hustota	(kg·m ⁻³)
t	čas	(s)
a	součinitel teplotní vodivosti	(m ² ·s ⁻¹)
c_p	měrná tepelná kapacita	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)

Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí:

$$a = \frac{\lambda}{(\rho \cdot c_p)} \quad (51)$$

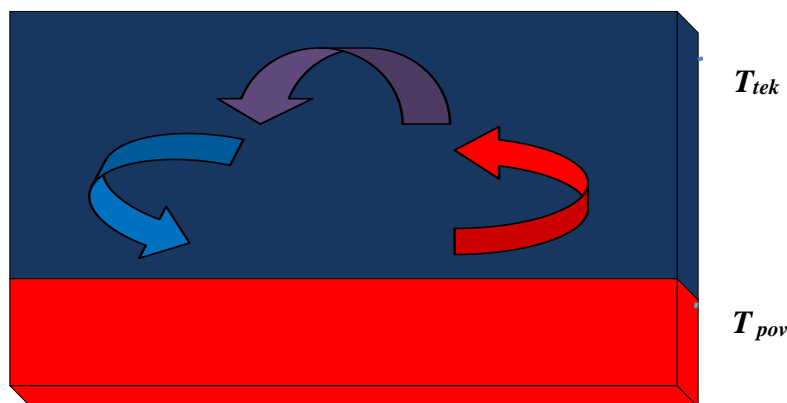
Šíření tepla prouděním (konvekcí)

Šíření tepla prouděním je druhým ze způsobů šíření tepla. Prouděním se šíří teplo v kapalinách, plynech a v plazmě. Konvekci rozdělujeme na přirozenou a nucenou. Následující část je zaměřená na konvekci mezi tekutinou a tuhou látkou. Teplo se šíří ze stěny látky vedením přes laminární podvrstvu a pak prouděním. Chladnější tekutina sestupuje a teplejší stoupá, což je znázorněno na Obr. 37. Šíření tepla prouděním matematicky lze popsat jako rovnost prvního Fourierova zákona a Newtonova zákona [104], [105], [106], [82], [111], [112]:

$$q_{konv} = -\lambda \cdot \text{grad}T = \alpha_{konv} \cdot (T_{pov} + T_{tek}) \quad (52)$$

kde:

q_{konv}	hustota tepelného toku (konvekcí)	(W·m ⁻²)
$\text{grad}T$	jednotkový teplotní gradient (1 K)	(K·m ⁻¹)
T_{pov}	teplota povrchu tuhé látky	(K)
T_{tek}	teplota proudící tekutiny	(K)
α_{konv}	součinitel přestupu tepla	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)



Obr 37 2 Schematické zobrazení šíření tepla konvekcí mezi tekutinou a povrchem pevné látky

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_{konv} - určuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu tuhé látky. Čím je součinitel vyšší, tím intenzivněji k výměně tepla dochází, proto je potřeba určit hodnotu součinitele, aby bylo možné správně vyjádřit konvekci. Rovnice, která umožní výpočet α_{konv} obsahuje fyzikálních vlastností kapaliny, charakter proudění za určitých podmínek. Proto byla stanovena obecná kritériální rovnice sdílení tepla konvekcí, popisující celý proces sdílení tepla konvekcí [38], [45], [48], [51], [62], [105], [106], [82], [108], [111], [112]:

$$\text{Grashofovo kritérium} \quad Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2 \quad (53)$$

$$\text{Nusseltovo kritérium} \quad Nu = \alpha_{konv} l / \lambda \quad (54)$$

$$\text{Prandtlovo kritérium} \quad Pr = \nu / \alpha_{konv} = c_p \eta / \lambda \quad (55)$$

$$\text{Pécletovo kritérium} \quad Pe = v l / \alpha_{konv} \quad (56)$$

$$\text{Reynoldsovo kritérium} \quad Re = v l / \nu \quad (57)$$

$$\text{Stantonovo kritérium} \quad St = \alpha_{konv} / v \rho c_p \quad (58)$$

kde:

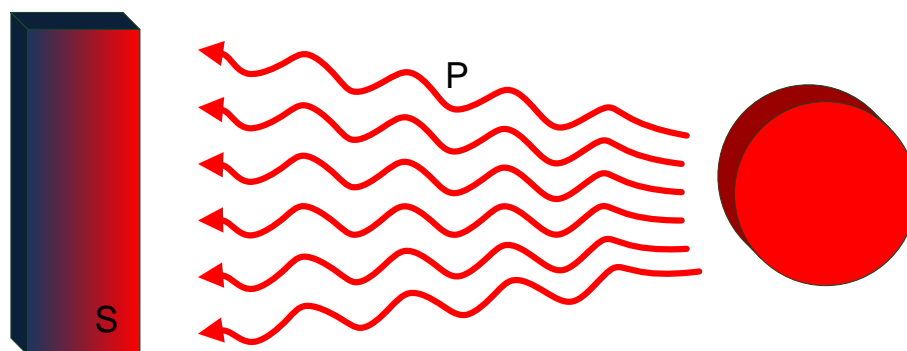
g	tíhové zrychlení	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
α_{konv}	součinitel přestupu tepla	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
c_p	měrná tepelná kapacita	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
ρ	hustota	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
β	teplotní objemová roztažnost	(K^{-1})
ν	kinematická viskozita	$(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1})$
η	dynamická viskozita média	$(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
v	charakteristickou rychlost	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
l	charakteristický délkový rozměr	(m)

Součinitel přestupu tepla konvekcí závisí na vlastnostech a na rychlosti

proudění dané tekutiny a také na tvaru povrchu, který je obtékán. V Tab. 2 jsou uvedeny hodnoty součinitelů přestupu tepla nucenou konvekcí a přirozenou konvekcí [82].

Šíření tepla zářením (radiací, sáláním)

Šíření tepla zářením je třetí způsob přenosu tepla. Přenos energie se uskutečňuje elektromagnetickým vlněním, které se šíří rychlostí světla. Na Obr. 38 je schematické zobrazení šíření tepla zářením. Existují dvě teorie chování světla – vlnová teorie, kde lze světlo popsat klasickou elektromagnetickou teorií (např. šíření, lom, odraz, ohyb světla) a kvantovou korpuskulární teorií (např. interakce světla s látkou, laser). Mezi základní pojmy šíření tepla patří: intenzita vyzařování, směrová intenzita vyzařování, plošná zářivost [39], [82], [111], [112], [128].



Obr. 38 Schematické zobrazení šíření tepla zářením z místa vyšší teploty na místo s nižší teplotou

Intenzita vyzařování E (vztah (59)) a představuje hustotu tepelného toku:

$$E = \frac{dP}{dS} \quad (59)$$

kde:

P	celkové množství energie (zářivý tok)	(W)
S	povrch pevné látky (plocha)	(m ²)
E	intenzita vyzařování	(W·m ⁻²)

Směrová intenzita vyzařování I_φ (vztah (60)) představuje množství energie vyzářené v určitém směru, když je směr odkloněn od normály n k ploše dS o úhel φ , pak směrová intenzita vyzařování je [128]:

$$I_{\varphi} = \frac{dE_{\varphi}}{d\omega} \quad (60)$$

kde:

I_{φ}	směrová intenzita vyzařování	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
$d\omega$	elementární prostorový úhel	(sr)
dE_{φ}	intenzita vyzařování v určitém směru	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
φ	úhel	(rad)

Plošná zářivost L_{φ} (vztah (61)) se vyjadřuje jako směrová intenzita vyzařování I_{φ} , je ale vztažena k elementární ploše dS_s , která je průmětem dS na rovinu kolmou ke směru s [128]:

$$L_{\varphi} = \frac{I_{\varphi}}{\cos \varphi} \quad (61)$$

kde:

I_{φ}	směrová intenzita vyzařování	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
L_{φ}	plošná zářivost	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
φ	úhel	(rad)

Přenos sáláním (zářením) popisuje Stefan-Boltzmannův zákon a může být vyjádřen následujícím vztahem [39], [45], [112], [120]:

$$q_{\text{sáláním}} = \varepsilon \cdot C \cdot S \cdot (T_{\text{sáláním}}^4 - T_o^4) \quad (62)$$

kde:

$q_{\text{sáláním}}$	hustota tepelného toku sáláním (zářením)	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
ε	poměrná emisivita materiálu	(-)
C	Stefan-Boltzmannova konstanta	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$
S	vyzařovací plocha tělesa	(m^2)
$T_{\text{sáláním}}$	absolutní teplota sálajícího povrchu	(K)
T_o	absolutní teplota okolí (vzdáleného)	(K)

Odvod tepla zářením se ve velkých elektrických zařízeních neuplatňuje tak významným způsobem, jako vedením a prouděním, s ohledem na přesnost tepelných

výpočtů jej lze zanedbat.

Příloha III Měření teploty v elektrických strojích

Kontaktní měření

Kontaktní měření teploty je založené na přímém přenosu tepla z měřeného povrchu na měřicí čidlo např. odporové senzory, termoelektrické senzory, indikátory teploty, dilatační teploměry [129].

Odporové senzory jsou založeny na jednoduchém principu změny odporu v závislosti na teplotě (např. u vodivých materiálů narůst odporu s teplotou, u polovodičů snížení odporu se zvýšením teploty). Podle konstrukčního uspořádání odporové senzory mohou být rozdělené na kovové (např. platinové, niklové, měděné) a polovodičové (např. termistory, negistory, pozistory, polovodičové monokrystalické senzory teploty).

Termočlánky se skládají ze dvou vodičů (např. pásků nebo drátů) z různých kovů, spojených na jednom konci. Při změně teploty na spoji dojde ke změně termoelektrické síly mezi dvěma konci. Princip termočlánků vychází z jevu, který je nazván Seebeckův jev (převod tepelné energie na elektrickou). Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii, a proto difundují do chladnějších míst ve větším množství.

Indikátory teploty slouží k přibližnému určení teploty (např. nálepky, tužky, laky, tekuté krystaly), ale mohou se hodit, když je potřeba potvrdit, že teplota určité části zařízení nebo materiálu nepřesáhla určitou hodnotu. Teplota se stanovuje na základě znalosti kritické teploty. Vliv na odchylky teploty má např. složení atmosféry, tlak, chemické prostředí. Indikátory teploty barevné se člení na vratné a nevratné.

Výhody kontaktního měření teploty:

- Dostatečná přesnost
- Dobrá časová stabilita měřených hodnot
- Relativně nízká cena
- Snadné umístění uvnitř i vně zařízení
- Relativně velká rychlost odezvy

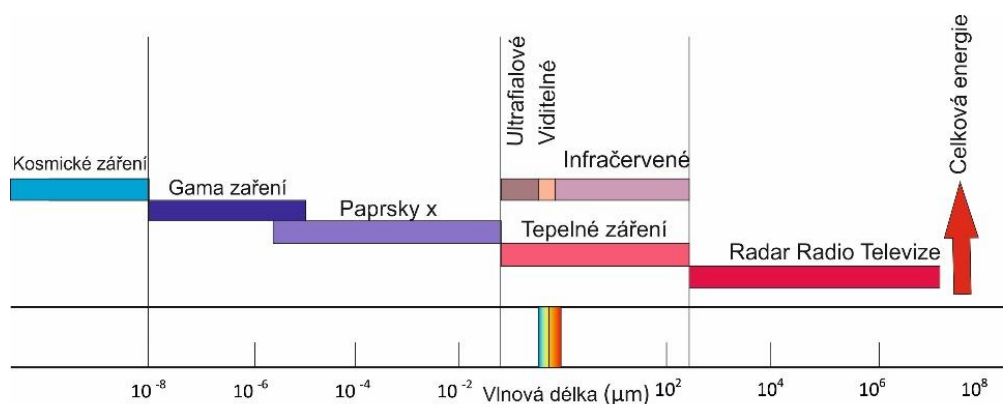
Nevýhody kontaktního měření teploty:

- Vyvedení připojovacích vodičů
- Měření na pohyblivých částech

- Nutnost úpravy konstrukce (v některých případech)

Bezkontaktní měření

Bezkontaktní měření teploty je založeno na sledování povrchové teploty předmětů na základě elektromagnetického záření (paprsky x, což je starší název rentgenového záření). Toto záření je zpracováno pomocí detektoru, který zaznamená záření v rozsahu vlnových délek 0,4 μm do 25 μm , což pokrývá velkou část infračerveného spektra (viz Obr. 39) a umožňuje měřit v rozsahu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [129].



