

STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

NOVÉ VEDECKÉ POZNATKY A ICH APLIKÁCIE

Jún 2009

Číslo 6/2009

ISSN 1337-0103

Obsah

Ľudovít Csányi, Roman Cimbala Tepelné starnutie v izolačných materiáloch	3
Martin Marci, Iraida Kolcunová, Juraj Kurimský Meranie výbojovej činnosti v kombinovanej izolácii olej - papier	7
Bystrík Dolník, Marián Holiš Výskum výbojových procesov vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli	12
Peter Semančík, Roman Cimbala Diagnostic of Transformer Oils using Thermal – Oxidation Stability Method	15

Starnutie elektroizolačných systémov

nové vedecké poznatky a ich aplikácie
ISSN 1337-0103

Vydavateľ

Energo Consulting s.r.o.

Copyright

Publikácie na tejto stránke sú predmetom autorských zákonov krajiny. Kopírovanie, používanie a všetky spôsoby využívania spadajúce pod autorský zákon musia byť písomne autorizované vydavateľom. Súbory na stiahnutie a kópie tejto stránky alebo jej častí sú preto dovoľené len pre súkromné použitie. Informácie o citovaní príspevkov sa posielajú autorom príspevkov na adresy uvedené na konci.

Zodpovednosť za obsah

Zodpovednosť za obsah, berúc do úvahy jeho presnosť a komplexnosť majú autori príspevkov.

Ľudovít Csányi, Roman Cimbala

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

Tepelné starnutie v izolačných materiáloch

Abstrakt. V elektroenergetických zariadeniach je veľká rozmanitosť elektroizolačných materiálov a pri ich tepelnom namáhaní dochádza k zmene elektrofyzikálnej štruktúry. Jedným zo spôsobov ako merať túto zmenu je metóda IRC analýza, táto metóda patrí medzi nedeštruktívne diagnostické meracie metódy, a preto sa často používa ako v laboratoriu tak aj v prax. Toto skúmanie nám zisťuje možnosti využitia neurónových sietí pri vyhodnocovaní nameraných diagnostických výsledkov. V našom prípade neurónovú sieť predstavuje kontrolované učenie Back Error Bpropagation.

Abstract. In the electroenergetic equipment is a large diversity of the electrically materials and the heat stresses induced a change in its electrophysical structures. One way how to measure this change is the IRC analysis method, this method belong to non-destructive diagnostic methods and therefore is often used in the laboratory and in the practice. By this measurement is possible to determine potential uses of neural networks in the evaluation of the measured diagnostic results. In our case the neural network constitutes a controlled learning system Back Error Bpropagation.

Kľúčové slová: izolácia, polarizácia, diagnostika, neurónová sieť.

Keywords: isolation, polarisation, diagnostic, neural network.

Úvod

Najdôležitejší prvok každého elektrického zariadenia je izolačný systém. Veľká časť porúch elektrických strojov je spojená práve so zlyhaním izolácie týchto strojov a to aj napriek zvyšovaniu kvality izolačných systémov. Jav, ktorý ma na kvalitu izolácia najväčší vplyv a dá sa minimálne ovplyvniť je starnutie izolácie [1].

Na zisťovanie stavu izolačného systému bolo vyvinutých niekoľko diagnostických metód pomocou, ktorých vieme zistiť aktuálny stav systému a zistiť zmenu vlastností, ktoré v izolácii prebiehajú počas starnutia. Je nutné aby sme pri meraní sledovali niektoré elektrické alebo fyzikálne veličiny, ktoré nám poukazujú na aktuálny stav zariadenia. Výber veličín môže byť náhodný, pretože každá nám poukazuje na určité zmeny izolačného systému. Jednou s nových metód je metóda IRC analýza (tepelné relaxačná prúdová analýza), táto metóda je nedeštruktívna a je založená na princípe merania nabíjajúcich prúdov v závislosti od konštantnej teploty.

Na základe zmeraných vzoriek Relanex a na základe meraní izolácií strojov v prevádzke, boli dosiahnuté výsledky, ktoré boli navzájom vyhodnocované a získané dáta boli prevedené do grafickej podoby.

Diagnostické metódy

Pod pojmom diagnostika rozumieme stanovenie a klasifikáciu príznakov, ktoré poukazujú na zmenu parametrov počas používania zariadenia. Aby sme toto dosiahli musíme zvoliť vhodné diagnostické metódy a pri ich voľbe musíme vychádzať s nasledovných požiadaviek:

- metóda sa musí týkať vlastnosti, ktorá je predmetom záujmu,
- rozloženie namáhania musí odpovedať skutočnému,
- prednostne sa používajú nedeštruktívne metódy,
- meracia metóda by nemala ovplyvniť proces degradácie,
- metóda sa musí aplikovať v prevádzkových podmienkach.

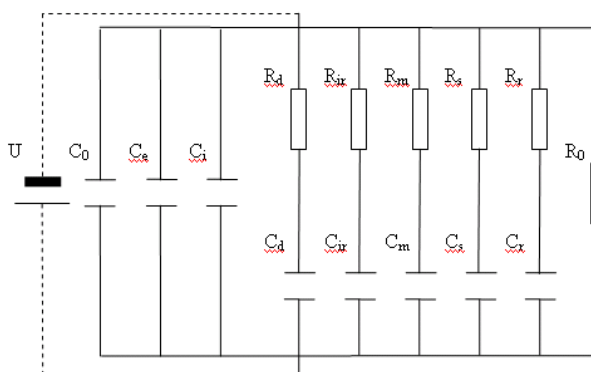
IRC analýza

Na základe poznatkov podľa Maxwell – Wagnerovho modelu (Obr.1) a na základe polarizačných javov prebiehajúcich v dielektrikách bola vyvinutá nová metóda, ktorá sa nazýva Isothermic Relaxation Current – Analysis

(IRC analýza), a táto analýza môže byť použitá práve na zhodnotenie zmeny stavu elektrofyzikálnej štruktúry materiálu.

Mikroskopický pohľad

Každý proces starnutia pôsobí na materiál a tým zmení mikroštruktúru a zloženie izolantu [2]. Z toho vyplývajú charakteristické zmeny dielektrického relaxačného správania sa.

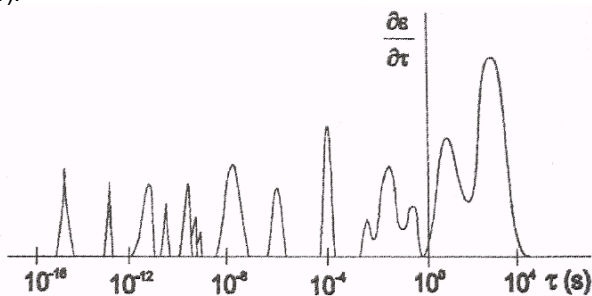


Obr.1 Náhradná schéma dielektrika (vyskytujú sa v nej všetky druhy polarizácie) [3]

Pri IRC analýze sa počas starnutia pozoruje pribúdanie pomalších polarizačných procesov a toto pribúdanie je zachytené meracou technikou pomocou separátneho určenia prúdovo relaxačných amplitúd v časovej dobe väčšej ako 100 sekúnd. Polarizačné spektrum (Obr. 2), na ktorom je možno vidieť, že maximum informácií je v pásme $10^{-3} \div 10^5$ s.

$$A = \frac{Q(\tau_3)}{Q(\tau_2)} = \frac{1 + \frac{a_2 \cdot \tau_2}{a_1 \cdot \tau_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_2}}\right) + \frac{a_3 \cdot \tau_3}{a_1 \cdot \tau_1} \cdot \left(1 - \frac{1}{e}\right)}{1 + \frac{a_2 \cdot \tau_2}{a_1 \cdot \tau_1} \cdot \left(1 - \frac{1}{e}\right) + \frac{a_3 \cdot \tau_3}{a_1 \cdot \tau_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_2}}\right)} \quad (1)$$

Pomocou IRC analýzy je možné nedeštruktívne sledovanie starnutia systému pomocou faktora starnutia A (1).



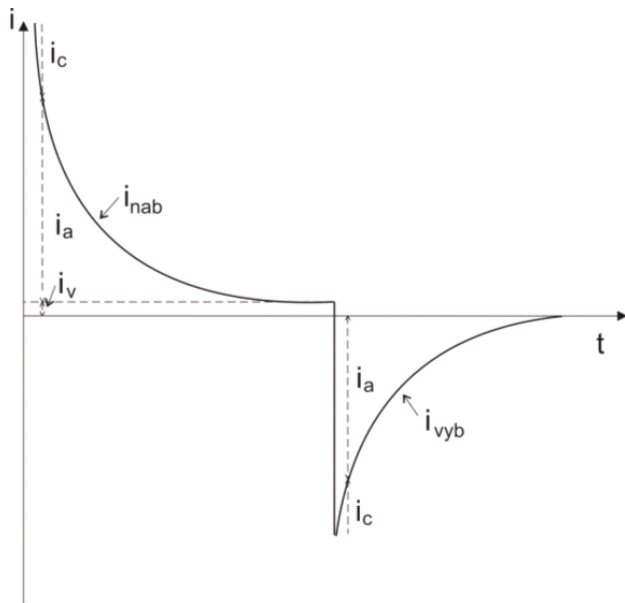
Infračervená spektroskopia Striedavé metódy Jednosmerné metódy

Obr. 2 Polarizačné spektrum izolačného materiálu [1], [3]

Makroskopický pohľad

Podstatná časť polarizačného spektra materiálu sa nachádza v oblasti $10^{-3} \div 10^5$ s a túto oblasť je možné skúmať jednosmernými metódami založenými na sledovaní napäťových a prúdových odoziev ako jednou z metód na sledovanie dynamických javov v časovej oblasti. Výška aplikovaného napätia je však limitovaná rozhraním slabých a silných polí, kde je možnosť vytvárania priestorového náboja [4] alebo povrchových výbojov pri nevhodne zvolených elektródových systémoch [6].

Priebeh prúdovej odozvy na pripojenie jednosmerného napätia – nabíjací prúd a jeho odstránenie – vybíjací prúd je na (Obr.3).



Obr. 3 Prúdová odozva na vnútený impulz [1], [3]

Pre nabíjací prúd $i_n(t)$ platí vzťah:

$$(2) \quad i_n(t) = i_c(t) + i_v + i_a(t)$$

kde

$i_c(t)$ - prúd od geometrickej kapacity,

i_v - vodivostný prúd,

$i_a(t)$ - absorpčný prúd.

Celkový prúd pretekajúci dielektrikom je vyjadrený ako suma prúdov s exponenciálne klesajúcou amplitúdou a preto je ho možné vyjadriť ako:

$$(3) \quad i(t) = \frac{U}{R_i} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right)$$

kde

U - aplikované jednosmerné napätie

R_i - jednosmerný izolačný odpor po nekonečne dlhom čase

I_{mi} - amplitúda i - tej zložky Debyeovho elementárneho prúdu

τ_i - časová relaxačná konštanta i - tej zložky Debyeovho prúdu

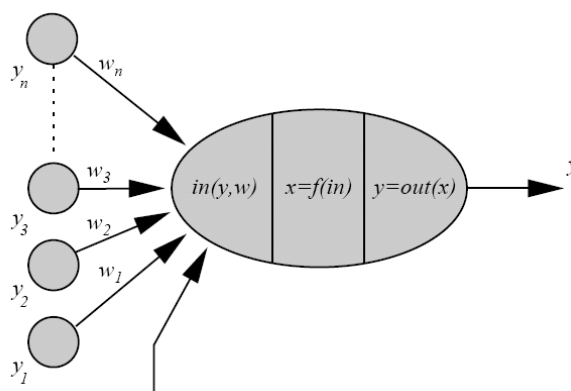
Neurónová sieť (NN)

Neurónová sieť je definovaná nasledovne podľa [5]: *Neurónová sieť (ďalej NN) je masívne paralelný procesor, ktorý má sklon k uchovávaní experimentálnych znalostí a ich ďalšieho využívania.* Napodobňuje ľudský mozog v dvoch aspektoch:

- poznatky sú zbierané v NN počas učenia,
- medzineurónové spojenia (synaptické váhy - SV) sú využívané na ukladanie znalostí.

