

TEPLOTNÍ MĚŘENÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

Ing. Marcel Janda, Doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, FEKT VUT v Brně
Email: janda@feec.vutbr.cz, kuchynka@feec.vutbr.cz

Abstrakt – Teplotní měření v elektrických strojích patří mezi velmi důležitou, ale často opomíjenou problematiku. Ztráty, které vznikají v elektrických strojích, způsobují oteplení vnitřních i vnějších částí konstrukce. Při dosažení určité teploty může dojít ke zničení izolace a tím i ke zničení motoru. U strojů s permanentními magnety může velké oteplení působit na jejich magnetické vlastnosti a při dosažení tzv. Curieho teploty může dojít k demagnetizaci magnetických materiálů. Pro klasické měření teploty lze použít velké množství metod. Pro diagnostiku teploty v elektrických strojích lze využít pouze malý okruh metod. Toto omezení je způsobeno tím, že v elektrických strojích působí mechanické vlivy a elektromagnetické pole. Tyto jevy mohou negativně ovlivnit některé metody a to buď vnesením chyby do měření, nebo nebezpečím, že dojde k destrukci teplotního čidla. Pro měření v elektrických strojích se používají dvě hlavní skupiny měření. První skupinou jsou kontaktní měření. Tato skupina je reprezentována odporovými čidly (termistory) nebo termočlánky. Druhou skupinou je bezkontaktní měření. Do této skupiny se řadí měření pomocí pyrometrů a termokamery. Tato práce se zabývá porovnáním několika metod, které lze použít k měření oteplení v elektrických motorech. Jsou zde porovnány oteplovací a ochlazovací charakteristiky při různých zatíženích elektrického motoru.

1. ÚVOD

Problematika teplotních měření patří mezi velice důležité součásti diagnostiky elektrických strojů. Zvláště v poslední době, kdy rostou požadavky na snižování ceny motorů, je tato problematika velice aktuální. Samotné měření teploty jako veličiny není v dnešní době problémem a k měření je k dispozici velké množství metod založených většinou na základních fyzikálních principech. Měření teplotních polí v elektrických strojích je specifickou problematikou vzhledem k jejich konstrukci. V elektrických strojích se objevuje velké množství fyzikálních jevů, které mohou působit na přesnost měření teploty nebo dokonce mohou způsobit poškození teplotních čidel. V elektrickém motoru se lze setkat s působením mechanických sil (otáčení rotoru motoru), elektromagnetických sil (ve vinutích) a samozřejmě teplotních polí.

Velký nárůst teploty v motoru může znamenat poškození izolace a tedy zničení stroje. U strojů s permanentními magnety může dojít, při dosažení Curieho teploty, k jejich demagnetizaci a tedy ke zničení stroje.

Specifickým problémem je měření teplotních polí na rotujících částech. Nejen, že je nutné umístit teplotní čidlo na pohybující se část stroje tak, aby nedocházelo rotačním pohybem k uvolnění senzoru (vliv odstředivé síly). Dále na čidlo uvnitř elektrického stroje působí relativně velké magnetické pole, které například u termočlánků může znamenat zanesení chyby do měření. Neposledním problémem je vyvedení teplotního senzoru z rotující části k měřicímu přístroji.

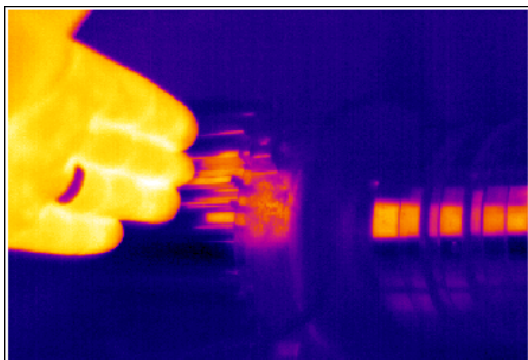
Z těchto důvodů vzniklo mnoho výpočetních metod pro určení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik elektrického stroje. Tyto metody mají ale mnohá omezení. Hlavní nevýhodou je relativní přesnost výpočtů. Pro základní výpočty při návrhu elektrických strojů jsou

tyto metody dostačující. Měření teploty však nelze při teplotních optimalizacích elektrických strojů nikdy nahradit.

2. MĚŘENÍ TEPLOTY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

2.1. BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ

Bezkontaktní měření teploty je založeno na sledování povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření. Toto záření je zpracováno pomocí detektoru, který zaznamená záření v rozsahu vlnových délek $0,4\mu\text{m}$ do $25\mu\text{m}$. Tento rozsah pokrývá velkou část infračerveného spektra a umožňuje tedy měřit teploty od -40°C do $+10\,000^\circ\text{C}$. Každý materiál vyzařuje jiným způsobem. Proto je pro každý materiál stanovena veličina, která udává míru vyzařování povrchu tělesa. Ačkoliv existují tabulky hodnot emisivity pro jednotlivé materiály, je vhodné na počátku měření ověřit, zda tato hodnota odpovídá právě měřenému materiálu. Důvod k tomu je jednoduchý. Na materiálech (zvláště na kovech) se objevují různé povrchové vrstvy a vlastnosti, které mají vliv právě na míru vyzařování. Povrchovými vrstvami může být například nátěr nebo koroze materiálu. Mezi povrchové vlastnosti patří například odrazivost povrchu, která může zapříčinit, že senzor zaznamená odraz zdroje tepla, který se nachází v blízkosti měřeného elektrického stroje. Na následujícím obrázku (Obr. č. 1) je znázorněn odraz tepla lidského těla na povrchu spojky motoru, která je z lesklého kovu. Jak je vidět, může vnést přítomnost dalšího zdroje tepla do měření určitou chybu. K řešení tohoto problému je možné použít několik metod. První je nátěr lesklých částí matnou barvou. Tato metoda je velmi levná a jednoduchá, ale zvláště u elektrických strojů může způsobit řadu problémů. Natírání členité konstrukce motorů může být složité a je nutné dávat pozor, aby barva nezpůsobila zkrat v elektrických částech stroje.



