

## STUDIUL ARCULUI ELECTRIC DE CURENT CONTINUU ȘI ALTERNATIV

### 1. Noțiuni teoretice

#### 1.1. Generalități

Arcul electric este o descărcare electrică în gaze sau vapori, autonomă (cu tendințe de automenținere) și caracterizată de următoarele:

- densități de curent foarte mari;
- căderi de tensiune mici pe coloană;
- coloana de arc se comportă ca un conductor mobil cu secțiunea ajustabilă de către curentul care îl produce;
- arcul electric se comportă ca o rezistență ohmică, neliniară;
- starea fizică de agregare a arcului electric este plasma;
- poziția spațială a coloanei de arc este modificabilă sub acțiunea câmpului magnetic, câmpului electric și a curenților de gaze;
- în coloana de arc, temperaturile sunt foarte ridicate ( $6000 \div 18000$  K).

La conectarea (închiderea) și deconectarea (deschiderea) unui circuit electric, există posibilitatea să apară arcul electric atunci când sunt satisfăcute anumite condiții:

- existența unei tensiuni de alimentare superioare unei anumite tensiuni, numită tensiunea minimă de arc;
- existența unui curent minim în arc, deci a unei puteri minime disponibile în sursa de alimentare.

La apropierea contactelor (conectare) spațiul dintre electrozi se ionizează, apare arcul electric la o distanță  $l$  și se stinge în momentul în care electrozii ajung în contact.

La depărtarea contactelor (deconectare) spațiul dintre electrozi se ionizează, luând naștere arcul electric care se stinge atunci când se atinge lungimea critică a acestuia. În concluzie, arcul electric de comutație este un fenomen dăunător prin temperaturile ridicate pe care le are și care erodează contactele.

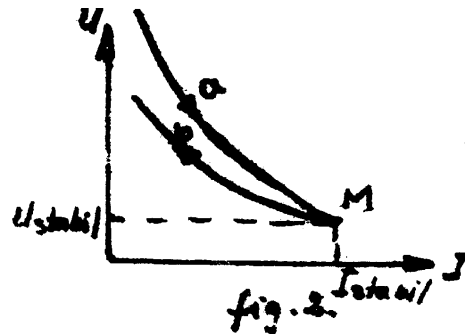
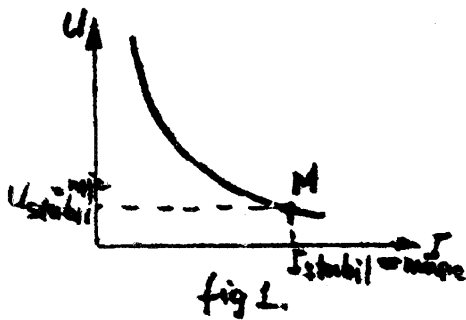
Funcționarea aparatelor de comutație și protecție cu contacte este strâns legată de apariția și stingerea arcului electric.

#### 1.2. Parametrii arcului electric:

- căderea de tensiune pe arc,  $U_a$ ;
- curentul prin arc,  $I_a$ ;
- gradientul de potențial în spațiul de arc,  $E_a$ ;
- lungimea arcului,  $l_a$ ;
- diametrul arcului  $d_a$ ;
- rezistența arcului  $R_a$ .

În aparatele electrice comportarea arcului electric este studiată prin analiza caracteristicii  $U_a=f(I_a)$ .

Alături de caracteristica  $U_a=f(I_a)$  la arc de curent continuu este prezentată în fig.1 constatându-se o dependență a acestuia de sensul variației curentului ( $di/dt > 0$  sau  $di/dt < 0$  - fig.2).



Arcul electric se stabilizează în zona curenților mari și a căderilor mici de tensiune (pct.M - fig.1 și 2), când arcul se stinge, crește tensiunea pe arc.