Inšpirácia pre vznik NN prišla z biologických systémov (simulácia mozgu). NN nachádzajú uplatnenie pre aplikácie v praxi a stávajú sa prostriedkom pre riešenie problémov v mnohých oblastiach (patrí sem napríklad aj elektroenergetika a jej súčasti).

Základným prvkom NN je neurón. Štruktúra NN je na (obr. 4).



Obr. 4 Štruktúra neurónu [5]

Neurón sa skladá z nasledujúcich častí [5]:

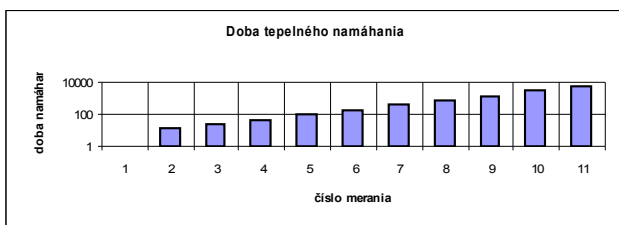
1. vstup do neurónu (dendrit),
2. prah neurónu – je hodnota θ_i , ktorá vlastne prispieva ku vstupu z externého sveta,
3. vstupná funkcia f_{in} ,
4. aktivačná funkcia neurónu f_a , ktorej výsledkom je stav neurónu x_i ,
5. výstupná funkcia neurónu f_o , ktorej výsledkom je výstup y ,
6. synaptické váhy, ktoré sú na synaptických spojeniach (synapsiách), majú svoj smer (predsynaptické(zdrojové)a postsynaptické(cieľové)) a spájajú jednotlivé neuróny do NN.

Experiment

Cieľom experimentu bolo zisťovanie stupňa tepelnej degradácie vzoriek Relanex (používa sa na izoláciu elektrických točivých strojov, ktoré pracujú v prostredí s tepelnou triedou F) v laboratórnych podmienkach pomocou IRC analýzy a ich následného porovnania so

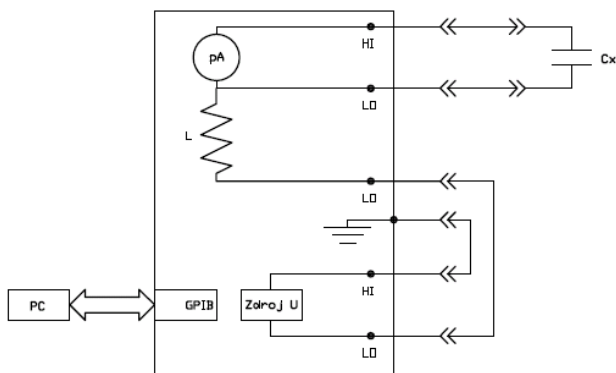
vzorkami nameraných na skutočných strojoch pomocou neurónovej siete.

Meranie začína prípravou vzoriek (priemer vzoriek bol 89 mm a do tohto tvaru sa upravovali kvôli meracím elektródam), ktoré spočíva vo vystavení vzoriek tepelnému namáhaniu počas zvolených časových intervalov v tepelnej komore pri teplote 186°C. Celkovo sme mali 11 vzoriek, ktoré boli očíslované od 1 až po 11 a každá vzorka bola vystavená odlišnej dobe tepelného namáhania (1 – 0 hod, 2 – 12 hod, 3 – 24 hod, 4 – 48 hod, 5 – 96 hod, 6 – 192 hod, 7 – 384 hod, 8 – 768 hod, 9 – 1536 hod, 10 – 3072 hod, 11 - 6144) (Obr.5).



Obr. 5 Doba tepelného namáhania vzoriek v grafickej podobe

Vzorky sa následne vkladali medzi meracie elektródy KEITHLEY 8008 RESISTIVITY TEST FIXTURE, po vložení vzorky sa na meracie elektródy priviedlo skúšobné jednosmerné napätie 100 V po dobu 1000 s pomocou elektromera KEITHLEY 617. Elektromer KEITHLEY 617 bol cez zbernicu GPIB prepojený s počítačom na ktorom sa zaznamenávali namerané nabíjacie prúdy jednotlivých vzoriek. Celé meranie bolo riadené pomocou programu vytvorenom v prostredí Agilent VEE Pro. Schéma zapojenia merania je zobrazená na (Obr. 6).



Obr. 6 Schéma zapojenia merania [6]

Výsledky získané pomocou neurónovej siete

Museli sme si určiť tréningové dáta, tieto dáta pochádzajú z merania na vzorkách RELANEX, ktoré sa uskutočnilo na katedre elektroenergetiky.

Tieto dáta sme následne po prefiltrovaní normalizovali na intervale <0,1>. Po natrénovaní neurónovej siete sa výsledok tréningovania pohyboval od 90 po 95 % čo bolo pre nás vyhovujúce percento presnosti. Výška presnosti tiež závisí aj od zadaných parametrov učenia neurónovej siete.

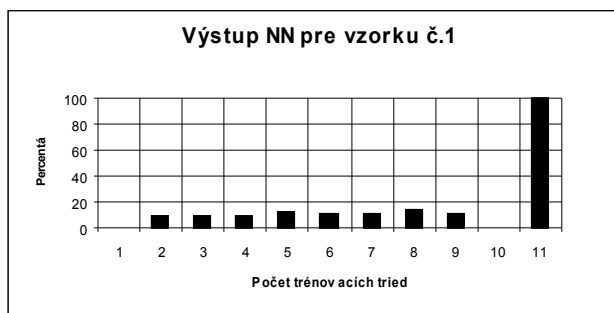
Potom ako bolo tréningovanie s filtrovanými dátami úspešné začali sme s testovaním. Ako testovacie dáta boli použité výsledky meraní, ktoré boli namerané na skutočných strojoch s prevádzky. Rovnako ako tréningové dáta aj testovacie sme normalizovali, ale tento krát sme ich normalizovali všetky spolu to znamená, že tréningové aj testovacie sme normalizovali spolu na intervale <0,1>. Samotnú normalizáciu sme uskutočnili tak, že sme si našli v tréningových a testovacích dátach najväčšie číslo a tomuto

číslu sme priradili najbližšie väčšie celé číslo a toto číslo pre nás predstavuje hodnotu 1 s nášho intervalu, po nájdení tohto čísla sme normalizáciu uskutočnili podľa vzorca

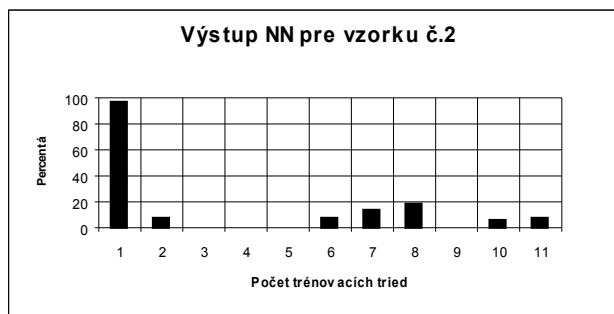
$$\frac{X_1}{X_x}$$

kde kde X_1 predstavuje číslo s testovacích a tréningových dát a X_x predstavuje najbližšie nami zvolené väčšie celé číslo.

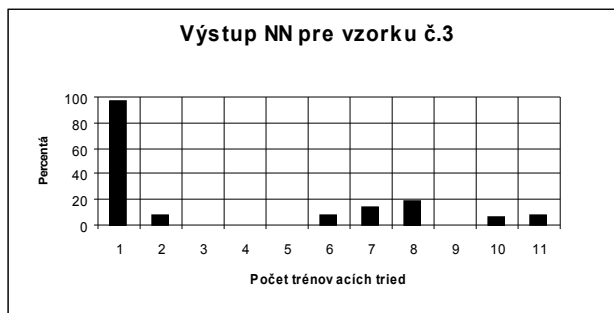
Výstup z neurónovej siete (Tab.1) sme si určili číselný, ktorý nám udáva percentuálnu podobnosť testovacej vzorky s tréningovou. Pre názornejšiu ukážku sme sa rozhodli aj pre grafické zobrazenie jednotlivých (Obr.7 až Obr.11).



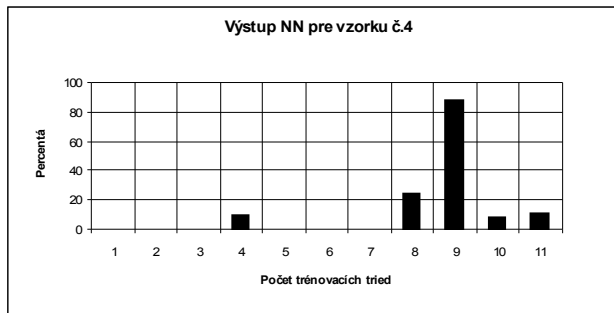
Obr. 7 Grafický výstup NN pre motor č.1



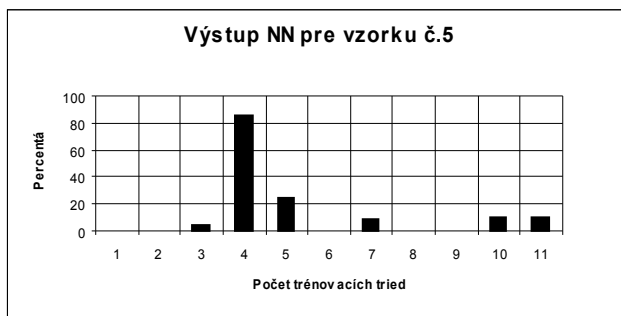
Obr. 8 Grafický výstup NN pre motor č.2



Obr. 9 Grafický výstup NN pre motor č.3



Obr. 10 Grafický výstup NN pre motor č.4



Obr. 11 Grafický výstup NN pre motor č.5

Z Tab.1 a Obr.7 až Obr.11 je jasne vidieť, ku ktorým tréningovým dátam nám neurónová sieť priradila jednotlivé testovacie dáta (Vzorky). Pre porovnanie sme uviedli nasledujúcu (Tab.2) kde je uvedené ako sa líšia výsledky, ktoré boli namerané pomocou IRC analýzy a výsledky, ktoré nám vyhodnotila neurónová sieť.

Tab. 1 Číselný výstup neurónovej siete

	Vzorka č.1	Vzorka č.2	Vzorka č.3	Vzorka č.4	Vzorka č.5
0 hodín	0	97,46887	97,51446	0	0,014562
12 hodín	9,379594	7,67498	7,714809	0,000001	0,000559
24 hodín	9,767261	0,000068	0,000068	0,000083	4,463115
48 hodín	9,606904	0	0	9,226135	86,18335
96 hodín	12,86703	0,000105	0,000107	0	24,23048
192 hodín	11,16556	7,439867	7,432626	0,001563	0,004647
384 hodín	10,42564	14,61370	14,68689	0,000453	9,048901
768 hodín	13,10272	18,1483	18,2528	24,43087	0,000147
1536 hodín	10,39069	0	0	87,72861	0
3072 hodín	0,410894	6,50568	6,45879	8,078659	10,02442
6144 hodín	99,57049	8,03123	8,005608	10,92094	10,05610

Ako už bolo spomenuté tréningové dáta pochádzajú s meraní, ktoré boli uskutočnené v laboratóriu a testovacie dáta pochádzajú z meraní na skutočných strojoch v prevádzke. Pri porovnaní tréningových a testovacích dát sú ich hodnoty podstatne odlišné. S tejto odlišnosti dát boli veľké obavy, pretože NN by nemusela správne klasifikovať testovacie triedy.

Tab. 2 Porovnanie výsledkov IRC analýzy s výsledkami NN

Číslo motora	Odhadovaný stav izolácie podľa jednoduchého posúdenia	Stav izolácie podľa NN
M1	izolácia vo ohrozenom stave	izolácia v kritickom stave
M2	izolácia v dobrom stave	izolácia vo veľmi dobrom stave
M3	izolácia v ohrozenom stave	izolácia vo veľmi dobrom stave
M4	izolácia v kritickom stave	izolácia v ohrozenom stave
M5	izolácia v kritickom stave	izolácia v dobrom stave

Samozrejme samotné tréningovanie neurónovej siete závisí hlavne od správnosti merania vzoriek Relanex, pretože na chybné namerané vzorky (napr. rušivé vplyvy) sa môžu odzrkadliť na testovaní.

