

Karol Marton \*

## TEPELNÉ PROCESY V OKOLÍ KANÁLU ELEKTRICKÉHO PRIERAZU V DÔSLEDKU TREEING EFEKTU

**Abstrakt:** V príspevku sa poukazuje na príčiny vzniku kanálu elektrického prierazu v dôsledku pôsobenia pulzujúceho elektro-mechanického tlakového a ťahového namáhania. Analyzujú sa tepelné pomery v priestore elektrického poľa hrot-hrot. Súčasne sa poukazuje na vznik tepelného gradientu v radiálnom smere kanálu, ktorý vznikol v dôsledku treeing-efektu.

**Kľúčové slová:** elektrický prieraz, elektro-mechanické tlakové a ťahové namáhanie, elektrické pole, gradient, treeing efekt

### 1. Úvod

Výskum iniciácie, vzniku a rozvoja elektrických stromčekov dospel do takého štádia, kedy sa viacerí autori domnievali, že sú už známe všetky okolnosti, ktoré tento fenomén doprevádzali. Neskôr sa ukázalo, že neboli docenené kolektívne vplyvy elektrofyzikálne, chemické, termické a mechanické, ktoré postupne odkrývali niektoré doposiaľ nejasné miesta. Bol vyriešený princíp elektrického a mechanického namáhania v okolí defektného miesta [5] a bol zostavený model rozvoja čiastkových výbojov v plnom rozsahu (Wlodek [2]), čo značne rozšírilo predstavu o výbojovej aktivite v prípade plynom vyplneného defektu, resp. rozvíjajúceho sa stromčeka z miesta degradácie s malým polomerom zakrivenia. Bol skúmaný vplyv silných (ionizujúcich) elektrických polí, presahujúcich  $10^7 \text{ Vm}^{-1}$  na chemickú stavbu polymérov [4]. Otázka preskúmania väzbových energií elektrickým polom sa stala predmetom skúmania degradácie polymérnych izolantov. Takto bol urobený pokus o vysvetlenie stability aj

---

\* prof. Ing. Karol Marton, DrSc., Katedra techniky vysokých napätí, Technická univerzita Košice, Mäsiarska 74, 041 20 Košice

takých izolácií, akými sú nielen polyetylén, ale aj silikónové živice, polytetrafluóretylén, prípadne hexafluorid síry.

Veľmi podrobné mikroskopické skúmanie vytvárajúcich sa kanálov v polymérnych izolantoch typu polyetylén a silikón poukázalo najmä v prípade prierazného kanála na doposiaľ nepopísaný jav. V okolí karbonizovaných stien plynom vyplneného kanála sa vytvorili symetricky sa rozkladajúce valcovité útvary o hrúbke 5 až  $30\mu\text{m}$ , ktoré kopírujú tvar kanálu. Pritom sa opticky líšia od základnej (pôvodnej) izolačnej hmoty a predstavujú z hľadiska koaxiálne rozloženého gradientu teploty diskkrétne ohraničený útvar. Tento jav bol voči degradovanému typu bush-like oveľa výraznejšie pozorovaný pri tvorbe typu tree-like. Pozorovaný fenomén nás podnietil k tomu, aby sme ho popísali a z hľadiska mechanizmu tvorby prierazného kanála vysvetlili, pričom budeme sa opierať o riešenie pomocou dvoch prípadov (Zaengl-Kuffel [3]):

- impulzný tepelný prieraz,
- prieraz pri kritickom napätí.

V oboch prípadoch je potrebné vychádzať z energetickej bilancie v kanáli prierazu vo vzťahu k elektrickým a tepelným vlastnostiam skúmanej izolačnej látky. Aj napriek tomu, že sme preskúmali niekoľko transparentných materiálov, v tomto príspevku sa budeme venovať kábelovému polyetylénu.

