

Bystrík Dolník, Jaroslav Macko

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

Modelovanie elektrického poľa v izolácii vn elektrických točivých strojov

Abstrakt. Článok je zameraný na pevné izolanty používané predovšetkým v statorových cievkach vn točivých strojov a na riešenie elektrických polí pomocou výpočtovej techniky. Autori navrhli model drážkovej izolácie, na ktorom je simulovaný bezporuchový a poruchový stav. Poruchu predstavuje vzduchová dutinka s rozličným priemerom umiestnená na rôznych miestach izolácie.

Abstract. The article is focused on solid insulating materials used primarily in high voltage stator coils of rotating machines. Subsequently, the authors handle about the solution of electric fields by computer technology. The authors proposed model of slot insulation, where operating and fault condition are simulated. The fault is represented by air void with different diameters and different positions across the insulation. (**Modelling of electric field in HV insulation of electric rotating machines**)

Kľúčové slová: elektrický točivý stroj, izolácia, elektrické pole, porucha, výboj.

Keywords: electric rotating machine, insulation, electric field, defect, discharge.

Úvod

Elektrické točivé stroje s vysokým výkonom pracujú s vysokým napätím a často aj v náročných prevádzkových podmienkach. Požiadavky a nároky na kvalitu dodávky elektrickej energie sú stále prísnejšie. Termín kvalita elektrickej energie združuje viacero technických pojmov založených predovšetkým na elementárnom základe, ktorým je kontinuálny a neprerušovaný zdroj napájania. Zabezpečenie bezchybného stavu izolačných systémov elektrických zariadení je jedným z hlavných predpokladov dodržania kvality dodanej elektrickej energie. Prítomnosť nečistôt a vzduchových bublín v izolačnom systéme môže spôsobovať vznik čiastočných výbojov a urýchliť starnutie izolácie. Množstvo porúch generátorov je zapríčinených problémom so statorovým vinutím. Väčšina porúch statora nedá sa jednoducho a rýchlo opraviť, oprava resp. výmena je značne nákladná. Na zlepšenie vlastností drážkovej izolácie možno v prvom kroku použiť metódu analýzy elektrického poľa. V statorovej izolácii sa objavujú dutinky a nečistoty, ktoré pochádzajú buď z výrobného procesu, alebo vzniknú počas procesu starnutia v prevádzke. Z toho dôvodu je zaujímavé zaoberať sa skúmaním elektrického poľa v izolácii umiestnenej v drážke statora, zhotoviť a skúmať modely s rôznou polohou a veľkosťou poruchy v izolácii.

Elektromotory spotrebúvajú značnú časť vyprodukovanej elektrickej energie, približne 60 % v industrializovaných krajinách [1]. Elektrické generátory produkujú takmer všetku globálne vyrobenú elektrickú energiu, pričom základný princíp je takmer 150 rokov starý a zásadne sa nezmenil ani v posledných desaťročiach. Skladajú sa z rotora, statora a rámu, no zdokonalili sa materiály a dizajn. Dnešné generátory s výkonom nad 40 MVA majú účinnosť 97 % až 99 %, údržbu treba robiť každých 30 000 prevádzkových hodín a ich cena je 5 % až 10 % ceny turbíny, podstatne menej ako 5 % ceny elektrárne [2]. Napriek tomu je trend vyrábať generátory lacnejšie, alebo výkonnejšie s tými istými nákladmi.

Veľa generátorov pracuje v ťažších podmienkach na aké boli navrhnuté. Takéto používanie môže spôsobiť ich poškodenie. Spoľahlivosť točivých elektrických strojov s veľkým výkonom silne závisí na stave izolácie statorových cievok. Výskumy ukazujú, že problémy, ktoré boli inicializované v izolácii statorového vinutia, sú jednou z hlavných príčin porúch točivých elektrických strojov [3–5]. Konštatuje sa, že 30 % až 40 % porúch striedavých točivých strojov je spojených so statorom [6], [7] a 60 % až 70 % pre vysoko-napäťové stroje [8].