Záver

Výsledkom práce je porovnanie meraní a ich analýz, ktoré boli uskutočnené na reálnych strojoch pomocou IRC analýzy s meraním, ktoré bolo uskutočnené na vzorkách Relanex v laboratóriu. Toto porovnanie sme uskutočňovali pomocou nami navrhutej umelej neurónovej siete s kontrolovaným typom učenia Back Error Propagation. Výsledkom tohto porovnania bolo priradzovanie testovacích vzoriek a reálnych objektov k jednotlivým stupňom tepelného zostarnutia izolačného materiálu. Klasifikácia do príslušnej triedy pomocou neurónovej siete je týmto na podstatne vyššom stupni ako tomu bolo doposiaľ, nakoľko nie je priebeh skúmaných parametrov počas celej doby starnutia monotónny a tým je značne sťažená ich analýza jednoduchým porovnávaním ich veľkostí. Neurónová sieť dokázala tento nedostatok odstrániť a určiť stav, v ktorom sa daný izolačný systém nachádza.

Výpovede neurónovej siete sa líšia od odhadovaných stavov len odchýlkami, ktoré je možné tolerovať. Otázkou naďalej ostáva, ktoré ohodnotenie stavu systému viac zodpovedá reálnemu stavu.

Najdôležitejším výsledkom výpovede neurónovej siete je však to, že všetkých päť testovaných objektov dokázala jednoznačne priradiť ku jedinému stavu zostarnutia bez akéhokoľvek významného rozptylu a tým jednoznačne ohodnotiť ich tepelnú degradáciu.

Vyhodnocovanie pomocou neurónovej siete sa tak dopĺňa databázy tréningových dát stane významným nástrojom pri záverečnom hodnotení izolačného systému.

Literatúra

- [1] CIMBALA, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov, TUKE, 2007.
- [2] Hassdenteufel, J., kol.: Elektrotechnické materiály, ALFA SNTL, Praha, 1978.
- [3] SEMANČÍK, P.: Tepelná degradácia izolačných systémov : Dizertačná práca, Košice, TUKE, 2007
- [4] BERNÁT, M., BERNÁTOVÁ, R.: Mathematical Modelling of Some Problems of Dynamics of Space Charges in Highly Non-homogeneous Fields, International Journal of Technical Physics, Number 4, Volume XLVIII, p.3 211; 10, Institute of Fundamental technological Research PAS, Warsaw 2007, Poland, ISSN 0324-8313.
- [5] SINČÁK, P. a ANDREJKOVÁ, G.: Neurónové siete Inžiniersky prístup 1. diel, ELFA, 1996.
- [6] KURIMSKÝ, J., KOLCUNOVÁ, I.: Partial discharge phase resolved analysis of the B and F temperature classes insulation systems. In: Przegląd Elektrotechniczny. vol. 3, no. 1 (2005), p. 154-156. ISSN 1731-6103.

Táto práca vznikla aj na základe podpory projektov VEGA 1/0368/09 a APVV-20-006005.

Autori: Ľudovít Csányi, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: laduss@azet.sk

Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk

Martin Marci, Irida Kolcunová, Juraj Kurimský

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

Meranie výbojovej činnosti v kombinovanej izolácii olej - papier

Abstrakt. V súčasnosti sa stále viac dostáva do popredia problematika životného prostredia. Veľké firmy, ktoré sa zaoberajú výrobou silových transformátorov vedú výskumy alternatív pre minerálne oleje, ktoré sú kvôli výborným elektroizolačným vlastnostiam, ľahkej dostupnosti a nízkej cene stále najatraktívnejšou voľbou. Najčastejšie sa v transformátoroch stretávame s izoláciou na báze olej – papier, pričom najväčšou mierou sa na izolačnom procese podieľa transformátorový olej. Možnou alternatívou dnes používaných olejov založených na ropnej báze sú organické oleje. Elektroizolačné vlastnosti organických olejov zatiaľ nie sú dostatočne preskúmané, preto sa táto práca zaoberá výskumom vzniku čiastkových výbojov v kombinovanej izolácii olej – papier s variáciou rôznych druhov olejov, vrátane organických, s cieľom náhrady minerálnych olejov rastlinnými.

Abstract. The environment problematic is getting into spotlight more and more presently. Enterprises, that handle the production of power transformers conduct research on mineral oil alternatives, that remain due to their great electro-insulant features, simple accessibility and their low price the most attractive choice. A possible alternative for the today used earth oil based oils are organic oils. This thesis is dealing with research of the formation of partial discharges in a combined insulation oil-paper with the variation of various types of oils, include organic ones, with the goal of supplementing the mineral oils, with plant oils.

Kľúčové slová: Kvapalný izolant, rastlinný olej, minerálny olej, čiastkový výboj.

Keywords: Liquid insulant, vegetable oil, mineral oil, partial discharge.

Úvod

V súčasnej dobe sa kladie vysoká požiadavka na spoľahlivosť energetických systémov. Analýza spoľahlivosti poukazuje na nutnosť vylepšovania kvality čiastkových elementov elektroenergetického systému [1,2]. Potreba a zdokonaľovanie elektroizolačných materiálov vzrastala paralelne s vývojom vysokonapäťových zariadení, ktoré sú stále zložitejšie a ktoré vyžadujú stále modernejšie a spoľahlivejšie technológie na zabezpečenie stabilnej a spoľahlivej izolácie. Medzi najpoužívanejšie izolácie u vysokonapäťových transformátorov patrí kombinovaná izolácia olej – papier, ktorej najdôležitejšou zložkou ovplyvňujúcou celý izolačný systém je kvapalná zložka, ktorá je reprezentovaná elektroizolačnými olejmi. Doteraz najčastejším typom kvapalného dielektrika sú minerálne oleje. Okrem vysokej stability a spoľahlivosti sa dnes kladie veľký dôraz na ekonomickosť a v neposlednom rade aj na ekológiu izolačných systémov, ktorá bola v tomto smere veľmi dlho zanedbávaná, kvôli veľmi dobrým technickým vlastnostiam doteraz používaných materiálov, ktoré boli navyše cenovo veľmi prijateľné. Novou ekologickou alternatívou náhrady doteraz používaných materiálov by mohli byť oleje rastlinného pôvodu. Táto téma je čoraz aktuálnejšia a ponúka úplne nové, zatiaľ nepreskúmané možnosti využitia nového a zaujímavého zdroja elektroizolačných systémov.

Táto práca sa venuje výbojovým procesom v kvapalných dielektrikách. Základnou metódou na zistenie parametrov týchto procesov boli praktické merania s následným vyhodnotením údajov do tabuliek a grafov, čo predstavuje meranie a vyhodnocovanie čiastkovej výbojovej činnosti v izolácii olej papier, čím simuluje čiastkovú výbojovú činnosť vo vysokonapäťových elektroenergetických zariadeniach. Cieľom meraní je na základe získaných informácií posúdiť elektrické vlastnosti kvapalných dielektrík založených na rastlinnom základe a porovnať ich s vlastnosťami dnes používaných kvapalných dielektrík.

Elektrické namáhanie v izolácii olej - papier

Pri výrobe a montáži vysokonapäťových zariadení sa spravidla najviac úsilia a financií investuje do realizácie vhodnej izolácie, ktorá je po celý čas životnosti v prevádzke

namáhaná vysokými hodnotami nielen prevádzkových napätí. Izolant musí byť navrhnutý tak, aby tieto hodnoty napätí vydržal čo najdlhšie s tým, že hodnoty jeho charakteristík ostanú v požadovanom intervale. Faktom však naďalej ostáva, že každý izolant podlieha starnutiu a degradácii. Postupné zhoršovanie stavu izolácie vedie ku vzniku výbojovej činnosti. V kvapalných dielektrikách, ktorá je často kombinovaná s papierovou izoláciou sa začnú objavovať čiastkové výboje. Ak je výbojová činnosť príliš veľká, či už vplyvom zostarnutia a znečistenia, alebo vplyvom zvýšenia hodnoty napätia z nejakého dôvodu, môže dôjsť vplyvom silného elektrického poľa a nedostatočnej elektroizolačnej schopnosti izolantu k preklenutiu vzdialenosti medzi elektródami. Tomuto javu u kvapalných izolantov hovoríme preskok, pri tuhých izolantoch hovoríme o prieraze. Prúd, ktorý pri preskoku, respektíve pri prieraze preteká izolantom, môže svojimi tepelnými a mechanickými účinkami spôsobiť na zariadení značné škody, alebo ho úplne zničiť.

Čiastkové výboje v izolácii olej - papier

Žiaden izolačný systém nie je dokonalý, ale naopak, vždy obsahuje drobné, až mikroskopické nehomogenity a dutinky. V týchto nehomogenitách je intenzita elektrického poľa počas namáhania vysokými hodnotami elektrického napätia najväčšia a môže presiahnuť elektrickú pevnosť plynovej medzery, čím dôjde k preskoku. Takémuto čiastočnému preklenutiu vzdialenosti elektrickým poľom hovoríme čiastkový výboj. Samotný čiastkový výboj trvá veľmi krátko a nespôsobí bezprostredne stratu elektroizolačnej schopnosti izolantu ako celku, ale pri opakovanom a dlhodobom pôsobení môže výrazne narušiť jeho elektrickú pevnosť.

Miestom, kde sa čiastkové výboje objavia ako prvé, je okraj elektród, kde je namáhanie elektrickým poľom najintenzívnejšie.

V papierovo-olejovej izolácii bežného prevedenia sa vyskytujú dva charakteristické typy čiastkových výbojov, ktoré sa od seba podstatne odlišujú intenzitou ako aj spôsobom degradácie izolácie. [3]

Čiastkové výboje prvého typu nazývame počiatočnými a sú reprezentované lavínami elektrónov, ktoré sa rozvíjajú bezprostredne v olejových vrstvičkách, ďalej od

mikrovýstupov na povrchu elektród, okolo ktorých sa elektrické pole zosilní. Energia počiatočných čiastkových výbojov je malá, pretože prenášaný náboj je malý a jeho hodnota sa pohybuje od 10^{-15} do 10^{-13} C a je nedostatočná na rozrušenie papiera. Počiatočné čiastkové výboje vyvolávajú rozklad oleja a uvoľňovanie plynov a celého radu iných produktov. [3]

Rast intenzity počiatočných čiastkových výbojov pri zvyšovaní intenzity elektrického poľa v izolácii je sprevádzané zväčšovaním sa rýchlosti vybavovania plynov a rozkladom oleja. Dostávame sa tak k prechodu čiastkových výbojov od počiatočných ku kritickým. [3]

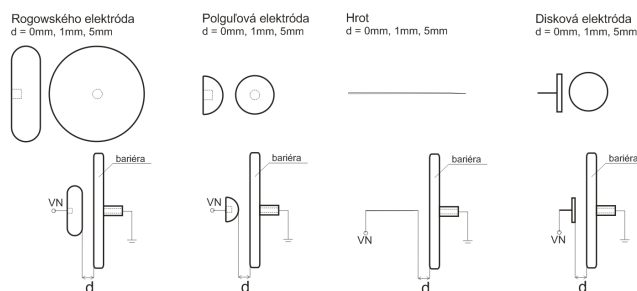
Pri prechode od počiatočných čiastkových výbojov ku kritickým intenzita procesu sa skokovite mení 10^3 až 10^4 násobne. Energia rozptyľujúca sa pri výbojoch je už dostávajúca na rozrušenie papiera. Preto za relatívne krátky čas (niekoľko sekúnd až hodín) v závislosti od hrúbky izolácie sa kritické čiastkové výboje rozvíjajú do plného prierazu izolácie. [3]

Meranie čiastkových výbojov

Úlohou bolo vytvoriť rovnaké podmienky pre vznik čiastkových výbojov po povrchu bariéry vo všetkých meraných vzorkách olejov, zmerať parametre čiastkových výbojov, vyhodnotiť ich a na základe získaných informácií následne porovnať jednotlivé vzorky. jedná sa o tri vzorky dvoch druhov oleja, a to konkrétne vysokorafinovaný minerálny olej s prísadou 2,6-di-terc-butyl-metylfenolu, olej ITO 100 založený na ropnej báze a rastlinný olej RACIOL, čo je repkový olej chemicky upravovaný len do miery vhodnej pre potravinársky priemysel. Keďže ako transformátorové oleje sú bežne používané minerálne oleje, z toho dôvodu bolo možné očakávať lepšie vlastnosti u minerálneho oleja. Preto okrem nového ITO 100 bol podrobený meraniu rovnako zostarnutý olej ITO 100, ktorý bol dlhú dobu elektricky namáhaný laboratórnymi meraniami a rovnako bol po celý čas vystavený prístupu vzduchu.

