

Bystrík Dolník, Michal Matis

Výbojové procesy vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli

Abstrakt Výbojové procesy v plynných izolantoch sú stále predmetom záujmu výskumných tímov pracujúcich nielen v technike vysokých napätí, ale aj v iných vedných odboroch. Článok je zameraný na výbojové procesy vo vzduchu, ktoré sú modelované pomocou fyzikálneho modelu. Použitý je elektródový systém hrot-doska zabezpečujúci silne nehomogénne jednosmerné ako aj impulzné elektrické pole s doskokom od 0,05 mm do 0,35 mm. Porovnané sú hodnoty preskokových napätí s kladnou a zápornou polaritou, pričom v experimente uzemnená bola elektróda v tvare dosky.

Kľúčové slová: výboj, nehomogénne elektrické pole, polaritný efekt

I. ÚVOD

V súčasnosti sa elektrické zariadenia používajú stále častejšie, pretože elektrická energia je nezastupiteľná od domácnosti až po priemysel. Na životnosť elektrických zariadení má veľký vplyv životnosť izolácie. Životnosť izolácie je závislá od viacerých faktorov ako napr. prepätia, prevádzkové napätia, mechanické vplyvy ale aj iné vonkajšie vplyvy. Ako izolačný materiál sa často používa vzduch, ktorý má pre techniku vysokých napätí veľký význam a preto je dôležité skúmanie výbojových procesov vo vzduchu. Vzduch sa používa buď samostatne, alebo aj v kombinácii s pevnými izolantmi.

Pre optimálnu životnosť izolácie treba skúmať vplyv intenzity elektrického poľa na dielektrikum z ktorého je izolácia vyrobená. Výbojové procesy vo vzduchu dajú sa aplikovať aj na výbojové procesy, ktoré vznikajú v plynom vyplnených malých dutinách, ktoré sa nachádzajú v pevných, alebo v kvapalných dielektrikách.

II. CIEĽ A PODMIENKY EXPERIMENTU

Cieľom experimentu bol výskum výbojových procesov vo vzduchu v nehomogénnom elektrickom poli. Nehomogénne elektrické pole bolo vytvorené elektródami v usporiadaní hrot-doska. Doska bola medená kruhového tvaru s priemerom 21,83 mm a hrúbkou 1,97 mm, hrot bol volfrámový s dĺžkou 40 mm a hrúbkou meniacou sa od 0,09 mm na hrote až do 0,55 mm. Experiment bol rozdelený do dvoch etáp.

Pre teoretické overenie predpísaných podmienok, t. zn. dosiahnutie silne nehomogénneho elektrického poľa, realizovala sa počítačová simulácia pomocou programu FEMM, ktorý je primárne určený na riešenie problémov elektromagnetického poľa, avšak umožňuje aj výpočet, elektrostatického poľa. Výsledkom simulácie je rozloženie napätia a intenzity elektrického poľa v okolí elektród a najmä v priestore doskoku. Simulácia bola realizovaná pre napätie na hrote 1 V, kým elektróda v tvare dosky bola uzemnená. Výpočty boli realizované pre doskoky od 0,05 mm do 3 mm s krokom 0,05 mm. V modeli neboli uvažované časti, ktoré mechanicky držali elektródy, pretože tieto nemali podstatný vplyv na tvar elektrického poľa a ani na priebeh napätia vo veľmi blízkom okolí elektród.

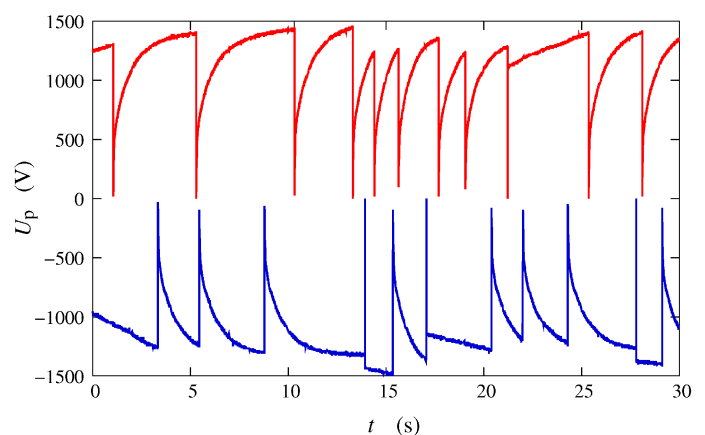
V prvej fáze merala sa veľkosť preskokového napätia pomocou digitálneho osciloskopa pre doskoky od 0,05 mm do 0,35 mm. Doska bola uzemnená a na hrot sa privádzalo kladné resp. záporné jednosmerné napätie. Priemerná teplota počas merania bola 23 °C, priemerný tlak mal hodnotu 101,675 kPa. Po pripojení jednosmerného