Arcul electric se stinge când căderea de tensiune pe arc depășește valoarea tensiunii sursei de alimentare, deci când căderea de tensiune pe arc crește încât tensiunea de alimentare nu mai este capabilă să întrețină arcul. Orice arc electric indiferent de lungimea și de valoarea curentului, se stinge când valoarea tensiunii sursei de alimentare scade sub  $22\pm 26V$ , aceasta reprezentind caderea de tensiune la electrozi.

### 1.3. Stingerea arcului electric de comutație

Se poate face:

- pe cale naturală;
- pe cale artificială.

Pe cale naturală se face prin lungirea arcului crescând  $R_a$  și scăzând  $I_a$ . Stingerea artificială se face prin activarea deionizării cu ajutorul dispozitivelor (camerelor) de stingere prin:

- suflaj magnetic;
- suflaj cu aer comprimat;
- autosuflaj prin descompunerea uleiului mineral, etc.

La lucrarea de laborator, stingerea arcului se va face prin:

- prin deplasarea electrozilor cu ajutorul manivelei de reglare a distanței, măbind lungimea de arc  $l_a$ , crescând deci rezistența de arc  $R_a$ , va scădea  $I_a$  și când se atinge lungimea critică arcul se va stinge;
- prin utilizarea electromagnetului de suflaj magnetic; prin introducerea unui curent continuu  $I_S$  în înfășurarea electromagnetului de suflaj ia naștere un câmp magnetic care acționează cu o forță  $F$  (forța lui Laplace), asupra coloanei de arc. Suflajul se face în sens antigravitațional și arcul este curbat (lungit) până la stingere (se va acorda atenție la polaritatea curentului din bobină pentru aceasta orientare);
- prin montarea unor elemente de ușurare a stingerii în serie sau în paralel cu arcul:  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , ceea ce duce la scăderea valorii curentului  $I_a$ . Arcul electric în curent continuu se stinge mult mai greu decât cel în curent alternativ deoarece curentul alternativ trece în mod natural prin zero la fiecare semiperioadă.

1.4. Caracteristica arcului de curent continuu se poate reprezenta prin una din ecuațiile de mai jos:

$$\text{Ecuația lui Nottingham: } U = aI + \frac{bI}{I^n};$$

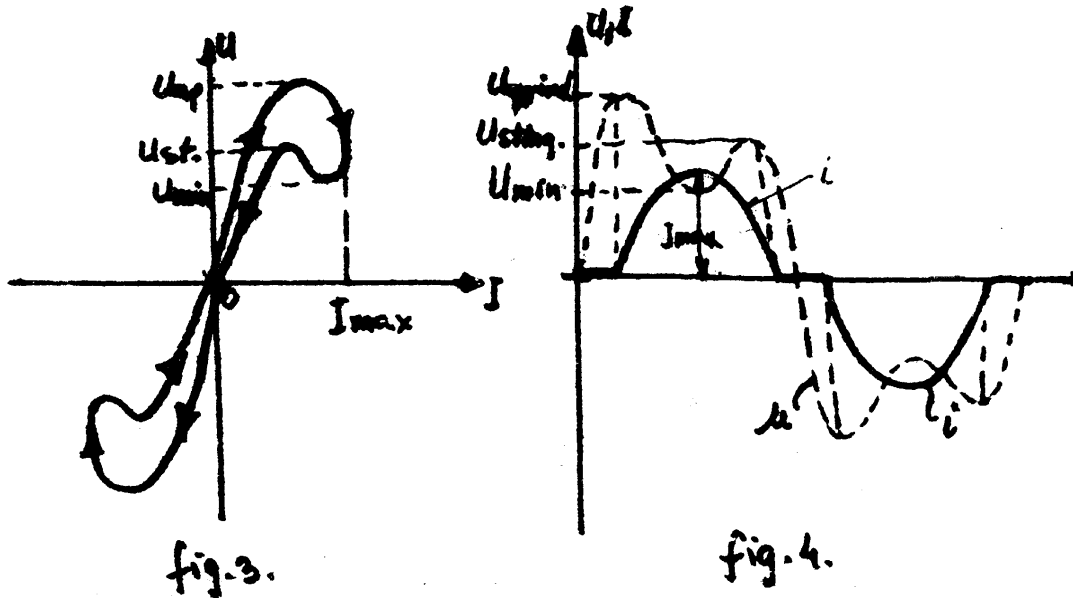
unde:

- $n =$  constantă  $< 1$  depinzând de temperatura absoluta a arcului;
- $aI$ ,  $bI =$  constante de material.

$$\text{Ecuatia lui Ayrton: } U = a + \frac{b}{I}, \quad s = \alpha + \gamma \cdot l, \quad b = \beta + \delta \cdot l,$$

unde:

- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  = constante de material;
- $l$  = lungimea arcului.



Curentul și tensiunea arcului electric în funcție de timp au alina din fig.4.

## 2. Chestiuni de studiat

Atât pentru arc electric de curent continuu cât și pentru cel de curent alternativ se vor ridica următoarele caracteristici:

**2.1. Tensiunea arcului (căderea de tensiune pe arc) în funcție de curentul din arc,  $U=f(I)$**  pentru diverse valori ale lungimii arcului  $l_a$ ; cu acest prilej se vor determina și prin calcul constantele de material ale ecuațiilor Ayrton și eventual Nottingham pentru arc de curent continuu la care caracteristicile de mai sus se ridică prin puncte (regim static); pentru arc de curent alternativ caracteristicile de mai sus se vizualizează pe osciloscop.

**2.2. Rezistența electrică a arcului în funcție de curentul din arc,  $R_a = \frac{U}{I} = f(I)$**  care se obține prin calcul din caracteristicile de la pct.2.1.

**2.3. Tensiunea arcului electric de curent continuu în funcție de lungimea sa,  $U=f(l_a)$**  pentru diverse valori constante ale curentului din arc.

**2.4. Tensiunea arcului electric și curentul din arc electric de curent alternativ în funcție de timp,  $u=f(t)$  și  $i=f(t)$**  pentru arc de curent alternativ având diverse lungimi ( $l_a$ ), aceste caracteristici se vizualizează pe osciloscop.

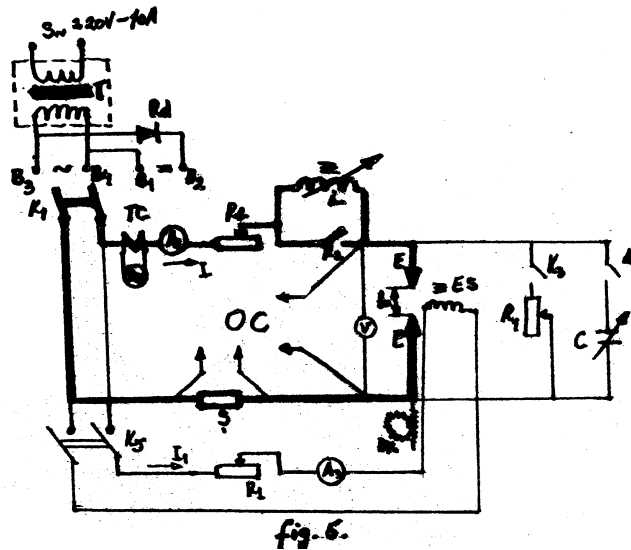
**2.5. Dependența caracteristicilor  $U=f(I)$ ,  $U=f(t)$ ,  $U=f(l_a)$ ,  $R_a=f(I)$**  de la punctele 2.1,...,2.4. de mai sus precum și condițiile de stingere a arcului electric în funcție de următoarele elemente (condiții) artificiale introduse din exterior:

- înserierea cu arc electric a unor rezistențe electrice și apoi a unor inductanțe cu varierea valorii acestora;

- conectarea în paralel cu arcul electric a unor rezistențe electrice și apoi a unor condensatoare electrice cu varierea valorii acestora;
- introducerea suflajului magnetic cu valori diferite ale câmpului magnetic cu ajutorul:
  - ✓ unor pastile de ferită numai la arcul electric de curent continuu;
  - ✓ unui electromagnet la care se va varia curentul din bobina atât pentru arcul de curent continuu cât și pentru cel de curent alternativ.

