

# ROZVOJ PRIERAZU V TRANSFORMÁTOROVOM OLEJI

## THE DEVELOPMENT OF BREAKDOWN IN TRANSFORMER OIL

Jozef Kúdelčík

*Elektrotechnická fakulta – Katedra fyziky  
Žilinská univerzita v Žiline, Veľký diel, 010 26 Žilina*

**Abstrakt** Podmienky, pri ktorých nastáva prieraz na rozhraní izolácií kvapaliny a materiálu, napríklad v transformátore, hrajú dôležitú úlohu pri projektovaní takýchto izolácií. Počiatočné štádia rozvoja prierazu sú vysvetlené na základe rozvoja streameru v kanálikoch nižšej hustoty. Celkový priebeh prierazu v transformátorovom oleji je možné interpretovať pomocou RLC obvodu a závislý na parametroch vonkajšieho obvodu.

**Summary** The conditions under which breakdown of composite liquid - solid insulation can be occurred, e.g. in transformer, play an important role in designing of such insulation. The initial state of breakdown development is explained based on development of streamers in cavitations. The whole breakdown development in transformer oil is represented by RLC circuit and it depends on the parameters of outer circuit.

### 1. ÚVOD

Kvapalné dielektriká sú vďaka svojim vlastnostiam užitočnejšie a efektívnejšie izolačné materiály ako pevné alebo plynné. Jedným z dôvodov je, že hustota kvapalného a pevného materiálu je obyčajne  $10^3$ -krát väčšia ako plynu a odtiaľ z Paschenovho zákona [1] vyplýva, že majú podstatne vyššiu dielektrickú pevnosť, rádu  $10^7$  V/cm. Taktiež, kvapalina rovnako ako plyn vyplní celý izolačný priestor a súčasne rozptyľuje teplo prúdením. Olej je 10 krát efektívnejší v celkovej schopnosti prestupu tepla v transformátore vzhľadom na vzduch alebo dusík. Kvapalné dielektriká sa používajú hlavne ako impregnačná látka vo vysoko napäťových káblach a kondenzátoroch i ako náplne do transformátorov, vypínačov okruhov atď. Ich využitie je tiež pri prestupe tepla v transformátoroch, zhašanií oblúka a pri vypínaní obvodov. Petrolejový olej (transformátorový olej) je najbežnejšie používané kvapalné dielektrikum. Nežiadúcim javom pri používaní kvapalných dielektrík vo veľmi vysokých poliach je prieraz. Cieľom výskumu v tomto článku je podrobnejšie sa zaoberať procesmi prebiehajúcimi pred vznikom a počas priebehu prierazu v kvapalných dielektrikách so zameraním sa na transformátorový olej ITO 100.

### 2. TEORETICKÁ ČASŤ

Na popis prierazu v kvapalných dielektrikách existujú dva základné teoretické modely: elektrónová a termálna teória. Podľa elektrónovej teórie sú voľné elektróny v kvapalnej fáze urýchľované silným elektrickým poľom. Urýchľované elektróny ionizujú zrážkami okolité molekuly, čo vedie k zvýšeniu počtu voľných elektrónov, t.j. ku vzniku elektrónovej lavíny a po prekročení ich kritickéj koncentrácie k jej prechodu

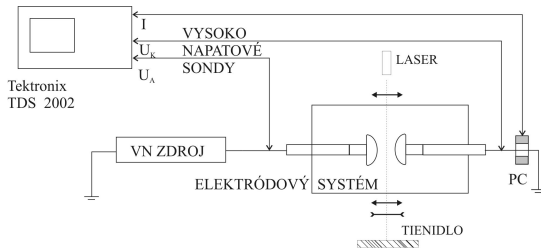
do streameru. Táto teória je takmer identická s teóriou vzniku streamerov v plynach a veľmi dobre vysvetľuje rozdielnu dĺžku streamerov pri kladnej a zápornej koróne, pozorovanú napr. v [2]. V termálnej teórii [3, 4] sa predpokladá, že elektrónové lavíny sa rozvíjajú v parách vzniknutých, alebo už predtým existujúcich bubliniek. Tieto bublinky vznikajú vďaka objemovému zahrievaniu kvapaliny – buď silným tokom iónového prúdu v dielektriku, alebo lokálnemu zahrievaniu prúdom elektrónov emitovaných poľom z mikroskopických nerovností na anóde. Prúdy presahujú hustoty  $1 \text{ A/cm}^3$  a energiu  $10^7 \text{ W/cm}^2$  [5]. Ani jeden z uvedených modelov však nedokáže popísať všetky javy pozorované v elektrických výbojoch, napr. rozdielnu rýchlosť šírenia sa streamerov pri kladnej a zápornej koróne. A preto tiež existujú „bublinové“ modely, v ktorých ionizácia a nárast prúdu začínajú v kvapaline a sprievodné zahrievanie vedie ku vzniku bubliniek. V týchto modeloch [6, 7, 8, 9] sa predpokladá, že termálne procesy sú dominantné pre časy  $\mu\text{s}$  a väčšie a pre relatívne slabé elektrické polia, zatiaľ čo elektrónové procesy hrajú dôležitejšiu úlohu pri kratších časoch a väčších poliach. Popri procesoch prebiehajúcich v priestore nesmieme zabudnúť aj na mechanizmy (Lippmannov jav, Augerov efekt), ktoré prebiehajú na rozhraní medzi kvapalinou a kovovými elektródami pri vysokom elektrickom poli [10].

