Universitatea de Ştiinţe şi Tehnologie
POLITEHNICA din Bucureşti
Facultatea de ENERGETICĂ
Departamentul SISTEME ELECTROENERGETICE

TEZĂ DE DOCTORAT
REZUMAT

Cauze de incendiu cu natură electrică

Coordonator ştiinţific
Prof. univ. dr. ing.
Nicolae GOLOVANOV

Doctorand ing.
Liviu-Mihai SBORA

Comisia de îndrumare:
Prof. univ. dr. ing. Radu Porumb
Prof. univ dr. ing. George Cristian LĂZĂROIU
Conf. univ. dr. ing. Laurențiu LIPAN

Bucureşti
2024

Cuprinsul tezei de doctorat

Capitolul 1 Introducere 5

Capitolul 2 Inițierea și stingerea incendiilor și exploziilor 7
2.1 Condiții necesare pentru inițierea unui incendiu / unei explozii 8
2.2 Cauzele inițierii incendiilor la instalațiile electrice 10
2.3 Conceptul de stingere a unui incendiu 12
2.4 Moduri de transfer de căldură 13
2.4.1 Conducția termică 13
2.4.2 Convecția termică 15
2.4.3 Radiația termică 16
2.5 Ecuația de trasfer prin conducție 18
2.6 Conductivitatea termică 20
2.7 Starea solidă 21
2.8 Materiale izolatoare termic 22
2.8.1 Starea fluidă (lichidă sau gazoasă) 22
2.8.2 Corpuri cu surse interioare de căldură 24
2.9 Bara cilindrică 25
2.10 Tubul cilindric 25
2.11 Conducția termică unidimensională în regim constant 26
2.12 Perete cilindric multicompozit (neomogen) 26
2.13 Încălzirea conductoarelor electrice 26
2.13.1 Influența regimului distorsionat asupra încălzirii conductoarelor 26
2.13.2 Încălzirea conductoarelor parcurse de curent electric 31
2.14 Rezistențe termice 32
2.15 Cabluri multiconductoare 32
2.16 Studiu de caz 33

Capitolul 3 Surse de căldură de natură electrică 40
3.1 Încălzirea contactelor 40
3.1.1 Fenomene fizice în contacte electrice 40
3.2 Stricțiunea liniilor de curent electric 42
3.3 Pelicula disturbatoare 44
3.4 Rezistența de stricțiune a unui contact punctiform 44
3.5 Rezistența de stricțiune a contactului plan 45
3.6 Rezistența de stricțiune a contactului linear 45
3.7 Dependența între forța de apăsare și rezistența electrică 45
3.7.1 Contactul punctiform 45
3.7.1.1 Studii de caz 46
3.7.2 Contactul plan 48
3.8 Încălzirea contactelor punctiforme 48
3.9 Încălzirea contactelor în regim de lungă durată 50
3.10 Regimurile termice ale contactelor electrice 50
3.10.1 Regimul permanent 50
3.11 Dependența între forța de apăsare și temperatură 50
3.12 Regimul de scurtă durată 50

3.13 Dependența rezistenței de strictiune de supratemperatura contactului 50
3.14 Date rezultate în urma experimentelor 51
3.14.1 Concluzii 53
3.15 Studiu de caz 54
3.15.1 Constatări după incendiu 55
3.15.2 Cercetări pentru stabilirea cauzelor 56
3.15.3 Interpretarea fenomenelor energetice petrecute cu ocazia incendiului 56
3.15.4 Particularitățile de dezvoltare, propagare a incendiilor 59

Capitolul 4. Mijloace de stingere a incendiilor în instalații electrice 60
4.1 Stingerea incendiilor în spații închise 61
4.2 Mijloace/instalații fixe pentru stingerea incendiilor 62
4.3 Mijloace/instalații mobile pentru stingerea incendiilor 64
4.4 Mijloace de protecție la arc electric în rețelele de joasă tensiune 65
4.5 Protecția la apariția arcului electric în tablourile electrice 67
4.6 Protecția prin întreruperea curentului electric de scurgere 67
4.7 Încălzirea conductoarelor electrice datorită modului specific de funcționare al receptoarelor nelineare 68
4.8 Constatări 69
4.9 Raport de evaluare 69

Capitolul 5 Propagarea incendiilor 71
5.1 Procesul de propagare 71
5.2 Influenţa curenţilor de aer 75

Capitolul 6 Cercetarea cauzelor de incendiu 77
6.1 Metode și procedee folosite în cercetarea cauzelor de incendiu 77
6.2 Clasificarea principalelor urme ale incendiilor 77
6.3 Daune datorate incendiului 79

Capitolul 7 Simularea numerică a incendiilor 81
7.1 Comportamentul ecuațiilor Navier-Stokes 83
7.2 Tehnici numerice: diferențe dintre RANS și LES 83
7.3 Condiții la limită și modele de pereți 83
7.4 Calculul schimbului de căldură 84
7.5 Concluzii 84

Capitolul 8 Concluzii 86

Anexe
Anexa 1 Transferul de căldură într-o bară cilindrică 89
Anexa 2 Transferul termic într-un tub cilindric 91
Anexa 3 Transferul termic prin peretele cilindric al unui conductor parcurs de curent electric 94
Anexa 4 Transferul termic în cazul unui conductor izolat electric 101

Anexa 5 Încălzirea conductoarelor electrice 104
Anexa 6 Încălzirea cablurilor multifilare 108
Anexa 7 Încălzirea unui cablul monofazat cu 3 fire 112
Anexa 8 Modelul de calcul al contactului electric 115
Anexa 9 Rezistenţa electrică a contactului plan 119
Anexa 10 Rezistenţa electrică a unui contact linear 121
Anexa 11 Rezistenţă electrică a unui contact plan cu deformare 123
Anexa 12 Încălzirea contactelor în regim de lungă durată 125
Anexa 13 Tubul de curent electric 127
Anexa 14 Influenţa forţei de apăsare 130
Anexa 15 Regimul adiabatic de încălzire 134
Anexa 16 Influenţa supratemperaturii 140
Anexa 17 Date experimentale în instalaţii industriale 141
Anexa 18 Date introduse în programul MALTLAB pentru simularea unei modelări experimentale 146

Bibliografie 150

Scurtă introducere

Focul se defineşte ca fiind ,,procesul de ardere caracterizat prin emisie de căldură, însoţit de fum sau flăcări sau ambele simultan".

Definiţia admite şi următoarea formulare: ,,arderea care se dezvoltă controlat în timp şi spaţiu".

Spre exemplu, arderea controlată a resturilor de paie reprezintă un foc/incendiu controlat; un alt exemplu de foc controlat îl constituie aprinderea sau generarea flăcării la un aragaz. Este necesar ca această aplicaţie să se realizeze utilizând metoda „flacără pe gaz".

Unele dintre principalele cauze ale incendiilor sunt generate de instalaţiile electrice.

