

UNIVERSITATEA "VASILE ALECSANDRI" DIN BACĂU
FACULTATEA DE INGINERIE
DEPARTAMENTUL ENERGETICĂ MECATRONICĂ ȘI TEHNOLOGIA INFORMAȚIEI
SPECIALIZAREA ENERGETICĂ INDUSTRIALĂ

POPA SORIN EUGEN

ECHIPAMENTE ELECTRICE

note de curs
pentru studenții Facultății de Inginerie

2011

1. Elemente de teorie a echipamentelor electrice

1.1. Echipamentul electric, definiții, caracteristici.

Echipamentul electric reprezintă un ansamblu de dispozitive electrice și mecanice având rol de comandă, protecție, reglare și control (automat sau neautomat), al funcționării unei instalații electrice.

Principalele părți constructive ale unui echipament electric sunt următoarele:

- partea conducătoare de curent;
- partea izolantă, care separă partea conducătoare de restul echipamentului;
- mecanismele necesare îndeplinirii operațiilor de comutare;
- carcasa și elementele de protecție.

Dintre funcțiile pe care trebuie să le îndeplinească un echipament electric menționăm:

- *funcții operative*, prin care se realizează anclanșări și declanșări în regim normal de funcționare a instalațiilor electrice sau în regim de avarie;
- *funcții de protecție*, cu rol de deconectare a porțiunii defecte din instalație;
- *funcții legate de securitatea muncii personalului de serviciu*, prin care se fac întreruperi și izolări față de tensiunea înaltă a unor porțiuni din instalație, pentru a permite executarea fără pericol a lucrărilor de reglare, revizie, reparații etc.

După funcțiile pe care le îndeplinesc echipamentele electrice pot fi grupate după cum urmează:

a) *Echipamente de comutație* (automată sau neautomată) a circuitelor electrice, care servesc la conectarea (închiderea) și deconectarea (deschiderea) circuitelor electrice, atât în regim normal de funcționare, cât și în regim de avarie. Din această grupă fac parte: întrerupătoare cu pârghie, comutatoare pentru lumină și forță, întrerupătoare pachet, contactoare, separatoare, întrerupătoare de înaltă și joasă tensiune etc.;

b) *Echipamente de protecție* a instalațiilor electrice împotriva curenților de suprasarcină și a supratensiunilor. Din această grupă fac parte siguranțele fuzibile, relele de protecție și descărcătoare.

c) *Echipamente limitatoare de curent* care servesc la limitarea curenților de scurtcircuit și la menținerea unui anumit nivel al tensiunii în momentul scurtcircuitului. În această grupă sunt incluse bobinele de reactanță.

d) *Echipamente automate de control și protecție*, care servesc la controlul regimului de funcționare al instalațiilor neelectrice, al mersului procesului tehnologic etc. Ele sunt destinate pentru a da un impuls electric sau un semnal la un aparat cu care se pot efectua operații ca: opriri, porniri etc.

e) *Echipamente de amplificare și stabilizare*, cum sunt: amplificatoare magnetice, stabilizatoare. Având scopul de a amplifica și stabiliza curentul, tensiunea, puterea și alte caracteristici în scopul reglării lor automate.

f) *Echipamente de comandă continuă și în trepte*, care execută pornirea și oprirea mașinilor electrice și a altor receptoare electrice, precum și modificarea caracteristicilor unor instalații.

g) *Echipamente de reglare continuă automată* care realizează menținerea la un anumit nivel a diferitelor caracteristici: nivelul apei, a tensiunii, a curentului, a puterii, a frecvenței etc. Din această categorie fac parte regulatoarele.

h) Echipamente pentru efectuarea unui lucru mecanic cu ajutorul energiei electrice, cum sunt dispozitivele de acționare electromagnetice, cuplele electromagnetice, frânele

electromagnetice, electromagneții de ridicat, supapele electromagnetice.

i) *Ansambluri de echipamente* care pot realiza câteva din funcțiunile enumerate mai sus. Astfel sunt: echipamente pentru instalații de distribuție, panourile de comandă, etc.

Echipamentele electrice se împart în două categorii: automate și neautomate. Echipamentele automate sunt acelea a căror funcționare depinde de starea rețelei în care sunt conectate și nu depinde de personalul de exploatare. Echipamentele neautomate intră în funcțiune numai la comanda personalului de exploatare.

În cadrul fiecărei grupe de echipamente se folosesc clasificări după tensiune (de înaltă și joasă tensiune), după felul curentului (continuu sau alternativ), după modul de protecție față de mediul ambiant (echipamente deschise, protejate și antideflagrante), după numărul de poli (monopolare și multipolare), după locul de amplasare (de interior sau de exterior).

1.2. Parametrii echipamentelor electrice

a. **Tensiunea nominală (Un)** este cea mai mare dintre tensiunile standardizate pentru care a fost construit echipamentul și pentru care se garantează funcționarea lui în regim permanent.

Echipamentele de înaltă tensiune trebuie să funcționeze în condiții bune la tensiune cu 10÷15% mai mare decât tensiunea nominală. Această tensiune se numește tensiunea maximă de serviciu a echipamentului.

După CEI (Comitetul Electroenergetic Internațional) tensiunea maximă de lucru reprezintă tensiunea nominală a echipamentului electric.

Tensiunea maximă de serviciu (valoarea efectivă a celei mai mari tensiuni dintre faze care poate să apară la un moment dat, în condiții normale de funcționare) este stabilită prin prescripții și standarde naționale, ca STAS, și recomandări internaționale. Această valoare a tensiunii trebuie să fie suportată de izolația echipamentelor electrice un timp nelimitat.

Tensiunea de ținere (nivelul de izolație) este cea mai mare tensiune de încercare pe care izolația echipamentelor electrice o suportă fără conturnări sau străpungeri, în cadrul verificării lor. Sunt standardizate în prezent, tensiunile de ținere la impuls (unda plină de 1,2/50 μ s și unda aperiodică lungă de 250/2500 μ s), precum și tensiunea de frecvență industrială.

Tensiunile nominale sunt date în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1.

Tensiuni normalizate

Tensiunea maximă de serviciu [kV]	3,6	7,2	12	17,5	24	36	52	72,5	100	123	145	170	245	300	400
Tensiunea nominală [kV]	3 3,6	6 6,3	10 11	15	20 22	30 33	45 44	60 66 69	80 88 90	100 110 115	120 132 138	150 161 170	220 224 230	275 278,5	380

b. **Curentul nominal** al unui echipament este cel mai mare curent pe care partea conducătoare de curent a echipamentului îl poate suporta un timp nelimitat fără ca încălzirea diferitelor elemente să depășească o anumită temperatură stabilită prin norme.

Valorile curenților nominali ai echipamentelor electrice din România sunt date în tabelul 1.2.

c. **Stabilitatea electrodinamică** a echipamentelor de înaltă tensiune este caracterizată prin curentul de stabilitate electrodinamică (curentul maxim admisibil) care reprezintă valoarea maximă a amplitudinii curentului de scurtcircuit, de șoc, pe care-l suportă echipamentul fără să se deterioreze.

d. **Stabilitatea termică** la scurtcircuite a echipamentelor de înaltă tensiune este

caracterizată prin curentul de stabilitate termică, adică cel mai mare curent de valoare efectivă constantă, pe care îl suportă aparatul un timp determinat (în mod obișnuit 1s, 3s sau 5s) fără ca temperatura pieselor sale să depășească limitele admisibile stabilite de norme.

Tabelul 1.2.

Valorile curenților nominali uzuali ai aparatelor electrice de înaltă tensiune

Denumirea echipamentului	Curenți nominali [A]
Întreprupătoare	400; 630; 1000; 1250; 1600; 2000; 3150; 4000; 5000; 6300
Separatoare de sarcină	200; 400; 630
Separatoare	200; 400; 630; (800); 1250; 1600; 2000; 3150; 4000; 6300
Bobine de reactanță	400; 600; 750; 1000; 1500; 2000
Transformatoare de curent	5; 10; (12,5); 15; 20; (25); 30; (40); 50; (60); 75 și multiplii zecimali ai acestora
Siguranțe fuzibile	2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 31,5; 40; 63; 80; 100; 200; 300; 400; 1000; 2000; 2500.

e. **Curentul de conectare** este cel mai mare curent de scurtcircuit (exprimat în valoare de amplitudine) pe care echipamentele de comutație automate îl pot stabili la tensiunea nominală sau la altă tensiune dată, fără pericolul sudării contactelor sau al altor deteriorări care să împiedice funcționare lor în continuare.

f. **Curentul de rupere** este cel mai mare curent pe care echipamentele de comutație îl pot rupe la o tensiune dată, fără deteriorări care să împiedice funcționarea lor în continuare.

g. **Puterea de rupere** a echipamentelor de comutație este o mărime convențională reprezentând produsul dintre valoarea efectivă a curentului de rupere în momentul depărtării contactelor și o tensiune dată.

1.3. Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească echipamentele electrice.

În timpul funcționării echipamentele electrice sunt supuse acțiunii multor factori, care influențează funcționarea lor și care determină condițiile pe care aceste echipamente trebuie să le îndeplinească. Cele mai importante dintre aceste acțiuni sunt următoarele:

Acțiuni electrice. Se produc sub acțiunea tensiunilor de serviciu. În unele cazuri, echipamentele sunt solicitate la supratensiuni de comutație sau atmosferice. De asemenea, sunt supuse acțiunii descărcării corona, precum și diferitelor descărcări electrice însoțite de un arc electrice mai mult sau mai puțin intens. Dacă supratensiunea depășește tensiunea de încercare, se admite ca echipamentul să prezinte descărcări superficiale, dar nu trebuie să apară străpungeri.

Acțiuni mecanice. Echipamentele sunt supuse la acțiuni mecanice în funcționare normală (de exemplu, la anclanșarea și declanșarea întrerupătoarelor), la acțiunea presiunilor interne (de exemplu, în întrerupătoare, siguranțe etc.) precum și la acțiunea forțelor electrodinamice ale curenților de scurtcircuit.

Acțiuni termice. În regim normal de funcționare aproape toate echipamentele electrice sunt supuse încălzirii produse de curentul ce trece prin căile de curent (curentul normal sau curentul de scurtcircuit). Arcul electric determină, de asemenea, încălziri în locul unde se produce, pe izolație sau pe părțile metalice.

Acțiuni atmosferice. Echipamentele electrice sunt supuse acțiunii temperaturii, presiunii și umidității aerului, ploii, ceței, poleiului, prafului, vântului și chiciurii.

Acțiunea timpului. Această acțiune se manifestă prin apariția uzurii sau a îmbătrânirii izolației.

De exemplu, la întrerupătoare și la separatoare, ea se manifestă prin uzura părților care se freacă; la izolație apare fenomenul de îmbătrânire și deci modificarea proprietăților electroizolante în funcție de timp; la întrerupătoare cu gaz și la descărcătoare tubulare se consumă suprafața interioară a camerei sau a tubului etc.

Echipamentele funcționează în unele cazuri în condiții grele. Factorii care acționează asupra lor nu se manifestă simultan. Sunt două categorii caracteristice care se deosebesc între ele în raport cu acțiunea factorilor externi: aparatele *de interior* și aparate *de exterior*. La primele nu au importanță acțiunile atmosferice, dar interesează alți factori ca, de exemplu, forțele electrodinamice, din cauza distanțelor mai mici dintre părțile conducătoare de curent.

Ținând seama de influența acțiunilor enumerate mai sus, pentru o funcționare normală în exploatare, echipamentele electrice trebuie să îndeplinească următoarele condiții fundamentale:

1. funcționarea sigură și de lungă durată la parametrii pentru care a fost calculat echipamentul;
2. stabilitatea termică și dinamică la trecerea celor mai mari curenți de scurtcircuit prescriși pentru echipamentul dat;
3. izolația electrică să reziste la solicitarea supratensiunilor, care nu întrec valoarea tensiunilor de încercare recomandate;
4. stabilitatea la solicitările factorilor climatici;
5. construcția în ansamblu să fie simplă, alcătuită din elemente tipizate și să permită execuția în flux tehnologic;
6. gabaritul, greutatea și costul să fie cât mai reduse;
7. deservirea, revizia și repararea să fie ușoare, simple și cu maximum de securitate.

2. Procese de comutație care solicită echipamentele

Echipamentele electrice de comutație reprezintă o clasă importantă a echipamentelor electrice, având în principal rolul de a stabili și întrerupe conducția în circuitele instalațiilor electrice.

Comutația circuitelor poate fi dinamică sau statică, după cum echipamentele de comutație realizează această operație pe cale mecanică, prin închiderea sau deschiderea unor contacte electrice, respectiv prin variația comandată a unui parametru electric de tip impedanță (în particular rezistență), specifică echipamentelor de comutație fără contacte.

Comutația circuitelor este însoțită de regimuri tranzitorii ale curenților și tensiunilor, capabile să producă asupra componentelor instalațiilor electrice solicitări de intensități mai mari decât cele existente în regim permanent de funcționare. Dacă procesele fizice care apar în echipamentele de comutație la conectarea circuitelor prezintă uneori mai mică importanță, deconectarea dinamică, însoțită de amorsarea arcului electric între contacte, ridică dificile probleme de ordin tehnic. În acest caz apare o solicitare suplimentară, produsă ca urmare a transferului de energie din coloana arcului spre componentele constructive din imediata vecinătate, ceea ce face ca temperatura acestora să crească rapid, la valori ridicate. Este necesar astfel ca întreruperea unui circuit aflat în sarcină să se obțină prin stingerea definitivă a arcului electric de deconectare într-un timp scurt, înainte ca acesta să producă efecte ireversibile, atât asupra elementelor constructive cu care vine în contact, cât și asupra stabilității instalației din care face parte circuitul care se deconectează.

2.1. Arcul electric. Amorsare. Proprietăți

Deconectarea dinamică a circuitelor parcurse de curent este însoțită de amorsarea, între contactele echipamentelor de comutație, a unui arc electric prin coloana căruia curentul continuă să treacă.

Arcul electric de deconectare reprezintă o descărcare autonomă, prin care spațiul dintre contacte, în general electroizolant, devine bun conducător de electricitate, caracterizat prin densitate de curent ($10^3 \div 10^8 \text{ A/cm}^2$) și conductivitate de valori mari, temperatură înaltă ($5000 \div 6000^\circ\text{C}$), presiune mai mare decât cea atmosferică și gradient de potențial (intensitate a

câmpului electric) de valoare redusă, $10 \div 20$ V/cm.

În figura 2.1 este prezentată caracteristica volt-ampere a unei descărcări în gaze, pe care poate fi localizat arcul. Descărcarea luminescentă se produce pentru căderi de tensiune la catod de $200 \div 250$ V, la curenți de $10^{-5} \div 10^{-1}$ A. Descărcării prin arc electric îi sunt proprii valori mari ale intensității curentului ($10 \div 10^5$ A), respectiv reduse pentru căderea de tensiune ($10 \div 20$ V).

Descărcarea prin arc electric, definită ca descărcare autonomă în gaze, se obține atunci când nu mai este necesar un agent ionizant exterior, gradul de ionizare a gazului fiind suficient de înalt, încât să permită formarea unei avalanșe de electroni și ioni.

Amorsarea arcului electric se produce în mod diferit, după cum curentul deconectat are intensități de valori reduse sau mari.

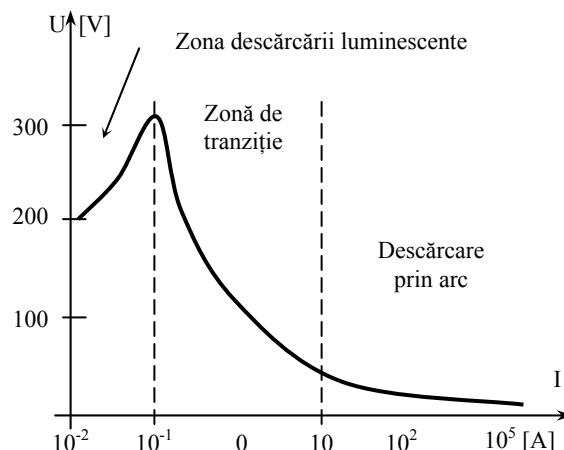


Fig. 2.1. Dependenta dintre tensiune și curent pentru diferite descărcări în gaze

Cazul curenților mici

La întreruperea curenților de mică intensitate, amorsarea se produce, în principal, în urma autoemisiei electronice la catod.

Intensitatea E_e a câmpului electric existent după ieșirea unui electron din catod, la distanța x de suprafața acestuia, este dată de relația:

$$(2.1.) \quad E_e(x) = \frac{e}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot x^2}$$

unde: e – sarcina electronului;

ε - permitivitatea gazului;

Potențialul V_e al câmpului, la aceeași distanță, rezultă de forma:

$$(2.2.) \quad V_e(x) = -\int_{\infty}^x E_e dx = \frac{e}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot x}$$

În realitate, potențialul de ieșire $V_e(x)$, reprezentat grafic în figura 2.2, are valori $V_e(0)$ finite, datorită existenței nivelelor Fermi de energie. În tabelul 2.1 sunt date valorile potențialelor de ieșire pentru câteva metale utilizate în construcția contactelor electrice.

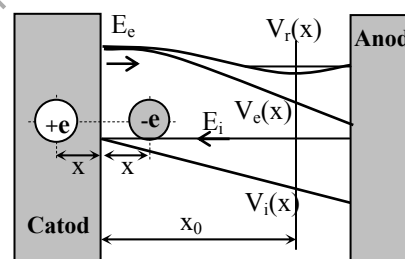


Fig. 2.2: Emisia electronică la catod

Tabelul 2.1.

Valori ale potențialului de ieșire				
Metalul	Bariu	Argint	Cupru	Wolfram
$V_e(0)$ [V]	1,5	4,3	4,5	4,6

Un electron poate părăsi metalul dacă energia sa cinetică depășește lucrul mecanic de ieșire, $e \cdot V_e(0)$. În cazul în care, la separarea contactelor, între acestea există o diferență de potențial, peste câmpul electric de intensitate E_e se suprapune un câmp electric imprimat, de intensitate E_i , considerată constantă.

Pentru potențialul imprimat V_i , la distanța x de catod se poate scrie relația:

$$(2.3.) \quad V_i(x) = -E_i \cdot x$$

Câmpul electric rezultat în spațiul anod-catod are intensitatea E_r de forma:

$$(2.4) \quad E_r(x) = E_e(x) - E_i,$$

încât, pentru distanța x_0 , la care intensitatea E_r se anulează, ținând seama de (2.1), (2.4) rezultă:

$$(2.5) \quad x_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{e}{\pi \cdot \varepsilon \cdot E_i}}.$$

Deci, la distanța x_0 de catod, intensitatea E_r a câmpului electric rezultat se anulează, iar potențialul acestuia, $V_r(x)$, admite o valoare minimă nenulă. În consecință, potențialul de ieșire, $V_e(0)$, se micșorează cu cantitatea:

$$(2.6) \quad \Delta V = V_e(x_0) - V_i(x_0),$$

care se mai poate scrie sub forma:

$$(2.7) \quad \Delta V = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{eE_i}{\pi\varepsilon}}.$$

Corespunzător, în prezența câmpului imprimat de intensitatea E_i , are loc micșorarea energiei cinetice necesare ieșirii electronului din metal cu cantitatea:

$$(2.8) \quad \Delta W = e \cdot \Delta V.$$

Rezultă de aici că emisia electronică este stimulată de existența unei diferențe de potențial între contacte, în aceste condiții ea producându-se chiar la distanțe mai mari între anod și catod. Existența câmpului electric imprimat conduce la micșorarea energiei cinetice necesare ieșirii electronilor din catod, cu cantitatea ΔW , dată de relația (2.8).

Electronii astfel extrași de pe suprafața catodului, accelerați spre anod în câmpul electric imprimat, produc ionizări prin ciocniri cu particule neutre astfel încât, între contacte, se amorsează o descărcare prin arc. Aceasta este întreținută prin creșterea în avalanșă a numărului de particule cu sarcină electrică din spațiu disruptiv, atât pe seama emisiei termoelectronice la suprafața catodului, a cărei temperatură crește rapid în timp, cât și datorită ionizării termice în coloana arcului, ca urmare a creșterii temperaturii acesteia până la valori de $5 \cdot 10^3 \div 10^4$ [K].

Tensiunea u_s la care se obține trecerea de la o descărcare autonomă la una neautonomă, se numește tensiune de străpungeră și este dată de **legea lui Paschen**. Conform acesteia, în ipoteza unui câmp electric uniform, stabilit între doi electrozi situați la distanța d într-un mediu gazos aflat la presiunea p , tensiunea de străpungeră depinde numai de produsul $(p \cdot d)$. Dependența $u_s(p \cdot d)$ este dată prin curbele lui Paschen, utile în tehnica echipamentelor de comutație funcționând cu mediu, izolant și de stingere a arcului electric, gazos. Aceste curbe, determinate experimental pentru diferite gaze, sunt de forma dată în figura 2.3.

În construcția echipamentelor destinate comutației, se urmărește ca, pentru o anumită distanță de izolație, d , impusă, să se stabilească valori de lucru, p , ale presiunii gazului, astfel încât tensiunea de străpungeră, u_s , să rezulte de valori cât mai mari.

Cazul curenților mari

În cazul întreruperii curenților de mare intensitate (mii de amperi și mai mult), odată cu diminuarea forței de apăsare în contact, are loc scăderea numărului de contacte elementare (puncte de atingere), astfel încât densitatea de curent prin suprafața reală de contact crește

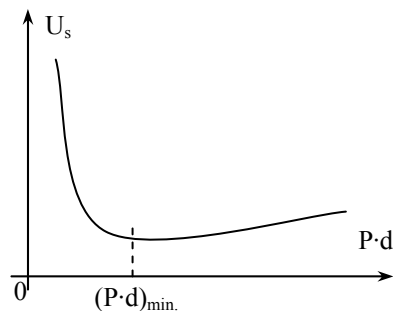


Fig. 23. Curba lui Paschen

foarte mult. Aceasta conduce la topirea și vaporizarea explozivă a ultimilor punți metalice dintre piesele de contact, între care se formează o plasmă de mare conductivitate. Arcul electric se consideră amorsat între rămășițele punților de contact, imediat după explozia acestora și este întreținut pe seama proceselor de ionizare, produse prin emisie termoelectronică și prin ciocniri între particule având energii cinetice de valori mari, ca urmare a temperaturii înalte din coloana arcului.

Distribuția tensiunii și a gradientului de potențial în lungul coloanei unui arc electric cu ardere staționară este reprezentată în figura 2.4, de unde rezultă că, în vecinătatea catodului, se produce o variație bruscă a tensiunii, numită cădere de tensiune catodică, u_K , gradientul de potențial corespunzător, E_K , având valori mari. În lungul coloanei arcului, tensiunea u_c variază aproape liniar, încât gradientul de potențial poate fi considerat constant, de valoare E_c . La anod se înregistrează de asemenea o variație bruscă a tensiunii, datorită căderii de tensiune anodice, u_A .

Căderea de tensiune catodică, având valori de $10 \div 20$ V, poate fi considerată constantă, pentru același mediu și același material al electrozilor. Căderea de tensiune anodică are valori dependente de intensitatea curentului prin arc, și se poate scrie astfel:

$$(2.9) \quad u_a = u_K + u_c + u_A;$$

neglijând căderile de tensiune la electrozi și ținând seama de caracterul constant al gradientului de potențial E_c , relația (2.9) se poate aduce la forma uzuală:

$$(2.10) \quad u_a = E_c \cdot l,$$

l fiind lungimea coloanei.

Stingerea arcului electric, etapă finală a procesului de deconectare, se obține prin deionizarea coloanei acestuia, care are ca urmare refacerea rigidității dielectrice a spațiului dintre contactele echipamentului de comutație. Deionizarea arcului se realizează prin recombinarea particulelor încărcate electric și prin difuzia acestora. Intensitatea procesului de recombinare depinde de natura, temperatura și presiunea gazului în care este amorsat arcul electric; valori scăzute pentru temperatură, respectiv ridicate pentru presiune și gradient de potențial, favorizează recombinarea. Deionizarea prin difuziune constă în împrăștierea particulelor încărcate electric în zone cât mai depărtate de spațiul de ardere a arcului, obținându-se astfel micșorarea conductivității coloanei acestuia.

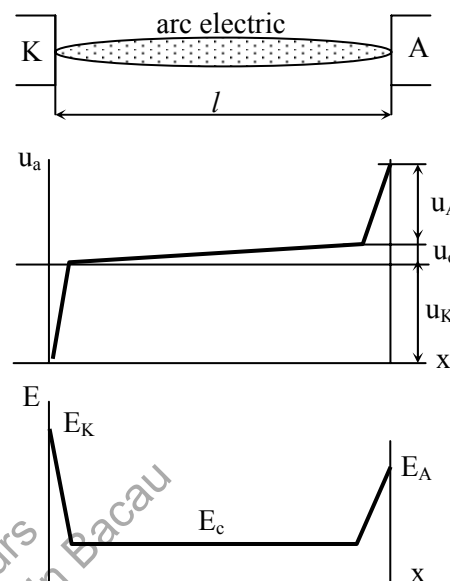


Fig. 2.4: Tensiunea de arc și gradientul de potențial.

2.2. Caracteristicile arcului electric

Considerat ca element de circuit, arcul electric are proprietăți de rezistor neliniar, fiind caracterizat printr-o dependență neliniară între tensiune și intensitatea curentului care îl străbate.

Caracteristicile volt-ampere ale arcului electric pot fi statice sau dinamice, după cum viteza de variație a intensității curentului prin arc este foarte mică (nulă) sau are valori mari.

- arc electric de curent continuu $\Rightarrow$ caracteristici statice și dinamice;
- arc electric de curent alternativ $\Rightarrow$ caracteristici dinamice

2.2.1. Caracteristicile arcului electric de curent continuu

În figura 2.5a sunt prezentate caracteristicile volt-ampere statice ale unui arc electric de curent continuu, obținute pentru diferite lungimi constante ale coloanei. Alura curbelor se explică prin faptul că, la creșterea intensității curentului, se înregistrează o creștere a temperaturii în coloana arcului, determinând o creștere importantă a conductivității gazului, având drept efect scăderea tensiunii de arc.

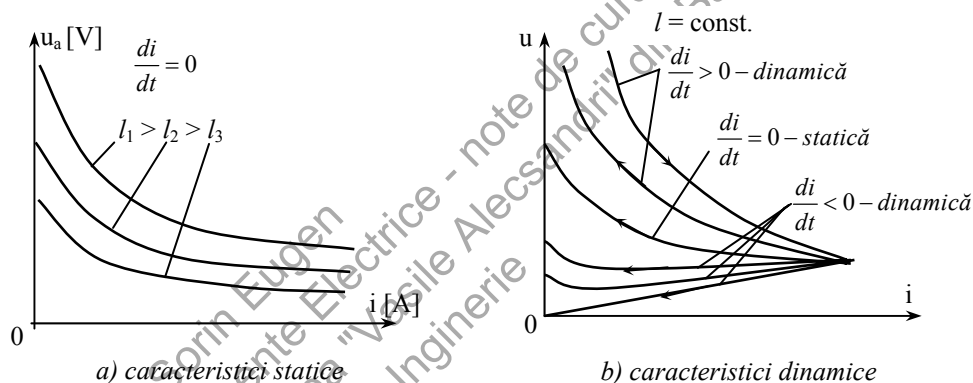


Fig. 2.5: Caracteristicile arcului electric de curent continuu.

Caracteristicile volt-ampere dinamice se obțin pentru lungimi constante ale coloanei, dar pentru viteze nenule de variație a intensității curentului care traversează arcul (figura 2.5b).

Arcul electric se amorsează la tensiunea u_s , valorile de stingere, u_{st} , sunt cu atât mai depărtate de u_s , cu cât este mai mare viteza de variație a curentului. Fenomenul de histerezis, propriu acestor caracteristici, se explică prin inerția termică a coloanei.

Aproximarea analitică a caracteristicilor arcului de curent continuu oferă posibilitatea modelării matematice a acestui proces, având drept rezultat obținerea unor relații de calcul utile în tehnica echipamentelor de comutație.

1. Funcția lui Ayrton:

$$(2.11) \quad u_a(i) = a + \frac{b}{i}$$

unde:

$$(2.12) \quad a = \alpha + \gamma l, \quad b = \beta + \delta l,$$

unde: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ fiind constante de material;
 l - lungimea coloanei arcului electric.

Tabelul 2.2

Coeficienții funcției de aproximare Ayrton				
Materialul \ Coeficientul	α [V]	β [VA]	γ [V/m]	δ [VA/m]
Cupru	30	10	1000	3000
Carbon	39	11,7	21	105

Funcția Ayrton evidențiază o variație liniară a tensiunii de arc u_a , în raport cu lungimea l a coloanei, pentru aceeași intensitate a curentului.

2. Funcția lui Nottingham

$$(2.13) \quad u_a(i) = a + cl + (b + dl)i^{-n}$$

unde: a, b, c, d sunt constante;
 l este lungimea coloanei arcului electric.
 Exponentul n se calculează cu relația:

$$(2.14) \quad n = 2,62 \cdot 10^{-4} \cdot T,$$

T [K]. fiind temperatura de vaporizarea a anodului.

3. Funcția lui Rieder

Ține cont de independența căderilor de tensiune la electrozi în raport cu lungimea l a coloanei arcului.

$$(2.15) \quad u_a(i) = \alpha + (\beta + l)\gamma \left[\ln\left(\frac{i}{\delta}\right) \right]^{-3}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ fiind constante, iar l -lungimea coloanei arcului electric.

În tabelul 2.3 sunt dați coeficienții funcției de aproximare pentru diferite materiale de contact.

Tabelul 2.3

Coeficienții funcției de aproximare Rieder			
	Cu	Ag	W
α [V]	26	26	26
β [m]	0,013	0,011	0,016
γ [V/m]	$5,4 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^5$
δ [A]	0,0074	0,0074	0,0074

2.2.2. Caracteristicile arcului electric de curent alternativ

Arcul electric de curent alternativ este un proces cvasistaționar, la lungime unitară a coloanei, este caracterizat printr-o ecuație de bilanț al puterilor având expresia:

$$(2.16) \quad u_a i dt = dQ + P dt \quad | : dt \Rightarrow \quad \frac{dQ}{dt} = u_a i - P$$

unde: $u_a i dt$ = energia primită de coloana arcului în timpul dt ;
 $P dt$ = cantitatea de căldură cedată de coloana arcului mediului ambiant;
 dQ = căldura înmagazinată în coloana arcului;
 i = intensitatea curentului prin arc.

Conform ipotezei lui Mayr, dependența conductanței G , a coloanei arcului, în raport cu conținutul Q , de energie, se poate exprima prin relația:

$$(2.17) \quad G = K \cdot e^{\frac{Q}{Q_0}},$$

unde K și Q_0 sunt constante.

Dar pentru coloana de lungime unitară se poate scrie:

$$(2.18) \quad G = \frac{i}{u_a},$$

logaritmând și derivând se obține:

$$\ln \frac{i}{u_a} = \ln i - \ln u_a = \frac{Q}{Q_0} \quad \left| \begin{array}{l} \text{derivăm în raport cu timpul:} \\ \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_a} \frac{du_a}{dt} = \frac{1}{Q_0} \frac{dQ}{dt} \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_a} \frac{du_a}{dt} = \frac{1}{Q_0} \frac{dQ}{dt} \\ \text{dar } \frac{dQ}{dt} = u_a i - P \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{Q_0} (u_a i - P) = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_a} \frac{du_a}{dt},$$

considerând $P = P_0 = \text{constant}$, rezultă:

$$\frac{P_0}{Q_0} \frac{u_a i - P_0}{P_0} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_a} \frac{du_a}{dt},$$

notăm :

$$(2.19) \quad T_a = \frac{Q_0}{P_0} = \text{constanta de timp a arcului electric}$$

$$(2.20) \quad \frac{1}{T_a} \frac{u_a i - P_0}{P_0} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_a} \frac{du_a}{dt}, \text{ care este ecuația arcului electric în regim dinamic.}$$

Considerând că intensitatea curentului prin arc este sinusoidală, de forma:

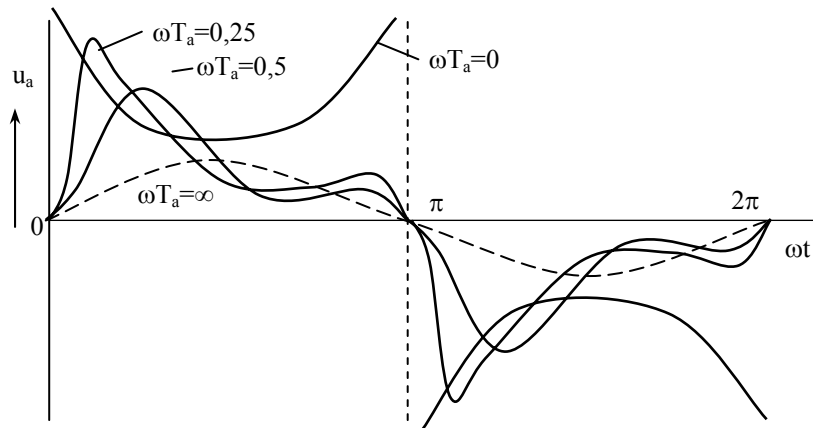
$$(2.21) \quad i(t) = \sqrt{2} I \sin \omega t, \quad \Rightarrow \quad \frac{di}{dt} = \sqrt{2} I \omega \cos \omega t$$

pentru soluția ecuației diferențiale (2.20) se obține:

$$(2.22) \quad u_a(t) = \frac{\sqrt{2} P_0 \cos \omega t}{I \left[1 - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{\sqrt{1 + 4\omega^2 T_a^2}} \right]}, \quad \text{unde: } \varphi = \arctg \left(\frac{1}{2\omega T_a} \right)$$

În figura 2.6 sunt reprezentate grafic curbele $u_a(t)$ date de relația (2.22), pentru diferite valori atribuite parametrului (ωT_a) .

- pentru $\omega T_a \rightarrow 0$ se obțin caracteristici apropiate de cele ale arcului de curent continuu.
- pentru $\omega T_a \rightarrow \infty$, tensiunea de arc se apropie de o sinusoidă.

Fig. 2.6: Tensiunea de arc u_a funcție de ωt

În figura 2.7 este prezentată caracteristica volt-ampere dinamică a arcului electric de curent alternativ.

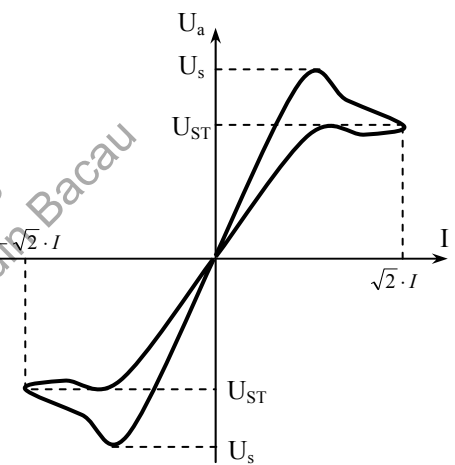
Eliminând coordonata timp din figura 2.6, se obține caracteristica volt-ampere dinamică $U_a(t)$ a arcului electric de curent alternativ (figura 2.17).

$$(2.23) \quad u_a(i) = \frac{P_0 i}{I^2 \cdot \left[1 - \frac{\sin(\varphi + \psi)}{\sqrt{1 + 4\omega^2 T_a^2}} \right]}$$

în care: $i \in (-\sqrt{2} \cdot I, +\sqrt{2} \cdot I)$, $\psi(i) = \arctg \frac{i\sqrt{2I^2 - i^2}}{I^2 - i^2}$

U_s = tensiunea de străpungere (de aprindere);

U_{ST} = tensiunea de stingere.



Caracteristica volt-ampere dinamică.

Interpretarea fizică a constantelor T_a , Q și K .

Pentru circuitele de curent alternativ aceste constante sunt mărimi specifice arcului electric în vecinătatea trecerii curentului prin zero.

Deci, dacă considerăm $i = 0$, relația (2.16) devine:

$$(2.24) \quad \frac{dQ}{dt} = -P$$

integrând se obține:

$$(2.25) \quad Q = -P_0 \cdot t + Q_0$$

în care: Q_0 este cantitatea de căldură din coloana arcului electric în momentul trecerii curentului prin zero.

Introducând relația (2.25) în (2.17) avem:

$$G = K \cdot e^{\frac{1}{Q_0}[-P_0 \cdot t + Q_0]}$$

în care notăm: $T_a = \frac{Q_0}{P_0} \Rightarrow P_0 = \frac{Q_0}{T_a}$

$$(2.26) \quad G = K \cdot e^{\left(1 - \frac{t}{T_a}\right)}$$

Considerăm două momente de referință $t = 0$ și $t = T_a$.

- pentru $t = 0$, $\Rightarrow G(0) = K \cdot e$;
- pentru $t = T_a$, $\Rightarrow G(T_a) = K$.

Se constată că de la momentul $t = 0$ la momentul $t = T_a$, conductanța, G , scade de " e " ori. Rezultă astfel:

- constanta de timp T_a , în modelul Mayr, este timpul necesar scăderii conductanței de " e " ori după ce curentul a trecut prin valoarea zero și nu se mai introduce energie în coloana arcului;
- constanta Q_0 , este cantitatea de energie din plasmă în momentul trecerii curentului electric prin zero;
- constanta K , este conductanța arcului electric după timpul T_a , de la întreruperea curentului electric.

3. Stingerea arcului electric

În cadrul comutației dinamice, procesul deconectării circuitelor include, ca fază esențială, stingerea arcului electric amorsat la separarea contactelor. Stingerea arcului se produce în mod diferit, după cum arcul este de curent continuu sau alternativ.

3.2. Stingerea arcului electric de curent continuu în cazul circuitelor inductive

Se consideră circuitul R,L de curent continuu, figura 3.1, la deconectarea căruia, între contactele A, K, se amorsează arcul electric, pe coloana căruia se înregistrează tensiunea $u_a(i)$.

Scriem legea conducției pentru acest circuit (legea lui Ohm generalizată), și obținem:

$$(3.1) \quad U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + u_a, \quad i(0) = i_0,$$

unde: U este tensiunea continuă de alimentare.

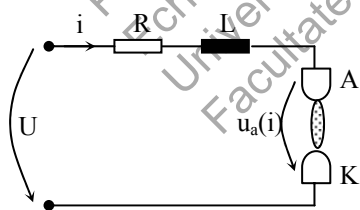


Fig. 3.1: Circuit RL după deconectare.

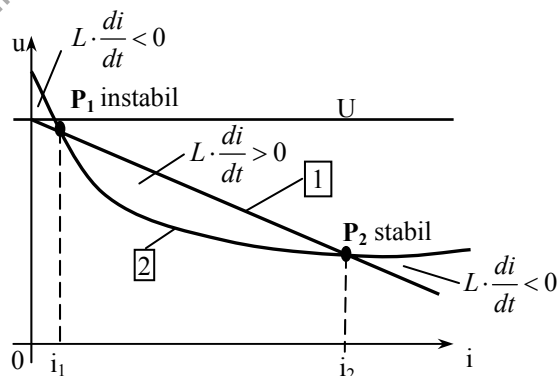


Fig.3.2: Analiza stabilității: 1- caracteristica sursei: $U=R \cdot i$, 2-caracteristica $u_a(i)$

Caracteristica externă a sursei, curba 1 definită de $(U-R \cdot i)$, care este o dreaptă, intersectează caracteristica 2 a arcului electric în punctele P_1 și P_2 , figura 3.2.

În regim static, ecuația de funcționare este:

$$(3.2) \quad U = R \cdot i + u_a$$

În regim dinamic la variații de curent ecuația de funcționare este dată de relația (3.1).

Cele două ecuații au aceleași soluții numai dacă $L \cdot \frac{di}{dt} = 0$, deci punctele P_1 și P_2 reprezintă aceleași soluții pentru ambele ecuații de regim static și dinamic.

Astfel, pentru valori ale curentului i , corespunzătoare punctului de funcționare P_1 , rezultă:

- pentru $i < i_1$; $L \cdot \frac{di}{dt} < 0$, curentul i are tendința să scadă la zero;
- pentru $i > i_1$; $L \cdot \frac{di}{dt} > 0$, curentul i are tendința să crească, tinde către i_2 .

În consecință, punctul P_1 este un punct instabil din punct de vedere al arderii arcului electric, de aceea, în această zonă arcul electric are condiții să se stingă.

Pentru valori ale curentului i în jurul valorii i_2 (corespunzătoare punctului de funcționare P_2) rezultă:

- pentru $i < i_2$; $L \cdot \frac{di}{dt} > 0$, curentul i are tendința de creștere la valoarea i_2 ;
- pentru $i > i_2$; $L \cdot \frac{di}{dt} < 0$, curentul i are tendința de scădere la valoarea i_2 .

Deci punctul P_2 este un punct stabil de funcționare din punct de vedere al arderii arcului electric, în acest punct nu sunt condiții de stingere a arcului electric.

La construcția echipamentelor electrice de comutație este vital ca arderea arcului electric să fie instabilă. Arcul electric va fi instabil atunci când curbele 1 și 2 (figura 3.2) nu se vor intersecta sau vor avea cel mult un singur punct în comun. Valoarea curentului pentru care cele două caracteristici au un singur punct comun se numește curent critic, i_{cr} , iar lungimea arcului lungime critică, l_{cr} .

Pentru determinarea curentului și lungimii critice a arcului, considerăm ecuația de regim staționar, și anume:

$$U = R \cdot i + u_a, \text{ în care înlocuim:}$$

$$u_a = a + \frac{b}{i} = \left(\alpha + \gamma l \right) + \frac{\beta + \delta l}{i} \text{ - aproximarea Ayrton.}$$

vom obține:

$$(3.3) \quad R \cdot i^2 - (U - a) \cdot i + b = 0$$

Ecuația (3.3) poate admite două soluții reale pozitive $i_1 \neq i_2$ pentru care există cele două puncte P_1 și P_2 și anume:

$$i_{1,2} = \frac{U - a \pm \sqrt{(U - a)^2 - 4Rb}}{2R}$$

Valoarea curentului critic se obține când discriminantul $\Delta = (U - a)^2 - 4 \cdot R \cdot b = 0$, pentru $\Delta = 0$:

$$(3.4) \quad i_{cr} = \frac{U - a}{2R} = \frac{U - \alpha - \gamma l_{cr}}{2R}$$

În regim static, deci la variații lente ale intensității curentului, tensiunea autoindusă de către bobină poate fi neglijată, în acest caz condiția pentru stingerea arcului electric va fi: $\Delta \leq 0$.

Inecuația $\Delta \leq 0$ delimitează domeniul în planul variabilelor R , l , pentru care stingerea arcului este sigură. Arcul arde stabil pentru valori R , l , cuprinse între coordonate și curba de graniță: $\Delta \leq 0$;

$$(3.5) \quad (U - a)^2 - 4 \cdot R \cdot b \leq 0$$

$$\text{adică:} \quad (U - \alpha - \gamma l)^2 - 4 \cdot R \cdot (\beta + \delta l) \leq 0$$

$$R \geq \frac{(U - a)^2}{4b} = \frac{(U - \alpha - \gamma l)^2}{4(\beta + \delta l)}$$

Se poate stabili curba de graniță prin dependența dintre valorile lui R și l pentru care arcul electric este instabil, deci:

$$\text{pentru } l = 0, \quad R = \frac{(U - \alpha)^2}{4\beta}$$

$$\text{pentru } R = 0, \quad l = \frac{U - \alpha}{\gamma}$$

În figura 3.3 sunt reprezentate, conform ecuației (3.5), granițele zonelor de ardere a arcului electric, pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare a circuitului considerat.

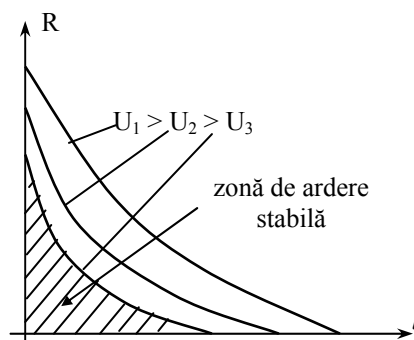


Fig. 3.3: Stabilitatea în coordonate (R, l)

Alungirea coloanei conduce la creșterea tensiunii de arc, fapt care conduce la deplasarea pe verticală a caracteristicii volt-ampere, până la îndeplinirea condiției de stingere, adică până când aceasta ajunge să fie amplasată deasupra drepte de sarcină.

Cazul deconectării dinamice

Considerând viteza de alungire a arcului electric constantă, $v = \text{const.}$, iar lungimea arcului electric $l = v \cdot t$, ecuația care descrie funcționarea la deconectarea circuitului poate fi scrisă sub forma:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + \alpha + \gamma vt + \frac{\beta + \delta vt}{i}, \quad i(0) = i_0$$

Neglijând termenul neliniar, $\frac{\beta + \delta vt}{i} = 0$, cu aport nesemnificativ în cazul circuitelor slab inductive, ecuația devine:

$$(3.6) \quad U = L \frac{di}{dt} + Ri + \alpha + \gamma vt$$

Soluția ecuației (3.6) reprezintă regimul tranzitoriu al curentului pe durata arderii arcului având următoarea relație:

$$(3.7) \quad i(t) = \frac{U - \alpha}{R} + \frac{\gamma v T}{R} \left[1 - \frac{t}{T} - e^{-\frac{t}{T}} \right],$$

în care:

$$(3.8) \quad T = \frac{L}{R} \quad \text{este constanta de timp a circuitului.}$$

Arcul electric va arde până când curentul $i(t)$ va trece prin zero, durata de ardere fiind $t = t_a$.

Punând condiția $i(t) = 0$, ecuația (3.7) devine:

$$U - \alpha + \gamma v T - \gamma v t_a - \gamma v T e^{-\frac{t_a}{T}} = 0,$$

Dacă se notează: $l_a = v \cdot t_a$

l_a fiind lungimea coloanei arcului în momentul stingerii, rezultă:

$$e^{-\frac{t_a}{T}} = \frac{U - \alpha + \gamma v T - \gamma l_a}{\gamma v T} = 1 + \frac{U - \alpha - \gamma l_a}{\gamma v T},$$

Prin logaritmare, pentru timpul de ardere a arcului electric, rezultă:

$$(3.9) \quad t_a = -T \cdot \ln \left(1 + \frac{U - \alpha - \gamma l_a}{\gamma v T} \right)$$

Pentru ca timpul de ardere să fie pozitiv, $t_a > 0$, trebuie ca $U - \alpha - \gamma l_a < 0$, deci va rezulta:

$$(3.10) \quad l_a > \frac{U - \alpha}{\gamma},$$

evidențiindu-se astfel că stingerea arcului electric de curent continuu este posibilă numai dacă lungimea coloanei acestuia depășește o valoare limită.

Considerând circuitul slab inductiv, $e^{-\frac{t_a}{T}} = 0$, vom avea: $U - \alpha - \gamma v T - \gamma v t_a = 0$, din care rezultă:

$$(3.11) \quad t_a = T + \frac{U - \alpha}{\gamma v}; \quad l_a = v \cdot T + \frac{U - \alpha}{\gamma}$$

Relațiile (3.11) arată că durata de arc t_a și lungimea arcului electric, l_a , depind de valoarea constantei circuitului $T = \frac{L}{R}$, deci atât durata de ardere cât și lungimea arcului în momentul stingerii au valori cu atât mai mari cu cât circuitul deconectat are un caracter mai inductiv.

t_a – durata de ardere a arcului depinde de materialul din care sunt făcute contactele prin constantele α și γ , de viteza v de deplasare a contactelor și de constanta T a circuitului.

Creșterea duratei de ardere t_a , datorită inductivității se explică prin fenomenul de autoinducție, care mărește tensiunea aplicată.

Popa Sorin Eugen
Echipamente Electrice - note de curs
Universitatea "Vasile Alecsandri" din Bacău
Facultatea de Inginerie

Cursul nr. 3

3.2. Stingerea arcului electric de curent continuu în cazul circuitelor rezistive

La deconectarea dinamică a circuitelor rezistive de curent continuu, pe durata arcului electric este valabilă relația: $U = R \cdot i + u_a$.

La desprinderea contactelor prin amorsarea arcului electric, intensitatea curentului scade brusc de la valoarea $I = \frac{U}{R}$, la valoarea: $i_{(0)} = \frac{U - a + \sqrt{(U - a)^2 - 4Rb}}{2R} < I$

După aceasta, urmează o scădere continuă până la stingerea arcului, care se produce în momentul în care intensitatea curentului atinge valoarea i_{cr} dată de expresia:

$$i_{cr} = \frac{U - \alpha - \gamma l_a}{2R} = \frac{U - \alpha - \gamma v t_a}{2R}, \text{ în care: } l_a = l_{cr} = v \cdot t_a.$$

De unde se poate determina timpul de arc >

$$(3.12) \quad t_{a_rez} = \frac{U - \alpha - 2Ri_{cr}}{\gamma v},$$

Relația (3.12) pune în evidență faptul că durata de ardere a arcului electric în circuitele rezistive este mai mică decât în circuitele inductive: $t_{a_rez} < t_a \cdot \left(t_a = T + \frac{U + \alpha}{\gamma v} \right)$

Atât durata de ardere a arcului, cât și lungimea coloanei acestuia în momentul stingerii, depind de natura circuitului deconectat; prezența bobinelor face mai dificil procesul de stingere.

Stingerea arcului electric în momentul corespunzător căruia intensitatea curentului atinge valoarea critică, se explică prin faptul că sursa de alimentare nu mai poate acoperi energia disipată sub formă de căldură în coloana arcului.

Dacă R_a reprezintă rezistența arcului electric la un moment dat, puterea electrică P_a , furnizată de sursă arcului, are expresia:

$$(3.14) \quad P_a = R_a i_a^2 = R_a \left(\frac{U}{R + R_a} \right)^2.$$

Valoarea maximă, P_{am} a puterii P_a , se obține atunci când rezistența arcului egalează rezistența circuitului deconectat, $R_a = R$; rezultă:

$$(3.15) \quad P_{am} = \frac{U^2}{4R} = 0.25 \cdot P_s, \quad \text{unde } P_s \text{ este puterea maximă a sursei..}$$

Relația (3.15) evidențiază faptul că, pe coloana arcului se poate repartiza cel mult 25% din puterea maximă furnizată de sursă circuitului; arcul electric de curent continuu poate fi stins numai dacă puterea disipată de coloana acestuia, sub formă de căldură, în unitatea de timp depășește 25% din puterea maximă, furnizată de sursă circuitului deconectat.

3.3. Stingerea arcului electric de curent alternativ

Stingerea arcului electric de curent alternativ este înlesnită de anularea periodică a intensității curentului, în momentele căreia deionizarea coloanei arcului electric este maximă. Procesele de stingere a arcului electric se realizează diferit la echipamentele de comutație de înaltă și medie tensiune față de cele de joasă tensiune.

3.3.1. Stingerea arcului electric la echipamentele de comutație de înaltă și medie tensiune (arcul lung)

În aceste echipamente arcul electric este alungit iar procesele de stingere sunt influențate de caracteristicile circuitului deconectat și de caracteristicile și parametrii din camera de stingere.

Stingerea arcului electric este influențată de:

a) parametrii circuitului:

- *intensitatea curentului* care solicită termic întrerupătorul;
- *tensiunea tranzitorie de restabilire*, $u_r(t)$ care solicită dielectricul dintre contactele echipamentului de comutație;

b) parametrii specifici întrerupătorului :

- *tensiunea de străpungere în camera de stingere*, care exprimă viteza de restabilire a rigidității dielectrice;
- *tensiunea arcului electric*, $u_a(t)$, dependentă de gradul de răcire și de mediul de stingere.

În momentul anulării intensității curentului electric, prin coloana arcului au loc următoarele fenomene:

- temperatura coloanei arcului și conductanța acesteia scad rapid, ceea ce duce la refacerea rigidității dielectrice a spațiului dintre contacte;
- crește tensiunea de străpungere a spațiului dintre contacte (are valoare maximă);
- apare tensiunea de tranzitorie de restabilire, $u_r(t)$ – dată de tensiunea de regim permanent a sursei (de pulsație ω) și de tensiunea corespunzătoare regimului liber al circuitului deconectat (de pulsație $\omega_l \gg \omega$).