*Notă:* Se va avea grijă ca suflajul să fie ascendent ceea ce depinde de orientarea câmpului magnetic.

### 3. Schema de lucru și aparatele utilizate



*Notă:* Circuitul de curenți mari s-a desenat cu linii groase.

S~ = sursa de curent alternativ 220V - 10A;

T = transformator coborâtor de tensiune, alimentator pentru curenți mari;

R<sub>d</sub> = dioda redresoare de 100A;

K<sub>1</sub> = comutator pentru conectarea schemei, fie la bornele B3-B4 pentru curent alternativ, fie la bornele B1-B2 pentru curent continuu;

OC = osciloscop catodic;

ES = electromagnet pentru suflajul magnetic;

DR = dispozitiv cu manivelă pentru reglajul manual al distanței între electrozi, respectiv a lungimii  $l_a$  a arcului electric;

E = electrozi între care se produce arcul electric;

R<sub>1</sub> = reostat cu lichid (electrolit = apă + sare) pentru 100A;

L = inductanță reglabilă;

K<sub>2</sub>,...K<sub>5</sub> = întreruptoare (hebluri);

A<sub>1</sub> = ampermetru de curent continuu pentru 50 - 100A (se poate înlocui cu un ampermetru de curent redus având în paralel șunturi calibrate);

A<sub>2</sub> = ampermetru de curent alternativ pentru 5A;

TC = transformator de măsură a curentului;

S = șunt neinductiv;

A<sub>3</sub> = ampermetru universal pentru 1A;

R<sub>1</sub> = reostat metalic pentru minim 1A și cu rezistența de  $2 \times 800\Omega$ ;

V = voltmetru universal pentru 100V;

C<sub>p</sub> = baterie de condensatoare identic conectate în paralel cu reglajul în trepte al capacității, prin introducerea sau scoaterea unor condensatoare.

#### 4. Modul de lucru

Se va executa schema de montaj pentru studiul arcului electric în curent continuu, mai puțin alimentarea la sursa de tensiune care se face numai la indicația cadrului didactic care conduce lucrarea sau a tehnicianului.

Începerea lucrării este precedată de o serie de operații pregătitoare care constă în:

- scoaterea electromagnetului de suflaj din interiorul dispozitivului pentru studiul arcului care se va monta numai când se cere suflajul magnetic;
- curățirea electrozilor de cărbune până la obținerea unor suprafețe plane în zona de contact;
- electrozii de cupru și de oțel se curăță pentru a le înlătura oxidul din zona de contact (la ambele capete se polizează, urmărindu-se să se mențină la un capăt forma ascuțită a contactului, iar la celălalt forma plană);
- se fixează electrozii în dispozitivul de lucru în așa fel încât să poată veni în contact prin manevrările realizate cu manivela;
- se execută apoi câteva manevre de apropiere și depărtare a electrozilor, pentru a căpăta îndemânare în mânăuirea dispozitivului urmărind distanța dintre electrozi. La o rotație completă a manivelei (360°) se obține o deplasare a electrozilor cu un milimetru ;
- se apropie electrozii în așa fel încât să fie în contact direct și se reglează acul indicator al manivelei la poziția zero.

#### 4.1. Studiul arderii și stingerii arcului electric de curent continuu în regim dinamic și

##### static

- se execută montajul din figură cu toate întreruptoarele deschise și cu R<sub>1</sub> întrerupt (sapele scoase);
- se aduc electrozii în contact și se închid K1 și K2 introducând lent sapele reostatului R<sub>1</sub> în lichid și reglându-se astfel curentul la cca. 20 A cum va arată ampermetrul A1 (montat în tabloul de alimentare, comandă și control); K1 se închide pe bornele B1 - B2 ;
- prin mânăuirea manivelei de distanțare a electrozilor, se amorsează un arc de o lungime constantă  $l_a = 1 \div 2 \text{ mm}$  ;
- prin introducerea lentă a sapelelor reostatului R<sub>1</sub> în lichid se crește lent curentul notând în tabel valorile succesive ale lui I și ale tensiunii arcului electric citite la voltmetru ;
- când curentul atinge valoarea de 40 ÷ 50A se scot sapele reostatului din lichid până la stingerea definitivă a arcului notând succesiv valorile curentului și ale tensiunii.