Experienţa relevă faptul că în majoritatea situaţiilor, în spaţiile tehnologice şi construcţiile conexe acestora afectate de incendii, au avut loc inclusiv deteriorări ale instalaţiilor electrice.

Cercetarea unei cauze de incendiu având natură electrică trebuie să se bazeze pe argumente ştiinţifice, fiind astfel necesar să se analizeze fenomenele care au avut loc în instalaţia electrică şi care pot fi puse în evidenţă printr-o serie de urme prezente în zona incendiului.

Riscul de incendiu pe care îl prezintă o instalaţie electrică are la bază efectul termic al curentului electric sau descărcări electrice în zone cu contact slab și este determinat de calitatea execuţiei, modul de exploatare a instalaţiilor, de natura materialelor aflate în vecinătatea acestora etc.

O cauză importantă care se generează frecvent, o reprezintă scurtcircuitul electric.

Scurtcircuitul electric se produce atunci când izolaţia dintre două conductoare ale unei reţele sau ale unui aparat se degradează şi între care există o diferenţă de potenţial, acestea putând ajunge în contact unul cu celălalt sau când izolaţia unui conductor aflat sub tensiune faţă de pământ se degradează.

Accidentul prin şoc electric apare atunci când corpul uman se intercalează între două puncte cu potenţiale electrice diferite, situate în care prin el circulă un curent electric capabil să afecteze funcţiile vitale (respiraţia, circulaţia sângelui şi activitatea nervoasă).

Lucrarea prezintă o serie de aspecte referitoare la instalațiile electrice, măsuri impuse cu scopul prevenrii incendiilor care ar putea fi inițiate de anumite nereguli întâlnite în modul de exploatare a acestora, fenomene care se produc în instalațiile electrice funcționale, și nu în ultimul rând, pericolele existente pentru om în momentul în care acesta vine în contact cu tensiunea electrică în diferite împrejurări.

În concordanță cu titlul tezei, bineînțeles că prima parte a lucrării este alocată descrierii încălzirii conductoarelor și a contactelor electrice, dar și a unui fenomen care poate genera catastrofe, pierderi de vieți omenești și bistrugerea bunurilor materiale: incendiul / explozia.

O atenție deosebită s-a acordat conductoarelor electrice, datorită importanței acestora în producerea incendiilor de natură electrică, a complexității structurii acestora și a măsurilor stricte ce se impun în utilizarea lor. Nerespectarea regulilor stabilite în acest domeniu pot duce la evenimente premergătoare apariției incendiilor.

Ultimele capitole oferă detalii despre cauzele de incendiu de natură electrică, mai concret fenomenele care se produc în instalațiile electrice, metodologia ce trebuie aplicată în vederea stabilirii cauzelor de incendiu, și nu în ultimul rând, despre

scurtcircuit.

În România, conform ultimelor statistici ale Inspectoratului General pentru Situații de Urgență (IGSU), au loc anual circa 30.000 de intervenții pentru stingerea incendiilor, din care 26% sunt incendii de natură electrică. De asemenea, la nivel european, statisticile sugerează că în fiecare an peste 5000 de oameni mor în incendii și aproximativ de zece ori mai mult sunt răniți. Dintre incendiile înregistrate, un sfert sunt tot de natură electrică. Deși incendiile de natură electrică reprezintă o amenințare importantă și ascunsă, cu pagube enorme și consecințe foarte neplăcute, abia relativ recent au început să fie abordate și studiate cauzele și modalitățile de stingere și prevenire.

Ecuația inițierii incendiilor și exploziilor

Fenomenul de iniţiere a unui eveniment de tip *incendiu / explozie*, este determinat de *triunghiul arderii* (fig.1) care se poate defini prin intermediul ecuaţiei (1):

$$\text{iniţiere incendiu} = f(x_1,\ x_2\ , x_3, x_4\ ) = f(x_1,\ x_2\ , x_{31}\ , x_{32}, x_4), \qquad (1)$$

sau

$$\text{iniţiere explozie} = g(x_1,\ x_2\ , x_3, x_4\ ) = g(x_1,\ x_2\ , x_{31}\ , x_{32}, x_4) \qquad (2)$$



Fig. 1 – Triunghiul arderii.

Variabilele care intervin în relaţiile (1 și 2) sunt:

- x_1 - mijlocul sau elemente componente din structura sa (acesta poate sau nu să reprezinte sediul fenomenului, adică să conţină sau nu sursa de aprindere/inflamare caracterizată de temperatura de aprindere/inflamare);

- x_2- sursa (care poate fi de natură electrică sau neelectrică); este necesar şi suficient ca între sursă şi primul material de natură lichidă, vapori ai lichidelor, pulberi, prafuri, ceţuri de G.P.L., scame/suspensii de natură organică/anorganică, gaze, etc., care se aprind/se inflamează să existe o condiţie de distanţă/lungime caracteristică ($l_{exp\ l.}$), care admite o valoare maximă; prin depăşirea/majorarea acestei valori, aprinderea/inflamarea nu se mai poate realiza; pentru generarea temperaturilor de aprindere/inflamare, după caz, este necesar ca variabila x_2 să genereze energie suficientă pentru inițierea unui incendiu / unei explozii;

- x_{31}- primul material care se poate aprinde/inflama; în cazul materialelor combustibile de tipul lichide/vapori ai lichidelor, pulberi, prafuri, ceţuri de G.P.L., scame / suspensii de natură organică/anorganică, gaze etc., un factor important în acest sens, este concentraţia în aer a acestor substanţe;

- x_{32} - aerul atmosferic care, pentru a contribui la iniţierea unei explozii, este necesar şi suficient să conţină oxigen pentru presiune şi temperatură la valori predefinite în limitele (16÷21)%;

- x_4 - împrejurarea;

- t, s - momentul de timp respectiv spaţiul (volumul) la / în care se realizează simultan condiţiile enunţate mai sus.

Din punct de vedere spaţio-temporal, relaţia (1) care semnifică iniţierea unui incendiu, se poate defini şi prin intermediul ecuaţiei:

$$\text{iniţiere incendiu} = \min . \bigcap_{k=1}^{k=4} x_k(t_i\,,\, s_i), \tag{3}$$

care reprezintă valoarea minimă de timp la care se realizează intersecţia variabilelor puse în discuţie, în raport cu anumite condiţii, determinate în principal de timp şi spaţiu:

$$t_i = t \text{ şi } s_i = s, \text{ pentru } i = \overline{1,4}. \tag{4}$$

Condiții necesare pentru inițierea unui incendiu/unei explozii

Mijloacele de producere a incendiului pot conţine sau nu sursa de aprindere. Sursa trebuie să genereze suficientă energie pentru a iniția aprinderea și să fie la o anumită distanță minimă față de primul material inflamabil. Pentru ca un eveniment de tip incendiu să fie generat, este suficientă simultaneitatea în timp și spațiu a variabilelor x_k (t,s) în relația (1). Pentru un anumit spațiu, fiecare dintre aceste variabile apare într-un anumit interval de timp Δt_k, incendiul fiind iniţiat doar în intervalul de timp care corespunde intersecției celor k intervale de timp (fig. 2), timpul minim la care se produce incendiul iniţiat reprezentând limita inferioară a acestui interval.