Marton [11, 12] skúma tiež experimentálne tvorbu, resp. výstavbu elektrického kanála, ktorý tvorí dráhu elektrického prierazu. Rozpracoval elektro-fyzikálne zdôvodnenie výstavby vodivého kanála (prechod od streamerového výboja k výboju leaderovému) na báze časovej zmeny koncentrácie nosičov elektrického náboja v závislosti od polohy. Tieto javy študuje za súčasnej interakcie elektrického a magnetického poľa v prostredí jednosmernom aj striedavom (50 Hz). Vo svojich prácach poukazuje na tri definované etapy mechanizmu výboja v rámci pozorovaného intervalu 500 ns: predprierazový,

prieraz a postprierazový stav, ktorý má silne oscilačný charakter.

### 3. EXPERIMENTÁLNA APARATÚRA A VÝSLEDKY

Obrázok 1 predstavuje schematický náčrt experimentálnej aparatury, ktorý obsahuje vysokonapäťový jednosmerný zdroj TESLA BS 221, elektródový systém, elektrickú a optickú diagnostiku. Polgul'ové elektródy mali polomer 25 mm a ich vzdialenosť bola meraná s presnosťou 0.01 mm. Ako dielektrická kvapalina sa používal nový transformátorový olej - ITO 100. Aplikované napätie bolo merané jednou vysokonapäťovou sondou na anóde a druhou na katóde a prúd prostredníctvom Pearson cievky (110A) s časovým rozlíšením 20 ns. Priebeh prúdu a napätí bol zaznamenávaný pomocou 200 MHz digitálneho osciloskopu Tektronix TDS 2002. Laserové svetlo (10 mW, 650 nm) bolo fokusované spojnu šošovkou ( $f_1 = 7$  cm) do medzielektródového priestoru a ďalšou dvojicou šošoviek ( $f_1 = 7$  cm,  $f_2 = -20$  cm) na tienidlo. Výsledný obraz výbojovej medzery na tienidle bol zaznamenávaný pomocou CCD kamery a digitálneho fotoaparátu.



Obr. 1. Experimentálna aparatura  
Fig. 1. Experimental setup

Pri postupnom zvyšovaní napätia na elektródach možno od 20 – 30% hodnoty prierazného napätia pozorovať kanáliky prepojujúce elektródy, ktoré sú neustále v pohybe. Tvar takýchto kanálikov, osvetlených laserom a zachytených na tienidle pomocou sústavy šošoviek pri napätí 1,2 kV a vzdialenosti elektród 0,4 mm, je zobrazený na Obr.2.

Časový priebeh elektrických charakteristík prierazu je znázornený na Obr. 3. Priebeh prierazového prúdu možno popísať charakteristickým tlmeným sínusovým priebehom. Podobné priebehy prierazového prúdu v transformátorovom oleji meral tiež Marton [11, 12] s iným typom prúdovej sondy, vo vode Timoshkin [13] a vo vzduchu Kijonka [14]. Amplitúda a pozorovaná doba prúdu narastali s narastajúcim zápalným napätím. Meranie bolo uskutočnené tiež pre rôzne medzielektródové vzdialenosti (0.05, 0.15, 0.20 a 0.03 mm) [15, 16]. Bol pozorovaný podobný priebeh prierazového prúdu ako na Obr. 3. Z porovnania priebehu

prierazových prúdov pri rovnakom aplikovanom napätí, ale rôznej elektródovej vzdialenosti sa zistilo, že hodnoty prúdových impulzov a ich charakteristických hodnôt závisia hlavne na zápalnom napätí.



