

Martin Mikitka, Juraj Kurimský

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

Fraktálna dimenzia elektrického stromčeka

Abstrakt. Príspevok prezentuje možnosti výpočtu fraktálnej dimenzie elektrického stromčeka. Sú tu zhrnuté teoretické poznatky rastu elektrických stromčekov. Je stručne popísaná fraktálna geometria, fraktál a fraktálna dimenzia. Je vykonaný experiment s vytváraním stromčekov na povrchu izolantu a je uvedený postup výpočtu fraktálnej dimenzie.

Kľúčové slová: prírastok dielektrika; elektrické stromčeky; Lichtenbergové obrazce; fraktálna dimenzia

Abstract. This work presents a calculation of fractal dimension of electrical tree. There is given theoretical background of growth of electrical trees. Fractal geometry, fractals and fractal dimension are described. The experimental tree generation were done, the method of fractal dimension calculation is applied. (**Fractal dimension of electrical tree**)

Keywords: dielectric breakdown, electrical treeing, Lichtenberg figure, fractal dimension

Úvod

Modelovanie prírastku v dielektriku je jedným zo základných problémov pri skúmaní vlastností dielektrík. Prírastok v pevných dielektrikách je jeden z dôležitých ukazovateľov pre stanovenie obmedzení izolácie v kábloch, kondenzátoroch, elektrických strojoch. V pevných dielektrikách, na začiatku prírastku prírastku, vznikajú rozvetvené stromčeky. Tie môžu vytvoriť vodivý kanál. Tento vodivý kanál značí poškodenie izolácie, dôsledkom čoho je skrat a poškodenie daného zariadenia, v krajnom prípade aj zásah elektrickým prúdom.

Na rozdiel od preskoku v kvapalných a plyných dielektrikách, dochádza pri prírastku v pevných dielektrikách k nezvratnej zmene v štruktúre materiálu. Elektrický prírastok pevných izolantov je možné z hľadiska priebehu a charakteru dejov ovplyvnených teplotou, dobou pôsobenia napätia a ďalších faktorov rozdeliť na tri základné mechanizmy prírastku prebiehajúce v pevnom izolante.

Čisto elektrický prírastok sa u pevných izolantov vyvíja vo veľmi krátkych časoch - rádovo 10^{-8} s, čo je spôsobené tým, že k nemu dochádza predovšetkým pri rázovom namáhaní [1].

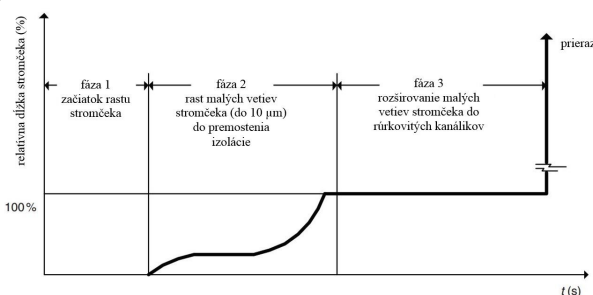
Počas tepelného prírastku sa uplatnia Joulove straty, ktoré dielektrikum ohrievajú, a tiež ohrev spôsobený dielektrickými stratami. Vzhľadom k tomu, že tento ohrev neprebíha rovnomerne, vznikajú potom miesta s vyššou teplotou, kde dochádza k ďalšiemu nárastu elektrickej vodivosti a dielektrickým stratám, čím dôjde k ešte väčšiemu ohrevu týchto miest. Na tepelný prírastok treba dbať predovšetkým u zariadení s dlhodobým zaťažením [2]. V izoláciách sa môžu nachádzať dutiny vyplnené plynom či vzduchom. Dutiny môžu v izolácii vzniknúť napríklad vplyvom vysokého elektrického namáhania a môžu byť rôzneho tvaru a veľkosti. Ak by bol osciloskopom sledovaný kapacitný prúd, ktorý prechádza daným dielektrikom s dutinami, boli by prebiehajúce výboje v dutinách znázornené krátkymi a nepravidelnými impulzmi v okolí amplitúdy prúdu, pričom každý takýto impulz zodpovedá práve jednému výboju v dielektriku. Všeobecne možno povedať, že tieto dutiny v dielektriku napomáhajú jeho prerazeniu. Výboje v nich vznikajúce totiž môžu mať elektrické, chemické, erózivne a tepelné účinky. Tepelné účinky znižujú napätie tepelného prírastku a to je spôsobené tým, že výboje vznikajúce v dutinách majú za následok oteplenie dielektrika. Erózie vznikajú opäť vplyvom výbojov v dutinách, ktoré spôsobujú rozrušovanie stien a pri pokročilej erózii môže dôjsť k elektrickému, prípadne dokonca mechanickému prírastku dielektrika.