## 2. Elektrotermická bilancia a tvorba kanálu elektrického prierazu

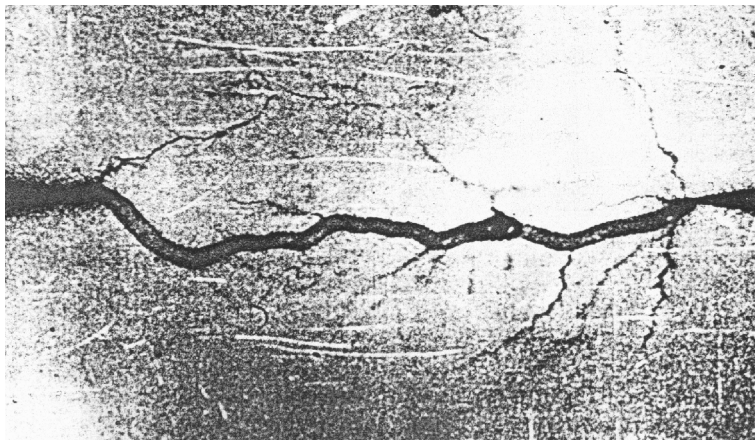
Lokálne pôsobiace silné elektrické pole  $E > 10^7 \text{Vm}^{-1}$  vyvoláva vznik elektrických stromčekov, ktoré predstavujú plynom vyplnené mikroskopicky malé kanáliky, v ktorých vzniká neúplný elektrický výboj. Rozširovanie, resp. zväčšovanie týchto defektov je vyvolané tiež extrémne vysokými tlakmi až  $10^3 \text{MPa}$ . Pri striedavom napätí 50 Hz tieto majú pulzujúci charakter, pričom v závislosti od vlastností izolácie spôsobujú lokálne ťahové aj tlakové namáhanie [4] a [6].

Významný vplyv na neúplný výboj má aj silná autoelektrónová emisia z povrchu elektródy pri negatívnej polvine striedavého napätia 50 Hz. Podobne môže nastať emisia aj pri pozitívnej polarite elektródy, avšak v tomto prípade je mechanizmus vodivosti diérový. Pri iniciácií elektrických stromčekov mechanickou únavou a čiastkovými výbojmi, ako aj injektážou a extrakciou priestorových nábojov, hrá emisia elektrónov na hrotovej elektróde pri negatívnej polarite striedavého napätia veľkú úlohu. Časť elektrónov ostáva v určitej vzdialenosti od hrotu. Počas pozitívnej polarite polvlny sa posúvajú naspäť ku hrotu v ďalšom cykle budú opäť emitované.

Pri každom cykle získajú elektróny dostatočnú energiu, ktorá postačuje na dekompozíciu polyméru, čím sa znižuje ich molekulová hmotnosť s následnou tvorbou plynu. Emisia elektrónov pochopiteľne závisí od výstupnej práce kovu elektródy, resp. materiálu defektu v dôsledku čoho existuje určitá korelácia medzi výstupnou prácou a iniciačným napätím pri vzniku stromčekov. Z toho vyplýva, že extrakcia a emisia elektrónov môže vytvoriť úzky kanál o malom kruhovom priereze pri odbúrání (dekompozícií) materiálu, čo je v podstate formovanie sa elektrického stromčeka.

Časť energie neúplného výboja sa využije na rozšírenie, resp. predĺženie kanálu, zatiaľ čo ďalšia časť energie sa spotrebuje na rozrušenie molekulárnych väzieb a následnému elektrickému priarazu.

Makroskopický pohľad na kanál elektrického priarazu v kábelovom polyetyléne pri konfigurácii elektród hrot-hrot je na obr. 1



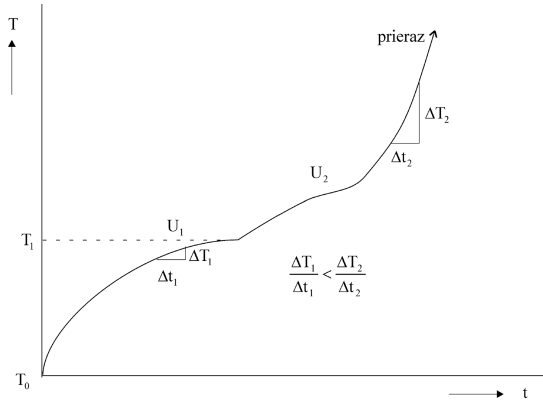
**Obr. 1.** Rozvoj elektrického stromčeka v okolí hlavného kanálu elektrického priarazu