Obr. č. 1 - Odraz tepla lidského těla na lesklém povrchu stroje

Další problém, který může u tohoto měření nastat, je změna teplotních vlastností stroje. Tato změna však může být zanedbatelná. V každém případě nátěr znamená změnu proti původnímu provedení stroje a je skoro nemožné nebo velmi složité ho odstranit. Další metodou, kterou lze k tomuto účelu použít, je použití křídového spreje. Ten slouží k nanesení jemného křídového prášku na povrch stroje a tím dojde k jeho zmatnění. Výhodou je snadná aplikace a to, že povrchová vrstva je velmi tenká, tedy má minimální vliv na teplotní pole. Nevýhodou je, že každý sebemenší otěr znamená setřetí vrstvy z materiálu.

Jak již bylo zmíněno, každá změna na povrchu má vliv na emisivitu materiálu. Z toho důvodu je na začátku každého měření nutné určit emisivitu všech materiálů, které se na elektrickém stroji nacházejí. Pokud jde o měření termokamerou, je nejjednodušší způsob určení emisivity porovnání známé teploty s měřením pomocí termokamery. Je tedy nasnímána část stroje se známou teplotou (tuto teplotu je možné určit například dotykovým teploměrem). Následně je v softwaru, který umožňuje u termosnímků měnit emisivitu, provedena analýza. Tedy uživatel mění hodnotu emisivity až do té míry, kdy teplota změřená bezkontaktní metodou odpovídá teplotě získané dotykovým teploměrem. Takto je možné určit emisivity všech viditelných částí elektrického stroje v klidovém stavu. To je také jediný stav, ve kterém je možné měřit kontaktními metodami na částech stroje, které při chodu rotují.

Pro bezkontaktní měření teploty se používají mimo jiné dva hlavní typy měřicích přístrojů:

Pyrometry – měřicí přístroj pro rychlá a spíše orientační měření. Pracuje na principu zaostření vyzářované teploty do jednoho detektoru uvnitř měřicího přístroje. Přesnost dosažených výsledků je závislá na velké řadě parametrů (například úhlu naklonění proti měřenému povrchu, apod.). Získání kvalitních výsledků pomocí tohoto přístroje vyžaduje určitou zkušenost. Díky svému jednoduchému ovládní se ale hodí pro přehledová měření, u kterých nezáleží na přesnosti.

Termokamery - využívají při bezkontaktním měření teploty zaznamenání celého povrchu stroje do jednoho digitálního snímku. Tento snímek je pak možné

dále analyzovat pomocí speciálních programů. V nich je pak možné měnit všechny parametry měření a tedy provést důkladnou analýzu teplotního pole. Toho lze s úspěchem využít při teplotní analýze elektrického stroje, jehož povrch je tvořen několika různými materiály. Termosnímek se zaznamená v jediný časový okamžik. Následně je tedy možné zjistit teplotu jednotlivých částí stroje v tomto čase bez větších problémů.

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- Možnost měřit teploty celého povrchu tělesa v jednom okamžiku
- Měření rychlých změn teploty
- Možnost měření na pohybuujících se objektech
- Malý vliv měřicího přístroje na měřený objekt

Nevýhody bezkontaktního měření:

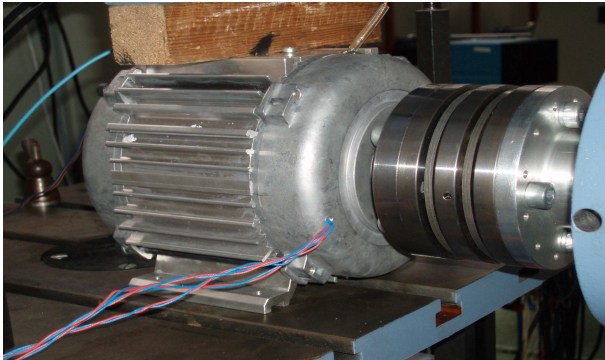
- Problém s určením správné emisivity povrchu
- Chyby měření způsobené prostupností prostředí
- Problémy s odrazem teploty na lesklých částech