Stingerea definitivă a arcului electric are loc atunci când:

$$i_a(t) = 0 \quad \text{și} \quad U_r(t) < U_s(t)$$

în care:

$U_r(t)$ – este tensiunea tranzitorie de restabilire;

$U_s(t)$ – este tensiunea de străpungere (reaprinere) a arcului electric.

În figura 3.6a este prezentată grafic schema electrică echivalentă a întreruperii unui curent de scurtcircuit, produs la bornele întrerupătorului. În majoritatea cazurilor, curenții de scurtcircuit sunt practic inductivi, deoarece parametrii limitelor electrice respectă inegalitatea $\omega L \gg R$. În figura 3.6b, drept origine a timpului ($t=0$) este considerat momentul unei treceri prin zero a intensității curentului de scurtcircuit $i_k(t)$, căruia îi corespunde valoarea de vârf a tensiunii sursei de alimentare (curba 1); curba 2 reprezintă tensiunea tranzitorie de restabilire, conținând tensiunea sursei de alimentare, la care se adaugă regimul liber al circuitului oscilant echivalent.

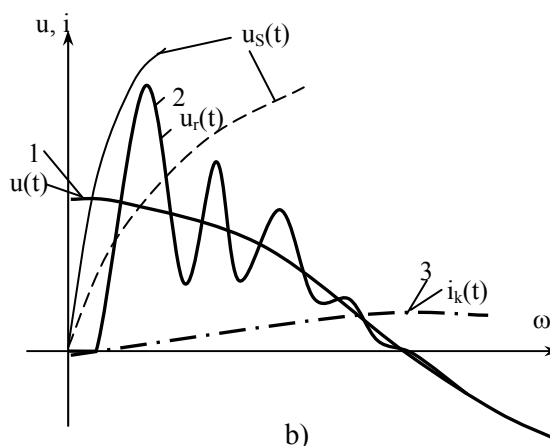
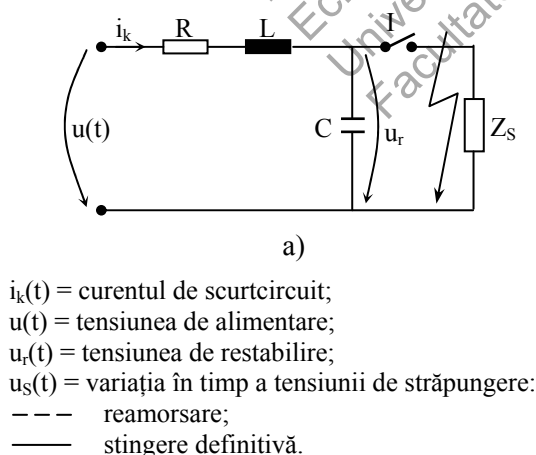


Fig.3.6: Deconectarea unui scurtcircuit la bornele întrerupătorului:
 a) schema electrică echivalentă, b) regimul tranzitoriu de deconectare.

Datorită inerției termice, conductanța arcului electric, calculată pentru momentele anulării intensității curentului are valori nenule, exprimate de valoarea G_0 prin relația:

$$(3.16) \quad G_0 = \frac{\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0}}{\left. \frac{du_a}{dt} \right|_{t=0}}, \quad \text{în care:} \quad \begin{aligned} i(t) &= \sqrt{2}I \sin \omega t, \\ u_a(t) &= \frac{\sqrt{2}P_0 \cos \omega t}{I \left[1 - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{\sqrt{1 + 4\omega^2 T_a^2}} \right]}, \\ \varphi &= \arccos(2\omega T_a) \end{aligned}$$

Derivând în raport cu timpul obținem:

$$(3.17) \quad G_0 = \frac{4I^2 \omega^2 T_a^2}{P(1 + 4\omega^2 T_a^2)} \neq 0, \text{ care este valoarea conductanței arcului electric în momentul } t=0.$$

Ținând cont că după timpul T_a , conductanța scade de "e" ori pentru conductanța $G(t)$ a arcului electric se poate scrie expresia:

$$(3.18) \quad G(t) = G_0 e^{-\frac{t}{T_a}}$$

Relația (3.17) este valabilă pentru un interval de timp mic, considerat din momentul anulării curentului electric.

Pentru ca tensiunea tranzitorie de restabilire, $u_r(t)$, aplicată spațiului dintre contacte să nu producă reamorsarea arcului electric, trebuie ca puterea preluată de la sursă de coloana arcului să aibă valori mai mici decât puterea disipată P_0 , adică:

$$u_r(t) \cdot i < P_0, \quad \text{în care: } i = u_r(t) \cdot G(t), \quad \text{deci rezultă: } u_r^2(t) \cdot G(t) < P_0 \Rightarrow$$

$$(3.19) \quad u_r(t) < \sqrt{\frac{P_0}{G(t)}} = \sqrt{\frac{P_0}{G_0}} e^{\frac{t}{T_a}}$$

Ținând cont de relația (3.18) condiția pentru ca arcul electric să nu se reamorseze între contacte va fi:

$$(3.20) \quad u_r(t) < u_s(t) = \sqrt{\frac{P_0}{G_0}} e^{\frac{t}{T_a}}$$

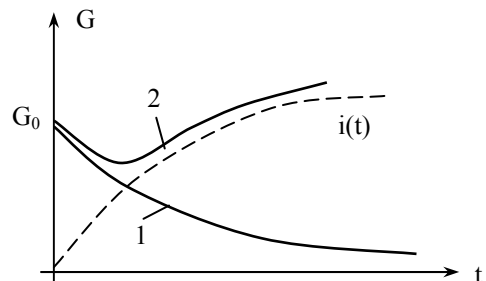


Fig. 3.7: Curbele de variație a conductanței: 1- variația conductanței la evacuarea intensă a căldurii din coloana de arc. 2- variația conductanței la evacuarea mai puțin intensă a căldurii din coloana de arc

Stingerea definitivă a arcului electric lung amorat între contactele echipamentelor de înaltă tensiune este dictată de evoluția în timp a conductanței, $G(t)$, după anularea intensității curentului electric. După anularea curentului se anulează puterea electrică primită de coloana de arc de la sursă, dar continuă cedarea în mediul înconjurător a căldurii acumulate de coloana de arc. Dacă evacuarea căldurii are loc cu mare intensitate, procesele de deionizare produc scăderea conductanței $G(t)$, (curba 1 din figura 3.7) încât arcul electric se stinge. Aceasta este posibil numai dacă densitatea electronilor în plasma reziduală nu depășește valoarea de $10^9 \text{ e}^-/\text{cm}^3$. Dacă evacuarea căldurii din coloana de arc este mai puțin intensă, conductanța va crește după curba 2 și arcul electric se reamorsează.

Un rol important în stingerea arcului electric lung îl are constanta de timp T_a , care pentru valori mici, conform relației (3.17), rezultă valori reduse pentru conductanța G_0 și deci, condiții bune pentru o reușită a stingere arcului electric. Acest lucru rezultă și din relația (3.20) în care pentru valori mici ale constantei T_a , rezultă valori mari ale tensiunii de străpungeri și deci spațiul dintre contacte nu se va mai străpunge.

Valorile constantei de timp T_a , depind de:

- mediul în care are loc arderea arcului electric;
- dimensiunile geometrice ale coloanei arcului electric.

Pentru calcularea constantei de timp T_a se folosește relația:

$$(3.21) \quad T_a = \frac{r_0^2}{2,4 \cdot a_0} \quad \text{în care: } r_0 - \text{este raza coloanei arcului electric;}$$

$$a_0 - \text{este difuzivitatea căldurii în mediu de stingere;}$$

$$(3.22) \quad a_0 = \frac{\lambda}{\gamma c} \quad \text{în care: } \gamma - \text{densitatea mediului de stingere;}$$

$$c - \text{căldura specifică a mediului de stingere;}$$

$$\lambda - \text{conductivitatea termică a mediului de stingere}$$

Din relația (3.21) rezultă că mediile cu bune proprietăți de stingere a arcului electric au valori cât mai mari ale difuzivității a_0 , așa cum sunt azotul, hidrogenul și hexaflorura de sulf.

3.3.2. Stingerea arcului electric scurt

Arcul electric scurt se amorsează între contactele echipamentelor de comutație de joasă tensiune. Datorită lungimii sale mici, de ordinul 1÷3 mm, stingerea se obține pe baza proceselor din vecinătatea contactelor, neglijabile în cazul arcului electric lung. Pentru reamorsarea arcului electric scurt este necesar ca între contacte, după anularea intensității curentului electric, să fie aplicate tensiuni de valori 150–250 V, în măsură să asigure gradientul de potențial corespunzător autoemisiei electronice la noul catod. Dacă tensiunile aplicate au valori mai mici, arcul electric scurt se stinge definitiv la prima trecere prin zero a intensității curentului.

4. Procedee și dispozitive pentru stingerea arcului electric

4.2. Procedee și dispozitive pentru stingerea arcului electric de curent continuu

Dacă în unele aplicații industriale (sudură electrică, cuptoare cu arc etc.) se urmărește obținerea unei arderi stabile a arcului electric, în tehnica echipamentelor de comutație se urmărește obținerea unui regim de ardere instabilă, favorabilă stingerii arcului electric, prin care se concretizează de fapt întreruperea circuitului.

Potrivit considerațiilor teoretice prezentate în cursurile anterioare, rezultă existența a două posibilități de principiu, ce pot fi aplicate în vederea stingerii arcului de curent continuu: translatarea caracteristicii volt-ampere spre valori crescătoare ale tensiunii de arc, respectiv rotirea drepte de sarcină corespunzător unor valori crescătoare ale rezistenței circuitului. Utilizarea separată sau combinată a acestor două principii conduce, la limită, la confundarea punctelor de funcționare P_1 și P_2 , condiție necesară pentru stingerea arcului electric.

Stingerea arcului electric se poate obține prin trei procedee practice și anume:

- a) deplasarea caracteristicii volt-ampere a arcului electric în sus, figura 4.1.;
- b) introducerea unei rezistențe în circuitul deconectat și rotirea caracteristicii în jos a drepte $u-R \cdot i$;
- c) modularea curentului continuu în curent alternativ.

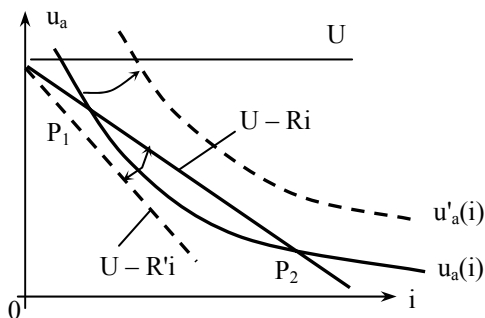


Fig.4.1: Deplasarea caracteristicii volt-ampere a arcului electric

a) Stingerea naturală sau forțată a arcului electric de curent continuu.

Stingerea naturală, specifică echipamentelor de comutație de mică putere, se obține prin alungirea coloanei arcului, figura 4.2, ca urmare a deplasării contactului mobil 1 în raport cu cel fix 2, a acțiunii forțelor electrodinamice de contur F și a suflajului natural, produs de deplasarea gazelor fierbinți, 3.

Pentru stingerea forțată a arcului electric, echipamentele de comutație sunt prevăzute cu dispozitive speciale, dintre care uzuale sunt camerele de stingere, asociate cu bobinele de suflaj magnetic. Camerele de stingere sunt dispozitive care delimitează spațiul de ardere a arcului electric. Acestea pot fi cu fantă largă, figura 4.3, respectiv cu fantă variabilă, figura 4.4a; arcul electric este reprezentat ca un conductor parcurs de curent, având o mișcare ascendentă. Pereții 1 ai camerelor de stingere se construiesc din materiale refractare (șamot, azbociment, steatit), acoperite la suprafață cu lacuri de hidrofobizare, pentru a limita adsorbția umezelii. La camerele de stingere cu fantă largă (figura 4.3) distanța dintre pereții laterali 1 este mai mare decât diametrul coloanei arcului; pe suprafețele exterioare ale pereților electroizolanți 1 sunt amplasate plăcile din oțel 2, care constituie piesele polare ale bobinei de suflaj magnetic. Intensificarea deionizării coloanei arcului este favorizată de contactul intim al acesteia cu pereții reci ai camerei de stingere; în acest scop, sunt uzuale variantele constructive reprezentate în figura 4.4: a- cu fantă variabilă, b- cu grile electroizolante, c- cu șicane.

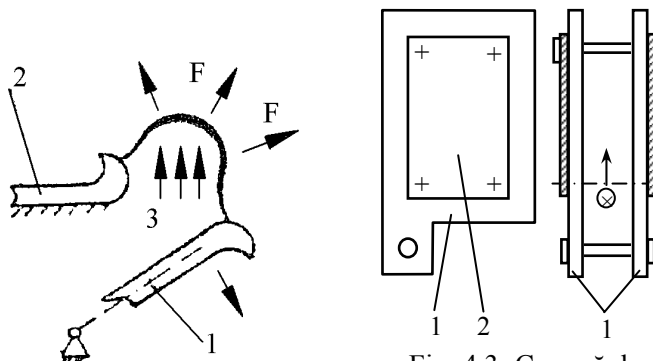


Fig. 4.2. Stingerea naturală.

Fig. 4.3: Camera de stingere cu fantă largă.

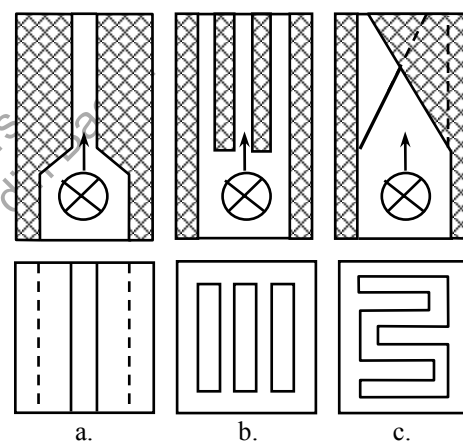


Fig. 4.4: Camere de stingere: a-cu fantă variabilă, b-cu grile, c-cu șicane

În majoritatea cazurilor, camerelor de stingere li se asociază suflajul magnetic, exercitat sub acțiunea forțelor electromagnetice care alungesc coloana arcului, parcursă de curent și situată în câmpul magnetic al bobinei de suflaj. Pentru realizarea suflajului magnetic, figura 4.5, camera de stingere 1 este prevăzută cu o bobină realizată dintr-un număr de spire 2, dispuse pe miezul cilindric feromagnetic 3, ale cărui piese polare 4 sunt fixate în exterior, de o parte și de alta a pereților camerei. Curentul care circulă prin coloana arcului electric parcurge și spirele bobinei de suflaj, producând, între piesele polare, câmpul magnetic de inducție B . Interacțiunea acestuia cu curentul de arc produce o forță electromagnetică F , orientată în sensul alungirii coloanei arcului electric.

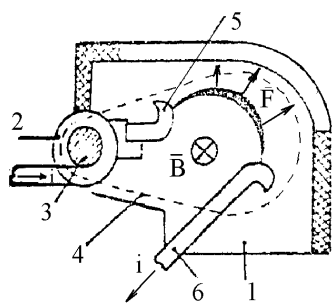


Fig. 4.5. Camere de stingere cu suflaj magnetic.

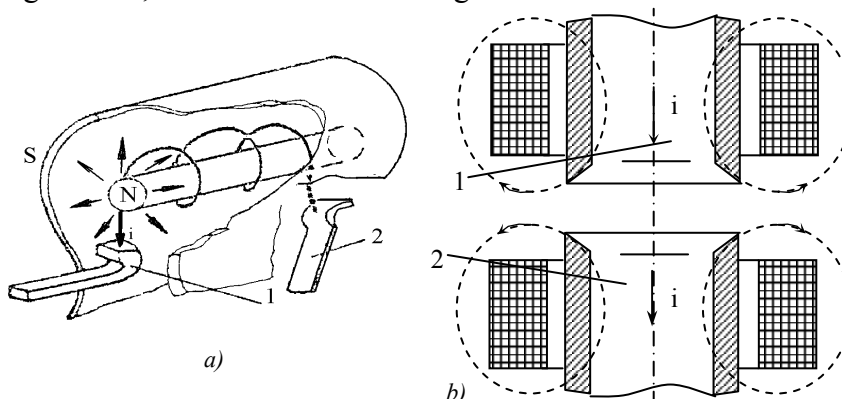


Figura 4.6. Suflaj magnetic radial: a- cu alungire elicoidală, b- cu alungire prin rotație.

Suflajul magnetic poate fi produs și cu ajutorul unor câmpuri magnetice radiale; în funcție de tipul dispozitivului, arcul electric amorsat între contactele 1-fix și 2-mobil este fie alungit după un elicoid, figura 4.6a, fie obligat să se rotească, cu o viteză apropiată de cea a sunetului, sprijinindu-se pe circumferințele contactelor, figura 4.6b în ultimul caz activându-se deionizarea prin difuziune.

b) Creșterea rezistenței circuitului deconectat

Dispozitivul având funcționarea bazat pe acest procedeu este denumit reductor de curent, figura 4.7. La deconectare, contactul mobil C, prin deplasarea spre poziția finală, introduce în circuit trepte din rezistorul R_1 , R_2 , obținându-se astfel creșterea rezistenței totale a circuitului. Arcul electric amorsat între contactele fixe finale F și contactul mobil C este stins cu ușurință, datorită valorii mici a intensității curentului și a arderii instabile.

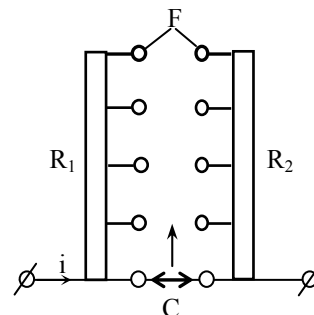


Fig.4.7. Reductorul de curent.

c) Modularea curentului de arc, forțează anularea intensității

acestui.

În figura 4.8a este dată schema electrică de principiu a unui astfel de echipament de comutație, funcționând la întreruperea unui curent de scurtcircuit. Aceasta conține întrerupătorul principal I_1 și un întrerupător secundar I_2 , prin închiderea căruia se permite descărcarea condensatorului de capacitate C_0 , inițial încărcat cu polaritatea din figură; la întreruperea unui curent de scurtcircuit i_k , simultan cu deschiderea întrerupătorului I_1 se închide întrerupătorul I_2 , încât, pentru intensitatea $i(t)$ a curentului prin arc rezultă:

$$(4.1) \quad i(t) = i_k(t) - i_c(t)$$

$i_c(t)$ fiind intensitatea curentului de descărcare oscilantă a condensatorului. Dimensionând corespunzător circuitul de descărcare R_0 , L_0 , C_0 , se obține anularea intensității $i(t)$ a curentului prin arc, stingerea fiind posibilă în momentele t_1 , t_2 ș.a.m.d., de trecere prin zero a acestuia, figura 4.8b.

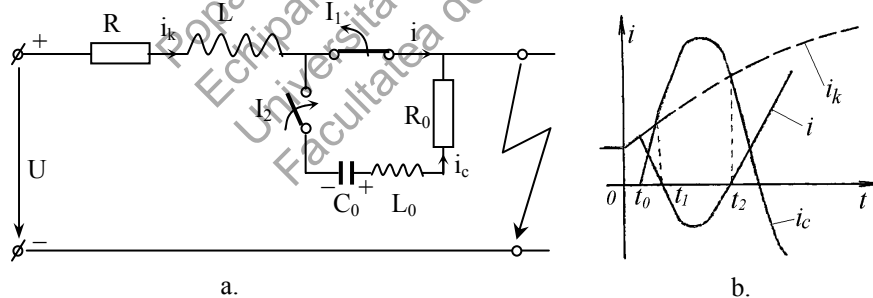


Fig. 4.8: Modularea curentului de arc: a. schema echivalentă; b. curbele de variație a curenților electrice.

4.3. Procedee și dispozitive pentru stingerea arcului electric de curent alternativ

În curent alternativ anularea periodică a curentului are o contribuție esențială în stingerea arcului electric prin deionizarea intensă a coloanei de arc. În procesul de stingere a arcului de curent alternativ intervin atât unii parametri ai circuitului deconectat cât ai camerei de stingere.

În cazul arcului scurt, de joasă tensiune, procedeul utilizat la stingerea arcului electric, constă în divizarea coloanei arcului astfel încât tensiunea furnizată de sursă repartizată pe fiecare spațiu divizat să fie mai mică de 100 V. În felul acesta stingerea se obține prin efectul de electrod. Divizarea arcului electric se obține în camere de stingere prevăzute cu grile metalice sau cu bare

metalice, figura 4.9. Grilele 3, figura 4.9a, sunt executate din OL zincat pasivizat și sunt prevăzute cu nișe dreptunghiulare sau triunghiulare, care sub acțiunea forțelor electrodinamice de atracție exercitate asupra arcului, produce divizarea coloanei de arc.

Arcul electric amorsat inițial între contactele 1, fix și 2, mobil, este introdus în camera de stingere între grilele 3. Numărul n al grilelor metalice necesare pentru o cameră de stingere se calculează impunând condiția ca valoarea de vârf, U_{cm} , aplicată spațiului dintre două grile succesive să fie inferioară tensiunii necesare pentru reamorsarea arcului, relația de calcul fiind:

$$(4.2) \quad n = \frac{1,5\sqrt{2}\gamma \cdot U_n k}{\sqrt{3}U_{cm}}$$

unde: $\gamma = 1,4 \div 1,6$ reprezentând factorul de amplitudine;

U_n – tensiunea nominală a echipamentului de comutație;

$k = 1,2 \div 1,3$ – coeficientul de neuniformitate;

$U_{cm} \leq 100$ V, tensiunea de reamorsare a arcului dintre două grile succesive, corespunzătoare unor intensități ale curentului nominal de $10 \div 400$ A.

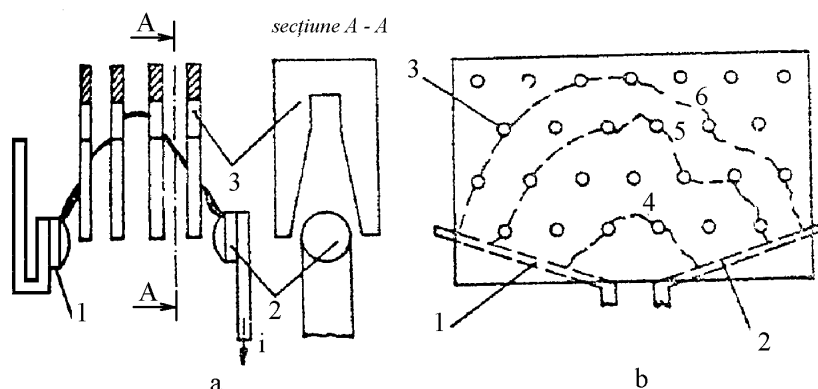


Figura 4.9: Camere de stingere a arcului electric în curent alternativ de j.t.:
a. cameră de stingere cu grile: 1-contact fix, 2-contact mobil, 3-grile metalice;
b. cameră de stingere cu bare metalice: 1,2 -rampe contact, 3-bare metalice.

Camerele de stingere cu bare, figura 4.9b, sunt prevăzute cu rampele 1, 2 pentru preluarea extremităților arcului electric; acesta, divizat de barele 3, ocupă succesiv până la stingere poziții cum sunt 4, 5, 6. Atât grilele cât și barele metalice exercită și o acțiune deionizantă asupra coloanei arcului, prin răcirea acesteia.

În cazul arcului lung, de întă tensiune, pentru stingerea arcului electric, echipamentele de comutație de înaltă tensiune sunt prevăzute cu camere de stingere, în care se asigură deionizarea intensă a coloanei arcului. Agentul de preluare a căldurii din coloana arcului electric este un fluid (gaz sau lichid) cu bune proprietăți electroizolante și de stingere a arcului electric.

Echipamentele moderne de comutație sunt prevăzute cu camere de stingere funcționând cu hexafluorură de sulf (SF_6) sau în vid avansat; comutația în hexafluorură de sulf cuprinde toată gama tensiunilor nominale, în timp ce echipamentele de comutație în vid avansat sunt întâlnite numai la instalațiile de joasă și medie tensiune.

Cursul nr. 4

Tensiunea tranzitorie de restabilire

Deconectarea dinamică este constituită din două etape:

- prima, cuprinsă între momentul desprinderii contactelor și cel al stingerii arcului electric;
- a doua, caracterizată prin procesul tranzitoriu de restabilire a tensiunii între contactele echipamentului de comutație.
 - Contacte închise $\Rightarrow$ tensiunea la borne = $1 \div 2$ mV;
 - Contacte deschise $\Rightarrow$ tensiunea la borne = tensiunea rețelei

DEFINIȚIE:

Tensiunea tranzitorie de restabilire este tensiunea care apare între contactele deschise ale echipamentului de comutație, după stingerea definitivă a arcului electric.

Caracteristicile cele mai importante ale tensiunii tranzitorii de restabilire sunt: **valoarea de vârf** și **viteza de creștere**.

Pentru circuitele trifazate, tensiunea tranzitorie de restabilire se referă la tensiunea bornelor polului care întrerupe primul.

Tensiunea tranzitorie de restabilire soliciță dielectric spațiul dintre contacte, putând determina reaprinderea arcului electric dacă are valori mai mari decât tensiunea de străpungere a spațiului dintre contacte.

Valori mai mari ale tensiunii de restabilire apar în cazul circuitelor de curent continuu inductive sau capacitive.

4.1. Deconectare dinamică în instalațiile de curent continuu

În figura 4.1 este reprezentat un circuit inductiv în care, la deconectarea circuitului, între contactele echipamentului de comutație apare un arc electric, tensiunea u_a a arcului, conform relației lui Ayrton, este: $u_a = a + b/i$; și care, dacă neglijăm termenul neliniar b/i , devine:

$$(4.1) \quad u_a(t) = \alpha + \gamma i = \alpha + \gamma v \cdot t,$$

În momentul în care arcul electric se stinge ($t = t_a$), tensiunea u_a devine tensiunea tranzitorie de restabilire, deci:

$$(4.2) \quad u_a(t_a) = u_m = \alpha + \gamma v \cdot t_a$$

Înlocuind timpul t_a de ardere a arcului electric în circuitele inductive, $t_a = T + \frac{U - \alpha}{\gamma \cdot v}$, vom obține:

$$(4.3) \quad u_m = U + \gamma \cdot v \cdot T > U$$

$T = L/R$ – constanta circuitului.

Prin înregistrarea tensiunii tranzitorii de restabilire rezultă că u_m este mai mare decât U , figura 4.2; lucru confirmat și de relația (4.3).

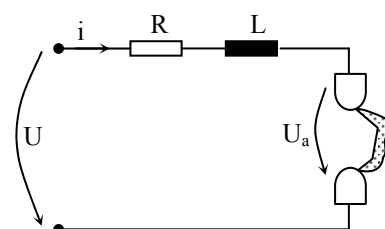


Fig. 4.1: Circuit RL după deconectare.

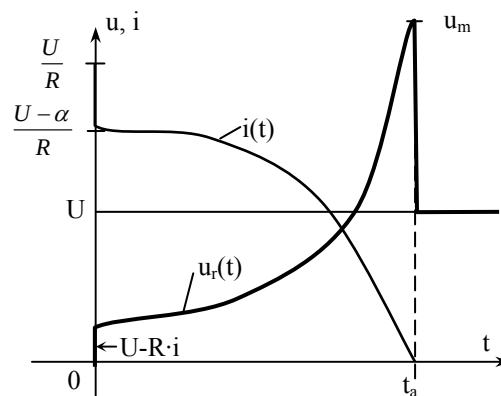


Fig. 4.2. Variația tensiunii de restabilire la deconectarea circuitelor de curent continuu inductive.

CONCLUZIE:

La deconectarea dinamică a unui circuit de c.c. între contactele echipamentului de comutație apare o supratensiune tranzitorie cu valoarea maximă $u_m = U + \gamma v T$

În cazul circuitelor de curent continuu capacitive, prezența capacității poate da un caracter oscilant tensiunii tranzitorii de restabilire, figura 4.3, iar în cazul circuitelor rezistive nu apar supratensiuni, figura 4.4.

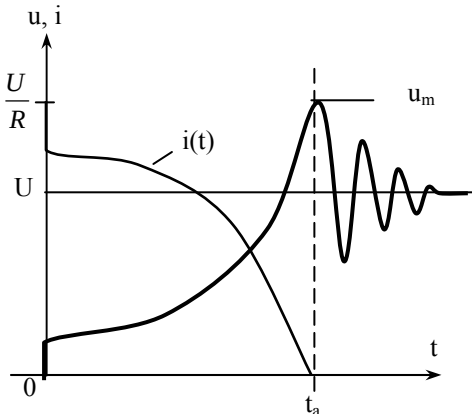


Fig. 4.3. Variația tensiunii de restabilire la deconectarea circuitelor RLC de curent continuu.

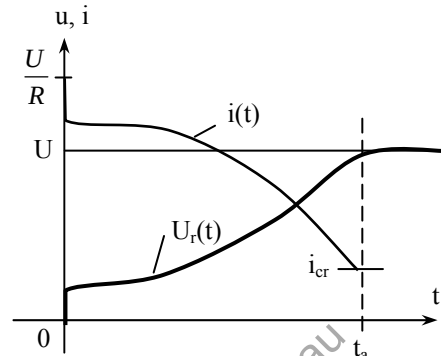


Fig. 4.4. Variația tensiunii de restabilire la deconectarea circuitelor de curent continuu rezistive.

Supratensiunile de comutație ce apar la deconectarea motoarelor de curent continuu sunt diminuate, datorită tensiunii contra-motoare E . În acest caz, ecuația circuitului echivalent se scrie sub forma:

$$(4.4) \quad L \frac{di}{dt} + Ri + u_a = U - E,$$

unde: L, R sunt parametrii electromotorului;

u_a – tensiunea arcului electric;

U – tensiunea de alimentare;

E – tensiunea contra-electromotoare.

De unde rezultă: $u_m = U - E + \gamma v T$

4.1.1. Metode de limitarea a supratensiunilor de deconectare de c.c.

Deoarece majoritatea circuitelor instalațiilor de curent continuu au caracter inductiv, supratensiunile înregistrate la deconectare au valori mari, astfel încât se impune limitarea lor. Pentru obținerea efectului de limitare se practică două procedee: șuntarea cu elemente de tip R sau RC ,

- fie a elementelor inductive din circuitul deconectat;
- fie a contactelor echipamentului de comutație.

Schema a.

În figura 4.5a este prezentată posibilitatea limitării supratensiunilor de comutație cu ajutorul unui rezistor șunt de rezistență R_s .

În ipoteza variației liniare a tensiunii de arc, (relația 4.1), ecuația care descrie funcționarea la deconectare a acestui circuit se poate scrie sub forma:

$$(4.5) \quad L \frac{di}{dt} + Ri + \gamma v \left(1 - \frac{R}{R_s} \right) t = (U - \alpha) \left(1 - \frac{R}{R_s} \right) - \frac{Lv\gamma}{R_s}$$

Durata t_a de ardere a arcului electric, în ipoteza $t_a \gg L/R$, se obține de forma:

$$(4.6) \quad t_a \cong T + \frac{U - a}{\gamma v} - \frac{L}{R_s - R},$$

unde: v = viteza de alungire a coloanei arcului;

T = constanta de timp a circuitului.

Pentru $R_s > R \Rightarrow t_a$ mai mic.

Dezavantaj: în regim permanent de funcționare apare un consum suplimentar de putere:

$$\Delta P = R_s i^2.$$

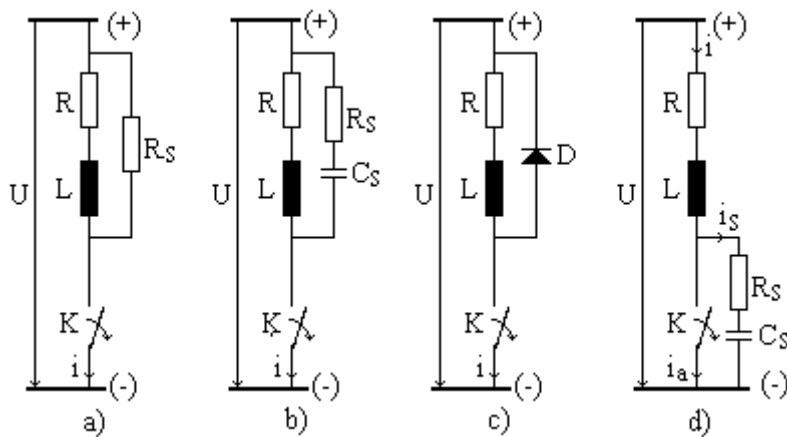


Fig. 4.5. Limitarea supratensiunilor de comutație.

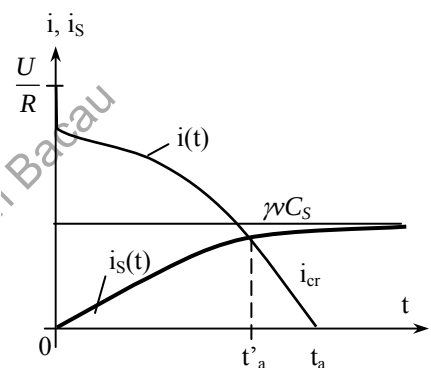


Fig. 4.6 Limitarea cu circuit RC.

Schema b.

Varianta din figura 4.5b elimină acest dezavantaj, grupul de limitare $R_s C_s$ intrând în funcțiune numai pe durata regimurilor tranzitorii, deci și la deconectare.

Pentru evitarea regimului oscilant, trebuie să se verifice relația:

$$(4.7) \quad R + R_s > 2 \sqrt{\frac{L}{C_s}}$$

Schema c.

O altă soluție de limitare a supratensiunilor de comutație constă în utilizarea unei diode D , conectată ca în figura 4.5c. Durata de ardere a arcului electric se reduce în acest caz la o valoare $t_0 < t_a$ când, prin schimbarea sensului tensiunii $U - u_d(t)$ aplicată diodei D , aceasta intră în conducție, limitând tensiunea de arc la valoarea $U + U_D$, U_D fiind căderea de tensiune pe dioda în conducție.

Schema d.

Pentru protecția contactelor releelor se folosesc grupuri R_s, C_s , conectate în paralel cu contactele (figura 4.5d). rezolvând sistemul de ecuații care descrie funcționarea, la deconectare a circuitului, pentru intensitatea $i_s(t)$ se obține formula

$$(4.8) \quad i_s(t) = \gamma v C_s \left(1 - e^{-\frac{t}{T_s}} \right),$$

unde: $T_s = R_s C_s$.

Durata t'_a de ardere a arcului electric între contactele K , se obține impunând condiția:

$$i_a(t'_a) = 0,$$

care, potrivit figuri 4.5d, implică:

$$(4.9) \quad i_a(t'_a) = i_s(t'_a)$$

Rezolvarea grafică a ecuației (4.9), dată în figura 4.6, evidențiază o micșorare a duratei de ardere a arcului electric, $t'_a < t_a$, însoțită de limitarea supratensiunilor de comutație.

OBSERVAȚIE:

Micșorarea duratei de ardere a arcului electric prin procedeele prezentate permite, pe lângă limitarea supratensiunilor de comutație, și reducerea intensității procesului de uzură electrică a pieselor de contact.

4.2. Deconectare dinamică în instalațiile de curent alternativ

În cazul instalațiilor de curent alternativ, tensiunea tranzitorie de restabilire poate avea caracter aperiodic sau oscilant, prezența capacităților având influențe similare celor din instalațiile de curent continuu.

Pentru evidențierea unor aspecte legate de restabilirea tensiunii în instalațiile de curent alternativ, se consideră schema electrică echivalentă a deconectării unui scurtcircuit produs la bornele întrerupătorului (figura 4.7)

La stingerea arcului electric ($i = 0$), curentul rămâne în urma tensiunii, adică:

$$(4.10) \quad u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \psi)$$

Ecuția de funcționare a circuitului, aplicând legea conducției, este:

$$(4.11) \quad u(t) = Ri + L \frac{di}{dt} + u_r$$

în care intensitatea curentului are un caracter predominant capacitiv:

$$(4.12) \quad i = C \cdot \frac{du_r}{dt} \Rightarrow$$

$$(4.13) \quad u(t) = RC \frac{du_r}{dt} + LC \frac{d^2 u_r}{dt^2} + u_r \quad | : L \cdot C \text{ și rezultă:}$$

$$(4.14) \quad \frac{u(t)}{LC} = \frac{d^2 u_r}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_r}{dt} + \frac{u_r}{LC}$$

cu notațiile: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\delta = \frac{R}{2L}$, obținem:

Considerăm drept origine a timpului momentul stingerii arcului, deci când intensitatea curentului electric trece prin zero, ecuația (4.14) poate fi scrisă sub forma:

$$(4.15) \quad \sqrt{2} \cdot U \cdot \omega_0^2 \cdot \sin(\omega t + \psi) = \frac{d^2 u_r}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{du_r}{dt} + \omega_0^2 u_r$$

la care se adaugă condițiile la limită:

$$u_r(0) = 0 \text{ și } \left. \frac{du_r}{dt} \right|_{t=0} = 0$$

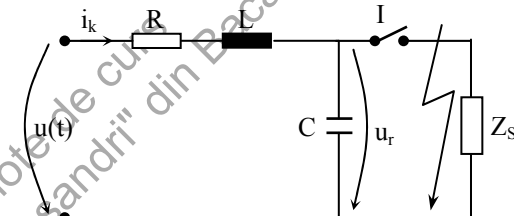


Fig.4.7: Schema electrică echivalentă a deconectării unui scurtcircuit

și admite soluția oscilantă:

$$(4.16) \quad u_r(t) = \frac{\sqrt{2}U}{\omega CZ} \sin(\omega t + \psi_u) - \frac{\sqrt{2}U}{\omega CZ} \cdot e^{-\delta t} \left[\left(\frac{\delta}{\omega_e} \sin \psi_u + \frac{\omega}{\omega_e} \cos \psi_u \right) \sin \omega_e t + \sin \psi_u \cos \omega_e t \right]$$

$$\text{în care:} \quad Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}; \quad \psi_u = \psi - \varphi - \frac{\pi}{2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}; \quad \delta = \frac{R}{2L};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \omega_e = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad \omega_0 > \delta.$$

În condiții reale de scurtcircuit, circuitul este puternic inductiv, $\omega L \gg R$, și putem considera:

$$\psi_u = \frac{\pi}{2}; \quad \omega_0 \approx \omega_e \gg \delta; \quad \omega_0 \approx \omega_e \gg \omega; \quad \varphi = -\frac{\pi}{2}; \quad Z = \frac{1}{\omega C}$$

Punând aceste condiții relația tensiunii tranzitorii de restabilire se poate scrie:

$$(4.17) \quad u_r(t) = \sqrt{2}U (\cos \omega t - e^{-\delta t} \cos \omega_e t)$$

Pe durata foarte scurtă a arcului electric se poate considera $\cos \omega t = 1$, astfel ecuația (4.17) devine:

$$(4.18) \quad u_r(t) = \sqrt{2}U (1 - e^{-\delta t} \cos \omega_e t)$$

În baza ecuație (4.18) se stabilesc parametrii caracteristici ai tensiunii tranzitorii de restabilire:

- valoarea de vârf, u_m , se obține pentru $\omega_e \cdot t = \pi$: $u_m = \sqrt{2}U \left(1 + e^{-\frac{\pi \delta}{\omega_e}} \right)$
- factorul de oscilație $\gamma = \left(1 + e^{-\frac{\pi \delta}{\omega_e}} \right)$, cu valori cuprinse: $1 < \gamma < 2$;
- frecvența proprie de oscilație: $f_e = \frac{\omega_e}{2\pi}$.

Se constată că parametrii tensiunii tranzitorii de restabilire au valori dependente de parametrii instalațiilor astfel: frecvența proprie a rețelilor de 6÷35 kV este de 3÷4 kHz iar a rețelilor de 110 kV de 0,5÷1 kHz, factorul de oscilație având valori de 1,3÷1,6.

Prin parametrii f_e și γ , tensiunea tranzitorie de restabilire exercită influențe importante asupra stingerii arcului electric.

Întreruperea unui curent de scurtcircuit trifazat se face cu ajutorul unui echipament de comutație tripolar. În acest caz stingerea arcului electric nu se produce în același timp pe cei trei poli, deoarece intensitățile I_1 , I_2 și I_3 sunt decalate cu $2\pi/3$; figura 4.8.

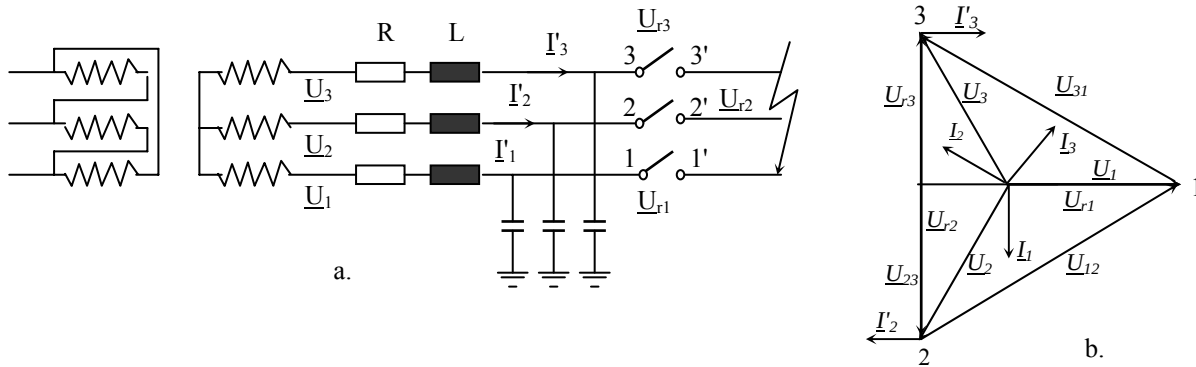


Fig. 4.8. Schema echivalentă (a) și diagrama fazorială (b) în cazul întreruperii unui scurtcircuitului trifazat.

Stingerea arcului electric se produce la polul corespunzător căruia intensitatea curentului se anulează prima, fie acesta polul 1. Ca urmare, scurtcircuitul trifazat devine bifazat, fazorii $\underline{I}_2, \underline{I}_3$ ajungând prin alunecare de fază, în pozițiile $\underline{I}'_2, \underline{I}'_3$; stingerea arcului electric are loc simultan la polii 2, 3, după o întârziere corespunzătoare unui defazaj de $\pi/2$.

Componenta de regim permanent a tensiunii tranzitorii de restabilire, $\underline{U}_{r1}$, pusă în evidență între contactele polului 1, după stingerea arcului electric, figura 4.8, rezultă de forma:

$$(4.19) \quad U_{r1} = U_1 + U_2 \cos 60^\circ = \frac{U_n}{\sqrt{3}} + \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} U_n$$

Pentru polii 2 și 3 se obține:

$$(4.20) \quad U_{r2} = U_{r3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cos 30^\circ = 0,5 \cdot U_n$$

Valorile de vârf ale tensiunii tranzitorii de restabilire la deconectarea unui scurtcircuit trifazat se pot calcula cu relațiile:

$$(4.21) \quad u_{m1} = \gamma \sqrt{2} U_{r1} = \frac{1,5\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \gamma U_n$$

$$(4.22) \quad u_{m2,3} = \gamma \sqrt{2} U_{r2,3} = 0,5\sqrt{2} \gamma U_n$$

în care:

$u_{m1}, u_{m2,3}$ reprezintă valorile de vârf ale tensiunii tranzitorii de restabilire pentru polul care întrerupe primul, respectiv ceilalți doi poli;

γ - factorul de oscilație

U_n - tensiunea nominală a instalației trifazate (valoarea efectivă, măsurată între faze).

Din relațiile (4.21) și (4.22) rezultă: $\frac{u_{m1}}{u_{m2,3}} = \sqrt{3}$.

CONCLUZIE:

La un echipament de comutație trifazat, polul care întrerupe primul este solicitat la supratensiuni mai mari decât ceilalți doi poli, care, la rândul lor, sunt suprasolicitați sub raport termic, datorită duratei mai mari de ardere a arcului electric.

Cursul nr. 5

Solicitări termice

Echipamentul electric aflat în funcționare este supus unor solicitări termice de intensitate variabilă ca urmare a transformării, la nivelul diferitelor elemente constructive, a energiei electromagnetice în căldură. În consecință, pe durata funcționării în regim normal, temperaturile diferitelor repere cresc în timp, până la atingerea valorilor corespunzătoare regimului termic permanent, când întreaga energie calorică produsă este transferată mediului înconjurător.

Există regimuri de încălzire, de exemplu cele produse de curenții de scurtcircuit, în care procesele termice pot fi considerate adiabactice. În aceste condiții, întreaga energie calorică produsă duce la creșterea rapidă, spre valori mari, a temperaturii elementelor constructive. În stabilirea valorii temperaturii de funcționare a unui reper constructiv, prezintă importanță cunoașterea temperaturii mediului ambiant, θ_a , cu valoarea normală de referință $\theta_a = 40^\circ\text{C}$.

Temperatura de funcționare θ , înregistrată la un moment dat, se poate calcula cu relația:

$$(5.1) \quad \theta = \theta_a + \vartheta,$$

unde: ϑ = supratemperatura (creșterea de temperatură), care apare din cauza încălzirii prin efect electrocaloric.

Majoritatea normelor existente se referă la două valori ale temperaturii de regim permanent, și anume supratemperatura maximă ϑ_p , respectiv temperatura maximă θ_p , dependente prin relația:

$$(5.2) \quad \vartheta_p = \theta_p - \theta_a,$$

5.1. Dezvoltarea căldurii în echipamentele electrice

Legea transformării energiei în masa conductoarelor este dată de relația:

$$(5.3) \quad p = \vec{E} \cdot \vec{J}$$

unde: p [W/m^3] = puterea cedată de câmpul electromagnetic unității de volum a conductorului parcurs de curent;

$\vec{E}$ [V/m] = intensitatea câmpului electric;

$\vec{J}$ [A/m^2] = densitatea curentului.

Ținând cont de expresia locală a legii lui Ohm:

$$(5.4) \quad \vec{E} = \rho \cdot \vec{J}, \quad \text{unde: } \rho [\Omega \cdot \text{m}] = \text{rezistivitatea materialului};$$

relația (5.3) devine de forma:

$$(5.5) \quad p = \rho \cdot J^2 \quad \text{forma locală a legii Joule–Lentz de transformare a energiei în volumul conductoarelor.}$$

Pentru un conductor omogen, de lungime l și secțiune transversală constantă s , pentru o densitate de curent, J , constantă, puterea, P , disipată sub formă de căldură în unitatea de timp este dată de relația:

$$p = \frac{dP}{dV}, \text{ deci } dP = p \cdot dV \Rightarrow$$

$$(5.6) \quad \boxed{P = \int_V \rho J^2 dV = Ri^2} = \text{puterea disipată sub formă de căldură}$$

unde: R = rezistența conductorului;

i = intensitatea curentului prin conductor, iar

$V = l \cdot s$ = volumul conductorului.

Cantitatea de căldură, $Q(t)$, degajată într-un interval de timp oarecare, rezultă:

$$(5.7) \quad Q(t) = \int_0^t P(t) dt .$$

DEFINIȚIE || **Fluxul termic** reprezintă transferul de căldură dQ în unitatea de timp după direcția normală la un element de suprafață ds , și se exprimă prin relația:

$$(5.8) \quad P(t) = \frac{dQ}{dt}$$

DEFINIȚIE || **Densitatea fluxului termic** (fluxul termic specific sau debitul de căldură) se obține prin raportarea fluxului termic la suprafața transversală:

$$(5.9) \quad q = \frac{dP}{ds}$$

În construcția echipamentelor electrice se folosesc anumite piese feromagnetice și materiale electroizolante care, în cazul câmpurilor magnetice variabile, reprezintă sediul unor importante surse termice și anume:

- solicitările termice în cazul **materialelor feromagnetice** amplasate în câmpuri magnetice variabile sunt determinate de pierderile în fier P_{Fe} , care se calculează cu relația:

$$(5.10) \quad p_{Fe} = p_H + p_t + p_v$$

unde: • **p_H – pierderi specifice prin histerezis;**

relația lui Steinmetz: $p_H = \eta f B_m^n$

relația lui Richter: $p_H = \frac{f}{100} (a + b B_m) B_m$
 η, n, a, b = mărimi constante, cu $n = 1,8 \div 2$;
 f – frecvența intensității câmpului magnetic;
 B_m – amplitudinea inducției;

• **p_t – pierderi specifice prin curenți turbionari;**

$$(5.11) \quad p_t = \sigma_t \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2$$

σ_t = constantă.

• **p_v – pierderi prin viscozitate magnetică**, se neglijează la frecvențe joase.

Deci pierderile specifice totale sunt:

$$(5.12) \quad p_{Fe} = \left[\sigma_h \frac{f}{100} + \sigma_t \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B_m^2$$

- solicitările termice în cazul **materialele electroizolante**: acestea sunt supuse solicitărilor termice prin pierderi în dielectric care apar în cazul tensiunilor variabile în timp și se calculează cu relația:

$$(5.13) \quad p_{iz} = \omega C U^2 \tan \delta$$

unde: ω - este pulsația tensiunii;
 δ - unghiul de pierderi;
 C – capacitatea dielectricului.

5.2. Transmisia termică în echipamentele electrice

Transformarea energiei electromagnetice în energie calorică are loc la nivelul materialelor active (căi de curent, piese feromagnetice și electroizolante). Cedarea căldurii se face prin transmisie termică, fluxul termic fiind orientat întotdeauna de la zonele cu temperaturi mai ridicate spre cele cu temperaturi mai scăzute, durata procesului extinzându-se până la egalizarea temperaturilor. Transmisia termică se realizează prin: conducție, convecție și radiație.

5.2.1. Transmisia termică prin conducție

DEFINIȚIE

Conducția termică reprezintă fenomenul de propagare a căldurii prin masa corpurilor solide, lichide sau gazoase sau între aceste corpuri aflate în contact când repartiția temperaturii în volumul lor este neuniformă.

Transmisia termică prin conducție se realizează cu cea mai mare viteză în metale, gazele rarefiate fiind caracterizate prin cea mai slabă conducție termică.

Starea termică a unui mediu este definită de câmpul scalar continuu de temperatură $\theta(x,y,z,t)$ care devine staționar de forma $\theta(x,y,z)$ dacă temperatura dintre diferite puncte ale mediului este invariabilă în timp.

Totalitatea punctelor câmpului staționar, caracterizate prin aceeași valoare a temperaturii, determină suprafețe izoterme (figura 5.1).

Prin intersecția suprafețelor izoterme cu un plan se determină curbe izoterme (figura 5.2).

Gradientul câmpului de temperatură se definește prin relația:

$$(5.14) \quad \text{grad} \theta = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \theta}{\Delta n} \right| \cdot \vec{n} = \frac{\partial \theta}{\partial n} \cdot \vec{n} = |\text{grad} \theta| \cdot \vec{n}$$

unde: $\vec{n}$ – direcția normalei la izotermă;

$\vec{n}$ - versorul normalei.

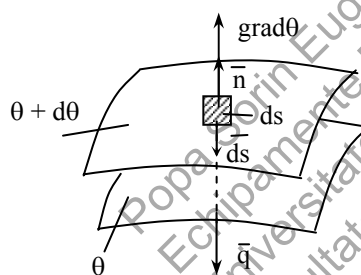


Fig. 5.1. Transferul de căldură între două suprafețe.

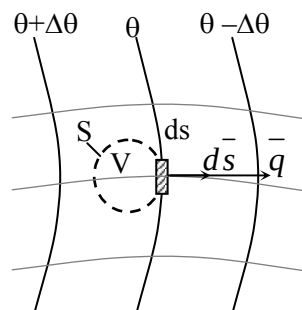


Fig. 5.2. Conducția termică nestaționară.

DEFINIȚIE

Gradientul câmpului de temperatură $\theta(x,y,z)$ reprezintă un vector în spațiu, orientat în sensul creșterii temperaturii de la o izotermă la alta.