napätia na elektródy sa postupne zvyšovalo napätie od 0 V až do okamihu preskoku. Po preskoku sa kondenzátor v zdroji vybil, jeho opätovné nabíjanie zabezpečilo rovnaké stúpanie napätia a v okamihu preskoku mal časový priebeh napätia takmer jednosmerný charakter. Na obr. 1 je znázornený časový priebeh preskokového napätia na použitom elektródovom systéme pre doskok 0,2 mm, kladnú a zápornú polaritu hrotu, ktorý slúžil na ďalšie štatistické spracovanie.

V druhej fáze experimentu merali sa charakteristiky výbojov vo vzduchu v nehomogénnom elektrickom poli po priložení impulzov napätia s presne definovaným tvarom impulzu napätia (normalizovaný atmosférický impulz napätia s tvarom 1,2/50) s kladnou alebo zápornou polaritou hrotu; doska bola počas experimentu uzemnená. Najprv merali sa základné charakteristiky generátora impulzov napätia naprázdno pomocou digitálneho osciloskopa, pričom trvanie čela impulzu napätia vypočítalo sa podľa rovnice, ktorá je dobre známa v skúšobníctve a technike vysokých napätí

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

pričom T je časový úsek ohraničený priemetom bodov na priebehu impulzu napätia v úrovni 30 % a 90 % do časovej osi označovaný aj ako čas rastu impulzu.



Obr. 1. Časový záznam merania jednosmerného preskokového napätia.

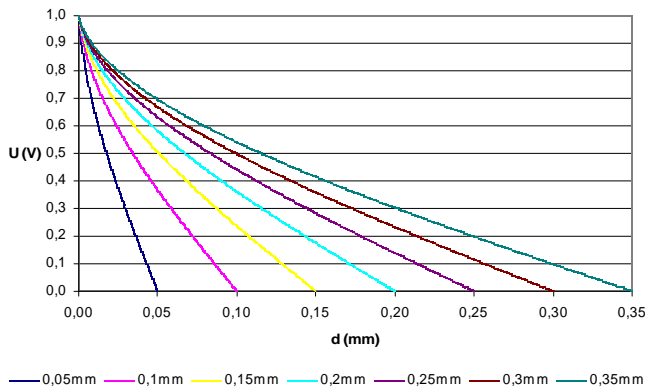
Priemerná teplota v laboratóriu v druhej fáze experimentu bola 22,1 °C a priemerný tlak 101,185 kPa. Počas meraní sa zaznamenávala: amplitúda impulzu napätia, trvanie impulzu napätia a čas do výstavby výboja. Z týchto hodnôt sa vypočítalo ešte trvanie

výstavby výboja, ako rozdiel medzi časom trvania nameraného impulzu a časom do výstavby výboja. Meranie sa uskutočnilo pre doskoky 0,15 mm až 0,35 mm. Pre každý nastavený doskok a polaritu impulzov privádzaných na hrot uskutočnilo sa 50 meraní. Pre malé doskoky nepodarilo sa namerať hodnoty preskokových napätí, pretože časový záznam impulzu nebolo možné dobre rozlíšiť od deformácií spôsobených osciláciami v čele impulzu. Pre väčšie doskoky nepodarilo sa namerať hodnoty impulzného napätia pretože impulzné preskokové napätie bolo väčšie ako amplitúda priloženého impulzu. Namerané a vypočítané hodnoty pre kladnú polaritu: $T_1 = 1,202 \mu\text{s}$ a $T_2 = 48,16 \mu\text{s}$; pre zápornú polaritu $T_1 = 1,17 \mu\text{s}$ a $T_2 = 48,64 \mu\text{s}$, čo je v tolerancii pre normalizovaný atmosférický impulz napätia používaný v skúšobníctve.