2.1.1. MĚŘENÍ TERMOKAMEROU NA ELEKTRICKY KOMUTOVANÉM (EC) MOTORU

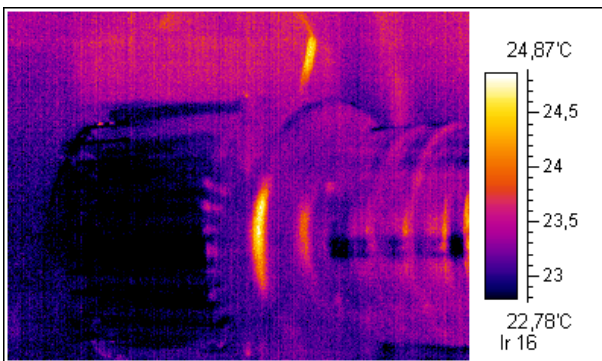
Měření termokamerou bylo provedeno na elektricky komutovaném stroji, který není vybavený žádným chladicím systémem jak vnitřních tak vnějších částí. Na následujících obrázcích (Obr. č. 2 až 5) je zobrazen ohřev tohoto motoru postupně v čase 0 až 3600 sekund. Kamera byla umístěna na stativu pod mírným úhlem vzhledem k motoru, aby nedocházelo k nežádoucím odrazům a aby byly snímky pořízeny ze stejného místa. Z termosnímků je vidět, že teplota stoupala od teploty okolí, což je cca 23°C v počátku měření, k teplotě 80°C při jmenovitém zatížení stroje po dobu jedné hodiny. Z obrázku je zřejmé, že k největšímu oteplení dochází v místě ložiskových štítů motoru. To je způsobeno tím, že se zde nachází několik zdrojů tepla. Prvním tímto zdrojem jsou samotná ložiska. Jejich pohyb způsobuje tření, při kterém vzniká teplo. Při analýze ztrát v elektrických strojích jsou ztráty v ložiscích zařazeny do skupiny ztrát mechanických, protože vznikají vlivem mechanického působení. Druhým zdrojem tepla v této části stroje je vinutí stroje. V blízkosti ložiskového štítu se nachází čela vinutí. Díky ztrátám v mědi dochází k jejich ohřevu. Teplo se pak dále šíří směrem ke studenějšímu místu, tedy k povrchu elektricky komutovaného motoru. Díky tomu dochází k dalšímu zahřátí štítů.

V chladicích žebrech motoru je možné vidět, že jedna drážka má výrazně vyšší teplotu než ostatní. To je způsobeno vloženým materiálem, který brání odvodu tepla do okolí. Teplota odečtená ze zobrazených

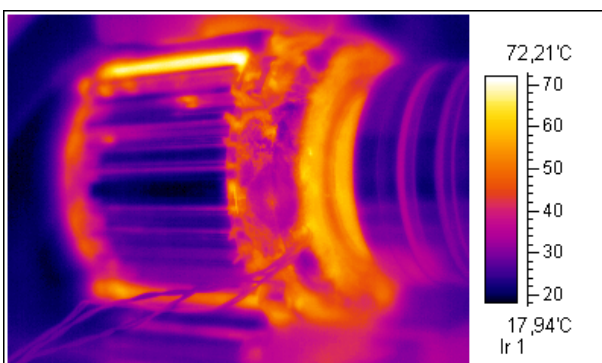
termosnímků ale neodpovídá tomuto zobrazení, protože emisivita materiálu v drážce je jiná, než nastavená.



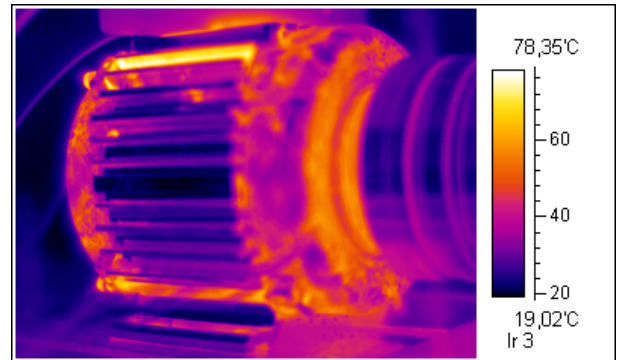
Obr. č. 2 – Fotka měřicího pracoviště a EC motoru - t=0s



Obr. č. 3 – Termosnímek EC motoru - t=0s



Obr. č. 4 – Termosnímek EC motoru - t=1800s



Obr. č. 5 – Termosnímek - t=3600s

2.2. KONTAKTNÍ MĚŘENÍ

Kontaktní měření teploty je založené na přímém přenosu tepla z měřeného povrchu na měřicí sondu. Tato sonda může být realizována různými způsoby. Hlavní typy čidel, které lze použít pro měření v elektrických strojích, lze rozdělit do několika skupin podle provedení:

- Odporové senzory
- Termoelektrické senzory
- Indikátory teploty

Kromě těchto typů se v běžné praxi používají další typy teplotních snímačů. Příkladem jsou dilatační teploměry, které jsou založeny na principu změny objemu média (kapalina, plyn) v závislosti na teplotě. Tato teplotní čidla se u měření na elektrických strojích moc nepoužívají, protože jejich konstrukce bývá citlivá na mechanické poškození. Další nevýhodou může být komplikované zapojení těchto typů čidel do automatizovaných měření, která jsou v dnešní době požadována.