Valorile obținute se trec în tabel repetându-se pentru diverse valori menținute constante ale lungimii arcului electric ( $l_a = \text{ct.}$ ). În felul acesta se trasează prin puncte caracteristicile arcului electric

de curent continuu  $U=f(I)$  și  $R_a = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} = f(I)$  pentru diverse valori ale lui  $l_a$ , pentru ambele sensuri

de variație ale lui I, crescător  $\left(\frac{dI}{dt} > 0\right)$  și descrescător  $\left(\frac{dI}{dt} < 0\right)$ .

*Notă:* - Se impune un ritm rapid de lucru pentru evitarea erorilor produse de consumarea electrozilor de contact, prin creșterea necontrolată a lungimii arcului ( $l_a \neq \text{constant}$ ).

- Valorile lui  $U$  de mai sus se citesc la voltmetrul V, iar ale lui  $I$  la ampermetrul A1 din fig.5, valoarea  $R_x$  a rezistenței interne a voltmetrului V este înscrisă pe acesta ca o constantă de fabricație. Valorile rezistenței arcului electric  $R_a$  se calculează cu relația:  $R_a = \frac{U}{I}$ .

- Parametrii ecuațiilor Ayrton și Nottingham pentru arcul electric de curent continuu se calculează prin sortarea succesivă a acestor ecuații pentru diversele valori măsurate ale lui  $U$ ,  $I$  și  $l_a$ , cu rezolvarea respectivă a sistemului de ecuații obținute.

#### **4.2. Studiul arderii și stingerii arcului electric de curent continuu, în condițiile înserierii unei inductanțe (L) cu arcul electric**

Se repetă montajul și toate indicațiile de la pct. 4.1. de mai sus, dar cu modificarea că se închide numai K1 și se lasă K2 deschis, reglând diverse valori ale lui  $L$  din fig.5.

Se vor compara caracteristicile obținute la pct. 4.1. cu cele obținute la pct. 4.2. pentru aceleași valori ale lungimii  $l_a$  a arcului electric, elaborând concluzii asupra efectului prezenței unor inductanțe în circuitul de c.c. cu arc electric în serie cu acesta.

#### **4.3. Studiul arcului electric de curent continuu în condițiile conectării în paralel cu acesta a unei rezistențe și respectiv a unui condensator electric**

Se repetă montajul și toate indicațiile de la pct. 4.1. de mai sus închizând întreruptorul K3 (pentru introducerea în paralel cu arcul electric a capacității  $C$ , reprezentând o baterie de condensatoare în paralel).

Pentru diverse valori ale lui  $RI$  și  $C$  se vor compara caracteristicile obținute la pct. 4.3. cu cele obținute la pct. 4.1. pentru aceleași lungimi ale arcului electric  $l_a$ , elaborând concluzii asupra efectului prezenței în paralel cu arcul electric a unor elemente de circuit ca cele arătate. Se va urmări în special rolul valorilor acestor elemente de circuit asupra instabilității arderii și asupra tendințelor de stingere a arcului electric de curent continuu.

