

Michal Kosterec, Juraj Kurimský

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Analyza tepelného poľa vo vn cievkach točivých strojov

**Abstrakt.** Príspevok sa zaoberá problematikou rozloženia teplotného poľa vo vn vinutí a izolácii točivých strojov. Je poukázané na vznik tepla v točivých strojach. Je popísaný teoretický model a prezentovaná jeho realizácia v programe Ansys Workbench. V závere sú predložené výsledky zo simulácie oteplenia vybraného miesta a diskusia.

**Kľúčové slová:** teplota, teplo, izolácia, točivý stroj, teplotná trieda

**Abstract.** Paper deals with the issue of thermal field distribution in h.v. insulation of rotating machine. The heat generation is explained in the rotating machines. Theoretical model is referenced and model design is presented in Ansys Workbench. Results of selected simulating cases are presented and discussed.

**Keywords:** temperature, heat, electrical insulation, rotating machine, thermal class

### Úvod

Problematika tepelnej analýzy elektrických strojov je aktuálna a aj v súčasnosti sa jej venuje veľká pozornosť, najmä pri návrhu elektrického stroja. Vo všeobecnosti sa tento problém sa týka všetkých elektrických strojov, pretože v každom stroji pri prevádzke vznikajú straty. Sú to straty vo vinutí, v železe, mechanické straty a dodatočné straty. Straty v elektrickom stroji je elektrická energia, nenávratne premenená na teplo. To v konečnom dôsledku spôsobuje otepľovanie jednotlivých súčastí stroja. Dimenzovanie elektrickej izolácie musí vychádzať z analýzy možného oteplenia stroja v rôznych režimoch prevádzky.

Po štarte stroja sa generované teplo spotrebuje na zvýšenie tepelného obsahu stroja; zmeny teploty vykazujú určitú vyššiu dynamiku. Časť teploty sa odvádza do okolia. S rastúcim oteplením sa táto dynamika spomaľuje. Menšie množstvo tepla prispieva k ohrievaniu stroja, ale o to viac je odvedené do okolitého prostredia. S rastúcim oteplením sa prestup tepla do okolia zlepšuje. Tento proces pokračuje až do stavu, keď nastane rovnovážny stav. Vtedy sa stroj neotepľuje, ale všetko vzniknuté teplo sa odvádza do okolia. Stroj dosiahol maximálne oteplenie.

Všetky tieto deje sú pre prevádzku stroja veľmi dôležité, najmä z hľadiska elektrickej izolácie a jej možného tepelného zaťaženia. Izolácia je objemovo najmenšia časť elektrického stroja, ale pre správnu funkciu stroja je nenahraditeľná. Ak sa poškodí elektrická izolácia, zvyčajne to znamená aj porucha stroja a nutnosť jeho odstavenia.

Elektrická izolácia by sa nemala tepelne namáhať nad povolené kritické hodnoty, ktoré sú dané vlastnosťami použitých materiálov, aby sa neporušili izolačné schopnosti a mechanická pevnosť materiálu. Prehrievanie izolačného materiálu narušuje celistvosť organických zložiek izolačných materiálov vinutia, čo má za následok zrýchlenie ich tepelného starnutia [1][2][3].

Príspevok sa zaoberá analýzou oteplenia systému vn vinutia točivého stroja. Je vytvorený 3D model a analyzované výsledky zo simulácie priestorovým modelom. Dosiahnuté výsledky sú následne porovnané s teoretickými predpokladmi.

### Metódy

V elektrickom stroji nastáva jeho oteplenie z niekoľkých príčin, z ktorých najdôležitejšie sú [1][4][5]:

- prechod elektrického prúdu ohmickým odporom: pretekanie elektrického prúdu vodičmi, nedokonalé spojenie vodičov v spojoch, poddimenzovaním vodičov, vyšším odberom prúdu

- elektrický oblúk: teplo vzniká pri skratoch, zvráňaní, pri spínaní elektrického obvodu
- elektrická indukcia: indukcia striedavého prúdu - motory, transformátory, generátory
- vysokofrekvenčný ohrev
- infračervené žiarenie: ohrev vzduchu infračerveným žiaričom.

