

## Lucrarea 8 – DESCĂRCAREA ELECTRICĂ ÎN AER LA TENSIUNE ALTERNATIVĂ DE FRECVENȚĂ INDUSTRIALĂ

### 1. Baze teoretice

#### 1.1. Câmpul electric neuniform

Formarea descărcărilor electrice și valoarea tensiunii disruptive depind în mod esențial de distribuția intensității câmpului electric dintre electrozi, iar aceasta la rândul său depinde de forma electrozilor, de poziția lor reciprocă și de faptul dacă unul din electrozi este sau nu legat la pământ.

Pentru caracterizarea distribuției câmpului electric, în general, se poate folosi noțiunea de grad de neuniformitate, definit prin raportul:

$$k = \frac{E_{\max}}{E_{\text{med}}} = \frac{E_{\max} \cdot d}{U}, \quad (1)$$

în care:  $E_{\max}$  – intensitatea maximă a câmpului electric în interval;  $d$  – distanța dintre electrozi;  $U$  – tensiunea aplicată între aceștia.

Factorul  $k$  ia valorile: *1 pentru câmp uniform; între 1 și 2 pentru câmp slab neuniform; mai mare decât 4 pentru câmp puternic neuniform*. Valoarea factorului de neuniformitate se poate calcula analitic doar pentru configurații simple de electrozi (sferă-sferă), cilindri paraleli sau coaxiali.

În cazul câmpurilor uniforme și slab neuniforme, la o densitate normală a aerului, condiția de autonomie a descărcării este aceeași (densitatea sarcinilor electrice libere din avalanșă suficient de mare, orientativ numărul electronilor din avalanșă mai mare de cca.  $10^8$ ), iar momentul îndeplinirii sale este practic identic cu momentul formării descărcării în scânteie.

În cazul câmpului puternic neuniform condiția de autonomie a descărcării este îndeplinită inițial la suprafața electrodului cu raza de curbura cea mai mică și la o tensiune aplicată cu atât mai mică decât tensiunea disruptivă, cu cât gradul de

neuniformitate este mai mare. În acest caz apare un nou stadiu în formarea descărcării, stadiul de descărcare autonomă incompletă, localizată la electrodul cu rază mică de curbură, cunoscută sub denumirea de descărcare corona.

Valoarea tensiunii disruptive depinde de distanța dintre electrozi, de gradul de neuniformitate a câmpului, umiditatea și densitatea aerului, viteza de variație a tensiunii aplicate.

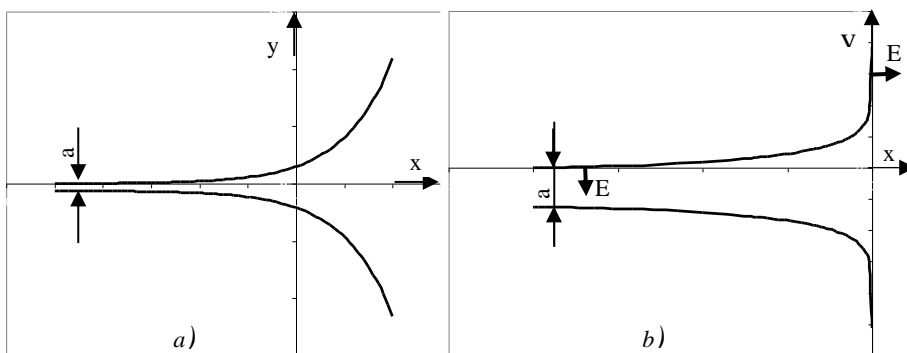
## 1.2. Tensiunea disruptivă în câmp uniform

Câmpul electric uniform există, teoretic, numai între electrozi plani paraleli, cu dimensiuni infinite. În practică, câmpul uniform se poate obține folosind electrozi plani, cu marginea curbată astfel încât intensitatea maximă a câmpului să se obțină în zona plană, centrală, iar în zona curbată acesta să fie mai mică. Astfel, există mai multe forme de electrozi, după cum urmează:

a) *Profilul Rogowski*, prezentat în figura 1, a) este descris de ecuația:

$$y = \frac{a}{\pi} e^{\frac{\pi-x}{a}} \quad (2)$$

Distanța dintre electrozi este limitată la mărimea  $a = 2\pi$ , care, iar dacă aceasta este depășită, se produce trecerea către câmp neuniform.