Legea lui Fourier ne dă relația dintre căldura Q transmisă prin conducție și gradientul de temperatură:

$$(5.15) \quad \frac{\partial^2 Q}{\partial s \partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = -\lambda(n) \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\lambda(n) |\text{grad} \theta|$$

unde: $\lambda(n)$ – conductivitatea termică a mediului anizotrop [W/m·K];

Ținând cont de relația de definiție a fluxului termic, $P(t)=dQ/dt$, și de legea (5.15), pentru fluxul termic rezultă:

$$(5.16) \quad dP = -\lambda(n) \frac{\partial \theta}{\partial n} d\vec{s} \cdot \vec{n} = -\lambda(n) |\text{grad} \theta| d\vec{s} \cdot \vec{n} = -\lambda(n) \text{grad} \theta d\vec{s} = \text{fluxul termic}$$

semnul (-) indicând că sensul fluxului termic (P) este opus sensului vectorului gradient de temperatură (figura 5.1)

Pentru densitatea fluxului termic, q , din relațiile (5.9) $q=dP/ds$ și (5.16) rezultă:

$$(5.17) \quad \bar{q} = -\lambda(n) \text{grad} \theta, \quad \Rightarrow \quad q = -\lambda(n) |\text{grad} \theta| = -\lambda(n) \frac{\partial \theta}{\partial n}$$

Pe baza relației (5.15) a lui Fourier, se poate obține ecuația generală a conducției termice nestaționare pentru mediile solide.

Energia calorică dQ_s , transmisă pe durata dt printr-o suprafață închisă S , care delimitează volumul V (figura 5.2) este:

$$(5.18) \quad \frac{dQ_s}{dt} = \int_S \bar{q} d\bar{s} = - \int_S \lambda(n) \text{grad} \theta d\bar{s}$$

în același interval de timp, variația energiei din volumul V este de forma:

$$(5.19) \quad \frac{dQ_v}{dt} = \int_V p dV - \int_V \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} dV$$

unde: $\int_V p dV$ = energia transformată prin efect electrocaloric;

$\int_V \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} dV$ = energia acumulată, care conduce la variația în timp a temperaturii;

γ = densitatea materialului [kg/m^3];

c = căldura specifică [$\text{W}\cdot\text{s}/\text{kg}\cdot\text{K}$].

Conform legii conservării energiei se poate scrie:

$$(5.20) \quad dQ_s = dQ_v \quad \Rightarrow \text{ecuația de bilanț termic:}$$

$$(5.21) \quad \int_V p dV = \int_V \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} dV - \int_S \lambda(n) \text{grad} \theta d\bar{s}$$

și aplicând teorema lui Gauss-Ostrogradski $\left(\frac{dQ_v}{dt} = - \int_{V\Sigma} \text{div} [\lambda(n) \text{grad} \theta] dV \right)$ rezultă:

$$(5.22) \quad p = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \text{div} [\lambda(n) \text{grad} \theta]$$

care reprezintă ecuația generală a conducției termice nestaționare în medii solide conținând surse termice.

În coordonate carteziene, ecuația (5.22) devine:

$$(5.23) \quad p = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

pentru un mediu izotrop, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda = \text{const.}$, încât ecuația (5.23) devine:

$$(5.24) \quad p = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \nabla^2 \theta$$

unde: $\nabla^2 = \Delta$ este operatorul laplacean aplicat câmpului de temperatură $\theta(x,y,z)$.

Dacă mediul nu conține surse termice, se consideră $p=0$.

5.2.2. Transmisia termică prin radiație și convecție. Transmisia combinată a căldurii

Transmisia termică prin radiație se produce numai pentru medii transparente pentru radiațiile infraroșii și luminoase, cu lungimi de undă $\lambda = 0,8 \div 40 \mu\text{m}$, respectiv $0,4 \div 0,8 \mu\text{m}$.

Densitatea fluxului termic, evacuat prin radiație la suprafața exterioară a unui conductor care funcționează în vid sau într-un mediu gazos având temperatura T_a este dată de legea Ștefan-Boltzmann:

$$(5.25) \quad q_r = K\varepsilon(T^4 - T_a^4)$$

unde: $K = 5,6697 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ – constanta Ștefan-Boltzmann;

$T_a [\text{K}]$ = temperatura mediului ambiant;

$T [\text{K}]$ = temperatura suprafeței radiante;

$\varepsilon < 1$ = coeficientul de radiație – depinde de natura și starea suprafeței radiante.

Coeficientul α_r , se numește transmisivitatea termică prin radiație și caracterizează transmisia termică de pe suprafața de radiație, fiind dat de relația:

$$(5.26) \quad \alpha_r = \frac{q_r}{T - T_a} = \frac{q_r}{\theta - \theta_a}$$

unde: q_r = densitatea fluxului termic de radiație;

T, θ = temperatura corpului care radiază $[\text{K}]$, $[\text{°C}]$;

T_a, θ_a = temperatura mediului ambiant $[\text{K}]$, $[\text{°C}]$;

Ținând seama de cele două relații, rezultă:

$$(5.27) \quad \alpha_r = K\varepsilon \frac{T^4 - T_a^4}{T - T_a}$$

Energia termică transmisă de un corp prin radiație la temperatură constantă se calculează cu relația:

$$(5.28) \quad Q_r = \alpha_r S (\theta - \theta_a) t$$

unde: S = suprafața de radiație;

t = durata procesului.

La temperaturile întâlnite obișnuit în funcționarea echipamentelor electrice, transmisia termică prin radiație poate fi neglijată.

În cazul sistemelor conductoare funcționând la temperaturi de $100 \div 120^\circ\text{C}$, fluxul termic transmis prin radiație reprezintă $40 \div 50\%$ din fluxul total; acest procent are valori mai mari pentru componentele ce funcționează la temperaturi mari ridicate (elemente fuzibile, bimetale, camere de stingere etc).

Transmisia termică prin convecție se realizează pe seama deplasării particulelor unui fluid (gaz sau lichid), pe o suprafața caldă, care cedează căldură.

➤ naturală;

➤ forțată.

Densitatea fluxului termic de transmitere a căldurii prin convecție se calculează cu relația:

$$(5.29) \quad q_c = \alpha_c (\theta - \theta_a),$$

unde: α_c = transmisivitatea termică prin convecție $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$;

θ = temperatura suprafeței care cedează căldura $[\text{K}]$;

θ_a = temperatura fluidului de răcire $[\text{K}]$.

Energia termică transmisă prin convecție la temperatură constantă este:

$$(5.30) \quad Q_c = \alpha_c S (\theta - \theta_a) t,$$

unde: S = suprafața de cedare a căldurii [m^2];
 t = durata transmisiei [s].

Transmisia combinată a căldurii

În funcționarea echipamentelor electrice, transmisia căldurii are loc combinat, atât prin radiație cât și prin convecție, astfel încât, pentru densitatea totală a fluxului termic, se poate scrie:

$$(5.31) \quad q_t = q_r + q_c \Rightarrow q_t = \alpha_t (\theta - \theta_a)$$

unde: $\alpha_t = \alpha_r + \alpha_c$ = transmisivitatea termică globală [$W/m^2 \cdot K$];
 θ = temperatura corpului cald;
 θ_a = temperatura mediului ambiant.

Fluxurile termice dP sau P , disipate prin suprafețele dS , respectiv S sunt:

$$(5.32) \quad \begin{aligned} dP &= \alpha_t (\theta - \theta_a) dS \\ P &= \alpha_t S (\theta - \theta_a) \end{aligned}$$

$\Rightarrow$ stabilirea dependenței dintre valorile temperaturii și ale gradientului de temperatură de pe suprafața exterioară a unui corp:

$$(5.33) \quad -\lambda(n) \frac{d\theta}{dn} \Big|_S = \alpha_t (\theta - \theta_a) \Big|_S$$

unde: $\lambda(n)$ [$W/m \cdot K$] = conductivitatea termică a corpului cald, considerată după direcția normală la suprafața S .

5.3. Ecuația generală a solicitărilor termice

Pentru determinarea ecuației generale a solicitărilor termice ale căilor conductoare, se consideră o porțiune dintr-un conductor omogen (figura 5.3), parcursă de un curent de intensitate i , și aflat într-un fluid de răcire având temperatura θ_a .

La nivelul volumului elementar $dV_x = s_x \cdot dx$, ecuația de bilanț termic este:

$$(5.34) \quad dP_p = dP_V + dP_\lambda + dP_\alpha$$

în care:

➤ dP_p = fluxul termic produs de sursele interne de căldură:

$$(5.35) \quad dP_p = p(x, t) dV_x = p(x, t) s_x dx$$

unde: $p(x, t)$ = pierderile specifice de putere în conductor, calculate la nivelul volumului dV_x .

➤ dP_V = fluxul termic corespunzător căldurii acumulate în volumul conductorului, care produce variația temperaturii în timp:

$$(5.36) \quad dP_V = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} dV_x = \gamma c s_x \frac{\partial \theta}{\partial t} dx$$

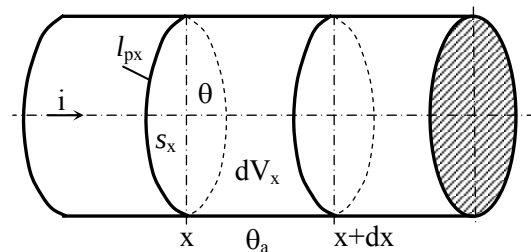


Fig. 5.3. Solicitarea termică a conductorului omogen.

unde: $c[\text{W}\cdot\text{s}/\text{kg}\cdot\text{K}]$ = căldura specifică;
 $\gamma[\text{kg}/\text{m}^3]$ = densitatea materialului conductor.

➤ dP_λ = fluxul termic de transmisie prin conducție a căldurii în lungul căii conductoare:

$$(5.37) \quad dP_\lambda = -\text{div}(\lambda \text{grad}\theta) dV_x = -\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} s_x dx,$$

unde: $\lambda[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ = conductivitatea termică a materialului conductor.

➤ dP_α = fluxul termic de cedare a căldurii spre mediu ambiant, prin suprafața laterală a volumului dV_x :

$$(5.37) \quad dP_\alpha = \alpha_t(x,t)(\theta - \theta_a) l_{px} dx$$

unde: $\alpha_t(x,t) [\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$ = transmisivitatea termică globală;
 $l_{px}[\text{m}]$ = perimetrul corespunzător suprafeței s_x a secțiunii transversale.

Astfel, ecuația **generală a solicitărilor termice** ale căilor de curent devine:

$$(5.38) \quad p(x,t) = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \alpha_t(x,t) \frac{l_{px}}{s_x} (\theta - \theta_a),$$

în care funcția necunoscută este temperatura $\theta(x,t)$.

Pentru o porțiune omogenă a unei căi conductoare, având secțiunea s și perimetrul l_p constante pe toată lungimea ei, ecuația (5.38) devine:

$$(5.39) \quad p(x,t) = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \alpha_t(x,t) \frac{l_p}{s} (\theta - \theta_a),$$

ținând cont că $\theta = \mathcal{G} + \theta_a$, rezultă:

$$(5.40) \quad p(x,t) = \gamma c \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial x^2} + \alpha_t(x,t) \mathcal{G} \frac{l_p}{s},$$

unde: $\mathcal{G}(x,t)$ = supratemperatura căii conductoare.

Ecuația (5.40) descrie procesele termice produse prin efect electrocaloric, într-un conductor omogen, cu suprafața secțiunii transversale constante, iar transmisia termică are loc prin conducție, convecție și radiație.

Cursul nr. 6

Solicitări termice – partea a II-a

6.1. Regimurile termice tranzitorii ale căilor de curent

Regimul tranzitoriu de încălzire a unei căi de curent prin transformarea Joule-Lentz reprezintă efectul modificărilor care survin, de obicei prin salt, în valorile intensității curentului care traversează conductorul. Regimurile termice tranzitorii se produc atât în timpul regimurilor normale de funcționare a instalațiilor, când acestea sunt supuse unor solicitări termice de lungă durată (continue sau intermitente), cât și pe duratele regimurilor anormale (de scurtcircuit), când solicitarea termică este de scurtă durată.

6.1.1. Regimurile tranzitorii în solicitarea termică de lungă durată

Ipoteze simplificatoare:

- calea de curent este omogenă;
- transmisivitatea termică globală $\alpha_t(x,t) = \alpha_t = \text{constantă}$ cu temperatura;
- căldura specifică c , este constantă cu temperatura;
- variația temperaturii în lungul conductorului este nulă, adică $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0$;
- temperatura mediului ambiant este constantă, $\theta_a = \text{const.}$

Ecuția generală a solicitărilor termice: $p(x,t) = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \alpha_t(x,t) \theta \frac{l_p}{s}$, devine:

$$(6.1) \quad \begin{cases} \rho_0 J^2 [1 + \alpha_R (\theta + \theta_a)] = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha_t \theta \frac{l_p}{s} \\ \theta(0) = \theta_0 \end{cases}$$

unde: ρ_0, γ = rezistivitatea, densitatea materialului conductor la 0°C;

α_R = coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura;

J = densitatea de curent;

c = căldura specifică;

l_p = lungimea perimetrului secțiunii transversale s ;

$\theta(t)$ = supratemperatura căii de curent.

Înmulțind cu s relația 6.1, și rearanjând-o, obținem:

$$(6.2) \quad \rho_0 J^2 s (1 + \alpha_R \theta_a) + (\rho_0 J^2 s \alpha_R - \alpha_t l_p) \theta = \gamma c s \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

dacă notăm:

$$\theta_p = \frac{\rho_0 J^2 s (1 + \alpha_R \theta_a)}{\alpha_t l_p - \rho_0 J^2 s \alpha_R} - \text{supratemperatura de regim permanent;}$$

$$T = \frac{\gamma c s}{\alpha_t l_p - \rho_0 J^2 s \alpha_R} - \text{constanta de timp termică a căii de curent.}$$

Sistemul de ecuații (6.1) devine:

$$(6.3) \quad \begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta_p - \theta}{T} \\ \theta(0) = \theta_0 \end{cases}$$

în regim critic, $T \rightarrow \infty, \Rightarrow \alpha_t l_p - \rho_0 J^2 s \alpha_R = 0$ și obținem valoarea critică a densității de curent, J_{cr} :

$$(6.4) \quad J = J_{cr} = \sqrt{\frac{\alpha_t l_p}{\rho_0 s \alpha_R}},$$

pentru care, ecuația sollicitării termice, (6.2), devine:

$$(6.5) \quad \begin{cases} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\rho_0 J_{cr}^2 (1 + \alpha_R \theta_a)}{\gamma c} \\ \vartheta(0) = \vartheta_0 \end{cases}, \text{ care admite soluția:}$$

$$(6.6) \quad \vartheta(t) = \frac{\rho_0 J_{cr}^2 (1 + \alpha_R \theta_a)}{\gamma c} t + \vartheta_0$$

dacă $J \neq J_{cr}$, ecuația sollicitării termice admite soluția:

$$(6.7) \quad \boxed{\vartheta(t) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T}}} \quad \text{— ecuația încălzirii.}$$

Dacă l este lungimea căii conductoare, și se ține seama de:

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}, \quad R_a = R_0 (1 + \alpha_R \theta_a), \quad I = JS, \\ m = \gamma l S, \quad S = l \cdot l_p$$

unde: $R_0 [\Omega]$ = rezistența căii conductoare la 0°C ;

$R_a [\Omega]$ = rezistența căii conductoare la temperatura θ_a ;

$I [\text{A}]$ = intensitatea curentului (valoare efectivă);

$m [\text{kg}]$ = masa conductorului;

$S [\text{m}^2]$ = suprafața de cedare a căldurii.

Supratemperatura de regim permanent ϑ_p și constanta de timp termică T , devin:

$$(6.8) \quad \begin{aligned} \vartheta_p &= \frac{R_a I^2}{\alpha_t S - R_0 I^2 \alpha_R}, \text{ utilă în calcule preliminare.} \\ T &= \frac{mc}{\alpha_t S - R_0 I^2 \alpha_R} \end{aligned}$$

Dacă se consideră $\alpha_R = 0$ (rezistivitatea nu variază cu temperatura), atunci, constantele devin:

$$\begin{cases} \vartheta_p \cong \frac{R_a I^2}{\alpha_t S}, \\ T \cong \frac{mc}{\alpha_t S} \end{cases}$$

În figura 6.2 este reprezentată curba de încălzire a unei căi conductoare, pentru $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$. Constanta de timp termică reprezintă intervalul de timp măsurat de la începutul regimului tranzitoriu de încălzire, pentru care se verifică relația:

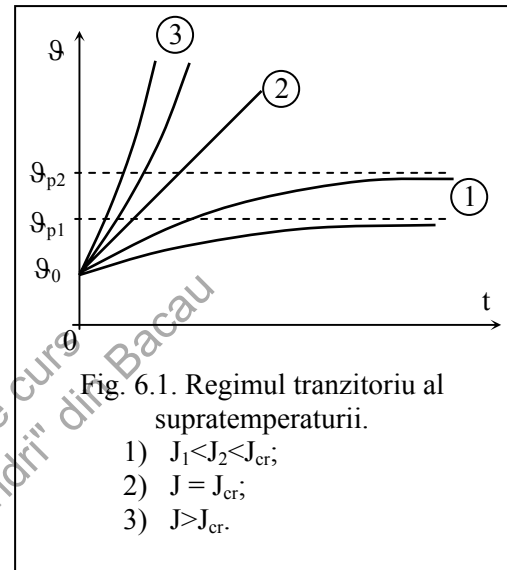


Fig. 6.1. Regimul tranzitoriu al supratemperaturii.

- 1) $J_1 < J_2 < J_{cr}$;
- 2) $J = J_{cr}$;
- 3) $J > J_{cr}$.

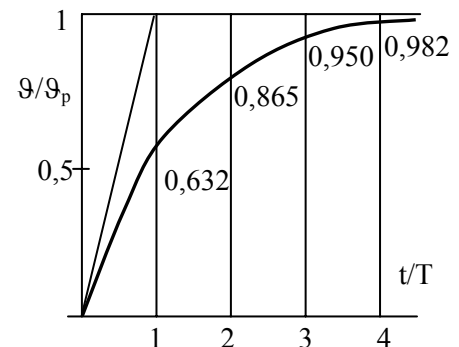


Fig.6.2: Temperatura de regim permanent și constanta de timp.

$$(6.9) \quad \mathcal{G}(T) = 0,632 \cdot \mathcal{G}_p, \quad \mathcal{G}_0 = 0.$$

Ecuția regimului tranzitoriu de răcire a unei căi conductoare se obține, din (6.3), impunând condiția $J = 0$, ceea ce implică $\mathcal{G}_{pr} = 0$, deci ecuația de răcire devine:

$$(6.10) \quad \frac{d\mathcal{G}}{dt} = -\frac{\mathcal{G}}{T}, \quad \mathcal{G}(0) = \mathcal{G}_p, \text{ și admite soluția:}$$

$$(6.11) \quad \boxed{\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_p e^{-\frac{t}{T}}} \text{ — ecuația răcirii.}$$

6.2. Stabilitatea termică a echipamentelor electrice

Noțiunea de stabilitate termică se definește în legătură cu regimul tranzitoriu de încălzire a căilor conductoare, corespunzător solicitărilor termice de scurtă durată, produse sub acțiunea curenților de scurtcircuit.

Stabilitatea termică a echipamentelor electrice reprezintă capacitatea de a suporta, pe durate limitate și fără deteriorări vizibile, solicitarea termică produsă de curenții de scurtcircuit.

6.2.1. Calculul procesului de scurtcircuit trifazat

Acesta este necesar pentru verificarea stabilității termice și electrodinamice a echipamentelor electrice de comutație. În cazul unui scurtcircuit simetric depărtat, ponderea impedanțelor interne ale generatoarelor sincrone în limitarea intensității curentului de scurtcircuit poate fi neglijată.

Ecuția de regim tranzitoriu a circuitului echivalent (fig 6.3):

$$(6.12) \quad \begin{cases} \sqrt{2}E \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di_k}{dt} + Ri_k \\ i_k(0) = 0 \end{cases} \text{ și admite soluția:}$$

$$(6.13) \quad i_k(t) = \sqrt{2}I_k \left[\sin(\omega t + \varphi - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \varphi_k) \right]$$

$$\text{unde: } I_k = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad \varphi_k = \arctg \frac{\omega L}{R}, \quad T = \frac{L}{R}$$

dacă notăm: $\varphi_0 = \varphi_k - \varphi$,

φ_0 = unghi de conectare, ecuația curentului de scurtcircuit devine:

$$(6.14) \quad i_k(t) = \sqrt{2}I_k \left[\sin(\omega t - \varphi_0) + e^{-\frac{t}{T}} \sin \varphi_0 \right] = i_{kp}(t) + i_{ka}(t)$$

unde: $i_{kp}(t) = \sqrt{2}I_k \sin(\omega t - \varphi_0)$ = componenta periodică a curentului de scurtcircuit;

$i_{ka}(t) = \sqrt{2}I_k e^{-\frac{t}{T}} \sin \varphi_0$ = componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit;

I_k = valoarea efectivă a intensității curentului de scurtcircuit permanent.

Dacă:

$\varphi_0 = 0$, sau $\varphi_0 = \pi \Rightarrow i_k(t)$ este simetric;

$\varphi_0 = \pi/2$, sau $\varphi_0 = 3\pi/2 \Rightarrow i_k(t)$ este asimetric.

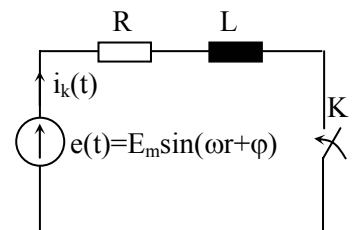


Fig. 6.3: Schema electrică echivalentă.

Pentru $\varphi_0 = (2n+1)\pi/2 \Rightarrow$

$$(6.15) \quad i_k(t) = (-1)^{n+1} \sqrt{2} I_k \left(\cos \omega t - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad n = 0, 1, \dots$$

pentru $\omega t = \pi$, se obține valoarea de vârf maximă a intensității curentului de scurtcircuit:

$$(6.16) \quad i_s = \sqrt{2} K_s I_k = \text{curent de șoc sau de lovitură};$$

unde: $K_s = 1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T}}$, $1 < K_s < 2$ este factorul de șoc.

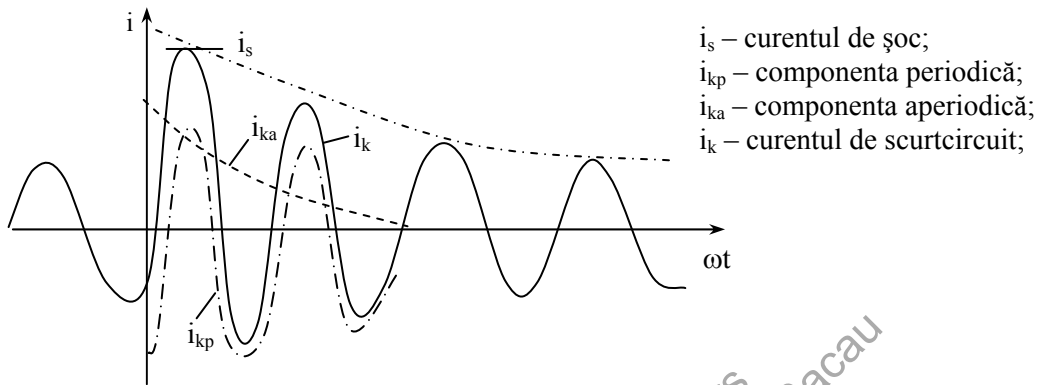


Fig. 6.4: Regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit.

În cazul scurtcircuitului apropiat, ponderea în limitarea intensității curentului o are impedanța internă a generatorului sincron. În acest caz valorile de vârf ale componentei periodice nu mai sunt constante, ci amortizate cu două constante de timp, corespunzătoare regimurilor subtranzitoriu, respectiv tranzitoriu.

Curentul de șoc este dat de relația:

$$(6.17) \quad i_s = \sqrt{2} K_s I_k''$$

unde: $I_k'' > I_k$ = valoarea efectivă a intensității curentului de scurtcircuit simetric inițial apropiat.

6.2.2. Regimul termic tranzitoriu de scurtă durată sub acțiunea curenților de scurtcircuit

Se consideră că procesul termic este adiabatic, deci fără schimb de căldură cu mediul ambiant, $\Rightarrow$ ecuația solicitărilor termice devine:

$$(6.18) \quad p = \gamma c \frac{d\theta}{dt}$$

Rezistivitatea, ρ , și căldura specifică, c , a materialului conductor se consideră variabile cu temperatura:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_R \theta) \text{ și } c = c_0 (1 + \beta \theta)$$

$$\text{dar } p = \rho J_k^2 = \rho_0 (1 + \alpha_R \theta) \frac{i_k^2}{s^2} = \gamma c_0 (1 + \beta \theta) \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow$$

$$i_k^2 dt = \frac{\gamma c_0 s^2 (1 + \beta \theta)}{\rho_0 (1 + \alpha_R \theta)} d\theta \quad \text{integrăm pe intervalul } [0, t_k],$$

t_k fiind durată reală a procesului de scurtcircuit, rezultă:

$$(6.19) \quad \int_0^{t_k} i_k^2 dt = \frac{\gamma C_0 S^2}{\rho_0} \int_{\theta_i}^{\theta_k} \frac{(1 + \beta \theta)}{(1 + \alpha_R \theta)} d\theta$$

unde: $\theta_i = \theta_{ad}$ – temperatura admisibilă în regim permanent;

$\theta_k = \theta_{kad}$ – temperatura admisibilă în regim de scurtcircuit.

$$(6.20) \quad \sigma(t_k) = \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt - \text{solicitarea termică la scurtcircuit};$$

$$(6.21) \quad R(\theta_i, \theta_k) = \frac{\gamma C_0 S^2}{\rho_0} \int_{\theta_i}^{\theta_k} \frac{(1 + \beta \theta)}{(1 + \alpha_R \theta)} d\theta - \text{rigiditatea termică la scurtcircuit.}$$

Asigurarea stabilității termice la scurtcircuit a echipamentelor electrice impune ca valoarea finală, θ_k , a temperaturii atinse de căile conductoare în momentul t_k al întreruperii curentului de scurtcircuit, să nu depășească valoarea admisibilă, θ_{kad} , precizată în norme.

Valoarea admisibilă a solicitării termice la scurtcircuit, σ_{ad} , poate fi calculată pentru $\theta_i = \theta_{ad}$ și $\theta_k = \theta_{kad}$, cu $\theta_{ad} < \theta_{kad}$:

$$(6.22) \quad \sigma_{ad} = s^2 R(\theta_{ad}, \theta_{kad})$$

Pentru verificarea stabilității termice la scurtcircuit este necesar calculul solicitării termice la scurtcircuit, $\sigma(t_k)$, care se efectuează cu ajutorul metodei curentului echivalent. Conform acesteia, se consideră că solicitarea termică la scurtcircuit este produsă sub acțiunea unui curent echivalent de intensitate constantă, care acționează pe durata t_{ke} , $t_{ke} = 1$ sec.

$$(6.23) \quad \sigma(t_k) = I_{ke}^2 t_{ke}$$

Aceeași valoare a solicitării termice la scurtcircuit se poate obține sub acțiunea unor curenți de intensități diferite, $I_1 \neq I_2$, care acționează pe durate diferite, $t_1 \neq t_2$, impunând condiția:

$$\sigma(t_1) = \sigma(t_2) = I_1^2 t_1 = I_2^2 t_2 \Rightarrow \text{relațiile de echivalență: } I_2 = I_1 \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}, \quad t_2 = t_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2$$

Solicitarea termică la scurtcircuit se consideră de forma:

$$(6.24) \quad \sigma(t_k) = \sigma_a(t_k) + \sigma_p(t_k)$$

unde: $\sigma_a(t_k) = m I_k''^2 t_k$ = componenta aperiodică;

$$\sigma_p(t_k) = n I_k''^2 t_k = \text{componenta periodică};$$

m și n sunt coeficienți de corecție dependenți de parametrii curentului de scurtcircuit, și se determină din curbele $m(K_s, t_k)$, $n(I_k''/I_k, t_k)$, figura 6.5.

Intensitatea curentului de scurtcircuit echivalent este:

$$(6.25) \quad I_{ke} = I_k'' \sqrt{(m+n) \frac{t_k}{t_{ke}}},$$

unde: I_k'' = intensitatea curentului de scurtcircuit simetric inițial apropiat
 t_k = durata reală a scurtcircuitului.

Stabilitatea termică a unui echipament electric este asigurată dacă este satisfăcută inegalitatea:

$$(6.26) \quad \sigma(t_k) \leq \sigma_{ad}$$

Pentru unele echipamente electrice, solicitarea termică admisibilă la scurtcircuit, σ_{ad} , se poate calcula cu ajutorul unei relații de forma: $\sigma(t_k) = I_{ke}^2 t_{ke}$; astfel pentru întrerupătoare de înaltă tensiune se consideră:

$$(6.27) \quad \sigma_{ad} = I_{pr}^2 t$$

unde: I_{pr} = capacitatea de deconectare la scurtcircuit;
 t = durata admisibilă de menținere a curentului I_{pr} ,
sunt parametri nominali.

Astfel, relația de verificare devine:

$$(6.28) \quad I_{ke}^2 t_{ke} \leq I_{pr}^2 t$$

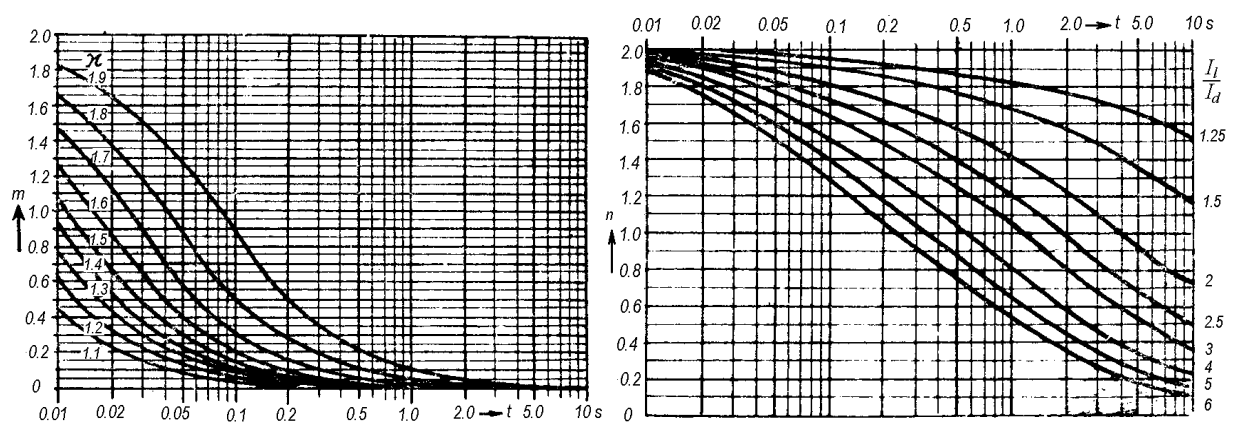


Fig. 6.5. Coeficienții de corecție m și n .

Cursul nr. 7

Solicitări termice – partea a III-a

7.1. Regimul intermitent de încălzire al conductoarelor

Regimul termic periodic intermitent, având perioada T_i , se obține ca urmare a unei circulații periodic-intermitente a curentului.

$$(7.1) \quad T_i = t_c + t_p - \text{perioada regimului intermitent};$$

t_c – durata de conducție, în care $i = I_c = \text{const} > 0$;

t_p – durata de pauza, în care $i = 0$.

Regimul periodic intermitent de încălzire se stabilește dacă pe duratele t_p , supratemperatura conductorului nu se anulează, iar perioada T_i a ciclurilor îndeplinește condiția:

$$T_i \leq 600 \text{ [s]}$$

Se definește parametrul: *durata relativă de conectare*, exprimată procentual, astfel:

$$(7.2) \quad DC = \frac{t_c}{T_i}, \quad DC\% = \frac{t_c}{T_i} \cdot 100,$$

cu valorile standardizate: $D_c = 10\%, 25\%, 40\%, 60\%, 100\%$.

Regimul termic intermitent este constituit dintr-o succesiune de încălziri și răcirii (figura 7.1), din ale căror ecuații calculăm supratemperatura în regim intermitent.

Supratemperatura la încălzire: $\vartheta(t) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T}};$

Supratemperatura la răcire: $\vartheta(t) = \vartheta_p e^{-\frac{t}{T}}$

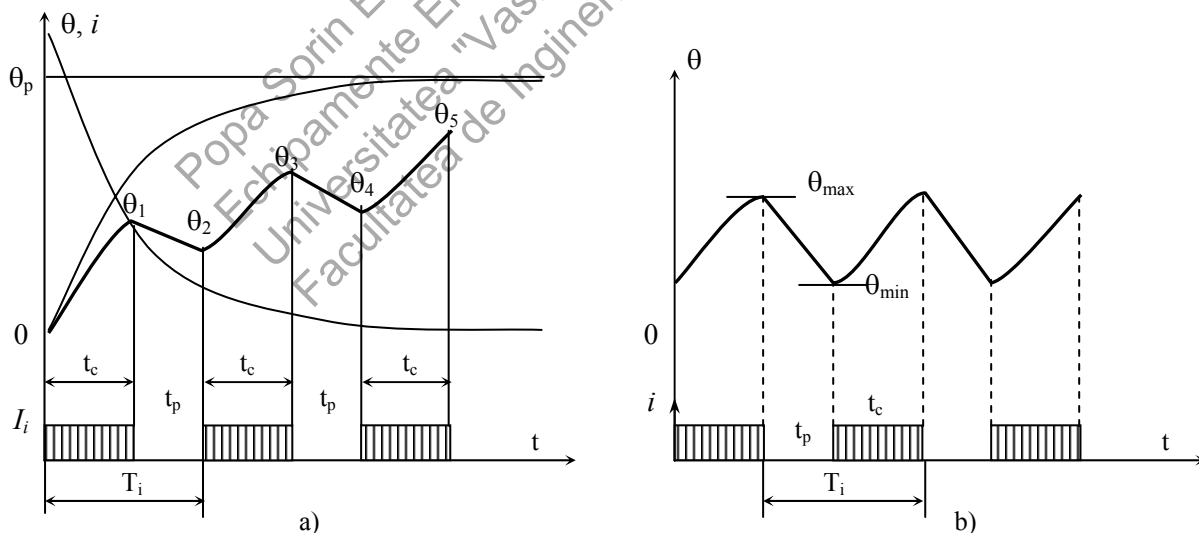


Fig. 7.1: Curentul și temperatura în cazul solicitării termice periodic intermitente:
a) regimul tranzitoriu; b) regimul cvasi-permanent.

În regim periodic intermitent avem:

$$(7.3) \quad \begin{cases} \vartheta(t) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{t-nT_i}{T}} \right) + \vartheta(nT_i) e^{-\frac{t-nT_i}{T}}, & n \in [nT_i, nT_i + t_c] \\ \vartheta(t) = \vartheta(nT_i + t_c) e^{-\frac{t-nT_i-t_c}{T}}, & n \in [nT_i + t_c, (n+1)T_i] \end{cases}, n = 0, 1, 2, \dots$$

unde: supratemperatura de regim permanent $\vartheta_p \cong \frac{R_a I_i^2}{\alpha_t S}$, iar constanta de timp termică $T \cong \frac{mc}{\alpha_t S}$

Aplicând din aproape în aproape relațiile (7.3), pentru valorile minime, respectiv maxime ale supratemperaturii de regim tranzitoriu, se obțin expresiile:

$$(7.4) \quad \begin{cases} \vartheta(nT_i) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{nT_i}{T}} \right) \left(\frac{e^{\frac{t_p}{T}} - e^{-\frac{T_i}{T}}}{1 - e^{-\frac{T_i}{T}}} \right) + \vartheta_0 e^{-\frac{nT_i}{T}}, \\ \vartheta(nT_i + t_c) = \vartheta_p \left(1 - e^{-\frac{(n+1)T_i}{T}} \right) \left(\frac{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}}{1 - e^{-\frac{T_i}{T}}} \right) + \vartheta_0 e^{-\frac{nT_i + t_c}{T}} \end{cases}$$

trecând la limită cele două relații se obține:

$$(7.5) \quad \begin{cases} \vartheta_{\min} = \lim_{n \rightarrow \infty} \vartheta(nT_i) = \vartheta_p(I_i) \frac{e^{\frac{t_p}{T}} - e^{-\frac{T_i}{T}}}{1 - e^{-\frac{T_i}{T}}}, \\ \vartheta_{\max} = \lim_{n \rightarrow \infty} \vartheta(nT_i + t_c) = \vartheta_p(I_i) \frac{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}}{1 - e^{-\frac{T_i}{T}}} \end{cases}$$

Relația (7.5₂) evidențiază faptul că supratemperatura maximă $\vartheta_{\max}$, corespunzătoare regimului intermitent cvasipermanent, este mai mică în valoare decât supratemperatura $\vartheta_p(I_i)$ – supratemperatura de regim permanent, corespunzătoare curentului de intensitate I_i .

Se definește factorul de supraîncărcare pentru temperatură, k_θ :

$$(7.6) \quad k_\theta = \frac{\vartheta_p(I_i)}{\vartheta_{\max}(I_i)} = \frac{1 - e^{-\frac{T_i}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}} > 1$$

în ipoteza $T \gg T_i$, prin aproximare $\Rightarrow k_\theta = \frac{1}{DC}$

în condiția în care $\vartheta_p(I) = \vartheta_{\max}(I_i)$, conductorul este supraîncărcat în curent la funcționarea în regim intermitent.

$$(7.7) \quad \vartheta_p(I) = \frac{R_a I^2}{\alpha_t S} = \frac{\vartheta_p(I_i)}{k_\theta} = \frac{R_a I_i^2}{\alpha_t S k_\theta} \Rightarrow \boxed{I_i = k_i I},$$

unde: $k_i = \sqrt{k_\theta} = \frac{1}{\sqrt{DC}} > 1$ reprezintă factorul de încărcare în curent.

Intensitatea I_{iad} a curentului admisibil pentru funcționarea unei căi de curent în regim intermitent, se determină din condiția:

$\vartheta_{\max}(I_{iad}) = \theta_{ad} - \theta_a$, care ne conduce la relația:

$$(7.8) \quad I_{iad} = \sqrt{\frac{\alpha_t S k_\theta (\theta_{ad} - \theta_a)}{R_a}} = \sqrt{\frac{\alpha I_p s (\theta_{ad} - \theta_a)}{DC \cdot \rho_0 (1 + \alpha_R \theta_a)}}$$

7.2. Regimul permanent de încălzire al conductoarelor

Este caracterizat prin valori invariabile în timp a supratemperaturii, adică $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$.

Ecuția generală a transmisiei termice prin conducție devine:

$$(7.9) \quad p + \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = 0,$$

iar ecuația generală a solicitărilor termice a căilor conductoare are expresia:

$$(7.10) \quad p = -\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \alpha_t \frac{l_p}{s} (\theta - \theta_a)$$

unde: p = pierderile specifice de putere prin efect electrocaloric;

λ [W/m·K] = conductivitatea termică;

α_t [W/m²·K] = transmisivitatea termică globală;

θ, θ_a [°C] = temperatura căii de curent, respectiv a mediului ambiant;

l_p, s [m, m²] = perimetrul respectiv suprafața secțiunii transversale a conductorului.

7.2.1. Regimul permanent de încălzire al conductoarelor, fără flux termic axial egalizator

Fluxul termic axial egalizator poate fi neglijat dacă lungimea conductorului este suficient de mare sau dacă acesta este izolat termic la capete foarte bine. În aceste condiții, temperatura în

lungul conductorului este constantă, adică: $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow$ ecuația solicitărilor termice este:

$$(7.11) \quad p = \alpha_t \frac{l_p}{s} (\theta - \theta_a)$$

CONCLUZIE:

În regim permanent căldura degajată prin efect electrocaloric într-un conductor, fără flux termic axial egalizator, este cedată integral mediului ambiant.

Pierderile specifice p , în volumul conductorului se pot calcula cu relația:

$$(7.12) \quad p = K_p \rho_0 (1 + \alpha_R \theta) \frac{I^2}{s^2} \quad \text{sau,} \quad p = K_p \cdot \rho \cdot J^2.$$

unde: K_p este coeficientul pierderilor suplimentare $K_p = \begin{cases} 1 & \text{în curent continuu} \\ 1 \dots 1,8 & \text{în curent alternativ} \end{cases}$,

ecuația de bilanț termic (7.11) devine:

$$(7.13) \quad K_p \rho_0 I^2 (1 + \alpha_R \theta) = \alpha_t l_p s (\theta - \theta_a) \Rightarrow \theta = \frac{K_p \rho_0 I^2 + \alpha_t l_p s \theta_a}{\alpha_t l_p s - K_p \rho_0 \alpha_R I^2}$$

în condițiile în care $I = I_s$ – curentul de sarcină, $\theta = \theta_p$ – temperatura în regim permanent este:

$$(7.14) \quad \theta_p = \frac{K_p \rho_0 I^2 + \alpha_t l_p s \theta_a}{\alpha_t l_p s - K_p \rho_0 \alpha_R I_s^2}$$

în ipoteza $\theta_p = \theta_{ad}$, rezultă curentul admisibil I_{ad} :

$$(7.15) \quad I_{ad} = \sqrt{\frac{\alpha_t l_p s (\theta_{ad} - \theta_a)}{K_p \rho_0 (1 + \alpha_R \theta_{ad})}}$$

Ecuția de bilanț (7.13) ne permite, de asemenea, calculul dimensiunilor (de gabarit a) suprafeței secțiunii transversale a căii conductoare, pentru valori date ale curentului de sarcină I_s , respectiv ale temperaturii de regim permanent $\theta_p < \theta_a$.

Exemplu 1: Cale de curent circulară, de diametru d_c .

$$s = \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad l_p = \pi d_c \quad (\text{I și } \theta_p \text{ sunt cunoscute, iar } d_c \text{ este necunoscut})$$

$$K_p \rho_0 I^2 (1 + \alpha_R \theta_p) = \alpha_t \frac{\pi^2}{4} d_c^3 (\theta_p - \theta_a) \Rightarrow d_c = \sqrt[3]{\frac{4 K_p \rho_0 I^2 (1 + \alpha_R \theta_p)}{\alpha_t \pi^2 (\theta_p - \theta_a)}}$$

Exemplu 2: Cale de curent dreptunghiulară, cu raportul laturilor: $\frac{a}{b} = n$:

$$s = ab = nb^2, \quad l_p = 2(a+b) = 2b(n+1)$$

$$K_p \rho_0 I^2 (1 + \alpha_R \theta_p) = \alpha_t 2n(n+1)b^3 (\theta_p - \theta_a) \Rightarrow b = \sqrt[3]{\frac{K_p \rho_0 I^2 (1 + \alpha_R \theta_p)}{2n(n+1)\alpha_t (\theta_p - \theta_a)}}$$

Exemplu 3: Cale de curent izolată, de secțiune circulară.

În acest caz se utilizează expresia legii lui Fourier: $q = -\lambda \frac{d\theta}{dr}$

unde: q = densitatea de flux termic

λ = conductivitatea termică a materialului izolanț.

dar $q = \frac{P}{2\pi r}$, P = fluxul termic radial

$\Rightarrow \frac{P}{2\pi\lambda} \frac{dr}{r} = -d\theta$, care prin integrare pe grosimea stratului izolanț, conduce la soluția:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_c - \theta_i = \frac{P}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_i}{d_c} \\ \text{din legea lui Newton: } P = \alpha_t S (\theta - \theta_a), \text{ se poate scrie:} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \theta_c - \theta_a = \frac{P}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_i}{d_c} + \frac{1}{\alpha_t d_i} \right)$$

dar pentru fluxul termic P , considerat pe unitatea de lungime a căii de curent, se stabilește relația:

$$P = p \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad \text{deci rezultă: } \theta_c = \frac{4\rho_0 I^2 K_p R_\theta + \pi d_c^2 \theta_a}{\pi d_c^2 - 4\alpha_R \rho_0 K_p R_\theta I^2},$$

unde s-a notat:

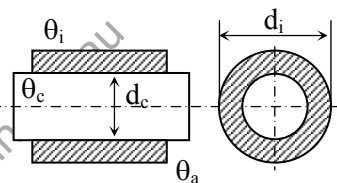
$$R_\theta = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_i}{d_c} + \frac{1}{\pi\alpha_t d_i} = \text{rezistența termică rezultantă,}$$

considerată după direcția razei conductorului.

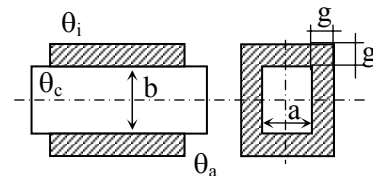
Ultimele două relații permit calculul temperaturii de regim permanent corespunzătoare unei căi de curent izolate, traversate de un curent de sarcină, precum și determinarea intensității curentului admisibil.

Aceleași relații pot fi folosite pentru dimensionarea căii de curent, când se cunosc intensitatea curentului de sarcină și temperatura de regim permanent.

În mod similar se fac calculele și pentru un profil dreptunghiular.



Cale de curent izolată, cu secțiune circulară.



Cale de curent izolată, cu secțiune dreptunghiulară.

7.2.2. Regimul permanent de încălzire al conductoarelor, cu flux termic axial egalizator

În cazul căilor de curent omogene temperatura de regim permanent poate fi considerată constantă pe toată lungimea acestora. Căile de curent neomogene se caracterizează prin valori diferite ale temperaturii de regim permanent, în lungul axei existând fluxuri termice axiale, notate în figura 7.2 cu P_x , care conduc la egalizarea temperaturii.

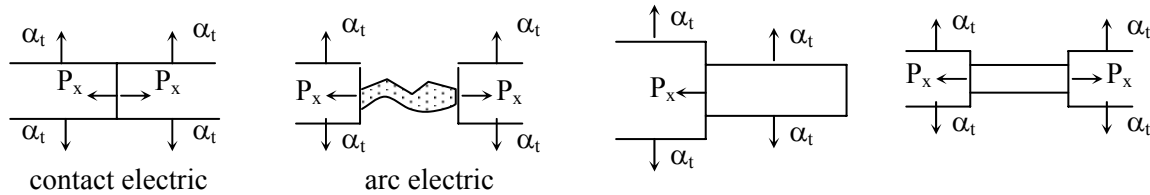


Fig. 7.2. Încălzirea căilor de curent cu flux termic axial, căi de curent neomogene.

Pentru determinarea temperaturii de-a lungul unei căi de curent neomogene, pentru o porțiune oarecare, n , ecuația solicitărilor termice este:

$$(7.16) \quad p_n = -\lambda_n \frac{d^2 \theta_n}{dx^2} + \alpha_{pn} \frac{l_{pn}}{s_n} (\theta_n - \theta_{an})$$

Pierderile specifice p_n se consideră constante, luându-se în calcul printr-o valoare medie, dată de relația:

$$p_n = \rho_n J_n^2 = \rho_{0n} (1 + \alpha_{Rn} \theta_{nmed}) J_n^2$$

vom obține:

$$\rho_{0n} (1 + \alpha_{Rn} \theta_{nmed}) J_n^2 = -\lambda_n \frac{d^2 \theta_n}{dx^2} + \alpha_{pn} \frac{l_{pn}}{s_n} (\theta_n - \theta_{an})$$

Ordonând această relație vom obține ecuația diferențială de ordinul 2 de forma:

$$\frac{d^2 \theta_n}{dx^2} + \theta_n \left(\frac{\rho_{0n} \alpha_{Rn} J_n^2 s_n - \alpha_{pn} l_{pn}}{\lambda_n s_n} \right) + \frac{\rho_{0n} J_n^2 s_n + \alpha_{pn} l_{pn} \theta_{an}}{\lambda_n s_n} = 0$$

notăm:

$$(7.17) \quad a = \sqrt{\frac{\alpha_{pn} l_{pn} - \rho_{0n} \alpha_{Rn} J_n^2 s_n}{\lambda_n s_n}}, \quad b = \sqrt{\frac{\rho_{0n} J_n^2 s_n + \alpha_{pn} l_{pn} \theta_{an}}{\lambda_n s_n}}$$

și se obține:

$$(7.18) \quad \frac{d^2 \theta}{dx^2} - a^2 \theta + b^2 = 0, \text{ ecuație diferențială ce are soluția:}$$

$$(7.19) \quad \theta_n(x) = A_n \cdot e^{a_n x} + B \cdot e^{-a_n x} + \theta_{pn}$$

unde:

$$(7.20) \quad \theta_{pn} = \frac{b_n^2}{a_n^2};$$

A_n, B_n = constante care se determină din condițiile de frontieră.

Exemplul 1: Conductor cu două zone neomogene

Pentru calea de curent cu două zone din figura 7.3 se pot scrie două ecuații particulare a soluției generale (7.19), și anume:

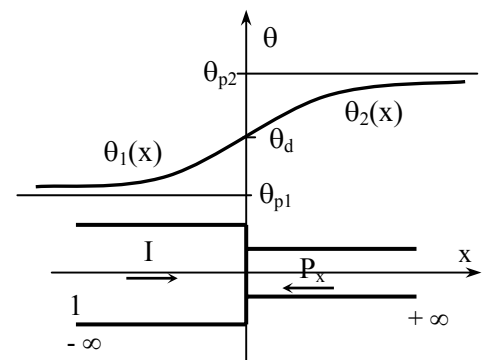


Fig. 7.3. Conductor cu două zone neomogene.

$$(7.21) \quad \begin{cases} \theta_1(x) = A_1 \cdot e^{a_1 x} + B_1 \cdot e^{-a_1 x} + \theta_{p1} \\ \theta_2(x) = A_2 \cdot e^{a_2 x} + B_2 \cdot e^{-a_2 x} + \theta_{p2} \end{cases}$$

Constantele A_1, A_2, B_1, B_2 se determină punând condițiile de frontieră, considerate sub forma:

$$\begin{aligned} \theta_1(-\infty) = \theta_{p1}; \quad \left. \frac{d\theta_1}{dx} \right|_{x=-\infty} = 0; \quad \theta_1(0) = \theta_2(0) = \theta_d \\ \theta_2(+\infty) = \theta_{p2}; \quad \left. \frac{d\theta_2}{dx} \right|_{x=+\infty} = 0; \quad \left. \frac{d\theta_1}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\theta_2}{dx} \right|_{x=0} = 0; \end{aligned}$$

Din condițiile de frontieră rezultă:

$$(7.22) \quad \begin{cases} A_1 = \theta_d - \theta_{p1} \\ B_1 = 0 \\ A_2 = 0 \\ B_2 = \theta_d - \theta_{p2} \end{cases}, \quad \theta_d = \frac{a_1 \theta_{p1} + a_2 \theta_{p2}}{a_1 + a_2}$$

unde: a_1, a_2, b_1, b_2 se calculează cu relațiile (7.17), iar θ_p cu relația (7.20).

Exemplul 2: Conductor cu istm.

Pentru calculul temperaturii căii de curent cu istm, prezentată în figura 7.4 se poate proceda la fel.

Corespunzător porțiunilor neomogene 1 și 2, valorile constantelor A_1, A_2, B_1, B_2 se determină cu ajutorul condițiilor de frontieră, puse sub forma:

$$\begin{aligned} \theta_1(0) = \theta_m; \quad \left. \frac{d\theta_1}{dx} \right|_{x=0} = 0; \quad \theta_1(x_0) = \theta_2(x_0) \\ \theta_2(+\infty) = \theta_{p2}; \quad \left. \frac{d\theta_2}{dx} \right|_{x=+\infty} = 0; \quad \left. \frac{d\theta_1}{dx} \right|_{x=x_0} = \left. \frac{d\theta_2}{dx} \right|_{x=x_0} = 0 \end{aligned}$$

Din condițiile de frontieră de mai sus se obține:

$$(7.23) \quad \begin{cases} A_1 = B_1 = \frac{\theta_m - \theta_{p1}}{2} \\ A_2 = 0 \\ B_2 = \frac{a_1}{a_2} (\theta_{p1} - \theta_m) e^{a_2 x_0} sh(a_1 x_0) \end{cases}$$

Introducând valorile (7.23) în ecuația (7.21) rezultă:

$$(7.24) \quad \begin{cases} \theta_1(x) = (\theta_m - \theta_{p1}) ch(a_1 x) + \theta_{p1} \\ \theta_2(x) = \frac{a_1}{a_2} (\theta_{p1} - \theta_m) e^{-a_2(x-x_0)} sh(a_1 x_0) + \theta_{p2} \end{cases}$$

Ecuațiile (7.24) permit evidențierea variației temperaturii în calea de curent prezentată în figura 7.4.

