

Vliv tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy

T. Tomášková¹, A. Čejková¹, L. Harvánek¹

¹ Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail: tomaskot@ket.zcu.cz, cejkova@ket.zcu.cz, harvy@ket.zcu.cz

Anotace:

The requirements for electrical machine and its loading grow with the development of society. With increasing performance and decreasing dimensions of electrical equipment, the losses grow. In mind of those high demands it is necessary to search new materials which can fulfil the higher requirements. One group of the important aspects are thermal properties of material. This article describes how nano and micro fillers can affect the properties of electrical insulation systems and heat transfer in electrical devices.

Anotace:

Požadavky na elektrické stroje a jejich zatížení rostou s rozvojem společnosti. Kvůli zvýšení výkonu a snížení rozměrů elektrických zařízení, ztráty rostou. Proto je nezbytné hledat nové materiály, které mohou splnit požadavky a odvádět lépe ztráty. Jedna skupina z důležitých aspektů, jsou tepelné vlastnosti materiálu. Tento článek popisuje, jak nano a mikro-plniva mohou ovlivnit vlastnosti elektrických izolačních systémů a přenosu tepla v elektrických zařízeních.

ÚVOD

Chceme-li parametry vysokonapěťových elektrických zařízení analyzovat nebo ovlivnit, musíme znát vlastnosti jednotlivých podsystémů, ze kterých je elektrické zařízení sestaveno. Pro zajištění vysoké spolehlivosti je potřeba sledovat nejslabší část, kterou je z hlediska tepelné odolnosti izolační systém. Izolační systém elektrických strojů musí splňovat požadavky elektrické, mechanické pevnosti a tepelné odolnosti. Z těchto důvodů je věnovaná velká pozornost tepelným poměrům a způsobům chlazení elektrických zařízení. Dále je potřeba studovat a matematicky popisovat procesy probíhající ve vysokonapěťových izolačních systémech, hledat nové materiály, které mohou zlepšit dielektrické a tepelné vlastnosti a tím i celkovou účinnost vysokonapěťových elektrických zařízení.

ZTRÁTY V ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH

Při průchodu proudu vinutím vznikají ztráty Joulovy. Tyto ztráty se objevují i průchodem parazitních proudů jinými částmi elektrického zařízení. Přeměna elektrické energie v teplo je dána Joulovým zákonem, podle kterého je možné určit množství tepla Q [1], [2]:

$$Q = R \int_0^t i^2 dt \quad (1)$$

kde:

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

Pro konstantní proudové zatížení lze rovnicí (1) zjednodušeně vyjádřit vztahem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (2)$$

Joulovy ztráty (ΔP_{Cu}) vznikající při činnosti elektrického stroje se nazývají – elektrické. Další ztráty, které vznikají při provozu elektrického zařízení, jsou ztráty (ΔP_{Fe}) ve feromagnetických částech stroje (hysterezní a ztráty vířivými proudy) a na to navazují ztráty (ΔP_m) mechanické (např. způsobené třením v ložiskách, třením o vzduch, třením na kartáčích nebo kroužcích). Vzniklé ztrátové teplo je nutno odvádět, aby nedošlo k poruchovému stavu nebo k trvalému poškození elektrického zařízení. Správně navržený a vypočtený ventilační, tepelný a dielektrický systém elektrických zařízení je nezbytný pro bezpečný a spolehlivý provoz elektrických strojů.

CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Chlazením elektrického stroje se rozumí odvod tepla, které ve stroji vznikne vlivem ztrát. U elektrických strojů malého výkonu není vzniklé teplo příliš velké, a proto k jejich chlazení stačí vlastní přenos tepla materiálu a použití chladicích žeborů na plášti. U zařízení s většími výkony (a tedy i ztrátami) je již

nutné zajistit chlazení, které odpovídá provozním podmínkám. Ztrátové teplo odvádíme pomocí chladicího média. 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. Přímým chlazením se rozumí odvod tepla z aktivních částí přímo na chladicí médium, zatímco při nepřímém chlazení je tento styk zprostředkován např. izolací vodičů, což klade větší nároky na vlastnosti média. Ventilační výpočet elektrického stroje vychází ze základních zákonů hydromechaniky a jedná se o řešení proudění chladicího média skrz geometrii elektrického stroje. K základním ventilačním výpočtům se používají tyto vztahy [2], [9], [24], [26]: rovnice kontinuity (3), Bernoulliho rovnice (4), Eulerova ventilační rovnice (6).