**Fig.1** – Sisteme de electrozi pentru câmp electric uniform:  
a) – profil Rogowski; b) profil Borda

b) *Profilul Borda*, ce este prezentat în figura 1,b), este caracterizat prin unghiul  $\varphi$  dintre vectorii intensitate a câmpului electric la suprafața electrozilor în zona plană și la extremitatea profilului. Pentru cazul din figura 1,b,  $\varphi \leq 90^\circ$ , dar există profiluri Borda având  $\varphi > 90^\circ$ , mergând până la  $180^\circ$ .

Profilul din figura 1,b) este descris de ecuațiile:

$$x = \frac{a}{\pi} \left[ \sin \varphi - \operatorname{Intg} \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\varphi}{4} \right) \right]; \quad y = \frac{a}{\pi} \cos \varphi \quad (3)$$

Mărimea tensiunii de străpungere a aerului depinde de tipul câmpului electric și se poate determina după cum urmează:

- conform legii lui Paschen – pentru cazul intervalelor de aer în câmp electric uniform;
- conform legii similitudinii descărcărilor electrice – pentru intervalele de aer aflate în câmp slab neuniform.

Totuși, pentru scopuri practice este mai comod a utiliza relații de calcul empirice. Astfel, în cazul sistemelor cu electrozi plani – paraleli cu marginile curbate, ce generează un câmp electric uniform ( $k=1$ ), se poate utiliza expresia de mai jos:

$$U_d = 24,5 \delta s \left( 1 + \frac{0,28}{\sqrt{\delta s}} \right), \quad (4)$$

în care:  $\delta$  – este densitatea relativă a aerului. Dacă  $s$  – distanța dintre electrozi este exprimată în  $cm$ , rezultă  $U_d$  în  $kV$  (valoare de vârf în cazul tensiunii alternative).

### 1.3. Tensiunea disruptivă în câmp puternic neuniform

Caracterul de câmp puternic neuniform este propriu celor mai multe configurații de electrozi întâlniți în practica tensiunilor înalte. Astfel, este imposibil a se stabili o relație de calcul a valorii tensiunii de străpungere, general valabilă, deoarece forma și dispunerea electrozilor, care exercită influența principală asupra ei, pot fi foarte diferite.

În cadrul experimentelor de laborator câmpul puternic neuniform asimetric se modelează prin sistemul de electrozi vârf – placă, iar câmpul puternic neuniform simetric prin sistemul de electrozi vârf – vârf.

Pentru electrozi vârf – vârf, la distanța  $s > 8$   $cm$ , se poate utiliza relația de calcul a tensiunii disruptive

$$U_d = \sqrt{2}(14 + 3,16 \cdot \delta s), \quad (5)$$

în care semnificația mărimilor componente este aceeași ca pentru relația (4).

## 2. Determinări experimentale

Lucrarea de laborator vizează așadar înțelegerea modului în care gradul de neuniformitate al câmpului electric influențează procesul de străpungere al unui interval de aer, în cazul solicitării acestuia cu tensiune alternativă de frecvență industrială. Este analizată, de asemenea, și influența ecranelor dielectrice.

În acest scop, mai întâi, va fi prezentată instalația de înaltă tensiune ce urmează a fi folosită pentru efectuarea încercărilor.

## 2.1. Prezentarea montajului experimental al lucrării

Pentru efectuarea determinărilor experimentale se va utiliza instalația de încercare cu tensiune înaltă alternativă, de 250 kV, din dotarea laboratorului de înaltă tensiune al facultății. Montajul experimental va fi realizat în conformitate cu schema de principiu prezentată în figura 2.

