

Iraida Kolcunová, Milan Kvakovský, Marián Hrinko, Juraj Kurimský

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

Porovnanie výbojovej činnosti na cievkach s polovodivou a bez polovodivej ochrany

Comparison of discharge activity on the stator windings with and without semi-conductive layer

Abstrakt. Izolačný systém musí spĺňať nie len náročné kritéria výborných elektroizolačných vlastností, ale musí aj odolávať vonkajším vplyvom, ako je teplota, pôsobenie chemických látok, plyných exhalátov, slnečnému žiareniu a mechanickému namáhaniu. Aby bolo splnené základné kritérium spoľahlivosti je potrebné intenzívne sa venovať jednotlivým degradačným mechanizmom, ktoré prichádzajú u elektroizolačného materiálu do úvahy. Tento článok rieši rozdiel vo výbojovej činnosti na cievkach s polovodivou a bez polovodivej ochrany.

Abstract. Insulation system must satisfy not only exacting criteria of excellent electrical insulating properties, but must also resist external influences such as temperature, chemical exposure, gaseous air pollutants, sunlight and mechanical stress. In order to keep the basic criterion of reliability is very necessary to give individual degradation mechanisms, which come with an electrical insulating material into account. This article addresses the difference in discharge activity in coils with semi-conductive protection and without semi-conductive protection.

Kľúčové slová: izolácia, čiastkové výboje, polovodivá ochrana, elektrický stroj.

Keywords: insulation, partial discharges, semi-conductive protection, electrical machine.

Úvod

Z hľadiska spoľahlivosti prevádzky elektrických strojov točivých je dôležitým miestom izolačný systém statora, t. j. vysokonapäťová izolácia statorových cievok alebo tyčí, a to obzvlášť v prípade strojov veľkých výkonov. Vo vysokonapäťovej izolácii elektrických strojov točivých môžu existovať malé dutinky vyplnené plynom. Pri výrobe izolačného systému nie je vždy možné zabrániť vzniku nehomogenít (dutiniek) v dielektriku. Tieto dutinky môžu vznikáť 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 – čiastkové výboje. Tieto výboje významným spôsobom negatívne ovplyvňujú vlastnosti izolačného systému a znižujú ich spoľahlivosť a životnosť. Výbojová činnosť pôsobí na izolačný systém elektrickými, tepelnými a chemickými vplyvmi [1]. 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. drážkové 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 [2], [3].

V súčasnej dobe existuje mnoho diagnostických metód, ktoré sa používajú na zisťovanie aktuálneho stavu izolačného systému, no žiadna z nich nie je schopná riešiť túto problematiku komplexne, samostatne a jednoznačne. Preto si každé diagnostické centrum vypracovalo, v priebehu rokov praxe, vlastný súbor diagnostických metód, ktoré sa navzájom dopĺňujú. Výber metód do tohto súboru je ovplyvňovaný výpovedeschopnosťou metódy, ale aj požiadavkami na prerušenie prevádzky, stupňom ohrozenia izolácie a v neposlednom rade aj vybavením pracoviska [4]. Existuje zhoda v tom, že diagnostika prevedená v pravidelných časových intervaloch je veľmi užitočná, pretože na vyhodnocovanie izolačného systému je cennejšie porovnávanie nameraných hodnôt z jednotlivých meraní ako vyhodnocovanie absolútnych hodnôt nameraných veličín. Keďže doteraz nie je známa metóda, ktorá by úplne vyčerpávajúcim spôsobom podávala informácie o stave vinutia a jeho životnosti, odporúča sa používať súbor meracích metód [5].

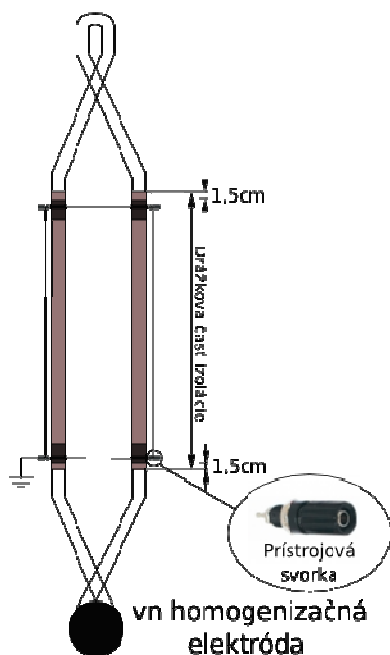
Merané vzorky

V našom prípade sa na skúmanie vzniku čiastkových výbojov rozvíjajúcich sa pri výstupe cievky z drážky, použili dve novonavínuté 6 kV statorové cievky, jedna bola bez polovodivej ochrany a druhá s polovodivou ochranou.