Specifickým problémem kontaktního měření je uchycení teplotního čidla na měřený povrch. Při použití lepidla nebo speciálních materiálů může dojít k poškození čidla v případě, že je nutné čidlo odstranit. Zvláště náchylné na tento způsob poškození jsou termočlánky. Při krátkodobém měření je možné použít k uchycení lepicí pásku, ale její plocha brání odvodu tepla a při dlouhodobějších měřeních je patrný rozdíl teploty pod touto páskou.

Výhody kontaktního měření teploty:

- Nízká cena
- Možnost snadného umístění uvnitř i vně stroje
- Nezávislost měření na povrchu stroje
- Velká rychlost odezvy – v závislosti na čidle

Nevýhody kontaktního měření teploty:

- Nutnost vyvedení připojovacích vodičů
- Komplikované měření na pohyblivých částech stroje
- Někdy nutnost zasáhnout do konstrukce stroje – vrtání otvoru apod.

2.2.1. ODPOROVÉ SENZORY

Tyto senzory jsou založeny na jednoduchém principu změny odporu jednotlivých látek v závislosti na teplotě. U vodivých materiálů dochází ve většině případů k růstu odporu s teplotou. Naopak u polovodičů dojde ke snížení odporu materiálu se zvýšením teploty. Hlavní výhodou odporových teplotních čidel je dostatečná přesnost a velmi dobrá časová stabilita měřených hodnot.

Podle konstrukčního uspořádání lze dále odporové senzory teploty rozdělit do dvou skupin:

Kovové odporové senzory – principem těchto sensorů je teplotní závislost odporu kovu. Odporové kovové senzory teploty lze podle použitých materiálů rozdělit do několika hlavních skupin:

- odporové platinové senzory
- odporové niklové senzory
- odporové měděné senzory

Polovodičové odporové senzory – polovodičové senzory teploty využívají stejně jako odporové senzory teplotní závislosti odporu. U polovodičových materiálů je dominantní závislost koncentrace nosičů náboje na teplotě. Mezi polovodičové odporové teplotní senzory patří:

termistory, negastory, pozistory, polovodičové monokrystalické senzory teploty, monokrystalické Si senzory, Senzor SiC.

Hodnoty teploty, které odpovídají příslušnému odporu, lze získat pomocí informací, které výrobci dodávají k jednotlivým čidlům. Většinou se jedná o tabulky, grafy (viz. Obr. č. 6) nebo rovnice. Tyto vztahy po dosažení zjištěného odporu aproximují průběh křivky změny odporu v závislosti na teplotě. Výsledkem těchto vztahů je teplota.

Příkladem může být vztah pro termistory KT110, kdy pro teplotu [°C] platí:

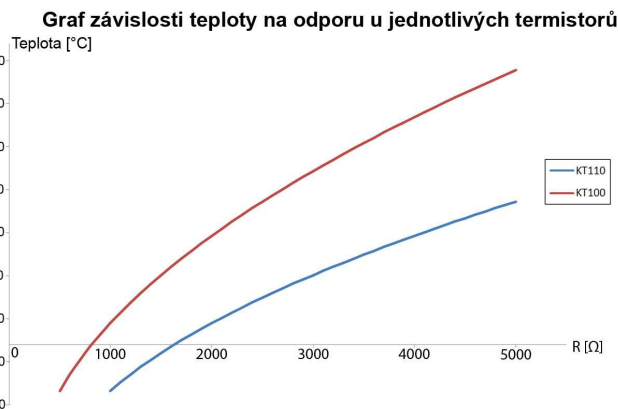
$$T = \left(25 + \frac{\sqrt{\alpha^2 - 4\beta + 4\beta \cdot \frac{R_T}{R_{25}} - \alpha}}{2\beta} \right) \quad (8)$$

Kde R_T ... odpor termistoru při měřené teplotě

R_{25} ... odpor termistoru při 25°C – od výrobce

α ... konstanta termistoru $\alpha = 7,88 \cdot 10^{-3} K^{-1}$

β ... konstanta termistoru $\beta = 1,397 \cdot 10^{-5} K^{-2}$



Obr. č. 6 – Graf závislosti teploty na odporu pro termistory KT100 a KT110

2.2.2. TERMOELEKTRICKÉ SENZORY

Termočlánky se skládají ze dvou pásků nebo drátů. Ty jsou realizovány z různých kovů, spojených na jednom konci. Při změně teploty na spoji dojde ke změně termoelektrické síly mezi dvěma konci. S růstem teploty vzrůstá také výstupní termoelektrická síla. Tato závislost, ačkoliv se tak může jevit, není přesně lineární.

Princip termočlánků vychází z jevu, který je po svém objeviteli nazván Seebeckův jev. Ten popisuje 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 než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných, a proto znaménka absolutních Seebeckových koeficientů souhlasí se znaménkem těch nositelů nábojů, kterých je ve vodiči více. Tento jev zajišťuje vlastní převod teploty na elektrické napětí.