Obr. 39 Vlnová délka

Pro každý materiál stanovena veličina (existují tabulky hodnot emisivity), která udává míru vyzařování povrchu tělesa. Ale, je vhodné na počátku měření ověřit, zda tato hodnota odpovídá právě měřenému materiálu. Z důvodu, že na materiálech se objevují různé povrchové vrstvy (např. na kovech nátěr nebo koroze) a vlastnosti (např. odrazivost povrchu), které mají vliv na hodnotu emisivity. K řešení tohoto problému je možné použít několik metod, které jsou podrobně popsány v [129]. Pro bezkontaktní měření teploty se používají např. pyrometry a termokamery.

Pyrometry – měřicí přístroj pro rychlá a spíše orientační měření např. při jednoduché revizi daného zařízení, teploty vodičů, teploty venkovního vedení, teploty spojů na vedení. Pracuje na principu snímání jen jednoho optického bodu v závislosti na optických vlastnostech daného pyrometru. Zaklad pyrometru tvoří snímače infračerveného záření, které se dělí podle principu funkce na kvantové a tepelné snímače [130], [131]. Kvantové snímače využívají k vyhodnocování infračervené oblasti záření fotoelektrického jevu v polovodičích (např. senzor – fotodioda,

fotoodpor). Tepelné snímače zvyšují svoji teplotu vlivem dopadajícího záření bez ohledu na jeho vlnovou délku (např. termoelektrické články, termistory, pyroelektrické senzory). Pyrometry vyhodnocují podle použitého druhu snímače určitou část záření a na základě toho mohou být rozdělené na radiační (využívají celé spektrum, tepelné snímače), spektrální (využívají záření úzké části spektra nebo jednu vlnovou délku, kvantové snímače) a barvové (vyhodnocují změnu barvy měřeného materiálu s teplotou, kvantové snímače) [130], [131]. Pyrometry mohou být rozdělené na ruční a stacionární, které jsou podrobně popsány v [130]. Získání kvalitních výsledků pomocí pyrometru vyžaduje určitý druh zkušenost, protože přesnost dosažených výsledků může být závislá např. na úhlu naklonění proti měřenému povrchu.

Termokamery využívají při bezkontaktním měření teploty zaznamenání celého povrchu stroje do jednoho digitálního snímku, který lze dále analyzovat pomocí speciálních programů. Tyto programy umožňují provést důkladnou analýzu teplotního pole pomocí údajů z demosnímků, které jsou zaznamenány v jediný časový okamžik. Což se využívá při teplotní analýze elektrického stroje, který je konstruován z několika různých materiálů a je možné zjistit teplotu jednotlivých částí stroje v určitém čase bez větších problémů. Termokamery mohou být rozdělené na přenosné a pevně zabudované (stacionární), dalším rozdělením je podle oblasti infračerveného spektra (podle oblasti v které pracují NWIR - Near Wavelength Infrared Region, MWIR – Middle Wavelength Infrared Region, LWIR – Long Wavelength Infrared Region) nebo podle počtu pixelu, podrobně popsáno v [130].

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- Možnost měřit teploty celého povrchu stroje v jednom okamžiku
- Měření rychlých změn teploty
- Možnost měření na pohybujících se částech
- Malý vliv měřicího přístroje na měřený stroj

Nevýhody bezkontaktního měření:

- Problém s určením správné emisivity povrchu
- Chyby měření způsobené okolním prostředím
- Problémy s odrazem teploty na lesklých částech stroje

Příloha IV Experimentální vzorky s přidáním oxidu hlinitého

Výroba vzorků s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3

Bylo vyrobeno šest sad vzorků. Postup výroby vzorku s přidáním oxidu hlinitého Al_2O_3 byl popsán v Kapitole 5 této práce. Na výrobu první sady vzorku nebyl použit oxid hlinitý Al_2O_3 , ale jen modifikovaná epoxidová pryskyřice (angl. bisphenol A type) s tvrdidlem obsahujícím methylhexahydrophthalic anhydrid, methyltetrahydrophthalic anhydrid a hexahydrophthalic anhydrid [116]. Do dalších sad byly přidány částice oxidu hlinitého Al_2O_3 (v množství, které je vidět v Tab. 17). Součinitel tepelné vodivosti elektroizolačního systému, kde jako matrice je použita epoxidová pryskyřice se rovná $0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ [111], [112], [132], [133], [134]. Vytvrzování vzorků probíhalo po dobu 2 hodin při teplotě $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a dotvrzování po dobu 5 hodin a při teplotě $135 \text{ }^\circ\text{C}$.

Měření součinitele tepelné vodivosti

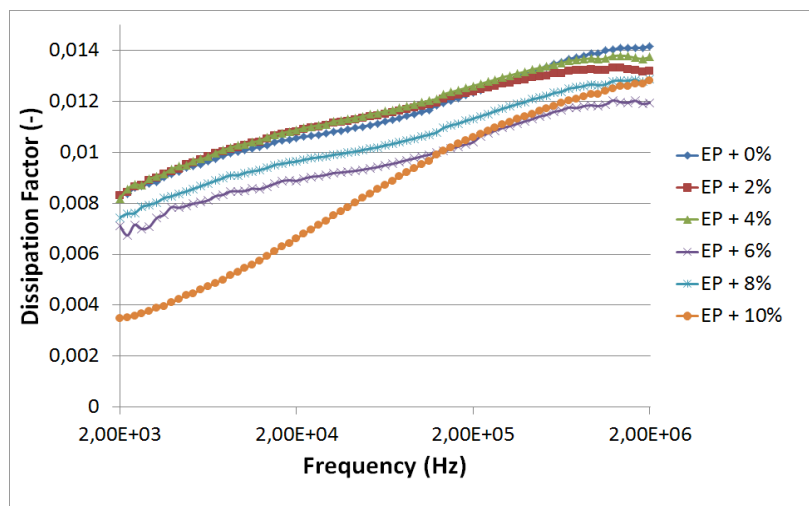
Tab. 17 ukazuje hodnoty součinitele tepelné vodivosti vzorku, které byly vyrobené s použitím epoxidové pryskyřice a oxidu hlinitého (Al_2O_3) a hodnoty $\tan \delta$. Měření $\tan \delta$ byly provedeny při napětí 500 V, teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C}$ a vlhkosti vzduchu 40 %. Součinitel tepelná vodivost se zvyšuje s přidáním většího množství Al_2O_3 (2%, 4%, 6%, 8% a 10%). Jak se dalo očekávat, můžete získat vyšší hodnotu tepelné vodivosti.

Tab. 17 *Hodnoty součinitele tepelné vodivosti*

Vzorek	$\lambda \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\tan \delta$
EP	0,22	0,0023
EP + Al_2O_3 2 %	0,22	0,0022
EP + Al_2O_3 4 %	0,23	0,0021
EP + Al_2O_3 6 %	0,24	0,0028
EP + Al_2O_3 8 %	0,28	0,0025
EP + Al_2O_3 10 %	0,29	0,0027

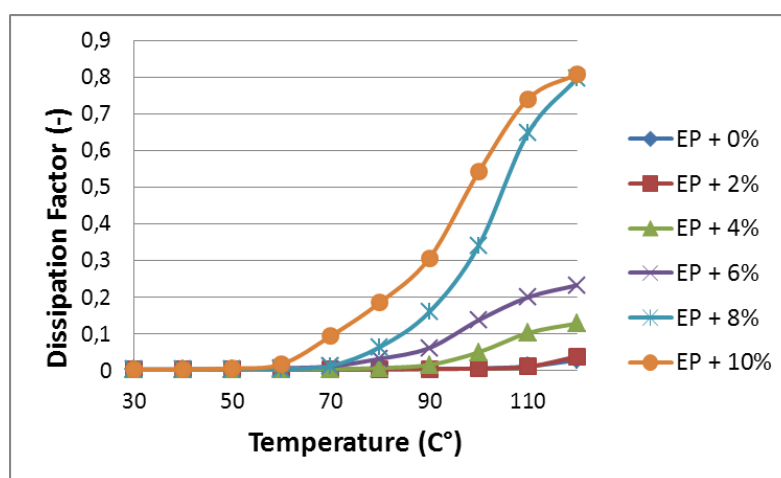
Měření $\tan \delta$ v závislosti na frekvenci

Na vzorcích proběhla měření $\tan \delta$ v závislosti na frekvenci, kde vliv plniv na $\tan \delta$ v závislosti na frekvenci o 5 kHz až 2000 kHz nebyl pozorován (Obr. 40), za účelem ověřit vliv Al_2O_3 na dielektrické vlastnosti vzorku (10 V).

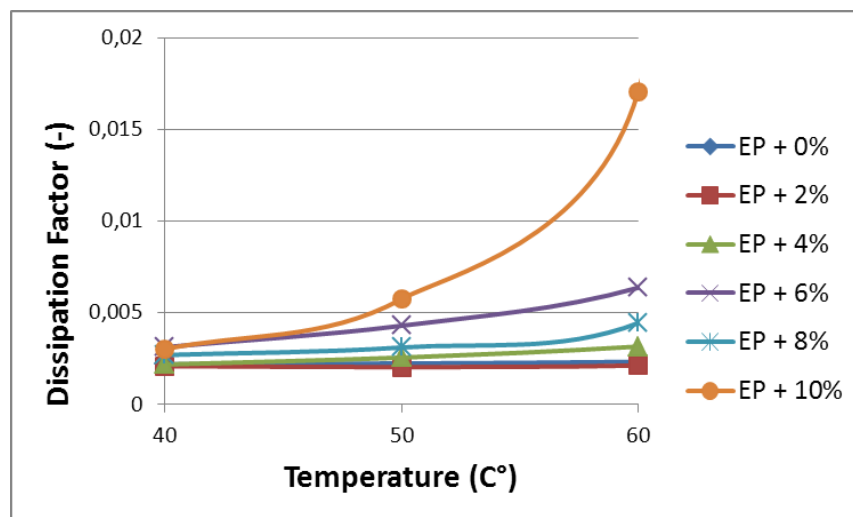
Obr. 40 Měření $\tan \delta$ v závislosti na frekvenci

Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě

Z grafu na Obr. 41 je vidět že vzorky vyrobené s přidáním 8% Al_2O_3 mají stejný průběh jako vzorky s přidáním 10% Al_2O_3 , dále zde můžeme sledovat stejný trend chování u zbylých vzorku (6%, 4%, 2%) kde pozorujeme nižší hodnoty $\tan \delta$.

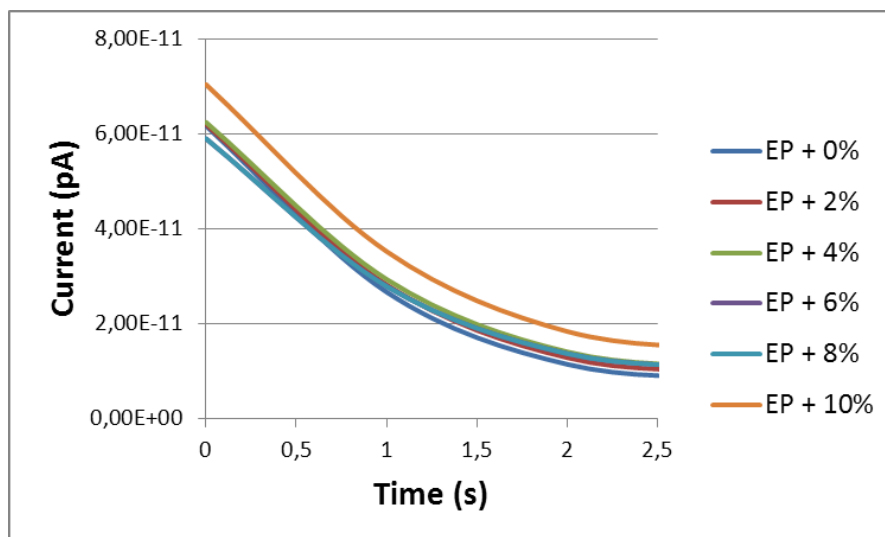
Obr. 41 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě

Teplota skelného přechodu (T_g) epoxidové pryskyřice, použité pro výrobu vzorku je 131 °C (teplotní třída E (120)). Vzduchem chlazené turbogenerátory v současné době pracují v teplotní třídě F (155 °C) a vyšší. Obvykle je provozní teplota je nižší (což odpovídá třídě B (130 °C)).

