

Milan Kvakovský, Marián Hrinko, Irida Kolcunová, Juraj Kurimský

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

## Skúmanie výbojovej aktivity pri rôznych spôsoboch uzemnenia drážkovej časti izolácie vn cievky

**Abstrakt.** Napriek zvyšovaniu kvality izolačných materiálov, je značná časť porúch elektrických strojov spojená práve so zlyhaním izolácie. Predchádzať poruchám môžeme napríklad dôsledným dodržiavaním prevádzkových parametrov a skvalitnením údržby. Avšak jeden z javov, ktorý má dominantný vplyv na kvalitu izolácie, môžeme ovplyvniť len minimálne. Je to starnutie izolácie, ktoré súvisí s degračnými faktormi vplyvajúcimi na samotnú štruktúru izolantu. Tým sa menia jeho vlastnosti, ktorých stabilita v určitých toleranciách je pre prevádzku elektrického stroja nevyhnutná.

**Abstract.** Despite improving the quality of insulation, a sizeable proportion of failures of electrical machines coupled with the right insulation failure. To prevent such failures can be consistent adherence to operating parameters and improved maintenance. However, one of the phenomena, which have a dominant influence on the quality of insulation, can only affect the least. It is the aging of insulation, which is linked to degradation factors affecting the very structure of the insulator. By changing its properties, the stability of certain tolerances for the operation of electric machine is necessary.

**Kľúčové slová:** izolácia, čiastkové výboje, drážka, elektrický stroj.  
**Keywords:** insulation, partial discharges, slot, electrical machine.

### Úvod

Z hľadiska diagnostiky je najsledovanejším elementom vysokonapäťového točivého stroja izolácia statorového vinutia, ktorá je počas prevádzky vystavená kombinácii rôznych namáhaní. Jedná sa hlavne o namáhanie elektrické a tepelné, ale v nemalej miere na izoláciu pôsobí aj namáhanie mechanické, ktoré je zapríčinené vibráciami stroja. Všetky typy namáhaní nepriaznivo vplyvajú na izolačný systém statorového vinutia [1].

Vo vysokonapäťovej izolácii elektrických strojov točivých môžu existovať malé dutinky vyplnené plynom. Pri výrobe izolačného systému nie je vždy možné zabrániť vzniku nehomogenít (dutínok) v dielektriku. Tieto dutinky môžu vzniknúť napríklad pri výrobe, pri degradácii izolácie alebo ako výsledok veľkého lokálneho elektrického namáhania. Ak zvýšime napätie priložené na meraný objekt, objavia sa pri určitom napätí v týchto dutinkách výboje, ktoré majú charakter lavínových alebo malých iskrových výbojov. V miestach so zníženou elektrickou pevnosťou vplyvom vysokej intenzity elektrického poľa v izolácii vznikajú čiastkové výboje [2]. Čiastkové výboje sú výsledkom koncentrácie lokálneho elektrického namáhania v izolácii alebo na povrchu izolácie a vytvárajú prúdové (napäťové) impulzy s dobou trvania menej ako 1 $\mu$ s. Tieto výboje predstavujú prerez v plynom vyplnených dutinkách. Inými slovami, čiastkové výboje premostujú vzdialenosť medzi dvomi elektródami len čiastočne a zbytok izolácie je schopný vydržať celé prevádzkové napätie [3].

Čiastkové výboje sa v izolačnom systéme statorovej izolácie vyskytujú najčastejšie v týchto miestach:

- v dutinkách medzi medenou časťou cievky a hlavnou izoláciou, prípadne v mikrotrhlínach hlavnej izolácie, ktoré môžu byť spôsobené delamináciou izolačného systému, tzv. vnútorné výboje,
- medzi ochrannou vodivou vrstvou (ktorá pokrýva povrch cievky uložený v drážke) a stenou drážky, tzv. povrchové výboje,
- pri výstupe cievky z drážky pri nedostatočnom riadení elektrického poľa polovodivými páskami, tzv. povrchové výboje pri výstupe cievky z drážky,

- na časti povrchu cievky, ktorá je uložená v drážke, keď elektrické pole pozdĺž povrchu presiahne kritickú hodnotu, tzv. povrchové výboje v drážke [4].