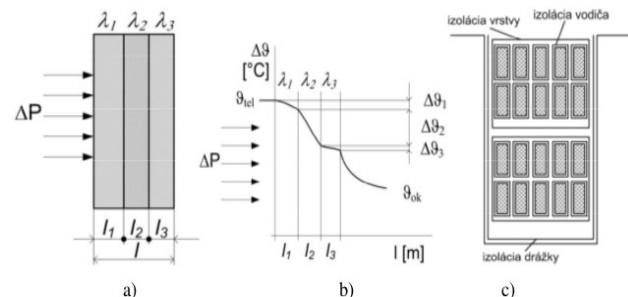
Najväčšie teplo vzniká pri skratoch. Teplo vzniká aj pri nedokonalom spojení elektricky vodivých častí, kde rozhodujúci vplyv má prechodový odpor medzi spojmi. Dôsledky vzniku tepla pri správnom odvetrávaní môžu byť zanedbateľné, ale v určitých prípadoch, ktoré sú známe z praxe, môže dôjsť ku prehriatiu elektrického stroja, ktoré častokrát vedie ku zlyhaniu stroja. Problematika prestupu tepla je dostupná v mnohých dostupných učebniciach alebo knihách, napr. [1][6]. V našej práci budeme analyzovať model zohľadňujúci o prestup tepla cez niekoľko vrstiev.

Stavové riešenie problematiky je možné cez simulácie vykonávané na náhradnom tepelnom modeli elektrického stroja, ktorý bol publikovaný napr. v [6].

V točivom elektrickom stroji rozlišujeme tri typy izolácie:

- izolácia vodičov,
- izolácia čiel cievok vinutia,
- drážková izolácia.

Príklad prestupu tepla pre viacvrstvovú izoláciu je znázornený na obr. 1 ( $\lambda_i$  sú súčinitele tepelnej vodivosti,  $l_i$  sú hrúbky vrstiev,  $\Delta\theta$  je zmena oteplenia a  $\Delta P$  je výkon stroja).



Obr.1. Príklad prestupu vo viacvrstvej izolácii

Tepelná odolnosť izolačných materiálov je klasifikovaná pomocou tzv. *tepelných tried*. Tepelná trieda udáva maximálnu teplotu, pri ktorej izolačný materiál pri trvalom tepelnom namáhaní vykazuje optimálnu životnosť. Jednotlivé tepelno-izolačné triedy sú dané normou STN-EN-61857, pozri tab. 1.

Tabuľka 1. Tepelno-izolačné triedy podľa STN-EN-61857

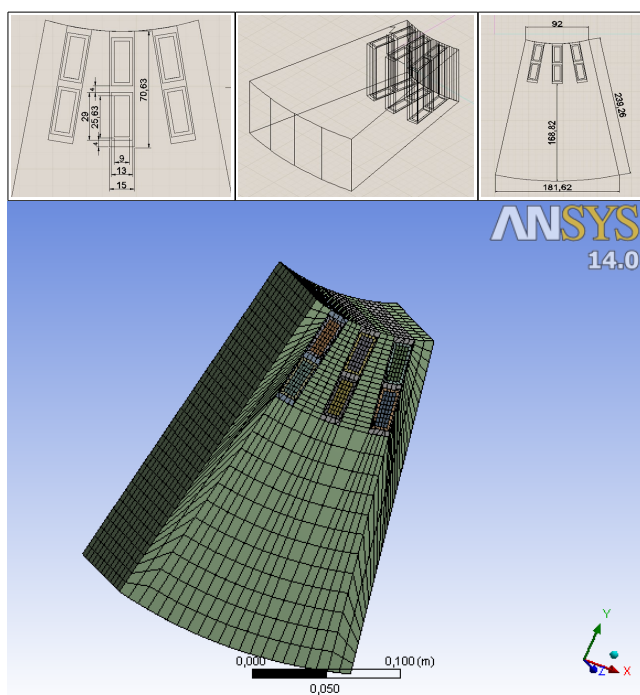
Spôsob chladenia	Trieda / medzná teplota (°C)					
	A	E	B	F	H	200
vzduchom alebo plynom	125	145	170	195	220	240
olejom	115	140	155	180	200	220

**Model**

V rámci tejto práce bol vytvorený model trojfázového asynchrónneho 6 kV motora. Model pozostával z troch častí:

1. vinutie – vinutie je tvorené medeným pásom s prierezom 225 mm<sup>2</sup> dĺžky 81 cm.
2. statorová časť – stator pozostáva z pospájaných statorových plechov. Materiál statoru je oceľ.
3. izolácia vinutia – je tvorená izolačnou vrstvou. Materiálom je epoxidová živica, tepelná trieda F. Hrúbka izolácie je 2 mm.