Obr. 2. Obraz výbojovej medzery pri aplikovanom napätí 1,2 kV a vzdialenosti elektród 0,4 mm.  
Fig. 2. The picture of discharge gap at the applied voltage 1,2 kV and gap distance 0,4 mm.

Priebeh prierazového prúdu má podobné charakteristiky, aké by sme mohli pozorovať v sériovom RLC elektrickom obvode [17]. Priebeh prúdu v takomto obvode sa dá popísať pomocou funkcie danej vzťahom:

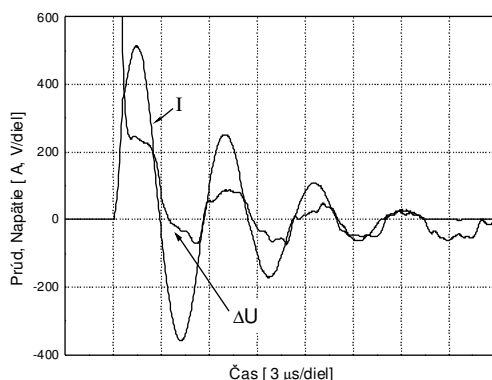
$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau} \sin(\omega t), \quad (1)$$

príčom odpovedajúce hodnoty R, L a C daného RLC obvodu sú vyjadrené na základe  $\tau$ ,  $\omega$ ,  $I_0$  a  $U_Z$  pomocou nasledovných vzťahov:

$$L = \frac{U_Z}{I_0 \omega}, \quad R = \frac{2L}{\tau}, \quad C = \frac{1}{L(\omega^2 + \tau^{-2})} \quad (2, 3, 4)$$

Z predpokladu, že RLC obvod môže reprezentovať priebeh prierazového prúdu, môžeme použiť vzťahy (2, 3, 4) k určeniu jeho zodpovedajúcich hodnôt: R, L a C. Namerané priebehy prierazového prúdu počas prierazu pri danom zápalnom napätí  $U_Z$  boli interpolované funkciou (1) v programe Origin, čoho výsledkom boli zodpovedajúce hodnoty funkcie:  $\tau$ ,  $\omega$  a  $I_0$ . Z analýzy vypočítaných príslušných hodnôt pre rôzne medzielektródové vzdialenosti a hodnoty zápalného napätia, pri ktorých nastal prieraz, sa zistilo, že vypočítaná kapacita C a indukčnosť L počas prierazu sú približne konštantné s hodnotami  $252 \pm 8$  nF,  $3,31 \pm 0.16$   $\mu$ H, v danom poradí. Vypočítaná hodnota odporu nebola konštantná

a klesala od  $4 \Omega$  po  $1 \Omega$  so stúpajúcim zápalným napätím.



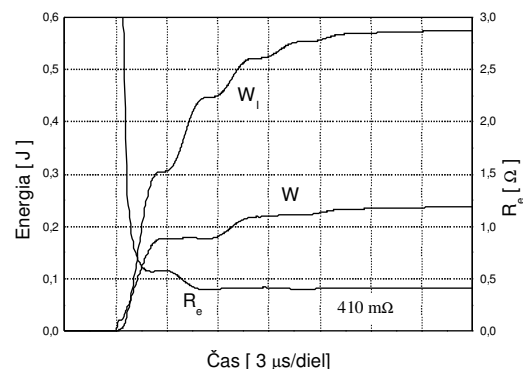
Obr. 3. Pribeh prirazového prúdu a napätia medzi elektródami pri zápalnom napätí 2810 V v ITO 100 a vzdialenosti elektród 0,2 mm.

Fig. 3. Development of breakdown current and voltage across gaps at voltage 2810 V in ITO 10 and gap distance of 0,2 mm.