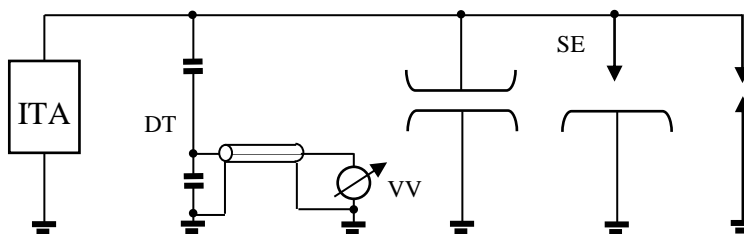


Fig. 2 – Schema de principiu a montajului experimental

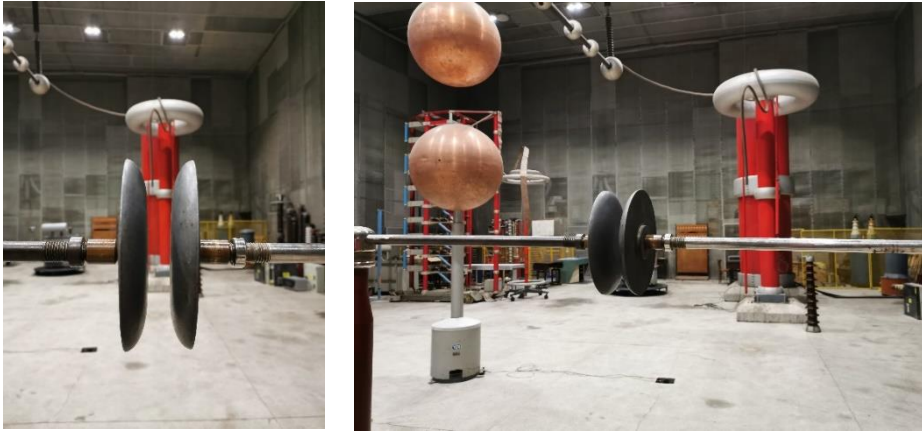
Elementele prezentate în schema din figura 2 au următoarele semnificații: ITA- instalație pentru producerea tensiunilor înalte alternative; DT- divizor de tensiune capacitiv; VV- voltmetru de vârf; SE- sisteme de electrozi.

Instalația de tensiune alternativă, respectiv divizorul capacitiv de tensiune, au fost prezentate pe larg în cadrul lucrării 1 de laborator – *Producerea și măsurarea tensiunilor înalte alternative* (§ 2.1 – pag. 19), atât din punct de vedere constructiv, cât și în ceea ce privește modul de utilizare.

Sistemele de electrozi care urmează a fi utilizate pentru modelarea câmpului electric sunt următoarele:

- *electrozi în formă de disc, cu marginile curbate, conform profilului Rogowski, detaliu prezentat în figura 4 – câmp electric uniform;*
- *electrozi tip vârf – vârf, detaliu prezentat în figura 5.a) – câmp electric neuniform simetric;*
- *electrozi tip vârf – placă, detaliu prezentat în figura 5.b) – câmp electric neuniform nesimetric.*

Pentru a putea analiza influența ecranelor dielectrice asupra modului de formare a descărcărilor electrice și, implicit, asupra tensiunii de străpungere a intervalului de aer dintre cei doi electrozi se va utiliza o coală de hârtie ce va fi dispusă pe un cadru lemn care va fi amplasat între electrozii din montajul experimental, așa cum se poate observa și din figura 6.



**Fig. 4** – Sistem de electrozi cu profil Rogowski pentru modelarea câmpului electric uniform în laboratoarele de înaltă tensiune



a) Sistem de electrozi *vârf – vârf*

b) Sistem de electrozi *vârf – placă*

**Fig. 5** – Sisteme de electrozi pentru modelarea câmpului electric puternic neuniform în laboratoarele de înaltă tensiune

**Fig. 6** – Utilizarea ecranului dielectric în intervalul de aer dintre sistemul de electrozi *vârf – placă*



## 2.2. Modul de lucru

La partea experimentală a lucrării se urmărește analiza influenței caracterului câmpului electric asupra tensiunii de străpungere a unui interval de aer, ca urmare a aplicării tensiunii alternative de frecvență industrială.

Astfel se vor studia următoarele cazuri:

- câmp electric uniform: *sistem de electrozi în formă de disc – tip Rogowski*;
- câmp electric neuniform nesimetric: *sistem de electrozi vârf – placă*;
- câmp electric neuniform simetric: *sistem de electrozi vârf – vârf*.

Influența utilizării ecranelor dielectrice va fi analizată doar pentru cazul sistemelor de electrozi ce generează un câmp electric puternic neuniform, și anume:

- sistem de electrozi *vârf – placă*;
- sistem de electrozi *vârf – vârf*.

Determinările experimentale vor fi însoțite și de o serie de determinări pe cale analitică a tensiunii de străpungere a intervalului de aer. Astfel, utilizând expresiile (4) și (5), prezentate anterior, se poate calcula tensiunea de străpungere în cazul câmpului electric uniform, respectiv neuniform nesimetric.

În continuare sunt prezentate indicațiile de lucru necesare realizării încercărilor experimentale.