Rovnice kontinuity. Za předpokladu konstantních stavových veličin bude i objemový průtok Q stálý, takže rovnice kontinuity má výsledný tvar:

$$Q = S \cdot v = konst. \quad (3)$$

kde:

Q	objemový průtok média ($m^3 \cdot s^{-1}$)
S	průřez kanálu (m^2)
v	rychlost proudění média ($m \cdot s^{-1}$)

Bernoulliho rovnice. Z rovnice je vidět, že oba druhy tlaku dynamický a statický jsou ekvivalentní objemové hustotě potenciální a kinetické energie proudící tekutiny o hustotě ρ . Součet obou tlaků se nazývá celkový tlak p_c .

$$p_s + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = konst. \quad (4)$$

kde:

$$\frac{\rho}{2} \cdot v^2 = p_d \quad (5)$$

p_d	dynamický tlak (Pa)
p_c	celkový tlak (Pa)
p_s	statický tlak (Pa)
m	hmotnost proudícího média (kg)
v	rychlost proudění média ($m \cdot s^{-1}$)

Eulerova ventilační rovnice. Tato rovnice se týká zdrojů tlaků. Zde dochází k přeměně mechanické energie na tlakovou a pohybovou energii toku tekutiny. Celkový tlakový rozdíl mezi sacím a výfukovým prostorem u ventilátoru je:

$$H_{TH} = m \cdot (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) \quad (6)$$

kde:

H_{TH}	tlakový rozdíl (Pa)
u_1	obvodová rychlosti na vst. ventilátoru
u_2	obvodová rychlosti na výst. ventilátoru
c_{u1}	složka absolutní rychlosti na vstupu
c_{u2}	složka absolutní rychlosti na výstupu
m	hmotnost proudícího média (kg)

Jednou z možností, jak zlepšit výkon vysokonapětových elektrických zařízení (např. turboalternátorů), je použití chladicího média, které má vyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti (Tab. 1) a součinitel přestupu tepla (Tab. 2). Vodík má vysokou tepelnou vodivost (větší než vzduch), z toho plyne nízký tepelný odpor na mezní laminární vrstvě těsně u povrchu ochlazovaného úseku (např. izolačního systémů [9]). Vyšší součinitel přestupu tepla vodíku může vést ke zvýšení výkonu o desítky procent bez dalších úprav [9]. Součinitel přestupu tepla narůstá s tlakem, avšak zvýšením tlaku lineárně narůstají ventilační ztráty. Při kapalinovém chlazení se využívá velké měrné tepelné vodivosti kapalin. Relativně malý průtok chladicí kapaliny může odvést značné množství tepla. Když bude jako chladicí médium použita voda, je chladicí účinek velký. Součinitel přestupu tepla vody je při stejné rychlosti 570 x větší než u vzduchu. Výsledný chladicí účinek vody je asi 50 x větší než v případě vzduchu (voda musí proudit pomaleji s ohledem na hydraulické ztráty) [9], [24], [25].

ŠÍŘENÍ TEPLA V ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH

Pro návrh tepelných a ventilačních okruhů je nezbytné znát způsoby šíření tepla. Šíření tepla je sdílení energie mezi molekulami a atomy (převod energie z místa s vyšší teplotou na místo s nižší teplotou). Částice se přitom nepřemísťují, ale pouze si mezi sebou předávají energii.

Přechod tepla probíhá třemi způsoby a to **vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací, zářením)** [3], [4], [5], [7], [14]. Nejvíce se vedení tepla uplatňuje v pevných látkách, ale dochází k němu i u kapalin a plynů, avšak u těchto látek má větší význam přenos tepla prouděním.

Šíření tepla vedením (kondukcí)

Pro popis odvodu tepla šířením se používá **druhý Fourierův zákon** nazývaný vedení tepla (7). Nejčastěji používaný tvar Fourierovy (parciální diferenciální) rovnice vedení tepla [2], [3], [4] je:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \quad (7)$$

kde: ∇^2 - Laplaceův operátor

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (8)$$

T	teplota (K)
x, y, z	prostorové souřadnice
q_v	tepelný tok uvolněný vnitřními zdroji ($W \cdot m^{-2}$)
ρ	hustota ($kg \cdot m^{-3}$)
t	čas (s)
a	součinitel teplotní vodivosti ($m^2 \cdot s^{-1}$)
c_p	měrná tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
λ	součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí (vztah (9)).

$$a = \frac{\lambda}{(\rho \cdot c_p)} \quad (9)$$

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 (1 s) jednotkovou plochou izotermického povrchu (1 m^2), přičemž v tělese je jednotkový teplotní gradient (1 K), (vztah (10) [4]).

$$\lambda = - \frac{Q}{\text{grad } t \cdot S \cdot t} \quad (10)$$

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. Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti různých látek jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti λ [6, 7, 8]