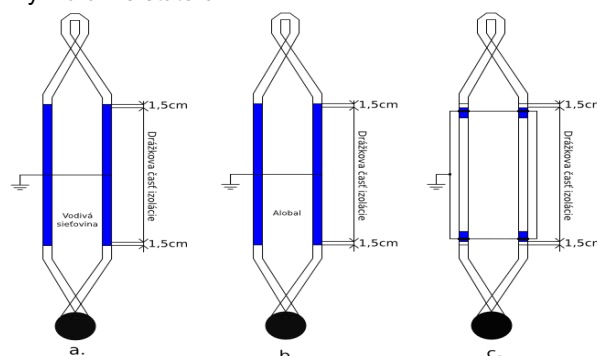
### Skúšobné vzorky a metódy merania

Na meranie výbojovej aktivity bola použitá vysokonapäťová cievka (z asynchrónneho motora s menovitým výkonom 2,1MW a menovitým fázovým napätím 3,6kV) bez polovodivej ochrany na výstupe cievky z drážky statora. Konce cievky boli spojené homogenizačnou elektródou, na ktorú sa privádzalo vysoké napätie.

Boli vykonané tri merania, každé s iným typom uzemnenia drážkovej časti izolácie:

- Celá drážková časť izolácie vn cievky bola ovinutá vodivou sieťovinou (obr.1.a.),
- Celá drážková časť izolácie vn cievky bola ovinutá alobalom (obr.1.b.),
- Drážková časť izolácie bola ovinutá v štyroch špecifických miestach alobalom o šírke 5cm, pričom jednotlivé miesta boli galvanicky spojené vodivou sieťovinou a vyvedené na potenciál zeme (obr.1.c).

Vo všetkých prípadoch sa vynechalo 1,5cm po oboch okrajoch vodivej vrstvy drážkovej časti izolácie z dôvodu čo najpresnejšieho priblíženia skutočnému stavu uloženia cievky v drážke statora.



Obr. 1 Meranie čiastkových výbojov pri rôznych spôsoboch uzemnenia, a.) uzemnenie prostredníctvom vodivej sieťoviny, b.)

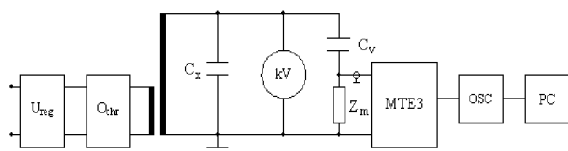
uzemnenie prostredníctvom alobalu, c.) uzemnenie prostredníctvom štyroch bodov.

Meraný objekt bol zavesený na izolačnom lane vo Faradayovej kletke. Príklad umiestnenia cievky pri meraní obr. 2



Obr. 2 Umiestnenie skúšanej cievky pri meraní častkových výbojov

Regulovateľným zdrojom napätia sa plynulo zvyšovalo napätie privádzané na homogenizačnú vn elektródu až po napätie, kedy boli zaznamenané prvé výboje - napätie počiatkových výbojov. Pri počiatkovom napätí sa spustil program na vyhodnocovanie výbojovej činnosti. Ďalšie merania boli realizované pri zvyšovaní napätia krokom 200V do napätíovej hladiny 6kV (nominálna hodnota združeného napätia vysokonapäťovej cievky). Bloková schéma použitého zapojenia je na Obr.3.



Obr. 3 Schéma zapojenia

$U_{reg}$  – regulovateľný zdroj napätia,  
 $C_v$  – väzobný kondenzátor,  
 $Z_m$  – meracia impedancia,  
 $C_x$  – meraný objekt.

Na meranie častkových výbojov bola použitá priama galvanická metóda. Meracia impedancia bola pripojená paralelne k meranému objektu. Výhoda tohto zapojenia spočíva v tom, že pri preraze na meranom objekte nedôjde k poškodeniu meracích prístrojov.

**Namerané hodnoty a ich diskusia**

Na porovnanie nameraných výsledkov zo všetkých vykonaných meraní, t.j. od napätia počiatkových výbojov po nominálne združené napätie cievky, pre všetky tri typy uzemnenia, sme si určili tri napätíové hladiny, pre ktoré sme vykonali vyhodnotenie (tab. 1, tab. 2, tab. 3):

- napätie počiatkových výbojov,
- nominálne fázové napätie 3,6kV,
- nominálne združené napätie 6kV.