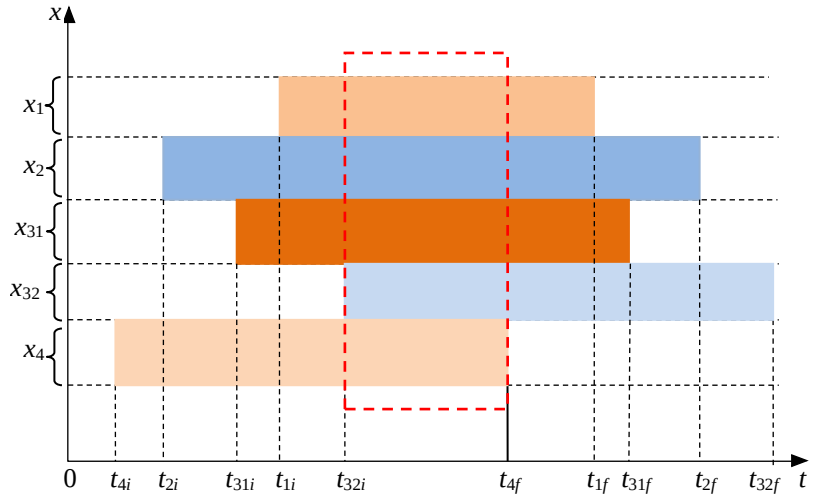


Fig. 2 Intervalul de timp în care se poate produce incendiul

Inițierea incendiilor presupune, deci, existența simultană în timp și spațiu a variabilelor din ecuația (1):

- mijlocul sau elementele componente din structura sa (dispozitive, aparate, unelte etc.), care generează sursa de aprindere din cauza efectuării unor activități funcționale (alimentarea cu energie a utilizatorilor, cuplarea circuitelor, intervenția personalului);

- sursa de aprindere (încălzirea conductoarelor și a contactelor, străpungerea

izolației, apariția arcului electric etc.) care este necesară pentru a depăși energia minimă de aprindere a materialului inflamabil din apropiere (materiale plastice, hârtie, carton etc.);

- materialul combustibil sau inflamabil (primul material din seria materialelor combustibile existente în spațiul în care se poate produce incendiul) care generează fenomenul de aprindere (vapori de combustibil, alcool, solvenți, pulberi și fibre organice etc.);

- aerul atmosferic (pentru inițierea arderii este necesar să conțină oxigen minim între limitele de 16...21%; (cu cât procentul crește peste valoarea de 21% oxigen, probabilitatea inițierii incendiului printr-o reacție de combustie crește);

- împrejurările care contribuie la realizarea fenomenului (umiditatea mediului ambiant, nerespectarea instrucțiunilor de utilizare, instalații improvizate, aparate defecte, intervenții neautorizate etc.).

O variabilă sau parametru important care aparține mulțimii de împrejurări, o reprezintă umiditatea mediului (înconjurător, ambiant sau tehnologic), în care se realizează diferitele activități specifice (industriale, domestice etc.); pentru valori numerice ale umidității mediului care depășesc valoarea de 75% în aer sau în mediul atmosferic, nu se generează fenomene de încărcare electrostatică, nefiind posibilă astfel, inițierea unor incendii sau explozii, prin acest fenomen.

Unele cauze de inițiere a incendiilor la instalațiile electrice

Tablourile electrice de distribuție sunt componente ale instalațiilor electrice cu rolul de a asigura distribuția energiei electrice, fie către alte tablouri, fie către diverse receptoare. Acestea conțin cabluri precum și elemente de conectare, protecție, control, sau de manevră, iar în cazul tablourilor importante, și echipamente de măsurare, control, semnalizare, reglare și eventual automatizări.

În condiții anormale, la deteriorarea sau distrugerea izolaţiei conductoarelor, în aceste tablouri pot apărea încălziri locale sau arcuri electrice care pot conduce la incendii urmate de scoaterea din funcțiune a instalației electrice prin distrugerea tabloului sau se pot răspândi spre exterior, inițiind focare de aprindere în spațiile învecinate. Cele mai frecvente cauze ale incendiilor la tablourile electrice sunt regimurile anormale cauzate de supracurent electric, supratensiune, scăderea tensiunii sub anumite limite sau regimuri distorsionate. Îmbătrânirea și străpungerea izolațiilor, uzura elementelor de conectare și de comutare, arcuri electrice, curenţi electrici de fugă, reducerea presiunii de contact dar și alte cauze, precum manipularea sau întreținerea necorespunzătoare, pot provoca, de asemenea, apariția incendiilor. Toate aceste cauze determină iniţierea incendiului prin apariția unor centre de aprindere singulare sau multiple, din cauza creșterii temperaturii locale peste limita de topire sau aprindere a izolațiilor sau a materialelor cu care există contact.

Dacă un cablu este deteriorat sau apare un contact slab, iniţierea incendiului poate avea loc plecând de la două fenomene:

– carbonizare locală;

– apariţia unui arc electric.

Acumularea locală de carbon la locul carbonizării permite trecerea în continuare a curentului electric prin materialul carbonizat. Datorită neuniformităţii acestuia, curenţii electrici determină căderi diferite de tensiune şi deci posibilitatea apariţie de arcuri electrice care determină amplificarea carbonizării până când cantitatea de carbon este

suficientă pentru o inflamare spontană a zonei.

Dacă defectul are loc în spaţiul dintre două conductoare sau în spaţiul dintre un conductor sub tensiune şi un corp aflat la potenţial zero, prin canalul conductor determinat apare un arc electric care conduce la carbonizarea locală şi iniţierea incendiului prin inflamarea carbonului produs.

Supracurentul electric poate fi de scurtă durată (sub 10 – 15 secunde) sau de lungă durată (suprasarcină). În cazul supracurentului electric de scurtă durată (curent electric de defect), intensitatea curentului electric poate depăși cu mult valorile nominale, dar aceste fenomene sunt, în general, mai puţin periculoase deoarece nu este suficient timp pentru ca temperatura să se ridice la limita de topire a conductorului şi de iniţiere a incendiului. În cazul celor de lungă durată, depășirea mai moderată a valorilor nominale poate determina creșterea temperaturii în timp până la limita de aprindere a izolației sau a materialelor cu care conductorul este în contact.

Supratensiunea reprezintă depășirea tensiunii nominale, care, în timp, are ca efect îmbătrânirea materialului izolator, reducerea duratei de viață a acestuia și creșterea probabilității de apariție a curenților electrici de defect sau de scurtcircuit care pot provoca incendiu (fig. 2.4).

Scăderea tensiunii de alimentare duce, în timp, la efecte nedorite deoarece, în cazul anumitor categorii de receptoare, precum motoare electrice, determină creșterea intensității curentului electric și încălzirea conductoarelor de alimentare, cu toate consecințele care urmează de aici.