V praxi sa v elektroenergetických zariadeniach nevyskytujú len polia silne homogénne a preto sa meranie čiastkových výbojoch uskutočnilo na rôznych elektródach, ktorých tvar má zabezpečiť rôzne stupne homogenity poľa v medzielektrodovom priestore. Jedná sa o Rogowského elektródu, polguľovú elektródu, diskovú elektródu a hrot.

Okrem rôzneho elektródového usporiadania podľa obrázka (Obr. 1), bolo meranie uskutočnené pri rôznych vzdialenostiach $d = 0\text{mm}$, $d = 1\text{mm}$ a $d = 5\text{mm}$, ale vzhľadom k veľkému množstvu nameraných výsledkov, popisuje táto práca len výsledky z merania na elektródovom systéme Rogowského elektróda – bariéra, pre všetky tri druhy olejov a pri medzielektrodovej vzdialenosti $d = 0\text{mm}$.

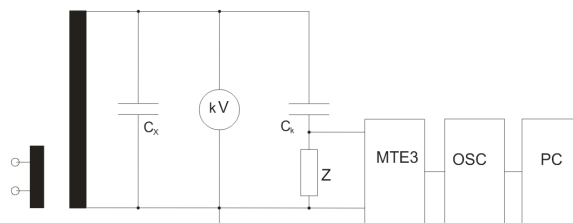


Obr. 1 Konfigurácia vysokonapäťových elektród

Usporiadanie meracieho pracoviska

Samotné meranie čiastkových výbojov bolo vykonané pomocou priamej metódy so sériovým zapojením meracej impedancie a väzobného kondenzátora podľa schémy

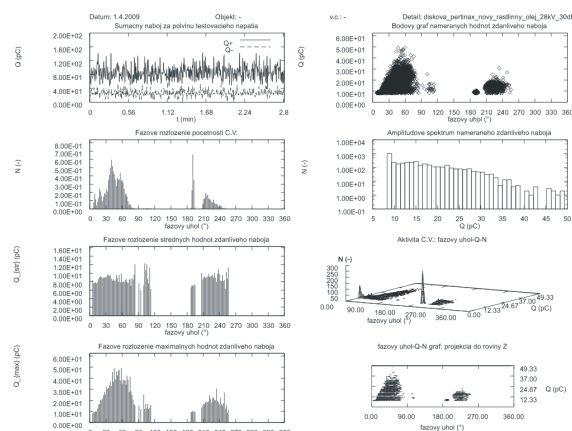
zapojenia na obrázku (Obr. 2). Princíp tejto metódy je popísaný v norme IEC 60270.



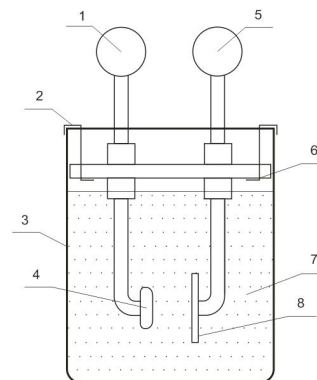
Obr. 2 Schéma meracieho obvodu čiastkových výbojov [4]

Čiastkové výboje ktoré vznikajú na meranom objekte C_x vo forme prúdových impulzov sú pomocou meracej impedancie Z premenené na napäťové impulzy, ktoré sú spracovávané pomocou meracieho prístroja MTE3, ktorý je schopný zachytiť a zobrazit čiastkové výboje s rôznymi amplitúdami v závislosti od nastavenej citlivosti snímania a priradiť ich príslušnému fázovému uhlu. Tieto sú na výstupe odovzdávané digitálnemu osciloskopu OSC, ktorý dokáže snímané impulzy uložiť do pamäte. Tento osciloskop funguje tiež ako A/D prevodník a spracované údaje odosiela do osobného počítača, kde sú na základe vhodnej kalibrácie spracované pomocou programu vytvoreného v prostredí HP VEE. Úlohou programu je zhromažďovať dáta a vhodným spôsobom ich ukladať na pamäťové médium. Tieto dáta sú neskôr vhodne spracované do konečnej podoby (Obr. 3).

Meraný objekt C_k pozostáva zo sklenenej nádoby naplnenej olejom, vysokonapäťovej elektródy a pertinaxovej bariéry, ktorá je spojená s nízkonapäťovou elektródou, teda so zemou (Obr. 4).



Obr. 3 Grafické vyhodnotenie merania čiastkových výbojov



1 - vn kontakt, 2 - upevňovacie svorky, 3 - sklenená nádoba, 4 - vn elektróda, 5 - kontakt elektródy na zemiacom potenciáli, 6 - izolačná podložka, 7 - transformátorový olej, 8 - bariéra

Obr. 4 Schéma meraného objektu

Postup merania

Po aplikácii jednej z vysokonapäťových elektród a umiestnení do meranej vzorky oleja sa na meranom objekte nastavila vzdialenosť $l = 0\text{mm}$, takže vysokonapäťová elektróda sa úplne dotýkala bariéry. Na vysokonapäťovú elektródu bolo privádzané napätie, ktoré sa postupne zvyšovalo. Po dosiahnutí zápalného napätia, ak hodnota napätia nebola celočíselným násobkom 2kV, sa toto napätie zdvihlo na spomínanú hodnotu. Teda ak zápalné napätie bolo napr. 13kV, nastavilo sa na 14kV a pre danú hodnotu sa spustilo meranie, ktoré trvalo 180 sekúnd. Po ukončení merania sa napätie ďalej zvyšovalo s krokom 2kV až po hodnotu 30kV. Po každom zvýšení napätia sa vykonalo meranie, pričom bolo potrebné dbať na vhodné nastavenie citlivosti prístroja a nemu odpovedajúce nastavenie programu. Po dosiahnutí a zmeraní napätia pri 30kV, ak to pomocou spomínaných prístrojov bolo možné, zvýšila sa vzdialenosť na $l = 1\text{mm}$ a celý proces sa opakoval. Po zmeraní poslednej vzdialenosti $l = 5\text{mm}$ sa vymenila elektróda a celý proces sa opakoval od začiatku. Takto sa meranie zopakovalo pre všetky druhy vyššie spomenutých elektród.

Po ukončení meraní pre všetky spomínané elektródy pre konkrétnu vzorku oleja sa meracia nádoba vyprázdnila a očistila technickým benzínom a následne teplou vodou a nechala sa sušiť minimálne 24 hodín. Po naliatí novej vzorky oleja, sa táto opäť nechala odstáť minimálne 24hodín, aby sa z nej uvoľnili vzduchové bublinky, poprípade, aby sa mohli usadiť prípadné mikroskopické tuhé nečistoty. Po výmene vzorky oleja sa vymenila rovnako pertinaxová bariéra, pričom pre každú z troch vzoriek oleja bola bariéra technicky identická.

Štatistické vyhodnotenie merania

Po ukončení jednotlivých meraní sa namerané dáta uchovávali v osobnom počítači, pomocou vopred pripraveného programu, ktorému boli pred každým meraním zadané informácie o meranej vzorke, kvôli prehľadnosti nameraných výsledkov a citlivostí, kvôli technickému spracovaniu nameraných výsledkov pomocou vopred vykonanej a zadefinovanej kalibrácie. Tieto dáta boli transformované do konečnej podoby, ktorej výsledkom je osem grafov pre každé napätie jednej zo štyroch elektród, jednej z troch vzoriek olejov pre každú z troch vzdialeností.

Sú v nich zhrnuté základné informácie o výbojovej činnosti, teda základné parametre čiastkových výbojov. Parametrami, ktoré nám najviac povedia o výbojovej činnosti sú:

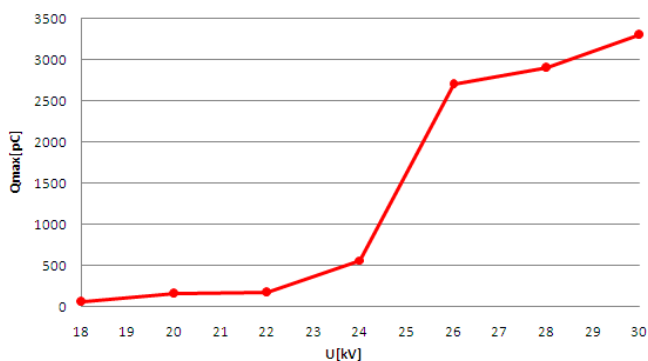
- maximálna hodnota náboja,
- početnosť výbojov,
- fázové rozloženie výbojov,
- sumačný náboj.

Preto boli do tabuliek štatisticky spracované práve tieto parametre, spolu s informáciou o hodnote zápalného napätia, ktorá je rovnako veľmi dôležitým parametrom pri porovnávaní jednotlivých vzoriek olejov. Jednotlivé parametre sú zapísané v tabuľkách (Tabuľka 1 – 3) pre každú vzorku oleja zvlášť. Porovnávacie grafy sú zostrojené pre zápalné napätia a maximálne hodnoty náboja výbojovej činnosti kvôli čo najjednoduchšiemu porovnaniu jednotlivých olejových vzoriek.

Tabuľka 1. Vyhodnotenie parametrov výbojovej činnosti pre nový minerálny olej ITO 100

Nový minerálny olej ITO 100 (d = 0mm)			
$U_{\text{poč}}[\text{kV}]$		18	
$Q_{\text{max}}^{+/-}[\text{pC}]$	18kV	50	
	20 kV	155	120
	22 kV	170	140
	24 kV	560	
	26 kV	2700	
	28 kV	2900	
	30 kV	3300	
$N_{\text{max}}^{+/-}[-] / \varphi [^\circ]$	18kV	0,75/10	0,6/195
	20 kV	0,3/35	0,26/210
	22 kV	0,57/30	0,11/230
	24 kV	0,5/35	0,36/230
	26 kV	0,19/40	0,25/215
	28 kV	0,25/35	0,21/215
	30 kV	0,17/45	0,19/215
$Q_{\text{sum}}^{+/-}[\text{pC}]$	18kV	100	120
	20 kV	420	300
	22 kV	540	380
	24 kV	2000	2000
	26 kV	4300	4000
	28 kV	5600	5600
	30 kV	6000	7000
$(\varphi_1 - \varphi_2)^{+/-} [^\circ]$	18kV	10-120	180-310
	20 kV	25-115	180-305
	22 kV	350-120	180-300
	24 kV	5-130	185-290
	26 kV	30-110	110-240
	28 kV	30-120	210-315
	30 kV	25-70	210-310

Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napäťových hladín pre nový olej ITO 100

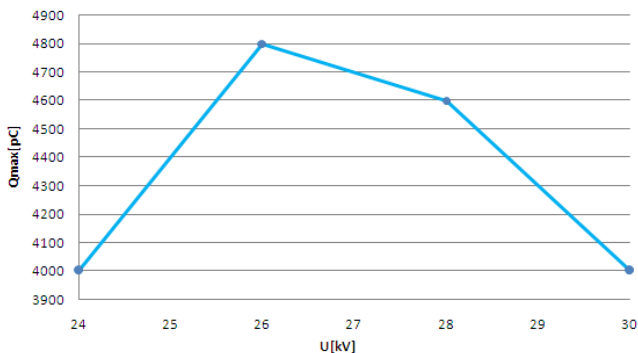


Obr. 5 Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napäťových hladín pre nový minerálny olej ITO 100

Tabuľka 2. Vyhodnotenie parametrov výbojovej činnosti pre zostarnutý minerálny olej ITO 100