V súvislosti s predchádzajúcimi úvahami budeme analyzovať elektro-termický priaraz iniciovaný elektrickým a mechanickým pôsobením elektrického poľa. S narastajúcou intenzitou elektrického poľa, stúpa aj hodnota mechanického tlaku. Nezanedbateľnú úlohu tu hrá hodnota relatívnej permitivity materiálu a veľkosť činiteľa dielektrických strát  $\tan \delta$ . Tvorba kanála elektrického priarazu je časovo a tepelne závislý proces, doprevádzaný vývojom plynu, pričom posledná fáza v oblasti predpriarazného stavu závislosti teploty od času má prudko stúpajúci charakter. Pri konštantnom napätí na elektródach, napr.  $U_1$  a  $U_2$ , po určitej stabilizácii teploty ( $U_1$ ), dochádza k náhlej zmene na  $T = f(t)$  krivke, čo je znázornené na obr. 2.

Vývoj tepla v quasihomogénnej izolácii v prípade, že sa teplota  $T$  jednotlivých objemových elementov telesa s časom nemení [8] a je teda iba funkciou miesta  $T = (x, y, z)$  potom je procesom stacionárnym. V našom prípade však ide aj o časovú závislosť, (obr. 2), to znamená, je treba uvažovať s prípadom  $T = (x, y, z, t)$  čo vedie k procesu nestacionárnemu. Generované teplo z hľadiska energetickej bilancie musí byť v rovnováhe s teplom absorbovaným a tepelnými stratami do obklopujúceho prostredia. Keďže budeme analyzovať osove súmerný kanál elektrického priarazu, prepíšeme rovnicu energetickej bilancie do všeobecného tvaru:

$$\gamma E^2 = W(T) + C \frac{dT}{dt} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda \frac{dT}{dr} \right) \quad (1)$$

kde  $\gamma$  – merná elektrická vodivosť izolácie,  $E$  – intenzita elektrického poľa,  $W(T)$  – vyžiarený výkon na jednotku objemu,  $r$  – polomer kanálu,  $T$  – teplota,  $\lambda$  – tepelná vodivosť,  $C$  – merná tepelná kapacita.



**Obr. 2.** Priebeg teploty v závislosti na čase počas vývoja prierezného kanála; v limite je  $dT_1/dt_1 < dT_2/dt_2$

Pri elektrickom priereze dochádza k náhlemu uvoľneniu tepla, takže tepelné straty do okolia môžu byť zanedbateľné a celé vyvinuté teplo sa spotrebuje na lokálne zvýšenie teploty izolácie. Tento stav vedie k impulznému tepelnému prierezu. Nakoľko sa jedná o „uzavretý“ systém kedy sa kanál nachádza vo vnútri izolácie (napr. kábelový polyetylén), vyžiarený výkon  $W(T)$  na jednotku objemu nebudeme v ďalšom uvažovať. Potom rovnica (1) sa redukuje na tvar:

$$\gamma E^2 = C \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Mernú vodivosť izolácie vyjadríme vzt'ahom:

$$\gamma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\tau \operatorname{tg} \delta = 0,555 f \varepsilon_\tau \operatorname{tg} \delta 10^{-10} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$$