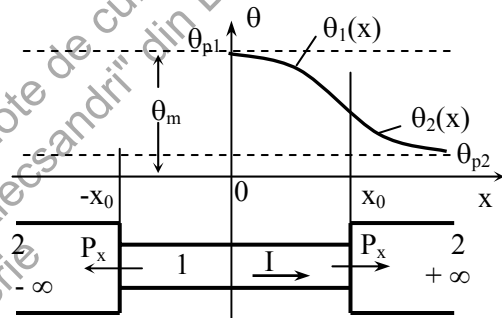


Fig. 7.4. Conductor cu trei zone neomogene (cu istm).

Cursul nr. 8

8.1. Solicitări termice ale bobinelor

Studiul solicitărilor termice în cazul bobinelor se face admițând unele ipoteze simplificatoare.

La *bobinele fără miez feromagnetic*, energia termică se dezvoltă prin efect Joule-Lentz numai în conductoare. Transmisia căldurii se face prin izolație de la strat la strat.

La *bobinele cu miez feromagnetic*, transmisia căldurii are loc după cum urmează:

- la bobinele de c.a., miezul constituie o sursă termică generată de pierderile în fier, deci căldura se cedează în acest caz numai prin suprafețele exterioare. Din acest motiv la bobinele de c.a. se asigură un strat de aer între suprafața laterală interioară și miez.
- bobinele de c.c. nu au surse termice în miezurile feromagnetice, din acest motiv spirele se execută strâns pe miezul feromagnetic.

8.1.1. Bobine fără miez feromagnetic

Pentru determinarea câmpului de temperatură în secțiunea radială a unei bobine cilindrice fără miez feromagnetic se consideră următoarele ipoteze simplificatoare:

- căldura se dezvoltă uniform în întreaga bobină;
- conductivitatea termică λ se consideră constantă, neglijând astfel golurile de aer din bobină;
- cedarea căldurii are loc numai prin suprafețele laterale cilindrice.

Deoarece considerăm că, în acest caz, regimul permanent de încălzire are loc numai pe direcție radială, ecuația generală a transmisiei termice $p = \gamma c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \nabla^2 \theta$ se poate scrie sub forma:

$$(8.1) \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{p}{\lambda} = 0$$

unde: $p = \rho J^2 =$ pierderile specifice,

Trecem ecuația (8.1) în coordonate polare (r, φ) prin schimbarea de variabilă:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad y = r \cdot \sin \varphi$$

ecuația (8.1) devine:

$$(8.2) \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{p}{\lambda} = 0$$

Deoarece transmisia termică este numai radială, $\Rightarrow \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} = 0$, ecuația (8.2) devine:

$$(8.3) \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{p}{\lambda} = 0, \text{ a cărei soluție este:}$$

$$(8.4) \quad \theta(r) = A \ln(r) - \frac{pr^2}{4\lambda} + B$$

Punând condițiile de frontieră: $\theta(r_1) = \theta_1$; $\theta(r_2) = \theta_2$, se obține:

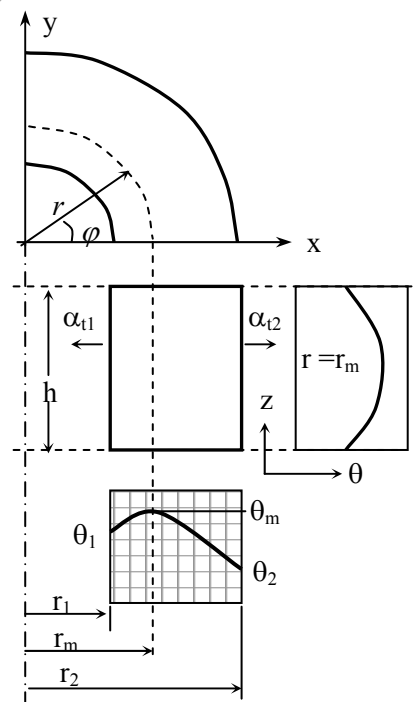


Fig. 8.1. Propagarea căldurii într-o bobină fără miez feromagnetic.

$$(8.5) \quad \begin{cases} \theta_1 = A \ln r_1 - \frac{pr_1^2}{4\lambda} + B \\ \theta_2 = A \ln r_2 - \frac{pr_2^2}{4\lambda} + B \end{cases}, \text{ de unde rezultă următoarele valori pentru } A \text{ și } B:$$

$$(8.6) \quad A = \frac{4\lambda(\theta_1 - \theta_2) + p(r_1^2 - r_2^2)}{4\lambda \ln \frac{r_1}{r_2}}; \quad B = 0,5 \left[\theta_1 + \theta_2 - A \ln(r_1 r_2) + \frac{P}{4\lambda} (r_1^2 + r_2^2) \right]$$

Cunoscând valorile pentru A și B , și cu ecuația (8.4) se poate determina raza r_m la care temperatura atinge valoarea maximă θ_m . Din condiția:

$$(8.7) \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=r_m} = 0,$$

derivând ecuația (8.4) în raport cu r , pentru $r = r_m$, $\Rightarrow A \frac{1}{r_m} + \frac{2pr_m}{4\lambda} = 0$, de unde:

$$(8.8) \quad r_m = \sqrt{\frac{2\lambda A}{p}}$$

Temperatura maximă θ_m va fi:

$$(8.9) \quad \theta_m = A \ln r_m - \frac{pr_m^2}{4\lambda} + B$$

OBSERVAȚIE:

În condiții reale, temperatura de regim permanent este neuniform distribuită și după direcția y a înălțimii bobinei, pentru că cedarea căldurii are loc și pe suprafețele frontale.

8.1.2. Bobine cu miez feromagnetic

Pentru studiul solicitărilor la aceste bobine se consideră următoarele ipoteze simplificatoare:

- se consideră bobina cilindrică cu miez feromagnetic, corp omogen sub raport termic;
- se consideră valoarea medie pentru transmisivitatea termică globală α_t , la suprafața de cedare a căldurii.

Relația de calcul a supratemperaturii medii în acest caz este:

$$(8.10) \quad \mathcal{G}_{med} = \frac{RI^2}{\alpha_t S}$$

unde: R = rezistența bobinei la temperatura de funcționare;

I = intensitatea curentului care parcurge spirele bobinei;

S = suprafața de cedare a căldurii, care se calculează cu relația:

$$(8.11) \quad \begin{cases} S = 2\pi h(r_1 + r_2), & \text{la bobinele de curent continuu} \\ S = 2\pi h r_2, & \text{la bobinele de curent alternativ} \end{cases}$$

h = înălțimea bobinei;

r_1, r_2 = raza interioară, respectiv exterioară.

Rezistența bobinei se calculează cu relația:

$$(8.12) \quad R = \rho \frac{l}{S_c}$$

unde: $\rho = \rho_0 [1 + \alpha_R (\vartheta_{med} + \theta_a)]$ = rezistivitatea la temperatura θ_{med} ;

$l = N \cdot l_{med}$ = lungimea conductorului;

$l_{med} = \frac{2\pi(r_1 + r_2)}{2} = \pi(r_1 + r_2)$ = lungimea medie a unei spire;

$S_c = \frac{\pi d_c^2}{4}$ = secțiunea conductorului.

Înlocuind aceste valori în relația rezistenței obținem:

$$(8.13) \quad R = \rho_0 [1 + \alpha_R (\vartheta_{med} + \theta_a)] \cdot \frac{4N(r_1 + r_2)}{d_c^2}$$

Înlocuind relația (8.13) în relația (8.10) se obține valoarea medie a supratemperaturii:

$$(8.14) \quad \begin{cases} \vartheta_{med} = \frac{2\rho_0(1 + \alpha_R \theta_a) NI^2}{\pi h \alpha_t d_c^2 - 2\rho_0 \alpha_R NI^2}, \text{ pentru bobinele de c.c., și} \\ \vartheta_{med} = \frac{2\rho_0(1 + \alpha_R \theta_a)(r_1 + r_2) NI^2}{\pi h \alpha_t d_c^2 r_2 - 2\rho_0 \alpha_R (r_1 + r_2) NI^2}, \text{ pentru bobinele de c.a.} \end{cases}$$

Valoarea medie a supratemperaturii în volumul unei bobine poate fi determinat experimental, printr-un procedeu bazat pe variația rezistenței acesteia cu temperatura. Astfel, prin măsurarea valorilor R_a , R_p , ale rezistenței bobinei corespunzătoare temperaturii θ_a , a mediului ambiant, și θ_{med} , obținută prin încălzire, se poate scrie:

$$(8.15) \quad R_a = R_0(1 + \alpha_R \theta_a), \quad R_p = R_0(1 + \alpha_R \theta_{med}), \text{ de unde rezultă:}$$

$$(8.16) \quad \vartheta_{med} = \theta_{med} - \theta_a = \frac{(R_p - R_a)(1 + \alpha_R \theta_a)}{R_a \alpha_R}$$

Pentru calculul valorii maxime a supratemperaturii de regim permanent din volumul unei bobine, se pot utiliza relații de verificare pe cale experimentală, cum ar fi:

$$(8.17) \quad \vartheta_m \equiv 2\vartheta_{med} - \vartheta_s$$

unde: ϑ_{med} are expresia (8.16), iar

ϑ_s = valoarea medie a supratemperaturilor de regim permanent, înregistrate pe suprafața de cedare a căldurii.

9. Solicitări electrodinamice ale căilor de curent

O mare parte a solicitărilor mecanice, la care echipamentele electrice sunt supuse în funcționare, se produc sub acțiunea forțelor electrodinamice, puse în evidență ca forțe de interacțiune între căi conductoare parcurse de curenți electrici, înălțuite printr-un câmp magnetic comun. Intensitatea acestor solicitări depinde de configurația geometrică a căilor de curent, de așezarea lor reciprocă și de intensitățile curenților care le parcurg.

9.1. Procedee de calcul a forțelor electrodinamice

Forțele electromagnetice se pot calcula cu ajutorul:

- forței Laplace;
- tensiunilor Maxwelliene;
- teoriei forțelor generalizate în câmp magnetic.

Forța Laplace:

Forța elementară $d\vec{F}$, care acționează asupra unui element de lungime $d\vec{l}$ dintr-un circuit situat în câmp magnetic și parcurs de curentul de intensitate i , este dată de relația:

$$(9.1) \quad d\vec{F} = i(d\vec{l} \times \vec{B})$$

unde: $\vec{B}$ [H] = inducția corespunzătoare punctului în care este situat elementul de lungime $d\vec{l}$ (figura 9.1a).

Forța totală care acționează asupra întregului contur (C), prin integrare rezultă de forma:

$$(9.2) \quad \vec{F} = i \cdot \int_C (d\vec{l} \times \vec{B})$$

inducția magnetică $\vec{B}$, produsă în vid într-un punct A, de un curent de intensitate i , (figura 9.1b) este dată de relația lui Biot-Savart-Laplace:

$$(9.3) \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \int_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^3}$$

unde: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] = permeabilitatea magnetică a vidului;
 $\vec{r}_0$ = versorul vectorului de poziție $\vec{r}$

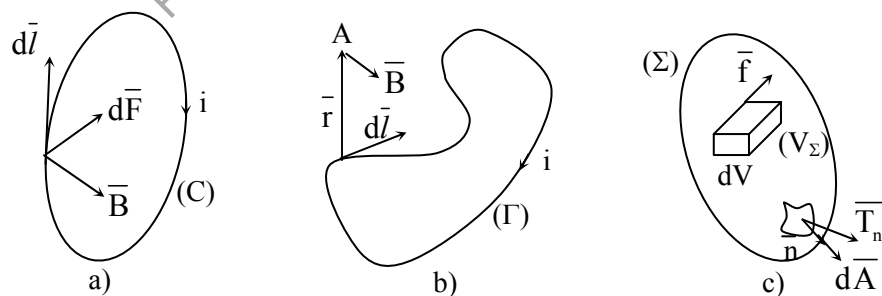


Fig. 9.1. Referitor la calculul forțelor electrodinamice.

Tensiunile Maxwelliene:

Din mecanică se cunoaște că forțele care acționează într-un volum V_Σ , figura 9.1c, cu densitatea $\vec{f}$, sunt echivalente cu un sistem de tensiuni superficiale, $\vec{T}_n$. Forța totală $\vec{F}$, poate fi calculată integrând fie densitatea de forță pe volumul V_Σ , fie tensiunea superficială $\vec{T}_n$, pe suprafața închisă Σ care delimitează volumul V_Σ :

$$(9.4) \quad \bar{F} = \int_{V_{\Sigma}} \bar{f} dV = \int_{\Sigma} \bar{T}_n dA$$

în care: $\bar{T}_n$ este tensiunea maxwelliană care activează pe o suprafață având versorul normalei $\bar{n}$ și se calculează cu relația:

$$(9.5) \quad \bar{T}_n = (\bar{B} \cdot \bar{n}) \bar{H} - \bar{n} \left(\frac{\bar{B} \cdot \bar{H}}{2} \right)$$

Forța generalizată în câmp magnetic

– cazul a două circuite (figura 9.2)

Energia magnetică W_m a sistemului se determină cu expresia:

$$(9.6) \quad W_m = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + i_1 i_2 M$$

unde: L_1, L_2 – inductivitățile proprii ale celor două circuite;

M – inductivitatea mutuală între cele două circuite.

Forța de interacțiune între cele două circuite considerând că valorile curenților nu depind de formația circuitelor este:

$$(9.7) \quad F = \frac{\partial W_m}{\partial x} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{dx} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dx} + i_1 i_2 \frac{dM}{dx}$$

Primii doi termeni reprezintă forțele interne ale celor două circuite:

$$(9.8) \quad \begin{cases} F_{x1} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{dx} & \text{- pentru circuitul 1} \\ F_{x2} = \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dx} & \text{- pentru circuitul 2} \end{cases}$$

Forța de interacțiune este dată numai de ultimul termen din relația (4.10), și anume:

$$(9.9) \quad F_{x12} = i_1 i_2 \frac{dM}{dx}$$

Observație:

În aplicațiile practice, calculul forțelor electrodinamice prin procedeele prezentate se localizează numai la anumite porțiuni ale circuitelor închise, neglijându-se interacțiunile dintre căile de curent situate la distanțe mari una de alta.

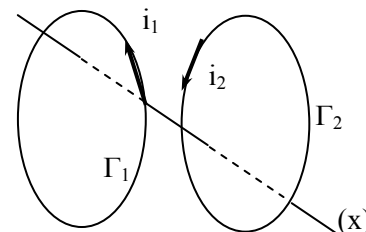


Fig. 9.2. Forța de interacțiune între două circuite parcurse decurent.

9.2. Solicitățile electrodinamice ale conductoarelor

9.2.1. Conductoare filiforme infinite, necoplanare

Considerăm două conductoare 1 și 2, așezate într-o poziție oarecare în spațiu, conductorul 1 fiind parcurs de curentul i_1 , iar conductorul 2 de curentul i_2 , figura 9.3. Între două elemente dl_1 și dl_2 de pe cele două conductoare, forța exercitată asupra segmentului dl_2 se poate calcula cu relația lui Laplace:

$$(9.10) \quad d\bar{F}_2^{(1)} = i_2 (d\bar{l}_2 \times \bar{B}_1)$$

$$\text{unde: } \bar{B}_1 = \mu_0 \bar{H}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 \cdot \frac{d\bar{l}_1 \times \bar{R}}{R^3}$$

Se obține solicitarea electrodinamică elementară asupra unui element dl_2 de pe conductorul 2, și anume:

$$(9.11) \quad d\vec{F}_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} \cdot i_1 i_2 (d\vec{l}_2 \times d\vec{A})$$

unde: $d\vec{l}_1 \times \vec{R} = d\vec{A}$

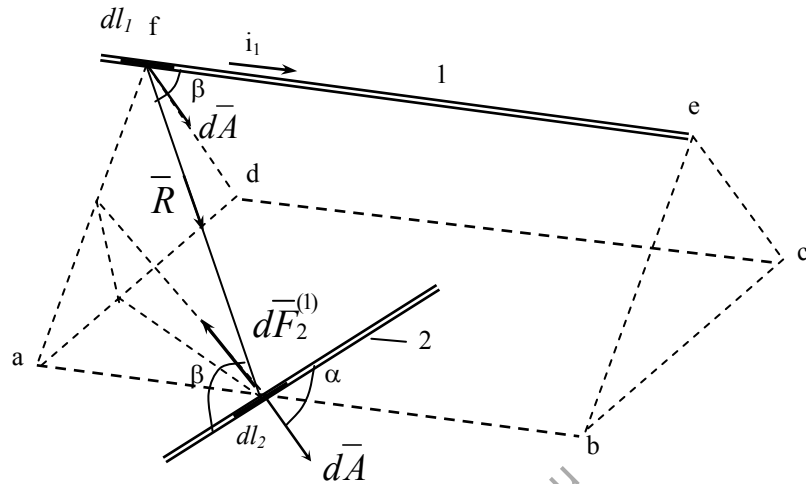


Fig. 9.3. Forțe de interacțiune exercitate între conductoare filiforme parcurse de curent.

Observații:

1. Forța $d\vec{F}_2^{(1)}$ este produsă de conductorul 1 și acționează asupra conductorului 2;
2. $d\vec{A} \perp (abef)$

Pentru a calcula acest modul trebuie observat că raza vectorială $\vec{R}$ și conductorul 1 se află în planul $abef$, iar vectorul $d\vec{A}$ este normal la acest plan. Vectorul $d\vec{F}$ se află în planul $abef$ dar perpendicular pe planul format de conductorul 2 și vectorul $d\vec{A}$ traslat la locul lui dl_2 , deci putem scrie relația:

$$(9.12) \quad d\vec{l}_2 \times d\vec{A} = dl_2 dA \sin \alpha$$

Se obține astfel valoarea modului forței $d\vec{F}$:

$$(9.13) \quad dF_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} i_1 i_2 dl_2 dA \sin \alpha$$

Din produsul vectorial $d\vec{A} = d\vec{l}_1 \times \vec{R}$ rezultă: $dA = dl_1 \cdot R \cdot \sin \beta$

Din figura 9.4 rezultă: $dl_1 \cdot \sin \beta = R \cdot d\beta \Rightarrow dl_1 = \frac{R d\beta}{\sin \beta}$;

Introducând valoarea lui dl_1 în dA se obține: $dA = R^2 \cdot d\beta$;

Introducând pe dA în relația (9.13) se obține modulul forței sub forma:

$$(9.14) \quad dF_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 dl_2 \frac{\sin \alpha \cdot d\beta}{R}$$

care reprezintă forța produsă de o unitate de lungime a conductorului 1, parcurs de curentul i_1 , asupra unității de lungime dl_2 , a conductorului 2, parcurs de curentul i_2 .

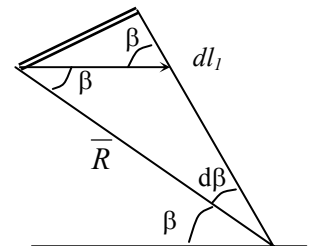


Fig. 9.4. Element din conductorul 1.

Cursul nr. 9

Solicitări electrodinamice – II.

9.1.1. Conductoare coplanare, rectilinii, filiforme, de lungime finită

Considerăm două conductoare filiforme drepte 1 și 2, parcurse de curenții i_1 și i_2 , situate în același plan, figura 9.5.

Forța Laplace $d\vec{F} = i(d\vec{l} \times \vec{B})$ care acționează asupra conductorului 2 este:

$$(9.16) \quad d\vec{F}_2^{(1)} = i_2 (d\vec{l}_2 \times \vec{B}_1),$$

care în modul este:

$$(9.17) \quad dF_2^{(1)} = i_2 dl_2 B_1 \sin \alpha$$

unde: $\alpha = \frac{\pi}{2}$ este unghiul dintre $d\vec{l}_2$ și $\vec{B}_1$, deci $\sin \alpha = 1 \Rightarrow$

$$(9.18) \quad dF_2^{(1)} = i_2 dl_2 B_1$$

dar: $\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 \cdot \frac{d\vec{l}_1 \times \vec{R}}{R^3} \Rightarrow B$ în modul este:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 \cdot \frac{dl_1 R \sin \beta}{R^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 \cdot \frac{dl_1}{R^2} \sin \beta$$

calculăm dl_1/R^2 :

$$\left. \begin{array}{l} dl_1 = dy \\ y = x \cdot \operatorname{ctg} \beta \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} dl_1 = -x \frac{d\beta}{\sin^2 \beta} \\ R = \frac{x}{\sin \beta} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{dl_1}{R^2} = -\frac{d\beta}{x}$$

$$\Rightarrow B_1 = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 \cdot \frac{d\beta \sin \beta}{x} \Rightarrow dF_2^{(1)} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{dl_2 d\beta \sin \beta}{x}, \beta \in [\beta_1, \beta_2]$$

$$\frac{dF_2^{(1)}}{dl_2} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{d\beta \sin \beta}{x} \quad \left| \quad \int_{\beta_1}^{\beta_2} \quad (\text{integrăm de la } \beta_1 \text{ la } \beta_2) \right.$$

$$\frac{dF_2^{(1)}}{dl_2} = -\frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin \beta \cdot d\beta}{x} \Rightarrow$$

$$(9.19) \quad \frac{dF_2^{(1)}}{dy} = -\frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} \frac{\cos \beta_2 - \cos \beta_1}{x}$$

Modulul solicitării specifice pe unitatea de lungime în punctul de abscisă x .

$$(9.20) \quad F_2(x) = \frac{dF}{dy} = -\frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 \frac{\cos \beta_2 - \cos \beta_1}{x} = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{\cos \beta_2 - \cos \beta_1}{x}, \quad F_2(x) = i_1 \cdot i_2 \cdot K$$

unde: K este factor de contur, dependent numai de geometria sistemului constituit din căile de curent.

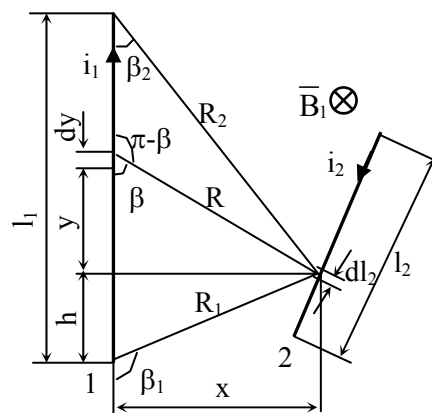


Fig.9.5: Conductoare coplanare finite.

Suprapunerea efectelor. În construcția echipamentelor electrice, în special la întrerupătoare, calea de curent are în unele cazuri forma unui U, adică în acest caz sunt de considerat trei segmente de conductor, ca în figura 9.6a. Deoarece segmentele sunt situate în același plan, iar fenomenele sunt liniare, se admite principiul suprapunerii efectelor. Astfel, după cum se arată în figura 9.6b, încărcarea specifică F_2 a conductorului 2, rezultă din însumarea încărcărilor specifice $F_{2,1}$ și $F_{2,3}$, adică provenind de la conductoarele 1 și 3. De asemenea încărcarea specifică F_3 rezultă din însumarea încărcărilor specifice $F_{3,1}$ și $F_{3,2}$.

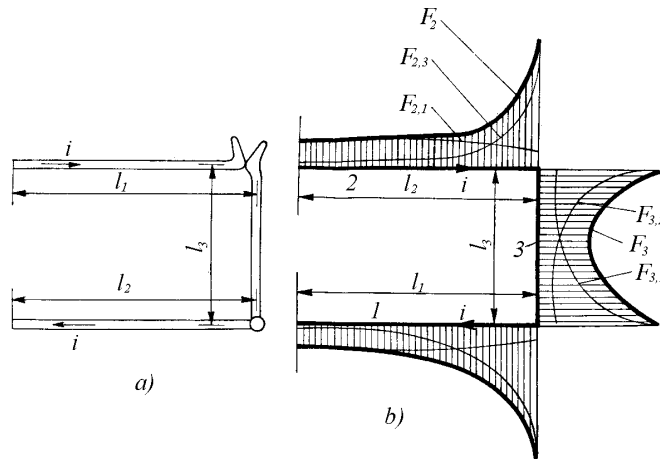


Fig. 9.6: Forțe exercitate într-o cale de curent a unui aparat.

9.1.2. Conductoare paralele, filiforme, de lungime infinită și finită

Forța Laplace este: $d\vec{F}_2^{(1)} = i_2 (d\vec{l}_2 \times \vec{B}_1)$, în

care: $\vec{B}_1 = \mu_0 \vec{H}_1$

dar: $i_1 = \int_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = H \cdot 2\pi r = H 2\pi a \Rightarrow$

$$H = \frac{i_1}{2\pi a}, \text{ deci:}$$

$$(9.21) \quad B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi a}$$

în relația (9.17), $dF_2^{(1)} = i_2 dl_2 B_1 \sin \alpha$, $\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow$

$\sin(\alpha) = 1$, deci:

$$(9.22) \quad dF_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{2\pi a} i_1 i_2 dl_2, \text{ integrând de la } 0 \text{ la } l_2 \text{ obținem:}$$

$$(9.23) \quad F_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{l_2}{a} \quad (\text{cazul conductoarelor de lungime finită})$$

pentru cazul particular, în care $l_1 = l_2 = l$, aplicăm formula (9.19):

$$\frac{dF_2^{(1)}}{dy} = -\frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} \frac{\cos \beta_2 - \cos \beta_1}{x},$$

$$\text{în care: } \cos \beta_2 = \frac{l-y}{\sqrt{a^2 + (l-y)^2}} \quad \text{iar} \quad \cos \beta_1 = \sin \gamma = \frac{a}{\sqrt{a^2 + y^2}}$$

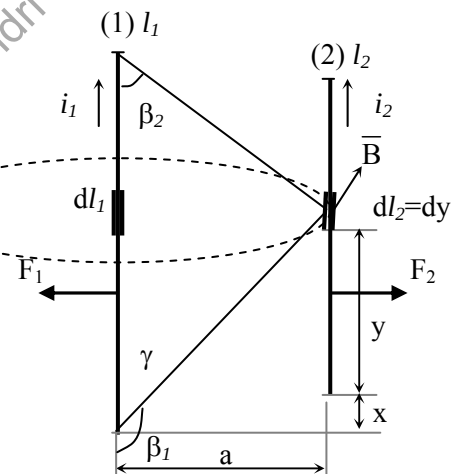


Fig. 9.7: Conductoare paralele.

$$(9.24) \quad \frac{dF_2^{(1)}}{dy} = \frac{\mu_0}{2\pi a} i_1 i_2 \int_0^l \left(\frac{l-y}{\sqrt{a^2 + (l-y)^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + y^2}} \right) dy$$

$$(9.25) \quad \frac{dF_2^{(1)}}{dy} = \frac{\mu_0}{2\pi a} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{l}{a} \cdot \varphi_c \left(\frac{l}{a} \right),$$

unde: $\varphi_c \left(\frac{l}{a} \right)$ = factor de corecție (factor de contur).

CONCLUZIE:

Asupra a două căi de curent parcurse de curenți, acționează forțe electrodinamice egale și de sensuri contrare, de respingere între conductoare, sau de atracție, după cum intensitățile curenților au același sens sau sensuri contrare.

9.2. Solicitățile electrodinamice ale conductoarelor profilate

9.2.1. Conductoare cu secțiune transversală circulară, paralele de lungime finită

În astfel de sisteme, figura 10.1, forțele de interacțiune pot fi calculate pe baza teoriei forțelor generalizate în câmp magnetic.

Inductanța magnetică a circuitului format din două căi de curent paralele, de lungime h , situate în aer la distanța a unul față de celălalt, este dată de relația:

$$(10.1) \quad L = \frac{\mu_0}{4\pi} h \left(1 + 4 \ln \frac{a-r}{a} \right)$$

unde: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] – permeabilitatea magnetică a vidului;
 r = raza secțiunii transversale a conductorului;

Energia magnetică a sistemului, dată de relația generală:

$$(10.2) \quad W_m = \frac{1}{2} L i^2, \text{ se poate scrie sub forma:}$$

$$(10.3) \quad W_m = 10^{-7} h i^2 \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{a-r}{a} \right)$$

Pentru forța F , orientată după direcția a , corespunzătoare distanței dintre căile de curent se obține relația:

$$(10.4) \quad F = \frac{\partial W_m}{\partial a} \Big|_{i=\text{const}} = 10^{-7} i^2 \frac{2h}{a-r}$$

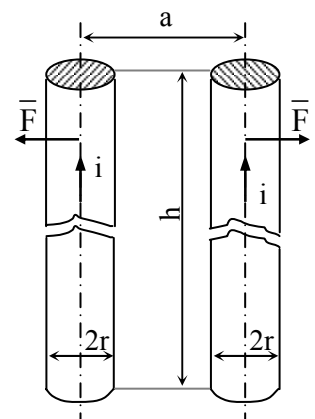


Fig. 10.1: Conductoare cu secțiune circulară.

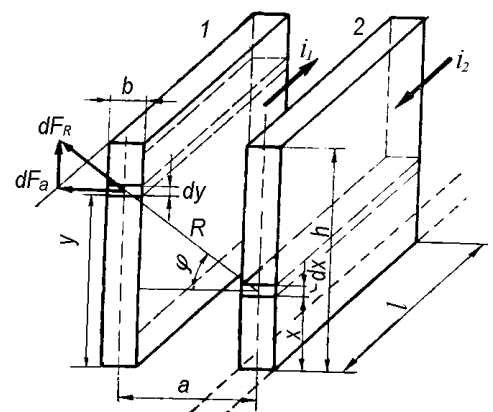


Fig. 10.2. Conductoare de secțiune dreptunghiulară, așezate vertical.

9.2.2. Conductoare cu secțiune transversală dreptunghiulară, paralele, de lungimi finite

În figura 10.2 sunt prezentate două conductoare paralele, de secțiune dreptunghiulară, cu distanța a între axele conductoarelor, așezate pe latura mică a dreptunghiului: grosimea fiecărui conductor (latura mică) este b , iar înălțimea sa este h . Lungimea l este foarte mare în raport cu h și $b \ll h$; $b \ll a$. Cele două conductoare se consideră de lungime infinită.

Forța elementară care se exercită asupra unui element elementar de pe conductorul 2 pe direcția lui R este:

$$(10.5) \quad d^2 F_R = \frac{\mu_0}{2\pi} di_1 di_2 \frac{l}{R}$$

unde: R – distanța între cele două segmente elementare de pe conductorul 1 și 2.

Curenții elementari, di_1 , di_2 , care parcurg elementele elementare de suprafețe $b \cdot dx$ și $b \cdot dy$ sunt:

$$j_1 = \frac{i_1}{bh} = \frac{di_1}{b dx} \Rightarrow di_1 = i_1 \frac{dx}{h}, \quad di_2 = i_2 \frac{dy}{h}, \text{ de unde, forța rezultă:}$$

$$(10.6) \quad d^2 F_R = \frac{\mu_0}{2\pi R} i_1 i_2 \frac{l}{h^2} dx dy$$

Componenta forței elementare pe direcția a este: $d^2 F_a = d^2 F_R \cos \varphi$,

$$\text{unde: } \cos \varphi = \frac{a}{R} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + (y-x)^2}}$$

$$\Rightarrow d^2 F_a = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{dx dy}{h^2} \frac{l}{\sqrt{a^2 + (y-a)^2}} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + (y-a)^2}},$$

$$d^2 F_a = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{la}{h^2 [a^2 + (y-a)^2]} dx dy \quad \left| \begin{array}{l} \text{integrăm după } x \text{ și } y \text{ de la } 0 \text{ la } h \end{array} \right.$$

$$F_a = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{la}{h^2} \int_0^h dx \int_0^h \frac{dy}{[a^2 + (y-a)^2]} \Rightarrow$$

$$(10.7) \quad F_a = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \varphi(f),$$

unde:

$$(10.8) \quad \varphi(f) = \frac{a^2}{h^2} \left[\frac{2h}{a} \arctg \frac{h}{a} - \ln \left(1 - \frac{h^2}{a^2} \right) \right] = \text{funcție de formă.}$$

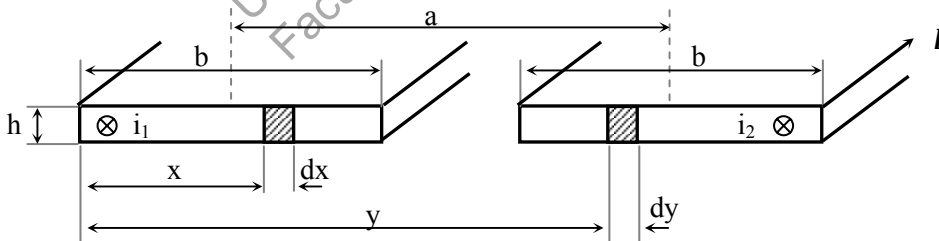


Fig. 10.3. Conductoare cu secțiunea transversală dreptunghiulară, așezate pe lat.

Dacă cele două conductoare sunt amplasate ca în figura 10.3 (pe lat), curenții prin suprafețele elementare se scriu sub forma (în ipoteza unei densități de curent constante):

$$(10.9) \quad j_1 = \frac{i_1}{xb} = \frac{di_1}{x dx} \Rightarrow di_1 = i_1 \frac{dx}{b}, \quad di_2 = i_2 \frac{dy}{b}.$$

$$(10.10) \quad d^2 F = \frac{\mu_0}{2\pi} di_1 di_2 \frac{l}{y-x} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l dx dy}{b^2 (y-x)},$$

integrând după x de la 0 la b , și după y de la a la $a+b$, obținem forța dintre cele două conductoare:

$$(10.11) \quad F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{b^2} \int_0^b dx \int_a^{a+b} \frac{dy}{y-x}, \text{ sau, mai simplu:}$$

$$(10.12) \quad F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \varphi(f),$$

unde:

$$(10.13) \quad \varphi(f) = \frac{a^2}{b^2} \left[\left(1 + \frac{b}{a}\right) \ln \left(1 + \frac{b}{a}\right) + \left(1 - \frac{b}{a}\right) \ln \left(1 - \frac{b}{a}\right) \right] = \text{funcție de formă.}$$

OBSERVAȚII:

1. Calculul forțelor electrodinamice dintre conductoare cu secțiune dreptunghiulară devine rapid dacă valorile funcției $\varphi(f)$ se determină din curbele lui Dwight, din figura 10.4.
2. Funcția $\varphi(f)$ corectează valorile forțelor calculate în ipoteza conductoarelor filiforme.

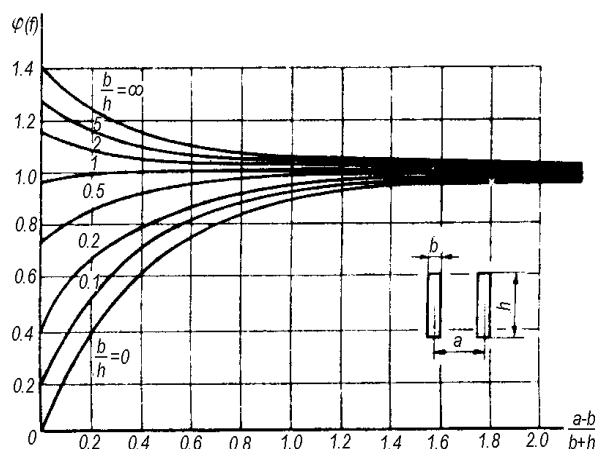


Fig. 10.4. Curbele lui Dwight.

9.2.3. Conductoare cu secțiune transversală circulară și configurații de tip L și U

Configurațiile de tip L și U sunt frecvent întâlnite în construcția căilor de curent ale echipamentelor.

$$F = i \int_C (d\vec{l} \times \vec{B}), \quad dF = i (d\vec{l} \times \vec{B})$$

$$\text{dar: } \vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^2} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{dx R \sin \beta}{R^2}, \quad \sin \beta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_r^{l_1} \frac{x dx}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$F_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \int_r^{l_2} dy \int_r^{l_1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx \quad F_2^{(1)} = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{l_1 (l_2 + \sqrt{l_1^2 + r^2})}{r (l_2 + \sqrt{l_2^2 + r^2})}$$

Forțele electrodinamice sunt perpendiculare pe cele două conductoare, având tendința de a aduce în prelungire cele două segmente ale configurației de tip L.

În ipoteza $r \ll l_1, l_2$, a fost posibilă neglijarea solicitărilor datorate inducției magnetice din interiorul căilor de curent.

Dacă raza r a conductorului are valori comparabile cu l_1 sau l_2 , atunci este necesar ca în calcule să fie considerate și componentele forțelor electrodinamice produse prin interacțiunea dintre câmpul magnetic din interiorul unui segment și curentul din celălalt.

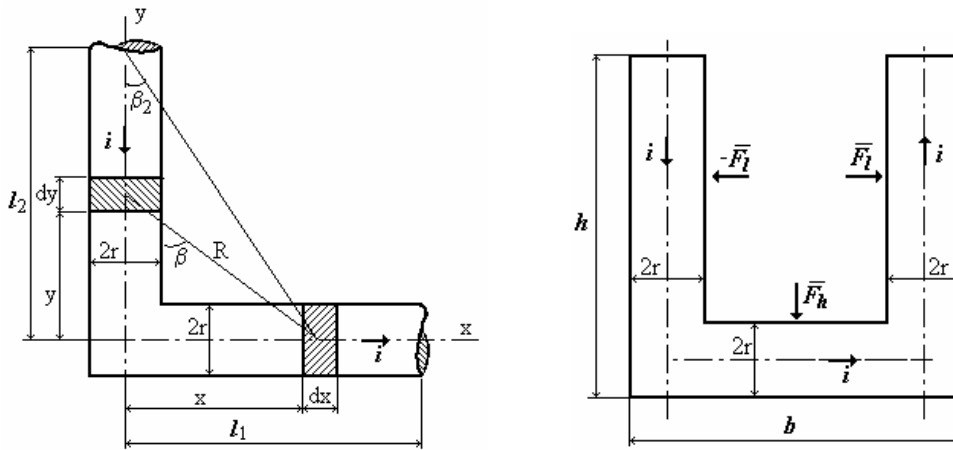


Fig. 10.5. Configurații de tip L și U.

Pentru determinarea forțelor electrodinamice care solicită o cale de curent cu configurația tip U, specifică realizării contactelor unor echipamente de comutație, se face apel la procedeul suprapunerii efectelor.

$$\overline{F}_l = i \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \frac{2h}{l-r} - \overline{F}_2^{(1)}, \quad \overline{F}_h = 2\overline{F}_1^{(2)}$$

$$\overline{F}_l = i \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{h(l + \sqrt{l^2 + r^2})}{r(l + \sqrt{l^2 + h^2})}, \quad \overline{F}_h = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{l^2 + h^2})}$$

Popa Sorin Eugen
Echipamente Electrice - note de curs
Universitatea "Vasile Alecsandri" din Bacău
Facultatea de Inginerie

Cursul nr. 10

Solicitări electrodinamice

10.3. Conductoare amplasate în vecinătatea unor corpuri feromagnetice

Între un conductor parcurs de un curent electric situat în vecinătatea unui perete feromagnetic se manifestă o forță electrodinamică, având tendința de a micșora distanța dintre conductor și perete.

Astfel de situații se întâlnesc în construcția echipamentelor electrice amplasate în celule având pereți sau uși din oțel.

10.3.1. Cale de curent paralelă cu un perete feromagnetic plan

Pentru calculul forței se face ipoteza simplificatoare că permeabilitatea magnetică este infinită, deci se poate admite că inducția magnetică este perpendiculară la suprafața peretelui.

Pentru calculul forței electrodinamice se apelează la metoda conductorului imagine, în care peretele feromagnetic este înlocuit cu un conductor imagine simetric față de conductorul real în raport cu peretele, și este parcurs de același curent i . Astfel forța de interacțiune între un conductor parcurs de curent și peretele feromagnetic este echivalentă cu forța care apare între două conductoare parcurse de curent în același sens.

Deci pentru calculul forței de interacțiune se folosește relația:

$$(10.x) \quad F = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2 \frac{2l}{2a-r},$$

unde: l = lungimea conductorului;

r = raza conductorului.

În ipoteza $r \ll l$ expresia forței devine:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \frac{l}{a}$$

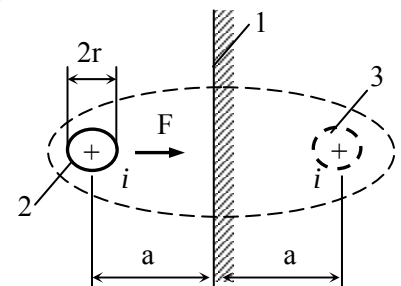


Fig. 10.6. Metoda conductorului imagine: 1-perete feromagnetic; 2-conductor real, 3-conductor imagine.

10.3.2. Solicitări electrodinamice asupra conductoarelor așezate în nișe feromagnetice

Aceste solicitări prezintă interes în cazul camerelor de stingere prevăzute cu grile feromagnetice în care interacțiunea dintre căile de curent și grile este hotărâtoare în evoluția procesului de stingere a arcului electric.

Forța electromagnetică care acționează asupra căilor de curent situate în nișe feromagnetice se calculează pe baza teoremei forței generalizate în câmp magnetic, care este:

$$F = \frac{1}{2} \left(i_1^2 \frac{dL_1}{dx} + i_2^2 \frac{dL_2}{dx} \right) + i_1 i_2 \frac{dM}{dx} - \text{forța generalizată.}$$

Pentru nișe se poate scrie:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}$$

inductanța L a conductorului este egală cu permeanța Λ a circuitului magnetic corespunzător unei grile $\Rightarrow$

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{d\Lambda}{dx}, \quad \text{în care } \Lambda = \frac{\Lambda_\delta \Lambda_{Fe}}{\Lambda_\delta + \Lambda_{Fe}}, \text{ dar } \Lambda_\delta \ll \Lambda_{Fe} \Rightarrow \Lambda \cong \Lambda_\delta$$

unde: Λ_δ = permeanța corespunzătoare porțiunii de circuit magnetic prin aer;

Λ_{Fe} = permeanța corespunzătoare porțiunii de circuit magnetic prin fier.

$$\Rightarrow F = \frac{1}{2} i^2 \frac{d\Lambda_\delta}{dx}$$

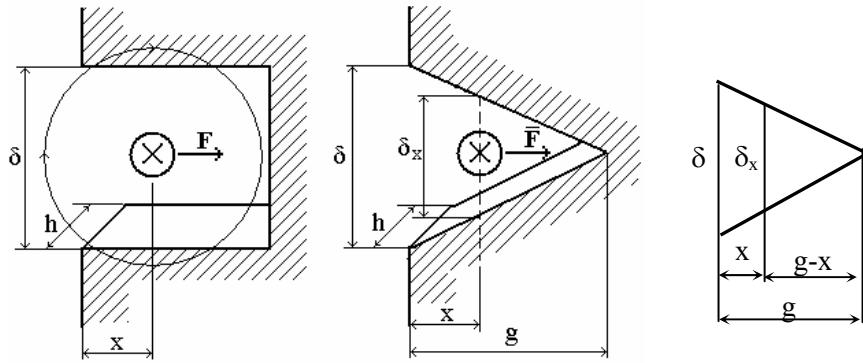


Fig. 10.7. Efectul de nișă feromagnetică

nișă dreptunghiulară:

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{hx}{\delta} \Rightarrow F = \frac{\mu_0}{2} i^2 \frac{h}{\delta}$$

nișă triunghiulară:

$$d\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{dx}{\delta_x},$$

$$\frac{\delta_x}{\delta} = \frac{g-x}{g} \Rightarrow \delta_x = \frac{\delta(g-x)}{g} \Rightarrow \frac{d\Lambda_\delta}{dx} = \frac{\mu_0 hg}{\delta(g-x)} \Rightarrow$$

$$F = \frac{\mu_0}{2} i^2 \frac{hg}{\delta(g-x)}$$

10.4. Solicitări electrodinamice ale spirelor

10.4.1. Solicitări electrodinamice ale spirelor circulare

Pentru calculul acestor solicitări, considerăm o spirală circulară de rază r , realizată dintr-un conductor cu diametru $d_c = 2 \cdot r_c$ și care este parcursă de un curent i , vezi figura 10.8. Forțele electrodinamice acționează pe direcție radială în sensul creșterii razei r și sunt rezultatul integrării pe toată lungimea spirei a forțelor de respingere între lungimi elementare din spirală diametral opuse și parcurse de curenți în sensuri contrare.

Forța electrodinamică radială F_r se calculează pe baza teoremei generalizate în câmp magnetic, și anume:

$$F_r = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dr}$$

în care: L este inductanța spirei: $L = \mu_0 r \left(\ln \frac{8r}{r_c} - 1,75 \right)$

$$(f \cdot g)' = f' \cdot g + f \cdot g'; \quad \ln(u) = u' / u.$$

$$\frac{dL}{dr} = \mu_0 \left(\ln \frac{8r}{r_c} - 1,75 \right) + \mu_0 r \frac{\frac{8}{r}}{\frac{8r}{r_c}} = \mu_0 \left(\ln \frac{8r}{r_c} - 0,75 \right)$$

Deci vom avea:

$$(*) \quad F_r = \frac{\mu_0 i^2}{2} \left(\ln \frac{8r}{r_c} - 0,75 \right)$$

Forța radială specifică f_r se obține prin raportarea lui F_r la $2\pi r$, și va fi:

$$f_r = \frac{F_r}{2\pi r} = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi r} \left(\ln \frac{8r}{r_c} - 0,75 \right)$$

Forța tangențială, care tinde să rupă spira, se poate calcula înlocuind forțele interne după secționarea spirei pe diametru, și anume:

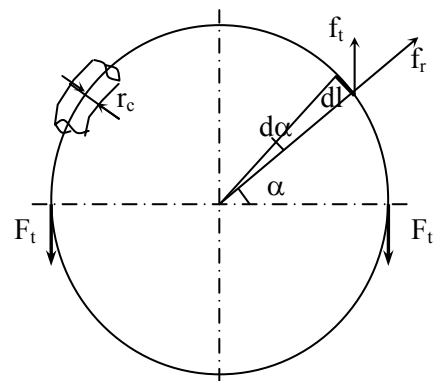


Fig. 10.8. Spirală circulară parcursă de curent.

$$2F_t = \int_0^{\pi r} f_t \cdot dl$$

în care: $f_t = f_r \cdot \sin \alpha$;

$$dl = r \cdot d\alpha.$$

Înlocuind valorile lui f_t și dl vom obține:

$$2F_t = \int_0^{\pi r} r \cdot f_r \sin \alpha d\alpha = 2rf_r$$

$$\text{Deci forța tangențială care tinde să rupă spira este: } F_t = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \left(\ln \frac{8r}{r_c} - 0,75 \right)$$

10.4.2. Solicitări electrodinamice între două spire circulare

Pentru stabilirea relației de calcul a solicitărilor electrodinamice se consideră două spire circulare așezate în planuri paralele, construite din conductoare de aceeași secțiune, dar de diametre diferite, vezi figura 10.9. Calculul solicitărilor electrodinamice se efectuează de asemenea pe baza teoremelor generalizate în câmp magnetic.

În acest caz forța de interacțiune între spire este definită de inducția mutuală care se exprimă prin relația:

$$M = \mu_0 r_1 \left[\ln \frac{8r_1}{\sqrt{h^2 + (r_2 - r_1)^2}} - 2 \right],$$

unde: r_1, r_2 = raza spirei 1, respectiv spirei 2;
 h = distanța dintre spire.

Componenta F_h , dezvoltată de direcția axială a celor două spire se poate determina cu relația:

$$F_h = i_1 i_2 \frac{dM}{dh} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{hr_1}{h^2 + (r_2 - r_1)^2}$$

Forțele F_h sunt de atracție sau de respingere după cum curenții i_1 și i_2 au aceleași sensuri sau sunt de sensuri contrare.

Componenta radială a forței de interacțiune dintre cele două spire rezultă din triunghiul format, figura 10.9, și anume:

$$\frac{F_{r0}}{F_h} = \frac{r_2 - r_1}{h}, \text{ din care rezultă:}$$

$$(**) \quad F_{r0} = F_h \cdot \frac{r_2 - r_1}{h}$$

Forțele radiale totale F_{r1} și F_{r2} , care solicită cele două spire se obțin prin însumarea algebrică a forțelor datorate inductanțelor proprii, F_r , exprimate prin relația (*) și a celor radiale F_{r0} , datorate inductanței mutuale, exprimată cu relația (**)

Deci vom obține astfel expresiile:

$$F_{r1} = \frac{\mu_0 i_1^2}{2} \left(\ln \frac{8r_1}{r_c} - 0,75 \right) - F_h \frac{r_2 - r_1}{h}$$

$$F_{r2} = \frac{\mu_0 i_2^2}{2} \left(\ln \frac{8r_2}{r_c} - 0,75 \right) - F_h \frac{r_2 - r_1}{h}$$

unde: r_c = raza secțiunii transversale a conductorului fiecărei spire.

Forța electrodinamică de interacțiune după o direcție x , dintre două bobine cilindrice, fără miez feromagnetic și situate în aer, se calculează pe baza aceluiași teoreme ale forțelor

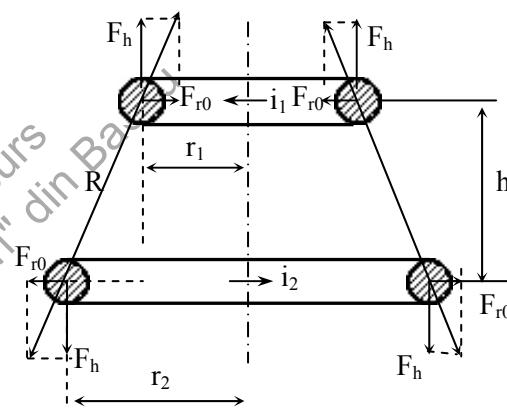


Fig. 10.9. Spire circulare paralele parcurse de curent electric.

generalizate în câmp magnetic.

Forța electrodinamică după o direcție x se scrie:

$$F_x = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial x},$$

unde: $\frac{\partial M}{\partial x} = N_1 N_2 \mu$

N_1, N_2 = numărul de spire ale celor două bobine;

μ = constantă, este un factor de formă ce depinde de dimensiunile geometrice și așezarea bobinelor.

10.5. Forțe electrodinamice în instalațiile de curent alternativ

În aceste instalații forțele electrodinamice sunt variabile în timp, ca urmare a faptului că intensitățile curenților variază în timp. Solicitarea electrodinamică are intensități mari atunci când este produsă de curenții de scurtcircuit.

10.5.1. Forțe electrodinamice în instalații monofazate de curent alternativ

Forțele electrodinamice se interacționează între două conductoare filiforme, paralele, situate în același plan și parcurse de același curent i se pot calcula cu relația:

$$F = 10^{-7} K i^2$$

unde: K – factor de contur;

În aceste instalații, solicitarea electrodinamică are valori mari atunci când este produsă de curenți de scurtcircuit, fiind maximă atunci când gradul de asimetrie al acestor curenți este maxim.

Curentul de scurtcircuit este:

$$i_k(t) = \pm \sqrt{2} I_k \left(\cos \omega t - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Pentru conductoarele din figura 10.10, forțele electrodinamice de interacțiune se determină:

$$-\bar{F}_1 = \bar{F}_2 = i F_k,$$

unde F_k se calculează pentru $i_1 = i = i_k(t)$,

$$F_k = 10^{-7} K i_k^2(t) = 2 \cdot 10^{-7} K I_k^2 \left(0,5 + 0,5 \cos 2\omega t + e^{-2t/T} - 2e^{-t/T} \cos \omega t \right)$$

unde: I_k = valoarea efectivă a intensității curentului de scurtcircuit în regim permanent;

T = constanta de timp a circuitului echivalent.

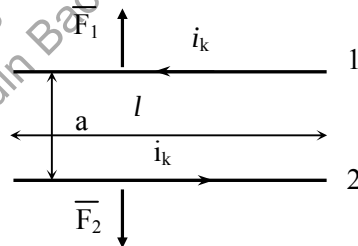


Fig. 10.10. Conductoare filiforme paralele parcurse de curent de scurtcircuit.