III. VYHODNOTENIE

POČÍTAČOVÁ SIMULÁCIA

Priebeh intenzity elektrického poľa E od vzdialenosti elektród (doskoku) d mala exponenciálne klesajúci charakter pre všetky doskoky. Hodnota intenzity elektrického poľa exponenciálne klesala od hrotu, pričom pre najmenší doskok 0,05 mm maximálna hodnota okolo hrotu mala hodnotu 73 170,79 V/m; pre najväčší doskok (3 mm) maximálna hodnota bola 7 568,45 V/m.



Obr. 2. Priebeh napätia medzi elektródami pre doskok 0,05 mm až 0,35 mm.

Ako je dobre známe z teórie elektromagnetického poľa, rozloženie napätia medzi elektródami má klesajúci charakter, pričom toto rozloženie napätia možno rozdeliť do dvoch oblastí: smerom od hrotu spočiatku rýchlo klesá, neskôr má takmer lineárne klesajúci charakter. Priebeh napätia medzi elektródami pre doskoky 0,05 mm až 0,33 mm je zobrazený na obr. 2.

JEDNOSMERNÉ PRESKOKOVÉ NAPÄTIE

Priemerná hodnota nameraného preskokového napätia rástla so zväčšovaním doskoku. Pre kladnú polaritu bolo priemerné preskokové napätie väčšie ako pre zápornú polaritu. Najmenšia hodnota jednosmerného preskokového napätia medzi elektródami dosiahla hodnotu 868 V pre zápornú polaritu hrotu a doskok 0,05 mm. Najväčšia hodnota preskokového napätia medzi elektródami dosiahla hodnotu 1 921 V pre kladnú polaritu na hrote a doskok 0,35 mm. Hodnoty preskokových napätí pri rovnakom doskoku boli väčšie pre kladnú polaritu hrotu, čím sa nepotvrdil polaritný efekt. Tento jav môže byť spôsobený veľmi malým doskokom a/alebo aj prítomnosťou iných mechanizmov výboja. Vzájomné rozdiely neboli však veľmi veľké. V tab. I sú uvedené namerané hodnoty jednosmerného preskokového napätia pre doskoky 0,05 mm až 0,2 mm.

TABUĽKA I
Jednosmerné preskokové napätie pre kladnú a zápornú polaritu na hrote a doskoky od 0,05 mm do 0,2 mm

Preskokové napätie (kV)							
$d = 0,05 \text{ mm}$		$d = 0,10 \text{ mm}$		$d = 0,15 \text{ mm}$		$d = 0,20 \text{ mm}$	
U_p^+	U_p^-	U_p^+	U_p^-	U_p^+	U_p^-	U_p^+	U_p^-
0,906	0,900	1,171	1,062	1,125	1,234	1,296	1,265
0,893	0,881	0,984	1,032	1,128	1,234	1,375	1,250
0,993	0,868	1,078	1,203	1,281	1,203	1,421	1,312
1,150	0,912	1,109	1,093	1,281	1,187	1,437	1,312
1,037	0,900	1,015	1,156	1,328	1,203	1,328	1,500
1,012	0,900	1,203	1,109	1,281	1,203	1,390	1,375
1,012	0,937	1,234	1,078	1,406	1,187	1,406	1,328
1,156	0,906	1,203	1,256	1,312	1,250	1,484	1,281
0,850	0,931	1,062	1,078	1,171	1,203	1,406	1,203
0,906	0,925	1,156	1,015	1,453	1,328	1,359	1,218