Regimurile distorsionate se datorează utilizării la scară din ce în ce mai mare a circuitelor neliniare în reţelele de tensiune alternativă, ceea ce generează armonice de curent electric de mare intensitate, în rețea. În cazul circuitelor trifazate dezechilibrate, armonicele generate pot determina încărcarea conductorului neutru cu un curent electric armonic de rang trei, care ar putea ajunge până la intensitatea curentului electric de fază. În aceste condiții de funcționare, se poate produce o supraîncălzire semnificativă a conductorului neutru, dezvoltându-se astfel pericolul de deteriorare a izolațiilor și, în final, apariția condițiilor de incendiu.

Îmbătrânirea izolațiilor, ca fenomen normal în funcționare sau din cauza acțiunii agresive a mediului (supunerea la temperaturi și umiditate extreme sau acțiunea unor substanțe corozive), determină pierderea calității izolaţiei sau apariția de fisuri în material, favorizând astfel apariţia unor curenţi electric de scurgere datorați defectului sau ruperii izolaţiei, provocând un scurtcircuit la conductoarele vecine sau la masă.

Uzura elementelor de contact sau de comutare este una dintre cauzele frecvente ale incendiilor electrice. Slăbirea contactelor fixe (punctele de conectare) sau acționarea repetată a contactelor mobile (întreruptoare, separatoare, bare de cuplare ș.a.) provoacă scântei și arcuri electrice care încălzesc, oxidează și topesc contactele, determinând o creștere puternică a rezistenței de contact și a temperaturii locale.

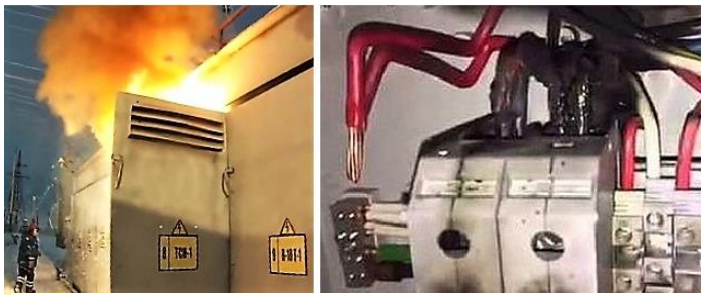


Fig. 3. Incendii la tablouri electrice

Aceste fenomene determină topirea şi aprinderea izolaţiilor, precum şi a materialelor suport din imediata apropiere, care pot genera incendii puternice, topirea metalului conductoarelor şi producerea de scurtcircuite.

Manevrarea greșită de către personalul de întreținere sau întreținerea necorespunzătoare pot, de asemenea, să favorizeze și să genereze condiții de incendiu. Neverificarea și fixarea necorespunzătoare a punctelor de conectare, instalarea siguranțelor necalibrate , necontrolarea periodică a contactelor prizelor, întreruptoarelor și a elementelor de cuplare, conectarea receptoarelor prin instalații improvizate, conectarea receptoarelor cu puteri nominale mai mari decât sarcina admisă în tabloul general sau în rețea, nerespectarea normelor de prevenire și stingere a incediilor, sunt doar câteva dintre cauzele frecvente care duc la supraîncălziri periculoase ce pot genera incendii.

Conceptul de stingere a unui incendiu

Plecând de la ecuaţia post-iniţierii unui incendiu:

$$\text{post-iniţiere incendiu} = \Delta_{arderii} = f'(x_2', x_{31}', x_{32}'), \qquad (5)$$

(în care, cu $\Delta_{arderii}$ s-a notat triunghiul arderii), situaţie care constituie practic esenţa teoriei arderii/utilizării substanţelor de stingere, se observă că intervenţia/operaţia de stingere a unui incendiu se realizează prin acţiunea cu substanţe de stingere doar asupra variabilelor care determină/formează triunghiul arderii.

Operaţia/acţiunea de stingere se poate realiza, după caz, intervenind doar asupra variabilelor:

- x_2': reprezintă sursa, aceasta fiind de tipul: flacără deschisă sau de stări/fenomene determinate de ardere mocnită, ardere cu incandescenţă;
- x_{31}': reprezintă materialul supus combustiei/arderii; acesta poate fi al doilea, al treilea etc., material supus combustiei;
- x_{32}': reprezintă oxigenul existent în volumul de aer/spaţiu în care are loc/se dezvoltă arderea;
- a două variabile sau a trei variabile, în mod simultan.

Atunci când se intervine asupra unui incendiu, în sensul realizării stingerii/lichidării acestuia, substanţa de stingere, se aplică după caz.

Conducţia termică

Conceptul de conducţie este legat de activitatea particulelor microscopice: molecule, atomi, electroni liberi. Conducția termică poate fi văzută ca transferul de energie de la particulele cu energie mai ridicată, aparţinând corpului sau regiunii de temperatură mai ridicată, către particulele cu energie mai coborâtă, aparţinând corpului sau regiunii de temperatură mai coborâtă. Transferul propriu-zis se realizează prin interacţiunea dintre particule.

Prin ciocnirile elastice, care au loc inerent între moleculele vecine, se transferă energie cinetică din aproape în aproape, de la moleculele cu energie mai mare la moleculele cu energie mai mică. În modul acesta, macroscopic, transferul net de energie apare în direcţia descreşterii temperaturii. Datorită asocierii cu mişcarea dezordonată a particulelor, conducţia poate fi privită ca o *difuzie* de energie.

Situaţia este asemănătoare în cazul lichidelor, unde moleculele sunt mai apropiate

în spaţiu iar interacţiile moleculare mai puternice şi mai frecvente. Similar, la solide, conducţia este atribuită activităţii moleculare sub forma vibraţiei termice a reţelei cristaline. Acest mod de transfer de energie este uneori privit ca o suprapunere de unde acustice elastice induse de mişcarea atomilor din reţea. Fononii (cuantele de energie acustică) devin astfel analogi fotonilor din teoria radiaţiei electromagnetice. În corpurile solide neconductoare, transferul de energie termică este datorat exclusiv acestor unde de reţea sau fononi. În corpurile solide conductoare apare în plus transferul de energie prin electronii liberi.

Convecţia termică

Transferul de energie termică prin convecţie este realizat prin acţiunea combinată a două mecanisme. La energia termică transferată prin mişcarea dezordonată a particulelor microscopice (conducţie sau difuzie) se adaugă energia termică transferată prin mişcarea de ansamblu (ordonată, macroscopică) a fluidului. Combinarea celor două mecanisme se datorează suprapunerii mişcării de ansamblu peste mişcarea termică (microscopică dezordonată) pentru fiecare moleculă din fluid. Convecţia este cel mai important mod de transfer de-căldură între un fluid în mişcare şi o suprafaţă ce-l mărgineşte, când acestea se află la temperaturi diferite.