Obr. 42 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě

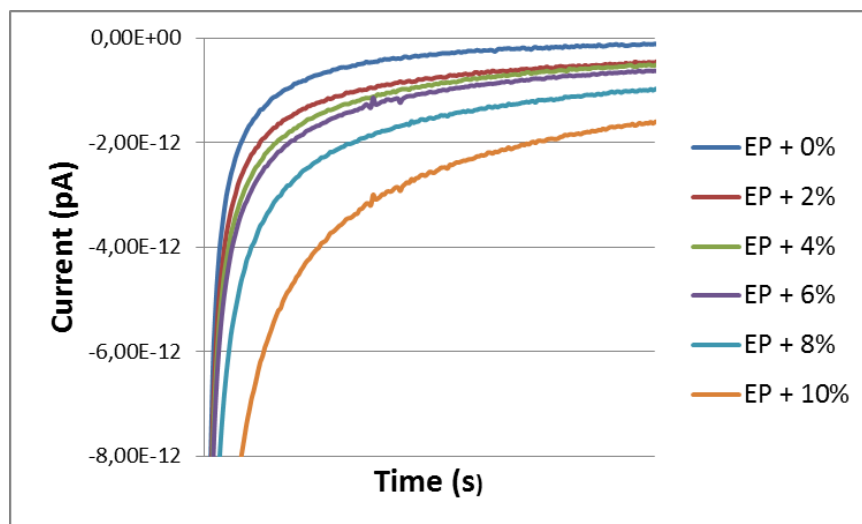
Měření absorpčních a resorpčních proudů

Bylo provedeno měření absorpčních a resorpčních proudů za účelem ověřit vliv množství Al_2O_3 na dielektrické vlastnosti (Obr. 43 - Obr. 45).

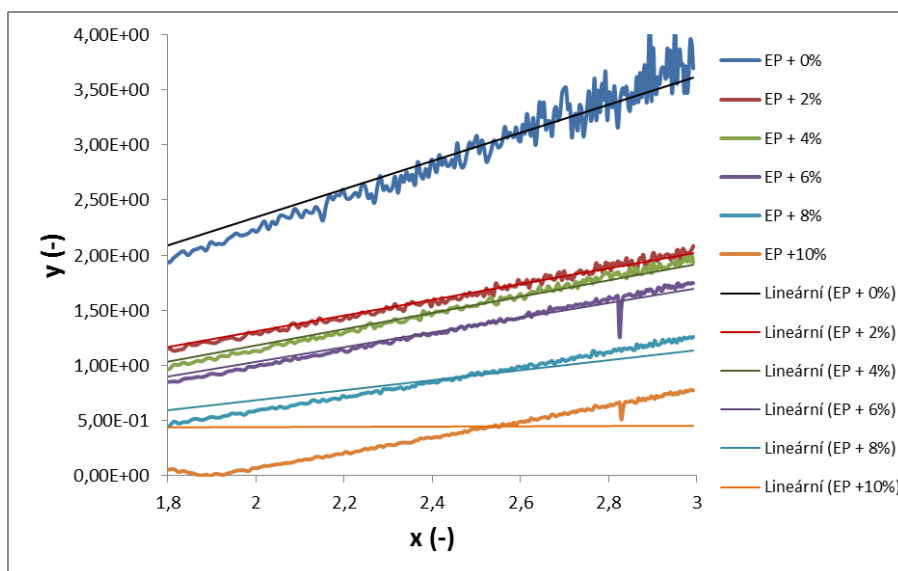


Obr. 43 Měření absorpčních proudů

Na Obr. 43 je znázorněn větší vliv pomalých polarizací u vzorků s přidáním 10% Al_2O_3 , což může být způsobeno formováním shluků částic oxidu hlinitého v matrici epoxidu.



Obr. 44 Měření resorpčních proudů

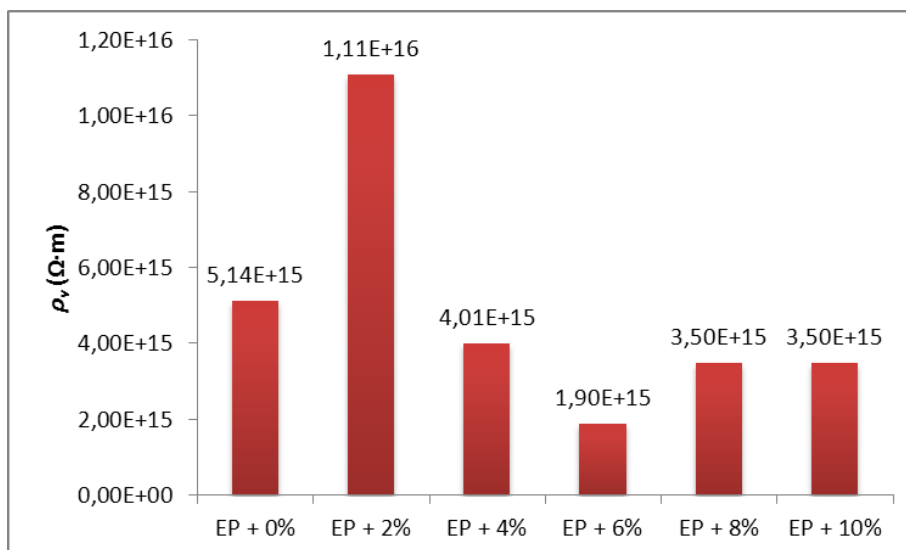


Obr. 45 Redukovaná resorpční křivka

Resorpční proudy (Obr. 44), jsou použity pro stanovení redukovaných resorpčních křivek (Obr. 45). Resorpční proudy jsou závislé na koncentraci plniva. Hodnocení vlastností elektroizolačního materiálu je založeno na lineární kompenzaci resorpčních proudů. Jak vysoký je sklon snížených absorpčních křivek elektroizolačního materiálu tím má lepší izolační vlastnosti.

Měření vnitřní rezistivity

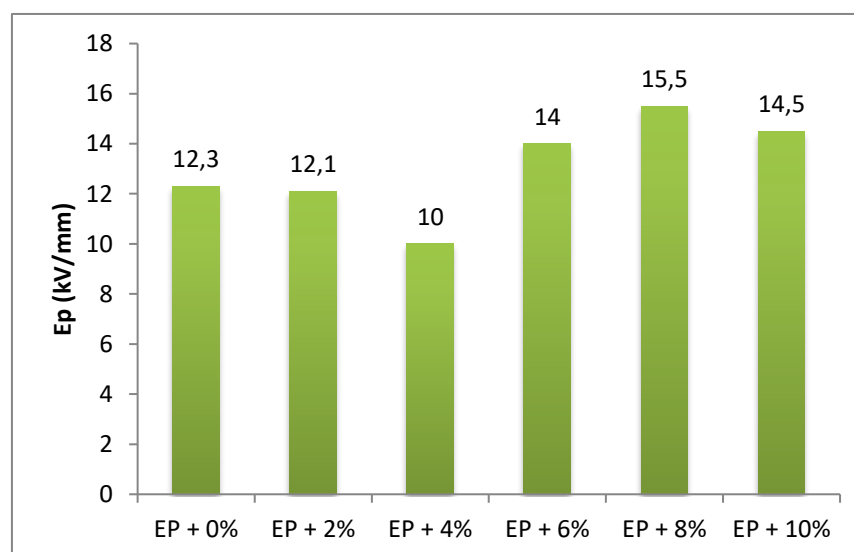
Na Obr. 46 je nejhorší hodnota epoxidové pryskyřice s 6% Al_2O_3 v porovnání s ostatními vzorky a nejlepší hodnota epoxidové pryskyřice s 2% Al_2O_3 , v porovnání s jinými vzorky.



Obr. 46 Vnitřní rezistivita vzorků plněných Al_2O_3

Měření elektrické pevnosti

Dále, vzorky byly měřeny, za účelem ověření vlivu množství oxidu hlinitého na elektrickou pevnost EP (kV/mm). Elektrická pevnost je znázorněna na Obr. 47, kde nejlepší hodnotu 15,5 kV/mm má pryskyřice s 8% Al_2O_3 .

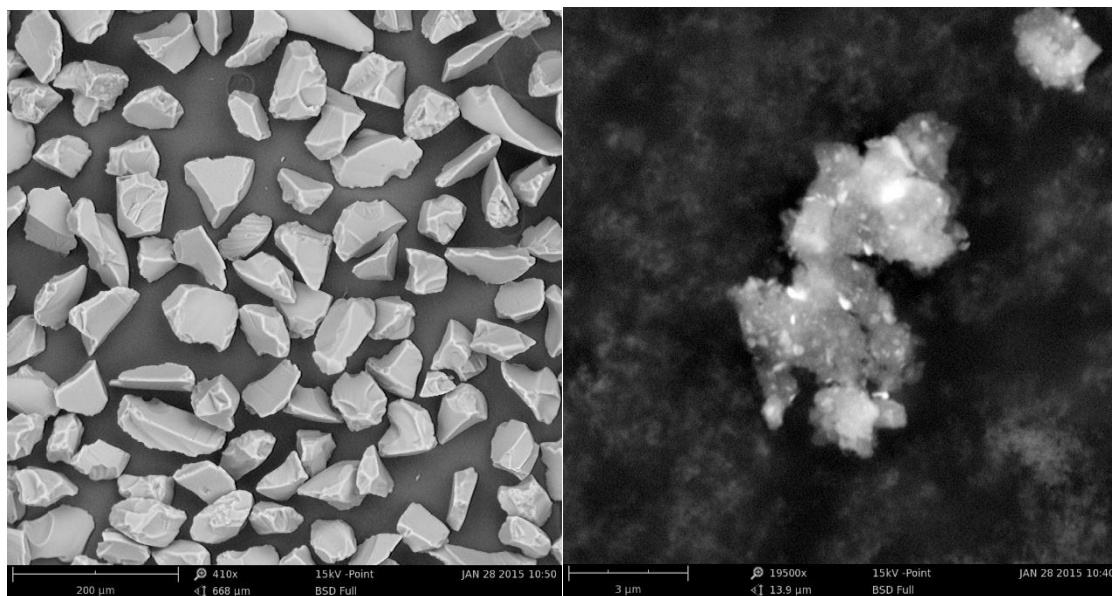


Obr. 47 Elektrická pevnost vzorku plněných Al_2O_3

Příloha V Experimentální vzorky s přidáním oxidu křemičitého

Výroba vzorků s přidáním oxidu křemičitého SiO_2

Byly vyrobeny čtyři sady vzorku s přidáním oxidu křemičitého SiO_2 . Postup výroby vzorku s přidáním oxidu křemičitého SiO_2 byl stejný, ale místo částic oxidu hlinitého byly použity částice oxidu křemičitého. Na výrobu první sady vzorku nebyl použit oxid křemičitý (SiO_2). Do další sady byly přidány nanočástice oxidu křemičitého. Potom následovala výroba vzorku s přidáním 1% mikročástic oxidu křemičitého. Poslední sada vzorku byla vyrobena s přimícháním, jak nanočástic oxidu křemičitého tak i mikročástic oxidu křemičitého. Součinitel tepelné vodivosti elektroizolačních systému, kde jako matrice je použita epoxidová pryskyřice se rovna $0,2 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ [111], [112], [132], [133], [134] Tab. 11). Tepelná vodivost SiO_2 je $1,5 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ [135].



a) mikročástice SiO_2

b) nanočástice SiO_2

Obr. 48 Velikost částic oxidu křemičitého SEM

Velikost použitých nanočástic SiO_2 byla přibližně 10 (nm) a velikost použitých mikročástic SiO_2 byla přibližně od 40 (μm) do 60 (μm), bylo určeno pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), Obr. 48).

Měření součinitele tepelné vodivosti

V Tab. 18 jsou uvedeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti vyrobených vzorků. Měření součinitel tepelné vodivosti bylo v souladu s normou ČSN 72 7012-1 (727012) a ISO 22007-2:2015. Tato norma uvádí deskovou metodu a podmínky jejího užití pro stanovení součinitele tepelné vodivosti zkušebních vzorků v ustáleném tepelném stavu.