**Uzemnenie drážkovej časti vodivou sieťovinou**

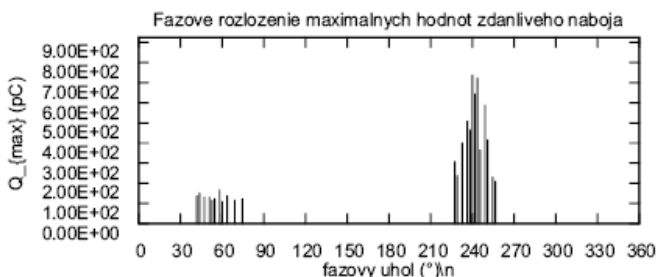
Na obr. 4 až 6 sú uvedené fázové rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pre napätíové hladiny 3,4kV; 3,6kV a 6kV. Napätie počiatkových výbojov pri cievke uzemnenej polovodivou sieťovinou bolo 3,4kV. Maximálna hodnota zdanlivého náboja pri tomto napätí dosiahla hodnotu 800pC (obr. 4) s početnosťou 0,02. Jedná sa o počiatkové častkové výboje, ktoré vznikajú v priestore medzi sieťovinou a izoláciou drážkovej časti cievky.

Pri napätí 3,6kV výbojová činnosť vzrástla na hodnotu 1800pC (obr. 5) s početnosťou 0,12. Jedná sa o povrchové výboje, vznikajúce na výstupe cievky z drážky statora, kde je najväčšia intenzita elektrického poľa.

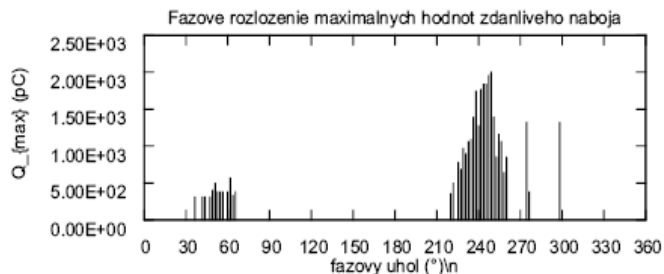
Maximálna hodnota zdanlivého náboja pri napätí 6kV dosiahla hodnotu  $q_{max}=20000pC$  (obr. 6) s početnosťou 1,5. Jedná sa výhradne o povrchové výboje.

Tabuľka. 1 Cievka uzemnená vodivou sieťovinou bez polovodivej ochrany

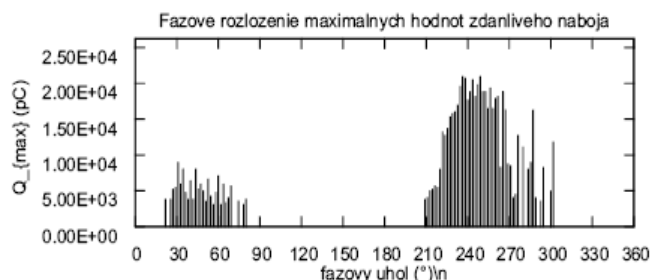
U [kV]	$q_{max}$	Nstr [-]	$\phi+$ [°]	$\phi-$ [°]
3,4	800	0,02	40-70	230-260
3,6	2000	0,12	30-70	220-300
6	20000	1,5	20-80	210-310



Obr. 4. Cievka uzemnená pomocou vodivej sieťoviny pri 3,4kV



Obr. 5. Cievka uzemnená pomocou vodivej sieťoviny pri 3,6kV



Obr. 6. Cievka uzemnená pomocou vodivej sieťoviny pri 6kV

**Uzemnenie drážkovej časti alobalom**

Na obr. 7 až 9 sú uvedené fázové rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pre napätíové hladiny 3kV; 3,6kV a 6kV. Počiatkové výboje pri cievke uzemnenej alobalom boli zachytené už pri napätí 3kV s rovnakou početnosťou ako v predchádzajúcom prípade 0,02. Maximálna hodnota zdanlivého náboja bola 150pC

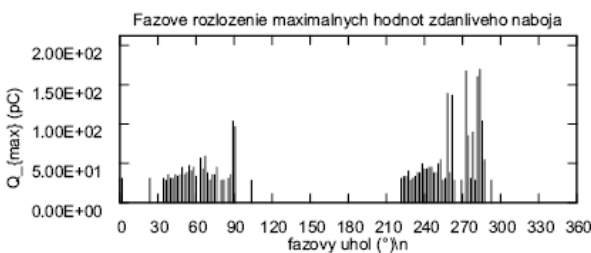
(obr. 7). Výbojová činnosť pri tejto napäťovej hladine bola nestabilná a postupom času výboje klesli. Pravdepodobne ide o výboje v plynom vyplnených vrstvách medzi alobalom a izoláciou drážkovej časti cievky.