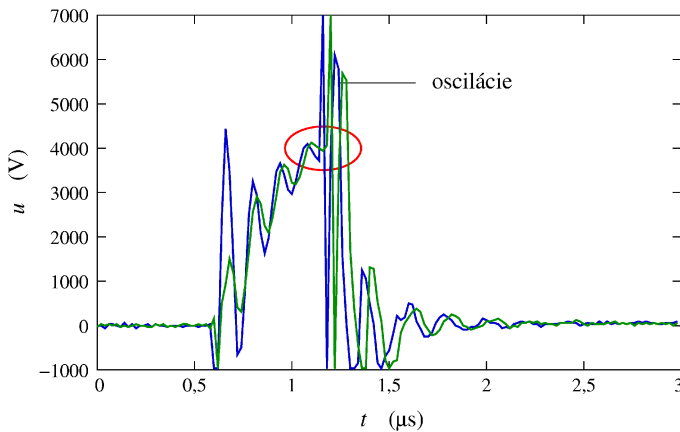
TABUĽKA II
Namerané parametre impulzu napätia pre doskok 0,2 mm: impulzné preskokové napätie U_{pimp} , trvanie impulzu napätia T_c , čas do výstavby výboja t_0 , čas výstavby výboja t_a

Parametre impulzu napätia							
Kladná polarita				Záporná polarita			
U_{pimp} (V)	T_c (μs)	t_0 (μs)	t_a (μs)	U_{pimp} (V)	T_c (μs)	t_0 (μs)	t_a (μs)
4 062	0,60	0,14	0,46	4 218	0,64	0,18	0,46
3 968	0,56	0,14	0,42	4 718	0,84	0,24	0,6
4 750	0,82	0,14	0,68	4 531	0,74	0,22	0,52
4 625	0,76	0,14	0,62	5 031	1,06	0,24	0,82
5 062	1,20	0,10	1,10	4 562	0,84	0,22	0,62
5 250	1,38	0,12	1,26	3 968	0,62	0,18	0,44
5 062	1,14	0,14	1,00	4 343	0,86	0,18	0,68
5 187	1,14	0,12	1,02	5 062	1,12	0,22	0,9
5 406	1,90	0,14	1,76	5 000	1,08	0,26	0,82
5 343	3,34	0,12	3,22	4 562	0,8	0,2	0,6

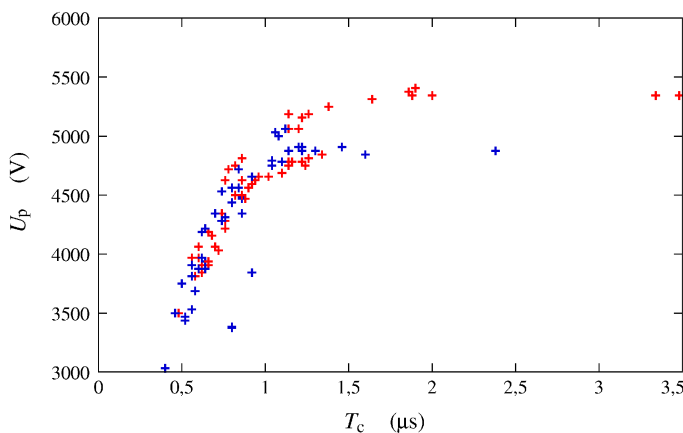
IMPULZNÉ PRESKOKOVÉ NAPÄTIE

Z experimentu počas meraní preskokového napätia impulzom napätia zistilo sa, že najväčšie preskokové napätie medzi elektródami malo hodnotu 5 406 V pre kladný impulz napätia na hrote a doskok 0,2 mm, najmenšie preskokové napätie medzi elektródami dosiahlo hodnotu 2 781 V pre záporný impulz napätia na hrote a doskok 0,15 mm. Najdlhší čas trvania impulzu 3,48 μs , sa zistil pre kladný impulz napätia a doskok 0,2 mm. Najkratší čas trvania impulzu 0,4 μs , sa nameril pre záporný impulz napätia a doskok 0,15 mm.

Najväčšie priemerné preskokové impulzné napätie bolo 4 616 V pri doskoku 0,2 mm a kladnej polarite hrotu a najmenšie priemerné impulzné preskokové napätie bolo 3 714 V pri doskoku 0,15 mm a zápornej polarite hrotu. Závislosť impulzu napätia od času pre doskok 0,2 mm a kladnú polaritu napätia je zobrazená na obr. 3. Namerané ako aj vypočítané parametre useknutého impulzu napätia sú uvedené v tab. II. Graf závislosti preskokového napätia U_{pimp} od trvania impulzu napätia T_c , pre obidve polarities impulzu napätia použité v experimente a doskok 0,2 mm, je zobrazený na obr. 4.