#### **4.4. Studiul stingerii arcului electric de curent continuu cu suflaj magnetic**

Se folosește montajul de la pct. 4.1., cu toate indicațiile respective, introducându-se însă după stabilizarea arcului electric electromagnetul de suflaj ES (fig.5) prin închiderea lui K5, după ce se asigură condițiile de mai jos:

- polaritatea alimentării bobinei electromagnetului ES va trebui să realizeze suflajul ascendent antigravitațional, al arcului electric ;
- se va începe cu un curent  $II$  mic, măsurat la ampermetrul A3, deci cu reostatul  $R_I$  având rezistența maximă; curentul  $II$  se va crește lent prin reducerea valorii rezistenței reostatului  $R_I$ , până când arcul electric se stinge ;
- lungimea și stingerea arcului electric se vor urmări vizual prin fereastra înnegrită a dispozitivului ( vizor opac );
- suflajul magnetic se repetă cu ajutorul discurilor de ferită. Pentru diverse valori menținute constante ale curentului  $II$  și lungimii arcului  $l_a$  se vor ridica din nou caracteristicile de la pct.4.1. comparându-le între ele și elaborând concluzii asupra eficienței suflajului magnetic.

#### **4.5. Studiul arcului electric de curent alternativ**

##### **4.5.1. Ridicarea caracteristicilor statice**

Se procedează la fel ca la pct.4.1. dar comutatorul K1 se închide pe bornele B3-B4. Apoi se citesc diferite valori ale lui  $U$  și  $I$  pentru  $\left(\frac{dI}{dt} > 0\right)$  și  $\left(\frac{dI}{dt} < 0\right)$ , la fel ca la pct. 4.1.

În continuare se înseriază L, apoi se introduc succesiv în paralel  $RI$  și  $C$  și se aplica suflajul magnetic dar numai cu electromagnetul de suflaj RS (nu și cu discul de ferită) la fel ca la pct. 4.2., 4.3., 4.4., comparând datele între ele și respectiv cu cele de la arcul de curent continuu pentru aceleași valori ale lungimii  $l_a$  ale arcului electric. Trasarea caracteristicilor statice ale arcului de curent alternativ se va face prin puncte la fel ca și la arcul de curent continuu.

#### 4.5.2. Ridicarea caracteristicilor dinamice

Se va utiliza osciloscopul catodic (ex. cel cehoslovac KRIZIK - T - 565), care se va conecta la o sursa de 220V~ cu cca. 5min înainte de începerea lucrării pentru încălzire. Bornele voltmetrului V (fig.5) se leagă la plăcile de deflexie verticală (Y) ale osciloscopului. Stabilirea frecvenței pe care lucrează osciloscopul se face punând butonul SWEPP COARSE pe diviziunea 50Hz. Se închide întreruptorul K1 (fig.5) pe bornele B3 - B4. Se depărtează electrozii la o distanță de 4mm și se introduc puțin sapele reostatului  $R_l$  în lichid până face contact cu acesta din urmă (pe poz. de rezistență maximă). Se închide apoi întreruptorul K2 (fig.5) moment în care voltmetrul V va indica prezenta tensiunii  $U_0$  la bornele electrozilor iar pe ecranul osciloscopului va apare sinusoida  $U = f(t)$ .

Tensiunea  $U_0$  la bornele electrozilor este tensiunea de mers în gol, adică fără arc electric amorsat, între electrozi existând un spațiu electroizolant de aer. Se apropie electrozii E (fig.5) până la contact și apoi prin creșterea distanței  $l_a$ , se va amorsa arcul electric iar pe ecranul osciloscopului se va vedea curba  $U = f(t)$  unde  $U$  este tensiunea de arc. Se aplică pe ecranul osciloscopului hârtie de calc și se copiază curba  $U = f(t)$  pentru diferite valori ale distanței  $l_a$  dintre electrozi, menținând  $I = \text{const}$ .

Se va constata creșterea tensiunii odată cu creșterea distanței dintre electrozi, deci se observa creșterea amplitudinii curbei  $U = f(t)$ . Se va proceda apoi la stabilirea diferitelor valori pentru curentul din arc, menținind constantă distanța între electrozi, se constată că în cazul aceleiași distanțe dintre electrozi amplitudinea curbei  $U = f(t)$  este mai mare pentru curentul din arc mai mic și pentru distanțe  $l_a$  mai mari. Alături curbei  $U = f(t)$  se va compara cu cea cunoscută (fig.6) elaborând concluzii.