Pri napätí 3,6kV maximálna hodnota zdanlivého náboja bola 1200pC (obr. 8) s početnosťou 0,2. V porovnaní s predchádzajúcim prípadom hodnota zdanlivého náboja je nižšia, pričom početnosť vzrástla. Výbojová činnosť pri tejto napäťovej hladine je reprezentovaná povrchovými výbojmi.

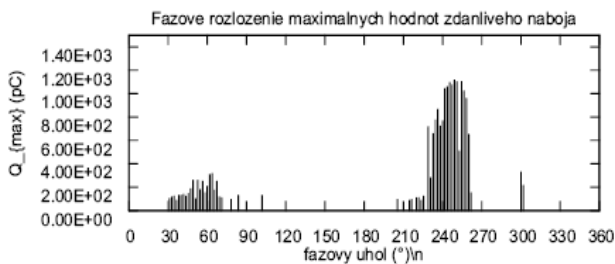
Pri napätí 6kV výbojová činnosť vzrástla na hodnotu  $q_{max}=20000pC$  (obr. 9). Aj v tomto prípade sa jedná výhradne o povrchové výboje.

Tabuľka 2. Cievka uzemnená alobalom bez polovodivej ochrany

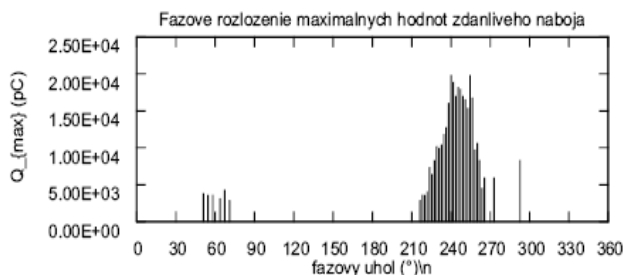
U [kV]	$q_{max}$	Nstr [-]	$\phi+$ [°]	$\phi-$ [°]
3	150	0,02	30-90	220-280
3,6	1200	0,2	30-90	210-300
6	20000	1,6	40-80	210-300



Obr. 7. Cievka uzemnená alobalom pri 3kV



Obr. 8. Cievka uzemnená alobalom pri 3,6kV



Obr. 9. Cievka uzemnená alobalom pri 6kV

**Uzemnenie drážkovej časti prostredníctvom štyroch bodov**

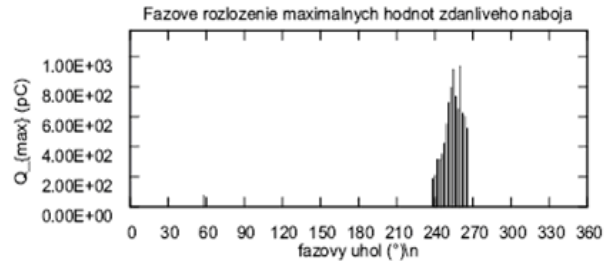
Na obr. 10 a 11 sú uvedené fázové rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pre napäťové hladiny 3,6kV a 6kV. Cievka uzemnená prostredníctvom štyroch bodov vykazovala výbojovú činnosť  $q_{max}=1000pC$  (obr. 10) pri napätí počiatočných výbojov 3,6kV, čo je zároveň aj nominálne fázové napätie meranej cievky. Početnosť výbojov vzrástla na hodnotu 0,08. Pravdepodobne sa jedná o povrchové výboje na konci vodivej vrstvy.

Maximálna hodnota zdanlivého náboja pri 6kV bola  $q_{max}=19000pC$  (obr. 11) s početnosťou 0,8. Jedná sa

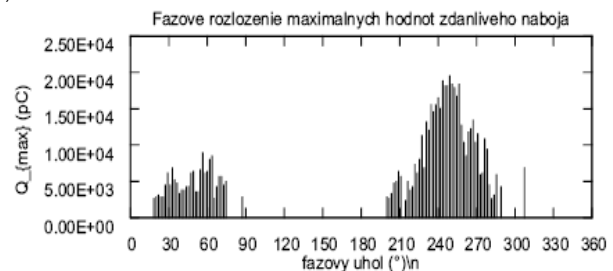
o povrchové výboje, keďže pri tomto napätí bola značne počuteľná koróna.