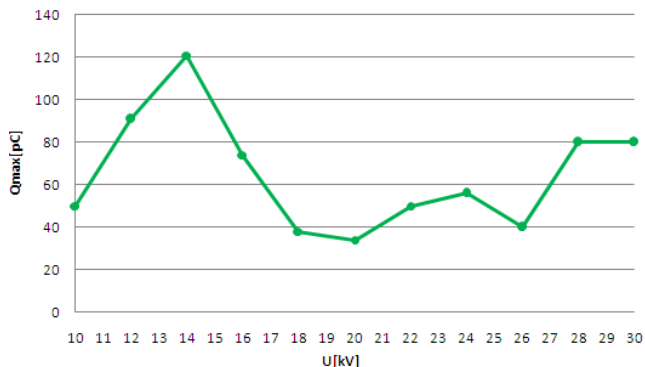
Zostarnutý minerálny olej ITO 100 (d = 0mm)			
$U_{\text{poč}}[\text{kV}]$		24	
$Q_{\text{max}}^{+/-}[\text{pC}]$	24 kV	3000	4000
	26 kV	2800	4800
	28 kV	2900	4600
	30 kV	2400	4000
	30 kV	2400	4000
$N_{\text{max}}^{+/-}[-] / \varphi [^\circ]$	24 kV	0,16/50	0,21/240
	26 kV	0,5/40	0,26/240
	28 kV	0,33/40	0,33/230
	30 kV	0,2/40	0,33/240
	30 kV	0,2/40	0,33/240
$Q_{\text{sum}}^{+/-}[\text{pC}]$	24 kV	6000	8000
	26 kV	5500	8000
	28 kV	6000	8100
	30 kV	3500	7300
	30 kV	3500	7300
$(\varphi_1 - \varphi_2)^{+/-} [^\circ]$	24 kV	40-80	225-255
	26 kV	30-75	220-260
	28 kV	30-75	220-255
	30 kV	30-70	225-260
	30 kV	30-70	225-260

Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napätových hladín pre zostarnutý olej ITO 100



Obr. 6 Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napätových hladín pre zostarnutý olej ITO 100

Závislosť maximálnej amplitúdy náboja od jednotlivých napätových hladín pre rastlinný olej Raciol



Obr. 7 Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napätových hladín pre olej Raciol

Tabuľka 3. Vyhodnotenie parametrov výbojovej činnosti pre rastlinný olej Raciol

Rastlinný olej Raciol (d = 0mm)			
U _{poč} [kV]		10	
Q _{max} +/- [pC]	10 kV	50	35
	12 kV	91	18
	14 kV	121	0
	16 kV	74	0
	18 kV	38	20
	20 kV	33	34
	22 kV	19	50
	24kV	56	
	26 kV	40	
	28 kV	80	
30 kV	80		
N _{max} +/- [-] / φ [°]	10 kV	0,14/70	0,08/240
	12 kV	0,14/45	0,01/230
	14 kV	0,18/40	0
	16 kV	0,08/20	0
	18 kV	0,6/15	0,48/185
	20 kV	0,5/10	0,4/185
	22 kV	0,5/5	0,43/185
	24kV	0,59/10	0,55/190
	26 kV	0,63/5	0,6/190
	28 kV	0,18/30	0,12/230
30 kV	0,13/15	0,14/210	
Q _{sum} +/- [pC]	10 kV	80	60
	12 kV	160	15
	14 kV	240	0
	16 kV	120	0
	18 kV	75	41
	20 kV	53	53
	22 kV	41	75
	24kV	210	190
	26 kV	90	115
	28 kV	220	160
30 kV	400	460	
(φ ₁ - φ ₂) +/- [°]	10 kV	55-75	210-270
	12 kV	30-75	220-235
	14 kV	30-75	-
	16 kV	15-65	-
	18 kV	0-60	185-290
	20 kV	0-55	185-290
	22 kV	0-60	185-295
	24kV	5-100	190-310
	26 kV	340-90	190-300
	28 kV	20-135	200-290
30 kV	150-325	330-125	

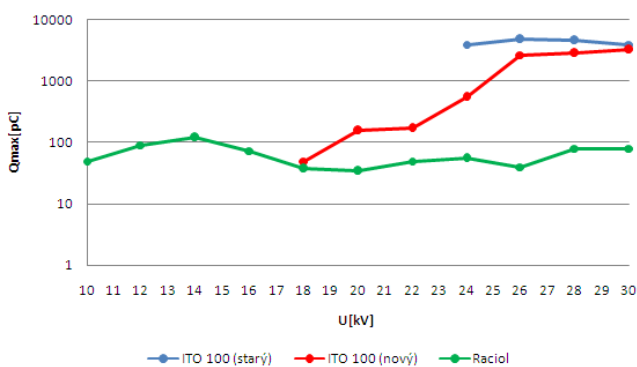
Porovnanie vzoriek meraných olejov

Ako parameter porovnania bola zvolená maximálna hodnota náboja výbojovej činnosti a zápalné napätie. Grafy sú zostrojené pre všetky tri vzorky oleja spoločne. Takto bolo možné dosiahnuť, lepšie porovnanie výsledkov a väčšiu priehľadnosť.

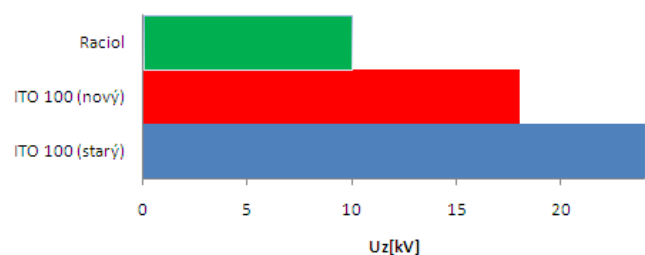
Tabuľka 4. Porovnanie zápalného napätia a maximálnej hodnoty náboja pre jednotlivé vzorky olejov

Vzorka oleja	ITO100 (starý)	ITO 100 (nový)	Raciol	
U _z [kV]	24	18	10	
Q _{max} [pC]	10kV	-	-	50
	12kV	-	-	91
	14kV	-	-	121
	16kV	-	-	74
	18kV	-	50	38
	20kV	-	155	34
	22kV	-	170	50
	24kV	4000	560	56
	26kV	4800	2700	40
	28kV	4600	2900	80
30kV	4000	3300	80	

Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napätových hladín



Obr. 8 Závislosť maximálnej hodnoty náboja od jednotlivých napätových hladín



Obr. 9 Porovnanie hodnôt zápalných napätí olejových vzoriek

Ako je možné všimnúť si z grafu (Obr. 9.), najnižšia hodnota zápalného napätia pri ktorej sa v oleji objavili prvé čiastkové výboje, bola nameraná pre rastlinný olej Raciol (10kV). Najodolnejšou vzorkou bol zostarnutý minerálny olej ITO 100. U nového minerálneho oleja ITO 100 sa prvé výboje objavili pri hodnote napätia (18kV).

V praxi a celkovo v oblasti techniky vysokého napätia, nie je rozdiel napätí 8kV výrazne podstatný vzhľadom na napätové hladiny s ktorými pracujú vysokonapäťové elektroenergetické zariadenia.

Dôležitým faktorom, ktorý rozhoduje o životnosti izolácie je výška maximálnej hodnoty náboja, ktorá je u nového minerálneho oleja takmer 30krát vyššia, ako u rastlinného oleja a ako je vidieť z grafu (Obr. 8), dalo by sa predpokladať, že pri ďalšom zvyšovaní napätia by sa u nového minerálneho oleja zvyšovala aj maximálna hodnota náboja, pričom u rastlinného oleja je možné si všimnúť približne konštantnú hodnotu náboja pri všetkých napätových hladinách.

Ak vezmeme do úvahy spomenuté fakty, dá sa povedať, že z hľadiska maximálnej hodnoty náboja výbojovej činnosti je rastlinný olej viac ako vhodný pre použitie vo vysokonapäťových elektroenergetických zariadení ako kvapalnú dielektrikum.

Záver

Táto práca sa zaoberá výbojovými javmi v izolácii olej – papier, s cieľom overiť nový fenomén použitia rastlinných olejov ako elektroizolačného média.

Výskum pozostával z merania čiastkových výbojov po bariere, za účelom napodobniť namáhanie oleja ako izolačného média, ktorý je v praxi namáhaný elektrickým poľom a časom podlieha starnutiu. Výsledky meraní boli použité na porovnanie jednotlivých vzoriek oleja medzi sebou s cieľom možnosti náhrady minerálnych olejov za oleje založené na rastlinnej báze, ktorých použitie by bolo veľmi vhodné na miestach, kde by únik izolačného média mohol spôsobiť zamorenie spodných vôd a okolia ako takého a v neposlednom rade by sa v budúcnosti mohol stať novým zdrojom pre výrobu elektroizolačných kvapalných dielektrík. Rovnako jeho manipulácia, skladovanie a likvidácia by bola jednoduchšia, bezpečnejšia a ekologicky a finančne menej náročná.

Z výsledkov merania čiastkovej výbojovej činnosti je vidieť, že z hľadiska maximálnej hodnoty náboja, ale aj zápalného napätia rastlinný olej zďaleka nezaostáva za minerálnymi olejmi, ale naopak, v niektorých prípadoch vykazuje ešte lepšie vlastnosti

Táto práca by mohla byť podnetom pre prehĺbenie výskumu v danej problematike, ktorá je doposiaľ len veľmi málo preskúmaná a dôkazom, že sa nejedná len o precenený pokus nového ekologického fenoménu.

Literatúra

- [1] Goňo, R., Rusek, S., Král, V., Krátký, M.: Reliability Analyses used by Maintenance. In International Conference POWER AND ENERGY SYSTEM AsiaPES 2008, Langkawi, Malaysia. Ed. K.M. Nor, Calgary, Alberta:ACTA Press, 2008, vol. 2008, 118 - 123, IASTED, ISBN CD: 978-0-88986-732-1
- [2] Kolcun M. et al. Elektrárne. Technická univerzita v Košiciach. Košice, 2009. ISBN 80-8073-704-5.
- [3] MARTON, Karol: K fyzike čiastkových výbojov v kombinácii kvapalných a pevných dielektrík, Publikácia ČSVTS: Tekuté izolanty a dielektriká v elektrotechnike, Dom techniky ČSVTS Bratislava, Bratislava, 1980
- [4] Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník: Laboratórny výskum výbojovej činnosti v modeloch s kombinovanou izoláciou olej - papier, Publikácia TUKE: Starnutie elektroizolačných systémov, 4/2008. Dostupné na internete: <http://web.tuke.sk/fei-kee/jses/uploads/File/jses-04-2008-07.pdf>
- [5] MARCI, M.: Meranie výbojovej činnosti v kombinovanej izolácii olej – papier, diplomová práca, Košice, 2009

Táto práca vznikla za podpory vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/0368/09.

Autori: Martin Marci, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: marci.martin@centrum.cz

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

Bystrík Dolník, Marián Holiš

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

Výskum výbojových procesov vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli

Abstrakt. Táto práca je zameraná na výskum charakteristík elektrického výboja v plynnom prostredí v silne nehomogénnom elektrickom poli, pričom ako plyn je použitý vzduch. Silne nehomogénne pole vytvára sa pomocou systému elektród typu hrot-doska. Elektrický výboj sa generuje pomocou generátora impulzov napätia s nastaviteľným trvaním čela a tyla impulzu.

Abstract. This article is focused on the research of characteristics of electrical discharges in gaseous environment in strong non-homogeneous electrical field. Insulating material we use in experiment is air in normal atmospheric conditions. To create non-homogeneous electrical field we use system of electrodes called rod-plane. Electrical discharge is generated by voltage pulse generator which can set up the duration of virtual front time and virtual time to half value on the tail of an voltage impulse.

Kľúčové slová: výboj, preskok, nehomogénne elektrické pole.
Keywords: discharge, flashover, non-homogenous electric field.

Úvod

Elektrina patrí medzi z hlavný zdroj energie potrebný pre život človeka. Dôležitý faktor, ovplyvňujúci prevádzku elektrického zariadenia, je životnosť izolačného materiálu. V prevádzke pôsobí na izoláciu viac činiteľov: prevádzkové napätie, rôzne druhy prepätí ako aj iné vonkajšie vplyvy. Preto treba skúmať vlastnosti nových izolačných materiálov a ich správanie v rôznych prostrediach a podmienkach.