Látka	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Suchý vzduch	0,027
Vodík	0,18
Voda	0,6
Transformátorový olej	0,13 – 0,16
Měď	395
Železný plech příčný směr	1
Železný plech podélný směr	50 - 80

Šíření tepla prouděním (konvekci)

Konvekci se teplo přenáší vzájemným pohybem různých tekutin, které mají odlišnou teplotu a tedy i různou hustotu vnitřní energie. Dále při konvekci dochází k výměně tepla, např. proudící tekutina

předává, nebo odebírá teplo z povrchu látky. Konvekci rozdělujeme na přirozenou a nucenou. Dále následuje část, která je zaměřená na přestup tepla mezi tekutinou a tuhou látkou. Matematicky lze popsat jako rovnost prvního Fourierova zákona a Newtonova zákona [2], [3], [4], [6] :

$$q_{konv} = -\lambda \cdot \text{grad } t = \alpha_{konv} \cdot (T_{pov} - T_{tek}) \quad (11)$$

kde:

q_{konv}	tepelný tok konvekci (W)
grad t	teplotní gradient
T_{pov}	teplota povrchu tuhé látky (K)
T_{tek}	teplota proudící tekutiny (K)
α_{konv}	součinitel přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

Součinitel přestupu tepla konvekci α_{konv} - určuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu tuhé látky. Rovnice, která umožní výpočet α_{konv} , obsahuje fyzikálních vlastností kapaliny, charakter proudění za určitých podmínek. Proto byla stanovena obecná kritériální rovnice sdílení tepla konvekci, popisující celý proces sdílení tepla konvekci [3], [4], [5], [6], [7].

Jak již bylo zmíněno, součinitel přestupu tepla konvekci závisí na vlastnostech a na rychlosti proudění dané tekutiny a také na tvaru povrchu, který je obtékán. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty součinitelů přestupu tepla nucenou a přirozenou konvekci [6].

Tab. 2: Hodnoty α_{konv} – přirozenou a nucenou konvekci

Látka	$\alpha_{přiroz.}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	$\alpha_{nuc.}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
Plyny	2 - 25	25 - 250
Kapaliny	50 – 1 000	50– 20 000

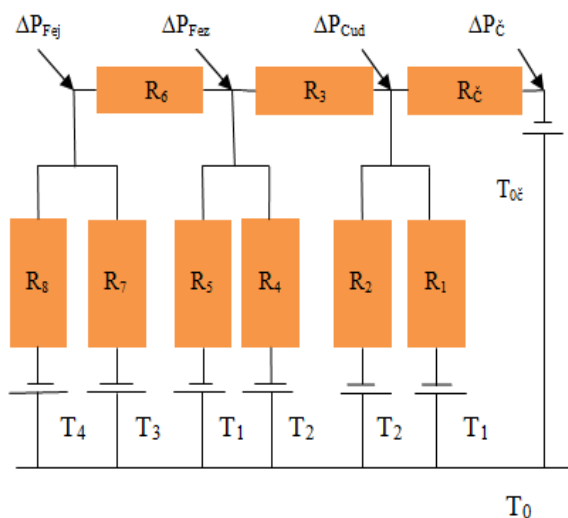
Šíření tepla zářením (radiací, sáláním)

Šíření tepla zářením je třetí způsob přenosu tepla. Přenos energie se uskutečňuje elektromagnetickým vlněním. 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). Odvod tepla zářením se ve velkých elektrických zařízeních příliš neuplatňuje tak významným způsobem, jako vedení a proudění, s ohledem na přesnost tepelných výpočtů jej lze zanedbat.

TEPELNÉ OBVODY V ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH

Při návrhu elektrického zařízení je snahou docílit co největší účinnosti [5], [9], [23], [24]. Tepelný výpočet je řešením tepelných obvodů (Obrázek 1). Tyto obvody lze řešit obdobně s elektrickými obvody, tedy

R je odpor, ΔP je analogií elektrického proudu a oteplení je analogií napětí v elektrických obvodech.