Cievky boli vyrobené pre asynchrónny stroj s menovitým fázovým napätím $U_n=3,6$ kV, menovitým prúdom $I_n=27,6$ A a menovitým výkonom $P_n=200$ kW.

Hlavná izolácia meraných cievok bola Samicatherm 366.28, ide o kalcínovo-sľudovú izoláciu spájanú epoxidovou živcou navínutou diskontinuálne. Pri meraní čiastkových výbojov jednotlivá cievka bola zavesená vo Faradayovej klietke na izolačnom lane. Konce vinutia sa prepajili homogenizačnou elektródou a uviedli sa na vysokonapäťový potenciál. Drážková časť izolácie bola ovinutá v štyroch špecifických miestach alobalom o šírke 5 cm, pričom jednotlivé miesta boli galvanicky spojené vodivou sieťovinou a vyvedené na potenciál zeme (obr. 1).

Toto usporiadanie modeluje uloženie cievky v drážke statora.



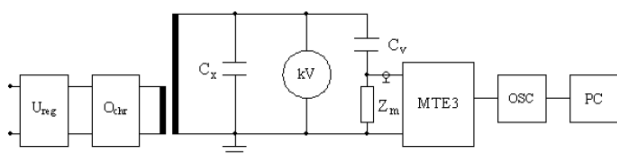
Obr.1. Príprava cievky na meranie, spôsob uzemnenia meraného objektu

Schéma zapojenia

Pri meraní bola použitá priama galvanická metóda merania častkových výbojov. Meracia impedancia bola zapojená v sérii s väzobným kondenzátorom. Výhodou tohto zapojenia je, že v prípade prerazu na meranom objekte nedôjde k poškodeniu meracích prístrojov.

Celý merací systém sa skladá z troch častí:

- vysokonapäťovej: vysokonapäťový transformátor, väzobný kondenzátor C_v , skúšaná vzorka C_x ,
- meracej: meracia impedancia Z_m , merač častkových výbojov MTE3,
- vyhodnocovacej: pamäťový osciloskop, počítač so softvérom.



Obr.2. Schéma zapojenia pre meranie častkových výbojov

Na obr. 2 je znázornená schéma použitého zapojenia. Regulovaným zdrojom U_{reg} sa nastavovalo napätie na meranom objekte C_x , v našom prípade na vysokonapäťovej cievke a pomocou meracieho zariadenia MTE3 sa zachytávali a zosilňovali úbytky napätí na meracej impedancii Z_m , ktoré vznikali v dôsledku impulzov častkových výbojov [2].

Postup merania

Prvé testovacie napätie sa nastavilo na hodnotu 2 kV a pôsobilo na cievku 3 minúty. Ak sa pri tomto napätí neobjavila výbojová činnosť hodnota napätia sa zvýšila o 200 V s rovnako dlhou dobou pôsobenia.

Napätie sa postupne zvyšovalo až po to napätie, kým nevznikli prvé stabilné výboje (napätie počiatkových výbojov), kedy bol spustený program na zaznamenávanie výsledkov merania a uskutočnené prvé meranie častkových výbojov. Ďalšie merania sa uskutočnili pri zvyšovaní napätia krokom 200 V až po nominálnu hodnotu združeného napätia skúšanej cievky 6 kV. Každé meranie trvalo 3 minúty, za ktoré bolo zaznamenané viac než 900 periód aplikovaného napätia. Zvyšovaním napätia krokom 200 V od počiatkovej hodnoty vzniku častkových výbojov až po nominálnu hodnotu 6 kV boli získané napätové závislosti charakteristických parametrov častkových výbojov. Aby boli výsledky meraní dôveryhodne je potrebné dokonale poznať skúmaný objekt, miesta vzniku výbojovej činnosti a správne namodelovať poruchový dej [6].