Valoarea de vârf maximă f_s a forței electrodinamice $F_k(t)$ corespunde intensității curentului de șoc i_s :

$$\left. \begin{aligned} f_s &= 10^{-7} K \cdot i_s^2 \\ i_s &= \sqrt{2} I_k \left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T}} \right) \\ K_s &= 1.8 \end{aligned} \right\} \Rightarrow f_s = 3,24 f_k$$

unde: f_k = valoarea de vârf a forței electrodinamice produsă de curentul de scurtcircuit în regim permanent..

$$\text{la limită, } t \rightarrow \infty \Rightarrow \begin{cases} i_k(t) = \sqrt{2} I_k \cos \omega t \\ F_k(t) = 10^{-7} K I_k^2 (1 + \cos 2\omega t) \end{cases}$$

sau $F_k(t) = 0.5 f_k (1 + \cos 2\omega t)$, cu valoarea de vârf: $f_k = 2 \cdot 10^{-7} K I_k^2$

Forța electrodinamică de interacțiune dintre două căi de curent parcurse de un curent având intensitatea armonic variabilă în timp sunt pulsatorii și conțin, pe lângă componenta continuă, o componentă armonică, de pulsație dublă în raport cu pulsația intensității curentului.

Valoarea medie F_{med} a forței electrodinamice $F_k(t)$ se calculează cu relația:

$$F_{med} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi [0.5 f_k (1 + \cos 2x)] dx, \text{ și rezultă de forma: } F_{med} = 0.5 f_k$$

În figura (10.11) este prezentată variația forței electrodinamice în regim tranzitoriu și în regim stabilizat. În regim stabilizat frecvența are valoare dublă față de regimul tranzitoriu.

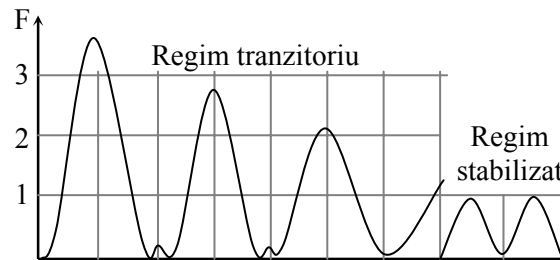


Fig. 10.11: Variația forței electrodinamice.

10.5.2. Solicitări electrodinamice în instalații trifazate de curent alternativ

Considerăm trei căi de curent parcurse de curenți de scurtcircuit de forma:

$$\begin{cases} i_{k1} = \sqrt{2} I_k \left[\sin(\omega t - \varphi_0) + e^{\frac{-t}{T}} \sin \varphi_0 \right] \\ i_{k2} = \sqrt{2} I_k \left[\sin\left(\omega t - \varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{\frac{-t}{T}} \sin\left(\varphi_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ i_{k3} = \sqrt{2} I_k \left[\sin\left(\omega t - \varphi_0 + \frac{2\pi}{3}\right) + e^{\frac{-t}{T}} \sin\left(\varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{cases}$$

unde: I_k = valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit de regim permanent;

φ_0 = unghiul de conectare.

Forțele electrodinamice de interacțiune sunt:

$$\overline{F}_{31} = -\overline{F}_{13} = \bar{i} F_{31}, \quad \overline{F}_{12} = -\overline{F}_{21} = \bar{i} F_{12}, \quad -\overline{F}_{23} = \overline{F}_{32} = \bar{i} F_{23}$$

Forțele rezultante $\overline{F}_1, \overline{F}_2, \overline{F}_3$, care solicită cele trei căi de curent se obțin de forma:

$$\left. \begin{aligned} \overline{F}_1 &= \overline{F}_{12} + \overline{F}_{13} = \bar{i} (F_{12} - F_{31}) = \bar{i} F_1 \\ \overline{F}_2 &= \overline{F}_{21} + \overline{F}_{23} = \bar{i} (-F_{21} - F_{23}) = \bar{i} F_2 \\ \overline{F}_3 &= \overline{F}_{31} + \overline{F}_{32} = \bar{i} (F_{31} - F_{32}) = \bar{i} F_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} F_1 = 10^{-7} K \cdot i_{k1} (i_{k2} - i_{k3}), \\ F_2 = -10^{-7} K \cdot i_{k2} (i_{k2} + 0.5 i_{k3}), \\ F_3 = 10^{-7} K \cdot i_{k3} (i_{k1} + 0.5 i_{k2}) \end{cases} \quad \text{unde: } K = \frac{2l}{a} = \text{factor de contur}$$

Introducând valorile curenților de scurtcircuit, pentru calea 1 de curent, se obține:

$$F_1(t) = 2\sqrt{3} \cdot 10^{-7} K I_k^2 \left[\sin(\omega t - \varphi_0) + e^{\frac{-t}{T}} \sin \varphi_0 \right] \cdot \left[e^{\frac{-t}{T}} \cos \varphi_0 - \cos(\omega t - \varphi_0) \right]$$

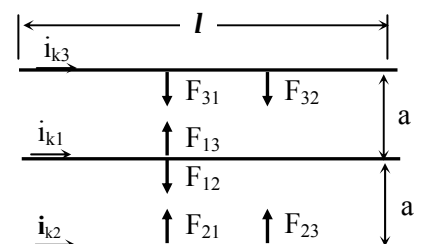


Fig. 10.12. Conductoare filiforme, trifazate, paralele parcurse de curenți de scurtcircuit.

Considerându-se valorile uzuale pentru constanta de timp și factorul de șoc ($T = 4,5 \cdot 10^{-2}$ s, și $k_s = 1,8$), din studiul extremelor funcției:

$$\Gamma_1(9t) = \frac{F_1(t)}{2 \cdot 10^{-7} K I_k^2} = \frac{F_1(t)}{f_k}, \text{ rezultă că valoarea de vârf } \gamma_1 \text{ a acesteia este maximă } \gamma_{1m} \text{ pentru}$$

$\varphi_0 = \pi/4$; prin calcul se obține: $\gamma_{1m} = 2,8$.

În mod similar, se obține: $\gamma_{2m} = \gamma_{3m} = 2,2 < \gamma_{1m}$

În regim tranzitoriu de scurtcircuit trifazat, solicitarea electrodinamică cea mai intensă f_m (valoarea de vârf) este suportată de calea de curent centrală: $f_m = 2,8 \cdot f_k = 5,6 \cdot 10^{-7} K \cdot I_k^2$.

În regim permanent, pentru $t \rightarrow \infty$, se obține:

$$\begin{cases} F_1(t) = -10^{-7} K \cdot I_k^2 \sqrt{3} \sin 2\alpha, \\ F_2(t) = 10^{-7} K \cdot I_k^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\alpha + 0.75 \right) \\ F_3(t) = 10^{-7} K \cdot I_k^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\alpha - 0.75 \right) \end{cases}$$

unde: $\alpha = \omega t - \varphi_0$.

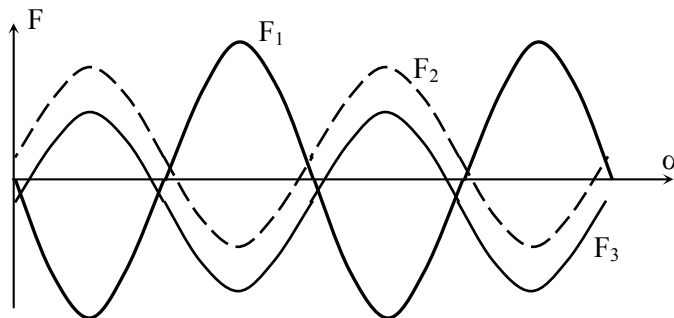


Fig. 10.13. Forțe electromagnetice de regim permanent.

Pentru $\alpha = (2n+1)\pi/4$; forțele rezultante ating valori maxime. Pentru F_1 , valoarea de vârf este: $f_1 = 10^{-7} \sqrt{3} K I_k^2$.

F_1 este ciclică și simetrică; F_2, F_3 sunt ciclice și asimetrice.

CONCLUZIE:

Fie în regim tranzitoriu, fie în regim permanent de scurtcircuit, solicitarea electrodinamică maximă este localizată pe calea de curent centrală.

10.6. Stabilitatea electrodinamică a echipamentelor electrice

Stabilitatea electrodinamică a echipamentelor electrice caracterizează capacitatea acestora de a rezista la solicitările mecanice produse sub acțiunea forțelor electrodinamice, atunci când căile de curent ale acestora sunt parcurse de curenți de scurtcircuit.

Pentru a garanta funcționarea sigură a echipamentelor electrice este necesară verificarea acestora din punct de vedere al stabilității electrodinamice.

În acest scop, se determină, prin procedee specifice de calcul, valoarea intensității curentului de șoc, i_s , corespunzător celei mai severe solicitări la care echipamentul poate fi supus pe durata exploatării. Acesta se compară cu I_d – intensitatea curentului limită dinamic, parametru nominal prin care firma producătoare precizează valoarea maximă admisibilă a intensității curentului de șoc pe care echipamentul îl poate suporta, fără pierderea stabilității electrodinamice.

Funcționarea echipamentului este garantată sub raportul stabilității electrodinamice, dacă este satisfăcută relația: $i_s \leq i_d$

uneori, în cataloagele echipamentelor este precizată valoarea coeficientului de stabilitate electrodinamică, definit prin relația: $k_d = \frac{I_d}{\sqrt{2} I_n}$

I_n = intensitatea curentului nominal.

Condiția de stabilitate electrodinamică fiind: $i_s \leq \sqrt{2} k_d I_n$

Pentru unele clase de echipamente de comutație se folosește relația: $i_s \leq i_l$, unde i_l este capacitatea de închidere nominală la scurtcircuit, și reprezintă valoare de vârf maximă a intensității curentului de scurtcircuit (curent de șoc) pe care un echipament de comutație îl poate stabili, fără sudarea contactelor sau alte deteriorări mecanice.

Cursul nr. 11

Contacte electrice

Contactul electric este ansamblul constructiv cu ajutorul căruia se realizează legătura electrică între două sau mai multe părți conductoare pentru a permite trecerea curentului electric.

Deoarece contactele electrice reprezintă porțiuni ale căilor de curent care suportă solicitări de intensități mari, este necesar ca acestea să se caracterizeze prin siguranță ridicată în funcționare, rezistență corespunzătoare la solicitări de diverse naturi (mecanică, electrică, factori de mediu), cât și printr-o suficientă stabilitate termică și electrodinamică.

După cinematica pieselor de contact, pot exista:

- contacte fixe (legături fixe de contact), obținute prin îmbinări demontabile sau nedemontabile (cu șuruburi, nituri, prin sudare etc.) ale pieselor de contact (fig. 11.1);
- contacte alunecătoare sau glisante, la care piesele de contact se pot deplasa una în raport cu cealaltă, fără întreruperea conducerii electrice (fig. 11.2);
- contacte amovibile, având un element fix și altul amovibil, fără sarcină și fără tensiune (de exemplu, contactul siguranțelor fuzibile);
- contacte de comutație, având cel puțin un element de contact mobil, prin deplasarea căruia se obține comutația dinamică în circuitele instalațiilor electrice.

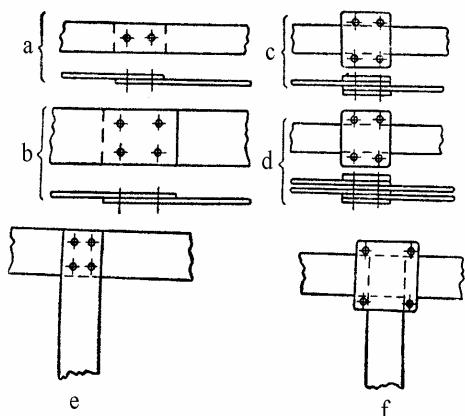


Fig. 11.1. Legături fixe ale barelor plate și rotunde

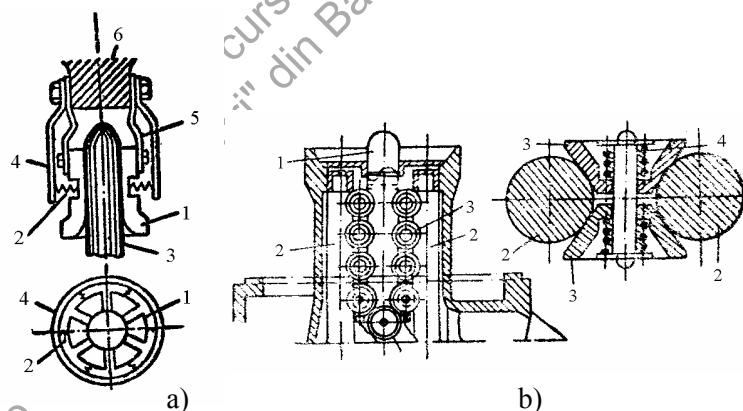


Fig. 11.2. Contacte alunecătoare: a- tip rozetă, b- cu role

11.1. Rezistența de contact

Prezența unui contact electric pe o cale de curent pune, întotdeauna, în evidență o rezistență electrică suplimentară, R_c , numită rezistență de contact.

Existența rezistenței de contact se explică pe seama a două procese, constând în stricțiunea liniilor de curent și în acoperirea suprafeței de contact cu pelicule disturbatoare.

Deci rezistența de contact este: $R_c = R_s + R_p$.

R_s - rezistența de stricțiune;

R_p - rezistența peliculară

Stricțiunea liniilor de curent

Indiferent de rugozitatea suprafețelor de contact, atingerea acestora nu poate avea loc decât într-un număr finit de puncte, suprafața reală de contact, A_c , considerată ca sumă a microsuprafețelor de contact, rezultă întotdeauna mai mică decât suprafața aparentă de contact, A , dependentă de dimensiunile geometrice ale pieselor de contact.

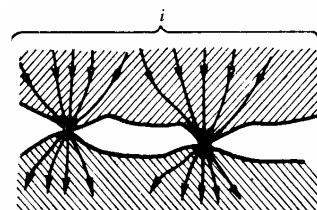


Fig. 11.3. Stricțiunea liniilor de curent.

În cazul deformării plastice, suprafața reală de contact, A_c , se poate calcula cu relația lui Holm:

$$(11.1) \quad A_c = \frac{F_c}{\xi H} = n\pi a^2$$

unde: F_c [N] = forța de apăsare în contact;

H [kgf/mm²] = duritatea materialului, considerată în condiții de deformare plastică;

$\xi \approx 0,6$ = coeficient de corecția a durității;

n = numărul contactelor elementare;

a [mm] = raza suprafeței circulare a contactului elementar.

Pentru contactele cu un singur punct de contact, suprafața reală de contact se calculează cu

formula: $A_c = \frac{F_c}{H} = \pi a^2$.

CONCLUZIE:

Rezistența de stricțiune este o consecință a discontinuității secțiunii transversale a căii de curent în zona de contact, fapt care are ca urmare stricțiunea liniilor de curent, figura 11.3.

Rezistența peliculară R_p , este efectul formării unor pelicule disturbatoare, de obicei cu proprietăți semiconductoare, pe suprafețele pieselor de contact. Structura și grosimea peliculei disturbatoare depinde de metalul pieselor de contact, de temperatura suprafeței de contact și de compoziția chimică a mediului ambiant.

Din acest punct de vedere, contactele electrice pot fi:

- cu atingere metalică, realizate în vid, din metale care nu au suferit acțiuni ale mediului ambiant;
- cu atingere cvasimetalică, realizate din metale nobile în atmosferă normală, unde acestea se acoperă cu pelicule având grosimi de 1÷2 nm, pe care electronii le străbat aproape în mod liber, prin efect tunel;
- cu peliculă disturbatoare, cum sunt de exemplu contactele din cupru în atmosferă normală sau cele din argint în vapori sulfuroși; în acest caz, între metalul pieselor de contact și gazele din mediul ambiant au loc reacții chimice, compușii rezultați având grosimi de ordinul a 100 nm.

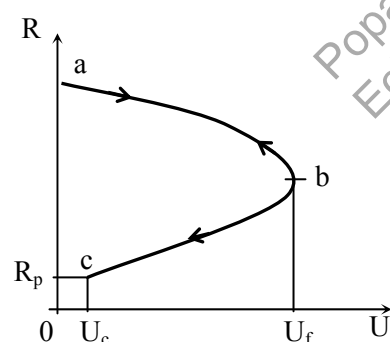


Fig. 11.4: Tensiunea de fritare.

În cazul contactelor cu peliculă perturbatoare conducția electrică se stabilește fie prin fenomenul de fritare, fie ca urmare a deformării plastice a suprafețelor de contact.

Dacă valorile forței de apăsare în contact sunt relativ mici (la contactele releelor), stabilirea conducției electrice prin fenomenul de fritare are la bază proprietățile semiconductoare ale peliculei disturbatoare.

În domeniul determinat de porțiunea (ab) a curbei $R(U)$, figura 11.4, fenomenele sunt reversibile. Dacă tensiunea U , aplicată contactului, depășește însă valoarea U_f , a tensiunii de fritare ($U_f = 10\div 100V$), pelicula se străpunge, punctul de funcționare stabilindu-se în (c), unde căderea de tensiune pe contact are valori mici, corespunzătoare unor valori, de asemenea mici, ale rezistenței peliculară, R_p .

Sub acțiunea unei forțe de contact mari, pelicula disturbatoare se fisurează, iar materialul pieselor de contact, care în zona vârfurilor atinge limita de plasticitate, curge prin fisurile formate; în acest caz conducția electrică se stabilește prin punți metalice, care se formează între piesele de contact.

Rezistența peliculară R_p , se poate calcula cu relația: $R_p = \frac{R_{p0}}{A_c}$,

unde: R_{p0} = rezistența superficială specifică; A_0 = suprafața reală de contact.

Valorile rezistenței peliculare specifice se determină prin calcul, cu ajutorul unor relații determinate experimental.

În practica proiectării obișnuite, calculul contactelor electrice se efectuează ținându-se seama numai de rezistența de stricțiune, R_s .

11.1.1. Rezistența de stricțiune

Studiul analitic al contactului punctiform se face apelând fie la modelul sferei de conductivitate infinită, fie la modelul microsuprafeței de contact eliptice, ambele elaborate de Holm.

Potrivit modelului sferei de conductivitate infinită, se consideră că între două piese metalice 1,2, (figura 11.5), cu rezistivitatea $\rho \neq 0$, contactul electric elementar se realizează prin intermediul unei sfere, având raza a și rezistivitatea nulă. În aceste condiții, în zona locului de contact, liniile de curent sunt radiale, iar suprafețele echipotențiale sunt sfere, concentrice cu sfera de contact.

În cazul modelului microsuprafeței de contact eliptice, suprafața de contact dintre cele două piese metalice (figura 11.6) se consideră realizată după o elipsă de semiaxe a, b ; astfel, liniile de curent se orientează după curbele geodezice la suprafețele hiperboloizilor cu o singură pânză, care au drept curbe colier elipse confocale cu elipsa de contact, suprafețele echipotențiale fiind elipsoizi, de asemenea confocali cu această elipsă.

Indiferent de modelul utilizat, pentru calculul rezistenței de stricțiune se apelează la un procedeu bazat pe dualitatea existentă între relațiile ce caracterizează câmpul electrostatic în vid și câmpul electric staționar al curenților continui, într-un mediu conductor.

Dacă spectrul câmpului electric al curenților continui, stabilit într-un spațiu conductor, coincide cu spectrul câmpului electrostatic în vid, ambele considerate între două suprafețe echipotențiale A_1 și A_2 (figura 11.7), atunci între rezistența R , corespunzătoare spațiului conductor și capacitatea C , dintre suprafețele A_1 și A_2 , considerate în vid, există relația:

$$(11.2) \quad RC = \rho \epsilon_0 \Rightarrow R = \frac{\rho \epsilon_0}{C}$$

unde: ρ = rezistivitatea mediului conductor;
 ϵ_0 = permitivitatea vidului.

$$\text{Dar: } E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r^2}, \text{ potențialul: } V = \int \bar{E} d\bar{l} = \int_a^\infty E dr = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 a}$$

$$C = \frac{q}{V} = 2\pi\epsilon_0 a, \text{ unde: } a = \text{raza sferei de contact.}$$

Rezistența de stricțiune corespunzătoare unei piese de contact este:

$$R_{1s} = \frac{\rho}{2\pi a}, \text{ iar rezistența de stricțiune a întregului contact sferic:}$$

$$(11.3) \quad R_s = 2R_{1s} = \frac{\rho}{\pi a}$$

În cazul suprafeței de contact eliptice, se obțin rezultate mai apropiate de cele experimentale. Ecuația suprafețelor echipotențiale elipsoide este:

$$\frac{x^2}{a^2 + \mu} + \frac{y^2}{b^2 + \mu} + \frac{z^2}{\mu} = 1, \text{ unde: } a, b = \text{semiaxele elipsei de contact; } \mu \in [0, \infty] =$$

parametru real; pentru $z = \sqrt{\mu} = 0$ se obține elipsa de contact.

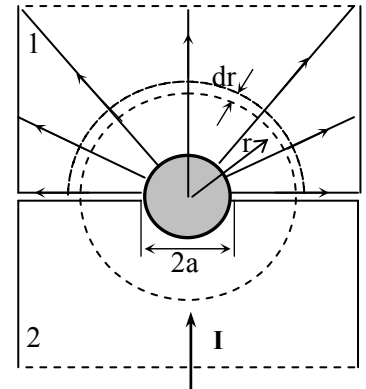


Fig. 11.5. Modelul sferei de conductivitate infinită.

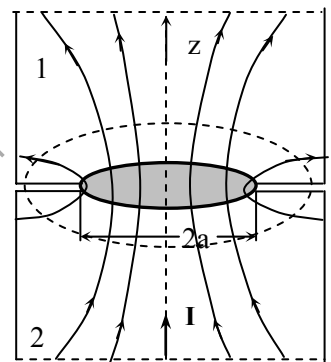


Fig. 11.6. Modelul elipsei de contact.

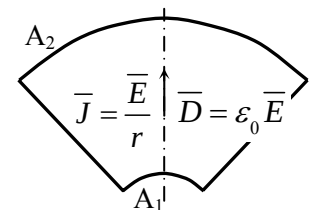


Fig. 11.7. Similitudinea între câmpul electric și electrostatic.

Calculul rezistenței de stricțiune, R_s , presupune calculul capacității, C_μ , corespunzătoare discului eliptic de contact, considerat în vid și încărcat cu sarcina electrică q .

Sarcina electrică q este uniform distribuită pe o suprafață plană, intensitatea E a câmpului electrostatic în punctele unei suprafețe echipotențiale elipsoidale, pentru $\mu \rightarrow 0$ se poate scrie:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)}}$$

pentru potențialul discului de contact, în raport cu o suprafață echipotențială eliptică se obține:

$$V = \int \bar{E} d\bar{l} = \int_0^{\sqrt{\mu}} E d(\sqrt{\mu}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\mu}{\sqrt{\mu(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)}}$$

Capacitatea C_μ a unui condensator având drept armături suprafața discului eliptic de bază și suprafața unui semielipsoid confocal este:

$$C_\mu = \frac{q}{V_\mu} = \frac{4\pi \cdot \epsilon_0}{\int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)\mu}}},$$

Pentru rezistența R_μ dintre aceste suprafețe se obține expresia :

$$R_\mu = \frac{\rho\epsilon_0}{C} = \frac{\rho}{4\pi} \int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\mu}{\sqrt{\mu(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)}}$$

în ipoteza $a = b$, potrivit căreia elipsa de contact degenerază în cerc, rezistența R_μ devine:

$$R_\mu = \frac{\rho}{2\pi a} \arctg \frac{\sqrt{\mu}}{a}$$

Rezistența R_{1s} , corespunzătoare stricțiunii liniilor de curent în una din piesele de contact, capătă expresia:

$$(11.4) \quad R_{1s} = \lim_{\mu \rightarrow \infty} R_\mu = \frac{\rho}{4a},$$

pentru rezistența de stricțiune corespunzătoare întregului contact se obține:

$$(11.5) \quad R_s = \frac{\rho}{2a}$$

11.1.2. Influența forței de apăsare, asupra rezistenței de contact

Expresia analitică a dependenței dintre forța, F_c , de apăsare în contact și rezistența de contact este o relația necesară în proiectarea contactelor electrice.

În cazul contactului punctiform, realizat cu deformare plastică, raza microsuprafeței circulare de contact se calculează cu relația (11.1), din care rezultă:

$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi H}}$$

Introducând valoarea lui a în relația rezistenței de stricțiune, se obține:

$$(11.6) \quad R_s = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F_c}}$$

unde: R_s = rezistența de stricțiune a contactului punctiform;

ρ = rezistivitatea materialului pieselor de contact;

F_c = forța de apăsare în contact;

H = duritatea materialului de contact, considerată pentru zona deformărilor plastice.

Relația pune în evidență faptul că un contact punctiform poate fi considerat o porțiune a căii de curent, având rezistența electrică dependentă de forța de apăsare în contact.

Suprafața reală de contact a contactelor plane se constituie ca sumă a tuturor microsuprafețelor de contact de tip punctiform.

Dacă suprafața de contact este formată din mai multe puncte de contact (n puncte), situate la o distanță suficient de mare între ele, și dacă ținem cont și de pelicula perturbatoare, atunci:

$$\begin{aligned}
 R_c &= R_s + R_p \\
 R_s &= \frac{\rho}{2an}; \quad R_p = \frac{Rp_0}{A_0} = \frac{Rp_0}{\pi na^2} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} R_s &= \frac{\rho}{2an}; \\ R_p &= \frac{Rp_0}{A_0} = \frac{Rp_0}{\pi na^2} \end{aligned}} \right\} \Rightarrow R_c = \frac{\rho}{2an} + \frac{Rp_0}{\pi na^2} \\
 \text{dar: } A_c &= \frac{F_c}{\xi H} = n\pi a^2 \Rightarrow a = \sqrt{\frac{F_c}{n\pi\xi H}} \\
 (11.7) \quad R_c &= \frac{\rho}{2n} \sqrt{\frac{n\pi\xi H}{F_c}} + \frac{Rp_0}{\pi n} \frac{n\pi\xi H}{F_c} \Rightarrow R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi\xi H}{nF_c}} + \frac{Rp_0\xi H}{F_c}
 \end{aligned}$$

Deoarece numărul punctelor de contact, n , depinde de forța de apăsare în contact, F_c , și de duritatea materialului H , relația poate fi utilizată numai dacă se cunoaște numărul punctelor de contact.

În calculele de proiectare se utilizează relația restrânsă:

$$(11.8) \quad R_c = cF_c^{-m} + eF_c^{-1}$$

valorile parametrilor c , e , m fiind determinate experimental.

În figura 11.8, se prezintă dependența rezistenței de contact în raport cu forța de apăsare.

În funcție de natura materialelor și de varianta constructivă, există valori limită ale forței de apăsare, la a căror depășire nu se mai obțin scăderi vizibile ale rezistenței de contact.

Fenomenul de histerezis, prezent în curbele din figura 11.8, se explică prin apariția, la creșterea forței de apăsare F_c , a unor deformări plastice ale vârfurilor de contact. Aceasta conduce la creșterea numărului contactelor elementare, astfel încât valorile rezistenței de contact sunt mai mici la scăderea forței de apăsare, comparativ cu creșterea acesteia.

Un contact electric, parcurs de curentul de intensitate I , se caracterizează prin căderea de tensiune pe contact U_c , dată de relația:

$$(11.9) \quad U_c = R_c I,$$

R_c fiind rezistența de contact.

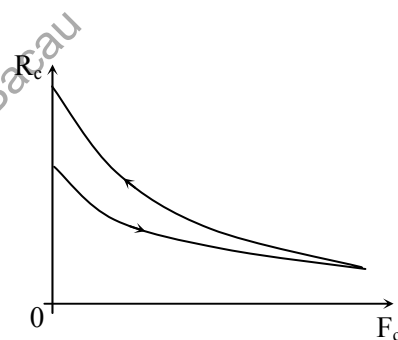


Fig. 11.8: Caracteristica rezistenței de contact.

11.2. Solicitățile contactelor electrice

11.2.1. Regimul permanent de încălzire al contactelor

Un contact electric prezintă o rezistență de contact, în care va apare efectul Joule-Lentz, deci se va produce o încălzire suplimentată a zonei căii de curent unde se află contactul electric.

Fie un contact punctiform, parcurs de un curent $I = m \cdot i$, unde m este numărul tuburilor de curent care străbat suprafața de contact A_c .

Ipoteze simplificatoare:

- fiecare tub de curent produce un flux termic propriu, care se va propaga numai în lungul acestuia – nu există schimb de căldură între tuburile de curent;
- piesele din care sunt confecționate cele două contacte sunt din același material;
- suprafețele echipotențiale ale tubului, s_x , sunt și izoterme.

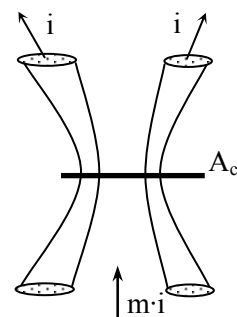


Fig. 11.9: Tuburile de curent prin contact.

Fluxul termic transmis prin suprafața S_x este:

$$P_x = -\lambda S_x \frac{d\theta}{dx} \left(\bar{P} = \bar{E} \cdot \bar{J}; \quad P = \int_V \rho J^2 dV = Ri^2 \right)$$

$$\text{dar: } P_x = EJxS_x = \frac{u_c S_x}{\rho} \cdot \frac{du_c}{dx}$$

$$\Rightarrow (11.10) \quad (*) \quad \boxed{u_c du_c = -\lambda \rho d\theta}$$

Considerând că diferența dintre temperatura la suprafața de contact, θ_c , și temperatura de regim permanent a căii conductoare, θ_p , este relativ mică ($5 \div 10^\circ\text{C}$), ecuația (11.10) se integrează considerându-se pentru produsul $\lambda\rho$ o valoare medie $(\lambda\rho)_{\text{med}}$:

$$\int_0^{u_c} u_c du_c = -(\lambda\rho)_{\text{med}} \int_{\theta_c}^{\theta} d\theta \Rightarrow$$

$$(11.11) \quad \theta_c - \theta = \frac{u_c^2}{2(\lambda\rho)_{\text{med}}}$$

Pentru un punct de pe calea de curent, suficient de îndepărtat de contact, pentru care temperatura de regim permanent devine θ_p , și tensiunea $u_c = 0,5 \cdot U_c$, rezultă:

$$(11.12) \quad \theta_c - \theta_p = \frac{U_c^2}{8(\lambda\rho)_{\text{med}}}$$

unde: U = căderea de tensiune pe contact;

θ_c = temperatura de regim permanent pe suprafața de contact.

Dacă temperatura θ_c are valori apropiate de punctul de topire al metalului contactului, ecuația (11.10) se integrează în ipoteza legii Wiedemann-Prantz-Lorentz:

$\lambda\rho = LT$, unde: T = temperatura absolută a contactului; λ , ρ = conductivitatea termică, respectiv rezistivitatea metalului pieselor de contact; $L = 2,4 \cdot 10^{-8} [\text{V}^2/\text{K}^2]$ cifra Lorentz pentru metale.

Deoarece $d\theta = dT$, se obține: $\int_0^{u_c} u_c du_c = -L \int_{T_c}^{T_p} T dT$, sau

$$(11.13) \quad (**) \quad \boxed{u_c^2 = L(T_c^2 - T_p^2)}$$

T_c fiind temperatura suprafeței de contact.

Pentru $x \rightarrow \infty$, $T = T_p$ și $u_c = 0,5 \cdot U_c$, obținem:

$$(11.14) \quad T_c = \sqrt{\frac{U_c^2}{4L} + T_p^2},$$

relație ce permite calculul temperaturii de regim permanent T_c a suprafeței de contact atunci când se cunosc valorile căderii de tensiune pe contact, u_c , și temperatura de regim permanent T_p , a căii de curent.

Legătura dintre T_c și F_c :

În baza modelului sferei de conductivitate infinită, pentru rezistența de stricțiune a unei pelicule semisferice de rază r și grosime dr , se poate scrie: $dR_s = \frac{\rho dr}{2\pi r^2}$,

de asemenea, prin diferențierea relației (11.13), se obține: $du_c = -\frac{\sqrt{LT}dT}{\sqrt{T_c^2 - T^2}}$

deoarece se mai poate scrie: $\boxed{du_c = i \cdot dR_s}$, unde i este intensitatea curentului care traversează contactul punctiform obținem:

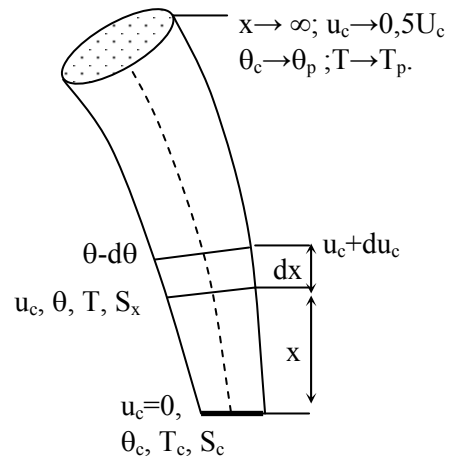


Fig.11.10. Bilanțul termic printr-un tub de curent.

$$-\int_{T_c}^{T_p} \frac{dT}{\sqrt{T_c^2 - T^2}} = \frac{i\sqrt{L}}{2\pi\lambda} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2}, \text{ după integrare, rezultă: } \arccos \frac{T_p}{T_c} = \frac{i\sqrt{L}}{2\pi a\lambda} \left. \vphantom{\int_{T_c}^{T_p}} \right\} \Rightarrow$$

dar forța de contact este: $F_c = a^2 \cdot \pi \cdot H$

$$(11.15) \quad F_c = \frac{LHi^2}{4\pi\lambda^2 \left[\arccos \left(\frac{T_p}{T_c} \right) \right]^2}$$

Încălzirea de regim permanent se verifică prin relația:

$$T_c - 273,15 \leq \theta_{ad}^c$$

unde θ_{ad}^c este temperatura admisibilă corespunzătoare solicitării termice de lungă durată.

11.2.2. Încălzirea la scurtcircuit a contactelor electrice

Caracteristica rezistența de contact funcție de căderea de tensiune pe contact este dată în figura 11.11.

La creșterea rezistenței de contact R_c sau la creșterea intensității curentului prin contact ($U_c = R_c \cdot I$), căderea de tensiune pe contact crește și poate atinge chiar valorile U_p sau U_t , corespunzătoare plastifierii, respectiv topirii contactului în zona de contact.

U_{cad} este căderea de tensiune pe contact admisibilă în regim de lungă durată.

Dacă în timpul funcționării în regim de lungă durată $U_c \leq U_{cad} < U_p$, în timpul scurtcircuitelor, căderea de tensiune pe contact, U_c , poate atinge valoarea U_t , ajungându-se astfel la topirea și sudarea suprafețelor de contact.

O solicitare mai intensă se întâlnește atunci când curentul de scurtcircuit este stabilit prin închiderea contactelor; datorită forței în contact mici, rezistența de contact este mare, deci energia termică degajată este mare, de unde rezultă temperaturi mari, deci topirea metalului și sudarea acestora.

La scurtcircuit se consideră un regim termic adiabatic, calculul contactului punctiform se face pe baza modelului sferei de conductivitate infinită și se urmăresc condițiile pentru care stabilitatea termică la scurtcircuit a contactului este asigurată.

Ecuția de încălzirea a căilor de curent în regim tranzitoriu este:

$$(11.16) \quad \rho j_k^2(t) = \gamma c \frac{d\theta}{dt},$$

unde: $\rho = \rho_0(1 + \alpha_R \theta)$ - rezistivitatea materialului contactului;

$c = c_0(1 + \beta \theta)$ - căldura specifică a materialului de contact.

$$(11.17) \quad j_k(t) = \frac{i_k(t)}{s_0} = \frac{i_k(t)}{2\pi a^2},$$

unde: i_k = intensitatea curentului de scurtcircuit care parcurge contactul;

a = raza microsuprafeței de contact,

deci, avem:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_R \theta) \frac{i_k^2(t)}{4\pi^2 a^4} = \gamma c_0(1 + \beta \theta) \frac{d\theta}{dt} \quad \left| \text{integrăm pe durata } t_k, \text{ de existență a arcului electric.} \right.$$

Ecuția solicitarea termică a contactului elementar: $\sigma(t_k) = (2\pi a^2)^2 R(\theta_0, \theta_k)$

Solicitarea termică la scurtcircuit a contactului: $\sigma(t_k) = 4\pi^2 a^4 \int_0^{t_k} j_k^2 dt = \int_0^{t_k} i_k^2 dt$;

Rigiditatea termică la scurtcircuit a contactului:

$$R(\theta_0, \theta_k) = \int_{\theta_0}^{\theta_k} \frac{\gamma c_0(1 + \beta \theta)}{\rho_0(1 + \alpha_R \theta)} d\theta = \frac{\gamma c_0}{\rho_0} \left[\frac{\beta}{\alpha_R} (\theta_k - \theta_0) + \frac{\alpha_R - \beta}{\alpha_R^2} \ln \frac{1 + \alpha_R \theta_k}{1 + \alpha_R \theta_0} \right]$$

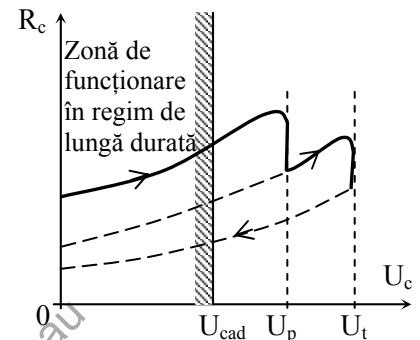


Fig. 11.11: Caracteristica $R_c(U_c)$ a arcului electric.

Solicitarea termică admisibilă la scurtcircuit este de forma: $\sigma(t_k) = 4\pi^2 a^4 R(\theta_{ad}^c, \theta_{kad}^c)$,

unde: rigiditatea termică $R(\theta_{ad}^c, \theta_{kad}^c)$ se calculează pentru :

$\theta_0 = \theta_{ad}^c$ - valoarea admisibilă a temperaturii de contact în regim de lungă durată;

$\theta_k = \theta_{kad}^c$ - valoarea admisibilă a temperaturii în regim de scurtă durată (scurtcircuit).

Dar $\sigma(t_k) = I_{ke}^2$, unde I_{ke} este curentul de scurtcircuit echivalent, care produce același efect termic ca și i_k într-o secundă.

Condiția de stabilitate termică este: $I_{ke} \leq \sqrt{\sigma_{ad}}$, $I_{ke} \leq 2\pi a^2 \sqrt{R(\theta_{ad}^c, \theta_{kad}^c)}$

Un contact electric este stabil din punct de vedere termic la scurtcircuit, dacă rezistența de contact este suficient de mică, fapt care reclamă valori corespunzătoare pentru forța F_c , de apăsare în contact. Relația de verificare a forței de apăsare în contact, pentru un curent de scurtcircuit dat este:

$$F_c \geq \frac{H(\theta_{kad}^c) I_{ke}}{2\sqrt{R(\theta_{ad}^c, \theta_{kad}^c)}}, \quad \text{unde: } H(\theta_{kad}^c) \text{ este duritatea metalelor pieselor de contact,}$$

considerată la temperatura θ_{kad}^c .

11.2.3. Solicitățile electrodinamice ale contactelor electrice

Stricțiunea liniilor de curent în zona contactelor elementare constituie cauza producerii forțelor electrodinamice de repulsie în contact, care acționează în sensul depărtării pieselor de contact, una în raport cu cealaltă.

Forța de respingere este cauzată de interacțiunea între curent și câmpul magnetic propriu din interiorul conductorului. Pentru calculul forței electrodinamice de repulsie dintre două piese de contact cilindrice de rază R , este util modelul sferei de conductivitate infinită de rază a .

Forța elementară de repulsie, $d\vec{F}$, care se exercită asupra unui tor având secțiunea radială de dimensiuni infinitezimale ($dr, d\alpha$) și conținut în una din piesele de contact (figura 11.12) se scrie sub forma:

$$d\vec{F} = di(d\vec{r} \times \vec{B}).$$

Componenta dF_z a acestei forțe, orientată după axa Oz , rezultă de forma:

$$dF_z = B di dr \cos \alpha$$

În punctele M inducția magnetică B este produsă de curentul având intensitatea $i(\alpha)$, care parcurge calota sferică definită prin unghiul α . Considerând densitatea de curent constantă pe orice semisferă de centru O , avem:

$$i(\alpha) = \frac{i}{2\pi r^2} 2\pi r(r - r \sin \alpha) = i(1 - \sin \alpha), \quad di(\alpha) = -i \cos \alpha d\alpha$$

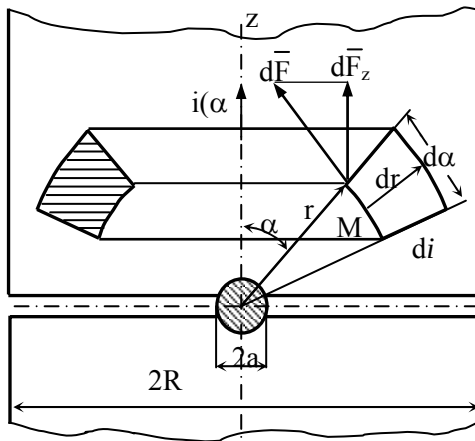


Fig. 11.12. Forța electrodinamică de repulsie în contact.

în punctul M , inducția magnetică este:

$$B = \frac{\mu_0 i(\alpha)}{2\pi r \cos \alpha} = \frac{\mu_0 i(1 - \sin \alpha)}{2\pi r \cos \alpha}$$

$$dF_z = \frac{\mu_0 i(1 - \sin \alpha)}{2\pi r \cos \alpha} (-i \cos \alpha d\alpha) dr \cos \alpha, \quad \text{prin}$$

integrare rezultă:

$$dF_z = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi} \int_a^R \frac{dr}{r} \int_{\pi/2}^0 (\sin \alpha - 1) \cos \alpha d\alpha,$$

cu expresia finală, pentru forța F , de repulsie în contacte:

$$(11.18) \quad F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{R}{a}$$

unde: i = intensitatea curentului care parcurge contactul;

R = raza pieselor de contact;
 a = raza contactului elementar,
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] – permeabilitatea magnetică a vidului.

Datorită forțelor electrodinamice de repulsie, forța rezultantă de apăsare în contact scade încât are loc și scăderea valorilor razei a ; aceasta conduce la creșterea în continuare a forței de repulsie, în cele din urmă ajungându-se fie la topirea și sudarea contactului, fie la autodeschiderea acestuia. Ambele consecințe se elimină prin dimensionarea corespunzătoare a resorturilor care asigură forța de apăsare în contact și prin alegerea judicioasă a geometriei căilor de curent în zona contactului. Pe această ultimă cale, este posibilă compensarea efectelor forțelor electrodinamice de repulsie în contact, prin cele ale unor forțe electrodinamice de contur. Un exemplu în acest sens este prezentat în figura 11.13.

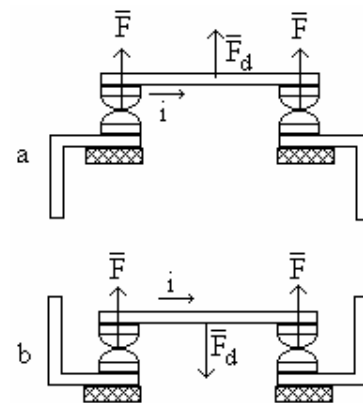


Fig. 11.13. Compensarea forțelor de repulsie prin forțe de contur F_d .

11.3. Procese fizico-chimice care afectează starea suprafeței de contact.

Deoarece starea suprafețelor contactelor electrice constituie un element hotărâtor în ceea ce privește durata de viață a acestora, exploatarea rațională a echipamentelor de comutație cu contacte impune cunoașterea atât a proceselor care pot altera suprafața de contact cât și a măsurilor tehnice necesare pentru încadrarea contactelor în durata de viață proiectată.

Sunt trei categorii de procese care duc la uzura contactelor, și anume: - procese fizice: coroziunea; -procese electrice: electrocoroziunea sau uzura electrică; -procese chimice: oxidarea.

Coroziunea este de mare intensitate atunci când piesele de contact sunt realizate din materiale diferite, deci au potențiale electrochimice de valori diferite. Între aceste materiale se inițiază procese de electroliză locală, favorizate de prezența umezelii, a unor gaze active (amoniac, bioxid de sulf, clor) sau de depunerea, în zona de contact, a unor săruri.

Limitarea coroziunii se realizează prin utilizarea unor metale cu potențiale electrochimice de valori cât mai apropiate, sau prin acoperirea contactelor cu lacuri anticorozive, sau prin galvanizarea pieselor de contact. o soluție modernă constă în utilizarea inhibitorilor de coroziune, care sunt săruri de aminoacizi care se depun sub forma unor pelicule pe suprafața de contact, încetinind reacțiile electrochimice.

Electroeroziunea este provocată de arcul electric, în special de arcul electric scurt, cu lungimi de câțiva milimetri, a cărui energie termică se cedează pieselor de contact prin conducție.

Creșterea rapidă a temperaturii contactelor la valori mari duce la evaporarea la suprafață a metalului, proces denumit și arderea contactelor, ceea ce conduce în timp la scăderea masei pieselor de contact.

Intensitatea procesului de uzură electrică este hotărâtoare pentru durata de viață a contactelor, caracterizată prin numărul maxim admisibil de acționări în sarcină. Acesta se poate calcula cu ajutorul unor relații verificate experimental, sau poate fi determinat din curbe, puse la dispoziție de firmele constructoare.

$$N = 10^9 \frac{Q}{qI^2}$$

unde: Q [kg] = uzura contactului (pierdere de masă după N întreruperi),
 I [A] = intensitatea curentului întrerupt;
 $q = 5 \cdot 10^{-5}$ [kg/A²] – constantă de material.

Limitarea electroeroziunii se obține prin:

- în cazul echipamentelor de c.c., prin limitarea supratensiunilor de comutație și a duratei de ardere a arcului electric și prin utilizarea unor materiale cu punct de topire ridicat;
- în c.a., realizarea unei viteze suficient de mari de alungire a coloanei arcului electric.

Electroeroziunea se mai produce și prin transportul de material între piesele de contact, fenomen denumit și migrație.

Migrația brută apare în cazul arcului electric scurt de c.c., amorsat la tensiuni de 20÷25 V și parcurs de curenți de 5÷10 A. Materialul contactelor este transportat de la catod (-) și depus la

anod (+). Dacă $U < 20 \text{ V}$ și $I < 5 \text{ A}$, transportul are loc de la anod la catod, procesul fiind cunoscut sub numele de migrație fină.

În exploatare, piesele de contact, supuse eroziunii prin migrație se recondiționează periodic, până la atingerea uzurii admisibile, după care se înlocuiesc.

Oxidarea este procesul chimic de combinare cu oxigenul, reacție ce este mai rapidă odată cu creșterea temperaturii. Combaterea oxidării contactelor se obține prin limitarea temperaturilor de funcționare a acestora, prin acoperirea galvanică a suprafețelor de contact cu metale ca Ag, Ni, Cd, Zn sau prin utilizarea unor substanțe antioxidante, sub formă de paste. O altă soluție, este montarea contactelor în stații protejate (ulei, vid, hexafluorură de sulf etc.).

11.4. Materiale pentru construcția contactelor

Materialele destinate construcției contactelor electrice trebuie să îndeplinească următoarele cerințe de baze:

- să prezinte conductivități electrice și termice cât mai mari;
- să aibă duritate și rezistență la oboseală de valori ridicate;
- să aibă temperaturi de topire și vaporizare mare;
- să fie rezistente la eroziune, uzură mecanică și la coroziune, iar peliculele disturbatoare de oxizi să prezinte conductivitate electrică de valori mari;
- să fie ieftine și ușor prelucrabile.

Trebuie remarcat faptul ca nici unul din metalele existente nu satisface integral cerințele enumerate, astfel încât, în construcția contactelor se adoptă soluții diferite, care să răspundă în mod rațional atât unor condiții de funcționalitate, cât și unor criterii tehnico-economice.

Principalele metale, cu proprietățile lor, utilizate în construcția contactelor electrice sunt: Cu, Ag, Au – se caracterizează prin conductivitate electrică și termică mare; paladiu (Pd) și platina (Pt) se comportă corespunzător sub raportul migrației fine; iar wolframul (W) și molibdenul (Mo) prezintă temperaturi de topire și de vaporizare ridicate, fiind recomandate pentru construcții intens solicitate sub acțiunea arcului electric.

Cuprul are elasticitate redusă, și acesta se aliază cu: Ag 2÷8%, Ag și Cd; Be 1,2÷2%, compoziție utilizată în construcția lamelor elastice de contact.

Un aliaj nou este CuNi4AlSi, ce poate înlocui aliajele Cu-Be, (Be este scump și rar).

Argintul, are duritate mică, prezintă tendință de sudare și rezistență slabă la electroeroziune. Acesta este folosit pentru acoperirea galvanică cât și pentru placarea contactelor, prin sudare sau lipire.

Aliajul AgCd are bune proprietăți pentru stingerea arcului electric.

Aluminiul: are conductivitate termică și electrică mai mici decât ale cuprului, dar este mai ușor și mai ieftin. Utilizarea Al este restrânsă la realizarea legăturilor fixe de contact, deoarece are duritate și elasticitate de valori reduse, iar oxidul de aluminiu are rezistivitate mare.

Wolframul are o bună stabilitate la contactul cu arc electric, conductivitatea termică și electrică sunt de valori mici, dar prezintă duritate ridicată și o bună rezistență mecanică. Se utilizează în construcția contactelor de rupere și a armăturilor de preluare a extremităților coloanei arcului electric de deconectare.

O largă utilizare în construcția contactelor electrice o au materialele metalo-ceramice, obținute prin sinterizare.

Cele mai frecvent întâlnite compoziții metalo-ceramice conțin două elemente: Cu-W, Cu-Mo, Ag-Ni, Ag-grafit, dar se pot întâlni și materiale sinterizate din trei elemente: Ag-W-Ni, Ag-Cd-Ni, Cu-W-Ni, Cu-Ni-grafit.

Metalele din grupa Cu, Ag, conferă materialelor metalo-ceramice conductivitate electrică și termică ridicată, celelalte elemente imprimând materialelor de contact o bună rezistență la uzură. Grafitul micșorează tendința de sudare și are rol de lubrifiant, în cazul contactelor alunecătoare.

Cursul nr. 13

Descărcătoare electrice

13.1. Generalități

DEFINIȚIE: Descărcătoarele sunt echipamente electrice care asigură protecția izolației instalațiilor electrice împotriva supratensiunilor.

Solicitările electrice la care este supusă izolația echipamentelor electrice sunt date de următoarele tensiuni:

- **tensiunea de serviciu** (50 Hz): solicitări de lungă durată, cu valori maxime prescrise;
- **supratensiuni temporare**: solicită izolația pe o durată scurtă și au valori mai mari decât tensiunea de serviciu;
- **supratensiuni de comutație**: solicitări de scurtă durată, de regulă sub forma unor oscilații amortizate;
- **supratensiuni externe**: de origine atmosferică, care sunt supratensiuni cu durate foarte mici, având valori de vârf foarte mari.

În laborator, pentru încercările izolației supratensiunile sunt simulate astfel:

- supratensiuni temporare = tensiuni mărite, de frecvență industrială;
- supratensiunile de comutație și cele atmosferice = unde de impuls de tensiune.

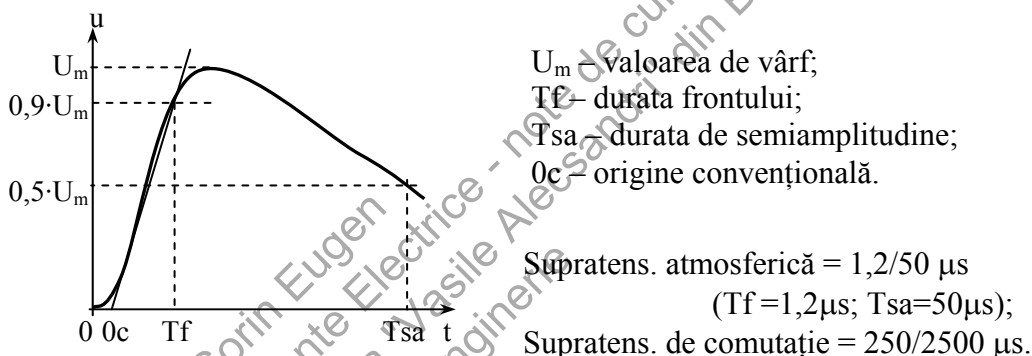


Fig. 13.1. Parametrii unde de impuls de tensiune

Izolația echipamentelor electrice se caracterizează, în funcție de solicitările menționate, prin:

- tensiune nominală;
- tensiune nominală de ținere la supratensiuni de frecvență industrială;
- tensiune nominală de ținere la supratensiuni de comutație și atmosferice.