- R_1 tep. odpor z vinutí do vent. kanálu ($K \cdot W^{-1}$)
- R_2 tep. odpor z mědi do vzd. mezery ($K \cdot W^{-1}$)
- R_3 tep. odpor z mědi do zubu ($K \cdot W^{-1}$)
- R_4 tep. odpor ze vzd. do vzd. mezery ($K \cdot W^{-1}$)
- R_5 tep. odpor ze zubu do ven. štěrbiny ($K \cdot W^{-1}$)
- R_6 tep. odpor z zubu do jha ($K \cdot W^{-1}$)
- R_7 tep. odpor z jha do vent. kanálu ($K \cdot W^{-1}$)
- R_8 tep. odpor z jha na vnější obvod ($K \cdot W^{-1}$)
- $R_{\check{c}}$ tep. odpor z čel do vzduchu ($K \cdot W^{-1}$)
- T_0 teplota okolí (K)
- T_1 oteplení na začátku chladicího kanálu (K)
- T_2 oteplení na začátku paketu (K)
- T_3 oteplení na konci chladicího kanálu (K)
- T_4 oteplení na konci paketu (K)
- $T_{0\check{c}}$ oteplení čela (K)
- ΔP_{Fej} ztráty ve jhu (W)
- ΔP_{Fez} ztráty v zubu (W)
- ΔP_{Cud} Joulovy ztráty ve vinutí (W)
- $\Delta P_{\check{c}}$ Joulovy ztráty v čelech vinutí (W)

Obr. 1: Tepelný obvod

Tepelný výpočet většinou navazuje bezprostředně na výpočet ventilační, z něhož přejímá velikosti průtoku chladiva a jejich rozdělení v navrhovaném zařízení. Z dílčích průtoků se poté určuje rychlost proudění v jednotlivých místech, z nichž se dále odvozuje chladicí účinek [26].

Účelem tepelných výpočtů je zjistit střední a maximální oteplení jednotlivých částí elektrických zařízení, které jsou v bezprostředním styku s izolací. Toto oteplení nesmí přesáhnout hodnotu, která odpovídá tepelné třídě použité izolace. Jak již bylo popsáno, s rostoucím zatížením roste oteplení

aktivních částí, což může vést ke zvýšenému namáhání izolace, popřípadě k jejímu zničení.

Pokud by bylo možné nalézt materiály s vyšší tepelnou vodivostí, klesly by tepelné odpory a tím by bylo možné navýšit využití stroje.

Tepelný odpor je obecně určen jako podíl teplotního rozdílu a příslušného tepelného toku [26], [27]:

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} \quad (12)$$

kde:

R tepelný odpor ($K \cdot W^{-1}$)

Φ tepelný tok (W)

ΔT teplotního rozdíl (K)

Na základě tohoto vztahu lze odvodit pro jednotlivé způsoby šíření tepla výrazy pro příslušné druhy tepelných odporů.

ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Kompozitní materiály se uplatňují v elektroizolačních systémech (EIS) elektrických strojů pro své vynikající mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti (jako je elektrická pevnost, odolnost elektrickému oblouku, klimatickým vlivům, vysoká vnitřní a povrchová rezistivita). Vysokonapětové izolační systémy točivých elektrických strojů mohou být provedeny dvěma způsoby: systémem Resin – Rich a systémem Vacuum Pressure Impregnation (VPI). Podle rozměrů plniv (výztuží) mohou být kompozity rozděleny na nano, mikro a makro kompozity [10], [11], [12], [13].

Přidáním plniva s dobrou tepelnou vodivostí do kompozitu může být zvýšena jeho tepelná vodivost. Mezi nejvíce zkoumané materiály patří polymerové materiály plněné malým množstvím (jednotky hmotnostních procent) nanoplňiv. U nanokompozitů lze sledovat určité vlastnosti, jimiž se liší od mikro kompozitních materiálů.

Mnoho vědeckých týmů zaměřuje svůj výzkum na elektroizolační kompozity s nanomateriály, s cílem ovlivnit elektrické a tepelné vlastnosti přidáním určitého množství nanoplňiva [21], [22]. Molekulový pohyb je u nanokompozitů omezen silnou vazbou mezi nanoplňivem a základním materiálem. Tvorba nanometrických paprscitých útvarů a zachytávání nábojů nabitými plnivy, mají za následek zmenšení volných cest a potlačení nárazové ionizace [10], [11]. V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty součinitelů tepelné vodivosti jednotlivých složek kompozitních materiálů. Pozoruhodná je hodnota laboratorně připravených polyetylenových nanovláken, která mají velmi vysokou tepelnou vodivost okolo $104 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [14].

Tab. 3: Součinitel tepelné vodivosti [7, 13 - 20]

<i>Materiál</i>	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Nízkohustotní polyetylen	0,34
Vysokohustotní polyetylen	0,66
Fenolické pryskyřice	0,35
Epoxid	0,2 - 0,3
Oxid hlinitý	25 - 30
Oxid zirkonia	3,76
Oxid titaničitý	6,53
Oxid křemičitý	11, 05
Sklo	0,6 – 1,0
Slída	0,75
Plasty s mikrovlákmem	0,0 – 0,7
Polyetylenová nanovlákna	104

MĚŘENÍ TEPLoty JAKO SOUČÁST DIAGNOSTIKY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Měření teploty patří mezi velmi důležité součásti diagnostiky elektrických strojů. Měření teploty v elektrických strojích je založeno na základních fyzikálních zákonech, které jsou založeny na přímém přenosu tepla z měřeného povrchu na měřicí čidlo (např. odporové senzory, termoelektrické senzory, indikátory teploty, dilatační teploměry – **kontaktní měření**). Vzhledem ke konstrukci elektrických strojů zde mohou vzniknout i problémy.