Izolačné materiály používané v elektrických strojoch

Od prvých pokusov s elektrickou energiou v 17. storočí až po počiatky technického využitia elektriny v devätnástom storočí sa skúšali ako izolanty všetky dostupné materiály. Ponajprv to boli len prírodné látky, prípadne nepatrne upravené prírodné látky [9]. Postupnými experimentmi sa nevhodné materiály vylučovali, a tým sa ich okruh zúžil na minimum. Tieto materiály sa vo svojej funkcii udržali mnohé desaťročia, napr. bavlna, kaučuk a priebežne sa zdokonaľovali drobnými úpravami. Ako ďalší prírodný izolačný materiál sa začala používať slúda a to najmä v kondenzátoroch a zariadeniach vysokého napätia. Samozrejme, okrem pevných izolantov, používajú sa aj izolanty kvapalné a plynné.

Plynné izolačné materiály sa vo všeobecnosti vyznačujú vysokým izolačným odporom, malým činiteľom dielektrických strát a relatívnou permitivitou blízkou hodnote 1. Plynné izolanty podliehajú starnutiu v malej miere. Pri prekročení elektrickej pevnosti nedochádza v nich k prierazu ale k preskoku. Po zániku elektrického poľa a podmienok pre samostatný výboj preto dochádza k obnove izolačných vlastností. Hlavný dôvod používania kvapalných izolantov je ich elektrická pevnosť, schopnosť chladenia, impregnačná schopnosť a schopnosť zhášania výboja. Podobne, ako je tomu v plynných izolantoch, nedochádza v kvapalných izolantoch k trvalému prierazu. Pri prekročení elektrickej pevnosti nastáva preskok. Po zániku podmienok pre samostatný výboj dochádza k opätovnej obnove izolačnej schopnosti materiálu s tým rozdielom, že izolačné vlastnosti sa postupne zhoršujú.

Medzi pevné izolanty patrí slúda. Termínom slúda označuje sa široká skupina materiálov patriacich medzi hliníto-kremičitany (alumosilikáty) s vrstevnatou kryštálovou štruktúrou. Tvoria asi 5 % zemskej kôry. Obsahuje prevažne kremík a kyslík, ktoré patria medzi prvky s najväčším výskytom v zemskej kôre. Slúdy bývajú priesvitné, priehľadné až nepriehľadné, na štiepných plochách perleťovo lesklé. V súčasnosti mineralógovia rozlišujú asi 40 druhov slúdy. Medzi najvýznamnejšie patrí muskovit. Často sa pod pojmom slúda myslí práve muskovit (svetlá slúda). Najkvalitnejšia slúda pochádza z nálezísk v Indii [10]. Ďalším významným druhom je flogopit, tzv. „tmavá slúda“. Mechanicky jemne rozdrvená slúda (aj zo sludového odpadu) sa pridaním spojiva spracováva na súvislú sludovú fóliu – remika.

Izolácia založená na slúde sa používa vo vn točivých strojoch už asi 50 rokov. Počas tejto doby sa dosiahol veľký pokrok. Izoláciu tvorí sludový papier (65 % hmotnosti),

živica (25 %) a sklenené vlákna alebo ešte iné pomocné materiály (10 %) [11]. Všetky tieto použité materiály majú vynikajúce elektroizolačné vlastnosti, ale relatívne nízku tepelnú vodivosť.

Konštrukcia statorového vinutia

Statorové vinutie môže byť urobené buď v jednej vrstve, alebo v dvoch vrstvách. V prípade jednovrstvového vinutia je v každej drážke jedna cievková strana. Každá cievka má dve strany, preto počet všetkých cievok po obvode stroja sa rovná polovici počtu drážok.

Takmer všetky veľké synchronne stroje a stredne veľké a veľké indukčné motory majú dvojvrstvové statorové vinutie. Teda v každej drážke statorového vinutia sú dve oddelené strany, dvoch cievok. Preto počet cievok na obvode sa rovná počtu drážok. Každá cievka má jednu stranu uloženú v spodnej časti drážky a druhú v hornej časti drážky (bližšie k vzduchovej medzere).

Za viac ako 150 rokov existencie točivých elektrických strojov urobilo sa mnoho zlepšení materiálov, komponentov a dizajnu. Vývoj chladiacich zmesí a dizajnu chladenia, zavedenie nepriameho chladenia vodíkom a priameho chladenia vodou spôsobili ďalšie zásadné zvýšenie výstupného výkonu generátorov. Spočiatku sa používali prírodné izolačné materiály ako hodváb, vlna, celulóza spolu s prírodnými lakmi a ropnými derivátmi. Používanie štiepanej sludy a sludového papiera pomohlo k zvýšeniu prevádzkovej napätia a odolnosti.