DEFINIȚII:

Nivelul de izolație nominal al echipamentelor de JT se definește prin tensiunea nominală de ținere la supratensiuni de frecvență industrială (având valori între 1000 și 3500 V, funcție de tensiunea nominală U_n);

Nivelul de izolație nominal al echipamentelor de ÎT se definește prin tensiunea nominală de ținere la supratensiuni atmosferice, la care se adaugă fie tensiunea nominală de ținere la supratensiune de frecvență industrială (pt. $U_n = 1 \div 300$ kV), fie tensiunea nominală de ținere la supratensiuni de comutație (pt. $U_n > 300$ kV).

Constructiv un descărcător este alcătuit, de regulă, dintr-un dispozitiv care să permită amorsarea arcului în cazul supratensiunilor și dintr-un dispozitiv de stingere a curentului de însoțire de frecvență industrială.

În funcție de modul de realizare a dispozitivelor de amorsare și de stingere se disting următoarele categorii de descărcătoare:

- descărcătoare cu coarne;
- descărcătoare cu rezistență variabilă;
- descărcătoare cu suflaj magnetic;
- descărcătoare cu oxizi metalici.

13.2. Descărcătoare cu coarne

- se utilizează pentru protecția împotriva supratensiunilor a LEA și a PT de medie tensiune realizate în construcție aeriană, având puteri până la 250 kVA;
- se mai montează și pe izolatoarele lanț de 110 kV și 220 kV pentru a uniformiza gradientul de potențial în lungul izolatorului, asigurându-se astfel protecția suprafeței izolatorului împotriva efectelor termice ale arcului electric.

Se construiesc trei tipuri de descărcătoare cu coarne, și anume: a- cu coarne de protecție, b- cu tijă și b- cu inele ecran.

Funcționarea descărcătorului cu coarne constă în străpungerea spațiului disruptiv dintre electrozi, prin care sarcinile electrice ale supratensiunii sunt dirijate spre pământ sub forma unui curent de impuls, numit curent de descărcare. După descărcarea energiei unde de impuls, la tensiunea de serviciu prin coloana de arc circulă curentul de însoțire, care se va stinge prin alungire pe rampele electrozilor, la trecerea curentului prin zero.

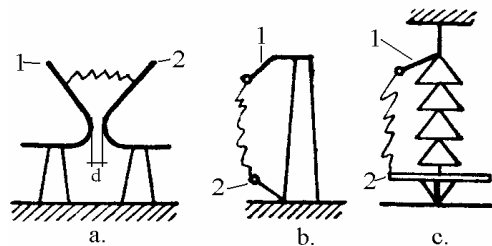


Fig. 13.2. Descărcătoare cu coarne.

1 – electrod racordat la LEA;
2 – electrod racordat la pământ.
d – distanța dintre electrozi.

13.3. Descărcătoare cu rezistență variabilă – DRV.

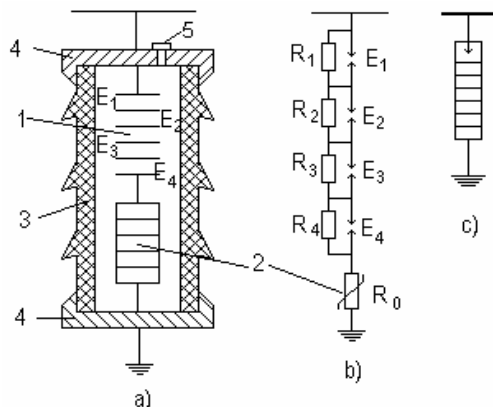


Fig. 13.3. Elementele constructive ale DRV.

- 1 – lanț de eclatoare;
2 – rezistență neliniară;
3 – carcasă de porțelan;
4 – capace metalice de etanșare;
5 – supapă mecanică.
- a) partea activă a unui descărcător cu rezistență variabil;
b) schema electrică echivalentă a unui DRV;
c) simbolul unui DRV.

Partea activă a descărcătorului este formată din spațiile disruptive (eclatoarele) 1, înseriate cu rezistența variabilă 2, ce este alcătuită din mai multe discuri de carbură de siliciu înseriate.

Construcția este protejată de anvelopa de porțelan 3, prevăzută cu capacele frontale metalice 4, având rol de etanșare a construcției și de borne de conexiuni. În interiorul anvelopei se introduc substanțe higroscopice (clorură de calciu) sau azot uscat la presiune atmosferică.

În paralel cu eclatoarele $E_1 \div E_4$ sunt cuplate rezistențele de egalizare $R_1 \div R_4$, având rolul de a asigura o distribuție uniformă a tensiunii pe lanțul de eclatoare. Cu R_0 s-a notat rezistența variabilă, a cărei rezistență depinde de tensiunea aplicată la borne (varistor).

Eclatoarele sunt formate din discuri de tablă de alamă ambutasate și izolate între ele. La unele construcții, în zona eclatoarelor se montează piese din titanat de bariu, care mențin o stare de preionizare, favorabilă amorsării descărcărilor între electrozi.

Distanța dintre electrozi corespunde amorsării la tensiuni de 3÷6 kV.

Rezistența neliniară R_0 , este alcătuită din discurile 2, de carbură de siliciu (carborund), având diametre de 75÷100 mm și grosimi de 20÷70 mm.

Caracteristica tensiune-curent a rezistenței variabile (a discurilor de carbură de siliciu) se poate aproxima cu o relație de forma:

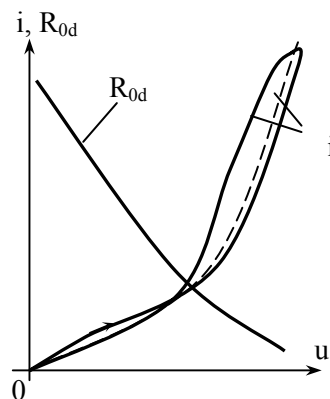


Fig. 13.4. Caracteristica volt-ampere și rezistența dinamică pentru un disc de carborund.

$$(13.1) \quad i = k \cdot u^\alpha$$

unde:

u – valoarea instantanee a tensiunii aplicate rezistorului;

k – constantă de material;

$\alpha = 4 \div 6$ – coeficient de neliniaritate.

Pentru rezistența dinamică a discurilor de carborund:

$$(13.2) \quad R_{0d} = \frac{du}{di} = \frac{1}{\alpha \cdot K \cdot u^{\alpha-1}}$$

Funcționarea DRV-urilor

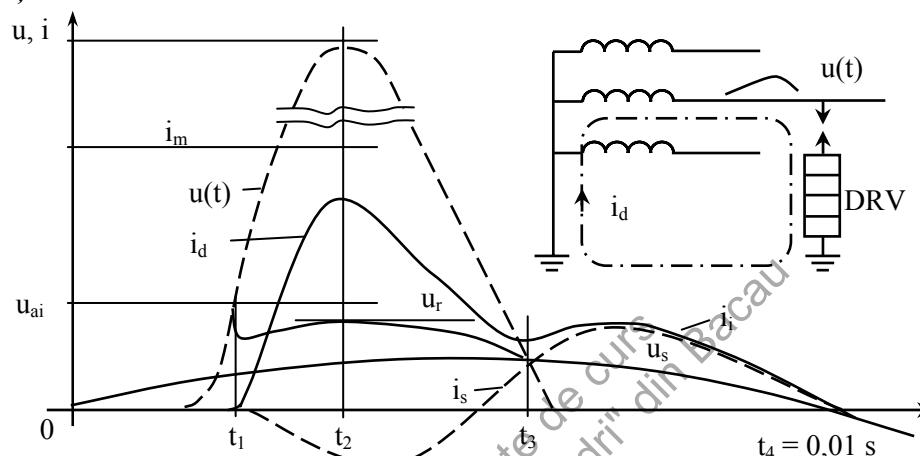


Fig. 13.5: Evoluția tensiunii și curentului pe durata funcționării unui descărcător cu rezistență variabilă.

În regim normal de funcționare, sub acțiunea tensiunii alternative de serviciu a liniei, $u_s(t)$, prin descărcător circulă un curent de conducție având intensitatea de $0,3 \div 1$ mA, care se închide la pământ prin capacitățile dintre electrozii eclatoarelor.

Sub acțiunea unei unde de supratensiune $u(t)$, în momentul t_1 , când se atinge tensiunea de amorsare la impuls u_{ai} , spațiile disruptive ale eclatoarelor sunt străpunse și prin descărcător circulă curentul de descărcare i_d , sarcinile electrice corespunzătoare unde de supratensiune fiind conduse la pământ.

Creșterea tensiunii $u(t)$ determină scăderea rezistenței dinamice R_{0d} , unda de supratensiune fiind limitată în amplitudine. Valoarea maximă, u_r , a tensiunii la bornele descărcătorului după amorsare, se numește tensiune reziduală.

Începând din momentul t_3 , sub acțiunea tensiunii alternative de serviciu, $u_s(t)$, a liniei, în canalele descărcării inițiale dintre eclatoare se dezvoltă descărcări prin arc electric, parcurse de curentul de însoțire, i_i . Intensitatea acestui curent este limitată prin creșterea rezistenței R_{0d} a discurilor de carbură de siliciu, încât în momentul t_4 , la prima sa anulare, se obține stingerea definitivă a arcului electric amorsat la eclatoare și revenirea descărcătorului în starea inițială.

Rezultă astfel, că în urma funcționării descărcătorului, unda de supratensiune $u(t)$, care ar fi solicitat izolația instalației la valoarea de vârf u_m , este limitată în amplitudine la valoarea u_r .

Caracteristica volt-ampere specifică funcționării unui descărcător DRV este reprezentată în figura 13.6, unde, în acest caz: $u_p = u_r$ – nivelul de protecție; u_r – tensiunea nominală a descărcătorului; u_{ai} – tensiunea de amorsare la impuls pe frontul unde; 1-caracteristica volt-ampere a discurilor din carbură de siliciu.

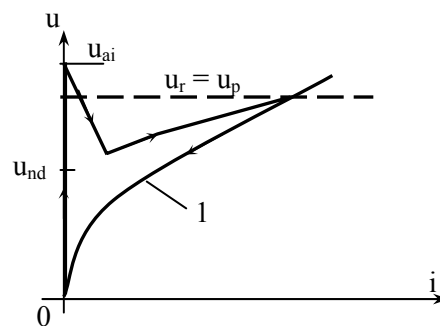


Fig. 13.6: Caracteristica volt-ampere a descărcătorului cu rezistență variabilă.

Deoarece funcționarea descărcătorului cu rezistență variabilă este foarte scurtă (sub 0,01 [s]), protecția prin relee a instalației nu sesizează punerea la pământ produsă, și deci nu acționează.

13.4. Descărcătoare cu rezistență variabilă și suflaj magnetic

Descărcătoarele electrice pentru tensiuni foarte înalte, care trebuie să facă față atât supratensiunilor atmosferice cât și de comutație, se realizează cu suflaj magnetic pentru stingerea arcului electric.

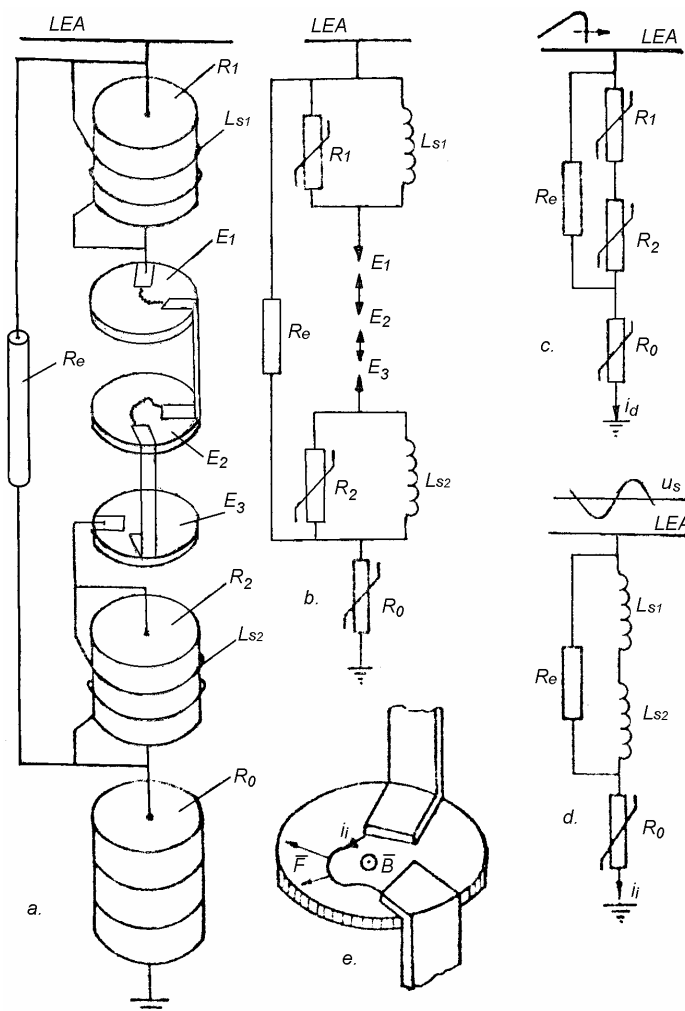


Fig. 13.7: Descărcător cu rezistență variabilă și suflaj magnetic.

Începând din momentul t_3 , curentul de însoțire i_i , produs de tensiunea de serviciu a liniei (având valorile mai mici decât cele ale unde de impuls incidente și frecvența industrială) circulă în principal pe traseul reprezentat în figura 13.7d, parcurgând bobinele de suflaj magnetic. Astfel, în zona eclatoarelor se produce un câmp magnetic de inducție B , figura 13.7e, arcul electric fiind supus forțelor electromagnetice F , care îl introduc în camera de stingere cu pereți reci (nefigurate). Se asigură în acest fel întreruperea curentului de însoțire la prima anulare a intensității acestuia.

Caracteristica volt-ampere corespunzătoare funcționării unui descărcător tip DRVM este reprezentată grafic în figura 13.8, unde notațiile au aceleași semnificații ca la figura 13.6.

13.5. Parametrii și caracteristicile descărcătoarelor cu rezistență variabilă

Capacitatea de descărcare = proprietatea descărcătorului de a permite, fără să se deterioreze, circulația unor curenți de impuls, specificați ca număr, formă și amplitudine.

Construcția unui descărcător tip DRVM este dată în figura 13.7, unde R_0 , R_1 , R_2 , sunt elemente de tip varistor din carbură de siliciu, E_1 , E_2 , E_3 eclatoare, R_e – rezistor liniar de egalizare; bobinele de suflaj magnetic de inductanțe L_{s1} , L_{s2} sunt conectate în paralel cu varistoarele R_1 , R_2 . În figura 13.7b este reprezentată schema electrică echivalentă a unui descărcător DRVM.

Până în momentul t_3 , figura 13.5, funcționarea descărcătoarelor tip DRV și DRVM decurge în același mod. Traseul pe care circulă curentul de descărcare, i_d , la descărcătoarele DRVM este reprezentat în figura 13.7c; acesta este justificat de faptul că rezistențele dinamice ale rezistoarelor R_1 , R_2 au valori mici (tensiunea are valori mari, figura 13.4) în timp ce reactanțele inductive ale bobinelor de suflaj magnetic sunt de valori mari (componentele spectrului armonic al curentului de descărcare sunt de frecvențe înalte).

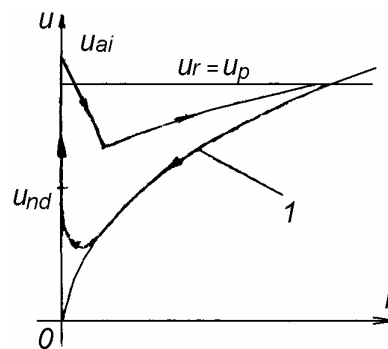


Fig. 13.8: Caracteristica volt-ampere a descărcătorului cu suflaj magnetic.

Verificarea capacității de descărcare se face trecând prin descărcător două impulsuri succesive de curent, undă 4/10 μ s și 20 de impulsuri dreptunghiulare de curent.

Curentul nominal = valoarea de vârf a intensității impulsului de curent 8/20 μ s, care se poate repeta fără deteriorarea descărcătorului.

Precizia cu care se obține amorsarea eclatoarelor și stingerea arcului electric dintre electrozii acestora. Precizia tensiunii de amorsare se îmbunătățește prin alegerea convenabilă a formei constructive a electrozilor și printr-o repartizare uniformă a tensiunii pe lanțul de eclatoare, realizabilă cu ajutorul divizoarelor rezistive de tensiune. Cu toate aceste măsuri, abaterea tip a valorilor tensiunii de amorsare nu poate scădea sub 2 – 3%.

Tensiunea de amorsare la impuls pe frontul undei, u_{ai} , reprezintă valoarea maximă a tensiunii la bornele descărcătorului, înainte de trecerea curentului de descărcare.

Tensiunea de 100% amorsare la impuls de 1,2/50 μ s reprezintă valoarea de vârf minimă a undei normale de impuls de tensiune care, aplicată repetat descărcătorului produce cel puțin 5 amorsări consecutive ale acestuia.

Pentru un descărcător dat, tensiunea de amorsare la impuls pe frontul undei divizată prin 1,15, tensiunea de 100% amorsări la impuls de 1,2/50 și tensiunea reziduală, u_r , sunt de valori apropiate, cea mai mare dintre acestea constituind nivelul de protecție, u_p .

Caracteristicile de protecție ale unui descărcător sunt curbele tensiune–timp de amorsare la undă de impuls normală, la care, pentru descărcătoarele destinate serviciului intensiv, se adaugă curbele tensiune–timp de amorsare la supratensiuni de comutație.

Ridicarea caracteristicii tensiune–timp de amorsare la undă de impuls normală se efectuează utilizând polaritatea impulsului care prezintă tensiunea de amorsare cea mai ridicată. Datele necesare se obțin aplicând impulsuri cu valori de vârf progresiv crescătoare, figura 13.9, pentru fiecare amorsare înregistrându-se valoarea maximă a tensiunii înainte de amorsare și durata până la amorsare, măsurată din originea convențională.

Caracteristica tensiune–timp de amorsare la supratensiuni de comutație se ridică experimental printr-un procedeu similar, pentru același tip de descărcător, aceasta obținându-se în prelungirea curbei tensiune–timp de amorsare la undă de impuls normală.

Diferențele funcționale existente între un descărcător cu coarne și unul cu rezistență variabilă sunt evidențiate cu ajutorul caracteristicilor tensiune–timp, în varianta amorsării pe frontul undei de impuls. Aceste caracteristici sunt prezentate grafic în figura 13.10, unde s-a notat:

- 1– nivelul nominal de ținere la undă de impuls normală, pentru izolația unui transformator;
- 2– nivelul de protecție, la același tip de undă, al unui descărcător DRV;
- 3– curba tensiune–timp de amorsare la undă de impuls normală, pentru un descărcător cu coarne.

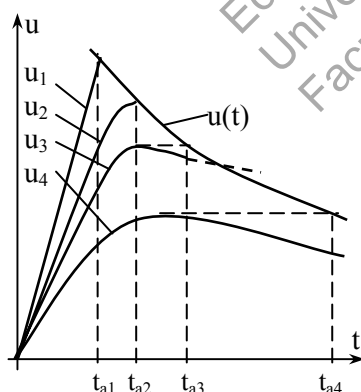


Fig. 13.9: Caracteristica de protecție tensiune-timp.

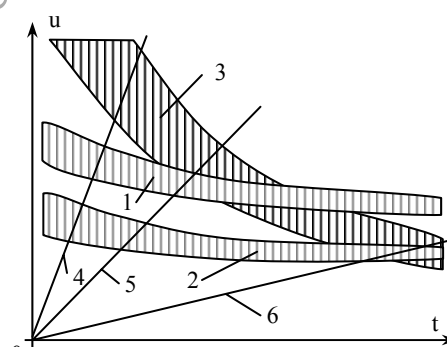


Fig. 13.10: Caracteristică tensiune-timp

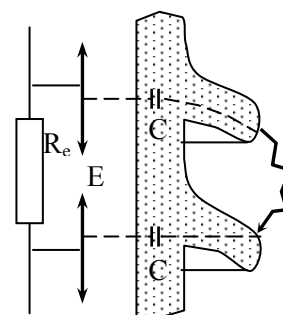


Fig. 13.11: Descărcări pe suprafața anvelopei de porțelan.

Din caracteristicile prezentate rezultă că în timp ce un descărcător de tip DRV asigură protecția izolației pentru unde de impuls cu pante mari, 4, 5, descărcătoarele cu coarne realizează protecția numai pentru unde de impuls, 6, cu pante de valori mici.

Un inconvenient important al descărcătoarelor prezentate constă în existența eclatoarelor în construcția acestora.

Prezența eclatoarelor favorizează producerea unor descărcări puternice pe suprafața

exterioară a anvelopei de porțelan, mai ales când aceasta este poluată (figura 13.11). Aceste descărcări influențează partea activă a descărcătorului, prin capacitățile parțiale C ; datorită scurtcircuitării unor spații disruptive, apar creșteri ale potențialelor pe altele, astfel încât devine posibilă amorsarea accidentală completă a descărcătorului.

Utilizarea tensiunilor foarte înalte în instalațiile de transport a energiei electrice reclamă realizarea unor nivele de protecție scăzute, astfel încât scumpirea izolației, odată cu creșterea tensiunii nominale, să nu devină excesivă.

Aceste cerințe apropie nivelul de protecție de cel al supratensiunilor temporare (la care descărcătorul nu trebuie să funcționeze), încât este necesară asigurarea unei înalte selectivități în funcționare pentru un astfel de descărcător.

În acest context, dezvoltarea tehnicii descărcătoarelor trebuie să vizeze obiectivul obținerii unor materiale cu proprietăți de varistor, având caracteristica volt-ampere cât mai aproape de cea ideală, reprezentată grafic în figura de mai sus.

13.6. Descărcătoare cu oxizi metalici

Construcția și funcționarea descărcătoarelor cu oxizi metalici se bazează pe utilizarea, ca element cu caracteristică de tip varistor a unui material ceramic obținut prin sinterizare din oxizi metalici (ZnO , Bi_2O_3 , CoO , etc.). Structura masei sinterizate este aproape matricială, figura 13.12, conținând granule de ZnO , cu o bună conductivitate electrică, înconjurată de o peliculă foarte fină din Bi_2O_3 , care dă caracterul puternic neliniar al conducției electrice printr-un astfel de material.

Caracteristica volt-ampere a discurilor astfel obținute, reprezentată grafic în figura 13.13, este aproximabilă cu o relație de forma (13.1), coeficientul de neliniaritate având valori $\alpha > 20$. În aceste condiții, în construcția descărcătorului nu mai sunt necesare spațiile disruptive ale eclatoarelor și nici rezistoarele de egalizare. Variantele constructive realizate, figura 13.14, conțin elementele de bază ale unui descărcător cu oxizi metalici: 1-borne de conexiuni, 2-discuri din oxizi metalici, 3-piesă metalică, 4-corp din rășină sintetică turnată.

Sub acțiunea tensiunii de serviciu, prin descărcător trece un curent capacitiv de mică intensitate ($0,5 \div 3$ mA), punctul de funcționare situându-se pe porțiunea (1), de impedanță maximă, a caracteristicii. La apariția unei unde de impuls de tensiune, punctul de funcționare se deplasează pe porțiunea de impedanță mică (2), figura 13.13 și supratensiunea este limitată la valoarea nivelului de protecție u_p .

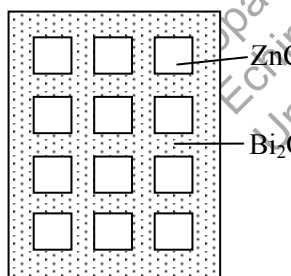


Fig. 13.12: Structura masei sinterizate a descărcătorului cu oxizi metalici.

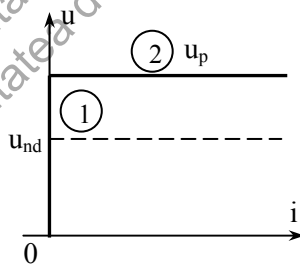


Fig. 13.13: Caracteristica volt-ampere ideală.

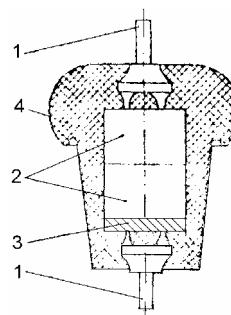


Fig. 13.14: Variantă constructivă de descărcător cu oxizi metalici.

În comparație cu tehnica clasică (DRV, DRVM) descărcătoarele cu oxizi metalici prezintă importante avantaje, dintre care se menționează:

- simplitatea constructivă, gabarit redus și fiabilitate sporită prin eliminarea eclatoarelor și a rezistențelor de egalizare;
- nivelul de protecție este cu circa 20% mai mic decât în cazul tehnicii clasice;
- stabilitate foarte bună a caracteristicii de protecție tensiune-timp.

Drept dezavantaje ale tehnicii pe bază de ZnO se poate menționa:

- creșterea puterii consumate în regim normal de funcționare odată cu mărirea temperaturii;
- existența unui pericol de ambalare termică datorită trecerii continue a unui curent de ordinul $1 \div 2$ mA prin varistoare.

Cursul nr. 14

Bobine de reactanță și bobine de stingere

14.1. Bobine de reactanță (limitatoare de curent)

14.1.1. Generalități

Sunt echipamente electrice care au drept element constructiv principal o înfășurare, cu sau fără miez feromagnetic, și care în regim electromagnetic cvasipermanent se caracterizează printr-o reactanță inductivă cu valoare mult mai mare decât rezistența (la frecvență industrială).

Bobinele de reactanță sunt destinate să limiteze valoarea curenților de scurtcircuit în circuitele electrice de mare putere și să asigure menținerea tensiunii la valori admisibile pentru a permite funcționarea echipamentelor electrice în regim de avarie. Deși construcția bobinelor de reactanță este simplă, folosirea lor conduce la ridicarea costului instalației și la mărirea pierderilor de putere și tensiune. Ele se construiesc, de regulă, fără miez pentru a se obține o inductanță cât mai constantă.

Introducerea miezului de fier permite o micșorare a gabaritelor bobinelor. Prin asocierea cu o bobină de compensare este posibilă obținerea unei reactanțe mici în regimul normal de funcționare. Dezavantajul bobinelor de reactanță cu miez de fier constă în aceea că în caz de scurtcircuit, când reactanța bobinei ar trebui să aibă cea mai mare valoare, intervine fenomenul de saturare a miezului.

Bobinele de reactanță se montează în instalațiile de distribuție de m.t.

Caracterizarea bobinei de reactanță se face, de obicei, cu ajutorul reactanței relative, care este o mărime adimensională și poate fi exprimată în procente.

$$(14.1) \quad X_* = 100 \sqrt{3} I_n X_n / U_n$$

unde: X_* – reactanța relativă, în %;

X_n – reactanța unei faze, în $[\Omega]$;

I_n – curentul nominal, în A;

U_n – tensiunea nominală, în V.

Deci, reactanța relativă reprezintă raportul dintre căderea de tensiune nominală prin bobină la trecerea curentului nominal și tensiunea pe fază nominală, exprimat în procente (dacă se neglijează rezistența activă a bobinei).

În figura 14.1 se prezintă semnul convențional al bobinelor de reactanță utilizat în schemele electrice.

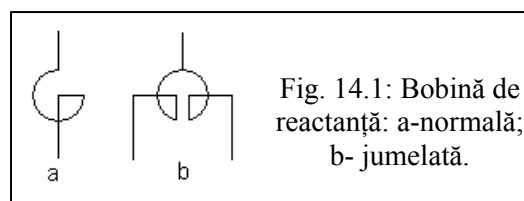


Fig. 14.1: Bobină de reactanță: a-normală; b-jumelată.

14.1.2. Funcționarea bobinelor de reactanță

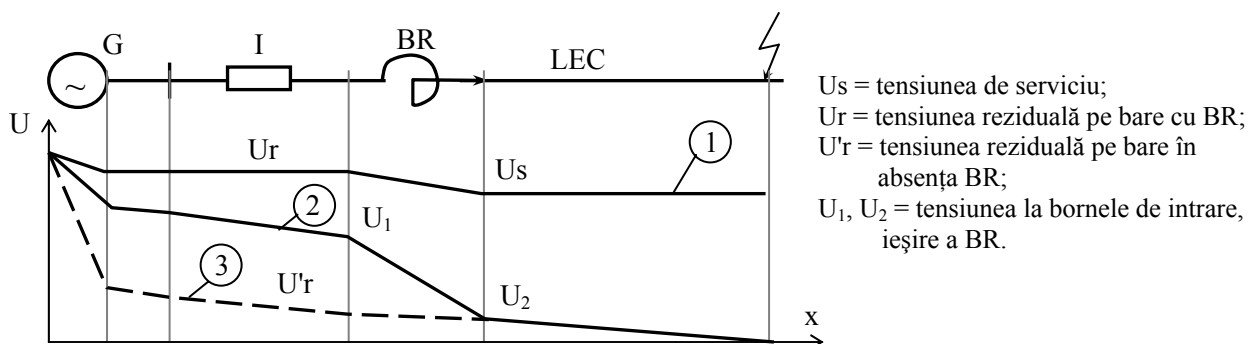


Fig. 14.2: Căderile de tensiune pe o plecare prevăzută cu bobină de reactanță.

Considerăm o bobină de reactanță BR pe o plecare de pe barele unei stații, figura 14.2, și

prezentăm efectele introducerii acestora asupra căderilor de tensiune în diferite regimuri de funcționare.

Curba 1 – variația tensiunii în regim normal de funcționare, cu bobină de reactanță.

Curba 2 – variația tensiunii în regim de scurtcircuit (în punctul K) – cu bobină de reactanță.

Curba 3 – variația tensiunii în regim de scurtcircuit (în punctul K) – fără bobină de reactanță.

În regim normal de funcționare este necesar ca pe bobina de reactanță să existe o cădere de tensiune de valori mici, curba 1, astfel încât, în aval de bobină, valoarea tensiunii să se încadreze în limitele tensiunii de serviciu U_s .

În cazul unui scurtcircuit, în punctul K, pe lângă limitarea intensității curentului de scurtcircuit la valorile impuse de stabilitatea termică a LEC și de capacitatea de rupere nominală a întrerupătorului I, bobina trebuie să asigure o astfel de cădere de tensiune pe reactanța proprie, încât, tensiunea reziduală pe bare, U_r , să se încadreze între anumite limite (curba 2) pentru a nu perturba funcționarea celorlalte plecări în linie de pe aceleași bare.

Pentru îndeplinirea acestor funcții, bobinele de reactanță se construiesc fără miez feromagnetic, încadrându-se astfel în categoria elementelor liniare de circuit.

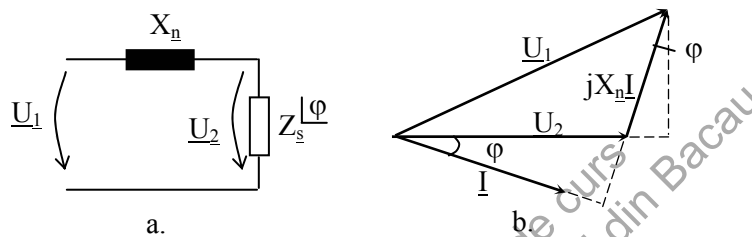


Fig. 14.3: Schema electrică echivalentă și diagrama fazorială corespunzătoare funcționării unei bobine de reactanță.

În figura 14.3. se prezintă schema electrică echivalentă și diagrama fazorială corespunzătoare funcționării unei bobine de reactanță, pentru care se determină pierderea relativă de tensiune, ΔU^* , definită prin relația:

$$(14.2) \quad \Delta U^* = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100$$

Din diagrama fazorială rezultă:

$$(14.3) \quad U_1^2 = (U_2 + X_n I \sin \varphi)^2 + (X_n I \cos \varphi)^2 \Rightarrow U_1 = \sqrt{U_2^2 + 2X_n I U_2 \sin \varphi + X_n^2 I^2}$$

$$\Delta U_* \% = \left(\sqrt{1 + 2 \frac{X_n I}{U_2} \sin \varphi + \frac{X_n^2 I^2}{U_2^2}} - 1 \right) 100,$$

unde: X_n = reactanța bobinei de reactanță;

Z_s = impedanța echivalentă a sarcinilor conectate pe linie.

În regim normal de funcționare, pentru $I = I_n$, $U_2 = U_n / \sqrt{3}$, și ținând cont de (14.1) $\Rightarrow$

$$(14.4) \quad \Delta U_* = \left(\sqrt{1 + 2 \frac{X_*}{100} \sin \varphi + \left(\frac{X_*}{100} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100$$

Pierderea relativă de tensiune ΔU_* pe o bobină de reactanță depinde numai de reactanța în valori relative a bobinei și de argumentul φ al impedanței de sarcină Z_s . În figura 14.4 sunt prezentate curbele $\Delta U_*(\cos \varphi)$.

- în regim normal de funcționare: $\cos \varphi \approx 1 \Rightarrow \Delta U_* \% \approx 1 \div 1,5\%$.
- în regim de scurtcircuit: $\cos \varphi = 0$, deci $\sin \varphi = 1 \Rightarrow \Delta U_* \% = X_* \%$.

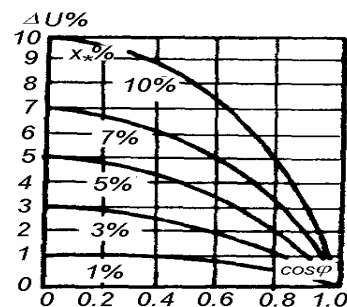


Fig. 14.4. Pierderea relativă de tensiune.

Bobinele de reactanță cu priză mediană, figura 14.5, (jumelate) permit reducerea pierderilor de tensiune în regim normal de funcționare, păstrând proprietățile de limitare a curenților de scurtcircuit.

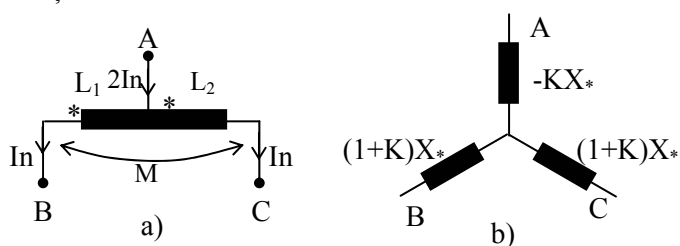


Fig. 14.5. Bobina de reactanță cu priză mediană (jumelată).

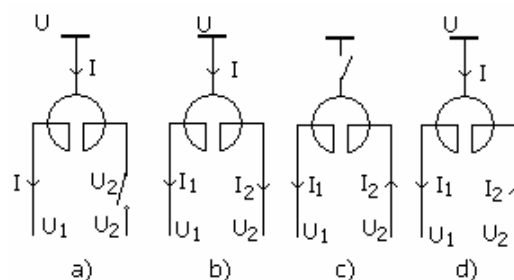


Fig. 14.6: Regimurile de funcționare a bobinei jumelate

Parametri caracteristici:

U_n = tensiunea nominală;

$2I_n$ = curentul nominal;

X_* = reactanța relativă, se calculează pentru o ramură, când cealaltă ramură nu este parcursă de curent ;

K = coeficient de cuplaj magnetic între ramuri: $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$;

M = inductanța mutuală dintre ramuri;

L_1, L_2 inductanțele proprii ale laturilor.

O bobină jumelată se poate afla în unul din următoarele regimuri de funcționare (fig. 14.6):

- cu o singură ramură conectată: $X_{*1} = X_*$;
- în regim de trecere: $X_{*tr} = 0,5 \cdot (1-K)(I_1 - I_2) \cdot X_*$;
- în regim longitudinal: $X_{*1} = 2(1+K)X_*$;
- în regim combinat.

Pierdere de tensiune relativă, în regim normal de funcționare, este cu atât mai mică cu cât coeficientul de cuplaj K este mai mare.

$\Delta U_*, \%$ este minim în cazul (b) – regim de trecere.

Dar pentru valori prea mari ale lui K , în regim de scurtcircuit, tensiunea U_2 are valori mari; în aceste condiții K se limitează la $0,3 \div 0,5$, astfel încât $U_2 < 1,5 \cdot U_n$.

14.1.3. Variante constructive de bobine de reactanță

Bobinele de reactanță se realizează obișnuit în două variante constructive diferite, în funcție de locul de amplasare (în interior sau în exterior).

Pentru tensiuni nominale până la 35 kV, BR se funcționează în instalații de interior și se construiesc de tip uscat, înfășurările fiind rigidizate în cadre de beton. Pentru tensiuni nominale mai mari de 35 kV, BR sunt de exterior și funcționează în cuve cu ulei mineral.

Condițiile principale pe care trebuie să le îndeplinească bobinele de reactanță sunt:

- stabilitatea termică și electrodinamică, la acțiunea curenților de scurtcircuit, să fie ridicată;
- căderile de tensiune în regim normal de funcționare să nu depășească $1 \div 3\%$ din tensiunea nominală;
- pierderile de putere în bobină să fie cuprinse între $0,2 \div 0,5\%$ din puterea care circulă prin bobină;
- să prezinte o izolație corespunzătoare între spire și față de pământ.

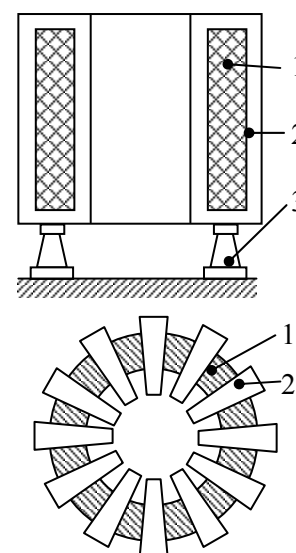


Fig. 14.7. Bobină de reactanță în cadre de beton: 1-bobina; 2-cadru de beton; 3-izolator.

Se construiesc bobine de reactanță de tipul BR, cu rigidizarea înfășurărilor în cadre de beton, cu tensiuni nominale de 7,2 kV, 12 și 17,5 kV; intensitatea curentului nominal cuprinsă între 75 și 2×2000 A, pentru reactanțe relative de 3%÷7%, 10%, 2×8%, 2×10%.

În figura 14.7 se prezintă o secțiune printr-o bobină de reactanță tip BR cu rigidizarea înfășurărilor în cadre de beton. Înfășurarea 1 a bobinei se execută din conductoare flexibile multifilare, izolate cu hârtie și țesătură de bumbac, între spire lăsându-se spații libere pentru ventilație naturală.

Pentru curenți nominali mari, înfășurarea se realizează cu mai multe conductoare în paralel, executându-se și transpunerea conductoarelor pentru evitarea curenților de circulație între spirele bobinelor conectate în paralel.

Bobinele de reactanță cu rigidizare în cadre de beton se obțin prin tehnologii relativ costisitoare de prelucrare și uscare, construcția rezultând cu dimensiuni de gabarit și greutate mari.

Rigidizarea înfășurărilor în rășini duce la reducerea gabaritului și a greutății, precum și la economii de cupru.

Pentru tensiuni mai mari de 35 kV se folosește uleiul drept izolan, bobinele fiind, de obicei, de tip exterior și realizate similar cu transformatoarele. Datorită calităților electroizolante ale uleiului, distanțele de izolație pot fi micșorate, acceptându-se în același timp creșterea densității de curent prin conductorul de bobinaj, încât întreaga construcție rezultă cu dimensiuni de gabarit mai mici.

Elementele constructive principale ale unei bobine de reactanță funcționând în ulei sunt date în figura 14.8, unde: 1 – cuva metalică, 2 – bobinajul, 3 – ecranul electromagnetic, 4 – izolatoarele de trecere, Φ_{st} – fluxul magnetic de dispersie, ce se închide prin pereții cuvei.

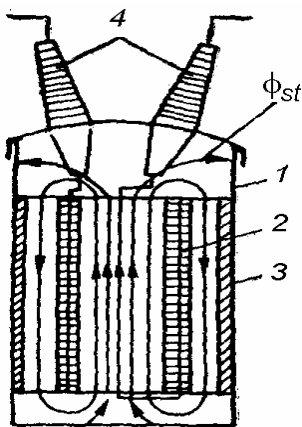


Fig. 14.8: Bobină de reactanță în ulei.

Utilizarea oțelului pentru confecționarea cuvei impune limitarea fluxului magnetic de dispersie ce se închide prin pereții acesteia, care altfel ar conduce la încălzirea excesivă a întregii construcții. O soluție tehnică aplicată în acest sens constă în montarea în cuvă, la exteriorul bobinei a ecranului cilindric 3, realizat din cupru sau aluminiu, care funcționând ca o spiră în scurtcircuit, conduce la micșorarea fluxului magnetic total produs de bobină. Trebuie avut însă în vedere, că prezența ecranului duce la obținerea unor valori mai mici pentru reactanța bobinei.

O altă posibilitate de limitare a fluxului magnetic ce se închide prin pereții cuvei constă în șuntarea magnetică a acestora cu ajutorul unor pachete de tole, amplasate din loc în loc în interiorul cuvei, pe suprafața acesteia. Fixarea mecanică a pachetelor de tole feromagnetice trebuie să reziste acțiunii forțelor electrodinamice de atracție produse de curenții de scurtcircuit ce trec prin bobină.

14.2. Bobine de stingere

Bobinele de stingere sunt echipamente utilizate pentru tratarea neutrului în rețelele electrice de medie tensiune, 6÷60 kV, având rolul de a compensa capacitatea echivalentă a liniilor, în cazul punerilor accidentale la pământ, facilitând astfel stingerea arcului electric la locul defectului.

În cazul apariției unei puneri la pământ, curentul care apare prin această bobină, datorită creșterii potențialului neutrului transformatorului la care este racordată, se închide prin locul defectului. El fiind în opoziție de fază cu curentul capacitiv care circulă prin același loc, contribuie la reducerea acestuia la o valoare care să permită stingerea arcului electric. Schema de principiu a compensării este indicată în figura 14.9a.

Bobinele de stingere sunt prevăzute cu dispozitive de reglaj care permit variația inducției

lor, astfel încât valoarea curentului inductiv să fie cât mai apropiată de valoarea curentului capacitiv. Operația de reglare a curentului inductiv I_L pentru a-l egala cu curentul capacitiv I_C de punere la pământ se numește **acordarea bobinei**.

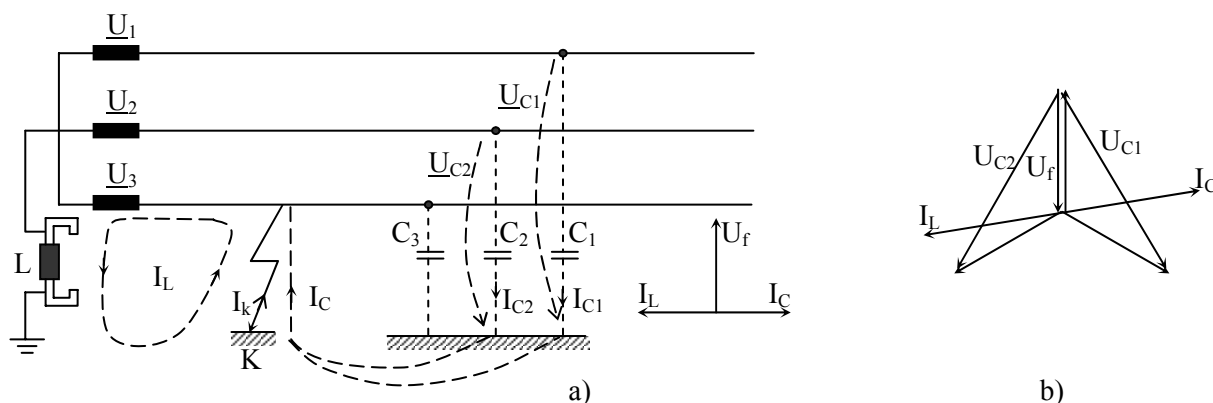


Fig. 14.9. Conectarea bobinei de stingere.

În cazul unei puneri la pământ monofazate, tensiunile fazelor sănătoase față de pământ U_{C1} , U_{C2} , devin egale cu tensiunea de linie, figura 14.9b. Tensiunea neutrului față de pământ devine egală cu tensiunea fazei U_f . În aceste condiții la locul de scurtcircuit (defect) circulă un curent I_k .

$$I_k = I_L + I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_L = \frac{U_f}{j\omega L}, \quad I_{C1} = I_{C2} = j\omega C U_C = \sqrt{3} \omega C U_f$$

unde s-a notat: $U_f = U_1 = U_2 = U_3$; $C_1 = C_2 = C_3 = C$.

Ținând cont de diagrama fazorială, curentul de defect se poate scrie:

$$(14.5) \quad I_k = U_f \left(\frac{1}{j\omega L} + 3j\omega C \right)$$

Curentul I_k va fi egal cu zero dacă $\frac{1}{j\omega L} + 3j\omega C = 0$, adică, dacă:

$$(14.6) \quad L = \frac{1}{3\omega C}$$

Când inductivitatea L capătă această valoare, intensitatea curentului care circulă prin locul defect se anulează iar arcul electric format se stinge. Relația (14.6) reprezintă condiția de acord a bobinei, care poate fi îndeplinită pentru o anumită capacitate a rețelei.

Păstrarea acordului când se modifică structura rețelei (modificarea capacității C) se poate realiza prin reglajul bobinei de stingere. Pentru aceasta se definește:

$$\text{gradul de acord } k = \frac{I_L}{I_C} \text{ și,}$$

$$\text{gradul de dezacord } \delta = 1 - k = \frac{I_C - I_L}{I_C}$$

În funcție de sistemul de reglaj al bobinei se deosebesc următoarele tipuri de bobine de stingere:

- cu ploturi reglabile (bobine Peterson cu reglaj în trepte);
- cu miezuri reglabile (reglaj continuu);
- cu magnetizare complementară în curent continuu.

14.2.1. Variante constructive de bobine de stingere

În țara noastră se execută primele două tipuri (cu ploturi și cu miezuri reglabile), și anume BS-6,6/3,8-200 kVA și BS 6,3/36,-370 kVA, precum și BS-RC 20/ $\sqrt{3}$ -600 kVA.

Cele două tipuri de bobine de stingere se folosesc în rețelele de 6 kV și sunt cu reglaj în trepte. Bobina BS-RC 20/ $\sqrt{3}$ -600 kVA se folosește la tratarea neutrului cu tensiune de 15-20 kV, pentru compensarea curenților capacitivi până la 50 A.

Această bobină (figura 14.10) se compune dintr-o înfășurare din cupru 2, care se montează în jurul a două miezuri mobile, 1. Miezurile și înfășurarea se amplasează într-o cuvă, 3, având toate anexele unei cuve de transformator. Reglajul continuu se asigură prin deplasarea în sus sau în jos a miezurilor cu ajutorul unui ax filetat antrenat de un motor prin intermediul unei roți melcate.

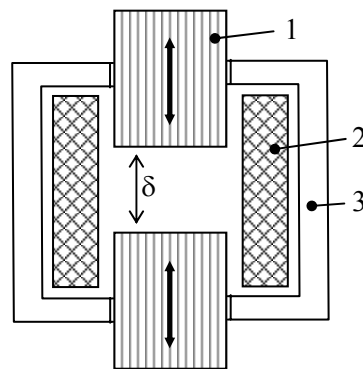


Fig. 14.10. Bobină de stingere cu reglaj continuu: 1-coloana centrală a miezului feromagnetic; 2-înfășurare cilindrică; 3-mantaua, δ -întrefier reglabil.

Bobinele de stingere se conectează la neutrul transformatoarelor sau generatoarelor prin intermediul separatoarelor. În cazul când neutrul nu este accesibil se folosește un transformator auxiliar de nul artificial care poate fi conectat la bare prin intermediul unui întrerupător. Transformatorul auxiliar nu trebuie să fie deconectat în timpul unei puneri la pământ în rețea pentru ca să nu fie distrus de supratensiuni.

În paralel cu bobina de stingere se recomandă montarea unui descărcător cu rezistență variabilă, a cărui tensiune nominală să fie egală cu tensiunea nominală a rețelei. Montarea descărcătoarelor este necesară pentru protecția înfășurărilor generatorului sau transformatorului la al cărui neutru se conectează bobina de stingere.

Cursul nr. 16

Înterupătoare cu hexafluorură de sulf

16.1. Hexafluorura de sulf SF₆ – caracteristici

Hexafluorura de sulf - SF₆- este un gaz apreciat pentru calitățile sale chimice și dielectrice. Tehnica de comutație care utilizează acest gaz a fost dezvoltată prima dată în 1970 odată cu tehnica comutării în vid.

16.1.1. Proprietățile gazului SF₆

În stare pură, gazul SF₆ este incolor, fără miros, neinflamabil și non toxic. Este insolubil în apă. Dar este unul din gazele cu efect de seră, introdus pe lista neagră a gazelor poluante de Protocolul de la Kyoto.

Este inert chimic: toate legăturile chimice dintre molecule sunt saturate și au o energie de disociere mare (+1,096 kJ/mol) de asemenea și o mare capacitate de evacuare a căldurii produsă de arcul electric (entalpie mare).

Pe durata arcului, în care temperatura poate ajunge la valori cuprinse între 15.000 și 20.000 K gazul SF₆ se descompune. Această descompunere este teoretic reversibilă: când curentul scade temperatura scade și ea iar ionii și electronii se pot recombina refăcând molecula de SF₆. Un mic număr de produse secundare sunt obținute din spargerea moleculei de SF₆ în prezența impurităților, precum dioxid de sulf sau tetrafluorură de carbon. Aceste produse secundare rămân confinate (închise) în anvelopă și sunt ușor absorbite de compușii activi, asemenea silicaților de aluminiu, care sunt deseori găsiți în mediul întrerupătoarelor.

Raportul 61634 al IEC asupra utilizării SF₆ în întrerupătoare oferă valorile standard care pot fi întâlnite după câțiva ani de funcționare. Cantitățile produse rămân mici și nu sunt primejdioase pentru oameni sau pentru mediu înconjurător: aer (câțiva ppm), CF₄ (40 – 600 ppm), SOF₂ și SO₂F₂ (în cantități neglijabile).

Metode de întrerupere în SF₆ și domeniile lor de aplicație:

În aparatele cu SF₆, contactele sunt amplasate în interiorul unei anvelope etanșe umplută cu gaz a cărui presiune variază funcție de tensiune și de parametrii proiectați. Aceste anvelope sunt în general, sigilate (capsulate) pe viață deoarece rata de scăpări poate fi ținută la un nivel foarte scăzut. Un sistem de măsurat presiunea și/sau densitatea poate fi instalat, ceea ce permite o monitorizare permanentă a presiunii gazului din anvelopă.

Există mai multe tipuri de tehnici ale dispozitivelor cu SF₆, diferențiate prin metodele de răcire a arcului electric și fiecare având caracteristici și domenii de aplicare diferite.

Concluzii privind proprietățile SF₆ ca mediu electroizolant:

- gaz electroizolant de mare rigiditate dielectrică, înregistrată chiar la presiuni relativ scăzute (0,15÷0,4 MPa);
- excelent fluid extingtor, capabil să transporte o mare cantitate de căldură.

Variante constructive de întrerupătoare cu SF₆:

- A. tehnica pneumatică;
- B. tehnica autopneumatică;
- C. cu suflaj magnetic;
- D. cu autoexpansiune;
- E. cu tehnică combinată.

16.2. Întrerupătoare cu SF₆ în tehnica pneumatică.

În construcțiile de acest tip, stingerea arcului electric se face prin suflarea cu gaz SF₆ la presiuni relativ ridicate. Circuitul de gaz este închis și conține două rezervoare, unul de joasă presiune (cca. 0,3 MPa) și unul de înaltă presiune (1,5 MPa), între care este amplasat un compresor. Echipamentele realizate în tehnica pneumatică sunt cunoscute ca funcționând la două presiuni. Hexafluorura de sulf la joasă presiune umple în întregime construcția întrerupătorului, realizând izolația întrerupătorului.