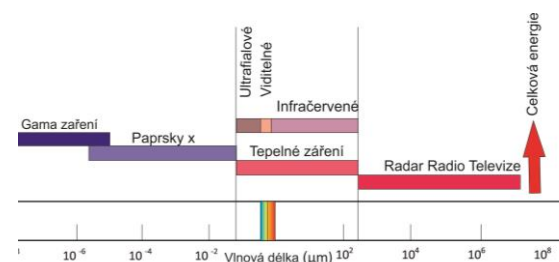
V elektrických točivých strojích při provozu působí fyzikální jevy (např. mechanické síly při otáčení rotoru, elektromagnetické síly ve vinutí) na přesnost výsledků měření teploty, případně mohou způsobit zničení teplotních čidel. Při měření teploty na rotujících částech je potřeba umístit teplotní čidlo na rotující část elektrického stroje tak, aby nedocházelo vlivem odstředivé síly k uvolnění čidel. Dále zanesení chyby do měření může být způsobeno působením relativně velkého magnetického pole na čidlo uvnitř elektrického točivého stroje. Na to navazuje problém vyvedení teplotních čidel z rotující části k měřicímu zařízení.

Vzniklo několik výpočetních metod (např. metody konečných prvků (MKP)) pro určení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik elektrického stroje. Při návrhu elektrických strojů mohou být tyto metody dostačující, ale při teplotních optimalizacích elektrických strojů nelze měření teploty nahradit.

Bezkontaktní měření teploty je založeno na sledování povrchové teploty předmětů na základě elektromagnetického 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 (Obrázek 2), dále umožňuje měřit v rozsahu teplot od - 0 °C do +10 000 °C [6].

Pro každý materiál je stanovena veličina (existují tabulky hodnot emisivity), která udává míru vyzařování povrchu tělesa. Je vhodné na počátku

měření ověřit, zda tato hodnota odpovídá právě měřenému materiálu.



Obr. 2: Rozsah vlnových délek

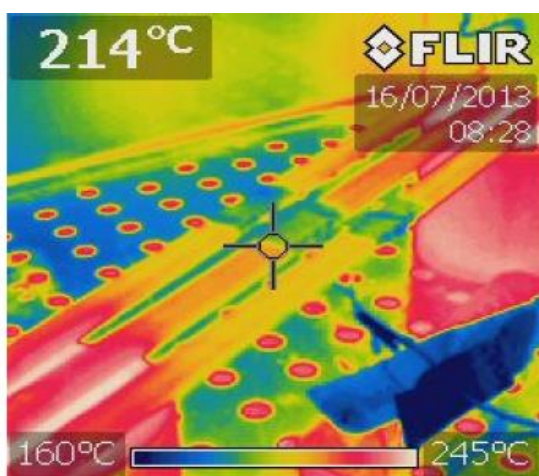
Protože se na materiálech objevují různé povrchové vrstvy (na kovech nátěr) a vlastnosti (např. odrazivost povrchu), které mají vliv na hodnotu emisivity, se musí provádět ověření. K řešení tohoto problému je možné použít několik metod, které jsou podrobně popsány v [6]. Pro bezkontaktní měření teploty se používají hlavní typy měřicích přístrojů pyrometry a termokamery. Protože bezkontaktní měření teploty má výhody v porovnání s kontaktním měřením (např. možnost měřit teploty celého povrchu stroje v jednom okamžiku, měření rychlých změn teploty, měření na pohybujících se částech stroje, malý vliv měřicího přístroje na měřený stroj), budou měřicí přístroje pyrometry a termokamery popsány podrobněji.

Pyrometry – měřicí přístroj pro rychlá a spíše orientační měření, např. při jednoduché diagnostice 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. Základ pyrometru tvoří snímače infračerveného záření, které se dělí podle principu funkce na kvantové a tepelné snímače. 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 radiální (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) [7], [8]. Získání kvalitních výsledků pomocí pyrometru vyžaduje určitý druh zkušeností, protože přesnost dosažených výsledků může být závislá např. na úhlu naklonění proti měřenému povrchu.