Namerané hodnoty a ich diskusia

Na vyhodnotenie výbojovej činnosti pri každej napätovej hladine boli zaznamenávané: sumačný náboj pre kladnú a zápornú polvlnu testovacieho napätia, početnosť výbojov, stredná a maximálna hodnota zdanlivého náboja a fázové rozloženie výbojovej činnosti. V článku sú uvedené výsledky merania dvoch vybraných cievok s polovodivou ochranou a bez nej. Za účelom vzájomného porovnania jednotlivých cievok boli stanovené nasledovné vypovedeschopné veličiny:

- maximálna hodnota zdanlivého náboja častkových výbojov v kladnej polvlne priloženého napätia q_{max+} ,
- maximálna hodnota zdanlivého náboja častkových výbojov v zápornej polvlne priloženého napätia q_{max-} ,
- fázový uhol vzniku častkových výbojov pre kladnú aj zápornú polvlnu priloženého napätia $\varphi+/\varphi-$.

V tabuľke 1 pre rôzne napätové hladiny sú uvedené namerané hodnoty zdanlivého náboja a fázových uhlov vzniku častkových výbojov pre cievku bez polovodivej ochrany a pre cievku s polovodivou ochranou sú v tabuľke 2.

Tabuľka 1. Namerané hodnoty pre cievku bez polovodivej ochrany

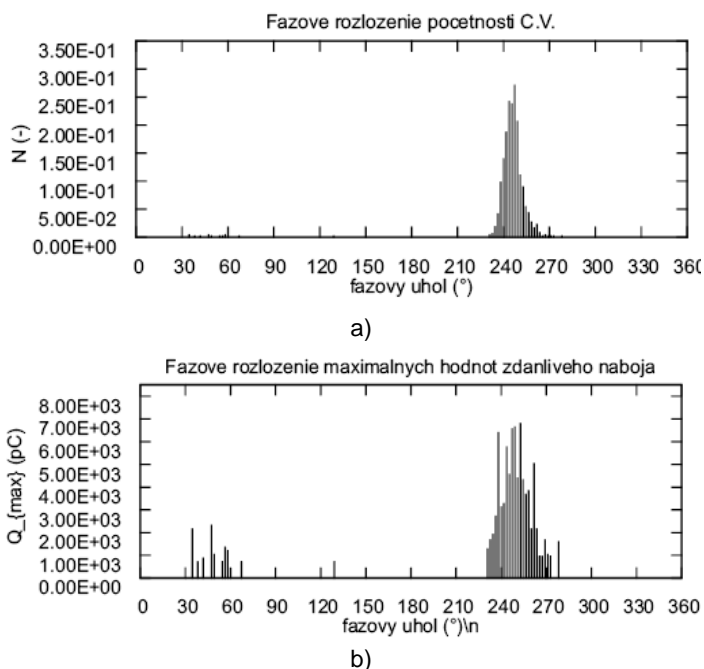
U (kV)	q_{max+} (pC)	q_{max-} (pC)	$\varphi+$ (°)	$\varphi-$ (°)
3,2	1500	2500	30-90	230-270
3,4	2000	4000	40-80	230-300
3,6	2000	7000	30-60	230-270
3,8	2000	10000	30-70	230-270
4	-	12000	-	-
4,2	-	15000	-	210-280
4,4	2000	13000	30-70	200-250
4,6	6000	14500	30-50	200-300
4,8	3000	15000	30-60	200-300
5	7000	15000	30-80	200-300
5,2	5000	20000	30-70	190-300
5,4	6000	19000	30-70	200-270
5,6	6000	17500	30-70	190-300
5,8	6000	19000	30-80	180-300
6	6000	22500	30-60	180-300

Tabuľka 2. Namerané hodnoty pre cievku s polovodivou ochranou

U (kV)	q _{max} ⁺ (pC)	q _{max} ⁻ (pC)	φ ⁺ (°)	φ ⁻ (°)
3	110	110	0-130	180-330
3,2	150	150	20-130	190-300
3,4	270	270	0-140	180-320
3,6	200	200	0-110	180-330
3,8	300	300	0-120	180-320
4	600	600	0-120	180-310
4,2	800	800	0-150	180-300
4,4	1200	1200	0-150	180-330
4,6	1600	1600	0-130	180-320
4,8	1700	1700	0-150	180-310
5	1900	1900	0-150	180-330
5,2	2100	2100	0-150	180-330
5,4	2200	2200	0-150	180-330
5,6	5000	5000	0-150	180-330
5,8	5000	5000	0-150	180-330
6	3000	3000	0-150	180-330

Pri porovnávaní hodnôt počiatkových napätí vzniku čiastkových výbojov je možné skonštatovať, že pri cievke bez polovodivej ochrany bola zaznamenaná nižšia hodnota počiatkového napätia, ako pri cievke s polovodivou ochranou.