Izolačný systém sa dnes považuje za kľúčový pri optimalizácii a zefektívňovaní vysokonapäťových točivých strojov. Účinnosť a výkon točivého stroja je do značnej miery ovplyvnená jeho vlastnosťami. Teplo produkované elektrickými stratami vo vinutiach musí prechádzať stenami hlavnej izolácie vinutia. Nepriamo chladené turbogenerátory sú čoraz viac využívané, pretože nemusia mať pomocné zariadenia ako priamo chladené stroje. Zároveň sú konštrukčne jednoduchšie a ich použitím možno zväčšiť prevádzkovú spoľahlivosť. Avšak tepelná vodivosť sludy obmedzuje účinnosť chladenia a tým aj výkon generátora.

Rozsah tepelnej vodivosti sludy sa pohybuje medzi $(0,25-0,3) \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pričom ocel alebo meď má 300 až 1 500 násobne väčšiu tepelnú vodivosť.

Riešenie elektrických polí pomocou počítača

Donedávna sa množstvo úloh riešilo výhradne analyticky s presnosťou, ktorá sa niekedy nedala ani odhadnúť, alebo len na základe empirických skúseností. V dnešnej dobe dochádza k veľkému rozvoju výpočtovej techniky a s tým aj numerických metód. Za posledných 40 rokov ich bolo vyvinutých asi 10 až 15. Tieto prostriedky uľahčujú prácu, ich používanie je pomerne jednoduché.

Na úspešné využívanie počítačového softvéru, ktorý používa numerickú metódu, treba mať znalosti z fyziky, aby nedošlo k chybným interpretáciám vypočítaných výsledkov. Používateľ softvéru by mal byť schopný vopred odhadnúť akceptovateľný výsledok.

Dobre známe sú analytické metódy riešenia polí ako napr. Metóda zrkadlení, Konformné transformácie, Metóda separácie premenných a pod. Z numerických metód sú to najmä Metóda vážených zvyškov, ktorá je považovaná za základ dnes najrozšírenejšej Metódy konečných prvkov, ďalej sú to: Metóda konečných diferencií a Metóda hraničných prvkov [12].

Elektrostatické pole možno opísať pomocou dvoch veličín. Intenzity elektrického poľa, E ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) a elektrickej indukcie, D ($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$), pričom musia byť splnené dve podmienky. Prvou podmienkou je diferenciálny tvar (2) tretej Maxwellovej rovnice, resp. Gaussovho zákona (1), ktorý hovorí, že elektrický indukčný tok ľubovoľnou von orientovanou plochou S je rovný celkovému voľnému náboju v priestorovej oblasti V ohraničenej plochou S .

$$\oint_S D \cdot dS = Q, \quad Q = \int_V \rho \cdot dV, \quad (1)$$

kde: D – elektrická indukcia, S – plocha, V – objem, Q – celkový voľný náboj, ρ – hustota náboja.

$$\nabla \cdot D = \rho. \quad (2)$$

Divergencia vektora elektrickej indukcie D je rovná hustote náboja ρ resp. siločiarly elektrickej indukcie začínajú alebo končia tam, kde je prítomný elektrický náboj. Druhou podmienkou je, aby rotácia vektora intenzity elektrického poľa bola rovná nule

$$\nabla \times E = 0. \quad (3)$$

Elektrická indukcia a intenzita elektrického poľa sú viazané dôležitým vzťahom

$$D = \epsilon E. \quad (4)$$

Uvažuje sa s lineárnou závislosťou medzi D a E . Pre zjednodušenie výpočtu oblastí, ktoré spĺňajú tieto podmienky, program používa elektrický potenciál φ definovaný vzťahom k E ako

$$E = -\nabla \varphi. \quad (5)$$

Dosadením do (4), ktorý je dosadený do (2) dostávame parciálnu diferenciálnu rovnicu druhého stupňa

$$-\epsilon \nabla^2 \varphi = \rho. \quad (6)$$

Použitý softvér rieši túto rovnicu, ktorá sa vzťahuje na regióny s homogénnou permitivitou ϵ [13]. Analytické riešenie polí je výhodné pri jednoduchom usporiadaní elektród, ale nepoužiteľné pri riešení reálnych úloh so zložitou geometriou, s nelineritami materiálov, s potrebou riešenia aj v priestore (3D), alebo pridaním ešte ďalšieho rozmeru – času, do úlohy.