Intensitatea transferului de căldură prin convecţie depinde în mare măsură de mişcarea de amestec a particulelor de fluid. Ca urmare, convecţia se poate clasifica în funcţie de natura curgerii. Astfel, convecţia se numeşte *forţată* când curgerea fluidului este rezultatul unor cauze externe, precum un ventilator, o pompă sau vânturi atmosferice. Dimpotrivă, convecţia se numeşte *naturală sau liberă* când mişcarea de ansamblu a fluidului este indusă de forţele ascensionale rezultate din diferenţele de densitate datorate gradienţilor de temperatură din fluid.

De remarcat faptul că, datorită convecţiei naturale, transferul de energie termică exclusiv prin conducţie există arareori într-un fluid.

Convecţia a fost, aşadar, definită ca modul de transfer de căldură într-un fluid, realizat prin acţiunea combinată a conducţiei şi a mişcării de ansamblu a fluidului. În general, energia care se transferă este energia internă sensibilă sau termică (energia cinetică a microparticulelor) a fluidului. Există, însă, procese de convecţie în care se transferă şi *energie latentă* (energia potenţială a microparticulelor). Este cazul proceselor de schimbare de fază între stările lichidă şi de vapori ale unui fluid.

Radiaţia termică

Radiaţia termică este energia emisă de corpuri (solide, lichide sau gazoase) având o temperatură finită. Emisia este atribuită schimbărilor în configuraţia electronilor constituenţi ai atomilor sau moleculelor din corpul care emite. Energia câmpului de radiaţie este transportată sub formă de unde electromagnetice (sau cuante de energie numite fotoni) şi provine din energia internă a materiei emiţătoare. Radiaţiile termice au o lungime de undă cuprinsă aproximativ între 0,1 şi 100 μm. Ele respectă aceleaşi legi ca şi radiaţiile luminoase: se propagă în linie dreaptă, se reflectă, se refractă şi se absorb.

Atât conducţia, cât şi convecţia, necesită prezenţa unui mediu intermediar de transport, în timp ce transferul prin radiaţie nu. De fapt, transferul radiativ este cel mai eficient în vid. Transferul de energie prin radiaţie se realizează de la distanţă, fără contact direct între corpuri. Fenomenul are sens dublu: un corp radiază energie, dar şi

absoarbe energia emisă sau reflectată de corpurile înconjurătoare. La corpurile solide şi lichide, transformarea energiei electromagnetice în energie termică are loc în straturile superficiale, iar la corpurile gazoase în volum.

Conductivitatea termică

Proprietăţile termofizice ale materiei sunt deosebit de importante în analiza proceselor de transfer de căldură. Aceste proprietăţi se împart în proprietăţi de transport (conductivitatea termică λ, vâscozitatea cinematică ν, coeficientul de difuzie D) şi în proprietăţi termodinamice (densitatea ρ, căldura specifică *c*).

Utilizarea legii lui Fourier presupune cunoaşterea conductivităţii termice, *c* proprietate de transport care indică eficienţa transferului de energie prin procesul de conducţie (difuzie termică). Conductivitatea termică depinde de structura fizică a materiei, care la rândul ei depinde de starea de agregare a materiei.

Se poate intui că proprietatea de conductivitate termică este în general mai mare la un solid decât la un lichid, şi mai mare la un lichid decât la un gaz. Acest aspect se datorează în mare măsură diferentelor în spaţiul intermolecular de la o stare de agregare la alta, fiind ilustrat valoric în figura 4.

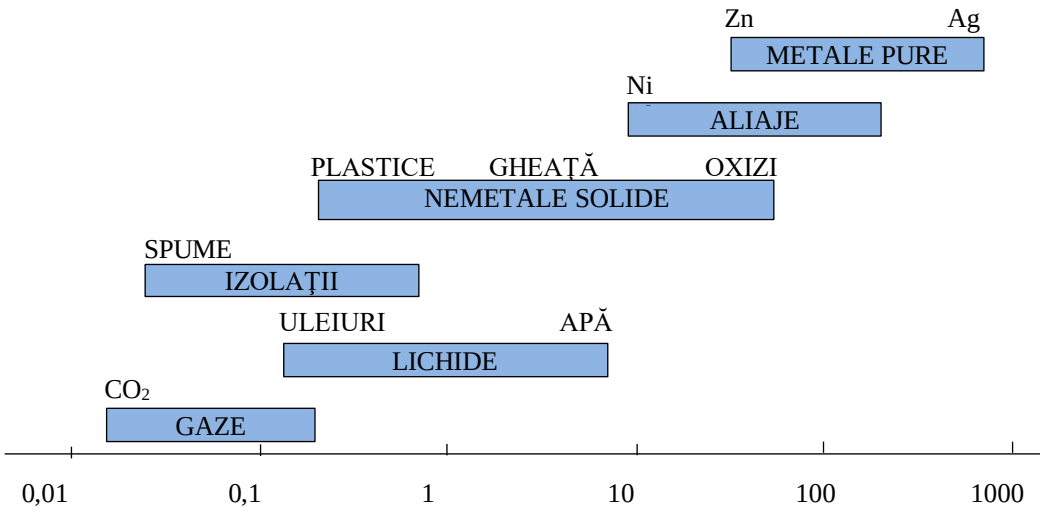


Fig. 4 Spectrul de valori pentru conductivitatea termică [W/(m×K)] a diverselor categorii de substanţe aflate la temperatura şi presiunea atmosferice.

Încălzirea conductoarelor electrice

Încălzirea conductoarelor electrice peste limita admisă și apariția incendiilor se datorează mai multor fenomene care apar ca urmare a nerespectării regulilor de proiectare, execuție și exploatare a instalațiilor de distribuție a energiei electrice.

La încălzirea conductoarelor datorită trecerii curentului electric o parte din căldura disipată dQ determină încălzirea conductorului propruzis dQ_1, iar o parte din căldură dQ_2 este transmisă în exterior prin suprafaţa laterală a acestuia. Astfel că ecuaţia de bilanţ energetic are forma:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2. \qquad (6)$$

Temperatura finală a conductorului se stabileşte în momentul în care variaţia de temperatură a conductorului devine nulă.

Efectul Joule-Lenz constă în disiparea energiei în conductor și apariția unui efect termic, având ca rezultat creșterea temperaturii. Într-un conductor care are rezistența electrică *R*, prin care trece un curent electric efectiv *I*, în intervalul de timp *dt* se generează fluxul de căldură *dQ*:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \Phi = R \cdot I^2 \ [\mathrm{W}], \tag{7}$$

care asigură încălzirea conductorului dar o parte se transmite la exterior prin izolație, a cărei temperatură t_{iz} este o funcție dependentă de intensitatea transferului de căldură către aerul înconjurător cu temperatura t_a :

$$t_{iz} = t_a + \frac{1}{\pi \cdot D \cdot L \cdot \alpha} \cdot \Phi = t_a + \frac{R \cdot I^2}{\pi \cdot D \cdot L \cdot \alpha} \ [\mathrm{K}]. \tag{8}$$

Influența regimului distorsionat asupra încălzirii conductoarelor

Depășirea unei valori limită duce, în mod evident, la încălzirea conductorului, deteriorarea izolației și la posibila apariție a unui scurtcircuit, conducând în final la dezvoltara unui incendiu. În figura 5 diferitele condiţii locale ale conductorului parcurs de curent electric determină temperaturi diferite ale acestuia.