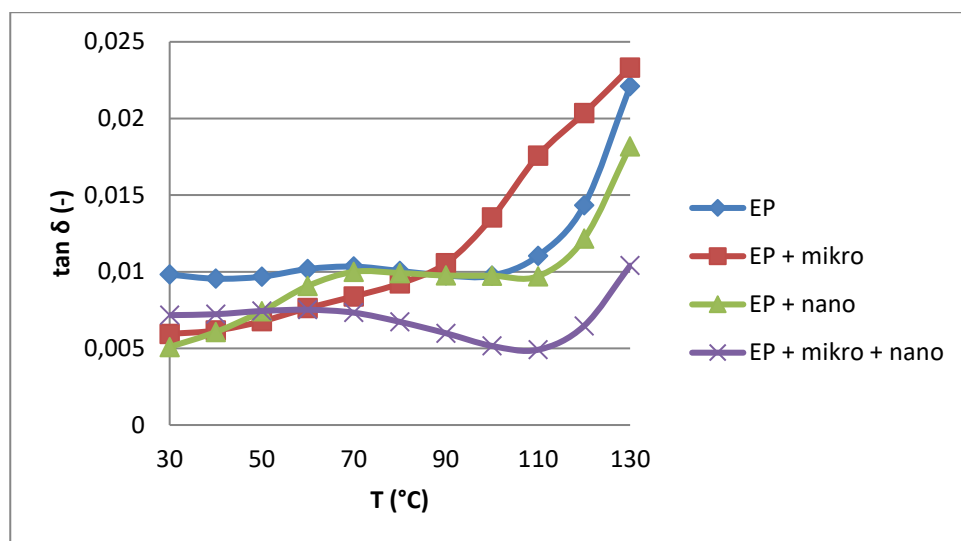
Tab. 18 Součinitele tepelné vodivosti

Vzorek	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$\tan \delta$ (-)
EP	0,19	0,01
EP + 1% Mikro SiO ₂	0,23	0,006
EP + 1% Nano SiO ₂	0,22	0,004
EP + 1% Nano SiO ₂ + Mikro SiO ₂	0,22	0,007

Součinitel tepelné vodivosti vzorku připraveného smícháním mikro a nanočástic oxidu křemičitého je nižší ve srovnání se vzorkem vyráběných s přidáním mikročástic, ale součinitele tepelné vodivosti vzorku připraveného smícháním mikro a nanočástic oxidu křemičitého, je větší ve srovnání se vzorkem s čistým epoxidové pryskyřice. Hodnota součinitele tepelné vodivosti vzorku připraveného smícháním mikro a nanočástic oxidu křemičitého je stejná 0,22 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ve srovnání se vzorkem s nanočástic oxidu křemičitého.

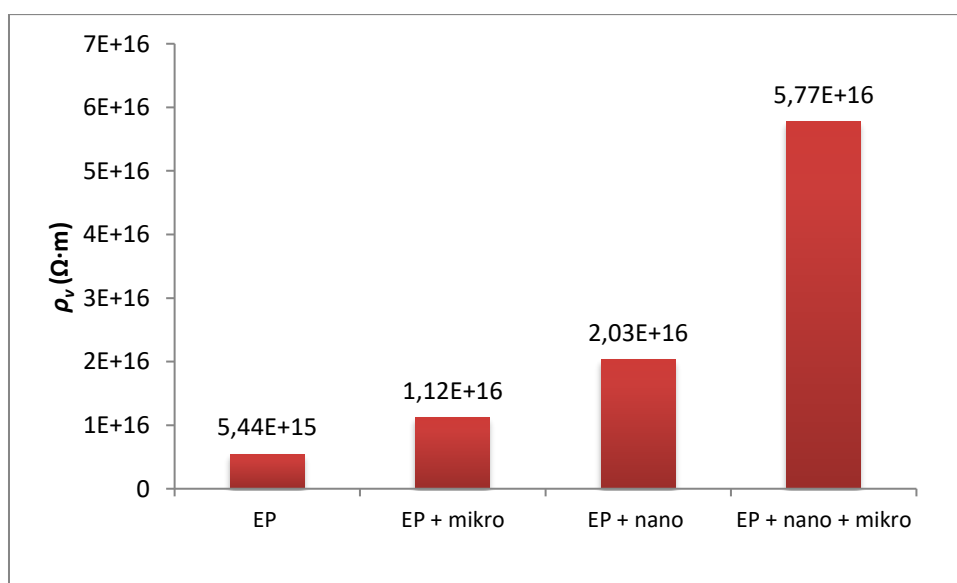
Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě

Měření závislosti $\tan \delta$ na teplotě bylo v souladu s normou IEC 60250. Měření $\tan \delta$ byly provedeny při napětí 500 V, teplotě 30 °C a 40 % vlhkosti, viz Tab. 17 a Obr. 49. Na Obr. 49 je znázorněn ztrátový činitel v závislosti na teplotě od 30 °C až 130 °C. Vzorky připravené s epoxidové pryskyřice s nanočásticemi SiO₂ mají nejnížší hodnotu $\tan \delta$ při teplotě 30 °C. Vzorky připravené smícháním mikro a nanočástic oxidu křemičitého mají nejnížší hodnoty $\tan \delta$ od 70 °C do 130 °C. Hodnoty $\tan \delta$ dalších vzorků zvyšují s teplotou. Nejvyšší hodnoty má ztrátový činitel při teplotě 130 °C (Obr. 49), což může odpovídat teplotě skelného přechodu a tepelné třídě použité epoxidové pryskyřice.

Obr. 49 Měření $\tan \delta$ v závislosti na teplotě

Měření vnitřní rezistivity

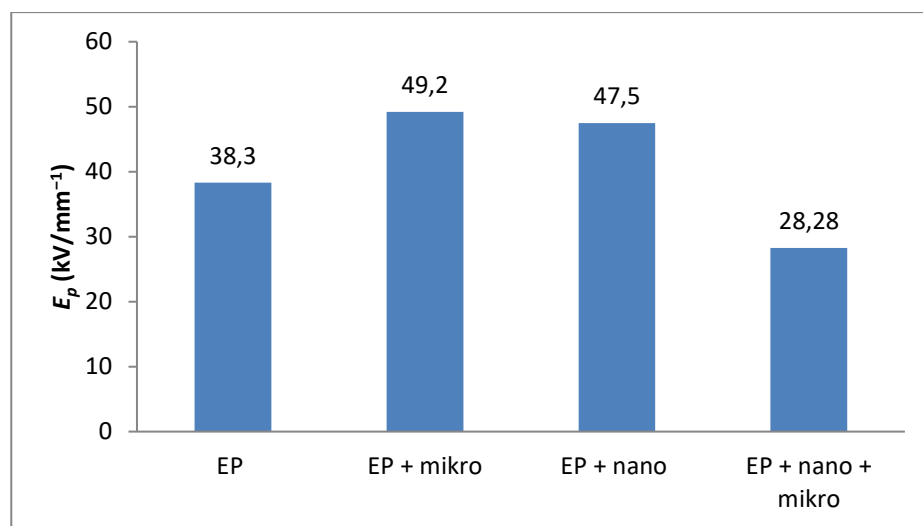
Výsledky měření absorpce při 500 V, bylo použito k výpočtu vnitřní rezistivity ρ_v ($\Omega \cdot m$) (IEC 60093:1980). Vzorky vyrobené s přidáním nanočástic oxidu křemičitého mají vnitřní rezistivitu $2,03 E + 16$ ($\Omega \cdot m$), Obr. 50. Vzorky připravené smícháním mikro a nanočástic oxidu křemičitého mají vnitřní rezistivity $5,77 E + 16$ ($\Omega \cdot m$), Obr. 50.



Obr. 50 Měření vnitřní rezistivity

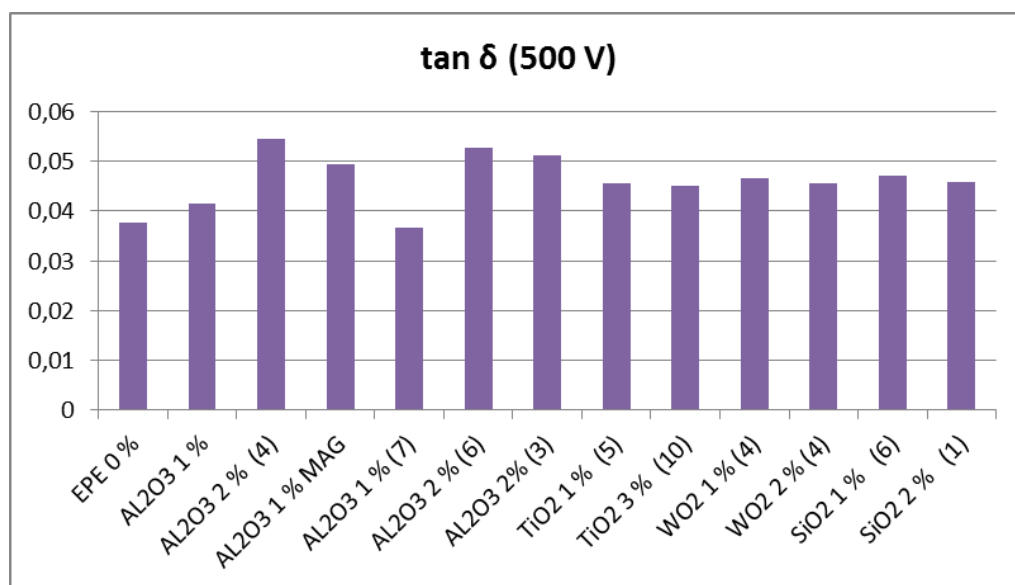
Měření elektrické pevnosti

Hodnoty elektrické pevnosti vyrobených vzorků je na Obr. 51. Nejlepší hodnota elektrické pevnosti je $E_p = 49,2$ (kV/mm). Elektrická pevnost vzorku připravených smícháním mikro a nano částic oxidu křemičitého se rovna $E_p = 28,81$ (kV/mm), viz Obr. 51.

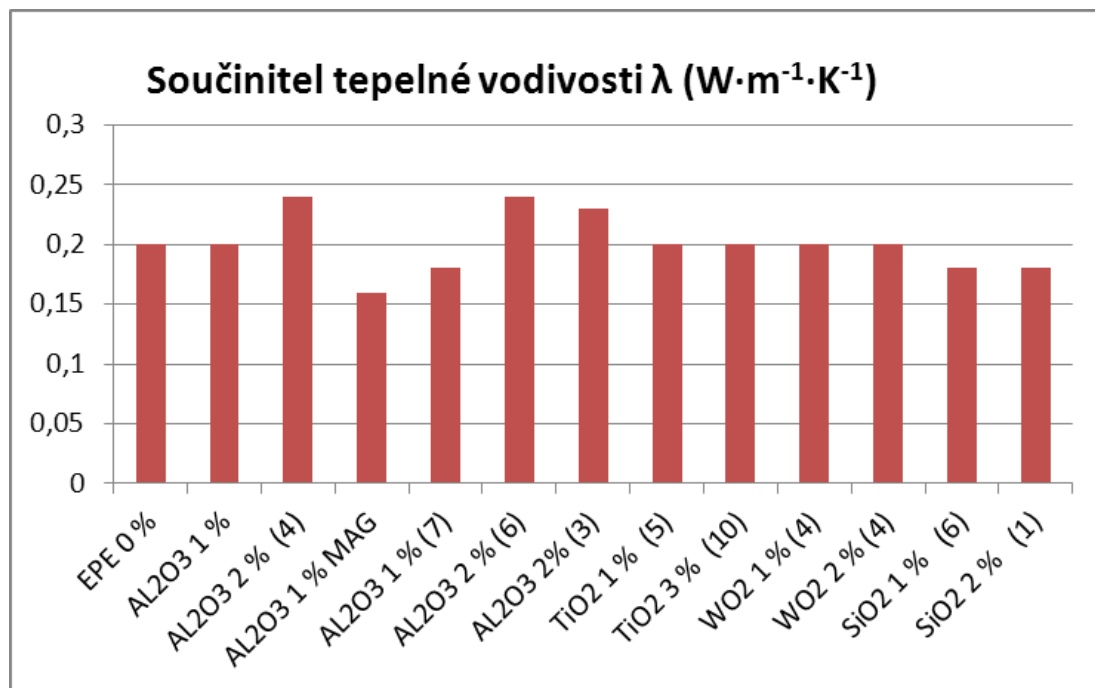


Obr. 51 Měření elektrické pevnosti

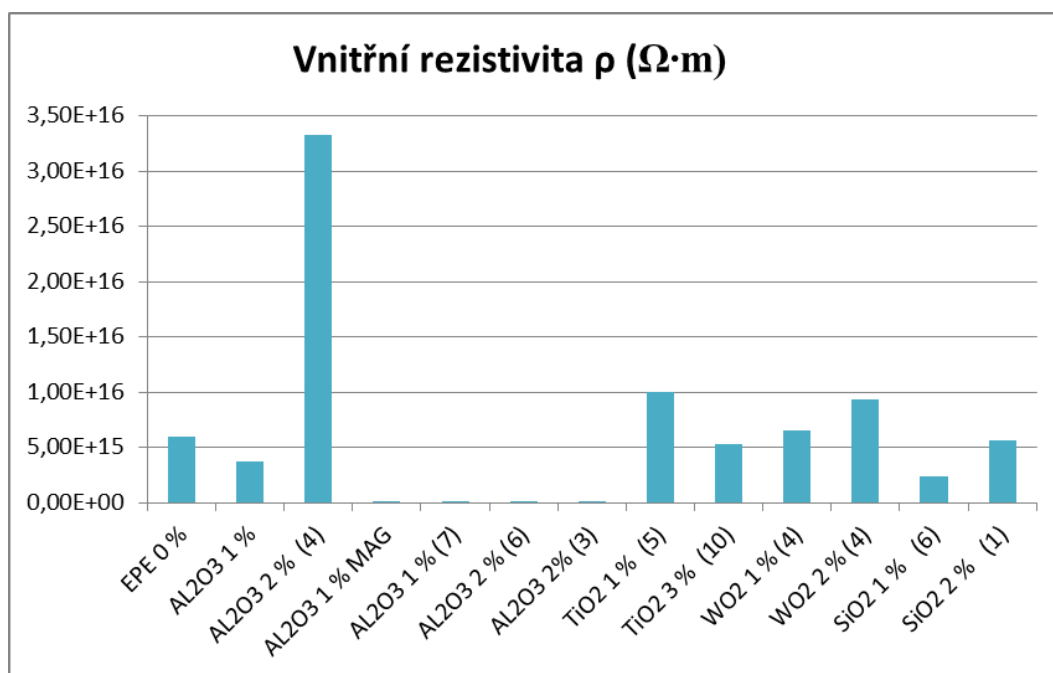
Příloha VI Experimentální vzorky s přidáním nano částic