Dnes sú možnosti využitia numerických metód pre riešenie polí ďaleko za možnosťami analytických metód. Numerické metódy transformujú systém parciálnych alebo obyčajných diferenciálnych rovníc, popisujúci danú úlohu, na algebraický systém rovníc, ktorý môže počítač ľahko a efektívne počítať.

Návrh modelu statorového vinutia

Na modelovanie elektrického poľa drážkovej časti statorovej cievky motora bol zostavený dvojrozmerný model statorovej drážky na základe reálnej predlohy statorovej cievky v priečnom reze (obr. 1).

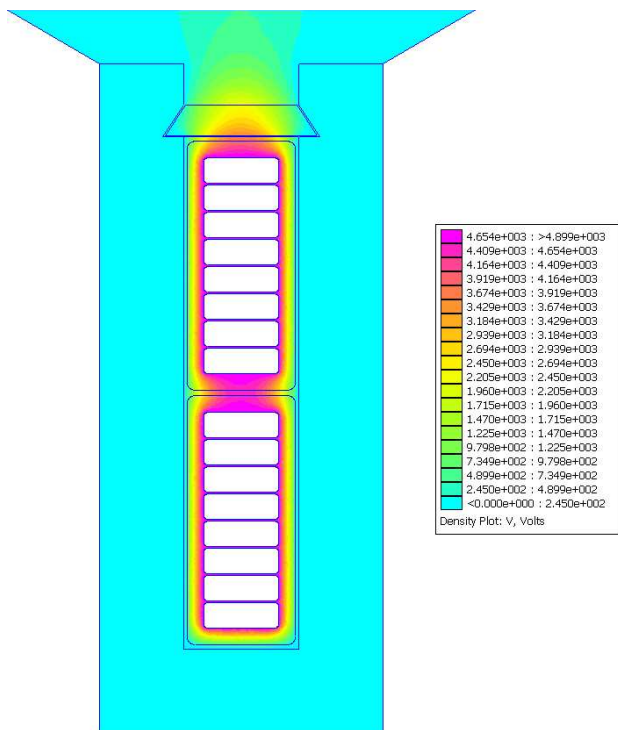
Poruchové miesto v izolácii pri modelovaní tvorila vzduchová bublina s priemerom: 10 μm , 50 μm a 100 μm . Pre každý priemer bolo zhotovených 5 modelov, každý s inou vzdialenosťou bubliny od okraja izolácie (miesto poruchy) statorovej cievky. V simulácii bolo nastavené na všetkých závitoch oboch cievok v drážke rovnaké napätie 4 899 V, čo je špičková hodnota, ktorú dosahuje fázové napätie motora na menovité napätie 6 kV. Keďže ide o simuláciu elektrostatického problému, simuluje sa tak len okamih, v ktorom napätie dosahuje maximálnu hodnotu.

V simuláciách bezporuchového stavu neobsahuje izolácia vnútri cievok žiadne poruchy, jedná sa o ideálny stav. Na obrázku obr. 2 je zobrazené rozloženie elektrického potenciálu v bezporuchovom stave.

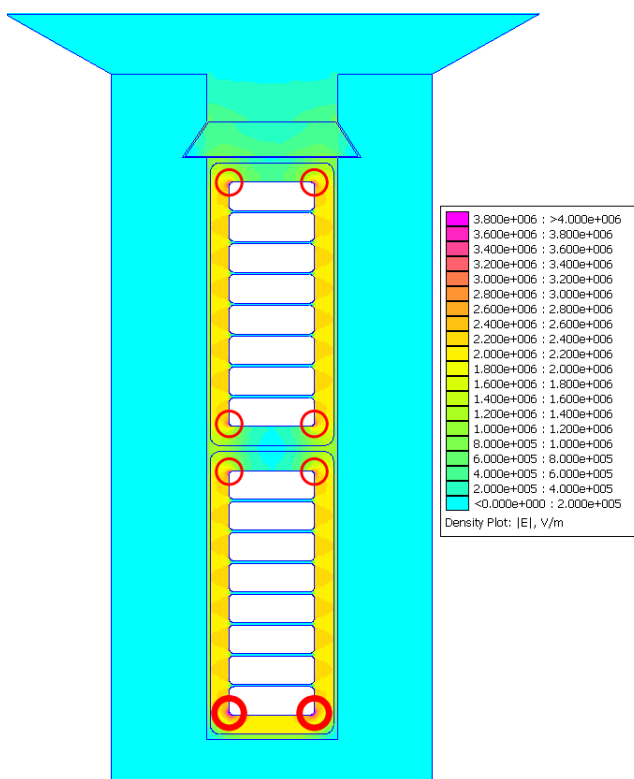
Na obrázku obr. 3 je zasa zobrazené rozloženie elektrického poľa. Oblasti označené červenou farbou reprezentujú miesta s najväčšou intenzitou elektrického poľa.