Geometria modelu je na obr. 2. Model bol realizovaný v CAD programe a prenesený pre ďalšiu analýzu do simulačného prostredia ANSYS.



Obr.2. Geometria modelu

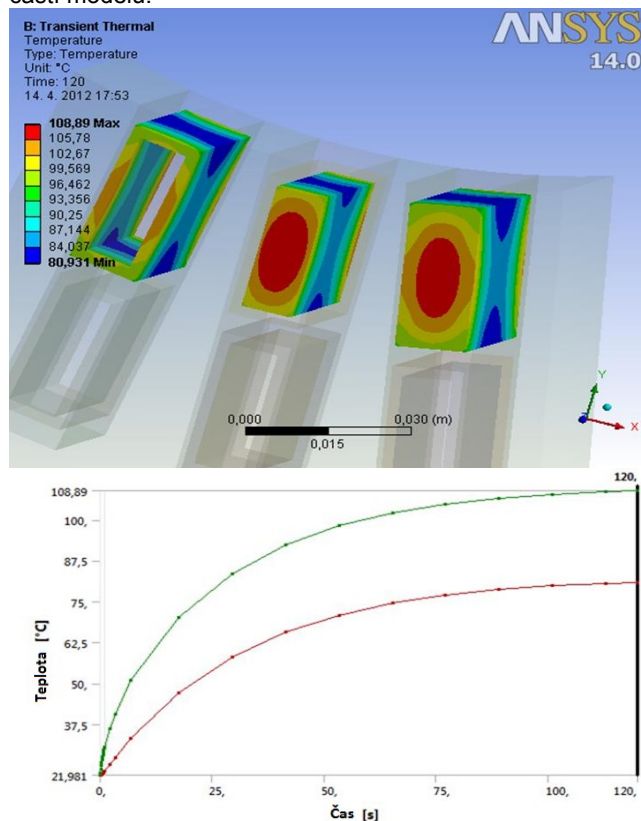
Na vytvorenom modeli bolo vykonaných šesť analýz:

1. Analýza: Teplota okolia: 22°C  
Napájacie napätie: 6 kV  
Menovitý prúd: 380 A  
Bez chladenia  
Prenos tepla vzduchu: 25 W/m<sup>2</sup>\*K  
Prenos tepla izolácie: 150 W/m<sup>2</sup>\*K

2. Analýza: Teplota okolia: 22°C  
Napájacie napätie: 6 kV  
Menovitý prúd: 380 A  
S chladením  
Prenos tepla vzduchu: 200 Wm<sup>-2</sup>K  
Prenos tepla izolácie: 150 Wm<sup>-2</sup>K
3. Analýza: Teplota okolia: 40°C  
Napájacie napätie: 6 kV  
Menovitý prúd: 380 A  
S chladením  
Prenos tepla vzduchu: 200 Wm<sup>-2</sup>K  
Prenos tepla izolácie: 150 Wm<sup>-2</sup>K
4. Analýza: Teplota okolia: 22°C  
Napájacie napätie: 6 kV  
Menovitý prúd: 380 A  
S chladením  
Prenos tepla vzduchu: 200 Wm<sup>-2</sup>K  
Prenos tepla izolácie: 150 Wm<sup>-2</sup>K
5. Analýza: Teplota okolia: 22°C  
Napájacie napätie: 6 kV  
Elektrický prúd: 456 A  
S chladením  
Prenos tepla vzduchu: 200 Wm<sup>-2</sup>K  
Prenos tepla izolácie: 150 Wm<sup>-2</sup>K
6. Analýza: Teplota okolia: 22°C  
Napájacie napätie: premenlivé  
Elektrický prúd: premenlivý  
S chladením  
Prenos tepla vzduchu: 200 Wm<sup>-2</sup>K  
Prenos tepla izolácie: 150 Wm<sup>-2</sup>K