Obr. 52 Měření $\tan \delta$ (500 V)



Obr. 53 Měření součinitele tepelné vodivosti



Obr. 54 Měření vnitřní rezistivity

Příloha VII Dielektrická spektroskopie

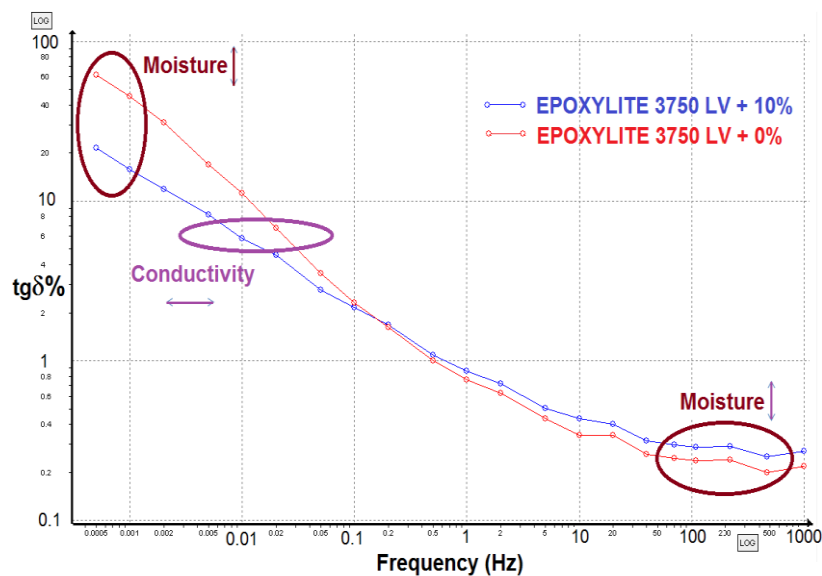
Principem dielektrické spektroskopie (nedestruktivní diagnostická metoda pro diagnostiku dielektrických materiálů) pro střídavé pole je sledování odezvy polarizace částic na základě změny frekvence vnějšího elektrického pole. Používá se tam, kde dochází ke změnám elektrických dipólů nebo jejich vzájemné interakci uvnitř dielektrického materiálu např. při diagnostice procesů stárnutí dielektrických materiálů, a při návrhu dielektrických materiálů pro různé elektrotechnické aplikace.

Měření na vzorcích s přidáním oxidu hlinitého do EPOXYLITE 3750 LV a do EPOXYLITE TSA 220 byly provedené na zařízení IDAX 350 od firmy Megger (Obr. 55).



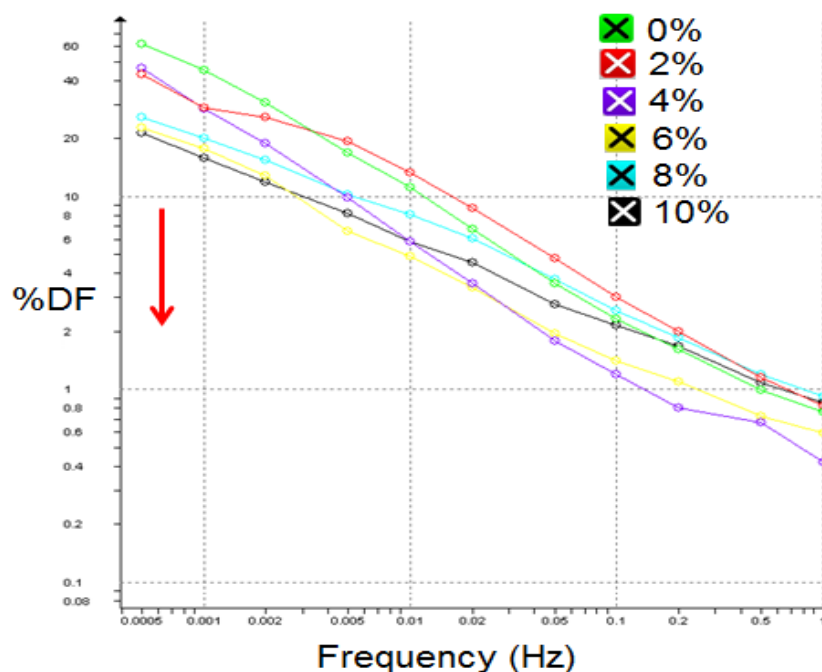
Obr. 55 zařízení IDAX 350 od firmy Megger

Na Obr. 56 je znázorněno měření na vzorcích s pryskyřici EPOXYLITE 3750 LV s 10% Al_2O_3 , kde pozorujeme nižší hodnoty ztrátového činitele $\tan \delta$ než u vzorku bez oxidu hlinitého (platí pro frekvenční pásmo od 0,0005 Hz až 0,1 Hz). Což ukazuje, že přidáním oxidu hlinitého lze ovlivnit vlhkost. Vyšší vodivost vzorku s přidáním oxidu hlinitého je evidentní z křivky, která má menší uhl vůči frekvenční x-souřadnici, jako u křivky vzorky bez příměsi. Případné malé odchylky při porovnávání křivek jednotlivých vzorků jsou způsobené nehomogenitou.

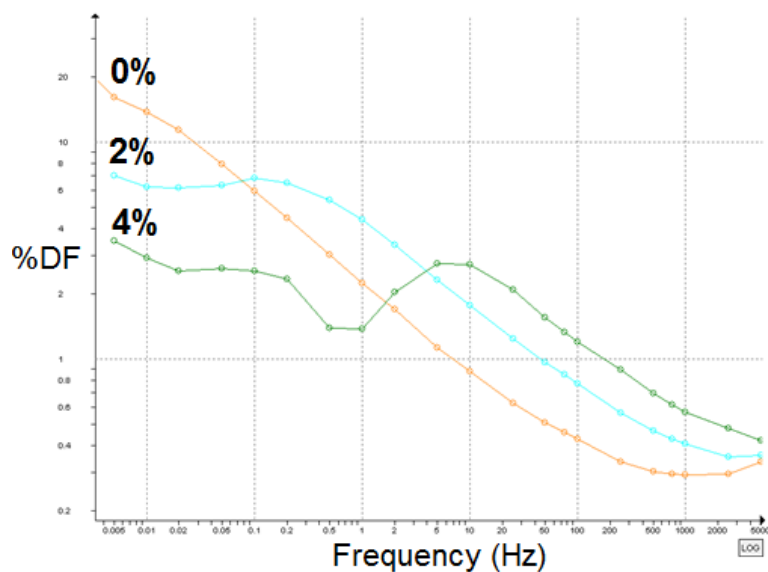


Obr. 56 Měření na vzorcích EPOXYLITE 3750 LV s přidáním 0% a 10% Al_2O_3 (při teplotě 20 °C)

Na Obr. 57 jsou znázorněny vzorky s přidáním Al_2O_3 (10%, 8%, 6%, 4%, 2%, 0%), kde je vidět pokles ztrátového činitele s narůstajícím obsahem příměsi při nejnižší měřicí frekvenci 0,0005 Hz. Podobné průběhy lze vidět na Obr. 58 pro vzorky s EPOXYLITE TSA 220 s obsahem příměsi 4%, 2% a 0% pro teplotu 40 °C.

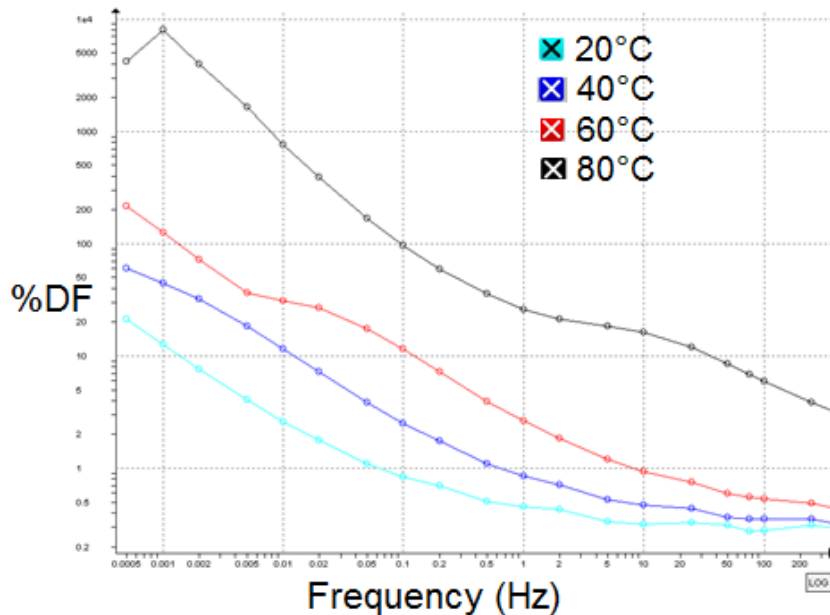


Obr. 57 Měření na vzorcích EPOXYLITE 3750 LV s přidáním 10%, 8%, 6%, 4%, 2%, 0% Al_2O_3 (při teplotě 20 °C)



Obr. 58 Měření na vzorcích EPOXYLITE TSA 220 s přidáním 0%, 2%, 4%, (40 °C)

Frekvenční závislost vzorků s EPOXYLITE 3750 LV s 10% oxidu hlinitého pro různé teploty (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C) je znázorněna na Obr. 59 - Obr. 62 zobrazuje frekvenční závislost vzorků EPOXYLITE TSA 220.