La deconectare, gazul stocat în rezervorul de înaltă presiune, străbate ajutajele camerei de stingere exercitând suflajul necesar stingerii arcului electric, după care se destinde în rezervorul de joasă presiune. Presiunea în rezervorul de înaltă presiune este refăcută prin intrarea în funcțiune a compresorului de SF₆.

Construcțiile de acest tip sunt realizate în două variante, cunoscute sub denumiri de *dead-tank*, respectiv *live-tank*, diferite prin modul de realizare a izolației căilor conductoare față de pământ.

Întrerupătorul de tip dead-tank are partea activă a polului închisă într-o cuvă metalică funcționând la potențialul pământului, umplută cu gaz SF₆ la joasă presiune, cu rol de realizare a izolației (figura 16.1).

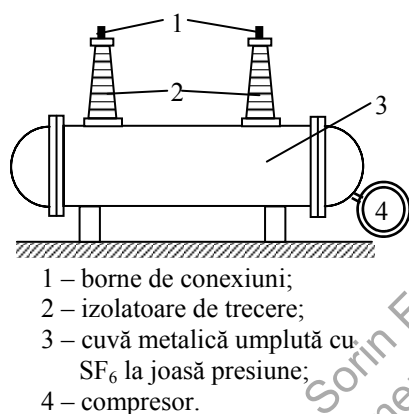


Fig. 16.1 Întrerupător dead-tank

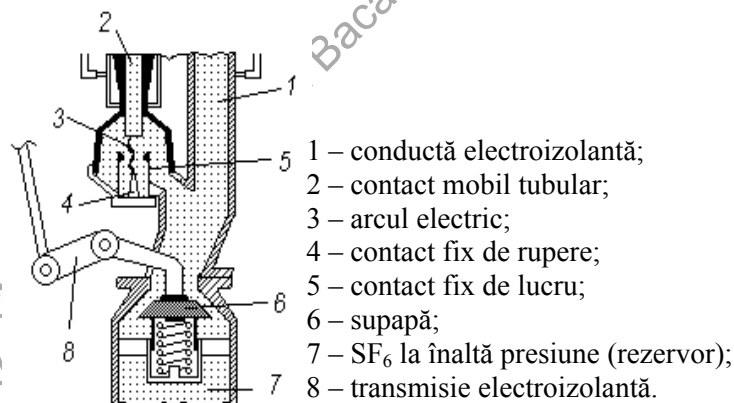
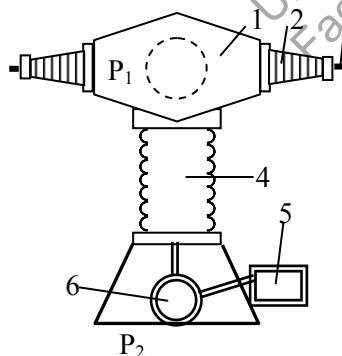


Fig.16.2. Secțiune prin polul unui întrerupător în tehnica pneumatică



- 1 – cameră de stingere modul;
 - 2 – izolator de trecere;
 - 3 – borne de conexiuni;
 - 4 – izolator suport;
 - 5 – compresor;
 - 6 – rezervor gaz la înaltă presiune (P_2)
- $P_1 = 0,4 \text{ MPa}$; $P_2 = 1,7 \text{ MPa}$.

Fig.16.3. Întrerupător de t.t. live-tank, tip SFA: $I_n = 2000 \text{ A}$, $I_{sc} = 63 \text{ kA}$.

În figura 16.2 se prezintă o secțiune printr-un pol al unui întrerupător în tehnica pneumatică, cu trei întreruperi cu $U_n = 220 \text{ kV}$ și $I_{sc} = 40 \text{ kA}$. SF₆ este filtrată cu filtre de alumina.

Întrerupătorul live-tank. La acest tip de întrerupător, izolația față de pământ se obține cu o coloană electroizolantă din porțelan, care susține camera de stingere (figura 16.3).

Camera de stingere modul, 1, este reprezentată în figura 16.4.

După desprinderea contactelor, stingerea arcului electric de deconectare se produce sub acțiunea unui suflaj intens cu SF₆ care se destinde de la presiunea $p_2 = 1,7 \text{ MPa}$ la presiunea $p_1 = 0,4 \text{ MPa}$. Extremitățile arcului electric se sprijină pe suprafețele interioare ale pieselor tubulare de contact, astfel suprafețele de lucru ale contactelor fiind protejate împotriva electroeroziunii.

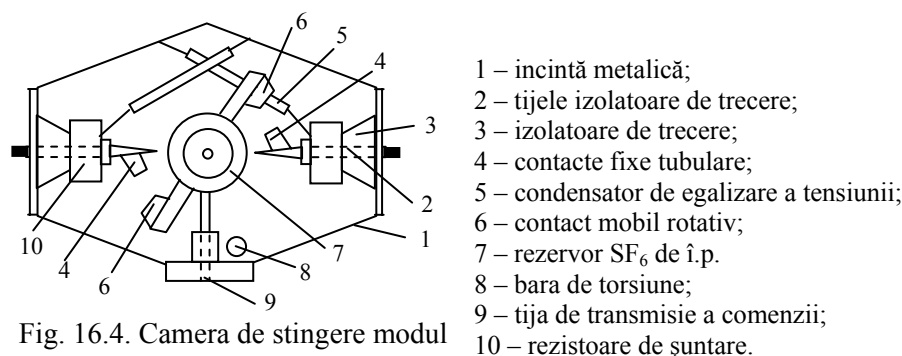


Fig. 16.4. Camera de stingere modul

Limitarea supratensiunilor de comutație se obține prin utilizarea unor rezistoare liniare de șuntare (10) a contactelor principale. La deconectare se deschid mai întâi contactele principale I urmate în ordine de contactele I₁ și I₂ (figura 16.5). Astfel, rezistența introdusă în circuitul deconectat crește în trepte de la zero la valoarea R₁, apoi la (R₁ + R₂), după care are loc întreruperea definitivă a arcului electric. În acest mod, tensiunea tranzitorie de restabilire are un caracter aperiodic cu valori relativ mici pentru factorul de oscilație.

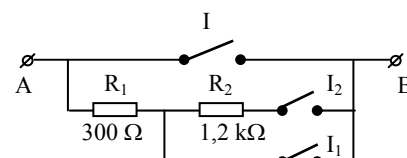


Figura 16.5. Limitarea supratensiunilor de comutație

Lichefierea nedorită a SF₆ la scăderea temperaturii mediului ambiant este preîntâmpinată prin folosirea unor rezistoare termostatare amplasate în pereții electroizolanți ai rezervorului cu gaz.

Dintre dezavantajele tehnicii pneumatice amintim:

- prezența compresorului;
- riscul pierderilor de gaz;
- dispozitivul suplimentar de încălzire prezent la echipamentele de exterior.

16.3. Întrerupătoare cu SF₆ în tehnica autopneumatică

Tehnica autopneumatică a fost adoptată de constructori și acceptată de utilizatori deoarece permite obținerea unor performanțe electrice înalte, cum sunt: capacitatea de deconectare la scurtcircuit poate atinge 63 kA, tensiunea nominală de până la 800 kV, timp de deconectare de valori mici (cca. 40 ms), presiune de lucru redusă: 0,5÷0,7 MPa.

Suflajul necesar activării stingerii arcului electric se obține la deconectare prin autocompresie, pe durata deplasării echipajului mobil. Aceste întrerupătoare se mai numesc cu autocompresie sau cu o singură presiune (monopresiune).

Avantaje:

- eliminarea compresorului și a valvelor pentru comanda suflajului;
- renunțarea la sistemul de încălzire, deoarece la presiuni mai scăzute de funcționare, specifice acestei tehnici, lichefierea hexafluorurii de sulf se poate produce doar la temperaturi foarte scăzute, de – 40°C.
- cheltuieli de exploatare reduse.

Variante constructive:

- la înaltă tensiune se construiesc întrerupătoare monopolare, variantă live-tank (izolate de pământ);
- la foarte înaltă tensiune, se construiesc întrerupătoare monopolare, în variantă dead-tank;
- la medie tensiune se construiesc întrerupătoare trifazate.

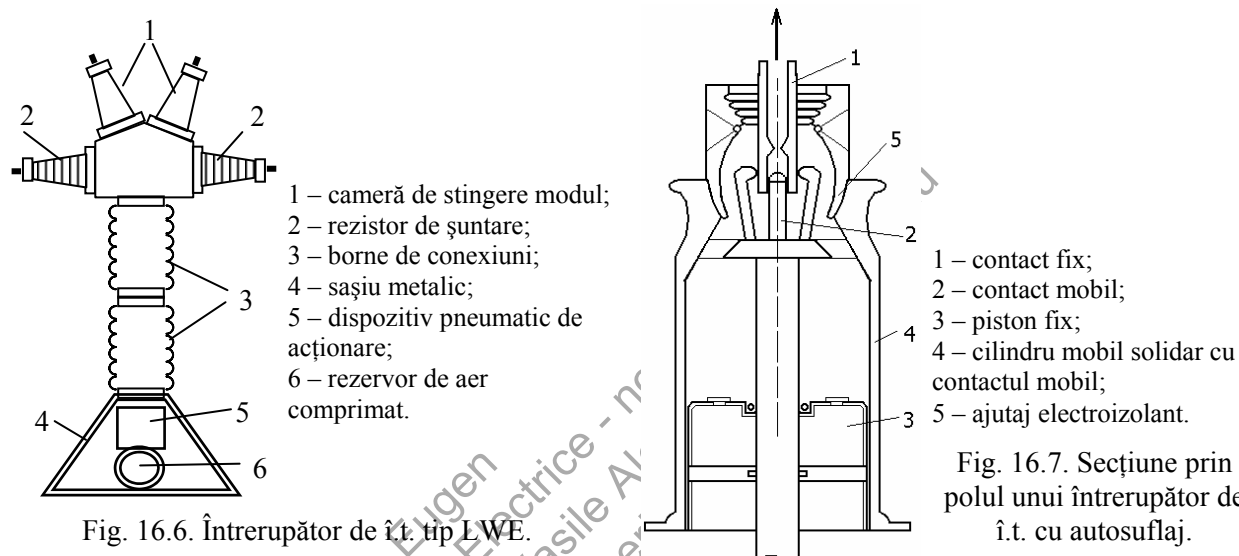
16.3.1. Întrerupătoare de înaltă tensiune în tehnică autopneumatică

Se exemplifică tehnica autopneumatică de înaltă tensiune prin întrerupătorul LWE având parametri nominali: $U_n = 362 \text{ kV}$, $I_n = 2000 \div 3000 \text{ A}$, $I_{sc} = 63 \text{ kA}$. (figura 16.6).

Construcția este protejată și etanșată într-o anvelopă de porțelan, conținând SF_6 la presiunea de 0,5 MPa; la aceeași presiune, gazul se găsește și în coloana electroizolantă.

Funcționarea camerei de stingere în sistem autopneumatic poate fi urmărită în figura 16.7. În poziția închis a întrerupătorului presiunea gazului SF_6 este aceeași, atât în interiorul cât și în exteriorul cilindrului 4. La deschiderea întrerupătorului, prin deplasarea în jos a tijei contactului mobil, contactele 1 și 2 se separă și între ele amorsează arcul electric de deconectare.

Simultan cu contactul mobil 2, fiind solidare cu acesta, se deplasează în jos și cilindrul 4 și ajutorul electroizolant 5. Ca urmare hexafluorura de sulf dintre pistonul fix 3 și cilindrul mobil 4 este comprimată, gazul fiind dirijat prin ajutorul 5 în suflaj asupra coloanei arcului electric.



În cazul întreruperii curenților de scurtcircuit, suprafața secțiunii transversale a coloanei arcului are valori mari, ocupând aproape integral ajutorul camerei de stingere; acesta este fenomenul de refulare al arcului electric, cunoscut și ca efect de dop sau bușon.

Fenomenul este benefic deoarece, fiind intens la valori instantanee mari ale curentului, permite rezervarea gazului comprimat înainte de momentul anulării intensității curentului, când, prin eliberarea ajutorului, se exercită suflajul necesar stingerii arcului electric.

Același efect conduce la micșorarea energiei arcului deoarece, prin frânarea mecanică a echipajului mobil al întrerupătorului, lungimea maximă atinsă de coloana arcului în momentul stingerii definitive este limitată. În cazul curenților de mică intensitate, efectul de dop este slab, încât, la aceeași viteză de deplasare a echipajului mobil, intensitatea suflajului scade. Se înlătură astfel riscul unor întreruperi cu tăiere (smulgere) de curent, soldate cu supratensiuni de comutație de valori mari.

Pistonul fix 3 este prevăzut cu valve, închise pe durata deplasării la deschidere a întrerupătorului, dar care se deschid pe parcursul închiderii acestuia, astfel încât gazul de sub cilindrul mobil 4 să poată fi împins înapoi prin recirculare.

Acționarea se poate face cu mecanism cu resorturi sau hidromecanic.

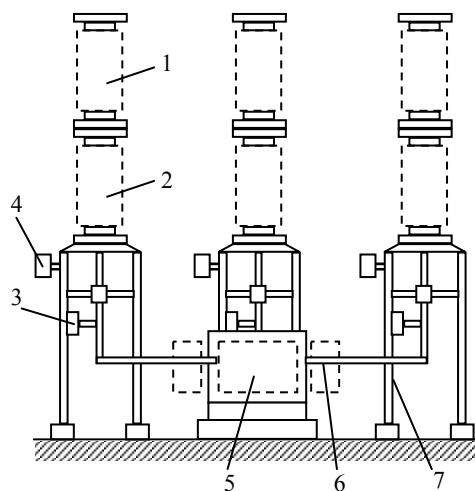
Întrerupătoarele autopneumatice cu SF_6 produse în România sunt cunoscute sub simbolizarea H 07; 14; 17; 42; $I_n = 2500 (3150) \text{ A}$ și $I_{sc} = \max 40 \text{ kA}$ (figura 16.8).

Construcția este constituită din trei poli monocoloană identici și un mecanism de acționare cu comandă pneumatică sau oleopneumatică. Componentele camerei de stingere și modul de funcționare sunt prezentate în figura 16.9.

Întrerupătorul este prevăzut cu contactele speciale de rupere (1 și 2), respectiv de lucru (3 fix și 4 mobil). Echipajul mobil este format din contactele (2), (4) conectate electric între ele,

ambele solitare cu ajutorul electroizolant (5) și cilindrul metalic (7). Conducția între tija contactului mobil și borna fixă de racord se stabilește prin contactul alunecător (9).

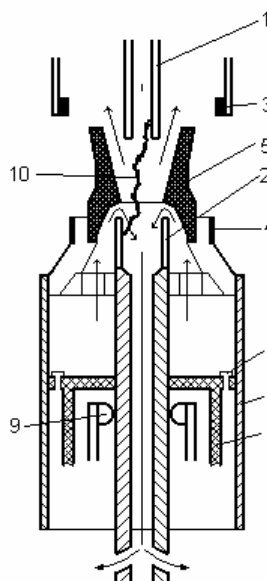
La deconectare, echipajul mobil coboară, arcul electric (10) fiind preluat de contactele (1) și (2). SF₆ comprimată între cilindrul mobil (7) și pistonul fix (8) exercită, prin ajutorul (5), un suflaj longitudinal bilateral. Valvele (6) se deschid la închiderea întrerupătorului și permit recircularea gazului necesar pentru suflaj.



- 1 – camera de stingere;
- 2 – izolatorul suport;
- 3 – mecanism întrerupător + tija;
- 4 – presostate de control;
- 5 – mecanismul de acționare;
- 6 – conducte înaltă presiune
- 7 – suporturi metalici.

Fig. 16.8. Înterupător autopneumatic tip H.

Presostatul (4) are rolul de a semnaliza scăderea presiunii, fie de a comanda blocajul general al funcționării sau deschiderea automată a întrerupătorului, dacă presiunea scade sub o valoare limită.



- 1 – contact fix de rupere;
- 2 – contact mobil de rupere;
- 3 – contact fix de lucru;
- 4 – contact mobil de lucru;
- 5 – ajutor electroizolant;
- 6 – valve;
- 7 – cilindru metalic mobil solitar cu contactele mobile;
- 8 – piston fix;
- 9 – contact alunecător;
- 10 – arcul electric

Fig. 16.9. Secțiune prin camera de stingere modul.

16.3.2. Întrerupătoare de medie tensiune cu SF₆ în tehnică autopneumatică

Înterupătoarele de m.t. sunt realizate în variantă tripolară, cu acționare cu mecanism unic.

Firma Merlin Gerin a dezvoltat o întreagă gamă de echipamente de medie tensiune cu comutație în SF₆, un loc important ocupându-l cele realizate în tehnica autopneumatică.

Dintre acestea fac parte și întrerupătoarele tripolare de interior tip Fluarc FG2, (figura 16.10), utilizat în special pentru manevre și protecție în rețelele de distribuție publice și industriale cu tensiuni nominale $U_n = 1 \div 17,5$ kV, cu $I_n = 630 \div 315$ A și capacitate nominală de deconectare la scurtcircuit $I_{sc} = 40 \div 50$ kA. Acționarea acestor întrerupătoare se face cu dispozitive cu acumulare de energie în resorturi.

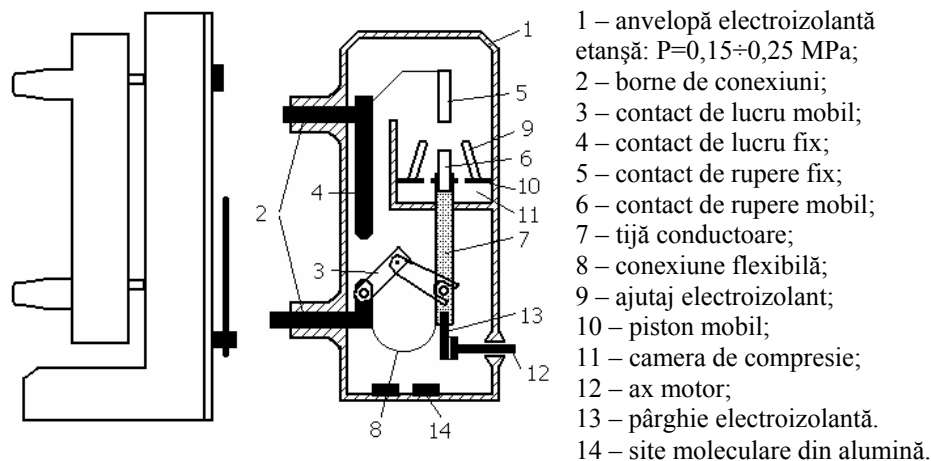


Fig. 16.10. Întrerupător Fluarc FG2 de medie tensiune

Corelarea mecanică a lanțurilor cinematice corespunzătoare celor două căi de curent permite deschiderea contactelor de lucru (3, 4) înainte a celor de rupere, arcul electric de deconectare formându-se între acestea din urmă (5 și 6). Sub acțiunea autocompresiei din camera 11, gazul SF₆ traversează ajutorul (9), exercitând suflajul în vederea stingerii arcului electric. Compușii care rezultă în urma descompunerii gazului SF₆ sunt reținuți de sitele moleculare (14).

Întrerupătoarele de medie tensiune cu autocompresie de tip Fluarc sunt utilizate și în construcția celulelor prefabricate tip Fluarc, destinate posturilor de transformare pentru instalațiile de distribuție cu tensiuni nominale $U_n = 1\div 40$ kV.

În România, SC Electroputere SA fabrică întrerupătoare cu autocompresie de medie tensiune de interior tip HF 12/24 kV destinate centralelor electrice, stațiilor de transformare și instalațiilor de distribuție.

Întrerupătoarele cu SF₆ realizează în tehnica autopneumatică au dimensiuni de gabarit mici și nu necesită o întreținere deosebită. Reviziile acestor echipamente se fac odată la câțiva ani; de fiecare dată examinându-se componentele constructive ale sistemelor de contacte, garniturile de etanșare împotriva scurgerilor de gaz SF₆ și se înlocuiesc filtrele sau sitele moleculare.

16.4. Întrerupătoare cu SF₆ cu suflaj magnetic.

La întrerupătoarele cu SF₆ realizate în tehnică pneumatică sau autopneumatică, arcul electric de deconectare este supus unui suflaj cu gaz sub presiune în măsură să producă răcirea coloanei acestuia prin evacuarea căldurii în afara volumului camerelor de stingere. Arcul electric este practic fixat între contacte în timp ce hexafluorura de sulf, ca mediu de stingere, se deplasează pe seama diferențelor de presiune.

Principiul de stingere pe care se bazează funcționarea întrerupătoarelor cu suflaj magnetic, constă în deplasarea rapidă a arcului electric într-un volum închis de SF₆, aflat inițial în repaus. În acest caz, mediul de stingere este practic fix iar coloana arcului electric, sub acțiunea unor forțe de tip Lorentz, se deplasează cu viteze comparabile cu cea a sunetului.

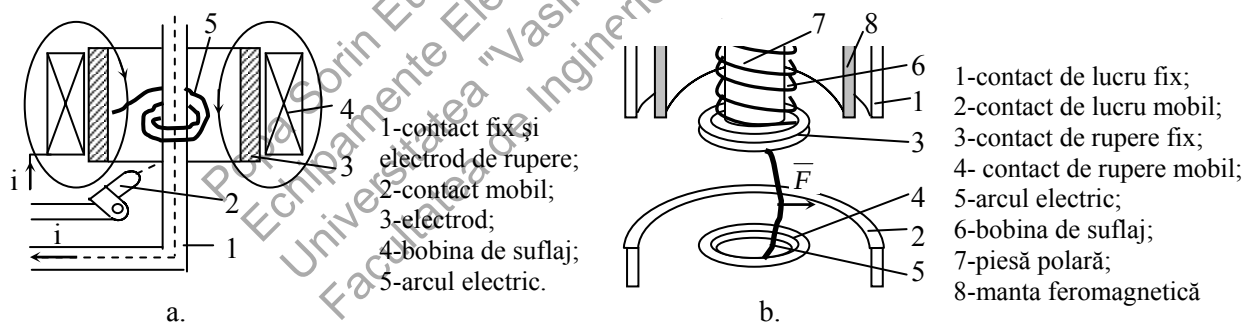


Fig. 16.11. Tehnica suflajului magnetic. a – sistem coaxial, b - sistem axial.

Câmpul necesar punerii în mișcare a arcului electric este produs de o bobină parcursă de curent pe durata deconectării sau de magneți amplasați în zona contactelor, energia necesară suflajului fiind deci furnizată de o sursă exterioară. Suflajul magnetic se obține în sistem coaxial (figura 16.11a), respectiv axial (figura 16.11b).

În cazul sistemului coaxial, (figura 16.11a), arcul electric amorsat la deconectare, inițial între contactele 1-fix și 2-mobil, este imediat preluat între electrozii 1 și 3, astfel încât curentul care trebuie întrerupt traversează spirele bobinei de suflaj 4. În câmpul magnetic al acestei bobine, forțele de tip Lorentz imprimă coloanei arcului o mișcare rapidă de rotație, dispunând-o sub forma unei elicoide spațiale, cu extremitățile mobile pe electrozii coaxiali 1 și 3.

Alungirea coloanei favorizează cedarea călduri spre mediul de stingere, iar deplasarea rapidă a acesteia intensifică deionizarea prin difuziune.

Pe lângă simplitate constructivă, întrerupătorul cu suflaj magnetic se caracterizează printr-o slabă electroeroziune a contactelor, deoarece, ca urmare a deplasării extremităților arcului electric,

temperatura înaltă nu se mai localizează în zone practic finite pe suprafața de contact.

Distanța dintre contacte, dependentă de nivelul nominal de izolație și de presiunea statică a SF_6 , rezultă mai mică decât la întrerupătoarele realizate în tehnică autopneumatică, energia necesară acționării având valori de asemenea mai mici.

Ca exemplu constructiv, se prezintă în figura 16.12, întrerupătorul Fluarc FG1: 1÷15 kV / 630÷1250 A / 20÷29 kA, fabricat de firma Merlin Gerin. Acesta se construiește în variantă debroșabilă.

Pentru protecția la electroeroziune, contactele de lucru se deschid înaintea celor de rupere, încât arcul electric se amorsează între acestea din urmă; imediat, extremitățile arcului sunt preluate de electrozii inelari 11 și 12. În acest moment, în circuitul curentului care trebuie întrerupt este înseriată bobina de suflaj magnetic 13 care produce, în zona de ardere a arcului, câmpul magnetic specific tehnicii suflajului magnetic.

Fiind în mod frecvent folosite în rețelele de distribuție publice și industriale, întrerupătoarele de tip FG1 sunt adaptate cu deosebire la întreruperea curenților mici inductivi.

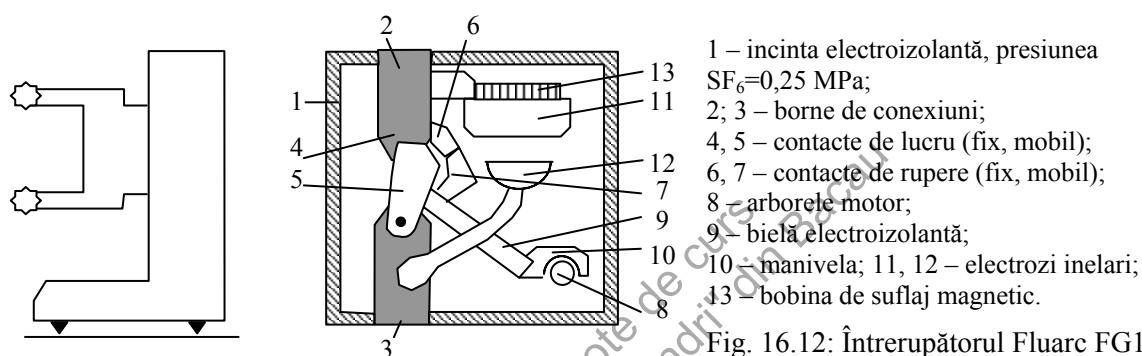


Fig. 16.12: Întrerupătorul Fluarc FG1.

Avantajele suflajului electromagnetic:

- simplitate constructivă;
- siguranță în exploatare și utilizarea practic fără mentenanță;
- eroziunea redusă a pieselor de contact;
- energie mecanică redusă pentru acționare.

16.5. Întrerupătoare cu SF_6 cu autoexpansiune.

De mai bine de două decenii, întrerupătoarele cu autoexpansiune funcționează cu bune rezultate în rețelele de distribuție și transport a energiei electrice din multe țări. În acest timp au fost dezvoltate în principal trei tipuri:

- întrerupătoare cu suflaj prin autoexpansiune cu arc rotativ, figura 16.13,a;
 - întrerupătoare cu suflaj prin autoexpansiune cu rezonator Helmholtz,
- aceste două metode sunt folosite în instalațiile de medie tensiune, ca întrerupătoare de generator sau pentru rețelele de distribuție.
- pentru tensiuni mai mari de 72,5 kV (întrerupătoare de înaltă tensiune), suflajului prin autoexpansiune i se asociază o componentă obținută prin autocompresie, care intervine numai la întreruperea curenților de mică intensitate. Pentru întreruperea curentului de scurtcircuit și, în general, a curenților de mare intensitate, funcționează numai suflajul prin autoexpansiune, energia arcului producând creșterea presiunii SF_6 într-un volum închis.

În camerele de stingerea ale acestor întrerupătoare suflajul cu SF_6 se obține prin dilatarea gazului sub acțiunea căldurii cedate de coloana arcului electric însăși. Acest principiu conduce la simplificarea construcției dispozitivelor de stingere, din care se elimină acțiunea pistonului, utilizat pentru comprimarea gazului în tehnica autopneumatică.

În camera de stingere coloana arcului este instabilă, ea luând formă de buclă la exteriorul

contactului, unde eficiența suflajului este redusă. Problema se rezolvă prin ghidarea arcului electric, astfel încât acesta să ocupe o poziție cât mai centrală. Ghidarea se poate face mecanic (prin utilizarea unor duze electroizolante) sau magnetică (prin utilizarea unei bobine sau a unui magnet permanent).

În figura 16.13 sunt reprezentate principiile autoexpansiunii.

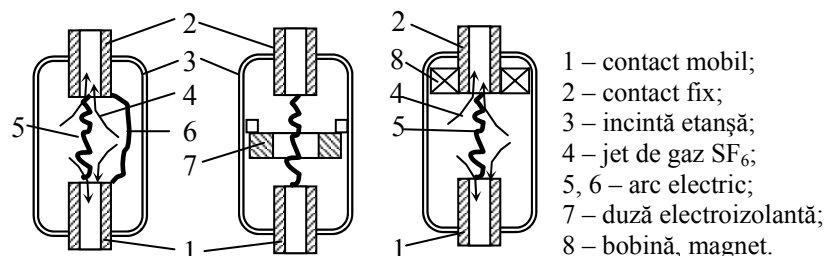


Fig. 16.13. Principiile autoexpansiunii.

Utilizarea duzei electroizolante (figura 16.13b) este o soluție foarte răspândită și relativ simplă, dar care are câteva dezavantaje:

- căldura cedată de coloana arcului electric spre SF_6 este redusă doar la 15% din energia totală;
- prezența duzei electroizolante produce perturbarea câmpului electric;
- electroeroziunea intensă a suprafeței de contact.

În cazul utilizării ghidării magnetice (cu bobină sau magnet) aceste inconveniente sunt reduse, arcului electric i se imprimă o mișcare rapidă de rotație. În consecință, energia cedată suprafețelor de contact se repartizează aproape uniform pe acestea, creșterea de temperatură este redusă. Căldura cedată de coloana arcului gazului SF_6 ajunge la 25% din energia acestuia, ceea ce permite creșterea capacității de întrerupere.

Spre exemplificare se prezintă în figura 16.14 o secțiune prin camera de stingere a unui întrerupător cu SF_6 cu autoexpansiune și ghidaj prin duză electroizolantă.

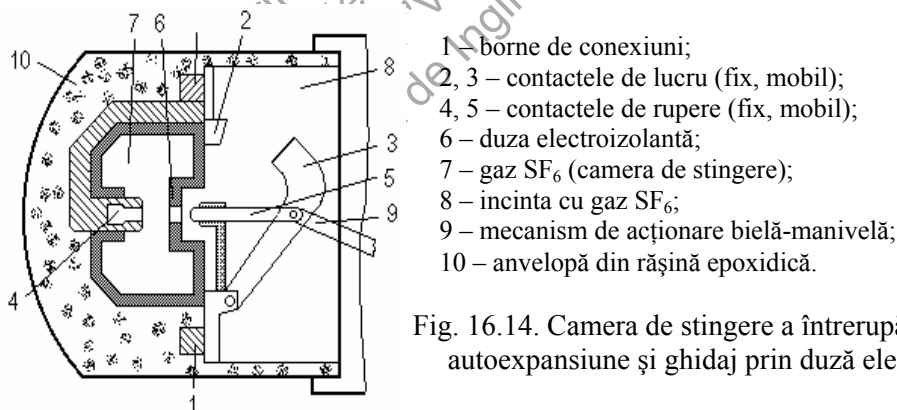


Fig. 16.14. Camera de stingere a întrerupătorului cu SF_6 , autoexpansiune și ghidaj prin duză electroizolantă.

Funcționare: La deschiderea întrerupătorului, contactele de rupere 4 și 5 se deschid după contactele de lucru 2, 3, astfel încât arcul electric se amorsează în camera de stingere 7, între contactele de rupere. Atât timp cât contactul de rupere mobil 5 obturează duza 6, sub acțiunea temperaturii înalte a arcului electric, presiune gazului din incinta 7 crește. Din momentul eliberării acestei duze, coloana arcului este supusă unui suflaj longitudinal unilateral, detenția gazului SF_6 producându-se în incinta 8.

Acest tip de întrerupător este destinat instalațiilor de medie tensiune; și este realizat în construcție tripolară, cele trei camere de stingere fiind înglobate în anvelopa unică 10.

Întrerupătoarele cu autoexpansiune pot fi considerate ca echipamente cu comutație lină, energia necesară suflajului fiind furnizată de arcul electric însăși.

16.6. Întrerupătoare în construcție hibridă – tehnică combinată.

Autoexpansiune asistată de autocompresie.

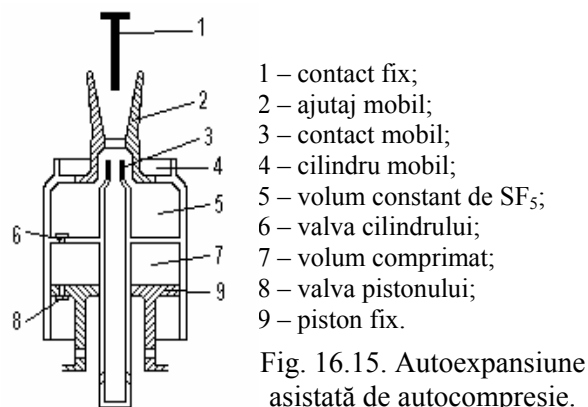
Suflajul necesar întreruperii curenților de mare intensitate este obținut în principal prin expansiunea termică a gazului conținut în volumul constant 5 încălzit de arc. (figura 16.15)

Un suflaj autopneumatic suplimentar, utilizând gazul comprimat la deconectare în volumul 7, se exercită la întreruperea curenților de mică intensitate, când, autoexpansiunea este slabă. Valva 6 a cilindrului mobil se deschide la începutul deplasării echipajului mobil și rămâne deschisă atâta timp cât presiunea în volumul constant 5 este mai mică decât presiunea din volumul 7. Valva 8 a pistonului fix se deschide dacă presiunea în volumul 7 depășește o valoare reglată.

Avantajul acestor întrerupătoare este că necesită un piston de dimensiuni reduse, ceea ce permite micșorarea energiei necesare pentru acționare.

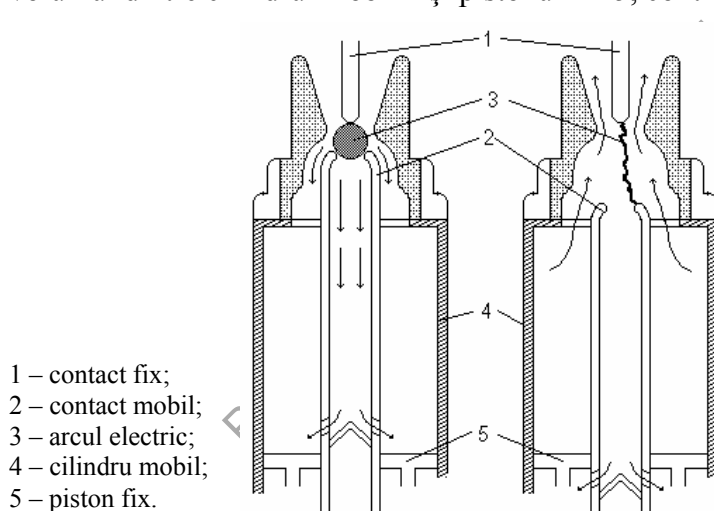
Un alt exemplu de întrerupător cu autoexpansiune asistată de autocompresie este dat în figura 16.16.

În faza incipientă a deconectării, gazul SF₆ încălzit de arcul electric 3 este parțial retrimis în volumul dintre cilindrul mobil 4 și pistonul fix 5, contribuind la creșterea presiunii în acest spațiu.



- 1 – contact fix;
- 2 – arcul electric;
- 3 – contact mobil;
- 4 – cilindru mobil;
- 5 – volum constant de SF₆;
- 6 – valva cilindrului;
- 7 – volum comprimat;
- 8 – valva pistonului;
- 9 – piston fix.

Fig. 16.15. Autoexpansiune asistată de autocompresie.



- 1 – contact fix;
- 2 – contact mobil;
- 3 – arcul electric;
- 4 – cilindru mobil;
- 5 – piston fix.

Fig. 16.16: principiul tehnicii hibride de comutație în SF₆:
a-faza incipientă a deconectării; b-faza finală

În faza finală, presiunea crescută a gazului care exercită suflajul compensează o oarecare scădere a capacității sale de răcire (datorită temperaturii mai ridicate) obținându-se o capacitate de deconectare cu circa 20% mai mare.

Energia necesară pentru comprimarea gazului are valori mai mari la întrerupătoarele autopneumatice. Întrerupătoarele cu autoexpansiune asistată de autocompresie, necesitând un piston de diametru redus, consumă mai puțin de o treime din energia necesară în cazul acționării unui întrerupător autopneumatic.

Extinderea tehnicii hibride de comutație la tensiuni superioare presupune rezolvarea problemei creșterii importante a energiei cinetice a echipajului mobil, care poate fi acoperită însă parțial de energia înmagazinată sub formă de căldură în coloana arcului.

Asocierea efectului termic al arcului electric pentru obținerea expansiunii SF₆ cu autocompresia acestuia este utilizată și în realizarea întrerupătoarelor destinate celulelor blindate, în special când este vorba de construcții cu parametrii electrici ridicați: 300 kV / 50 kA și un singur loc de întrerupere pe pol (cameră de stingere modul unică).

Avantajele specifice întrerupătoarelor cu autoexpansiune sunt:

- energie de acționare redusă;
- absența supratensiunilor de comutație;
- insensibilitate la viteza de creștere a tensiunii de străpungere în camera de stingere;
- funcționare corespunzătoare la întreruperea curenților capacitivi;
- electroeroziune redusă a contactelor.

16.7. Instalații capsulate cu izolație în hexafluorură de sulf

Ideea de bază a realizării instalațiilor capsulate izolate în gaz SF_6 constă în închiderea întregului echipament conectat la barele unei stații într-o incintă metalică etanșă și izolarea acestuia în hexafluorură de sulf. Prin proprietățile sale electroizolante excepționale, acest gaz permite o reducere importantă a distanțelor de izolație și deci a dimensiunilor de gabarit ale stației.

Pe lângă denumirea de instalații capsulate în SF_6 mai sunt utilizate și noțiunile de celule blindate, stații (posturi) de î.t. etanșate metalic (postes haute tension sous enveloppe metallique) respectiv instalații de comutație cu izolație în gaz (Gas Insulated Switchgear, GIS).

Construcția și introducerea în exploatare a instalațiilor capsulate, izolate cu SF_6 , răspund următoarelor cerințe:

a) Necesitatea transportului energiei electrice la tensiuni înalte până în centrele de consum (orașe, întreprinderi industriale etc) cu respectarea restricțiilor privind reducerea accentuată a suprafețelor ocupate cu echipament.

O instalație de î.t. realizată în variantă capsulată cu izolație în SF_6 ocupă circa 10÷20% din suprafața unei stații tradiționale de tip deschis.

b) Limitarea și chiar eliminarea solicitărilor produse de factorii de mediu asupra echipamentului electric.

Efectele acțiunii factorilor de mediu sunt practic eliminate deoarece elementele constructive funcționează în întregime în incinte metalice din oțel sau aluminiu, în care se găsește gaz SF_6 la presiuni de 0,3÷0,4 MPa.

c) Creșterea gradului de siguranță în funcționarea instalațiilor, prin eliminarea posibilităților de producere a avariilor sub acțiunea unor cauze întâmplătoare. Elementele constructive ale instalațiilor capsulate sunt complet inaccesibile din exterior, încât gradul de securitate împotriva electrocutărilor este foarte ridicat. De asemenea este înlăturat orice pericol de explozie, obținându-se astfel un avantaj foarte important, în special pentru instalațiile destinate funcționării în medii explozive (minerit, ind. chimică, armament etc.).

De la primele aplicații de acest tip, realizate în anii 1960 pentru tensiuni nominale de 66 kV, s-a ajuns la construcții de 500 kV (1975), extinse apoi la tensiuni nominale de 800 kV. Evoluțiile constructive s-au concretizat cu deosebire în compactizare și miniaturizare, ajungându-se la instalații tripolare și, în sfârșit, la construcții în care funcționalitățile sunt grupate.

Instalațiile capsulate cu izolație în SF_6 se pot conecta în diferite moduri la echipamentul instalației complexe din care face parte, astfel este posibilă ieșirea în linie fie subterană, fie aeriană sau racordarea directă la transformatorul de putere.

Fiind construite integral pe principiul modului, instalațiile capsulate pot reproduce orice schemă de stație de transformare, indiferent de tipul sistemului de bare colectoare: dublu, în H, în inel etc.

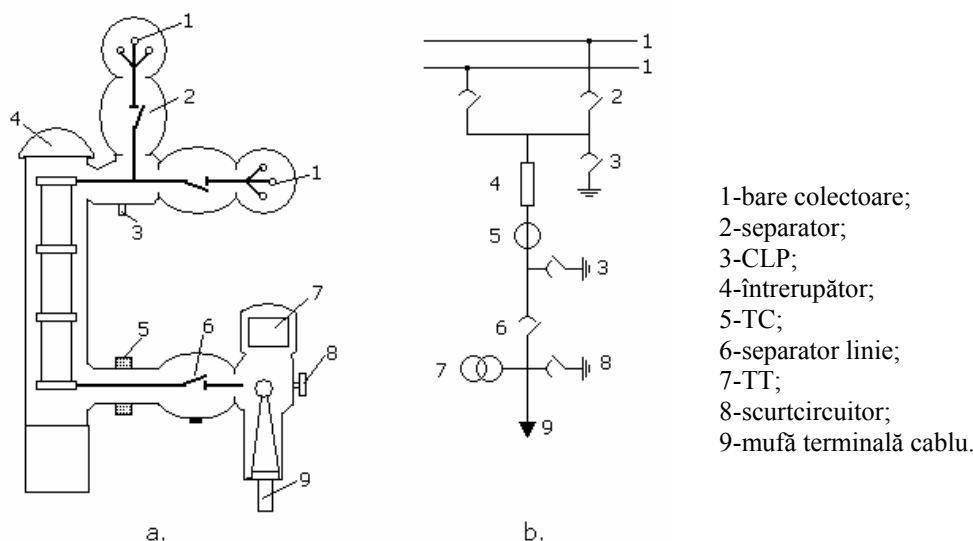


Fig. 16.17: Instalații capsulate: a-secțiune schematică, b-schema electrică monofilară.

Cursul nr. 17

Înterupătoare cu vid

17.1. Caracteristici constructive și funcționale

Vidul este caracterizat de tensiuni de străpungere mult mai mari, ceea ce conduce la obținerea unor distanțe de izolație mult mai mici decât în alte medii electroizolante.

Arcul electric sub vid

Coloana arcului electric este făcută din vapori de metal și electroni veniți din electrozi, contrar altor tehnici de comutație discutate anterior în care coloana arcului este în mare parte făcută din ionizarea gazului dintre contacte prin ciocniri. Arcul electric se poate manifesta sub două forme: arc difuz sau arc concentrat, acestea două forme apar în funcție de intensitatea curentului care este întrerupt.

□ Pentru valori mari ale curentului electric (≥ 10 kA) arcul este concentrat și singular, ca un fluid (vezi figura 17.1a). Spoturile catodic și anodic de câțiva mm^2 sunt aduse la temperaturi extrem de ridicate. Un strat fin din materialul contactului este vaporizat și arcul se dezvoltă într-o atmosferă de vapori de metal care ocupă tot spațiul. Când curentul descrește, acești vapori condensează pe electrozii din care provin sau pe un ecran metalic plasat în acest scop. În această configurație, tensiunea arcului poate atinge 200 V.

□ Pentru valori ale curentului mai mici decât câteva mii de amperi, acest arc capătă o formă difuză. El este făcut din câteva arcuri separate unul de altul care au o formă conică cu vârful pe catod (vezi figura 17.1b). Baza catodică a arcului, numită spot, are o suprafață foarte mică (10^{-5} cm^2) și densitatea de curent este foarte mare ($10^5 \div 10^7 \text{ A/cm}^2$). Temperatura locală extrem de mare (3000 K) conduce la foarte intense emisi termoelectronice/efect de câmp, cu toate acestea evaporarea materialului contactului rămâne limitată.

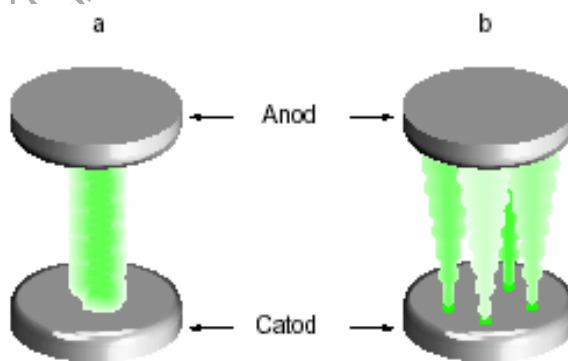


Fig. 17.1 : Arcul concentrat [a] și arcul difuz [b]

Viteza de difuziune a plasmei crește rapid pe măsură ce intensitatea curentului scade, fiind astfel create condițiile necesare condensării vaporilor de metal și refacerii vidului în camera de stingere, în urma cărora se obține întreruperea definitivă a curentului electric.

Circa 90% din vaporii metalici în care amorsează arcul electric se depun prin condensare pe suprafața de contact din care provin, metalul pieselor de contact fiind recuperat aproape în întregime, de unde rezultă o intensitate redusă a electroeroziunii, deci o durată de viață crescută a contactelor.

Condensarea vaporilor metalici în care amorsează arcul electric este stimulată de amplasarea, în vecinătatea contactelor, a unor ecrane metalice spre care plasma difuzează.

În figura 17.2 sunt prezentate principalele modele constructive de camere de stingere cu vid, în care se evidențiază principalele elemente constructive.

Durata de funcționare depinde de: soluția constructivă aleasă; modelul și metalele utilizate pentru contacte; tehnologia de obținere a vidului.

În construcția contactelor și electrozilor întrerupătoarelor cu vid se au în vedere următoarele aspecte tehnice:

- realizarea nivelului nominal de izolație între contactele deschise;
- asigurarea unui înalt grad de puritate pentru materialele de contact;
- dozarea corespunzătoare a cantității de vapori metalici produși la deconectare;
- adoptarea formei și dimensiunilor optime pentru piesele de contact și electrozi;

- stabilizarea prin câmpuri magnetice a arcului electric de deconectare în faza finală de ardere a acestuia.

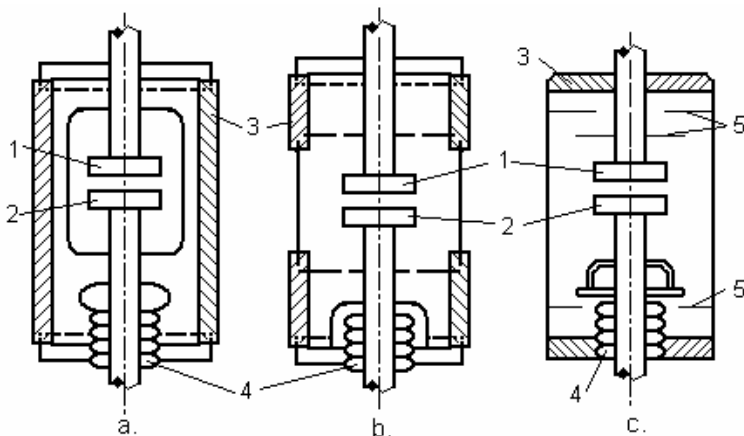


Fig. 17.2: Construcția unei camere de stingere vidate: 1- contact fix; 2-contact mobil; 3-capsulă sticlă; 4-burdof metallic de etanșare; 5-ecran de condensare.

Durata mare de funcționare a întrerupătoarelor cu vid impune recuperarea aproape integrală, la deconectare a vaporilor metalici proveniți din piesele de contact. Aceasta se obține prin condensarea vaporilor chiar pe suprafețele pieselor de contact, depunerea fiind stimulată de distanța mică între contactele deschise, circa 10 mm.

Între piesele de contact situate la distanțe atât de mici, intensitatea câmpului electric are valori foarte mari ($200\div 300$ kV/cm), încât forma, gradul de prelucrare și dimensiunile suprafețelor de contact

joacă un rol important în asigurarea unor valori mari pentru tensiunea de străpungere. Deoarece străpungerea în acest caz are loc prin emisie electronică la catod, micile asperități sau neuniformități ale suprafețelor de contact pot conduce la inițierea străpungerii în câmp electric.

Ținând cont de procesele repetate de vaporizare și condensare, este necesar ca materialul contactelor să aibă un înalt grad de puritate și să fie extrem de lipsit de gaze; în acest fel este posibilă redepunerea uniformă a materialului vaporizat pe suprafețele de contact și, în același timp, menținerea vidului în camera de stingere.

Un alt aspect tehnic, determinant în alegerea materialelor pentru contactele care funcționează în vid, este legat de tendința de sudare a pieselor de contact, atunci când contactul este închis. Deoarece piesele de contact nu sunt separate între ele nici măcar prin straturi străine monomoleculare, tendința de sudare se manifestă chiar la temperatură normală și sub acțiunea unor forțe de apăsare relativ mici. Ruperea la deschidere a punților metalice rezultate prin sudare se soldează cu asperități pe suprafețele de contact, fapt care conduce la micșorarea tensiunii de străpungere între contactele deschise.

Materialele pentru contacte trebuie să satisfacă de asemenea cerințe privind conductivitatea

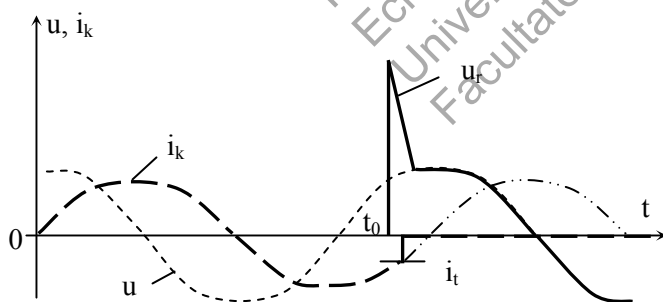


Fig. 17.3: Deconectarea cu tăiere de curent.

termică și presiunea de vaporii, astfel încât să fie posibilă dozarea optimă a cantității de vaporii dezvoltate la deconectare. Datorită vitezei mari de difuziune a plasmă în vid, arcul electric este instabil și poate fi stins înainte de momentul anulării naturale a intensității curentului, existând tendința de funcționare cu tăiere (smulgere) de curent; aceasta la rândul ei, conduce la apariția unor supratensiuni de comutație având valori mari (figura 17.3).

Din acest motiv, intensitatea curentului tăiat trebuie să aibă valori cât mai mici care se obțin prin creșterea cantității de vaporii metalici produși la deconectare.

Dozarea optimă are în vedere asigurarea arderii stabile a arcului electric până la valori ale intensității curentului foarte apropiate de zero și, în același timp, realizarea unei durate de viață cât mai mari pentru contacte, prin limitarea electroeroziunii acestora.

Materialele utilizate pentru construcția contactelor și a electrozilor sunt aliaje sau compoziții sinterizate e bază de cupru, căruia i se adaugă anumite cantități de wolfram, molibden sau crom.

Forma constructivă a contactelor și geometria electrozilor răspund cerințelor privind asigurarea unei uzuri uniforme distribuite pe suprafața acestora.

În figura 17.4 sunt prezentate două structuri de contacte care permit obținerea unui câmp magnetic radial; contacte spiralate (a) respectiv contacte de tip *cupă* sau *contrate* (b). Câmpul magnetic radial B_r este datorat modului de circulație a curentului prin contacte, acest câmp magnetic radial aplicat în zona de ardere a arcului electric conduce la apariția unei forțe electromagnetice rezultante F care va provoca o mișcare de rotație a arcului în jurul axei contactelor.

Aceste contacte nu pot întrerupe curenți mai mari de 40 kA, chiar dacă diametrul pieselor de contact ajunge la valori de 100÷150 mm. La aceleași dimensiuni este posibilă aproape dublarea curentului întrerupt, dacă în zona de contact se creează un câmp magnetic axial.

Aplicarea unui câmp magnetic axial impune electronilor și ionilor traiectorii elicoidale în jurul liniilor de câmp ceea ce stabilizează arcul electric în formă difuză și împiedică apariția formei concentrate a acestuia. Arcul electric utilizează astfel aproape întreaga suprafață a contactelor, încălzirea lor fiind astfel limitată și electroeroziunea rămâne redusă.