Pro termoelektrické napětí, které vznikne na svorkách termočlánku, je možné psát tzv. Seebeckovy vztahy:

$$dE_{AB} = S_{AB} \cdot dT \quad (9)$$

Pak lze psát:

$$E_{AB} = \int_{T_B}^{T_A} S_{AB} \cdot dT \quad (10)$$

Kde S_{AB} je Seebeckův koeficient, který se spočítá jako:

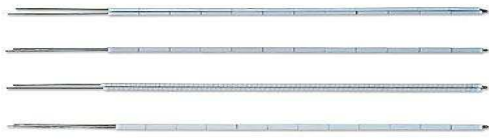
$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (11)$$

Jednotlivé složky jsou pak určeny ze vztahů:

$$S_A = \int_0^T \frac{\sigma_A}{T} \cdot dT, S_B = \int_0^T \frac{\sigma_B}{T} \cdot dT \quad (12,13)$$

Kde σ_A, σ_B ... Thomsonovy koeficienty

S použitím těchto vztahů je možné určit závislost termoelektrického napětí na teplotě, a tedy díky tomu lze pomocí termočlánků měřit teplotu.

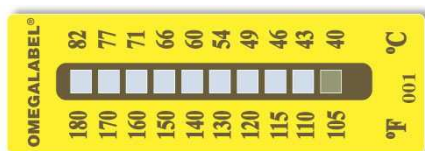


Obr. č. 7 – Různé typy termočlánků

2.2.3. INDIKÁTORY TEPLoty

Indikátory teploty slouží k přibližnému určení teploty těles. Teplota je stanovena na základě znalosti kritické teploty, tj. teploty, při níž nastává definovaná změna vzhledu indikátoru. Touto změnou může být buď tvar nebo barva indikátoru. Přesnost měření teploty indikátory je závislá na skutečnosti, nakolik se liší prostředí pro kalibraci indikátorů od prostředí, ve kterém probíhá měření. Vliv na odchylku teploty má nejen složení atmosféry, ale i tlak. Vliv chemického působení prostředí se u některých typů indikátorů řeší uzavřením do průhledné fólie. Důležitým parametrem pro používání indikátorů teplot je rychlost ohřevu. Barevné indikátory se dále člení na vratné a nevratné a s jedním nebo více barevnými zvraty. Vratný indikátor teploty má po zchladnutí výchozí barvu. Indikátor s více zvraty mění barvu při různých teplotách.

K těmto snímačům patří nálepky, peletky, tužky (krajony), laky nebo tekuté krystaly, u nichž se projeví změny, když se dosáhne určité teploty. Jsou používány např. na parních sifonech a uzávěrech - když překročí určitou teplotu, bílé políčko na snímači změní na černé. Doba odezvy je obvykle několik minut, takže nezachycují přechodné teplotní změny. Jejich přesnost je nižší než u jiných typů snímačů. I tak se mohou tyto snímače hodit, když je potřeba potvrdit, že teplota části zařízení nebo materiálu nepřesáhla určitou hodnotu.

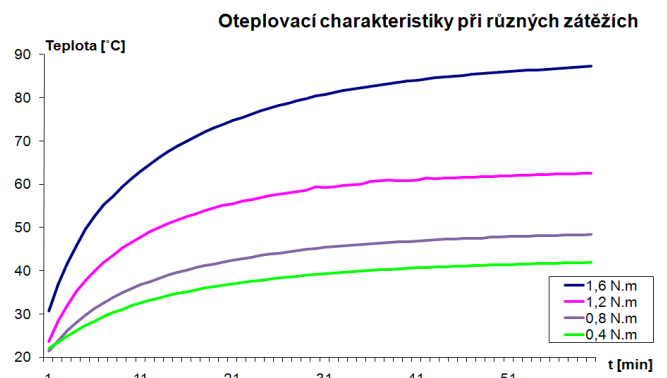


Obr. č. 8 – Indikátor teploty

3. POROVNÁNÍ OTEPLOVACÍCH A OCHLAZOVACÍCH CHARAKTERISTIK PRO RŮZNÁ ZATÍŽENÍ EC MOTORU

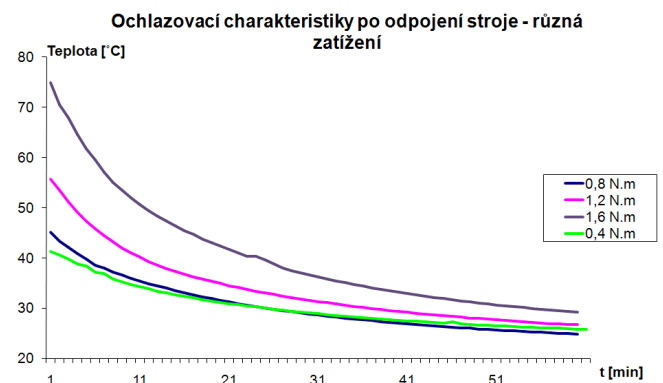
V rámci porovnávání jednotlivých metod byla provedena měření oteplovacích a ochlazovacích charakteristik pro různá zatížení elektricky komutovaného motoru. Maximální zatížení odpovídalo jmenovitému momentu, tedy 1,6 N.m. Další měření byla provedena při snížených zatíženích, které odpovídaly násobkům čtvrtiny jmenovitého zatížení. Po dosažení ustálené teploty byl motor odpojen a bylo provedeno měření ochlazovacích charakteristik.