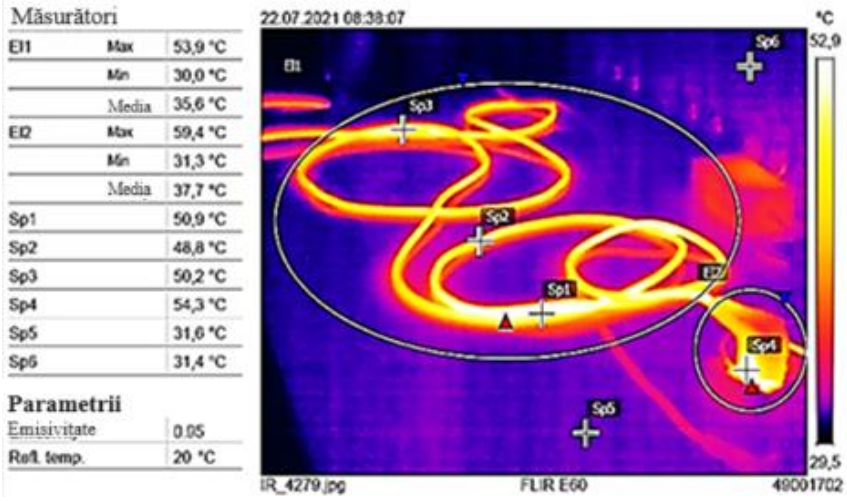


Fig. 5 Conductor încălzit din cauza suprasarcinii

În figura 6 este prezentată variația temperaturii suprafeței de izolație a unui cablu de tip ROMCAB trifazat ACYAby 3×150SE+70RE (cablu de joasă tensiune cu izolație PVC și diametru exterior al mantalei de 46 mm) în funcție de intensitatea efectivă a curentului electric de fază, pentru regimul sinusoidal neperturbat ($k_d = 0$; $I_n/I_f = 0$) și pentru regimurile armonice cu diferite valori ale factorul de distorsiune.

Conform specificației producătorului, limita de funcționare este de 70 [°C], limită care se atinge în cazul unui regim perfect sinusoidal pentru o intensitate a curentului de fază de 200 [A], iar limita de scurtcircuit la peste 300 [A].

În cazul curentului electric distorsionat se poate observa o încălzire puternică a

cablului. Pentru regimurile armonice puternic distorsionate $(k_d = 1;\ I_n/I_f = 3)$, temperatura maximă de lucru este atinsă la jumătate din valoarea acestui curent electric (≈100 A), dar pentru curentul electric maxim al regimului neperturbat nu se ajunge la scurtcircuit.

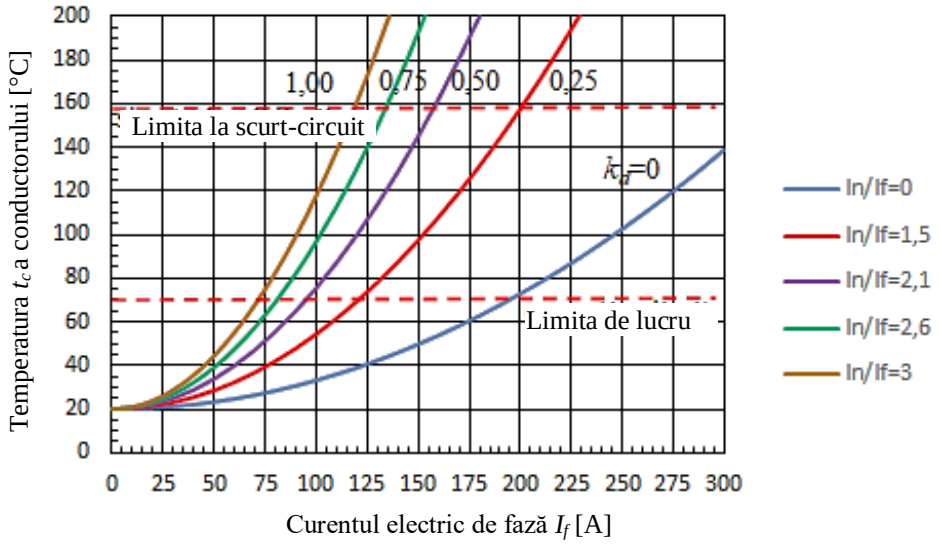


Fig. 6 Încălzirea cablului trifazat ACYAby 3×150SE+70RE datorită funcționării în regim distorsionat (*In* – curentul electric în conductorul neutru; *If* –curentul electric de fază).[8]

Dacă se consideră că temperatura iniţială t_0 este de 40[°C], temperatura de topire a cuprului este de 1083[°C] pentru o lungime unitară a conductorului analizat {aria secţiunii transversale 2,5 [mm^2]}, rezultă că intervalul de timp τ în care se ajunge la temperatura de topire, pentru un curent electric de scurtcircuit de 300 [A] este:

$$\tau = \frac{t - t_0}{R \cdot I^2} \cdot m \cdot c = 15{,}8\ [\text{s}].$$

În figura 7 este indicată durata până la topirea conductorului studiat în funcţie de intensitatea curentului electric din circuit {γ_{Cu}=8960 [kg/m^3]}.

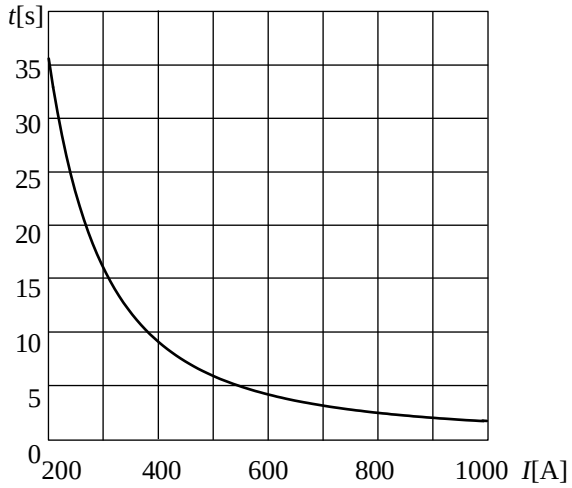


Fig. 7 Variaţia duratei până la topirea conductorului din cupru de 2,5 mm^2 în funcţie de intensitatea curentului electric în conductor.

În general, sistemul de protecţie asigură deconectarea instalaţiei înainte de topirea conductorului, dar în zone afectate ale conductorului, rezistenţa electrică locală poate fi mai redusă şi topirea poate avea loc. În punctul de topire apar atât componente la temperatură peste 1000[°C], dar se poate forma şi arc electric în spaţiul ionizat al zonei topite.