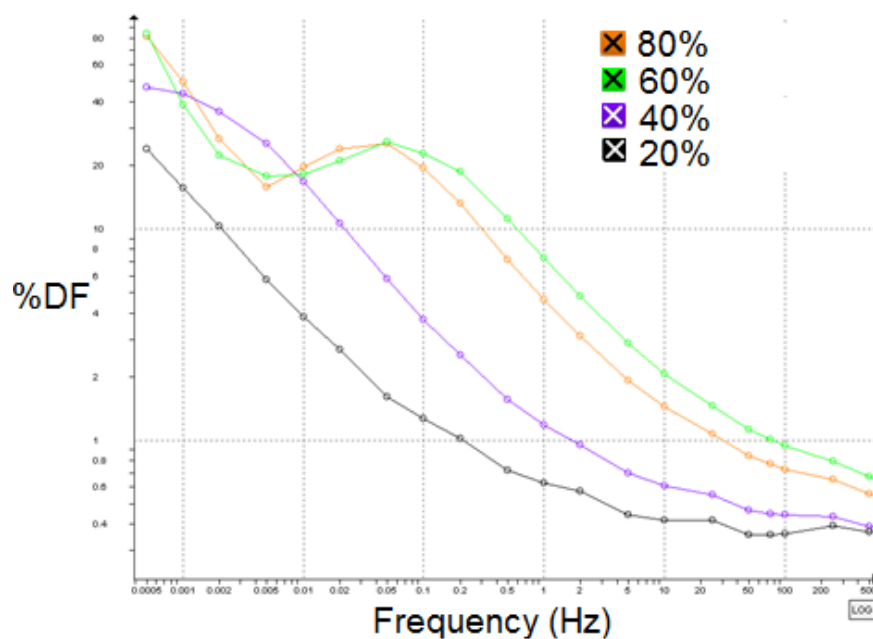


Obr. 59 EPOXYLITE 3750 LV s přidáním 10% Al_2O_3 (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C)

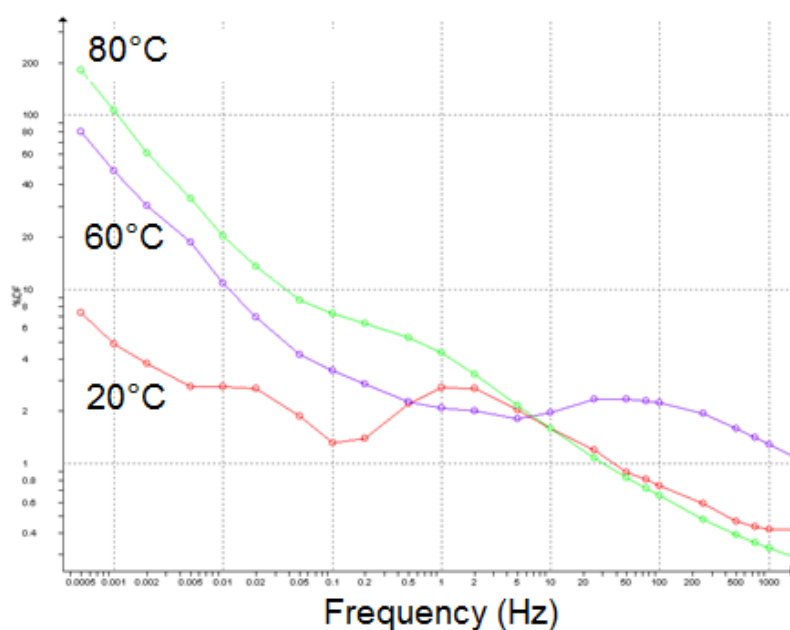
Obr. 59 nám ukazuje, že vzorky s EPOXYLITE 3750 LV s přidáním 10% Al_2O_3 mají hodnoty ztrátového činitele, které s teplotou rapidně narůstají, což je způsobeno změnou vlhkosti a vodivosti epoxidové pryskyřice s přidáním oxidu

hlinitého.

Na Obr. 60, kde u vzorku bez příměsi pozorujeme stabilitu, ale při teplotách 60 °C a 80 °C pozorujeme určitou nestabilitu v pásmě frekvenci od 0,001 Hz až 0,1 Hz, což může být následkem určitých změn ve fyzikálněchemické struktuře vzorků. V tomto případě se doporučuje analyzovat materiál až při vyšších frekvencích (od 0,1 Hz do 100 Hz).

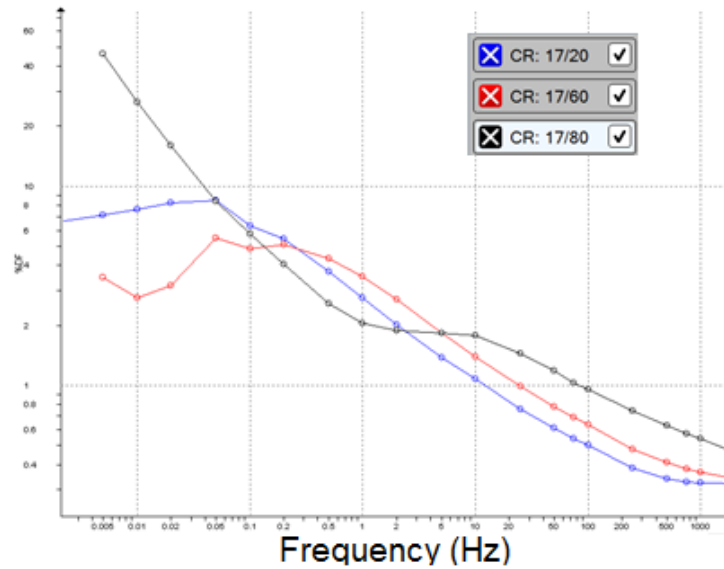


Obr. 60 EPOXYLITE 3750 LV bez s přidání Al_2O_3 (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C)

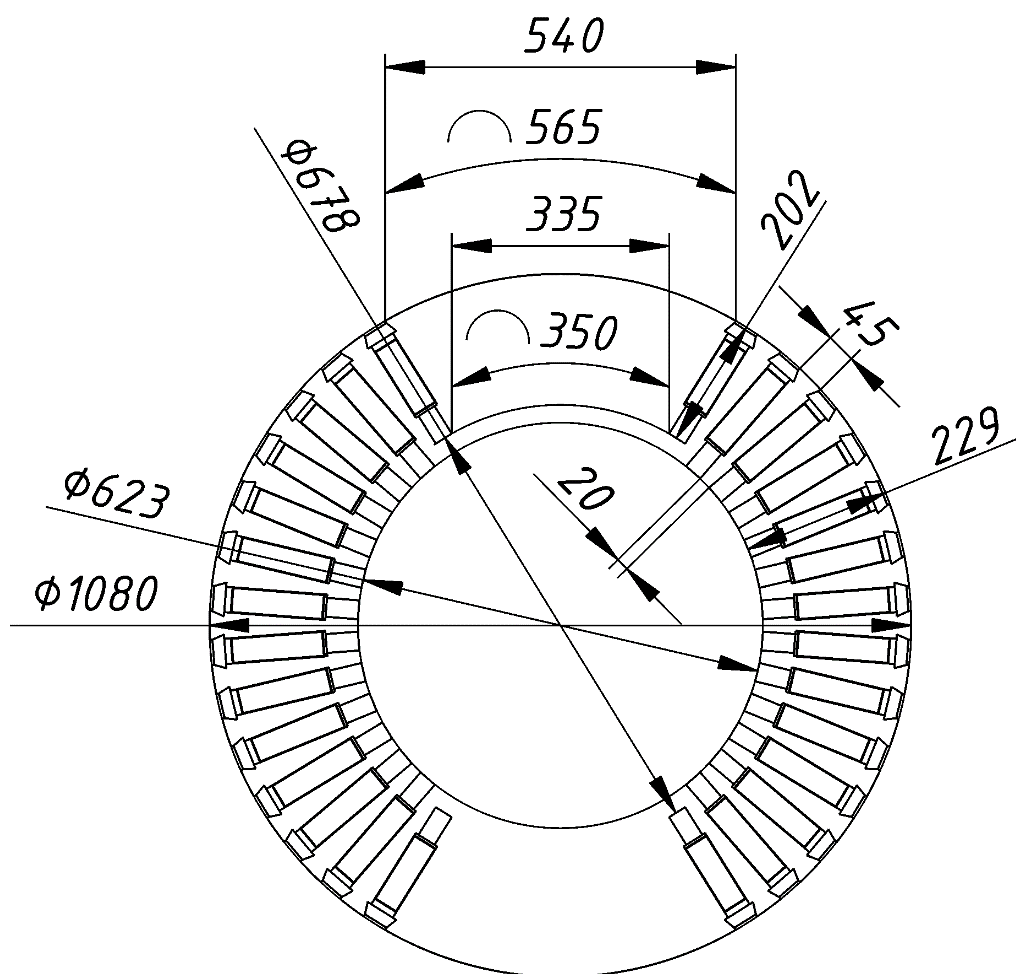


Obr. 61 EPOXYLITE TSA 220 s přidáním 4% Al_2O_3 (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C)

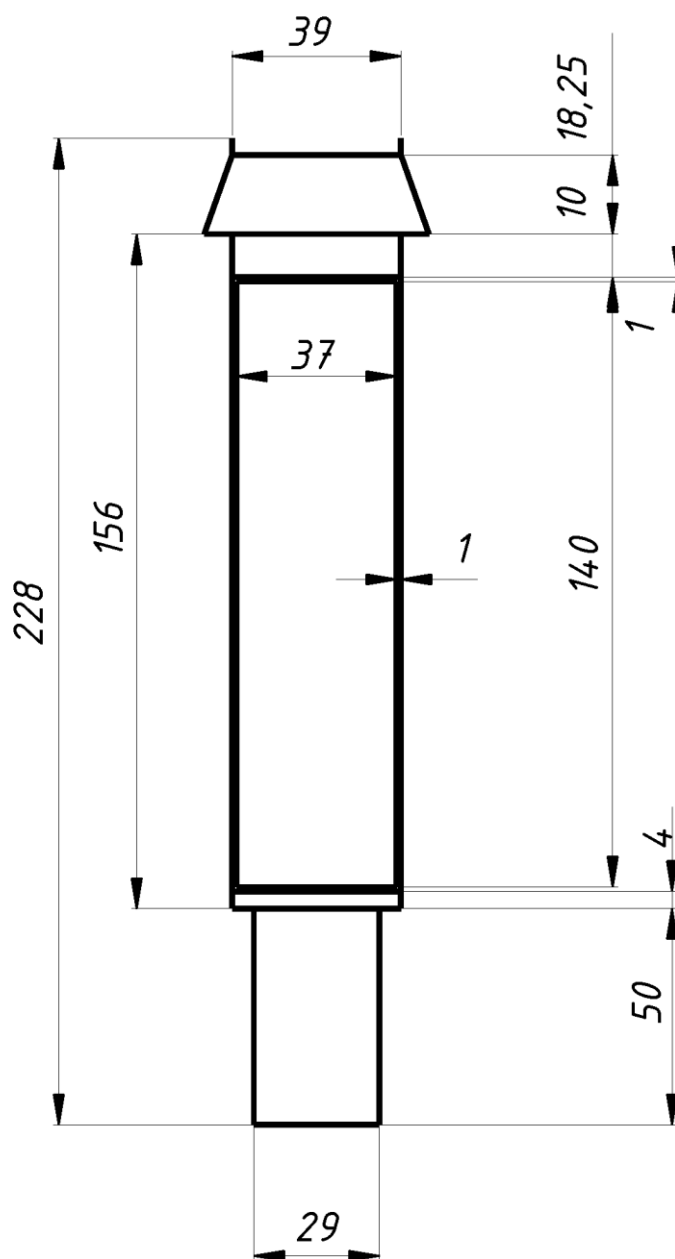
Obr. 61 a Obr. 62 znázorňují frekvenční závislost vzorků s EPOXYLITE TSA 220 s přidáním 4% Al_2O_3 a s přidáním 2% Al_2O_3 při různých teplotách.

Obr. 62 EPOXYLITE TSA 220 s přidáním 2% Al_2O_3 (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C)

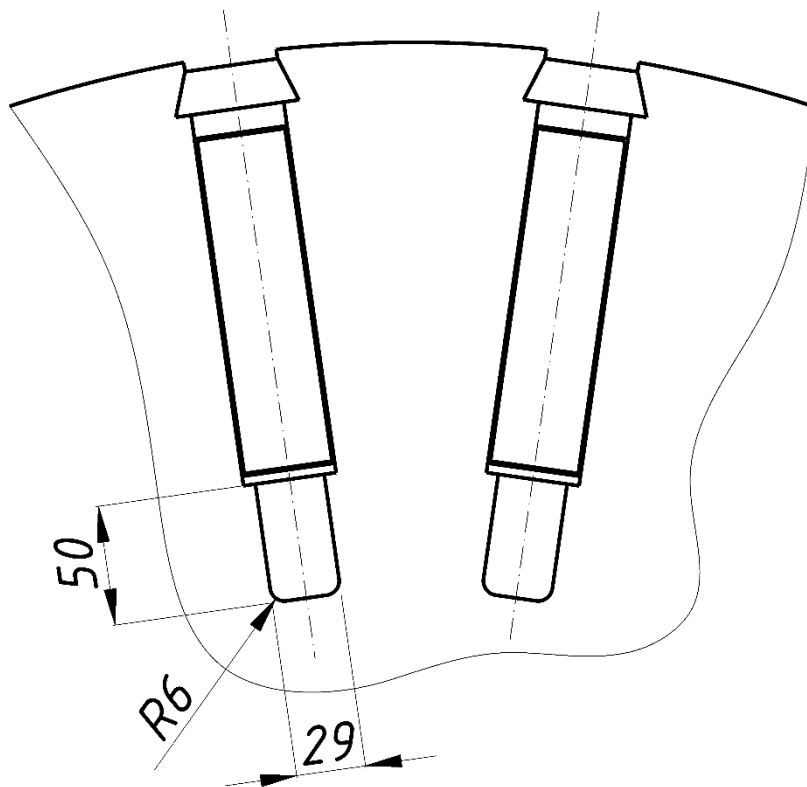
Příloha VIII Specifikace vzduchem chlazeného turboalternátoru