Jak je vidět na Obr. č. 9, je ustálená teplota oteplovací charakteristiky přibližně úměrná zatížení stroje. Zatímco při jmenovitém zatížení dosáhla ustálená teplota hodnoty 87°C, při polovičním zatížení byla ustálená teplota ve stejném čase 45°C.



Obr. č. 9 – Oteplovací charakteristiky pro různá zatížení

U ochlazovacích charakteristik lze jejich průběh předpokládat, protože pro všechna zatížení je koncová teplota stejná, tedy 24°C – teplota okolí. Počáteční body křivky se odvíjejí od ustálené teploty. Jak je vidět z Obr. č. 10 při všech zatíženích (kromě jmenovitého), došlo k vyrovnání teplot elektrického stroje s teplotou okolí v průběhu jedné hodiny. Pro úplné ochlazení EC motoru na stálou hodnotu bylo potřeba o 10 minut více, než u ostatních průběhů. Jedná se tedy o čas, který slouží ke snížení teploty o cca 20°C.



Obr. č. 10 – Ochlazovací charakteristiky EC motoru pro různá zatížení

4. VÝPOČET OTEPLOVACÍCH A OCHLAZOVACÍCH CHARAKTERISTIK

Průběhy oteplovacích a ochlazovacích charakteristik je možné určit nejen pomocí měření, ale také pomocí teoreticky určených vzorců. Díky relativně jednoduchým vzorcům je možné aproximovat průběhy oteplovacích a ochlazovacích charakteristik při různých provozních stavech elektrických strojů. Nejčastějším případem je trvalý chod, ale je možné vypočítat teplotní průběhy i pro přerušovaný chod.

4.1. OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKA

Nejvyšší ustálená teplota stroje je závislá na celkových ztrátách, ochlazovací konstantě a chladicím povrchu. Při daném chladicím povrchu a způsobu chlazení je nejvyšší hodnota oteplení úměrná okamžitým ztrátám. Čím více je stroj zatížen, tím většího oteplení dosáhne.

Oteplovací charakteristika má sama o sobě logaritmický průběh. Proto je možné ji aproximovat vztahem:

$$T = T_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (14)$$

Kde je T ... je teplota v čase t [°C]

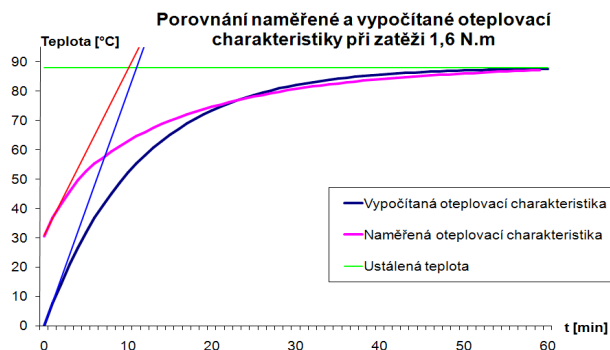
T_{\max} ... ustálené teplota stroje [°C]

t ... čas, ve kterém se určuje teplota [s]

τ ... časová konstanta stroje [s]

Výpočet oteplovací charakteristiky pomocí vztahu 14 je založen na znalosti ustálené teploty časové konstanty elektrického stroje. Časová konstanta elektrického stroje udává, za jak dlouho by bylo dosaženo ustálené teploty v případě, že by nedocházelo k sekundárním teplotním výměnám. Tato konstanta je nezávislá na ztrátách a tedy stroj směřuje k ustálené teplotě vždy stejně rychle. Průběh charakteristiky by pak měl lineární charakter.

Na Obr. č. 11 je zobrazeno porovnání změřené a vypočítané oteplovací charakteristiky. Jak je zřejmé, obě charakteristiky se rozcházejí hlavně na počátku měření. Tento rozdíl je způsoben tím, že teplota měřeného stroje odpovídá na počátku měření teplotě okolí, tedy pokojové teplotě (24°C). Základní matematická funkce použitá k aproximaci tohoto průběhu vychází z počátku, který je v nule. Rozdíl na počátku měření je tedy 24°C. Čím blíže se obě křivky přibližují k ustálené teplotě, tím se chyba aproximace zmenšuje.



Obr. č. 11 – Porovnání vypočítané a naměřené oteplovací charakteristiky EC motoru

4.2. OCHLAZOVACÍ CHARAKTERISTIKA

Ochlazovací charakteristika elektrických strojů má ve většině případů exponenciální průběh. Výjimkou jsou speciální provozní stavy elektrických strojů, jako je například přerušovaný chod elektrických strojů. Základní průběh ochlazovací charakteristiky je možné aproximovat pomocí vztahu:

$$T = T_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$

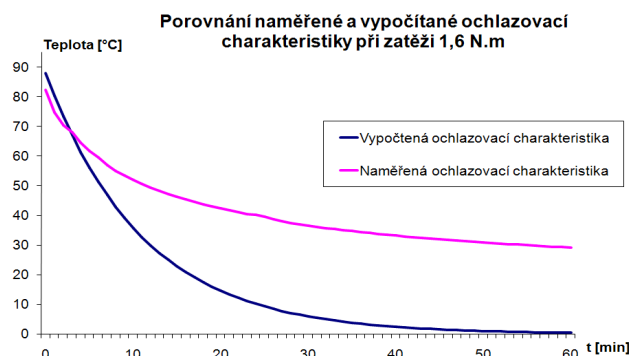
Kde je T ... je teplota v čase t [°C]