Elektrické účinky spôsobujú oblúk, ktorý sa v dutine môže vyvinúť. Ten potom s najväčšou pravdepodobnosťou vytvorí vodivú dráhu, na ktorej konci dostatočne vysoké napätie môže spôsobiť elektrický prírastok a vodivá dráha sa môže postupne šíriť celým dielektrikom.

Chemické účinky spôsobujú všeobecne produkty výbojov v dutinách, ktorými sú ozón, oxidy, dusík a iné. Izolant sa potom v okolí dutín rozkladá. Tieto účinky sú spôsobené predovšetkým dlhodobým elektrickým namáhaním [1].

Elektrické stromčeky

Elektrické stromčeky sú útvary stromovitého alebo krovitého tvaru (odtiaľ názov), ktoré vznikajú vnútri elektroizolačného materiálu. Jedná sa o degradačný jav, ktorý môže viesť až k prírastku elektrickej izolácie, a to pri menovitých hodnotách intenzity elektrického poľa (menovitom napätí zariadení). S týmto javom sa stretávame napr. u vysokonapäťových káblov. V materiáli elektrickej izolácie vplyvom pôsobení elektrického poľa dostatočnej intenzity vznikajú vodivé cesty - kanáliky smerom k miestu s iným elektrickým potenciálom. Dostatočná intenzita elektrického poľa na vytvorenie elektrického stromčeka vzniká na mieste "ostrej hrany". To môžu byť napríklad primiešané nečistoty v materiáli alebo aj vniknutý ostrý predmet. Kritická hodnota intenzity elektrického poľa je pre každý materiál iná. Stromčekovité kanáliky môžu byť duté (vyplnené plynom) alebo sú tvorené degradačnými splodinami, ktoré vznikli rozkladom materiálu elektrickej izolácie. Rast elektrického stromčeka môže byť rozdelený do niekoľkých časových fáz (obr. 1), ktoré sú všeobecne platné v rôznych elektroizolačných materiáloch [3].



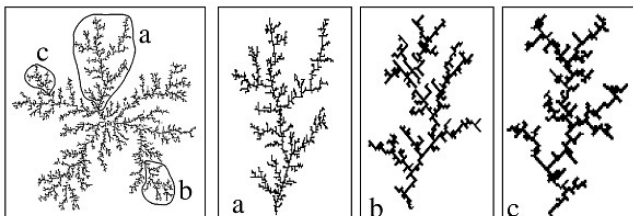
Obr. 1. Fázy rastu elektrického stromčeka v izolácii [3]

Fraktálna geometria a dimenzia

Fraktál môže byť predstavený ako nekonečne členitý útvar. Fraktálové útvary môžeme nájsť vo vzoroch rozvetvených

stromov, rastlín, mrakov alebo bleskov. Príkladom môžu byť rastliny, ale aj ľudské pľúca. V prírode sa proces vytvárania fraktálu opakuje konečným počtom. Bližšie informácie sú napr. v [4]. Fraktály, ktoré sú invariantné voči zmene mierky, sú sebedobné, obr. 2. Sebepríbuzné fraktály sú naproti sebedobným charakteristické tým, že ktorýkoľvek ich výsek je iba podobnou kópiou pôvodného tvaru.

Fraktálna geometria je časťou teórie chaosu. Používa sa na popis dynamických, turbulentných a nelineárnych dejov [5]. Fraktály možno tiež chápať ako nepravidelné geometrické útvary deliteľné na jednotlivé časti, z ktorých každá je v ideálnom prípade zmenšenou kópiou celku [6].



Obr. 2. Fraktálová sebedobnosť [14]

Mriežková metóda výpočtu fraktálnej dimenzie

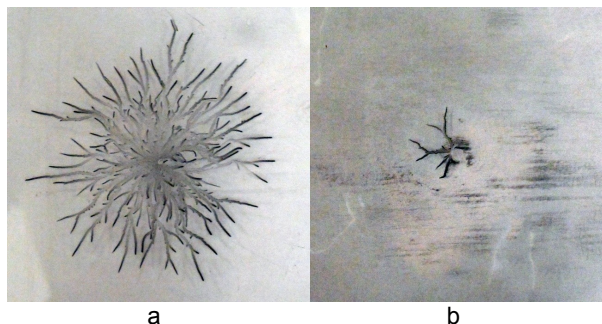
Najčastejšie používanou metódou na zisťovanie fraktálnej dimenzie je tzv. box-counting metóda alebo taktiež mriežková metóda. Vykonáva sa prekrytím obrázku určitým základným tvarom ako je napr. štvorec, kruh alebo kocka. Platí vzťah:

$$(1) \quad N(\varepsilon) \approx \varepsilon^{-D_f}$$

kde: $N(\varepsilon)$ je počet krycích elementov s veľkosťou ε a D_f je fraktálna dimenzia. Graficky sa $N(\varepsilon)$ znázorňuje voči veľkosti elementov ε využitím logaritmickej mierky.