Tabuľka 3 Cievka uzemnená prostredníctvom 4 bodov

U [kV]	$q_{max}$	Nstr [-]	$\phi+$ [°]	$\phi-$ [°]
3,6	1000	0,08	-	240-270
6	19000	0,8	20-80	220-300



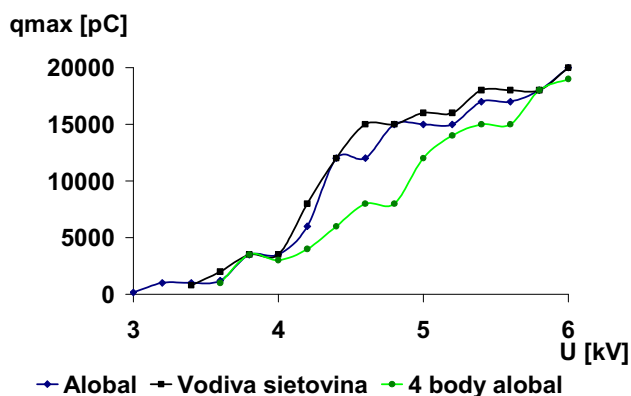
Obr. 10. Cievka uzemnená prostredníctvom štyroch bodov pri 3,6kV



Obr. 11. Cievka uzemnená prostredníctvom štyroch bodov pri 6kV

**Záver**

Na obr. 12 je graficky znázornená závislosť maximálnej hodnoty zdanlivého náboja od napätia. Na základe nameraných výsledkov (obr. 12) pre napäťovú hladinu 6kV, je možné skonštatovať, že maximálna hodnota zdanlivého náboja pri uzemnení prostredníctvom vodivej sieťoviny a pomocou alobalu dosiahla hodnotu 20000pC. Pri uzemnení pomocou štyroch bodov maximálna hodnota zdanlivého náboja dosiahla 19000pC, pri tomto meraní bol trend nárastu výbojovej činnosti nižší ako pri ostatných dvoch typoch uzemneniach (obr. 12). Počiatočné napätie pri uzemnení pomocou sieťoviny bolo 3,4kV, v prípade uzemnenia prostredníctvom alobalu bolo počiatočné napätie 3kV a v prípade štyroch bodov 3,6kV. Výhodou merania prostredníctvom štyroch bodov sú vyššie hodnoty počiatočného napätia, čo neovplyvní prípadnú vnútornú výbojovú činnosť na skúmanej cievke a nižšia hodnota maximálneho zdanlivého náboja. Pri meraní prostredníctvom štyroch bodov nie sú prítomné výboje, ktoré vznikajú medzi alobalom resp. sieťovinou a drážkovou izoláciou cievky. V neposlednom rade sa skrúti čas prípravy na meranie.



Obr. 12 Závislosť maximálnej hodnoty zdanlivého náboja od napätia

Prihliadnutím k týmto skutočnostiam, je možné vzniknúť záver, že metóda na modelovanie uloženia cievky v drážke statora prostredníctvom štyroch bodov je vhodná na meranie čiastkových výbojov.

#### Literatúra

- [1] Kolcunová, I.: Diagnostika elektroenergetických zariadení metódou čiastkových výbojov, Košice, 2008, ISBN 978-80-553-0031-3.
- [2] Kurimský, J., Kolcunová, I., Cimbala, R.: Partial discharge analysis for insulation systems of electric rotating machines with various voltage stress. In: Acta Electrotechnica et Informatica. roč. 8, č. 4 (2008), s. 64-67.
- [3] Cimbala, R.: Absorpčný prúd a jeho vzťah k iným diagnostickým metódam, Diagnostika 93, Plzeň 1993.
- [4] Petráš J., Džmura J., Balogh, J.: Metódy snímania čiastkových výbojov v izolačných systémoch vysokonapäťových zariadení, 2010. In: Electric Power Engineering 2010 : proceedings of the 11th international scientific conference : 4.- 6.5.2010, Hotel Santon, Brno, Czech Republic. - Brno : University of Technology, 2010. - ISBN 978-80-214-4094-4. - P. 707-710.

Táto práca vznikla za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0368/09.

**Autori:** Milan Kvakovský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: milan.kvakovsky@tuke.sk.

Marián Hrisko, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: marian.hrisko@tuke.sk.

Iraida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@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.