Încărcarea conductoarelor cu sarcini de putere mare și neliniare, poate duce la creșterea puternică a generării de căldură prin efectul Joule-Lenz și creșterea rapidă a temperaturii până la limita de scurtcircuit, declanșând în final apariția incendiului.

Fenomene fizice în contacte electrice

În limbajul tehnic uzual, expresia „*contact electric*" are un dublu înțeles, ea desemnând, pe rând:

- fie *situația de atingere mecanică* între două corpuri, bune conductoare de electricitate;

- fie *piese special construite*, între care se realizează continuitatea unui circuit când aceste piese (contacte) se ating. În acest context, orice echipament electric este considerat, în esență, ca un ansamblu de elemente funcționale și de conductoare interconectate electric. Punctul circuitului în care curentul electric trece dintr-o cale de curent în alta este denumit „*punct de contact electric*". În practică, prin *contact electric* se înțelege un ansamblu compus din două piese metalice, prin a căror atingere se stabilește conducția într-un circuit electric. Cele două piese se numesc *elemente de contact* sau, pur și simplu, *contacte*. Constructiv, la un contact electric, atingerea se realizează prin apăsarea (cu ajutorul unei forțe) a unui element contra celuilalt element. Suprafață de atingere a pieselor de contact se numește *suprafață de contact*.

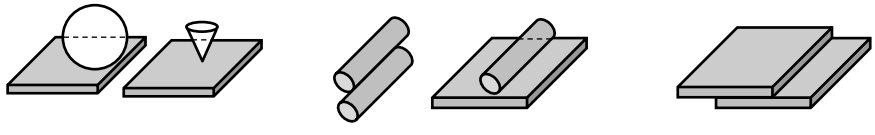
Contactele electrice se pot *clasifica* după diferite criterii:

1. După *forma geometrică a suprafeței de contact*, contactele electrice se împart, convențional, în trei grupe:

a) *Contacte punctiforme*, la care, macroscopic, atingerea are loc doar într-un singur punct, iar microscopic, pe o suprafață circulară de rază foarte mică. În această grupă intră, de exemplu, contactele sferă-sferă, sferă-plan, con-plan [fig. 8 a)].

b) Contacte liniare, la care atingerea are loc de-a lungul unei linii, adică, practic, pe o suprafață extrem de îngustă. Din această grupă fac parte, de exemplu, contactele între suprafața laterală a unui cilindru și un plan sau contactele între doi cilindri cu axele paralele [(fig. 8 b)].

c) Contacte plane, la care atingerea celor două piese se face pe o suprafață de contact. Din această grupă fac parte, de exemplu, contactele realizate între două suprafețe plane, cu secțiunea dreptunghiulară [fig. 8 c)].



a) b) c)

Fig. 8 Diferite geometrii de suprafețe în contact:
a) – punctiforme; b) – liniare; c) – de suprafață.

2. În funcție de *cinematica elementelor*, contactele electrice se pot clasifica în:

a) Contacte fixe, realizate, în general, prin îmbinarea mecanică a celor două elemente de contact prin șuruburi, nituri, buloane [reprezentate schematic în figura 9 a)].

b) Contacte amovibile, la care unul din cele două elemente de contact este fix, iar celălalt este amovibil (fără sarcină și fără tensiune). Un exemplu tipic îl constituie contactul realizat între piciorul unui ștecher și lamela de contact a prizei [fig. 9 b)].

c) Contacte mobile pentru comutația circuitelor electrice, la care cel puțin unul din elemente este deplasabil (la funcționarea normală a echipamentului), determinând astfel închiderea sau deschiderea circuitului [fig. 9 c)].

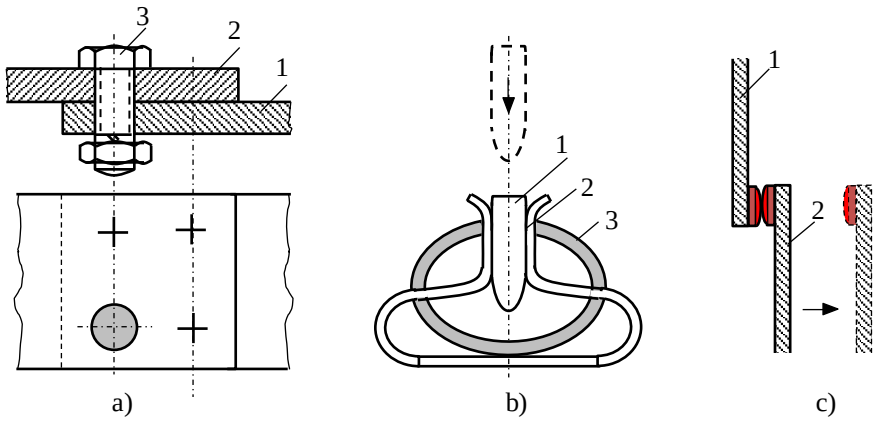


Fig. 9 Contacte în funcție de cinematică:
a) – contacte fixe; b) – contacte amovibile; c) – contacte mobile.

Pe durata funcționării lor, contactele sunt supuse la diferite solicitări. Astfel, contactele fixe și contactele amovibile sunt supuse *încălzirii* atât în regimul normal, cât și în regimul de suprasarcină și, uneori, în regimul de scurtcircuit. În toate aceste situații, încălzirea nu trebuie să depășească valorile supratemperaturilor prescrise de standarde pentru fiecare din regimurile sus-menționate. Contactele echipamentelor de comutație (în special, contactele mobile) sau contactele fixe și amovibile cu joc, sunt supuse și acțiunii *arcului electric*, care apare între elementele de contact la separarea lor. Deși durata arcului electric este limitată (5-30 ms), temperatura ridicată a arcului provoacă o încălzire intensă a elementelor de contact. În plus, la echipamentele care execută un număr mare de comutații sub sarcină se constată și o *uzură electrică* a contactelor, adică o migrație de material de pe elementele de contact, sub acțiunea temperaturii arcului electric. De asemenea, la contactele mobile poate să apară *uzura mecanică*, ca urmare a strivirii și deformării pieselor de contact, după un număr mare de manevre. Prin urmare, contactele electrice necesită o exploatare și o întreținere conform prescripțiilor.

Neînlăturarea uzurii contactelor, chiar neînsemnată la prima vedere, poate determina apariția unor defecte grave (încălzirea peste măsură a contactelor și chiar topirea lor), conducând la scoaterea din funcțiune a echipamentelor sau generarea de incendii.

În cazul contactelor fixe sau amovibile imperfecte ale unui aparat electric sau la ruperea contactului, se succed într-un timp foarte scurt, următoarele fenomene (fig. 10):

a) *contact închis*: curentul electric trece prin mai multe puncte de contact;

b) *contact in curs de rupere*: a rămas un singur punct de contact care concentrează toate liniile de curent electric;

c) *contact în primul moment al ruperii*: curentul electric continuă sa treacă printr-o punte de metal lichid;

d) *contact deschis*: din puntea de metal lichid s-a format un arc electric.