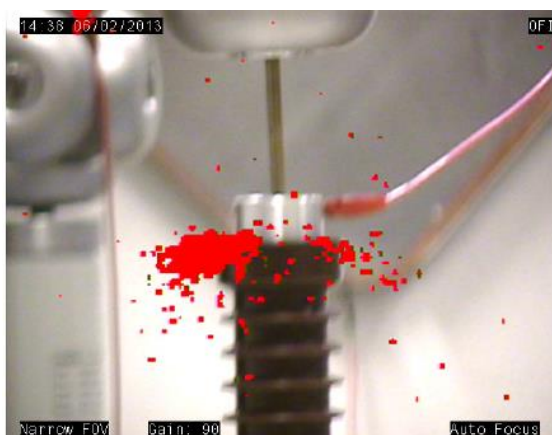
Termokamery - využívají při bezkontaktním měření teploty zaznamenání celého povrchu stroje do jednoho digitálního snímku, který lze dále analyzovat pomocí speciálních programů. Toho se využívá při teplotní analýze elektrického stroje, který je konstruován z několika různých materiálů, a je možné zjistit 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 oblastí, ve které pracují NWIR - Near Wavelength Infrared Region, MWIR – Middle Wavelength Infrared Region, LWIR – Long Wavelength Infrared Region), nebo podle počtu pixelu, podrobně popsáno v [7].

Infračervené (IR) kamery pro určení lokálních horkých míst, nebo snímáním ultrafialovou (UV) kamerou pro detekci výbojové činnosti na viditelných částech (např. na průchodkách) může být použité při vizuální prohlídce elektrického stroje, což je prvním krokem diagnostiky [9] (Obrázek 3).



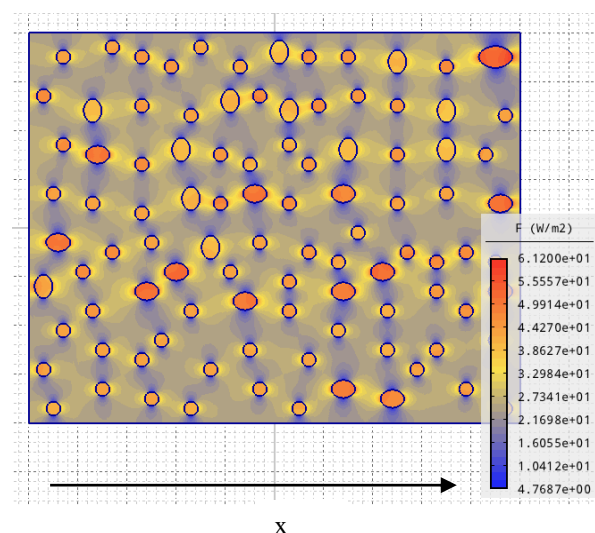
Obr. 3: Ukázka zobrazení pomocí infračervené kamery
Na Obrázku 3 je tyč asynchronního stroje v peci při stárnutí, zobrazení pomocí infračervené kamery (Laboratoř FEL/KET/ZČU v Plzni).



Obr. 4: Ukázka zobrazení pomocí ultrafialové kamery
Na Obrázku 4 jsou částecné výboje, které jsou zobrazeny pomocí ultrafialové kamery (Laboratoř FEL/KET/ZČU v Plzni).

MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍHO POLE POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

Dvourozměrný model byl vyvinut pomocí metody konečných prvků (software Agros 2D) za účelem modelování tepelné vodivosti polymerních kompozitů na bázi epoxidové pryskyřice ($\lambda = 0,2 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ tabulka 3). Základem modelu bylo, že epoxidová pryskyřice, byla považována za pevný povrch, do kterého byly náhodně nasázené SiO_2 částice, také nedošlo k překrývání vrstev (Obrázek 5). Tepelná vodivost SiO_2 je ($\lambda = 11,5 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ tabulka 3). Tepelný tok byl považován pouze v jednom směru a to ve směru x. Tepelný tok kolmo ke směru osy x $T = 0 \text{ K}$. Jedna strana byla definovaná na T1 ($155 \text{ }^\circ\text{C} = 428,15 \text{ K}$) a druhá na T2 ($40 \text{ }^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$). Tyto hodnoty byly vybrány, protože vzduchem chlazené turbogenerátory mají elektrický izolační systém, který v současné době pracuje v teplotní třídě F ($155 \text{ }^\circ\text{C}$) a vyšší. Obvykle je provozní teplota nižší (což odpovídá třídě B ($130 \text{ }^\circ\text{C}$)).