Na základe predchádzajúcich výsledkov boli zmerané pomocou programovateľného RLCmetra (FLUKE PM6306) charakteristiky experimentálnej aparatury s olejom a prívodného vedenia. Z nameraných údajov vyplýva, že prívodné vedenie možno nahradiť sériovým obvodom  $R_V L_V$  a výbojku s olejom paralelným obvodom  $R_o C_o$ . Nameraná hodnota indukčnosti vedenia a kapacity oleja sa menila v rámci 10% pri zmene meracej frekvencie a zodpovedajúce hodnoty boli  $L_V = 2,75 \mu F$  a  $C_o = 4,2 pF$ . Hodnota odporu prívodného vedenia  $R_V$  sa menila okolo hodnoty  $4,5 \Omega$ , zatiaľ čo odpor oleja  $R_o$  sa výrazne menil s meracou frekvenciou, od nemeateľnej hodnoty klesal k hodnote niekoľkých Ohmov pri frekvencii 1MHz.

Na Obr.3 je tiež znázornený pribeh napätia medzi elektródami  $\Delta U$  - toto napätie zodpovedá rozdielu napätia na anóde a katóde. Z priebehu napätia je zrejmé, že napätie po priraze pri zápalnom napätí 2810 V prudko poklesne a opäť s tlmenými osciláciami klesá na nulu na rovnakom časovom intervale ako prirazový prúd. Z porovnania priebehu napätia medzi elektródami voči napätiam na jednotlivých elektródach bol pozorovaný fázový posun zhruba  $90^\circ$ . Zotavenie zdroja po priraze a opätovný rast napätia na pôvodnú hodnotu, pri ktorej nastal priraz, trvá i niekoľko desiatok sekúnd.

Na základe práce Kijonka [14] môže byť vypočítaná energia prirazu v transformátorovom oleji a zodpovedajúca hodnota výbojového kanála  $R_e$ . Zodpovedajúce hodnoty energie prirazu  $W$ , vypočítané integráciou meraných hodnôt prirazového prúdu a napätia (Obr. 3), a hodnoty energie prúdu  $W_I$ , vypočítané ako integrál štvorca zmeraného prirazového prúdu, ako funkcia času sú zobrazované na Obr. 4.



Obr. 4. Hodnoty energie prirazu  $W$ , energie prúdu  $W_I$  a zodpovedajúce hodnoty odporu výbojového kanála  $R_e$  ako funkcia času pre zápalné napätie 2550 V.

Fig. 4. Values of breakdown energy  $W$ , values of current energy  $W_I$  and corresponding values of resistance of breakdown  $R_e$  as a function of time for the voltage 2550 V.

Zodpovedajúca hodnota odporu prirazového kanála vypočítaná ako  $W/W_I$  je tiež zobrazená na tomto obrázku. Z jeho priebehu možno vidieť, že hodnota odporu sa ustáli asi po  $2 \mu s$  na hodnote  $410 m\Omega$  a je menšia ako hodnota odporu  $R$  vypočítaná z priebehu prirazového prúdu. S narastajúcou hodnotou zápalného napätia hodnota odporu  $R_e$  výbojového kanála klesala.

#### 4. DISKUSIA

Pri postupnom zvyšovaní jednosmerného napätia na elektródach pozorujeme viacero procesov a na základe získaných výsledkov sa dá rozvoj prirazu popísať nasledovne. Pri pomalom zvyšovaní a nízkom jednosmernom napätí pozorujeme rôzne útvary, hlavne guľovitého tvaru a rôznej veľkosti, prechádzajúce od jednej elektródy k druhej. Jedná sa o presun nábojových zhlukov a možných nečistôt vplyvom elektrického poľa. Pri dosiahnutí 20 – 30 % hodnoty prirazného napätia sa objaví kanálik s priemerom niekoľko mikrometrov, ktorý premoštuje obidve elektródy. Tento kanálik nie je stabilný, mení svoju polohu a rozmer, ale nezaniká. S ďalším zvyšovaním napätia počet kanálikov rastie (viď Obr. č.2), pričom ich tvar tiež nie je stály, menia sa a neustále sú v pohybe. Počet a rozloženie kanálikov závisí v značnej miere od vzdialenosti elektród a aplikovaného napätia. Pri väčšej vzdialenosti elektród sú viac sústredené okolo osi elektród. Tieto kanáliky sú pozorované vďaka svojej nižšej hustote oproti okolitému prostrediu, čo spôsobuje rozptyl svetla laseru na danom rozhraní. Pri napätí vyššom ako je prirazné napätie sú kanáliky veľmi zhustené a pozorujeme priraz. Priraz je sprevádzaný mnohými procesmi ako sú: zvukový efekt, svetelný záblesk, tlaková a akustická vlna, prirazový prúd prechádzajúci obvodom a ďalšie. Po priraze pozorujeme množstvo bublín rôzneho rozmeru. Niekedy je následne po priraze

pozorovaný i druhý prieraz podporený prítomnosťou silného priestorového náboja.