Obr. 1. Reálna drážková časť satorovej cievky v reze

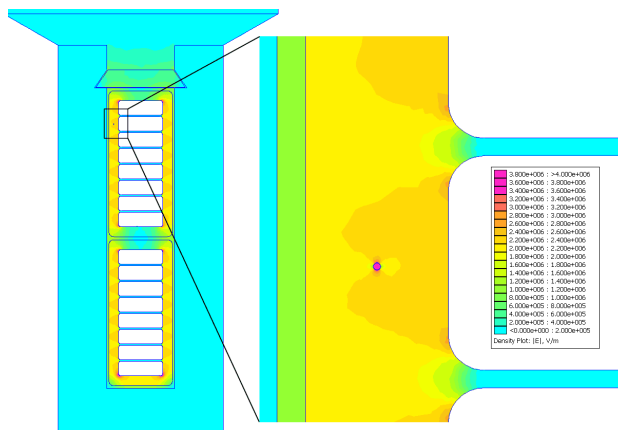


Obr. 2. Rozloženie potenciálu v izolácii bez poruchy



Obr. 3. Rozloženie intenzity elektrického poľa v izolácii bez poruchy

Ako už bolo spomenuté vyššie, modelovali sa aj stavy s poruchou. Zistilo sa, že na výsledných priebehoch potenciálu neboli pozorované extrémne zmeny v okolí dutinky. Avšak vyhodnotením intenzity elektrického poľa z grafov (napr. obr. 4), t.j. odčítaním hodnôt v programe FEMM, zistilo sa, že poloha dutinky a ani jej priemer nemá vplyv na intenzitu elektrického poľa v jej strede a vo všetkých simulovaných prípadoch má intenzita priemernú hodnotu 37,2 kV/cm. Z pohľadu výbojovej činnosti to znamená, že hodnota je väčšia ako 24,36 kV/cm, pri ktorej už môže nastať čiastkový výboj [14]. Spätnými prepočítaniami bolo poukázané na tú skutočnosť, že spomínaná kritická intenzita elektrického poľa dosiahne sa pri napätí 3 150 V.



Obr. 4. Rozloženie elektrického poľa v modeli s poruchou v izolácii

S prihliadnutím na výsledné rozloženie elektrického poľa v bezporuchovom stave boli realizované simulácie poruchy v miestach so zvýšenou intenzitou elektrického poľa. Vzduchová dutinka s priemerom 100 μm bola umiestnená blízko hrán vodičov satorového vinutia (na obr. 3 pozri oblasti označené červenou farbou). Pre tento modelový prípad bola priemerná intenzita elektrického poľa približne 1,7-krát väčšia voči predošlým modelom.

V simulovaných modeloch boli použité aj iné tvary porúch. Okrem poruchy, ktorá bola modelovaná pomocou dutinky s guľovým tvarom, použili sa ešte modely poruchy v tvare štvorcíčka s rozličným polomerom zakrivenia hrán. Tento typ porúch dominuje tuhých viacžložkových izoláciách, ktoré obsahujú napr. sludu.

Záver

Výsledky simulácií potvrdzujú, že defekty v izolácii satorových vn cievok spôsobujú výrazné zmeny v rozložení elektrického poľa a môžu viesť k vzniku čiastočných výbojov. Skúmanie vplyvu veľkosti vzduchovej dutinky a jej polohy v izolácii vn cievky ukazuje, že intenzita elektrického poľa v dutinke sa výrazne nemení. V prípade pozorovania intenzity elektrického poľa na rozhraní tuhý izolant a plyný izolant (dutinka so vzduchom) bola zistená prudká zmena priebehu intenzity elektrického poľa,

intenzita elektrického poľa v dutinke dosahovala pri maximálnom napätí hodnotu, pri ktorej je vysoká pravdepodobnosť, že nastane čiastočný výboj skôr ako napätie dosiahne maximum. Potvrdil sa aj predpoklad, že miesta s najväčšou intenzitou elektrického poľa sa nachádzajú okolo vonkajších rohov okrajových vodičov vinutia vn cievky. Keď je porucha v izolácii v týchto miestach, intenzita elektrického poľa dosahuje výrazne vyššie hodnoty. Značný vplyv má tvar dutinky (poruchy), predovšetkým ostrosť resp. polomer zakrivenia jej hrán.