Obr. 5: Tepelný tok
Přidání plniva (SiO_2), s dobrou tepelnou vodivostí (Obrázek 2) zvýší tepelnou vodivost epoxidové pryskyřice. Proto následovala výroba vzorku z epoxidové pryskyřice jako matrici a částic SiO_2 jako plniva.

EXPERIMENT

Na výrobu vzorku byly použity následující materiály: epoxidová pryskyřice DGEBA - Poly (Bisphenol A-co-epichlorhydrin), tvrdidlo Laromin C260 - diamine crosslinker - cycloaliphatic diamine - 3,3-dimethyl-4,4'diaminocyklohexyl-metan, mikro plnivo ($40 \text{ } \mu\text{m} - 60 \text{ } \mu\text{m}$) SiO_2 1% a nano plnivo (10 nm) SiO_2 1%.

Měření součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ vzorku byl vypočítán z naměřených údajů pomocí vztahu (10). Tabulka 4 obsahuje hodnoty součinitele tepelné vodivosti vyrobených vzorků. Součinitel tepelná vodivost se zvyšuje s přidáním 1% SiO_2 . Dle předpokladu lze takto získat vyšší hodnotu tepelné vodivosti. Vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti mají vzorky s

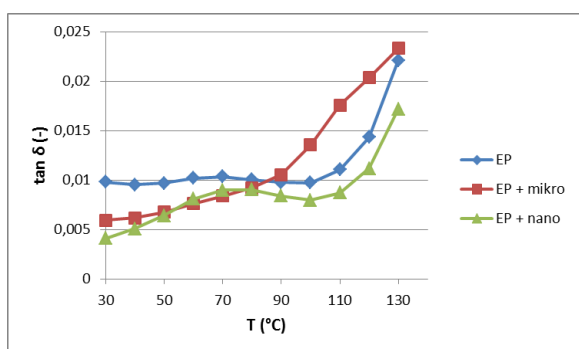
přidáním 1% mikro částic SiO_2 . Měření $\tan \delta$ byly provedeny při napětí 500 V, teplotě 23 °C a vlhkosti vzduchu 40 %.

Tab. 4: Součinitel tepelné vodivosti

Vzorek	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$\tan \delta$ (-)
EP	0,19	0,01
EP + mikro	0,22	0,006
EP + nano	0,20	0,004

Měření závislost $\tan \delta$ na teplotě

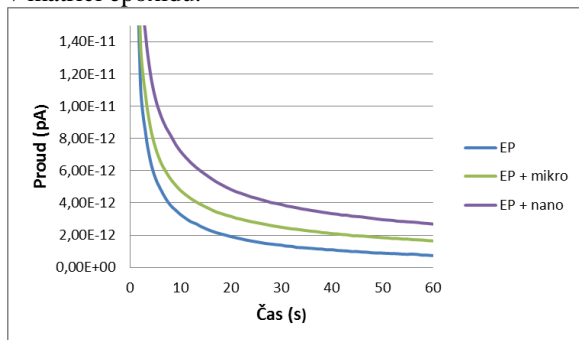
Na obrázku 6 je znázorněna závislost $\tan \delta$ na teplotě (od 30 °C do 130 °C). Nejnížší hodnoty $\tan \delta$ mají vzorky vyrobené s přidáním 1 % částic SiO_2 . Hodnoty $\tan \delta$ rostou s teplotou.



Obr. 6: Závislost $\tan \delta$ na teplotě

Měření absorpčních proudů

Dále na vzorcích bylo provedeno měření absorpčních proudů za účelem ověřit vliv množství SiO_2 na dielektrické vlastnosti (obrázek 7). O tom, jaký průběh polarizačních proudů (v materiálu probíhá polarizačních mechanismů více) rozhoduje struktura dielektrika, hromadění volných nosičů náboje např. na rozhraních nehomogenit. Vyrůstá-li polarizace látky, rostou dielektrické ztráty. Na obrázku 7 je znázorněn větší vliv pomalých polarizací u vzorků s přidáním 1 % nano částic SiO_2 , což může být způsobeno formováním shluků částic oxidu hlinitého v matici epoxidu.