dovtedy, kým nie je porušená výbojovým kanálom. V prípade vzniku výboja v kanáli s kruhovým prierezom v prostredí pevného izolantu — polyetylénu, najčastejšie v mieste najkratšej siločiar (čo je fiktívna predstava), zvýši sa hodnota  $\operatorname{tg} \delta > 100$ , relatívna permitivita elektrického výboja v plynnom prostredí kanála bude  $\varepsilon_\tau > 500$  čo znamená zvýšenie lokálnej vodivosti o niekoľko rádov. Analogický výsledok dostaneme pri náhlej zmene intenzity pol'a z hodnoty napr.:  $3,5 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$  na  $3,5 \cdot 10^{-1} \text{ Vm}^{-1}$  v trupe prierezného kanála počas výboja. Vychádzajúc z tejto úvahy sme odvodili kritickú intenzitu elektrického pol'a  $E_c$  [9], pričom sme korigovali interpretáciu podľa [3]. Na základe našich predchádzajúcich meraní pri skúmaní  $U(t)$  v nehomogénnom elektrickom poli sme dospeli k názoru, že k elektrickému prierezu počas aktivácie treeing efektu doba do prierezu sa dá vyjadriť vzt'ahom:

$$\frac{U}{U_c} = \left( \frac{t}{t_c} \right)^{-n} \quad \text{kde } n \in \langle 5, 20 \rangle \quad (3)$$

Vzt'ah (3) sa pretransformuje na pomer intenzít elektrického pol'a v prípade usporiadania hrot–hrot podl'a CIGRE, ref. 15–05 na základe rovnice:

$$E = \frac{U}{r \ln \left(1 + \frac{4d}{r}\right)}$$

Takže po úprave bude:

$$\frac{E}{E_c} = \left(\frac{t}{t_c}\right)^n \quad \text{alebo} \quad E = E_c t^n t^{-n} \quad (4)$$

Vzájomnú súvislosť teploty a intenzity elektrického pol'a počas impulzného elektro-tepeľného namáhania vyjadríme:

$$\gamma E^2 = C \frac{dT}{dE} \cdot \frac{dE}{dt} \quad (5)$$

Od teploty však závisí aj merná elektrická vodivosť  $\gamma$ , ktorej exponenciálna závislosť je priamo úmerná počiatočnej vodivosti  $\gamma_0$  ale závisí od aktivačnej energie  $w$  takže:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{w}{kT}\right) \quad (6)$$

Po dosadení do vzt'ahu (5) a vyriešení rovnice bude hodnota kritickej intenzity elektrického pol'a  $E_c$  mat' hodnotu [9]:

$$E_c = \left(\frac{3nCkT_0^{2+n}t_c^n}{\gamma_0 w t^{n+1}}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{w}{2kT_0}\right) \quad (7)$$

K tomuto výsledku sme dospeli za predpokladu, že aktivačná energia  $w \gg kT$  a  $T_c > T_0$  ( $T_c$  – kritická teplota).

Taktiež sme riešili v zmysle [3] tepelný priaraz počas generovania tepla medzi elektródami. Ak by sme riešili separátne druhú časť rovnice (1) a zovšeobecnil by sme ju pre rovinné (nie valcovité) usporiadanie potom výkon dodaný do jednotky objemu PE izolácie by sa dal vyjadriť:

$$\gamma E^2 = \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) \quad (8)$$

Využívajúc elementárny Ohmov zákon v diferenciálnej forme  $j = \gamma E$  (pričom  $E = -dU/dx$ ) na vyjadrenie  $\gamma$ , upravíme rovnicu (8) do tvaru:

$$-j \frac{dU}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) \quad (9)$$

Integrovaním (9) a d'alšou úpravou dosadením za  $j = -\gamma \frac{dU}{dx}$  získame pre kritickú hodnotu napätia  $U_c$  pri tepelnom priaraze vzorec:

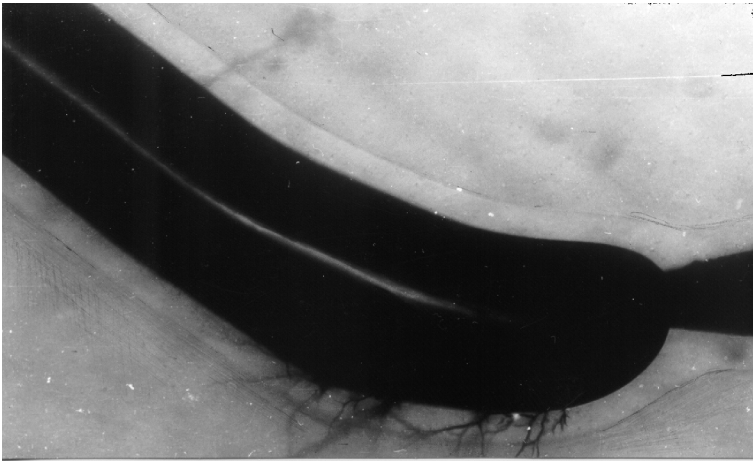
$$U_c^2 = 8 \frac{\lambda}{\gamma_0} \int_{T_0}^{T_c} \exp \frac{w}{kT} dT \quad (10)$$

Práve tak platí aj o rovnici (10), že ju možno aplikovať rovnako pre prostredie pevných dielektrík, ako aj na plynné izolanty. Podl'a údajov v [3] je maximálna intenzita pri tepelnom priaraze v polyetyléne 3,5 MV/cm.

### 3. Tepelný gradient v kanáli elektrického prierazu

Pri mikroskopickom skúmaní kanála po termoelektrickom prieraze sme v prípade kábelového polyetylénu zistili, že relatívne vysoká teplota počas elektrického výboja v karbonizovanom kanáli nepriaznivo pôsobí na steny kanála. Dokázali sme, že sa v určitej hrúbke jeho kruhového prierezu (až niekoľko desiatok mikrometrov, ak priemer kanála bol  $20\mu\text{m}$ ) mení štruktúra polyméru a tým sa menia aj jeho optické vlastnosti. Ak predpokladáme, že rozdiel teplôt vnútornej a vonkajšej steny narušenej časti kanálu je  $T_1 - T_2$ , najkratšia dĺžka valca daná vzdialenosťou hrotových elektród je  $10^{-2}$  m, šírka medzikružia degradovanej časti nech je  $r_1 - r_2 = 30\mu\text{m}$ , potom vieme vypočítať na základe predchádzajúcich poznatkov množstvo tepla (tepelnej energie) za čas  $t$  predchádzajúceho valcovitou plochou.

Tvar kanálu šíriaceho sa od hrotovej elektródy je znázornený na obr. 3.



**Obr. 3.** Kanál vytvorený elektro-tepelným prierazom, postupujúcim od hrotovej elektródy. Priemer kanála je  $200\mu\text{m}$

Pri relatívnom pozorovaní sme zistili, že vyššie uvedená tepelná degradácia zasahuje rovnako kanál po celej dĺžke a najvýraznejší vplyv teploty sa prejavuje na rozhraní kovového hrotu a sféricky zakončeného kanálu prierazu.

Vyššie uvedené tepelné množstvo prejde tzv. „plášťom kanála“ v diskrétnom ohraničenom objeme. Výpočet tepelnej energie cez daný plášť cylindrického tvaru urobíme pre ľubovoľný polomer  $x$  od osi kanálu, ktorého plocha  $S$  pri dĺžke kanálu bude:  $S = 2\pi xl$ .

V takomto prípade množstvo tepla bude:

$$Q = -\lambda 2\pi xl \frac{dT}{dx} \cdot t \quad (11)$$

Úpravou dostávame diferenciálnu rovnicu:

$$\frac{Q}{2\pi l \lambda t} \cdot \frac{dx}{x} = -dT \quad (12)$$

Za predpokladu, že  $l$ ,  $t$  a  $\lambda$  sú konštantné veličiny, dané geometriou medzielektródového priestoru, vlastnosťami polyetylénu a dobou  $t$ , za ktorú pozorujeme prechod tepelnej energie cez fiktívny plášť kanálu, potom základný vzťah pre integrovanie rovnice (12) bude:

$$\frac{Q}{2\pi l \lambda t} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dx}{x} = - \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (13)$$

Integráciou (13) dostaneme rozdiel teplôt vnútornej a vonkajšej steny ( $T_1 - T_2$ ) vo forme:

$$T_1 - T_2 = \frac{Q}{2\pi l \lambda t} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (14)$$

Pričom  $r_2$  je vonkajší polomer degradovaného valca polyetylénu a  $r_1$  je polomer vnútornej časti karbonizovaného kanálu.