Pri návrhu a výrobe je potrebné venovať pozornosť miestam s vysokou intenzitou elektrického poľa, aby sa čo najlepšie zamedzilo vzniku poruchových miest.

Literatúra

- [1] Hanitsch, R.: Energy efficient electric motors. In: *Proceedings of RIO 02 – World Climate & Energy Event*, January 6–11 2002 [online]. [cit. 2011-09-27], s. 45–50. Dostupné na: <http://www.rio02.com/proceedings/pdf/045_Hanitsch.pdf>.
- [2] Ladstätter, W., Marek, Dr. P., Grubelnik, W., Senn, F.: NEW INSULATION TECHNOLOGY IMPACTS GENERATOR DESIGN. In: *Power-Gen Conference 2006*, Orlando, USA [online]. [cit. 2011-09-27], s. 1–21. Dostupné na internete: <<http://www.isovolta.com/images/GetDownload.aspx?miid=c18eb5e9-5360-4adc-8c45-5a8869436573>>.
- [3] Emery, F. Tim, Pavlik, D.: Electrostatic field analysis of high voltage generator stator insulation systems. In: *2000 conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, IEEE, [online]. [cit. 2011-09-27], roč. 2, s. 510–513. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=884010>>. ISBN 0-7803-6413-9
- [4] Arshad, M., Khaliq, A., Islam, S. M.: Turbo generator stator winding condition assessment. In: *2004 International conference on power system technology*, POWERCON 2004, Singapore, 21–24 November 2004, [online]. [cit. 2011-09-27], roč. 2, s. 1399–1403. Dostupné na: <<http://ieeexplore.ieee.org/assets/img/btn.pdf-access-full-text.gif>>. ISBN 0-7803-8610-8
- [5] Lee, S. B., Yang, J., Younsi, K., Bharadwaj, R. M.: An On-Line groundwall and phase to phase insulation quality assessment technique for AC machine stator winding. In: *IEEE Transactions on Industry Application*, [online]. [cit. 2011-09-27], roč. 42 č. 4, júl/august 2006, s. 946–957. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/28/34719/01658323.pdf?tp=&arnumber=1658323&isnumber=34719>>.
- [6] O'Donnell, P.: Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part I. In: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1985 [online]. [cit. 2011-09-27], roč. IA-21, č. 4, s. 853–864. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/assets/img/btn.pdf-access-full-text.gif>>. ISBN 0093-9994
- [7] O'Donnell, P.: Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part II. In: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1985 [online]. [cit. 2011-09-27], roč. IA-21, č. 4, s. 865–872. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/assets/img/btn.pdf-access-full-text.gif>>. ISBN 0093-9994
- [8] Albrecht, P. F., Appiarius, J. C., Sharma D. K.: Assessment of reliability of motors in utility applications – Updated. In: *IEEE Trans. Energy Convers.*, 1986. roč. 1, č. 1, s. 39–46.
- [9] Artbauer, J., Šedovič, J., Adamec, V.: *Izolanty a izolácie*, 1969.
- [10] Weiss Z., Rieder M.: Krystalochemie slíd a deformace jejich krystalových struktur. In: *Bulletin mineralogicko-petrologického oddělení Národního muzea v Praze* 3, 195–205, 1995.
- [11] Allison, J., Brütsch, R.: Selection and Application of Insulating Materials: Their Importance in VPI Insulation for Rotating Machines, Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Conference, Berlin, s. 137–144, 1998.
- [12] Maga, D., Hartánský, R.: Numerické riešenia, Univerzita obrany, Brno, 2005 [online]. [cit. 2011-09-28]. Dostupné na internete: <http://www.maiki.ic.cz/2sem4roc/numries/num_ries_BRNO.pdf>.
- [13] Meeker, D.: Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual, 2010 [online]. [cit. 2011-09-28]. Dostupné na internete: <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>>.
- [14] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J.: High Voltage Engineering: Fundamentals. 2. vyd., 2000. 539 s. ISBN 0-7506-3634-3.

Autori vyjadrujú poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0368/09.

Autori: Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: bystrik.dolnik@tuke.sk

Jaroslav Macko, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.macko@student.tuke.sk