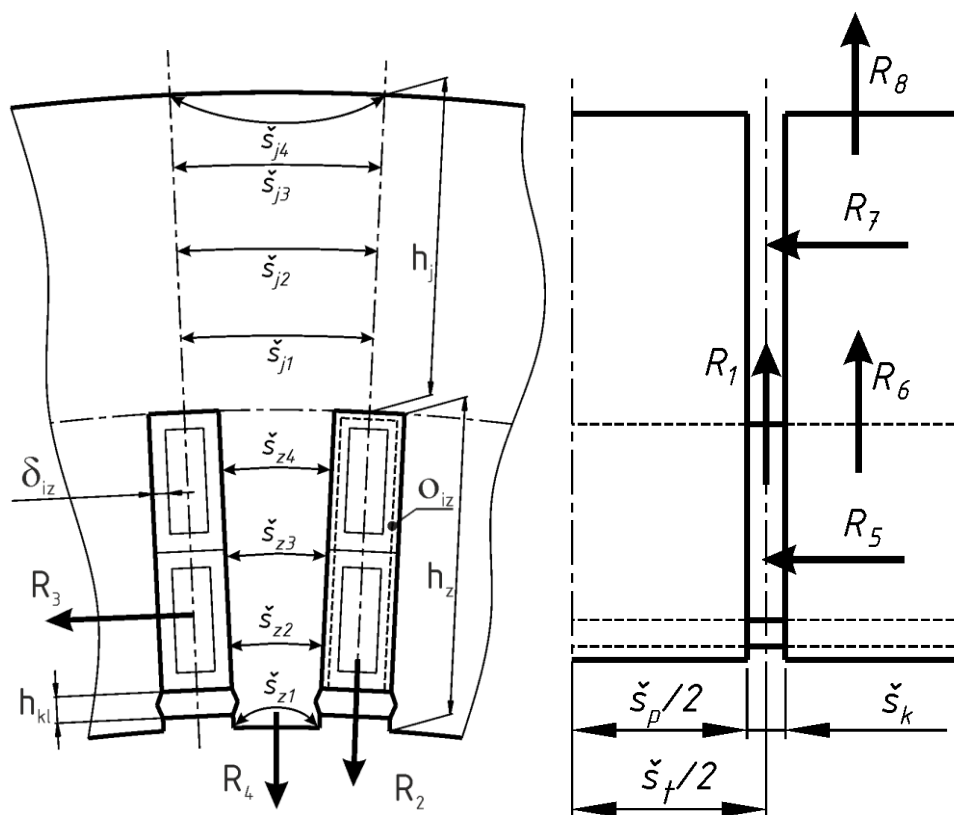
Obr. 63 Rotor



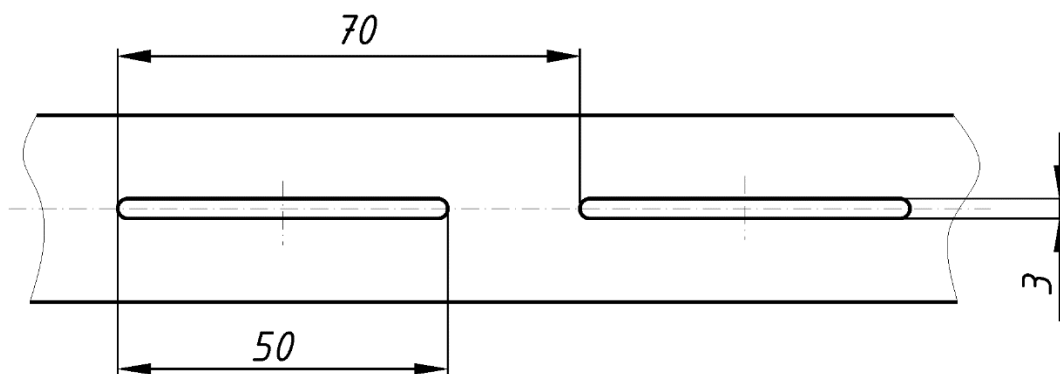
Obr. 64 Rotorová drážka



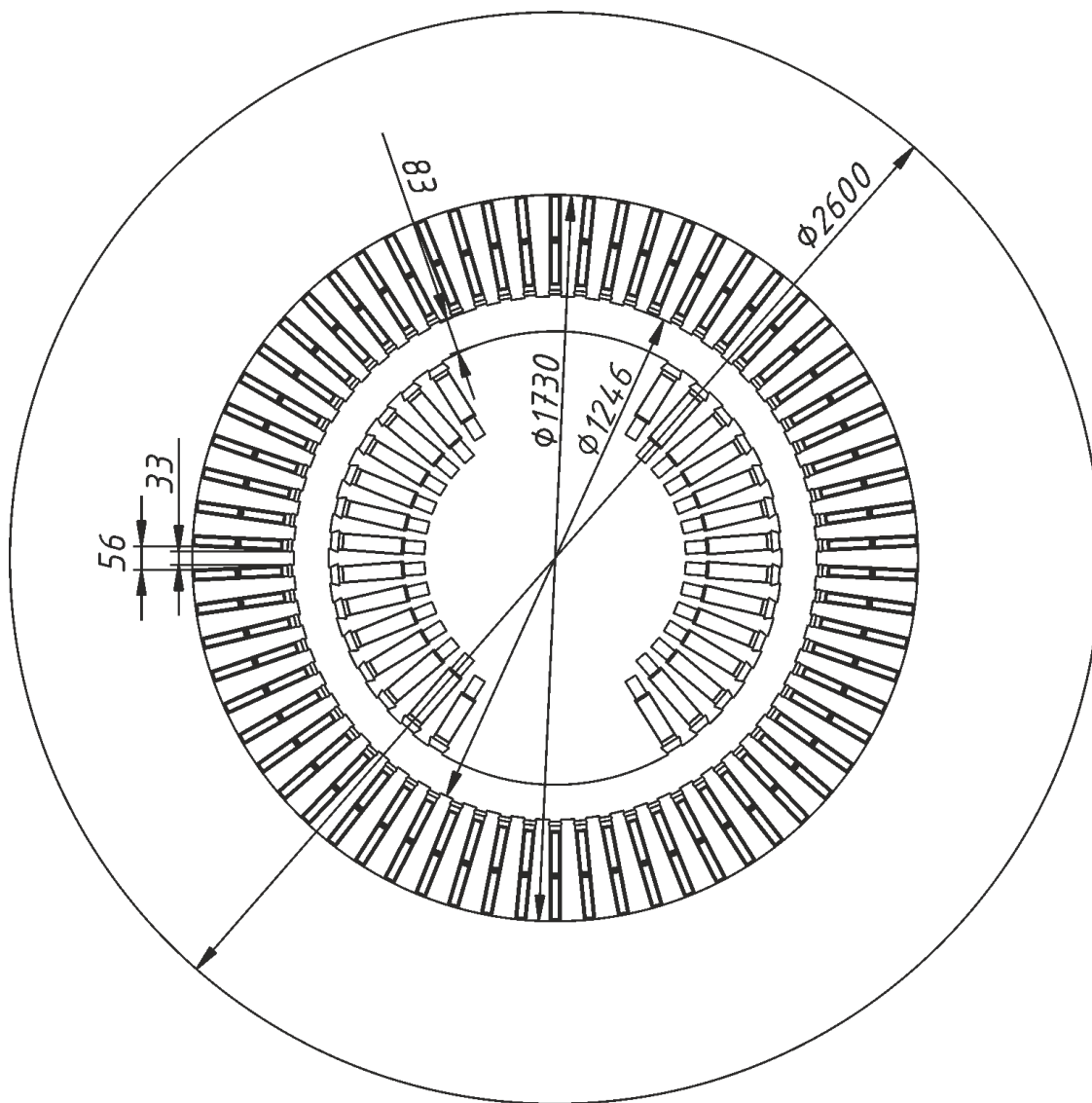
Obr. 65 Velikost podrážkového kanálu



Obr. 66 Úsek statoru turbogenerátoru pro výpočet oteplení (šířka a výška)



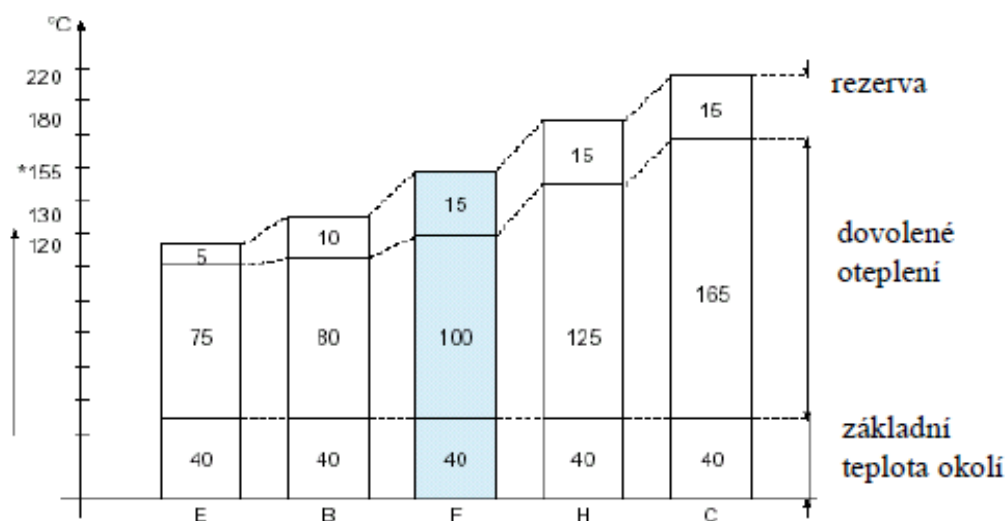
Obr.67 Vyražené otvory ve vodiči rotoru



Obr. 68 Synchronní stroj

Příloha IX Dovolené teploty a oteplení elektrických točivých strojů

Princip oteplování statorového nebo rotorového vinutí a železa v synchronním a asynchronním stroji je stejný. Při návrhu elektrického točivého stroje je nutno provést korekci hodnot dovoleného oteplení s ohledem na pracovní podmínky elektrického točivého stroje teplotu okolí (nad 40 °C) a nadmořskou výšku (nad 1000 m).



Obr. 69 Dovolené teploty a oteplení elektrických točivých strojů - převzato [11], [52]

60034-1 © IEC:2004

– 95 –

Table 10 – Assumed maximum ambient temperature

Altitude m	Thermal class		
	130 (B)	155 (F)	180 (H)
	Temperature °C		
1 000	40	40	40
2 000	32	30	28
3 000	24	19	15
4 000	16	9	3

Obr. 70 Závislost teploty na nadmořské výšce – převzato IEC 60034

(350000) ČSN EN 60034-29 Točivé elektrické stroje - Část 29: Metoda

ekvivalentního zatížení a superpoziční metoda - Určení oteplení nepřímým měřením.

(350019) ČSN 35 0019-9 Elektrické stroje točivé. Zkouška stanovení oteplení v závislosti na čase při zabrzděném rotoru.

IEC 60034 Mezinárodní norma pro elektrické točivé stroje.

IEC 60034-18-34 Rotating electrical machines - Part 18-34: Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for form-wound windings - Evaluation of thermomechanical endurance of insulation systems.

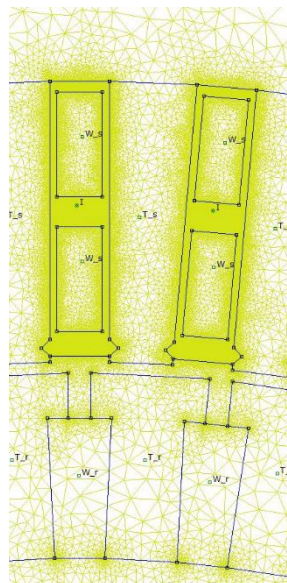
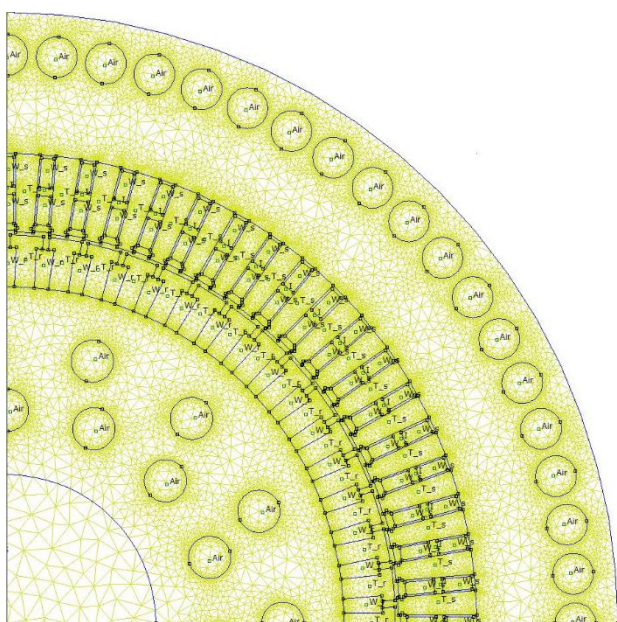
IEC / TS 60034-18-33 Rotating electrical machines - Part 18-33: Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for form-wound windings - Multifactor evaluation by endurance under simultaneous thermal and electrical stresses.