T_{\max} ... ustálená teplota stroje [°C]

t ... čas, ve kterém se určuje teplota [s]

τ ... časová konstanta stroje [s]

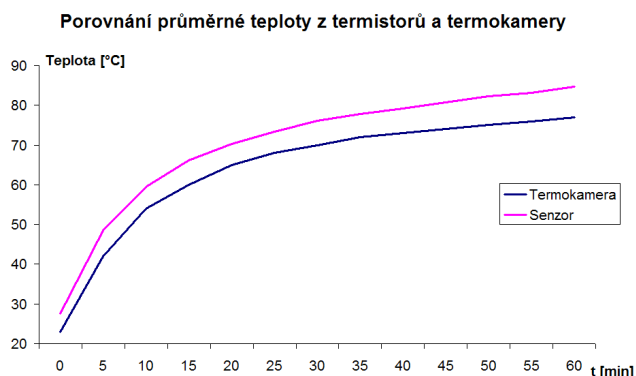
Počáteční teplota křivky odpovídá ustálené teplotě elektrického stroje. Obdobně jako u oteplovací charakteristiky dochází k největšímu rozdílu mezi naměřenou a vypočítanou křivkou v okamžiku, kdy se jejich průběhy blíží k ustáleným hodnotám. Zatímco naměřená charakteristika se ustálí na pokojové teplotě 24°C, vypočítaná křivka konverguje k nule. Rozdíl průběhů se tedy pohybuje v rozmezí od 0°C po odpojení do 24°C při dosažení ustálených hodnot – v tomto případě v čase 3600 sekund.



Obr. č. 12 – Porovnání vypočítané a naměřené ochlazovací charakteristiky EC motoru

5. MĚŘENÍ ROZDÍLU TEPLoty POVRCHU A UVNITŘ EC STROJE

K měření teploty v EC stroji byly použity dvě metody. První z nich byla odporová čidla, konkrétně termistory, které sloužily pro měření teploty uvnitř stroje. Druhá metoda byla bezkontaktní. Jako měřicí zařízení byla použita termokamera. Pomocí tohoto zařízení byla zaznamenávána teplota na povrchu EC motoru. Na Obr. č. 13 jsou znázorněny průběhy oteplovací charakteristiky uvnitř a vně měřeného elektrického stroje. Rozdíl teplot je dán přenosem tepla z vnitřku motoru přes hliníkovou kostru. Na rozdíl teplot má vliv teplota okolí, zejména proudění vzduchu kolem měřeného stroje, které způsobuje ochlazování materiálů. Během měření na EC motoru zobrazeném v následujícím grafu byl vliv proudění okolního vzduchu zanedbatelný. Teplota okolí byla po celou dobu měření konstantní a byla 23°C. Měření bylo provedeno při jmenovitém zatížení 1,6 N.m. Po jedné hodině měření byla teplota uvnitř stroje 88°C a na povrchu 79°C. Tento rozdíl je způsoben ochlazováním povrchu motoru vlivem okolní teploty. Na měření mohou mít vliv i chyby měřicích přístrojů, popřípadě chyby metod.



Obr. č. 13 – Porovnání oteplovacích charakteristik uvnitř a vně EC motoru

6. URČENÍ OTEPLENÍ ODPOROVOU METODOU

V elektrických strojích je možné vypočítat teplotu vinutí ze znalosti vlastností odporu mědi v závislosti na teplotě. Při určení oteplení měděného vinutí lze vycházet ze vztahu:

$$\Delta\vartheta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_1) + \vartheta_1 - \vartheta_0 \quad (16)$$

Kde je $\Delta\vartheta$... oteplení vinutí [°C]

R_1 ... odpor vinutí ve studeném stavu [Ω]

R_2 ... odpor vinutí v teplém stavu [Ω]

ϑ_1 ... počáteční teplota vinutí [°C]

ϑ_0 ... teplota okolí při měření odporu v teplém stavu [°C]

Odporovou metodu pro určení oteplení ve vinutí lze použít pro všechna vinutí napájená stejnosměrným proudem. U střídavých strojů je možné měřit odpor vinutí až po ukončení měření. Čas potřebný pro odpojení vinutí a připojení měřicího přístroje vnáší do měření nepřesnosti, protože během této doby dojde ke změně odporu vinutí. Pro zvýšení přesnosti odporové metody u střídavých strojů je možné změřit průběh ochlazování vinutí a následně pomocí získaného průběhu aproximovat teplotu v požadovaném časovém úseku.

Na motoru byl změřen počáteční odpor $R_0 = 43m\Omega$ a po jedné hodině chodu stroje pak $R_{3600} = 53m\Omega$. Tyto hodnoty odpovídaly oteplení stroje o 60°C. Když se k tomu připočítá počáteční teplota Ec motoru, která se rovnala teplotě okolí v době měření, byla teplota vinutí 83°C. V průběhu měření bylo umístěno mezi vinutí teplotní čidlo, které mělo sloužit k ověření vypočítané hodnoty. Naměřená teplota vinutí je $\vartheta_2 = 87,24^\circ\text{C}$. Hodnota měřeného oteplení je $\Delta\vartheta_{mer} = 64,24^\circ\text{C}$. Rozdíl mezi vypočítanou a naměřenou hodnotou je 4,24°C, což odpovídá odchylce cca 5%.