Experiment

Za účelom získania originálnych elektrických stromčekov boli vytvorené dvojdimenzionálne Lichtenbergové obrazce podobným spôsobom, akým ich vytvoril Lichtenberg v roku 1777. Na obr.2 je poukázané na rozdielnosť tvarov stromčekov pre kladný (a) a záporný náboj (b). Pre vytvorenie elektrického náboja bol použitý Van de Graffov generátor.

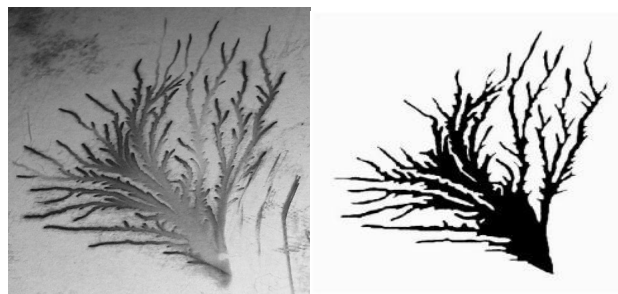


Obr. 3. Lichtenbergové obrazce

Obrazce boli nafotené digitálnym fotoaparátom a pre ďalšie spracovanie upravené hodnoty sýtosti farieb a kontrastu.

Výpočet fraktálnej dimenzie

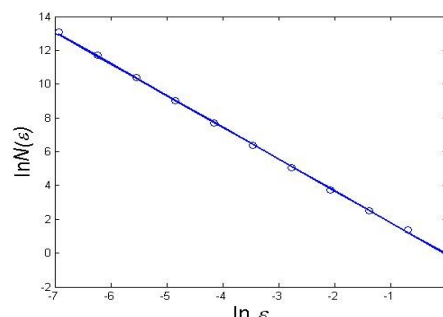
Pôvodný fraktálový tvar elektrického stromčeka bol digitalizovaný, obr. 3. Fraktálna dimenzia bola vypočítaná mriežkovou metódou. Na výpočet bolo použité prostredie Matlab®.



Obr. 4. Reálny a digitalizovaný snímok elektrického stromčeka

Výsledky

Algoritmus programu pre výpočet fraktálnej dimenzie spočíva nasledujúcom zjednodušenom postupe: raster obrázka sa transformuje na maticu s hodnotou 0 na mieste bielej a 1 na mieste čiernej farby; detekujú sa hrany a aplikuje sa mriežková metóda na výpočet fraktálnej dimenzie; výsledkom je vektor fraktálnej dimenzie a odhad neistoty. Na obr. 5 je znázornená logaritmická závislosť počtu štvorcov prekrývajúcich obrazec od ich veľkosti.



Obr.5. Počet štvorcov prekrývajúcich skúmaný obrazec v závislosti od ich veľkosti

Potom, podľa (1), vyčíslená fraktálna dimenzia elektrického stromčeka z obr. 4 je

$$D_f = 1,9104 \pm 0,0210$$

Záver

Fraktálna dimenzia elektrických stromčekov charakterizuje zložitosť daného tvaru v danej dimenzii. Je to objektívny parameter, ktorý môže byť využitý pre účely sledovania elektrofyzikálnych javov pri experimentoch v technike vysokých napätí alebo sa môže aplikovať pri určitých druhoch vyhodnotenia a posudzovania tvarov a zložitosti elektrických stromčekov na povrchoch pevných izolácií vysokonapäťových zariadení.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci projektu VEGA č. 1/0487/12.

„Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: **Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií**, kód ITMS: **26220220182**, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“



Literatúra

- [1] Kolcunová, I., Kurimský, J.: Čiastkové výboje v izolačnom systéme XPE káblov. In Zborník 16. medzinárodnej konferencie, DISEE 2006. STU v Bratislave, 12.-14. 9. 2006, 92-95, Časť – Píla, ISBN 80-227-2470-X
- [2] Veverka, A. Technika vysokých napětí. Praha: SNTL, 1978.
- [3] Trnka, P., Pihera, J., Širuček M. Elektrické stromečky - fenomén v elektroizolačných materiáloch. ELEKTRO. Plzeň: Fakulta elektrotechnická ZČU, 2010, 1/2010, s. 18-22.
- [4] Barrow, J. Zubaté ostří: živé fraktály. Vesmír plný umění. Krejza Martin. Brno: Jota, 1999, s. 86-91. ISBN ISBN 80-7217-097-X.
- [5] Hotař, V. Fraktální geometrie, 2006 [online] [cit. 2013-05-06]. Dostupné na internete: <<http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/index.html>>
- [6] Tišnovský, P. Fraktály v počítačové grafice. Root.cz [online]. 2005-2007 [cit. 2013-05-06]. ISSN 1212-8309. Dostupné na internete: <<http://www.root.cz/serialy/fraktaly-v-pocitacove-grafice/>>

Autori:

Martin Mikitka, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika

Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: juraj.kurimsky@tuke.sk