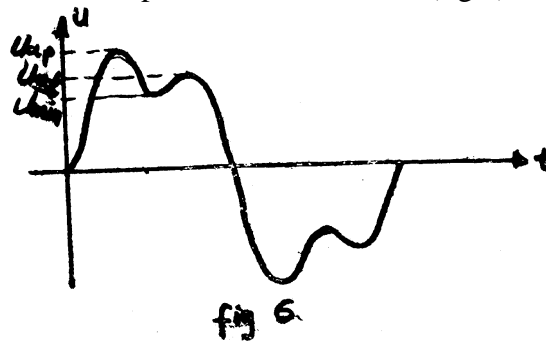


fig. 6.

Curba  $i = f(t)$  se va vizualiza pe ecranul osciloscopului, aplicând la plăcile de deflexie verticală (Y) ale acestuia legăturile de la bornele șuntului neinductiv S (fig.5); curba  $i = f(t)$  se va ridica pentru diverse valori ale curentului  $I$  eficace citite la ampermetrul A1 (fig.5), reglate cu reostatul cu lichid  $R_l$ , elaborând concluzii prin compararea cu curba cunoscută (fig.7).

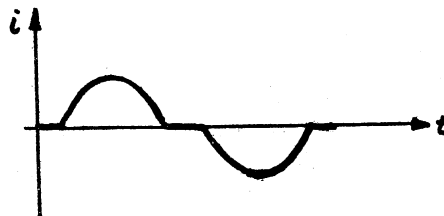


fig. 7.

Curba  $u = f(i)$  se va vizualiza pe ecranul osciloscopului prin aplicarea simultană a tensiunii  $U$  (de la bornele voltmetrului V-fig.5) la plăcile de deflexie verticală (Y) ale osciloscopului și a curentului  $i$  (de la bornele șuntului S-fig.5) la plăcile de deflexie orizontala (X) ale osciloscopului. Curba  $u = f(i)$  se va ridica pentru diverse valori ale tensiunii  $U$  (valori eficace citite la voltmetrul V-fig.5) reglate cu ajutorul modificării lungimii  $l_a$ , a intervalului dintre electrozi, comparând caracteristicile obținute cu cele cunoscute (fig.3).

Curbele obținute se vor copia pe hârtie de calc, la scară, cu indicarea numerică a valorilor specifice pentru  $u$  și  $i$ : ( $U_{aprinde}$ ,  $U_{stingere}$ ,  $U_{minim}$ ,  $I_{max}$ ).

Aceste curbe se vor compara între ele și în cazul variației valorii eficace a curentului  $I$  (măsurat la ampermetrul A1-fig.5) cu ajutorul reostatului cu lichid  $R_l$ .

Cele trei tipuri de caracteristici de la pct. a, b, c de mai sus se vor repeta în următoarele condiții (fig.5), create ca și la cazul arcului de curent continuu:

- pentru înserierea inductanței  $L$  cu arcul electric;
- pentru conectarea în paralel cu arcul electric a rezistenței  $R_l$  și a capacității  $C$ ;
- pentru suflajul magnetic cu ajutorul electromagnetului ES alimentând bobina acestuia cu curent alternativ;
- pentru parametri introduși în circuitul din fig.5 se vor varia la fel ca și în cazul arcului de curent continuu, elaborând concluzii asupra rezultatelor prin compararea caracteristicilor ridicate.

### Întrebări

1. Caracteristicile unui arc electric de curent continuu.
2. Caracteristicile unui arc electric de curent alternativ.
3. Care sunt principiile de stingere ale arcului electric? Dați exemple de utilizare a lor.
4. Deosebiri între stingerea arcului electric de c.c. și c.a.
5. Care sunt parametrii arcului electric de curent alternativ?

### Bibliografie

1. Hortopan, G.: Aparate electrice de comutație, vol I - Editura Tehnică, București, 2000.