Výbojové procesy v nehomogénnom elektrickom poli sú predmetom výskumu rôznych inštitúcií pracujúce v oblasti techniky vysokých napätí. Prvé experimentálne merania realizovali vedci už v polovici 20. storočia, ale jednako v tejto oblasti výskumu nenamerajú sa rovnaké výsledky, lebo meranie je vždy ovplyvnené rôznymi vplyvmi ako napr. počasie (atmosférické podmienky v laboratóriu), zapojenie samotného obvodu a pod.

Pre optimálny dizajn elektrického zariadenia treba brať do úvahy vplyv intenzity elektrického poľa na izoláciu počas namáhania impulzmi napätia. Do tejto kategórie patrí aj iskrisko, ktoré sa používa ako ochranné zariadenie voči prepätiam. V [1] autori uvádzajú výsledky z experimentov týkajúce sa vplyvu nehomogénneho elektrického poľa a polaritu impulzu napätia na hodnotu preskokového napätia. Hodnotu preskokového napätia iskriska ovplyvňuje aj koróna a predvýboje, pričom podľa [2] tieto sú závislé od tvaru priloženého napätia, usporiadania elektród iskriska, tvaru zakončenia elektród, atmosférických podmienok ako aj impedancie zdroja. Vplyv impedancie zdroja sa prejaví najmä vtedy, keď zdroj napätia je mäkký alebo celková kapacita záťaže – skúšaného objektu vrátane kapacitného deliča – je veľká (niekoľko stoviek pikofaradov a viac).

Teoretickými úvahami možno poukázať na dôležitú skutočnosť, že použitím mäkkého zdroja napätia, ktorý napája skúšaný objekt, sú predvýboje slabšie a tým aj namerané hodnoty preskokového napätia sú väčšie [3]. Vplyv predvýbojov na hodnotu preskokového napätia pre iskrisko typu hrot-doska a záporný atmosférický impulz napätia je podrobne opísaný v [4].

Aj keď na prvý pohľad sa zdá, že opísaná problematika výbojových procesov vo vzduchu je dominantná najmä pre techniku vysokých napätí, ktorá sa zaoberá prepätíovými javmi a meracími metódami, predsa je aktuálna aj pre ďalšie oblasti ako napr. problematika výbojových procesov vznikajúcich v plynnom vyplnených dutinách v pevných a kvapalných dielektrikách [5–7].

Experiment

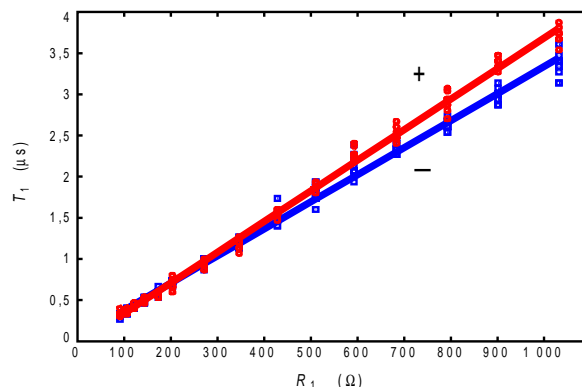
Samotný experiment zameraný na výskum výbojových procesov vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli bol rozdelený na tri fázy.

V prvej fáze zisťovali sa základné charakteristiky generátora impulzov napätia naprázdno, najmä závislosť trvania čela T_1 od veľkosti čelového odporu R_1 , pri kladnom ako aj zápornom napájanom jednosmernom napätí. Pre každú nastavenú hodnotu odporu R_1 realizovalo sa desať meraní. Celkovo bolo možné nastaviť pätnásť rôznych hodnôt odporu. Na meranie časového priebehu výstupného impulzu napätia použil sa digitálny osciloskop. Z časového intervalu medzi 90 %-nou a 30 %-nou hodnotou napätia v čele impulzu, ktorý nazývame aj čas rastu napätia, vypočítalo sa trvanie čela impulzu podľa rovnice

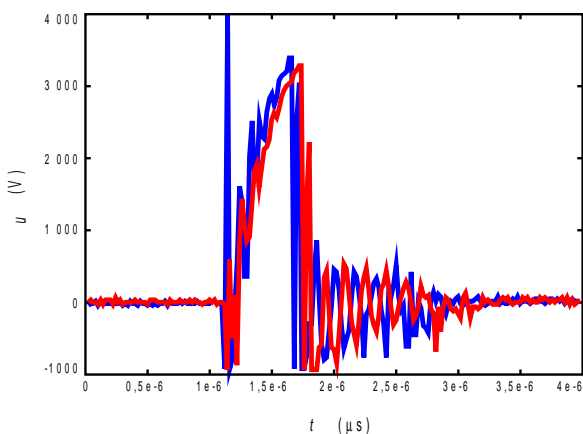
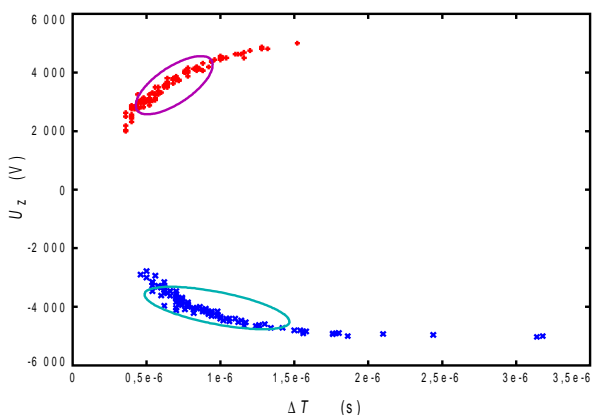
$$T_1 = 1,67 \cdot T \quad (1)$$

kde: T_1 – trvanie čela impulzu, T – čas rastu napätia.

Vzájomná súvislosť medzi veľkosťou čelového odporu R_1 a trvaním čela impulzu napätia T_1 je graficky zobrazená na obr. 1. Namerané výsledky poukazujú na to, že závislosť trvania čela impulzu napätia od čelového odporu je lineárna, pričom z obr. 1 je viditeľná vzájomná odchýlka, najmä pri väčších hodnotách odporu R_1 , medzi kladnou a zápornou polaritou výstupného impulzu napätia.



Obr. 1. Závislosť trvania čela T_1 výstupného impulzu napätia od odporu čelového rezistora R_1

Obr. 2. Závislosť impulzu napätia u na iskrisku od času t Obr. 3. Závislosť preskovového napätia U_z od trvania impulzu napätia ΔT , doskok $d=0,25$ mm, trvanie čela $T_1=1,18$ μ s

Druhá fáza experimentu bola zameraná na výskum charakteristík výbojov vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli. Nehomogénne elektrické pole vytvorilo sa pomocou dvoch elektród v usporiadaní hrot-doska. Medená doska štvorcového tvaru s plochou 1 cm^2 bola uzemnená, ihla s priemerom $0,64 \text{ mm}$ a veľmi malým polomerom zakrivenia reprezentovala hrot, na ktorý sa privádzali kladné resp. záporné impulzy napätia. Merania sa uskutočnili pri teplote vzduchu $t = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$.

Po pripojení elektród s usporiadaním hrot-doska ku obvodu nastavil sa rezistor R_1 na hodnotu odporu $346,2 \text{ } \Omega$ čomu zodpovedá trvanie čela $1,18 \text{ } \mu\text{s}$ ako pre kladnú tak aj pre zápornú polaritu impulzu napätia. Doskok medzi elektródami nastavoval sa na hodnoty od $0,15 \text{ mm}$ do $0,35 \text{ mm}$ s krokom $0,05 \text{ mm}$. Po priložení napájacieho jednosmerného napätia kladnej (zápornej) polarity do obvodu nastal preskok medzi elektródami.

Časová odozva obvodu merala sa pomocou digitálneho osciloskopa ETC M 621, pričom zaznamenávali sa tieto veličiny: amplitúda impulzu napätia $U_m = U_z$, trvanie čela impulzu napätia T_1 a trvanie impulzu napätia od začiatku až po okamih preskoku medzi elektródami ΔT ; časový priebeh (pozri obr. 2) impulzu napätia archivoval sa na záznamové médium. Pre nastavený doskok a polaritu impulzu napätia realizovalo sa desať meraní. Ďalší krok nášho experimentu spočíval v tom, že sa zmenila hodnota odporu rezistora R_1 na $1\,031,6 \text{ } \Omega$ čomu zodpovedá trvanie čela $3,71 \text{ } \mu\text{s}$ pre kladnú polaritu impulzu napätia a $3,35 \text{ } \mu\text{s}$ pre zápornú polaritu impulzu napätia. Postup merania bol ten istý, ako v prípade nastaveného rezistora $R_1 = 346,2 \text{ } \Omega$.

Ako príklad uvádzame v tabuľke 1 niekoľko vybraných nameraných hodnôt preskovového napätia a trvania impulzu napätia pre dva rôzne nastavené doskoky a impulz napätia s kladnou polaritou.

Tabuľka 1. Namerané hodnoty preskovového napätia a trvania impulzu napätia, kladná polarita, trvanie čela $1,18 \text{ } \mu\text{s}$

doskok $d=0,20 \text{ mm}$		doskok $d=0,15 \text{ mm}$	
$U_z \text{ (kV)}$	$\Delta T \text{ (}\mu\text{s)}$	$U_z \text{ (kV)}$	$\Delta T \text{ (}\mu\text{s)}$
3,468	0,60	3,468	0,54
3,250	0,52	3,218	0,58
3,375	0,58	3,406	0,58
3,750	0,70	3,437	0,56
3,562	0,66	3,468	0,60
3,531	0,62	3,781	0,70
3,468	0,56	3,843	0,68
3,625	0,68	3,937	0,72
3,312	0,56	3,781	0,72
3,437	0,60	3,437	0,58

Tabuľka 2. Namerané minimálne a maximálne hodnoty preskovového napätia a trvania impulzu napätia pre obidve polaritu, $T_1=1,18 \text{ } \mu\text{s}$, doskok $d=0,25 \text{ mm}$

Minimálne hodnoty				Maximálne hodnoty			
$\Delta T \text{ (}\mu\text{s)}$		$U_z \text{ (V)}$		$\Delta T \text{ (}\mu\text{s)}$		$U_z \text{ (V)}$	
+	-	+	-	+	-	+	-
0,36	0,46	2 000	2 781	1,52	3,18	5 000	5 031

Tabuľka 3. Vypočítané štatistiky preskovového napätia a trvania impulzu napätia pre obidve polaritu, trvanie čela $1,18 \text{ } \mu\text{s}$, $d=0,25 \text{ mm}$

Štatistika	Kladná polarita		Záporná polarita	
	$\Delta T \text{ (}\mu\text{s)}$	$U_z \text{ (kV)}$	$\Delta T \text{ (}\mu\text{s)}$	$U_z \text{ (kV)}$
Minimum	0,360	2 000	0,460	2 781
Dolný kvartil	0,480	3 000	0,700	3 625
Medián	0,620	3 531	0,820	4 062
Horný kvartil	0,840	4 125	1,060	4 468
Maximum	1,520	5 000	3,180	5 031
Priemer	0,687	3 566	0,976	4 044
Štandardná odchýlka	0,261	721,2	0,491	561,8
Koeficient šikmosti	0,922	0,041	2,289	-0,084
Koeficient špicatosti	0,176	-0,918	6,395	-0,835

Tretia etapa experimentu spočívala v realizácii merania s väčším počtom nameraných údajov. Cieľom bolo ukázať, pri akom napätí U_z a trvaní impulzu napätia ΔT najčastejšie nastáva preskok pri zvolených parametroch obvodu. Trvanie čela impulzu napätia bolo nastavené na $1,18 \text{ } \mu\text{s}$ pre kladnú aj zápornú polaritu, doskok bol nastavený na $0,25 \text{ mm}$. Meranie realizované pre zápornú polaritu bolo modifikované s ihlou s priemerom $0,89 \text{ mm}$ pretože došlo k opotrebovaniu predtým použivanej ihly. Ako výstup vznikol štatistický súbor s väčším počtom údajov vhodný pre ďalšie spracovanie. Na obr. 3 je zobrazená grafická závislosť preskovového napätia od trvania impulzu napätia pre obidve polaritu impulzu napätia.