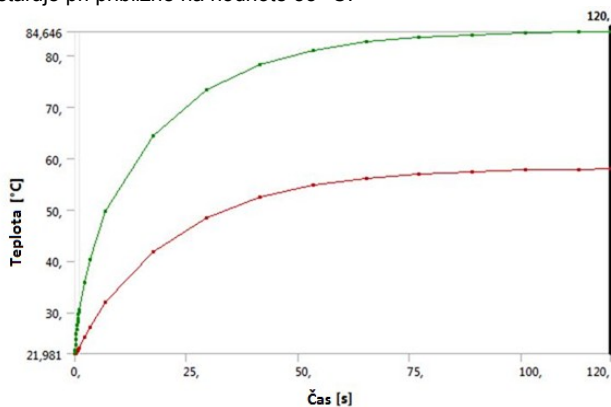
**Výsledky a diskusia**

Zo zoznamu analýz, uvedeného vyššie, v tomto príspevku prezentujeme prvé dve analýzy. Na obr. 3 je znázornený prípad teplotného poľa, kedy teplota okolia bola 22°C, systém je bez umelej cirkulácie vzduchu. Teplota vinutia vzrástla na maximálnu hodnotu 108,89 °C a teplota izolácie na hodnotu v priemere 82,85 °C čo je približne polovica z dovolenej hodnoty teploty pre izoláciu vinutia triedy F. Teplota okolia bola počiatočnou teplotou všetkých častí modelu.



Obr.3. Teplotné pole v motore po 120 sekundách pri prirodzenom chladení

Na obr. 4 je grafický priebeh zvýšenia teploty pri simulácii s núteným chladením. Tak ako aj v predošlom prípade, aj v tomto je trvanie simulácie 120s postačujúce. Teplota vodiča – zelená krivka – dosahuje okolo 85°C a teplota izolácie – červená krivka – sa ustalať pri približne na hodnote 55 °C.



Obr.4. Teplotné pole v motore po 120 sekundách pri nútenom chladení

Použiteľnosť navrhnutého modelu je umocnená jednoduchou modifikáciou jednotlivých parciálnych sústav: geometrie, materiálov a prevádzkových parametrov. Je vhodný pre overenie výpočtov, ale aj pre doplnenie informácií, pochádzajúcich z praktických meraní.

### Záver

Vytváranie modelov a simulácií prevádzkových stavov elektrických strojov točivých je pomocným nástrojom pri návrhu konštrukcie izolačného systému. Analýzy zohľadňujú vlastnosti použitých materiálov ako aj rôzne prevádzkové charakteristiky. V kritických prípadoch sa navrhnutý model môže použiť na analýzu príčin porúch, pokiaľ sa jedná o analýzu vplyvu prevádzkových podmienok na celkové oteplenie systému.

### Podakovanie

Táto práca je podporená projektom VEGA č.1/0311/15.

### Literatúra

- [1] Tepelno-ventilačná problematika elektrických strojov, [online], [prístup:24.4.2012 ], URL:<http://cpd.utc.sk/kvesnew/dokumenty/VSES/Tepelno%20ventilacna%20problematika%20ES.pdf>
- [2] Transformer diagnostics. Facilities instructions, standards and techniques (2003). Testing solid insulation of electrical equipment. Volume 3-1. HYDROELECTRIC RESEARCH AND TECHNICAL SERVICES GROUP., 2003
- [3] O. Shimizu: Temperature Classes of Electrical Insulation, Časopis ThreeBond Technical News vydaný 1. Decembra 1985, č.13. [online], [prístup:24.4.2012 ], URL: <http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech13.pdf>
- [4] M. Prezbuchý: Měření teplot na elektrických strojích, Brno 2009. [online], [prístup:24.4.2012 ], URL: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=17341](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17341)
- [5] V. Chudý, R. Palenčár: Meranie technických veličín, Vydavateľstvo STU, 1. vydanie, 1999
- [6] Tepelná problematika elektrických strojov, [online], [prístup: 24.4.2012 ], URL:<http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/VSES/TepeIná%20problematika%20elektrických%20strojov.pdf>

### Autori:

*Michal Kosterec, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [michal.kosterec@tuke.sk](mailto:michal.kosterec@tuke.sk)*

*Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [juraj.kurimsky@tuke.sk](mailto:juraj.kurimsky@tuke.sk)*