Hľadaná tepelná energia je teda:

$$Q = 2\pi l \lambda t \frac{T_1 - T_2}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (15)$$

Závislosť teploty od vzdialenosti  $x$  nájdeme integráciou rovnice (12) v hraniciach od  $r_1$  po  $x$ , resp. od  $T_1$  po  $T_2$  čo sa dá vyjadriť rovnicou:

$$T = T_1 - \frac{Q}{2\pi l \lambda t} \ln \frac{x}{r_1} = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{\ln x - \ln r_1}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (16)$$

Poznajúc základné vlastnosti kábelového polyetylénu, je možné zostaviť siet' kriviek, ktoré detailne poukážu na teplotné zmeny, odohrávajúce sa počas výboja v kanáli prierazu v radiálnom smere.

#### 4. Záver

Za ťažiskovú časť v predloženej práci považujeme tretiu kapitolu. Po matematickej analýze prieniku tepelného množstva do izolantu po vytvorení kanálu od elektrického prierazu sa dajú detailne skúmať pomery po totálnej degradácii polyetylénu. Tento sa rozkladá už pri teplote 280°C, pričom taví sa pri teplote 110°C. Prostredníctvom hodnoty elektrickej energie sa dá poukázať na výšku energie, ktorá spôsobuje deštrukciu izolácie, ktorú skúmame. Ukazuje sa, že prienik tepelného množstva do okolia kanála závisí lineárne od času a rozdielu teplôt medzi teplotou v kanáli a izolantom. Avšak rozdiel  $T_1 - T_2$  ovplyvní aj zmenu  $r_1 - r_2$ . Je prirodzené, že pri zvýšenej teplote v kanáli bude rásť šírka degradovanej vrstvy, čím ale bude klesať  $Q$ .

## Literatúra

- [1] **Bayer M.** et al.: *Hochspannungstechnik*, Springer-Verlag Berlin, 1986
- [2] **Wlodek R.**: *Mechanizmy dzialania vyladovaň niezupelnzch v dielektrikach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992
- [3] **Zaengl W., Kuffel E.**: *High Voltage Engineering, Fundamentals*, Pergamon Press, Oxford-New York, 1984
- [4] **Marton K.**: *Über dem Beitrag der Kraftwirkungen eines elektrischen Feldes zur Entwicklung der elektrischen Bäumchen während der Degradation eines Isolierstoffes*, Elektrotechnika, Tom 7 Zeszyt 2, AGH Kraków 1988
- [5] **Marton K.**: *Dizertácia DrSc.*, EF STU Bratislava 1989
- [6] **Marton K., Kollár M., Gargušová T.**: *Pressure and tensile stress in gas filled cavity in Insulation during Partial discharge activity*, Journal of El. Eng. Vol. 48 (1997) No. 11–12
- [7] **Horváth T., Németh E.** et al.: *Villamos szigetelések vizsgálata*, Műszaki könyvkiadó, Budapest 1979
- [8] **Il'kovič D.**: *Fyzika*, Slovenské vydavateľ'stvo technickej literatúry, Bratislava 1957
- [9] **Marton K., Kršňák I., Kolcunová I.**: *Creation of chanel at thermal breakdown*, Analele Universitatii din Oradea, Fascicola Electrotechnica, Oradea 1999

### THERMAL PROCESSES IN VICINITY OF CHANNEL OF ELECTRIC BREAKDOWN CAUSED BY TREEING EFFECT

This paper deals with the causes of occurrence of partial discharge channel and electric breakdown due to pulsed electrical, mechanical pressure and tension stress. Thermal processes in vicinity of needle — needle electrode are analysed. The occurrence of thermal gradient in radial direction of channel caused due to treeing is discussed as well.