Diskusia k nameraným výsledkom

Z experimentálnych meraní zistilo sa, že najväčšie preskové napätie medzi elektródami dosiahlo hodnotu $5,06 \text{ kV}$ pre doskok $0,75 \text{ mm}$, zápornú polaritu impulzu napätia s trvaním čela $3,71 \text{ } \mu\text{s}$. Najmenšia hodnota preskovového napätia bola $1,687 \text{ kV}$ pre doskok $0,15 \text{ mm}$, kladnej polarite impulzu napätia s trvaním čela $3,71 \text{ } \mu\text{s}$. To potvrdzuje teóriu polaritného efektu. Najdlhší čas trvania impulzu napätia pri preskoku medzi elektródami hrot-doska sme zistili pre zápornú polaritu impulzu napätia, doskoku $0,75 \text{ mm}$ a trvaní čela impulzu $5,92 \text{ } \mu\text{s}$. Najkratšie, iba $0,4 \text{ } \mu\text{s}$, trval impulz napätia so zápornou polaritou, doskokom $0,15 \text{ mm}$ s trvaním čela impulzu $T_1=1,18 \text{ } \mu\text{s}$.

Po štatistickom spracovaní preskovových napätí (105 hodnôt s kladnou polaritou a 101 hodnôt so zápornou polaritou) pre trvanie čela impulzu $T_1=1,18 \text{ } \mu\text{s}$ a doskok

0,25 mm zistilo sa, že minimálna hodnota preskokového napätia s kladnou polaritou je 2 000 V, so zápornou polaritou 2 781 V. Najkratšie trvanie impulzu napätia pre kladnú resp. zápornú polaritu impulzu napätia je 0,36 μ s resp. 0,46 μ s. Maximálna hodnota preskokového napätia s kladnou polaritou je 5 000 V, so zápornou polaritou zasa 5 031 V. Najdlhšie trvanie impulzu napätia pre kladnú resp. zápornú polaritu impulzu napätia je 1,52 μ s resp. 3,18 μ s. Prehľad uvedených hodnôt je v tabuľke 2. V rovine $(\Delta T, U_z)$ sú hodnoty takmer rovnaké v intervaloch: 0,46–1,67 μ s pre trvanie impulzu a 2 781–4 690 V pre preskokové napätia oboch polarít.

V tabuľke 3 sú uvedené štatistiky preskokového napätia a trvania impulzu napätia pre oboje polarities; trvanie čela impulzu napätia je opäť 1,18 μ s a doskok $d=0,25$ mm. Z tabuľky vidno, že štatistiky: minimum, medián, maximum, dolný kvartil, horný kvartil a priemer pre záporný impulz napätia sú väčšie ako pre kladný impulz napätia. Na obr. 3 sú vyznačené plochy s väčšou hustotou pravdepodobnosti v tvare natočenej elipsy. Stred každej elipsy $S_e(\Delta T_{avg}, U_{zavg})$ je v bode, ktorý je určený ako priemerná hodnota z trvania impulzu napätia ΔT a priemerná hodnota z preskokového napätia U_z podľa rovnice

$$\Delta T_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (2)$$

$$U_{zavg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{zi} \quad (3)$$

kde: ΔT_{avg} – priemerná hodnota trvania impulzu napätia, U_{zavg} – priemerná hodnota preskokového napätia, n – počet prvkov, $i = 1, 2 \dots n$ – prirodzené číslo.

Hlavná poloosa elipsy je rovná štandardnej odchýlke trvania impulzu napätia, vedľajšia poloosa zasa štandardnej odchýlke preskokového napätia. Výpočet je urobený podľa známeho vzťahu

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

kde: s – štandardná odchýlka, x_i – i -ta hodnota štatistického súboru, \bar{x} – priemerná hodnota štatistického súboru, n – počet prvkov, $i = 1, 2 \dots n$ – prirodzené číslo.

Je na zváženie, aké veľké majú byť poloosi elipsy; v našom prípade je to jednonásobok štandardnej odchýlky zo štatistického súboru. Natočenie hlavnej poloosi oboch elíps je v smere aproximačnej priamky, ktorej koeficienty sú vypočítané pomocou metódy najmenších štvorcov.

Záver

Cieľom experimentu bol výskum výbojových procesov vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli. Výboje boli generované priložením atmosferického impulzu napätia s kladnou (zápornou) polaritou na elektródy s usporiadaním hrot-doska s doskokom v rozsahu 0,15–0,30 mm. Polomer zakrivenia hrotovej elektródy bol veľmi malý. Použité boli

impulzy napätia s trvaním čela 1,18 μ s, 3,71 μ s a 3,35 μ s.

Merania realizovali sa v laboratóriu techniky vysokých napätí pri normálnych atmosferických podmienkach: $t = 23$ °C, $p = 101,325$ kPa. Časový priebeh napätia na elektródach meral sa pomocou deliča napätia a digitálneho osciloskopa. Experiment mal tri etapy: v prvej etape zistili sa základné parametre impulzu napätia pre kladnú ako aj zápornú polaritu; v druhej etape merala sa hodnota preskokového napätia a trvanie impulzu napätia pre doskoky v rozsahu 0,15–0,30 mm s krokom 0,05 mm, s trvaním čela impulzu uvedenými vyššie pre oboje polarities; v tretej etape realizovali sa merania s väčším počtom nameraných údajov. Cieľom bolo ukázať, pri akom napätí a trvaní impulzu napätia ΔT najčastejšie nastáva preskok pri zvolených parametroch obvodu. Trvanie čela impulzu napätia bolo nastavené na 1,18 μ s pre kladnú aj zápornú polaritu, doskok bol nastavený na 0,25 mm.

Celkovo bolo štatisticky spracovaných 105 nameraných hodnôt s kladnou polaritou a 101 nameraných hodnôt so zápornou polaritou. Porovnávali sa vypočítané štatistiky pre oboje polarities impulzu napätia. Zistilo sa, že hodnoty štatistik pre záporný impulz napätia sú väčšie ako pre kladný impulz napätia, čo potvrdzuje vplyv polaritného javu na výbojové procesy v nehomogénnom elektrickom poli vo vzduchu.

Literatúra

- [1] Feser, K.: Breakdown Behaviour of Air Spark-Gaps with Non-Homogeneous Field at Bias Voltages. In *Bulletin ASE* [on-line]. [citované 29. apríla 2009] Dostupné z <<http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-08.pdf>>
- [2] Feser, K.: Influence of corona discharges on the breakdown voltage of airgaps. In *Proc. IEE*, roč. 118, č. 9, sept. 1971, s. 1309–1313 [on-line]. [citované 29. apríla 2009] Dostupné z <<http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-11.pdf>>
- [3] Feser, K.: Influence of the source impedance on the breakdown behaviour of air spark-gaps. In *Osobitný výtlačok z ETZ-A*, s. 495–500 [on-line]. [citované 29. apríla 2009] Dostupné z <<http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-10.pdf>>
- [4] Feser, K.: Influence of the Pre-Discharges on Breakdown Behaviour of the Negative Rod-Plane Spark-Gap at Standard 1,2/50 Impulse Voltages. In *Elektrotechnik und Maschinenbau*, roč. 88, č. 8, 1971, s. 347–352 [on-line]. [citované 29. 04. 2009] Dostupné z <<http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-09.pdf>>
- [5] Petráš, J.: Partial discharge acoustic emission signal analysis. In: *Przeglad Elektrotechniczny Konferencje*. 2007, roč. 5, č. 3, s. 177–179. ISSN 1731-6103
- [6] Kolcunová, I., Cimbala, R., Kurimský, J.: Porovnanie technologických postupov pri výrobe cievok elektromotorov. In: *Výrobné inžinierstvo*. 2008, roč. 7, č. 3, s. 41–44. ISSN 1335-7972.
- [7] Džmura, J., Petráš, J., Balogh, J.: Partial discharge measurements using acoustic methods. In: *Electrotechnica, Electronica, Automatica*. 2008, roč. 56, č. 4, s. 10–12. ISSN 1582-5175

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.

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

Peter Semančík, Roman Cimbala

Dept. of Electric Power Engineering, FEI TU of Košice, Slovak Republic

Diagnostic of Transformer Oils using Thermal – Oxidation Stability Method

Abstract. This paper deals with the diagnostic method thermal – oxidation stability of transformer oils. It describes the principle test of method as a preparation of experiment. Two samples were used for the transformer oil experiment.

Keywords: Oxidation stability, oil life-time, dielectric dissipation factor, ČEZ – ORGREZ test method, transformer oil, diagnostics.

Introduction

Among material used in electrical transformers, transformer oil has special state. It is not only for its extraction, but also for several using like insulation or coolant. Insulating oils should have stable high-quality properties, not only in the original state, but also during the up time in operation. The stability of insulating oils has an elementary meaning during operation, because they work under high temperatures usually by the presence of oxygen, so they should be oxidation resistant.

Phenomena, which controlled natural oil toward change, chemical alternatively electric facilities in working condition, and which they can subject cut-down safety in service facilities, are called ageing process.

Speed ageing process of transformer oil can be affected by temperature (growth temperature about 8 till 10 K will cause doubling velocity of ageing process) and catalyzer (especially copper and iron).

There are several diagnostic methods, which deal with actual problems of insulating transformer oils.

The properties of insulating oil and measuring methods e.g. (STN EN 60296):

- viscosity (ISO 3104, IEC 61868),
- water content (IEC 60814),
- dielectric dissipation factor (DDF), (IEC 60247, IEC 61620 at 90 °C),
- oxidation stability (IEC 61125, method C),
- antioxidant additive content (IEC 60666),
- interfacial tension (IFT), (ISO 6295),
- breakdown voltage (IEC 60156).

This paper describes one of the test methods. Diagnostic methods are thermal – oxidation stability of insulating fluids by the ČEZ– ORGREZ test method [1].

Diagnostic method

Oxidation stability is an indicator that allows us to set stricter limits for oils in special applications. In some countries, stricter limits or other requirements and tests are imposed.

During the test, the sample of new or reclaimed oil is exposed to conditions simulating a load application, similar to the load during operation. Individual factors are simplified. High-quality parameters are periodically monitored until sediments are formed and the oil is no longer usable.

Laboratory instruments, devices and chemicals [1]

- glass sulphonation flask, 6000 ml,

- separation trap 250 ml,
- tube immune temperatures and oils (teflon, silicon),
- air compressor,
- laboratory drying chamber with temperature regulation (100 °C),
- plastic component syringe for taking samples (150 ml),
- clean copper wire without surface treatment (unvarnished),
- analytical scales, precision 0,001 g,
- measuring cylinder, 2000 ml.

Preparation of the experiment and testing process [1]

Before the test begins, the initial high-quality parameters are determined and 500 ml is taken away from the oil sample.

A measuring cylinder is used to measure out 5000 ml of oil, marked out for testing, into the sulphonation flask.

The required quantity of copper wire will be added to the oil – 10 g (quantity cca. 0,1 cm²/g of oil) to each liter of oil.

The flask with oil will be put into the laboratory drying chamber, at a temperature of 100 °C.

Using tubes for example made of glass, air will be conducted into the samples to ensure delivery of condensed fluid into the separation trap outside the drying chamber.

A control test and verification of the temperature regulated in the drying chamber will be carried out every day.

Some of the samples will be removed at weekly intervals to determine the values of selected parameters (acidity, interfacial tension and content of inhibitors – 1x 168 hours, dielectric dissipation factor – 1x per 336 hours).

The test will be completed when sediments insoluble in n-heptane are present or when there are no more samples for continuing the test or after 840 hours of testing.

Experimental results

The thermal – oxidation stability test of insulating oil was made using the ČEZ – ORGREZ method [1].

Two samples of power transformer insulating oil were used.

Further information about the sample is confidential to the manufacturer and to the plant operator. During the experiment the data interpreted in (Table 1, 2) were measured [4].

The principle of the test is based on the air oxidation of the measured oil with added accelerator at a given temperature.