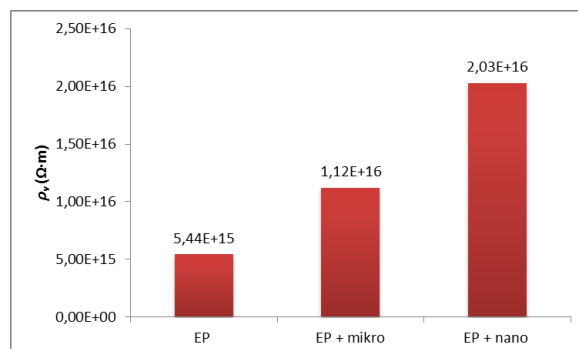


Obr. 7: Měření absorpčních proudů

Měření vnitřní rezistivity

Výsledky měření absorpčních proudů při 500 V byly použity pro určení vnitřní rezistivity ρ_v ($\Omega\cdot\text{m}$),

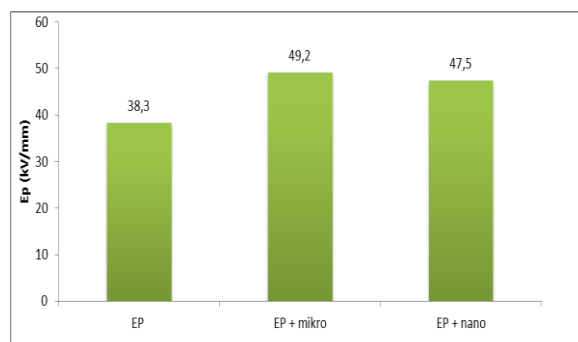
obrázek 8. Na obrázku 8 je nejhorší hodnota epoxidové pryskyřice bez přidání SiO_2 a nejlepší hodnota 2,03 $\Omega\cdot\text{m}$ epoxidové pryskyřice s 1 % nano částic SiO_2 , v porovnání s jinými vzorky.



Obr. 8: Vnitřní rezistivita vzorků plněných SiO_2

Měření dielektrické pevnosti

Dále byly vzorky měřeny za účelem ověření vlivu množství oxidu hlinitého na dielektrickou pevnost EP (kV / mm). Dielektrická pevnost je znázorněna na obrázku 7, nejlepší hodnotu 49,2 kV/mm má pryskyřice s 1 % mikro částic SiO_2 .



Obr. 9: Dielektrická pevnost vzorku plněných SiO_2

ZÁVĚR

Teplota je významný degradační faktor, který ovlivňuje spolehlivost izolačních systémů. Teplota při degradačních reakcích působí jako katalyzátor a urychluje degradaci. Je možné teplotu měřit, avšak v některých případech je nezbytné teplotní pole modelovat například pomocí metody konečných prvků (Obrázek 5).

Výzkum elektroizolačních kompozitů s nanočásticemi se rychle rozvíjí. Význam a spotřeba nanomateriálů stále roste, především kvůli mechanickým, tepelným a elektrickým vlastnostem. Proto se tento článek zabýval studiem jejich struktur, interakcí s okolním prostředím, s ohledem na jejich aplikaci v elektroizolačních systémech elektrických strojů.

Experiment popisuje možnost použití mikroplniva a nanoplíniva SiO_2 pro zvýšení tepelné vodivosti elektroizolačního materiálu pro vysokonapěťové točivé stroje. Součinitel tepelné vodivosti stoupá podle očekávání s přidáním 1 % SiO_2 (Tabulka 4).

Nejvhodnější koncentrace plniva SiO₂ zaleží na hodnotě tan δ ((Obrázek 6), (Tabulka 4)).

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory projektu SGS-2015-020 "Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice".

LITERATURA

- [1] W. Strunk, Jr. and E. B. White, *The Elements of Style*, New York, NY, USA: The Macmillan Company, 1959.
- [2] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics," *J. Chem. Phys.*, vol. 9, pp. 341–351, Apr. 1941.
- [3] E. Detyna, "Perfect inviscid fluids and gauge theory," in *Mathematical Methods in Hydrodynamics and Integrability in Dynamical Systems*, no. 88 in AIP Conference Proceedings, (New York), pp. 99–107, American Institute of Physics, 1982.
- [4] Barták, A, Mravináč, L. at al. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984, 256 s.
- [5] Hrstka, T., Chvátal, M., Kühn, J. at al. *Úvod do mineralogie – internetová učebnice* [online]. Praha: Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PF UK, 2002 [cit. 2005-05-5]. Dostupné z WWW: <<http://skripta.dictor.net/>>.
- [6] Janda, M., Kuchyňková, H., *Teplotní měření v elektrických strojích*, *Elektrorevue* ISBN 1213 – 1539, 2008/33 – 3. 9. 2008
- [7] Šimko, M., Chlupáč, M., *Termovízia a jej využitie v praxe*, Žilinská univerzita v Žiline 2007, ISBN 978-80-8070-654-8
- [8] Kraidl, M., *Měření teploty – senzory a měřicí obvody.*, BEN 2005
- [9] Svoboda, M., Teze dizertační práce, *Životnost izolačních systémů pro podporu Condition Based Maintenance*, 2013 ZČU v Plzni, nepublikováno.