7. ZÁVĚR

Měření teploty a oteplení v elektrických strojích je velmi důležitou diagnostickou problematikou. Význam analýzy teplotních polí stoupá s požadavky na minimalizaci nákladů na výrobu. Díky znalosti teplotních pochodů uvnitř elektrických strojů je možné modifikovat výrobní proces a popřípadě i materiály, které se používají k jejich výrobě. Pro měření teplotních polí lze použít celou řadu metod. V tomto článku jsou zmíněny dvě skupiny metod. První skupinou jsou kontaktní měření teploty. Ty jsou zde zastoupené odporovou metodou, tedy měřením pomocí termistorů. Termistory jsou velice jednoduché součástky a tedy i jejich cena se pohybuje řádově v desítkách korun. Přesto je možné s jejich pomocí dosáhnout velmi dobrých výsledků při měření teplotních polí na povrchu i uvnitř elektrických strojů. Samostatnou problematikou je v tomto případě metoda uchycení teplotních čidel na měřený povrch. Druhá skupina, která je zmíněna, je bezkontaktní měření. K tomuto účelu byla použita termokamera. Bezkontaktní měření má řadu výhod. Asi největší z nich je rychlost provedení vlastního měření. Na druhou stranu je termokamera relativně drahé zařízení v porovnání s termočládky nebo termistory. Přesnost této metody je silně závislá na znalostech a zkušenostech obsluhy. Dále určení emisivity měřeného povrchu může způsobit obtíže. Analýzu termočládky

značně usnadňují programy, které se k termokamerám dodávají. Ty umožňují uživateli měnit všechny parametry měření až po jeho realizaci. To dává obsluze čas na provedení celkové analýzy jednotlivých součástí elektrického stroje v jediném okamžiku. V další kapitole je uvedeno porovnání průběhů oteplovacích charakteristik při různých zatíženích elektricky komutovaného motoru. Jak vyplývá z grafů, je ustálená teplota stroje přibližně úměrná jmenovitému zatížení stroje.

V posledních částech článku je porovnání měřicích metod s metodami výpočetními. Teoretické výpočetní metody se používají při návrzích elektrických strojů. Jedná se o jednoduché matematické funkce, které aproximují průběh oteplovacích a ochlazovacích charakteristik. Přesnost těchto metod je velice relativní a jejich průběhy se nejvíce blíží reálným hodnotám až při ustálené teplotě. Samotný průběh oteplování je u teoreticky určených průběhů zatížen velkou chybou. Je nutné ale podotknout, že při návrzích elektrických strojů je nutné počítat s určitými rozdíly mezi vypočtenými reálnými hodnotami. Proto lze konstatovat, že teoreticky určené hodnoty jsou dostatečné při výpočetním návrhu nových elektrických strojů, ale pro jejich teplotní optimalizaci je vhodnější použít některou z měřicích metod. V laboratořích se nejvíce osvědčila odporová metoda pro určení teploty vinutí elektrického stroje. Díky ní je možné ve velmi krátkém čase a na základě odporu na počátku a na konci měření určit teplotu vinutí v drážkách elektrického motoru. Použitím této metody lze získat pouze okamžitou hodnotu. Neslouží tedy k aproximaci průběhu oteplovacích charakteristik.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumných projektů No. MSM0021630516: Zdroje, akumulace a optimalizace využití energie v podmínkách trvale udržitelného rozvoje a GAČR 102/09/1875 "Analýza a modelování vlastností elektrických strojů na malé napětí"

LITERATURA

- [1] P. Kopylov a kol., - Stavba elektrických strojů, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1988
- [2] Bašta J., Chládek J., Mayer J. – Teorie elektrických strojů, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1968
- [3] Kreidl M. – Měření teploty, senzory a měřicí obvody, Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2005, ISBN 80-7300-145-4
- [4] Hak. J., Ošlejšek O., - Výpočet chlazení elektrických strojů – 1. díl, Brno 1973
- [5] Sergent J., Krum Al. - Thermal management handbook for electronic assemblies, Published in New York: McGrawHill, 1998, ISBN 0-07-026699-9
- [6] Krum, Al. – "Basic thermal analysis", published in New York: McGrawHill, 1998, 5.1-5.22

- [7] Boldea, I., Nasar S. A. - The Induction Machine Handbook, Published 2002, CRC Press, ISBN 0849300045
- [8] Krok, R. - Zweryfikowany pomiarowo model cieplny do monitorowania rozkładu temperatury w silniku indukcyjnym, To be published on SME 2002
- [9] Staton, D.A., Cavagnino, A. - Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Analytical Modeling of Electric Machines, To be published on IECON 2006
- [10] Bašut V. a kolektiv – Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1965
- [11] Cigánek L. – Elektrické stroje, Elektrotechnický svaz Československý, 1944