IEC 60034-18-31 Rotating electrical machines - Part 18-31: Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for form-wound windings - Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines.

IEC 60034-18-21 Rotating electrical machines - Part 18-21: Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for wire-wound windings - Thermal evaluation and classification.

Příloha X Asynchronní stroj - FEM model

Jedna čtvrtina modelu asynchronního stroje vytvořeného pomocí MKP (software Ansys) je vidět na Obr. 71. Výpočet byl proveden pro celý stroj. Z Obr. 71 a Obr. 72 je vidět hlavní komponenty motoru v průřezu (rotor, stator). Rozmístění statorových a rotorových zubu vypočítáno matematicky pomocí MKP. Statorové vinutí je dvouvrstvé. Rotorové vinutí tvoří měděné tyče. V programu nadefinování materiály, které jsou použité při stavbě stroje (měď, hliník, železné plechy).



Obr. 71 Čtvrtina modelu asynchronního stroje MKP Obr. 72 Detail vinutí statoru

Tab. 19 Specifikace asynchronního motoru

Veličina	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	1600	(kW)
Jmenovitý proud statoru	1035	(A)
Jmenovité napětí	1130	(V)
Jmenovité otáčky	1800	(RPM)
Izolační třída	H	(-)

Tab. 20 Tepelné zatížení asynchronního motoru

Veličina	Hodnota	Jednotka
Otáčky rotoru	1800	(RPM)
I^2R ztráty statoru	20	(kW)
Ztráty v železe	9	(kW)
I^2R ztráty rotoru	15	(kW)
Přídavné ztráty	26	(kW)

Tab. 21 Materiálové vlastnosti

Materiál	Součinitele tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Statorové vinuti	$k_x = 380$ $k_y = 380$ $k_z = 38$	390	8900
Statorové jádro (paket)	$k_x = 45$ $k_y = 45$ $k_z = 2$	460	7900
Rotor s kotvou nakrátko	160	870	2270
Rotorové jádro (paket)	$k_x = 45$ $k_y = 45$ $k_z = 2$	460	7900-
Vzduch	0,03	1000	1,3

Pro výpočet součinitele tepelné vodivosti hlavních komponentů asynchronního motoru se používá následující vztah [136], [137] :

$$\lambda_s = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{pr_i}}} \quad (63)$$

V tomto vztahu byla změněna hodnota tepelné vodivosti elektroizolačního systému v rozmezí od 0,2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) do 0,6 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Výsledky modelování

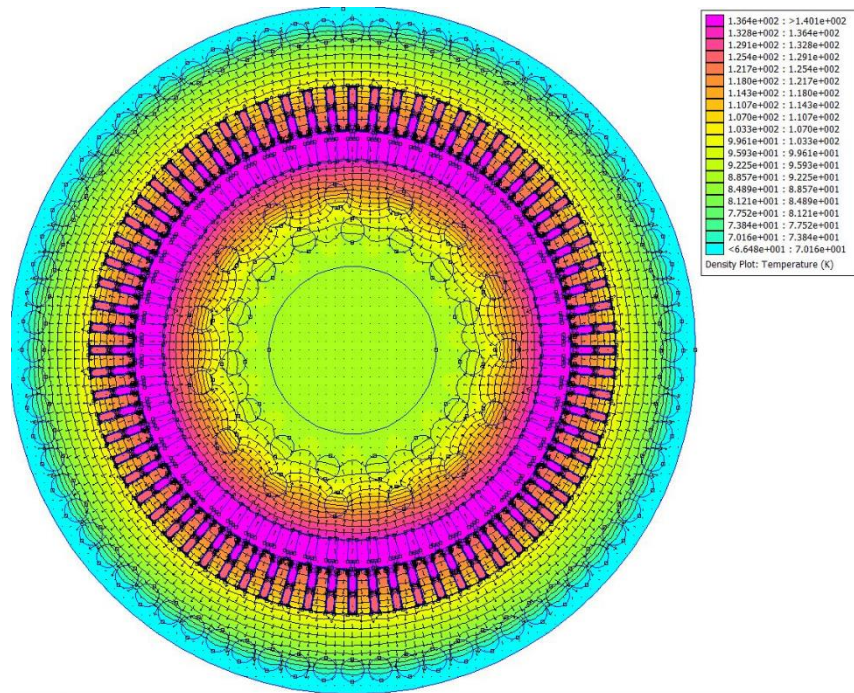
Výsledky výpočtu ztrát

Výsledky výpočtu ztrát, které jsou zde uvedené, se vztahují k ustálenému stavu trakčního asynchronního stroje, provozní rychlost je $n = 1800$ (RPM) a výkonu $P = 1600$ (kW). Pro stanovení nárůstu teploty v asynchronním motoru se používají hodnoty ztrát, které jsou generovány ve stroji. Mechanické ztráty byly zanedbány. Výsledky výpočtu všech typu ztrát vytvořených v rámci zkoumaného asynchronního stroje uvedeny v Tab. 20.

Výsledky počítačové simulace

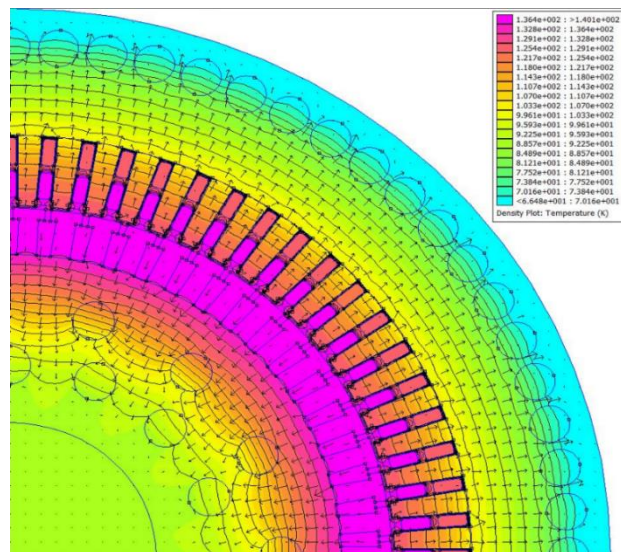
Výsledky počítačové simulace jsou uvedeny níže. Jsou znázorněny výsledky

pro různé hodnoty tepelné vodivosti izolačního materiálu.



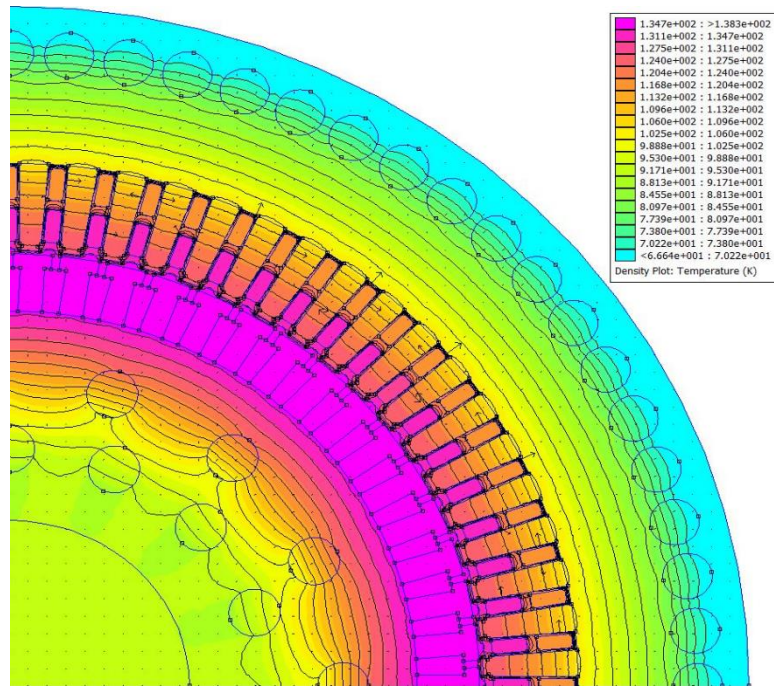
Obr. 73 Rozložení teploty stroje (součinitel tepelné vodivosti $EIS = 0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$)

Na Obr. 74 je detail rozložení teploty pro jednu čtvrtinu stroje, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$. Spodní strana cívky má 140 K. Horní strana cívky má 127 K.

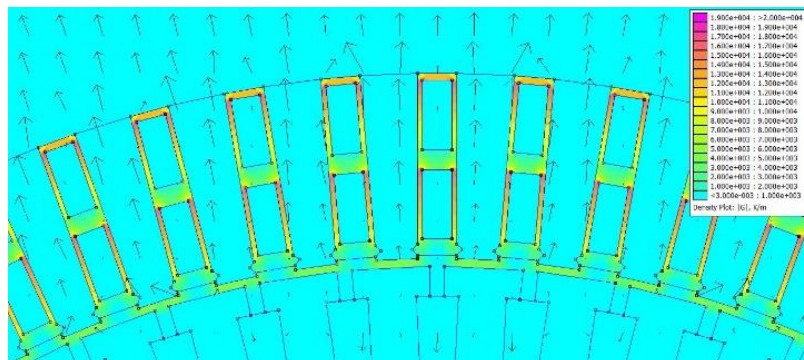


Obr. 74 Detail rozložení teploty (součinitel tepelné vodivosti $EIS = 0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$)

Na Obr. 75 je detail rozložení teploty pro jednu čtvrtinu stroje, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$. Teplota spodní strany cívky je 131 K. Horní strana cívky má 119 K.

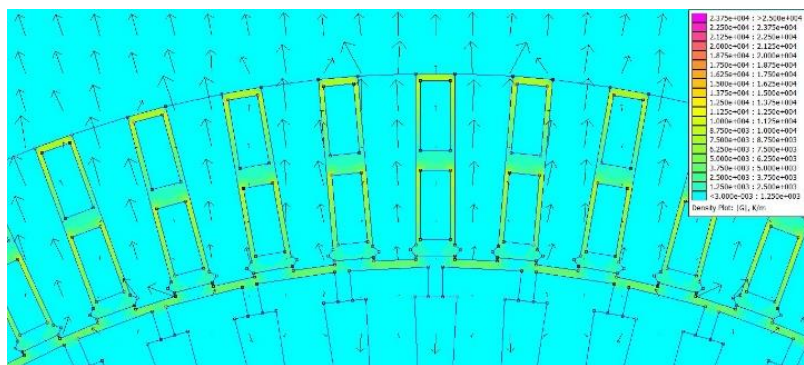


Obr. 75 Detail rozložení teploty (součinitel tepelné vodivosti EIS = $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$)



Obr. 76 Rozložení teplotního gradientu v elektro izolaci vinutí statoru (elektroizolační systém se součinitelem tepelné vodivosti = $0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$)

Na Obr. 76. je rozložení teplotního gradientu v elektro izolaci vinutí statoru, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$. Teplotní spád vztažený na 1 K a 1 m délky se rovná $15\,900 \text{ (K}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$.



Obr. 77 Rozložení teplotního gradientu v elektro izolaci vinutí statoru (elektroizolační systém se součinitelem tepelné vodivosti = $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)

Na Obr. 77. je rozložení teplotního gradientu v elektro izolaci vinutí statoru, výsledky jsou prezentovány pro EIS se součinitelem tepelné vodivosti $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$. Teplotní spád vztažený na 1 K a 1 m délky se rovná $1406 \text{ (K}\cdot\text{m}^{-1})$. Při porovnání teplotních gradientů izolaci vinutí statoru, kde v prvním případě je použit součinitel tepelné vodivosti elektroizolačního systému, který se rovná $0,3 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ je teplotní gradient izolaci vinutí statoru 10 krát menší než v dalším případě, kde je použit součinitel tepelné vodivosti elektroizolačního systému, který se rovná $0,6 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$.