Teraz si podrobnejšie rozoberieme priebeh prierazu, keď napätie na elektródach ponorených v transformátorovom oleji presiahne hodnotu prierazného. V tomto predprierazovom stave v medzielektródovom priestore existuje veľa kanálikov nižšej hustoty oproti hustote oleja (Obr. 2), v ktorých sa môžu rozvíjať elektrónovej lavíny a po prekročení ich kritickej koncentrácie vytvoríť primárne streamery (ionizačné vlny) šíriace sa medzi elektródami [2, 7, 8]. S približovaním primárneho streameru ku katóde pole pred jeho hlavou silne rastie. Počas prierazového stavu primárny streamer dopadá na katódu a pole v mieste kontakte sa stáva takým silným, že počet elektrónov vyrazených z katódy extrémne narastie a pozorujeme nárast prierazového prúdu spojený s rýchlym poklesom napätia (Obr. 2), keďže zdroj neudrží taký vysoký prúd – nie je dostatočne tvrdý. Po kontakte primárneho streameru s katódou nastáva prieraz za pretekania veľkých prúdov a následného prehrievania kanála za vzniku iskry a sú splnené dostatočné podmienky na štart sekundárneho streameru z katódy v opačnom smere k anóde, kanála silne ionizovanej plazmy. Stupeň ionizácie jeho kanála je o niekoľko rádov vyšší ako kanála primárneho streameru. Vysoký stupeň ionizácie je spojený s dostatočnou vodivosťou kanála (veľmi malý odpor) na prenos potenciálu katódy sekundárnym streamerom. Dynamickú zmenu odporu sekundárneho streameru veľmi dobre reprezentuje vypočítaná hodnota  $R_e$  [14] na obr. 4. Hodnoty jeho odporu počas doby svojho rozvoja poklesnú zo svojej počiatkovej relatívne veľkej hodnoty k minimálnej hodnote vyskytujúcej sa pri prúdovej špičke, keď jeho veľkosť dosahuje niekoľko stoviek miliOhmov. V čase dosiahnutia maxima prúdu sa hodnota odporu výbojového kanála stabilizuje a potom sa už nemení. Podobné hodnoty výbojového kanála rádu stoviek m $\Omega$  vo vode zmeral Mackersie [9] a vo vzduchu Kijonka [14]. Od tohto času prierazový kanál – odpor predstavuje časť celkového RLC obvodu. Pozorujeme teda tlmené harmonické kmity prierazového prúdu, ktorý je výsledkom vybitia sa kondenzátora – výbojovej aparatúry s transformátorovým olejom v danom obvode.

Hodnota odporu prierazového kanála  $R_e$  je o rád menšia v porovnaní s odporom vedenia  $R_V$  a aj vypočítanou hodnotou odporu  $R$ , a ešte aj klesá s rastom zápalného napätia. Z porovnania týchto odporov je vidieť, že fyzikálne procesy v transformátorovom oleji sú dôležité hlavne v počiatkových štádiách rozvoja prierazu a po vybudovaní prierazového kanála už nemajú vplyv na pozorovaný priebeh prúdu. Aj z ďalších meraní [16] sa ukázalo, že pridanie vonkajšieho odporu má výrazný vplyv na priebeh prúdu - na amplitúdu a dobu trvania. Môžeme teda povedať, že

pozorovaný priebeh prúdu a od neho odvodené parametre sú závislé hlavne na parametroch vonkajšieho obvodu.

Prechodom prierazového prúdu cez vytvorený prierazový kanál nastáva jeho ohrev následkom intenzívneho Joulovho tepla. Toto teplo spôsobuje radiálny rozvoj prierazového-plazmového kanála do dutiny plnej horúceho ionizovaného plynu s vysokým tlakom. Dutinka v priebehu svojej expanzie vyžaruje intenzívnu rázovú vlnu, ktorá sa okamžite pretvorí na akustický tlakový impulz [15], šíriaci sa do okolitého tekutého prostredia lokálnou rýchlosťou zvuku. Doba trvania takéhoto akustického impulzu presahuje stovky mikrosekúnd, zatiaľ čo prúdová odozva len pár desiatok mikrosekúnd. Prieraz teda spôsobuje aj silný lokálny ohrev dielektrika Joulovým teplom, čo má za následok vznik bublín pozorovaných po každom prieraze.