Počiatkové napätie je možné považovať za ukazovateľ kvality izolácie. Nižšie hodnoty poukazujú na horšiu kvalitu izolácie (napr. prítomnosť plyných dutínok v izolácii), vyššie hodnoty na lepšiu kvalitu izolácie. Plyné dutinky môžu vzniknúť počas výroby statorovej izolácie.

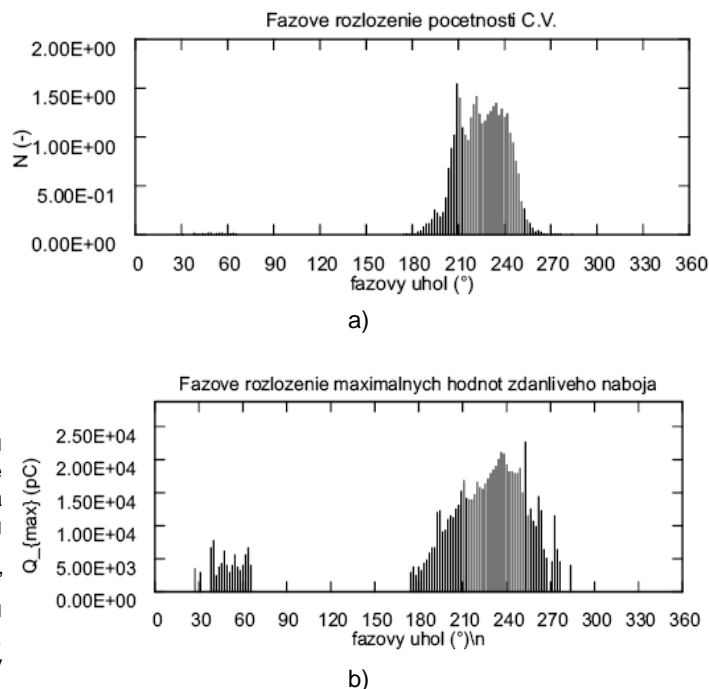


Obr.3. Cievka bez polovodivej ochrany, napätová hladina 3,6 kV. a) fázové rozloženie početnosti čiastkových výbojov, b) fázové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivého náboja

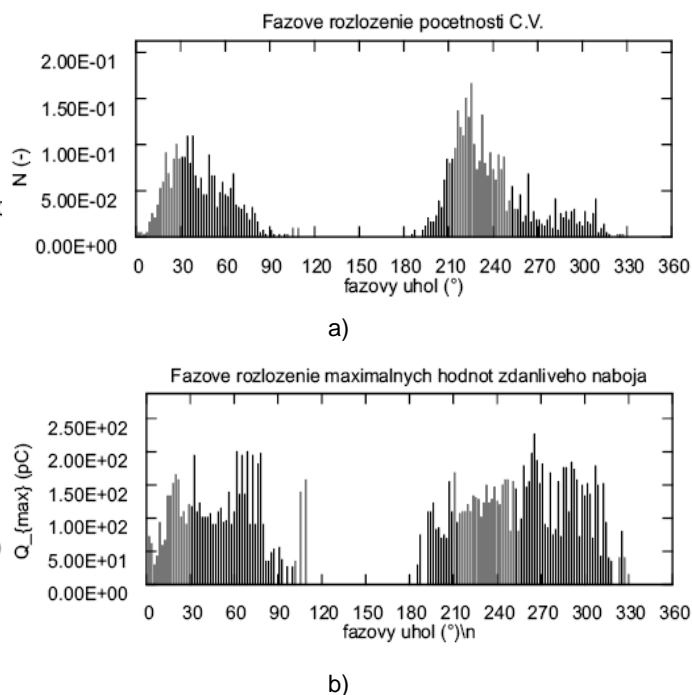
Z nameraných hodnôt uvedených v tabuľkách č.1 a č.2 je možné konštatovať rozdielne chovanie vzniku a rozvoja výbojovej činnosti na jednotlivých cievkach. Na obr. 3 až 6

sú znázornené fázové rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivého náboja a fázové rozloženie početnosti čiastkových výbojov pre zvolené napätové hladiny:

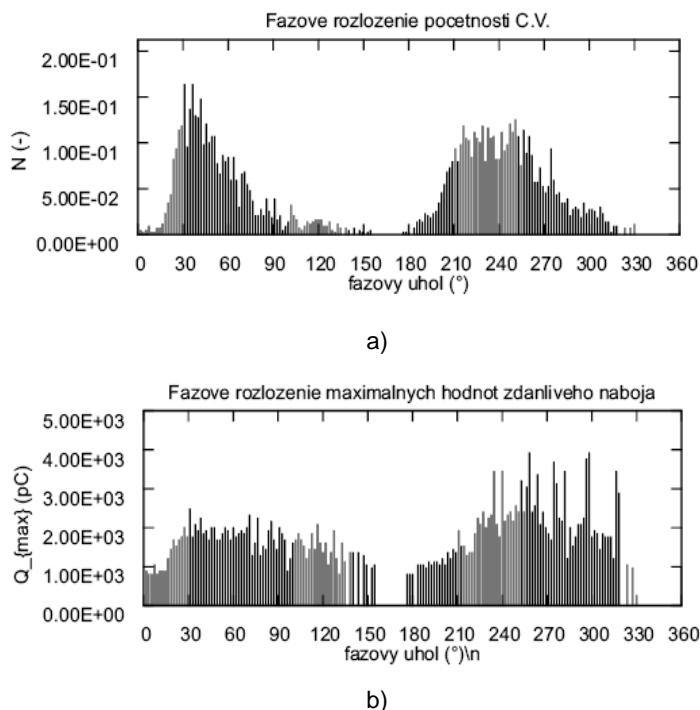
- nominálne fázové napätie cievky 3,6 kV,
- nominálne združené napätie cievky 6 kV.



Obr.4. Cievka bez polovodivej ochrany, napätová hladina 6 kV. a) fázové rozloženie početnosti čiastkových výbojov, b) fázové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivého náboja



Obr.5. Cievka s polovodivou ochranou, napätová hladina 3,6 kV. a) fázové rozloženie početnosti čiastkových výbojov, b) fázové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivého náboja



Obr.6. Cievka s polovodivou ochranou, napät'ová hladina 6 kV. a) fázové rozloženie početnosti častkových výbojov, b) fázové rozloženie maximalných hodnôt zdanlivého náboja

Pri porovnaní fázových rozložení častkových výbojov jednotlivých cievok je možné konštatovať nasledovné:

Napät'ová hladina 3,6 kV

- pre kladnú polvlňu fázové rozloženie výbojovej činnosti bolo v rozmedzí 30°-60° pre cievku bez polovodivej ochrany a 0°-110° pre cievku s polovodivou ochranou .

- pre zápornú polvlňu fázové rozloženie výbojovej činnosti bolo v rozmedzí 230°-270° pre cievku bez polovodivej ochrany a 180°-330° pre cievku s polovodivou ochranou .

Napät'ová hladina 6 kV

- pre kladnú polvlňu fázové rozloženie výbojovej činnosti bolo v rozmedzí 30°-60° pre cievku bez polovodivej ochrany a 0°-150° pre cievku s polovodivou ochranou .

- pre zápornú polvlňu fázové rozloženie výbojovej činnosti bolo v rozmedzí 180°-300° pre cievku bez polovodivej ochrany a 180°-330° pre cievku s polovodivou ochranou .

Maximálne hodnoty zdanlivého náboja boli podobné pri cievke s polovodivou ochranou v kladnej aj zápornej polvlni. Pri cievke bez polovodivej ochrany maximálne hodnoty zdanlivého náboja boli vyššie pri zápornej polvlni.