### *a. Determinarea tensiunii de străpungere a aerului în cazul sistemelor de electrozi cu câmp electric uniform*

Pentru măsurarea tensiunilor de străpungere se va proceda după cum urmează:

- se montează sistemul de electrozi cu profil Rogowski, conform reprezentărilor grafice din figura 4, asigurând succesiv distanțele de 2, 4, respectiv 6 cm între cele două discuri;
- se vor efectua seturi de trei încercări pentru fiecare distanță reglată, valoarea tensiunii fiind citită în momentul străpungerii intervalul de aer, de pe cadranul voltmetrului de joasă tensiune ce indică tensiunea de alimentare în primarul cascadei;
- pentru determinarea tensiunii de străpungere a intervalului de aer,  $U_{dm}$ , se va înmulți tensiunea de alimentare a cascadei, înregistrată anterior, cu raportul de transformare al cascadei, acesta fiind de 1250;
- toate intervențiile în zona de înaltă tensiune, pentru modificarea distanței dintre electrozi, respectiv pentru modificarea sistemului de electrozi, se vor realiza numai după întreruperea tensiunii de alimentare a instalației și verificarea, în

prealabil, a prezenței tensiunii remanente pe elementele instalației, cu ajutorul scurtcircuitului mobil.

- pentru aceleași distanțe între electrozi, se va calcula tensiunea disruptivă,  $U_{dc}$ , folosind relația (4), în care densitatea relativă a aerului,  $\delta$ , se va determina conform expresiei de mai jos:

$$\delta = 0,386 \frac{p}{273+t} \quad (6)$$

în care  $p$  se introduce în mmHg iar  $t$  în grade Celsius, valorile acestora fiind măsurate în laborator la momentul efectuării încercărilor.

#### *b. Determinarea tensiunii de străpungere a aerului în cazul sistemelor de electrozi cu câmp electric puternic neuniform*

Pentru măsurarea tensiunilor de străpungere se iau în considerare următoarele indicații:

- se va monta sistemul de electrozi tip *vârf – vârf*, iar apoi cel tip *vârf – placă*, conform reprezentărilor grafice din figura 5, considerând distanțele de 5, 10, 15, 20 și 25 cm între cei doi electrozi;
- se efectuează seturi de trei încercări la fiecare distanță, valoarea tensiunii de străpungere fiind obținută similar încercărilor efectuate anterior, la cazul sistemului de electrozi tip Rogowski;
- pentru sistemul de electrozi *vârf – vârf*, cu distanțe între electrozi  $s > 8$  cm, se vor calcula tensiunile disruptive cu relația (5), considerând valoarea densității relative a aerului calculată anterior.

#### *c. Analiza influenței ecranelor dielectrice asupra tensiunii de străpungere a intervalelor de aer*

Pentru realizarea acestui studiu se au în vedere următoarele etape:

- se vor considera sistemele de electrozi *vârf – placă* și *vârf – vârf*, distanța dintre electrozi fiind stabilită la 20 cm;
- ecranul dielectric este constituit dintr-o coală de hârtie, ce va fi dispusă între cei doi electrozi, așa cum este indicat și în figura 6, la mijlocul distanței;
- se vor realiza seturi de trei încercări pentru fiecare caz considerat, tensiunea de străpungere fiind obținută prin înmulțirea tensiunii de alimentare în primar a cascadei cu raportul de transformare a acesteia;
- în situația în care ecranul de hârtie ia foc ca urmare a străpungerii sale, acesta va fi înlocuit cu o nouă coală de hârtie, intervenția în zona de înaltă tensiune realizându-se cu respectarea regulilor referitoare la întreruperea alimentării și verificarea prezenței tensiunii remanente.

Rezultatele încercărilor experimentale efectuate, respectiv ale determinărilor analitice, se vor nota într-un tabel realizat conform modelului prezentat mai jos:

**Tabelul 1.** Rezultatele obținute

Sistemul de electrozi	$s$ (cm)	$U_{dm}$ (kV)				$U_{dc}$ (kV)	$E_m=U_{dm}/s$ (kV/cm)
		1	2	3	Med.		
<i>Placă – placă</i>	...						
<i>Vârf – placă</i>	...						
<i>Vârf – vârf</i>	...						
<i>Vârf – placă cu ecran</i>	...						
<i>Vârf – vârf cu ecran</i>	...						

Pentru toate sistemele de electrozi considerate valoarea tensiunii de străpungere a intervalului de aer va fi calculată ca medie a celor trei determinări efectuate. De asemenea, se va calcula intensitatea câmpului electric,  $E_m$ , pentru fiecare caz în parte.

Se vor reprezenta grafic funcțiile:  $U_{dm} = f(s)$ ,  $U_{dc} = f(s)$ ,  $E_m = f(s)$  și se vor prezenta concluzii privind rezultatele experimentelor.