## 5. ZÁVER

Záverom možno povedať, že boli zmerané prierazové charakteristiky pre dielektrickú kvapalinu – izolačný olej ITO 100. Meral sa rozvoj prúdu prierazu a napätia na elektródach v závislosti na čase. Na základe experimentálnych výsledkov je možné hovoriť, že prieraz v transformátorovom oleji môže byť reprezentovaný RLC obvodom. Vypočítaný odpor prierazového kanála rádu stoviek m $\Omega$  bol vyrátaný na základe energií prierazu. Pozorovaný priebeh prierazového prúdu a jeho charakteristiky sú silne závislé od parametrov vonkajšieho obvodu. Z fyzikálneho hľadiska sa dá povedať, že pri daných experimentálnych podmienkach celý rozvoj prierazu prebieha v prostredí s nižšou hustotou (kanálikoch) ako má použitá dielektrická kvapalina. Prieraz je spojený s rozvojom elektrónových lavín v kanálikoch za vzniku primárneho a sekundárneho streameru. Prieraz spôsobuje lokálny ohrev kvapaliny spojený so vznikom pozorovaných vzduchových bublín.

## Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná grantovou agentúrou VEGA z ministerstva školstva Slovenskej republiky pod číslom 1/2017/05

## LITERATÚRA

- [1] MARTIŠOVIČ, V.: Základy fyziky plazmy, MFIF UK, Bratislava, 2006
- [2] SUN, J., SATO, M., CLEMENTS, J. S.: Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water, Journal of Electrostatics 39, 189-202 (1997)
- [3] SMIDT, W.F. a kol.: Electronic conduction and breakdown in liquid helium and liquid neon, IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul Vol 10, No. 6, 1012-1021, (2003)
- [4] LISITSYN, I.V., NOMIYAMA, H., KATSUKI, S., AKIYAMA, H.: Thermal processes in

- a streamer discharge in water, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6., No. 3, 351-356, (1999)
- [5] NAIDU, M.S., KAMARAJU, V.: High voltage engenering, McGrow-Hill, USA 1996
- [6] BEROUAL, A.: Electeronic and gaseous processes in the prebreakdown phenomena of dielectric liquids, Journal of Applied Physics 73, 4526-4533, (1993)
- [7] JONES, H.M., KUNHARDT, E.: Development of pulsed dielectric breakdown in liquids, Journal Physics D: Applied physics 28, 178-188, (1995)
- [8] DEVINS, J. C., RZAD, J., SCHWABE, R. J.: Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids, Journal of Applied Physics 52, 4531-4545, (1981)
- [9] MACKERSIE, J. W. a kol: Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water, IEEE Transactions on plasma science Vol. 33, No. 5, 1715-1724, (2005)
- [10] LEVIS, T.J.: Breakdown initiating mechanism at electrode interface in liquid, IEEE Trans. on Diel.and Elect. Insul Vol 10, No. 6, 948-955, (2003)
- [11] MARTON, K a kol.: Predprierazový stav v izolačných kvapalinách v kombinovanom elektrickom a magnetickom poli, Proceedings 15th International Conference DISEE 2004, STU Bratislava, 24 – 27, (2004)
- [12] MARTON, K. a kol.: The development of electric breakdown in magnetic fluids in combined magnetic and electric fields. Casopis : Preglad Elektrotechniczny, Sigma - NOT, Warszawa, Poland , No.1, 161-164 , (2005)
- [13] TIMOSHKIN, I.V. a kol: Hydrodynamic modelling of transient cavities in fluids generated by high voltage spark discharge, J. Phys.Appl.Phys. Vol. 39, No. 22, 4808-4817, (2006)
- [14] KIJONKA, J., PETR, O., ŠIMANDL, L.: Diagnostika energie jiskrového výboje, 32. Sešit Katedry teoretickej elektrotechniky, Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Ostrava 2005
- [15] KÚDELČÍK, J., GUTTEN, M.: Diagnostika transformátorového oleja analýzou prierazu a čiastkových výbojov, Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení, Žilina, 117-120, (2006)
- [16] KÚDELČÍK, J.: Elektrická diagnostika prierazu v transformátorovom oleji, 34. Sešit Katedry teoretickej elektrotechniky, 2006 ,15-18
- [17] ČIČMANEC, P.: Všeobecná fyzika 2, Bratislava, Alfa, 1992