Tab. 1 Values measured by the ČEZ – ORGREZ test method [4] for sample no. 1

Test duration (h)	tgδ (x10 ⁻³)			ε _r (-)			ρ (GΩ m)			ČK	σ	Q _i	Sediments insoluble in the n-heptans
	20°C	70°C	90°C	20°C	70°C	90°C	20°C	70°C	90°C				
0	0,001	0,003	0,008	2,200	2,125	2,094	65789,4	59210,5	25000,0	0,003	58	0,38	-
168										0,004	56	0,39	-
336	0,009	0,050	0,063	2,184	2,136	2,104	25165,0	13228,0	1937,0	0,007	55	0,39	-
504										0,007	55	0,38	-
672										0,007	55	0,38	-
840	0,002	0,007	0,015	2,203	2,146	2,122	6788,0	2819,6	1730,2	0,004	54	0,38	-
1008										0,004	54	0,36	-
1176										0,005	52	0,33	-
1344	0,007	0,012	0,023	2,196	2,136	2,105	4602,0	1260,2	945,1	0,004	52	0,33	-
1512										0,008	51	0,30	-
1680										0,008	51	0,28	-
1848	0,006	0,028	0,063	2,201	2,131	2,100	1429,1	714,5	321,5	0,007	51	0,25	-
2016										0,009	50	0,22	-
2184										0,008	49	0,21	-
2352	0,088	0,112	0,129	2,187	2,141	2,113	1421,2	387,6	193,8	0,008	47	0,21	-
2520										0,008	48	0,16	-
2688										0,009	47	0,15	-
2856	0,082	0,136	0,145	2,199	2,156	2,112	1503,5	294,1	130,7	0,010	47	0,11	-
3024										0,007	47	0,12	-
3192										0,004	46	0,08	-
3360	0,158	0,293	0,311	2,196	2,127	2,099	1216,6	425,8	121,6	0,007	46	0,08	-

Tab. 2 Values measured by the ČEZ – ORGREZ test method [4] for sample no. 2

Test duration (h)	tgδ (x10 ⁻³)			ε _r (-)			ρ (GΩ m)			ČK	σ	Q _i	Sediments insoluble in the n-heptans
	20°C	70°C	90°C	20°C	70°C	90°C	20°C	70°C	90°C				
0	0,000	0,001	0,008	2,242	2,183	2,160	52604,4	14466,2	7233,1	0,005	58	0,34	-
168										0,007	52	0,30	-
336	0,018	0,236	0,570	2,207	2,138	2,118	2900,0	236,0	105,0	0,003	51	0,27	-
504										0,003	50	0,24	-
672										0,005	50	0,20	-
840	0,033	0,320	0,673	2,203	2,138	2,120	1300,0	217,0	98,0	0,003	50	0,17	-
1008										0,008	49	0,14	-
1176										0,009	48	0,14	-
1344	0,070	1,206	2,878	2,213	2,143	2,125	434,0	46,0	19,0	0,011	48	0,10	-
1512										0,021	47	0,08	-
1680										0,026	44	0,06	-
1848	0,535	6,420	11,440	2,241	2,170	2,149	35,0	5,0	2,0	0,153	30	0,00	presence

ČK – mg KOH/g,

σ – mN/m,

Q_i – % wt.,

– sample filtered using white tape filter paper (6 – 6,8 μm) before the measurement.

The test was carried out under the following conditions [1]:

1. temperature 100 °C,
2. volume of oil samples 5 l,
3. bubbling of oil dried and refined by air in larger amounts than are needed for reaction of oil with the air,
4. accelerator: copper wires in quantities cca 0,1 cm²/g measured oil.

The separation trap, placed outside the drying chamber, gathers the condensed fluid released during the test.

The values measured in dependency on the length of test periods are recorded in tables (Table 1, 2), which show the degradation process of the oil until the moment when sediments insoluble in n-heptane form or until the test is terminated.

Monitored parameters [2-5]:

tgδ – dielectric dissipation factor,

ε_r – dielectric permittivity,

ρ – volume resistivity,

ČK – determination of acidity,

σ – determination of interfacial tension of oil against water,

Q_i – contents of inhibitors.

The graphic dependencies in Fig. 1 – Fig. 5 were made from the measured values monitoring the individual parameters.

Figure 1 shows the dielectric dissipation factor as a function tgδ=f(t) at different temperatures (20 °C, 70 °C, 90 °C). The dependence of tgδ rises most at the temperature 90 °C in comparison with temperature 20 °C.

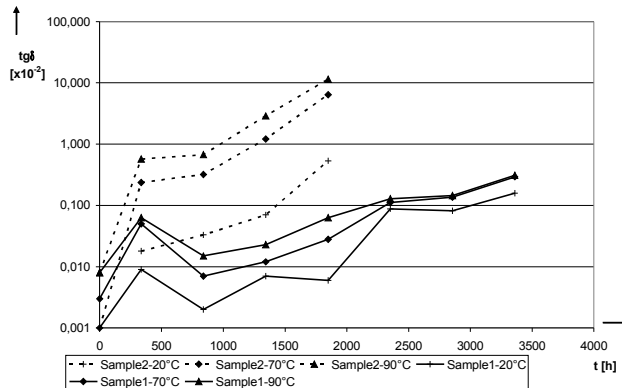


Fig. 1 Dependence of tgδ samples 1 – 2.

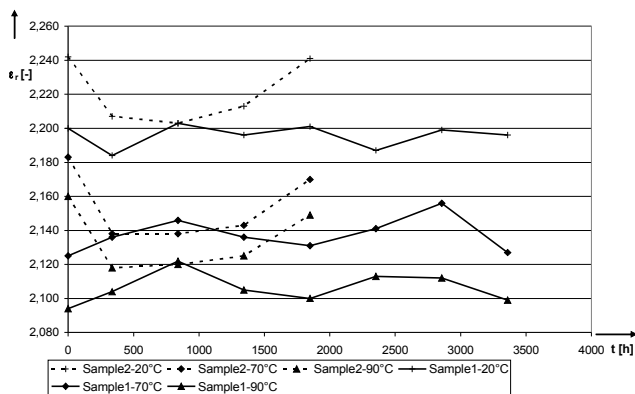


Fig. 2 Dependence of ϵ_r samples 1 – 2.

Figure 2 shows the dielectric permittivity as a function $\epsilon_r=f(t)$ at different temperatures (20 °C, 70 °C, 90 °C). The dependence of ϵ_r changes most at the temperature 20 °C in comparison with the temperature 90 °C. When comparing $tg\delta$ (90 °C) with ϵ_r (90 °C) we can see that the dependence of $tg\delta$ (90 °C) rises and dependence of ϵ_r (90 °C) changes minimally.

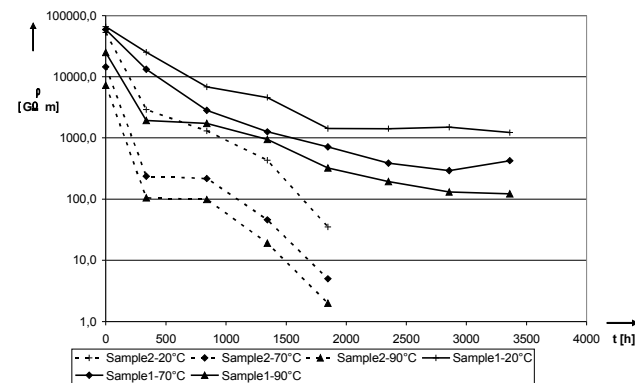


Fig. 3 Dependence of ρ samples 1 – 2.

Figure 3 shows the volume resistivity as a function $\rho=f(t)$ at different temperatures (20 °C, 70 °C, 90 °C).

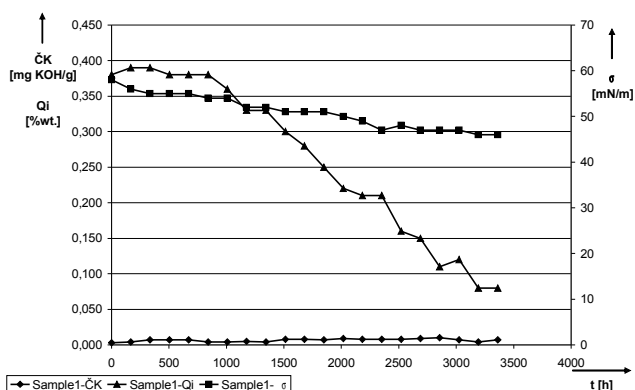


Fig. 4 Dependence of $\check{C}K$, Q_i , σ sample 1.

Figures 4 - 5 shows the $\check{C}K$, Q_i , σ as a function ($\check{C}K$, Q_i , σ)= $f(t)$. The dependence of $\check{C}K$ lightly rises and dependence of σ lightly decreases until the creation of sediments (that are insoluble in insulating oil), when process rapidly changes (growths, decreases). Dependence of Q_i decreases equally to the duration of sediments creation, which is insoluble in insulating oil.

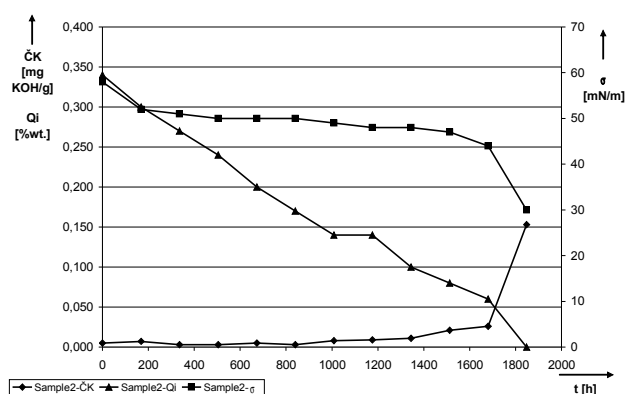


Fig. 5 Dependence of $\check{C}K$, Q_i , σ sample 2.

The graphic dependencies show degradation process of the oil until the moment when sediments insoluble in n-heptane form. Until the time of insulating oil degradation (Sample 2 \approx 1400 h) the dependencies of $tg\delta$, ϵ_r , $\check{C}K$, σ are changing minimally. In the next degradation process until the duration of sediments creation, which are insoluble in insulating oil, the dependencies and characteristic of insulating oil changing rapidly. The dependence of Q_i decreases equally are the duration of sediments creation, which is insoluble in insulating oil.

For the diagnostics of insulating oil degradation process, monitoring the parameter Q_i is necessary, because the dependence and gradient of the characteristics are changing equally during the whole degradation process. From this it is possible to follow the change of insulating oil properties, not only at the end of degradation process, but also at the beginning, in comparison with the other monitored parameters. During the degradation process of sample No.1 (Sample 1 = 3360 h) it has not come to the creation of sediments, which are insoluble in n-heptans, because there were no more samples for continuing the test.

Conclusion

The oxidation stability of oil is evaluated by period of time until sediments are soluble in the insulating oil (insoluble in the n-heptane), or by the creation of sediments that are insoluble in insulating oil. In the test of thermal-oxidation stability the submitted 2 samples of insulating oil degraded for sample 2 - 1848 hours, sample 1 - 3360 hours. This was documented by the presence of sediments insoluble in the n-heptanes except of sample 1. The thermal - oxidation stability test was carried out using the $\check{C}EZ$ - ORGREZ method.

References

- [1] SOP 2-32/72: The thermal - oxidation stability of insulating fluids by the CEZ ORGREZ test method, ORGREZ a.s., Brno, Czech Republic, 2004.
- [2] STN EN 60296: Fluids for electrotechnical applications. Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear. Slovak standard Institute, Bratislava, 2005.
- [3] $\check{C}SN$ EN 61125: Unused hydrocarbon-based insulating liquids. Test methods for evaluating the oxidation stability. Czech standards institute, 1996.
- [4] ORGREZ, a.s.: Protocol about measuring. Experiment of the insulating oil thermal - oxidation stability CEZ-ORGREZ method. ORGREZ a.s. Electrical Engineering Laboratory Division, Praha, 2006.
- [5] CEZ, a.s.: Prophylactic of mineral insulating oils. Company standard 00/08 rev0.

This work was supported by scientific Grant Agency of the ministry of Education of the Slovak Republic project VEGA No. 1/0368/09 and APVV-20-006005.

Autors: *Peter Semančík and Roman Cimbala, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University Košice, Slovakia, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Peter.Semancik@tuke.sk, Roman.Cimbala@tuke.sk*