17.2. Variante constructive de întrerupătoare cu vid

Întrerupătoare de medie tensiune actuale de obicei constau din trei poli legați mecanic și un mecanism de acționare. Mecanismul de acționare poate fi de tip mecanic cu resort sau electromagnetic. Controlarea comutării pentru o foarte mare serie de aplicații necesită un mecanism de acționare individual pentru fiecare pol. Acest lucru este mult mai ușor de obținut cu un dispozitiv de acționare cu magnet permanent decât cu un dispozitiv mecanic. Mai mult, repetabilitatea dispozitivului magnetic este mult mai bună datorită numărului mai mic de părți componente.

Figura 17.5 ne arată construcția mecanică simplă a unui întrerupător cu vid, în care polul este conectat la mecanismul de acționare printr-un ax cu camă. Acest principiu a dovedit stabilitatea pentru întrerupătoarele nesincrone care au un singur dispozitiv de acționare pentru toți cei trei poli legați în paralel.

Mecanismele de acționare magnetică asigură un design mult mai simplu și mult mai compact decât dispozitivele mecanice. Întrerupătoarele cu vid folosesc poli VM1 care sunt scufundați (încastați) în rășină epoxi pentru ai proteja împotriva șocurilor mecanice și a poluării.

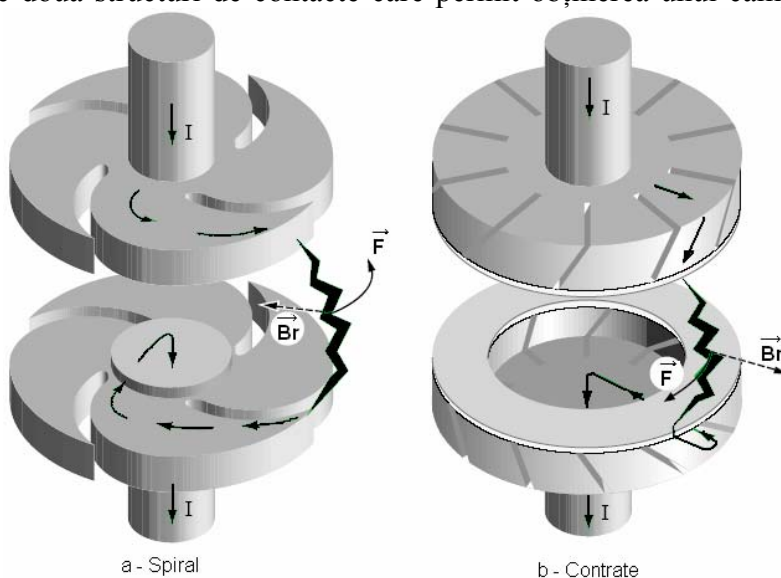


Fig. 17.4: Contacte folosite pentru realizarea câmpului magnetic radial: a-contacte spiralate; b-contacte contrate (cupă).

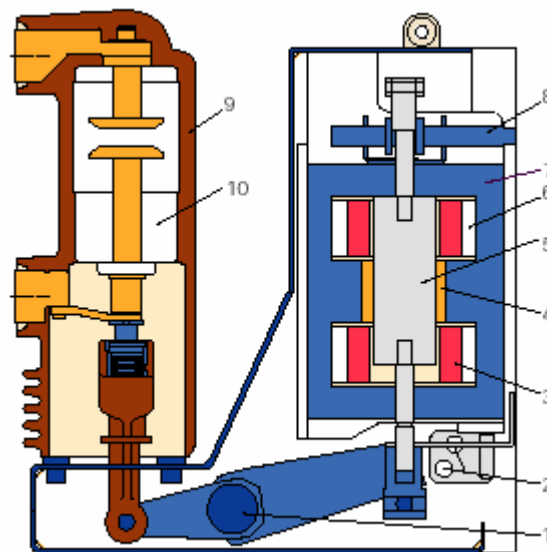


Fig. 17.5 : Secțiune printr-un mecanism de acționare și compartimentul polului unui întrerupător cu vid.

- 1- ax cu camă; 2- senzor de proximitate; 3- bobină de închidere; 4- magnet permanent; 5- piston mobil; 6- bobină de deschidere; 7- miez laminat fix; 8- dispozitiv de deschidere manuală de urgență; 9- incintă din rășină epoxi; 10- întrerupător cu vid.

17.2.1. Utilizarea tehnici de comutație în vid

Deși la niveluri superioare de tensiune sunt cunoscute și aplicații atipice, în prezent se asistă la generalizarea utilizării întrerupătoarelor cu vid în domeniul instalațiilor de medie tensiune (6÷35 kV). Pentru aceste tensiuni, întrerupătoarele construite au curenți nominali de până la 2500÷3000 A și pot atinge valori ale capacității de rupere la scurtcircuit de 25÷40 kA la 12 kV, în perspectivă tinzându-se spre 40÷100 kA pentru tensiunea de 13,8 kV.â

În funcție de firma producătoare, funcționarea echipamentului de comutație în vid este garantată pentru 20 ani sau pentru 10 ani și 30.000 de operații de comutație; dintre acestea circa 50÷100 deconectări pot fi efectuate la capacitatea nominală de rupere la scurtcircuit.

Se apreciază că, perspectivele extinderii echipamentului cu comutație în vid la tensiuni nominale mai mari de 72,5 kV sunt limitate de necesitatea creșterii exagerate a distanțelor dintre contacte, a lungimii liniilor de conturare corespunzătoare izolației interne și externe, precum și datorită construcției în final complicate a acestor echipamente.

Unele rezerve ale utilizatorilor față de întrerupătoarele cu vid sunt fondate pe ideea că funcționarea acestora este însoțită la deconectare de supratensiuni de comutație mai mari decât cele întâlnite la alte echipamente de comutație. Studiul supratensiunilor de comutație menționate arată că acestea pot fi produse ca urmare a tendinței de tăiere a curentului la deconectare și a fenomenelor de reamorsare repetată a arcului electric.

Deconectarea cu tăiere (smulgere) de curent depinde de particularitățile arderii și stingerii arcului electric în vid avansat. Supratensiunile de comutație provocate de acest mod de funcționare se consideră totuși a fi neglijabile, mai ales în condițiile limitărilor considerabile ale curentului tăiat, impuse prin soluții tehnologice aplicate sistemului de contacte.

Fenomenul de reamorsare multiplă a arcului electric se poate iniția atunci când separarea contactelor are loc cu foarte puțin timp înainte de momentul anulării intensității curentului. Din acest motiv distanța dintre contacte, înregistrată în momentul stingerii arcului și apariției supratensiunii de comutație aferente este foarte redusă. Ca urmare se produce străpungerea spațiului dintre contacte și reamorsarea unui arc electric traversat de un curent de frecvență ridicată, pe care întrerupătorul este obligat din nou să-l stingă. Acest fapt conduce la repetarea supratensiunii de comutație care, produsă în condițiile creșterii curentului de frecvență industrială, are ea însăși valori crescute.

Limitarea supratensiunilor de comutație produse la funcționarea echipamentelor de comutație cu vid este posibilă prin utilizarea unor elemente de protecție cum sunt grupurile RC sau descărcătoarele cu oxizi metalici (ZnO), conectate ca în figura 17.6.

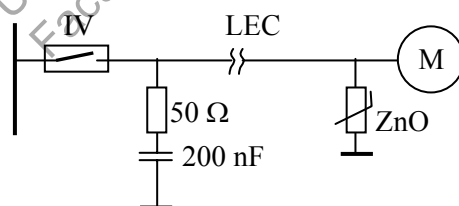


Fig. 17.6: Protecția împotriva supratensiunilor de comutație: IV - întrerupător cu vid; LEC - linie electrică în cablu; ZnO - descărcător cu oxizi metalici; M - electromotor.

Cursul nr. 18

Separatoare

18.1. Caracteristici constructive și funcționale

Separatoarele sunt echipamente de comutație care au rolul de a realiza, între contactele deschise, o distanță de izolare vizibilă, având valori specificate, cu scopul asigurării protecției muncii personalului de exploatare care efectuează lucrări în zone ale instalației, prealabil scoase de sub tensiune.

Deoarece este necesar asigurarea vizibilă a stării deschis a separatorului, acesta nu posedă dispozitiv de stingere a arcului electric. Deci, capacitatea de deconectare a separatorului este foarte mică, limitată la valori care să permită stingerea naturală a arcului electric.

Separatoarele pot fi utilizate ca echipamente de comutație numai în instalațiile care nu se află în sarcină sau pentru întreruperea unor curenți de sarcină foarte mici cum sunt curenții de mers în gol ai transformatoarelor de mică putere și ai liniilor electrice.

Căile de curent ale unui separator trebuie să permită, fără depășirea temperaturii admisibile, circulația pe durate nelimitate a curentului în regim normal de sarcină și pe durate limitate de stabilitatea termică, a curenților de suprasarcină și de scurtcircuit.

Nivelul de izolație între contactele deschise ale unui separator trebuie să fie superior atât nivelului de izolație al acestuia față de pământ cât și nivelului de izolație realizat între contactele deschise ale altor echipamente de comutație (întrerupătoare).

Separatoarele sunt utilizate cu precădere în instalațiile de î.t.

Elemente constructive:

- căile de curent: contacte, conexiuni flexibile, borne de conexiuni;
- ansamblul izolator;
- dispozitivul de acționare;
- elemente auxiliare.

Sistemul de contacte (cuțite):

- un contact fix + un contact mobil;
- două contacte mobile (uneori și cu un CLP).

Materialul și profilul contactelor trebuie să urmărească:

- uniformizarea densității de curent pe suprafața secțiunii transversale;
- realizarea unei răcirii eficiente pe durata funcționării;
- o bună rezistență mecanică.

În figura 18.1 sunt prezentate câteva profiluri, de obicei din cupru, utilizate în construcția cuțitelor de contact ale separatoarelor.

Contactele separatoarelor care funcționează în exterior au o construcție specială astfel încât să permită spargerea și înlăturarea unui eventual strat de gheață (figura 18.2).

Sub acțiunea curenților de scurtcircuit asupra căilor de curent ale separatoarelor se exercită forțe electrodinamice de contur care pot avea ca efect autodeschiderea nedorită a contactelor. Evitarea autodeschiderii separatoarelor se face fie prin blocarea mecanică în poziția închis, fie prin compensarea momentelor active M_a , prin momente rezistente M_r produse de forțele de frecare între piesele de contact.

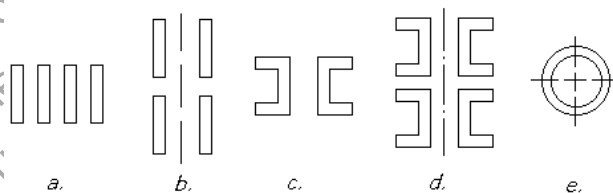


Fig.18.1: Profiluri ale cuțitelor separatoarelor.

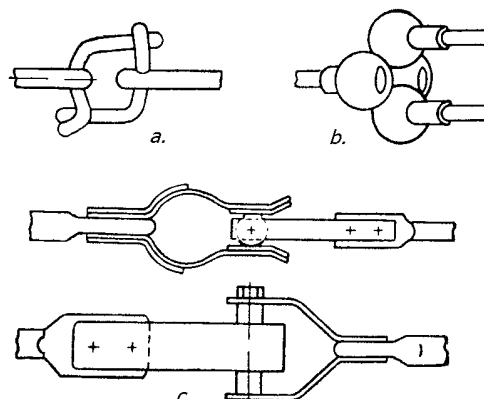


Fig.18.2:soluții constructive pentru spargerea gheții.

Ansamblul izolator al separatoarelor conține izolatoarele suport ale cuțitelor precum și alte dispozitive electroizolante necesare pentru transmisia mișcării de la dispozitivul de acționare la cuțite.

Dispozitivul de acționare servește pentru închiderea și deschiderea contactelor principale și pentru acționarea cuțitelor de legare la pământ (CLP). Aceste dispozitive pot fi manuale, cu resorturi, pneumatice sau cu motor electric.

18.2. Variante constructive de separatoare

După tipul instalației în care se montează, separatoarele pot fi de interior, respectiv de exterior; ambele variante se construiesc cu număr variabil de poli: monopolare, tripolare, cu sau fără cuțite de legare la pământ.

18.2.1. Separatoare tip cuțit

Contactele mobile ale acestor separatoare sunt realizate sub forma unor cuțite care se pot roti în planul izolatoarelor suport ale fiecărui pol. se construiesc pentru instalații de m.t. (1÷35 kV) și pot fi montate în interior sau în exterior. Unele variante sunt prevăzute cu cuțite de legare la pământ, iar altele, cu siguranțe fuzibile, în locul cuțitelor de contact. Pot fi monopolare sau tripolare.

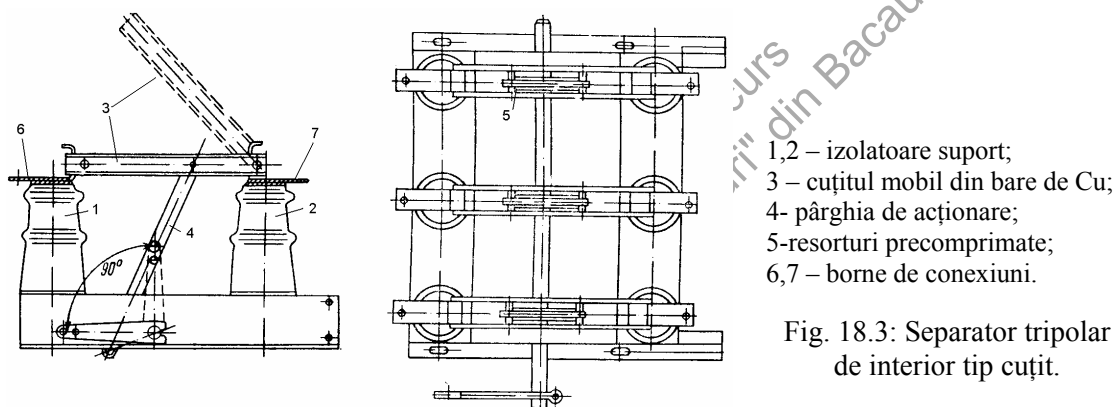


Fig. 18.3: Separator tripolar de interior tip cuțit.

La separatoarele cu siguranțe fuzibile, cuțitele sunt confecționate din materiale electroizolante și au rolul de socluri pentru elementele înlocuitoare ale siguranțelor.

18.2.2. Separatoare rotative

Acestea se construiesc pentru instalații atât de interior cât și de exterior, acoperind domeniul tensiunilor nominale 10400 kV. În funcție de soluția constructivă, aceste separatoare pot realiza întreruperea în două locuri sau într-un singur loc pe calea de curent.

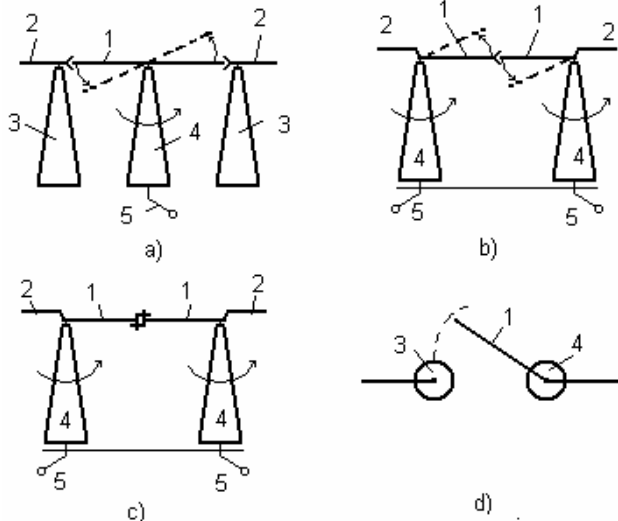


Fig. 18.4: Variante constructive de separatoare rotative:

- a-de interior cu 2 locuri de rupere;
- b-de exterior, cu un singur loc de întrerupere, cu două coloane rotative;
- c-de exterior, cu contacte tip gheară;
- d-cu o singură coloană rotativă și un singur loc de rupere;
- 1-braț (cuțit) port contact;
- 2-contacte fixe;
- 3-coloană izolatoare suport fixă;
- 4-coloană izolatoare rotativă;
- 5-tijă de comandă.

Dezavantaje: sunt sollicitate la momente de încovoiere importante, necesitând distanțe relativ mari între poli.

18.2.3. Separatoare basculante

Se construiesc pentru tensiunii medii ($10\div 20$ kV, $400\div 630$ A) și sunt în mod obișnuit tripolare, de tip exterior; se pot amplasa la sol sau suspendate.

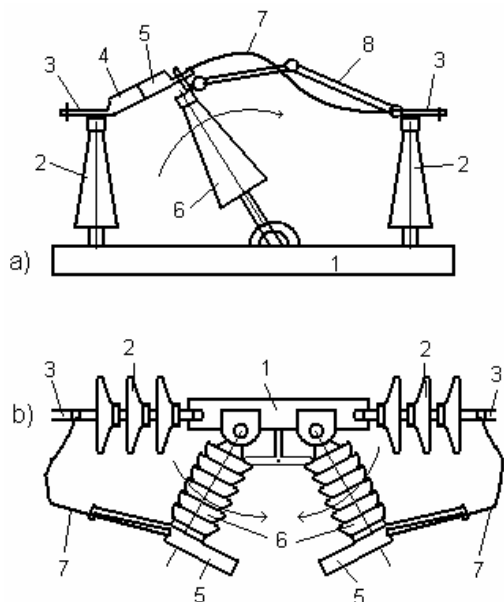


Fig. 18.5: Separator basculant
a-amplasat la sol, b-suspendat.

- 1-cadru metalic;
- 2-izolatoare suport;
- 3-borne de racord;
- 4-contact fix;
- 5-contact mobil;
- 6-izolator suport basculant;
- 7-conexiune flexibilă;
- 8-brațe articulate

18.2.4. Separatoare de translație

Sunt realizate pentru instalații exterioare, având tensiuni nominale de cel puțin 220 kV.

La acționarea acestor separatoare, contactul mobil execută o mișcare de translație fie după o direcție orizontală, în cazul construcțiilor amplasate în întregime la sol, fie după o direcție verticală, în cazul separatoarelor suspendate.

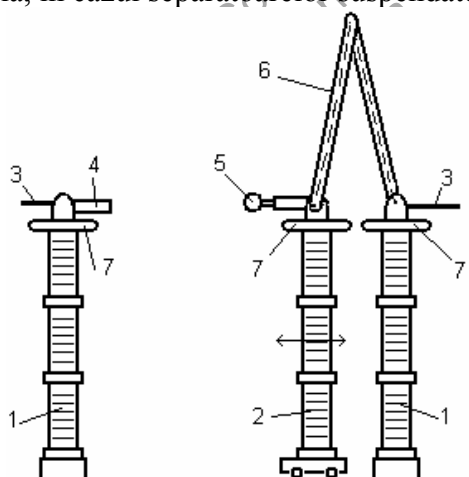


Fig. 18.6: Separator de translație
cu mișcare orizontală.

- 1-izolatoare suport fixe;
- 2-izolatoare suport mobile;
- 3-borne de racord;
- 4-contact fix;
- 5-contact mobil;
- 6-bare articulate metalice;
- 7-inele conductoare – asigură o repartitie uniformă a potențialului în lungul izolatoarelor suport.

18.2.5. Separatoare tip pantograf

Acest tip de separatoare sunt destinate instalațiilor exterioare de înaltă și foarte înaltă tensiune.

Pe lângă o estetică îmbunătățită a instalațiilor electroenergetice, utilizarea separatoarelor tip pantograf prezintă mai multe avantaje precum: reducerea suprafeței ocupate cu $10\div 30\%$ și a volumului fundațiilor cu circa 50% ; revizie simplă a separatorului; siguranță totală împotriva autodeschiderii la scurtcircuit.

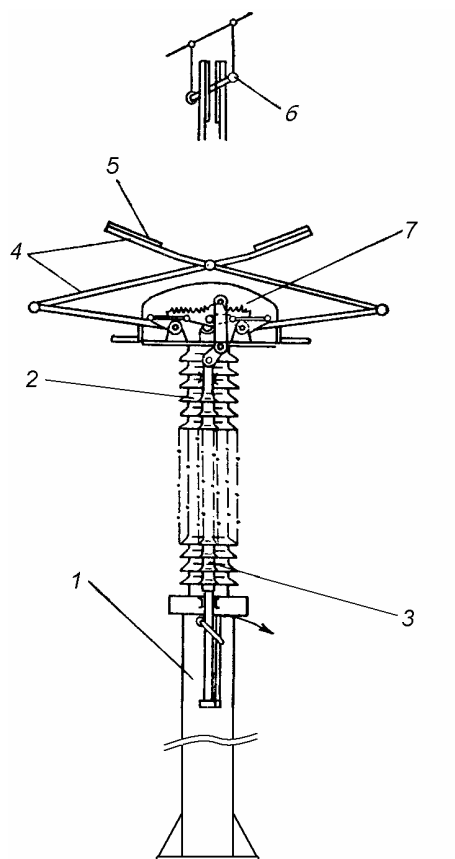


Fig. 18.7: Separator tip pantograf.

- 1- cadru metalic de susținere;
- 2-coloană izolatoare fixă;
- 3-izolator coloană rotitor;
- 4-contact mobil (pantograful propriu-zis);
- 5-fâlcile pantografului (Cu sau Al);
- 6-contact fix suspendat;
- 7-mecanism de transmitere a mișcării

18.3. Separatoare de sarcină

Separatoarele de sarcină sunt echipamente de comutație având caracteristicile și parametrii separatoarelor normale, dar care, în plus față de acestea, sunt capabile să întrerupă curenți în regimuri normale de funcționare a instalațiilor. În acest scop separatoarele de sarcină sunt prevăzute cu dispozitive pentru stingere arcului electric de deconectare și cu mecanisme de acționare care să permită deplasarea contactelor mobile cu viteze de valori mari, independente de operator.

Utilizarea separatoarelor de sarcină este eficientă în următoarele cazuri:

- comutarea bateriilor de condensatoare având puteri de cel mult 1,2 MVar și tensiuni nominale de maximum 20 kV;
- înlocuirea întrerupătoarelor de putere în puncte ale rețelelor caracterizate prin puteri de scurtcircuit de valori mici (30 MVA), dar în care frecvența operațiilor de comutare este mare;
- echipament de comutație în rețelele buclate, cu rol de a închide sau deschide bucla la sarcina nominală de trecere;
- echipament de comutație pentru linii electrice aeriene sau în cablu, funcționând în gol.

În comparație cu întrerupătoarele de înaltă tensiune, separatoarele de sarcină au o construcție mult mai simplă și sunt mult mai ieftine. Înlocuirea întrerupătoarelor cu separatoare de sarcină în punctele instalațiilor de distribuție cu frecvență mare de comutație în regim normal de sarcină este eficientă d.p.d.v tehnico-economic, deoarece aceeași funcționalitate se obține cu investiții și cheltuieli de exploatare mai mici.

Datorită simplității constructive, capacitatea de deconectare a separatoarelor de sarcină este limitată la valori de ordinul 25-30 MVA, mai mici decât puterile de scurtcircuit care caracterizează rețelele de distribuție. Din aceste motive, protecția la scurtcircuit în astfel de instalații se obține cu ajutorul fie al întrerupătoarelor automate, fie, în cele mai multe cazuri, al siguranțelor fuzibile cu mare putere de rupere.

18.3.1. Separatoare de sarcină cu camere de stingere plate

Separatorul de sarcină se obține dintr-un separator normal, căruia i se adaugă contacte de rupere prevăzute cu camere de stingere și un dispozitiv de acționare cu înmagazinare de energie în resorturi.

În figura 18.8 este prezentată operația de deconectare efectuată de un separator de sarcină având cameră de stingere plată, funcționând pe principiul autogenerării de gaze.

La deconectare, în timp ce cuțitul 1 al contactului de lucru părăsește contactul fix 6, cuțitul de rupere 2 rămâne în contact, rulând sub piesa 3, până la desprindere; în acest moment, între cuțitul de rupere 2 și contactul fix 3 se amorsează arcul electric de deconectare, alungit rapid prin deplasarea contactului 2, sub acțiunea resortului 5. Pereții camerei de stingere, formând o fantă cu grosimea de circa 5 mm, se descompun în contact cu coloana arcului electric și eliberează o cantitate de gaze care duc la creșterea locală a presiunii și la răcirea arcului; suflajul exercitat, la care se adaugă și forțele electrodinamice de contur, produc alungirea arcului și, în cele din urmă, stingerea acestuia.

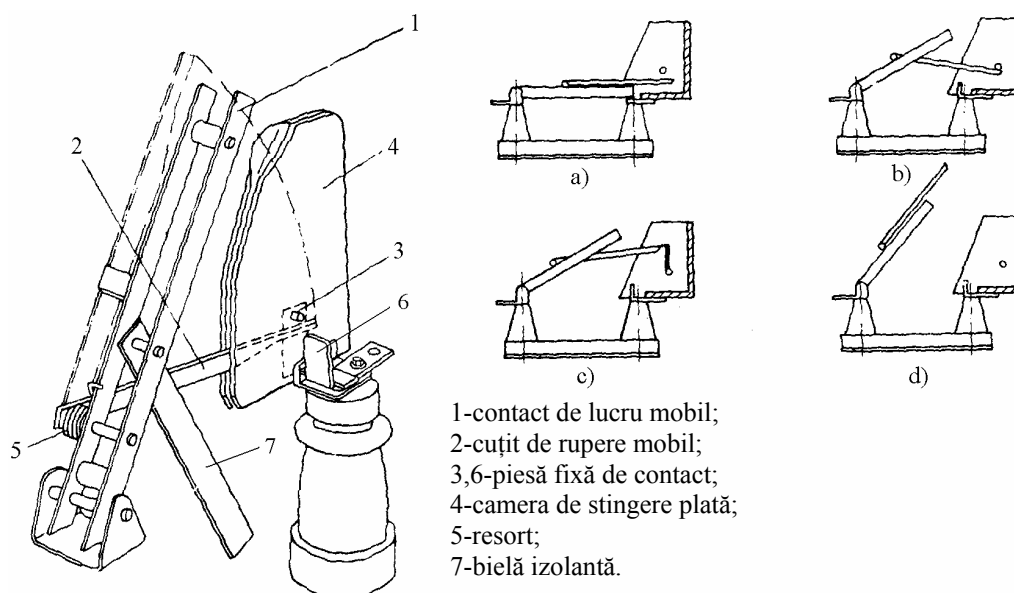


Fig. 18.8. Deonectarea unui separator de sarcină cu camere plate.

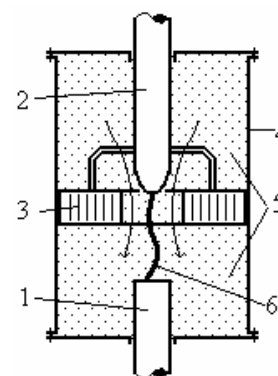
Potrivit principiului prezentat, se construiesc separatoare de sarcină cu camere plate, destinate montării în instalații de interior, cu tensiuni nominale de 10 kV (curent nominal de 400, 630 A) și de 20 kV (curent nominal de 200 A).

18.3.2. Separatoare de sarcină cu hexafluorură de sulf

Tensiunea nominală de lucru ajunge până la 750 kV.

Construcția acestor separatoare se caracterizează prin existența unei carcase etanșe, care conține toate componentele aferente și în care gazul SF₆ se găsește la presiuni variind între 0,15÷0,5 MPa. Suflajul cu SF₆, sub acțiunea căruia are loc stingerea arcului electric, se obține prin autocompresie, principiul utilizat fiind reprezentat schematic în figura 18.9.

Contactele de comutație ale separatorului de sarcină 1-fix și 2-mobil se găsesc în carcasa etanșă 4. Solidar cu contactul mobil 1, pistonul 3 comprimă la deconectare, pe fața superioară, hexafluorura de sulf; astfel, prin orificiul central al pistonului se exercită asupra arcului electric, 6, suflajul longitudinal necesar pentru stingerea acestuia.

Fig. 18.9: Separator de sarcină cu SF₆.

- 1-contact fix;
- 2-contact mobil;
- 3-piston;
- 4-cameră etanșă;
- 5-gaz SF₆.
- 6-arc electric

18.4. Scurtcircuitoare

Scurtcircuitoarele sunt echipamente de comutație utilizate în schemele de protecție la scurtcircuit a transformatoarelor de putere, care nu sunt racordate la rețea prin întrerupătoare de putere.

Configurația unei astfel de instalații este prezentată în figura 18.10. Un scurtcircuit în transformatoarele T₁, T₂ este sesizat de protecția prin relee a acestora, care comandă închiderea automată a scurtcircuitului SSC. Se realizează astfel un scurtcircuit voit (monofazat sau bifazat cu punere la pământ), caracterizat printr-un curent având intensitatea mai mare decât cea corespunzătoare defectului din transformatoare. În aceste condiții, scurtcircuitul este sesizat de protecția prin relee a întrerupătorului I, care comandă executarea unui ciclu deschis-închis.

În acest mod, întrerupătorul I întrerupe defectul produs în rețea prin închiderea scurtcircuitului SSC, iar după o pauză de durată prestabilită t_p , repune automat instalația sub tensiune. Pe durata t_p , de asemenea în mod automat, se deschid separatorul de secționare S și scurtcircuitul SSC. Această succesiune de operații de comutare conduce în final la lichidarea

defectului produs inițial în transformator, asigurându-se în același timp continuitatea în alimentarea cu energie a consumatorilor.

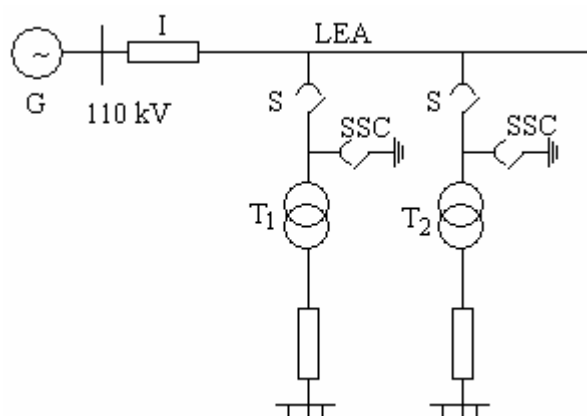


Fig. 18.10: Utilizarea scurtcircuitoarelor.

Deoarece în rețelele cu neutrul legat direct la pământ punerea monofază la pământ constituie un defect, scurtcircuitoarele utilizate sunt monopolare. În rețelele cu neutrul izolat se prevăd scurtcircuitoare bipolare.

În figura 18.11 este prezentată construcția unui scurtcircuitor cu contacte în aer, având tensiunea nominală de 110 kV.

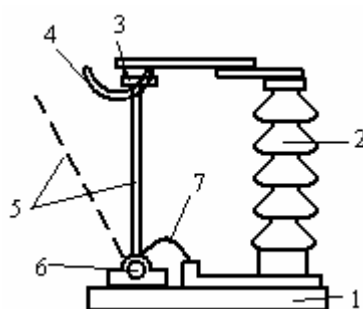


Fig. 18.11: Scurtcircuitor de î.t.

- 1-sașiu metalic;
- 2-izolator suport;
- 3-contact fix+bornă de racord;
- 4-coarne metalice – pentru uniformizarea repartiției potențialului pe izolator;
- 5-contact mobil;
- 6-ax fix;
- 7-legătură flexibilă.

Reducerea duratei de acționare a unui scurtcircuitor este posibilă prin micșorarea distanței de izolație dintre contactele deschise, soluție care cere un mediu cu proprietăți electroizolante mai bune decât aerul.

Astfel de considerente au condus la construcția scurtcircuitoarelor funcționând în SF₆; o variantă constructivă de acest tip este dată în figura 18.12.

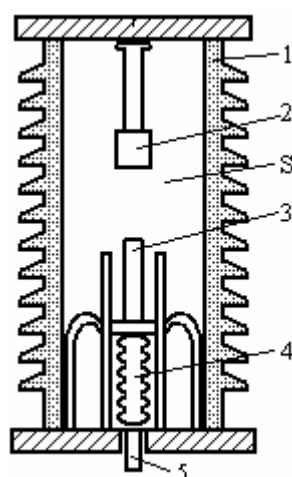


Fig. 18.12: Scurtcircuitor cu SF₆.

- 1-cilindru de porțelan;
- 2-contact fix;
- 3-contact mobil;
- 4-burdof din oțel pentru etanșare;
- 5-tijă de acționare;

Cursul nr. 19

Echipamente de comutație de joasă tensiune. Contactoare și ruptoare

19.1. Generalități

Contactoarele și ruptoarele sunt echipamente electrice de comutație și de comandă cu o singură poziție de repaus, acționate în alt mod decât manual, capabile de a închide, a suporta și a întrerupe curenți în condiții normale, inclusiv curenții de serviciu și de suprasarcină.

Contactoarele au în poziția de repaus contactele principale normal deschise în timp ce ruptoarele au contactele principale normal închise.

Contactoarele sunt cele mai răspândite echipamente din instalațiile de comandă și automatizare. Prezintă avantajele că pot fi acționate de la distanță la primirea unui impuls ce poate fi dat manual sau automat, au o frecvență mare de conectare și o rezistență mare la uzura electrică și mecanică.

19.2. Caracteristici constructive și funcționale

Principalele elemente ale unui contactor sunt: organul motor, căile de curent, dispozitivul de stingere a arcului electric, relee de protecție (când există), șasiul și carcasa.

Elementul motor asigură deplasarea contactelor mobile. Acest element poate fi un electromagnet (contactoare electromagnetice), un piston acționat cu aer comprimat (contactoare pneumatice) sau un ax motor prevăzut cu came (contactoare mecanice). Cele mai răspândite sunt contactoarele electromagnetice, mai ales cele ce acționează în circuite de curent alternativ (contactoare de curent alternativ). Electromagnetul poate fi alimentat cu tensiune alternativă (în cea mai mare parte a cazurilor) sau continuă;

Căile de curent sunt constituite din bornele de conexiuni, contactele principale și secundare și eventualele legături flexibile prin care se asigură continuitatea circuitului principal. Tot pe căile de curent sunt înseriate și bobinele de suflaj magnetic când acestea există. Contactele auxiliare ale unui contactor sunt constituite sub forma unui bloc suplimentar de contacte normal închise sau/și normal deschise și care sunt utilizate în circuitele secundare de semnalizare și comandă. Contactele principale sunt prevăzute cu camere de stingere, ca dispozitive specializate pentru stingerea arcului electric de comutație.

Contactoarele cu relee conțin relee de protecție la suprasarcină, care în mod obișnuit sunt blocuri de relee termice, prin care se asigură protecția la suprasarcină a motoarelor asincrone de joasă tensiune.

Șasiul și carcasa unui contactor sunt formate din piese izolante și metalice care asigură izolarea, ghidajul pieselor în mișcare și fixarea aparatului în poziția de funcționare.

Din punct de vedere al cinematicii, contactoarele se pot clasifica în:

- contactoare cu *mișcare de rotație* a contactelor mobile și a electromagnetului;
- contactoare cu *mișcare de translație* a contactelor și a electromagnetului. Mișcările contactelor și electromagnetului pot fi paralele și contactorul are o mișcare de translație simplă sau perpendiculară una pe cealaltă și contactorul are o mișcare combinată.

Tipul electromagnetului de acționare imprimă unele particularități construcției contactoarelor. Astfel, în cazul contactoarelor de c.c., este necesară asigurarea unei amplificări a deplasării armăturii mobile a electromagnetului, astfel încât să fie suficientă pentru stingerea arcului electric, obținută la lungimi relativ mari ale coloanei arcului electric. Această condiție poate fi realizată avantajos dacă mișcarea echipajului mobil este una de rotație; în acest scop, electromagneții de acționare au contactoarelor de c.c. au armătura mobilă cu mișcare de rotație.

Contactele contactoarelor de c.c. se realizează din cupru, de tip deget. Pentru stingerea arcului electric, aceste contactoare sunt prevăzute cu camere de stingere și cu dispozitive de suflaj magnetic.

Contactoarele de c.a. cu mișcare de rotație au o răspândire restrânsă, această soluție constructivă aplicându-se în cazul unor regimuri grele de funcționare, la curenți nominali având intensități ce depășesc de regulă 400 A. În mod obișnuit, contactoarele de c.a. sunt acționate cu electromagneți având armătura mobilă cu mișcare de translație. Contactele electrice ale contactoarelor cu mișcare de translație sunt de tip punte, cu rupere în două locuri pe calea de curent; piesele de contact se confecționează din argint sau aliaje ale acestuia.

Stingerea arcului electric are loc în camere de stingere prevăzute cu grile metalice; în unele cazuri acestea sunt feromagnetice și cuprate sau zincate la exterior.

Contactoarele electromagnetice se clasifică după categoriile de utilizare, și după tipul curentului astfel: cele de c.a. au simbolul AC-1 ... AC8a,b; iar cele de c.c.: DC-1...DC6.

19.3. Comanda contactoarelor electromagnetice

Schemele pentru comanda unui contactor sunt diferite, după cum acesta este de curent continuu sau de curent alternativ.

Contactorul electromagnetic poate fi acționat cu:

- electromagnet de curent alternativ;
- cu electromagnet de curent continuu de la o sursă exterioară sau de la un redresor.

19.3.1. Acționarea cu electromagnet de curent continuu.

În cazul acționării cu electromagneți de c.c., este posibilă dimensionarea economică a bobinei, dată fiind alura caracteristicii electromecanice; corespunzător acesteia, forța activă dezvoltată la întrefier minim depășește cu mult forța necesară asigurării presiunii pe contacte. În aceste condiții, după acționare. Intensitatea curentului prin bobina electromagnetului poate fi diminuată la valorile necesare menținerii contactorului în această poziție. Aceasta se obține prin utilizarea, în schema de comandă, a unei rezistențe economizoare, R_e ; schemele tipice de acționare cu electromagneți de c.c. sunt date în figura 19.1a – pentru alimentare în c.c., respectiv 19.1b, pentru alimentare în c.a.

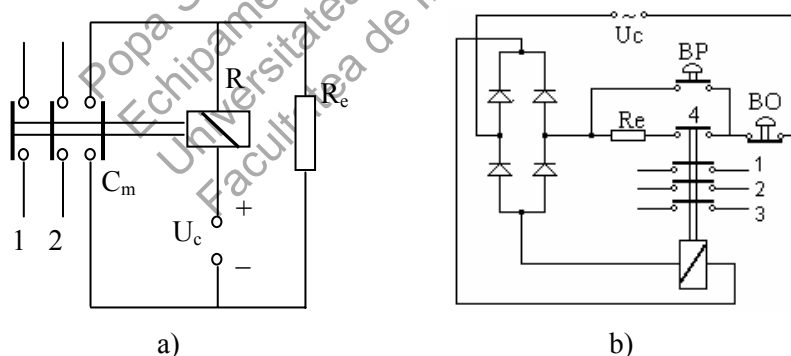


Fig. 19.1. Scheme pentru comanda contactoarelor electromagnetice în c.c.

La acționare, pe o durată egală cu timpul propriu, întreaga tensiune de comandă, U_c , se aplică bobinei electromagnetului, forțându-se astfel regimul tranzitoriu al acesteia. După acționare, rezistența economizatoare, R_e , este introdusă în circuit prin deschiderea unui contact auxiliar normal închis (C_m , fig 19.1a) sau prin închiderea unui contact auxiliar normal deschis (4, fig. 19.1b). În schema din figura 19.1b, contactul 4 realizează și automenținerea comenzii de acționare, dată prin apăsarea butonului BP; revenirea se obține prin întreruperea circuitului bobinei cu ajutorul butonului BO.

19.3.2. Actionarea cu electromagnet de curent alternativ

Pentru comanda contactoarelor de c.a. cu electromagneți de c.a., se utilizează scheme electrice de tipul celor prezentate în figura 19.2a și b.

În figura 19.2a s-a reprezentat schema electrică de comandă a unui contator echipat cu electromagnet de curent alternativ, acționat cu ajutorul butoanelor de comandă. Excitația se face la tensiunea compusă a rețelei. Se remarcă existența contactului auxiliar de reținere C_r , care asigură alimentarea bobinei, după ce butonul I de închidere a fost deschis. În figura 19.2b se arată varianta acționării în curent alternativ, comanda de închidere și deschidere realizându-se cu întrerupătorul auxiliar I_a . În acest caz, contactul auxiliar de reținere nu-și mai găsește utilitate.

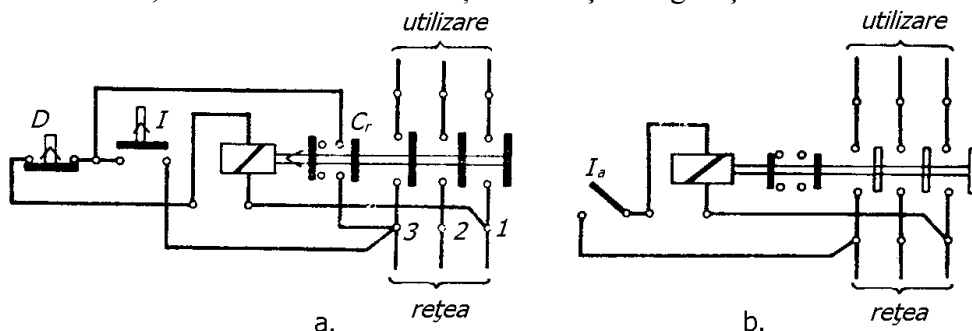


Fig. 19.2. Schema de comandă cu: a- buton dublu; b- întrerupător.

19.4. Contactoare electromagnetice de c.c și c.a.

19.4.1. Contactoare electromagnetice de c.c.

Acestea se fabrică într-o gamă restrânsă, pentru utilizări în domeniul echipamentului naval și pentru tracțiunea electrică. Se construiesc atât în variantă monopolară, cât și în variantă bipolară.

Schița constructivă a unui contractor monopolar de c.c. destinat instalațiilor de joasă tensiune este prezentată în figura 19.3.

Acționarea contactorului se obține prin punerea sub tensiune a bobinei electromagnetului 2, având armătura mobilă cu mișcare de rotație. Calea de curent principală conține bornele de conexiuni 5, bobina de suflaj magnetic 6 prevăzută cu piesele polare 7, contactul mobil 3, contactul fix 4 și legătura flexibilă 11.

Stingerea arcului electric de deconectare se obține în camera de stingere cu fantă variabilă 8, unde coloana arcului este introdusă prin deplasarea contactului mobil și sub acțiunea suflajului magnetic. Pentru valori relativ mici ale întrefierului de lucru al electromagnetului, contactul asigură o alungire relativ mare a arcului electric, deoarece constructiv se realizează un raport de aproximativ 2:1 între brațul contactului principal și lungimea armăturii mobile a electromagnetului.

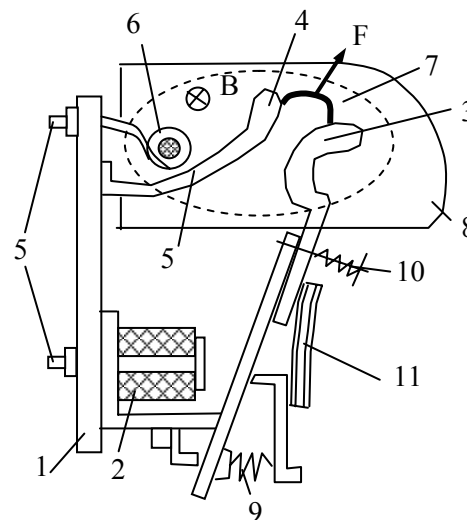


Fig.19.3. Contactor electromagnetic de c.c.

Contactele contactorului sunt de tip deget, realizate din cupru tare. Folosirea cuprului este posibilă în acest caz deoarece la închidere contactul mobil execută o mișcare combinată, de rostogolire și de translație față de contactul fix, asigurându-se astfel autocurățirea prin frecare a suprafețelor de contact.

Atât forța inițială de închidere, cât și forța de apăsare în contact se obține cu ajutorul resortului precomprimat 10; resortul 9 servește pentru deschidere.

19.4.2. Contactoare electromagnetice de c.a.

Se construiesc în variantă tripolară, deplasarea armăturii mobile fiind de translație sau de rotație.

Contactoarele cu mișcare de translație simplă, figura 19.4, se utilizează în instalații trifazate de joasă tensiune, având curenți nominali cu intensități de maximum 100 A. Construcția unui astfel de contactor cuprinde; contactele fixe 1, contactele mobile de tip punte 2, resortul precomprimat 3, resorturile de deschidere 4 și electromagnetul de acționare, având armătura fixă 5, bobina 6 și armătura mobilă 7.

Contactele de tip punte cu întrerupere în două locuri pe fază, facilitează stingere arcului electric de deconectare.

Contactoarele având curenți nominali mai mici de 10A, nu sunt prevăzute cu camere de stingere; pentru curenți nominali mai mari, camerele de stingere sunt cu fantă îngustă, prevăzute cu grile metalice, stingerea arcului electric obținându-se pe baza efectului de electrod.

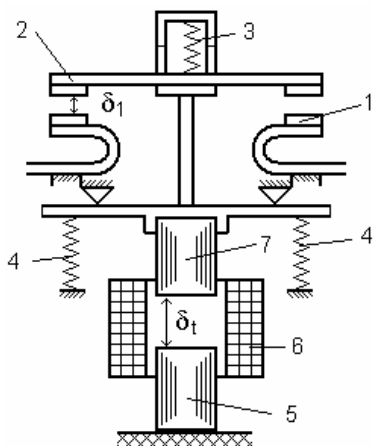


Fig. 19.4: Contactor de c.a. cu mișcare de translație.

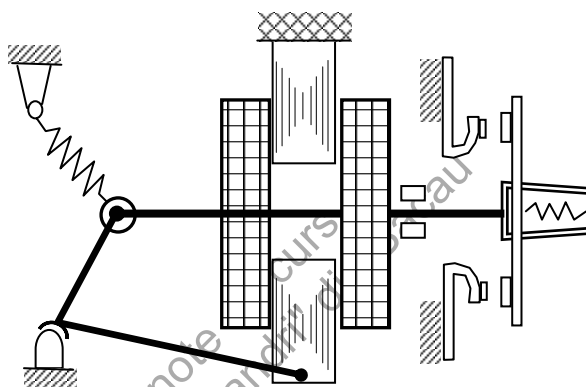


Fig. 19.5. Contactor de c.a. cu mișcare de translație combinată.

Pentru a se evita creșterea excesivă a uzurii mecanice, contactoarele având curenți nominali cu intensități de 100÷400 A se construiesc cu mișcare de translație combinată. Această soluție permite compensarea creșterii maselor pieselor în mișcare prin micșorarea vitezei de acționare a echipajului mobil, astfel încât energia cinetică a acestuia să nu crească foarte mult; pe această cale uzura mecanică poate fi menținută între limite acceptabile.

Contactoarele de c.a. cu mișcare de rotație se construiesc pentru curenți nominali mari (400÷2000 A). Acționarea acestora se realizează cu un electromagnet de c.a. a cărui armătură mobilă rotește un ax izolat, pe care sunt fixate contactele mobile ale celor trei faze și blocul de contacte auxiliare.

Adoptarea acestei variante constructive pentru curenți cu intensități de valori mari se bazează pe optimizarea consumului de materiale conductoare și feromagnetice necesare în construcția contactorului. În comparație cu contactoarele având mișcare de translație, varianta cu mișcare de rotație necesită forțe de apăsare în contact de două ori mai mici, prin aceasta diminuându-se mult dimensiunile de gabarit ale electromagnetului de acționare, cât și consumul propriu al acestuia.

19.4.3. Contactoare sincronizate

Micșorarea uzurii electrice a contactoarelor se poate obține prin reducerea la minimum a duratei de ardere a arcului electric de deconectare.

Unul din procedeele utilizate în acest scop îl constituie sincronizarea momentului desprinderii contactelor de comutație, în raport cu momentul anulării intensității curentului din circuitul deconectat; variantele constructive având o astfel de funcționare se numesc contactoare sincronizate.

Contactorul sincronizat care apelează la un dispozitiv electromagnetic de sincronizare are schema de principiu dată în figura 19.6a unde se evidențiază următoarele elemente componente:

- **contactorul electromagnetic:** electromagnetul de acționare 1, puntea contactelor mobile 2, contactele fixe 3, resorturile precomprimate 4 și resortul de deschidere 6, care se tensionează în timpul manevrei de conectare;

- **ansamblul de sincronizare:** care sesizează trecerile naturale prin zero ale curentului din circuit, ce folosește transformatorul de adaptare 5 și electromagnetul de sincronizare 7.

Funcționarea unui asemenea contactor cu sincronizare electromagnetică a deconectării, figura 19.6b, decurge astfel: la întreruperea alimentării electromagnetului de acționare 1, traversa contactelor mobile este menținută în poziția acționat datorită electromagnetului de reținere 7, cu bobina parcursă de curentul $i_2(t)$, furnizat prin intermediul transformatorului de adaptare 5, a cărui înfășurare primară este în serie cu circuitul principal de curent $i_1(t)$. Dependența în funcție de timp a forței de atracție exercitate de electromagnetul 7 asupra armăturii sale mobile, cu treceri prin zero simultane cu cele ale curentului $i_2(t)$, pune în evidență posibilitatea deschiderii contactelor 2, 3 ale aparatului în unul din momentele $t_1, t_2, t_3, \dots$, în care forța electromagnetică de menținere F_a , este egală cu forța resorturilor antagoniste, F_r . În momentul t_3 de exemplu, anterior trecerii prin zero a curentului din circuitul principal, $i_1(t)$, se începe mișcarea traversei 2 a contactelor mobile. Pentru a se obține deconectarea sincronizată este desigur necesar ca deschiderea contactelor aparatului să intervină exact în momentul trecerii prin zero a curentului din circuitul principal, ajustarea bunei funcționări asigurându-se fie pe seama inerției mecanice mari a contactelor fixe 3, ce au masa suficient de mare, fie prin modificarea întrefierului transformatorului de adaptare 5.

De remarcat faptul că dacă timpul propriu de răspuns al dispozitivului de acționare al contactorului este mare se poate amâna deconectarea sincronizată la o trecere ulterioară prin zero a curentului din circuitul principal.

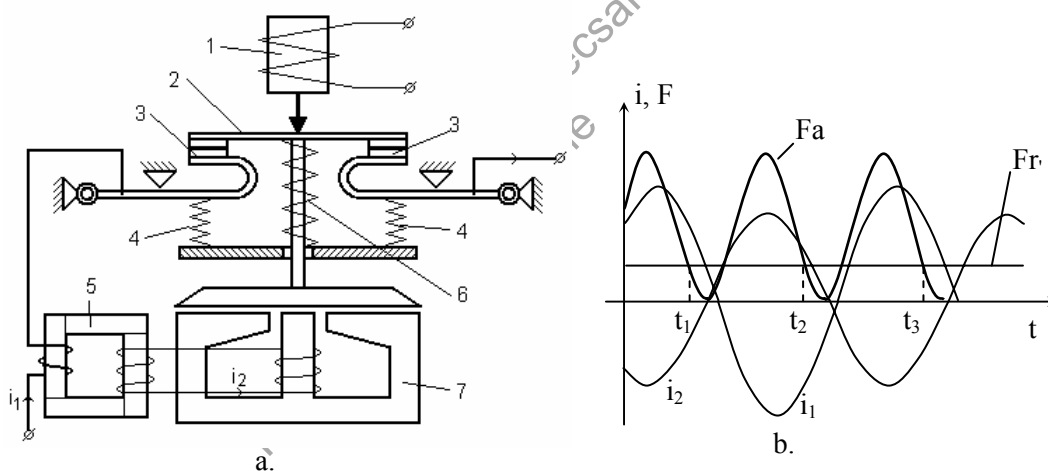


Fig. 19.6. Contactor sincronizat.

Contactorul prezentat, funcționând la joasă tensiune, permite întreruperea unor curenți având intensități de $150 \div 1000$ A, la $\cos \phi = 0,35$, practic fără arc electric. Pe această cale uzura electrică a contactelor se reduce de $15 \div 20$ ori față de cea a contactelor contactoarelor electromagnetice obișnuite. În aceste condiții, durata de funcționare a contactelor se apropie de duranța mecanică a contactorului.

OBS: Contactoarele sincronizate sunt prevăzute cu câte un ansamblu de sincronizare pe fiecare fază în parte.