Z hľadiska porovnania výbojovej činnosti podľa maximalných hodnôt zdanlivého náboja častkových výbojov pre jednotlivé cievky je možné konštatovať nasledovné:

Napät'ová hladina 3,6 kV

- pre kladnú polvlňu maximálna hodnota zdanlivého náboja dosiela 2000 pC pri cievke bez polovodivej ochrany a 200 pC pri cievke s polovodivou ochranou,

- pre zápornú polvlňu maximálna hodnota zdanlivého náboja dosiela 7000 pC pri cievke bez polovodivej ochrany a 200 pC pri cievke s polovodivou ochranou.

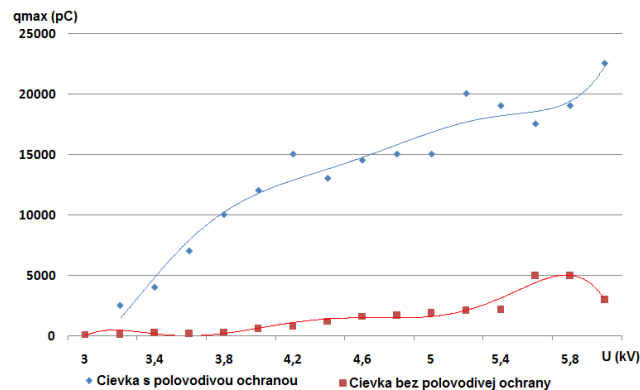
Napät'ová hladina 6 kV

- pre kladnú polvlňu maximálna hodnota zdanlivého náboja dosiela 6000 pC pri cievke bez polovodivej ochrany a 2000 pC pri cievke s polovodivou ochranou,

- pre zápornú polvlňu maximálna hodnota zdanlivého náboja dosiela 22500 pC pri cievke bez polovodivej ochrany a 3000 pC pri cievke s polovodivou ochranou.

Z vyššie uvedeného vyplýva, že maximálne hodnoty zdanlivého náboja mali rovnakú amplitúdu v kladnej aj zápornej polvlni pri cievke s polovodivou ochranou. Pri cievke bez polovodivej ochrany maximálne hodnoty zdanlivého náboja boli tri krát vyššie v zápornej polvlni ako v kladnej.

Na porovnanie výbojovej činnosti na obrázku č.7 je znázornená závislosť maximalnej hodnoty zdanlivého náboja od napätia pre cievku bez polovodivej ochrany a cievku s polovodivou ochranou.



Obr.7. Závislosť maximalnej hodnoty zdanlivého náboja od napätia

Záver

Výbojová činnosť pri oboch typoch cievok (bez a s polovodivou ochranou) bola odlišná. Maximálna hodnota zdanlivého náboja pri cievke bez polovodivej ochrany bola väčšia ako v prípade cievky, ktorá mala aplikovanú polovodivú ochranu na výstupe cievky z drážky statora. Z toho vyplýva pozitívny vplyv polovodivej ochrany na zníženie výbojovej činnosti.

Životnosť izolácie je nepriamo úmerná výbojovej činnosti, jej zníženie predlžuje životnosť izolácie a tým aj životnosť celého elektrického stroja točivého. Výstupné charakteristiky výbojovej činnosti získane z meraní budú použité pre neuronovú sieť ako vstupné dáta pri fáze učenia, ktorá na základe týchto údajov dokáže rozpoznať typy porúch izolačných systémov.

Literatúra

- [1] Fabiany, D., Montanari, G., Cavaliny, A., Mazzanti, G.: Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 3, June 2004.
- [2] Cimbala, R.: Absorpčný prúd a jeho vzťah k iným diagnostickým metódam, Diagnostika 93, Plzeň 1993.
- [3] Cimbala, R.: Diagnostická metóda izolačných systémov pri použití ultranízkych frekvencií, 5. Medzinárodná vedecká konferencia VŠT Košice 1989.
- [4] Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy. Plzeň: BEN, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [5] Reulle, A.: Summary report on the answers to the questionnaire on operational monitoring. ELECTRA č. 96, 1984, pp. 34-45
- [6] Kolcunová, I.: Diagnostika elektroenergetických zariadení metódou častkových výbojov, Košice, 2008, ISBN 978-80-553-0031-3.

Autori:

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

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



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

Táto práca vznikla na základe podpory vedeckej grantovej agentúry VEGA MŠVVaŠ SR a SAV č. projektu 1/0368/2009