Obr. 3. Časový záznam impulzného preskokového napätia.

Obr. 4. Závislosť impulzného preskokového napätia U_p od trvania impulzu T_c meraná normalizovaným impulzom napätia pre doskok 0,2 mm.

IV. ZÁVER A DISKUSIA

Cieľom experimentu bol výskum výbojových procesov vo vzduchu v silne nehomogénnom elektrickom poli. Hrotová elektróda mala veľmi malý polomer zakrivenia s cieľom získať podmienky na vytvorenie silne nehomogénneho elektrického poľa.

Experiment pozostával z dvoch častí: meranie jednosmerného preskokového napätia a impulzného preskokového napätia. Experiment sa realizoval pre doskoky od 0,05 mm do 0,35 mm s krokom 0,05 mm. Pri meraní jednosmerného preskokového napätia bola uzemnená doska a na hrotovú elektródu sa prikladalo napätie s kladnou resp. zápornou polaritou. Najväčšie priemerné preskokové napätie 1 875 V sa nameralo pre doskok 0,35 mm a kladnú polaritu na

hrote. Najmenšie preskokové napätie 935 V sa nameralo pre doskok 0,05 mm a zápornú polaritu na hrote. Tým sa nepotvrdil polaritný efekt, čo mohlo byť spôsobené veľmi malým doskokom, pri ktorom môžu existovať aj iné mechanizmy výboja. Treba však realizovať ešte ďalšie experimenty na overenie uvedeného predpokladu.

V druhej časti experimentu meralo sa impulzné preskokové napätie, pre doskoky 0,05–0,35 mm. Meralo sa aj trvanie impulzu napätia T_c , čas do výstavby výboja t_0 a čas výstavby výboja t_a . Normalizovaný impulz napätia s kladnou polaritou mal trvanie čela 1,202 μ s a trvanie poltyla 48,16 μ s, kým impulz napätia so zápornou polaritou mal $T_1 = 1,17$ μ s a $T_2 = 48,64$ μ s. Najdlhší čas trvania impulzu 3,48 μ s bol nameraný pre kladný impulz napätia a doskok 0,2 mm. Najkratší čas trvania impulzu 0,4 μ s, sa nameralo pre záporný impulz napätia a doskoky 0,15 mm a 0,2 mm. Najkratší čas výstavby výboja bol 0,24 μ s pre záporný impulz napätia a doskok 0,15 mm. Najdlhší čas výstavby výboja bol 3,34 μ s pre kladný impulz napätia a doskok 0,2 mm. Preskokové napätie nebolo možné odmerať pre všetky doskoky, pretože buď impulz napätia bol deformovaný osciláciami a nedali sa odčítať merané parametre alebo preskokové napätie bolo väčšie ako amplitúda skúšobného impulzu napätia.

POĎAKOVANIE

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.

LITERATÚRA

- [1] H. Prinz, *Hochspannungsfelder*. R. Oldenbourg, München · Wien, 1969.
- [2] A. Veverka, *Technika vysokých napätí*, Praha, 1982, pp. 304.
- [3] D. C. Meeker, *Finite element Method Magnetics – tutorial*, Electrostatic, Verzia 4.2 [on-line]. (25. 01. 2009), Dostupné na internete: <<http://www.femm.info/Archives/doc/tutorial-electrostatic.pdf>>.
- [4] D. C. Meeker, *Finite element Method Magnetics – Users manual*, Version 4.2, [on-line]. (05. 02. 2009), Dostupné na internete: <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>>.
- [5] Matis, Michal, *Výbojové procesy vo vzduchu v nehomogénnom poli*, Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2010. 66 s.

ADRESY AUTOROV

Bystrík Dolník, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Bystrik.Dolnik@tuke.sk
 Michal Matis, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, matism@centrum.sk