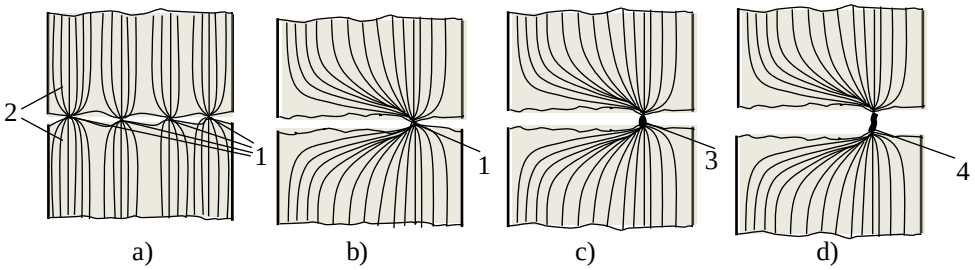


Fig. 10 Etapele de formare a arcului electric în cazul contactelor imperfect:
1- puncte de contact ; 2 - piesele de contact; 3 - punte de metal lichid; 4 - arc electric
a) contact închis: curentul electric trece prin mai multe puncte de contact;
b) contact în curs de rupere: a rămas un singur punct de contact care concentrează toate liniile de curent electric;
c) contact în primul moment al ruperii: curentul electric continuă sa treacă printr-o punte de metal lichid;
d) contact deschis: din puntea de metal lichid s-a format un arc electric.

Pe măsură ce piesele în contact se îndepărtează, suprafața reală de contact scade foarte mult, ajungând ca întregul curent electric din circuit să treacă printr-un singur punct de contact; în acest punct de contact, densitatea de curent electric este atât de mare, încât metalul este încălzit până la topire.

Îndepărtând mai mult piesele în contact, puntea de metal lichid se subțiază și în cele din urmă, datorită încălzirii din ce în ce mai mari, provocate de trecerea curentului electric, se vaporizează; existența, într-un spațiu foarte redus, a unei cantități mari de vapori metalici și a unor electroliți puternic încălziți creează condițiile apariției între contacte a unui arc electric, prin care curentul electric din circuit continuă să circule.

În această situație, aerul - considerat în mod obișnuit izolant, devine conducător de electricitate deoarece între cele două piese se formează o zonă fierbinte puternic ionizată (plasmă).

Pelicula disturbatoare

În cazul unui contact metalic curat, adică atunci când nu există pelicule disturbatoare (oxizi, sulfuri etc.) pe suprafața de contact, rezistența de trecere R_t este constituită numai din rezistențele de stricțiune. Numai că, în realitate, suprafețele metalice ale elementelor de contact reacționează cu atmosfera înconjurătoare, iar transformările care au loc determină apariția peliculelor de oxizi și depind atât de natura metalului contactului, cât și de proprietățile mediului ambiant. Prin urmare, rezistența de trecere R_t este alcătuită atât din rezistența de stricțiune (a două elemente de contact), cât și din rezistența peliculei disturbatoare (oxizi, sulfuri). În plus, peliculele disturbatoare formate pe suprafețele metalice de atingere (ale contactelor electrice) nu împiedică prea mult trecerea curentului electric prin contacte, pentru că, până la urmă, ele se distrug.

Dacă forța de apăsare a contactelor nu este suficient de mare pentru a produce deformația plastică a suprafețelor de contact (și, deci, fisuri în peliculă), atunci conducția curentului electric se realizează prin fenomenul de *fritare* (calcinare a peliculei). Astfel, dacă unei pelicule disturbatoare i se aplică progresiv o tensiune electrică crescătoare, se constată că rezistența peliculei începe să scadă, întrucât pelicula se comportă ca un semiconductor. Dacă se depășește tensiunea de fritare U_f (care la grosimi ale peliculei de 1000 Å poate fi de circa 10-100 V), tensiunea pe peliculă scade brusc la 0,5-1 V, și tot brusc va scădea și rezistența electrică a peliculei disturbatoare.

Studii de caz

1. Se determină tensiunea pe un contact din argint, astfel încât el să nu se topească la temperatura mediului ambiant t_{ma}= 40 [°C] și temperatura căii de curent în care este introdus contactul t_{max}=960,5 [°C]. Relația:

$$L \cdot (T_t^2 - T_0^2) = \frac{U^2}{4}, \tag{9}$$

ia forma:

$$U = 2\sqrt{L \cdot (T_t^2 - T_0^2)}, \tag{10}$$

unde:

$$T_t = 273 + 960{,}5 = 1233{,}5 \text{ K},$$

și:

$$T_0 = 273 + 40 = 313 \text{ K}.$$

Se obține:

$$U = 2 \cdot \sqrt{2{,}4 \cdot 10^{-8}(1233{,}5^2 - 313^2)} = 0{,}37 \text{ V}.$$

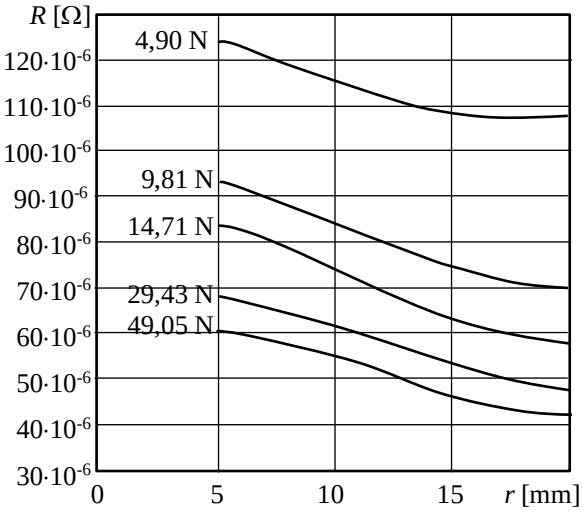


Fig. 11 Dependeța între rezistența de contact și raza de curbură la contacte din cupru argintat.

2. Pentru un contact cu T_0 = 373 [K], se determină supratemperatura, cunoscând tensiunea pe contact U = 10 [mV].

Relația:

$$T_t - T = \Delta T = \frac{U^2}{8 \cdot \overline{\lambda\rho}}$$

ia forma:

$$T_t = \sqrt{\frac{U^2}{4 \cdot L} + T_0^2} = \sqrt{\frac{10^{-4}}{4 \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-8}} + 373^2} = 374{,}39 \text{ [K]}.$$

Supratemperatura este:

$$\Delta T = T_t - T = 373{,}39 - 373 = 1{,}39 \text{ [K]}.$$

3. Se determină forța de apăsare la un contact punctiform realizat din Cu argintat, prin care trece un curent electric de I = 1000 [A], astfel încât supratemperatura contactului să fie de 5°C. Temperatura mediului ambiant este t_{ma} = 40 °C, iar supratemperatura conductorului este de 30 °C .

Se consideră duritatea argintului $H = 5 \cdot 10^8$ Pa și conductivitatea termică a cuprului λ=393 W/(m×grd.

$$T_0 = 273 + t_{ma} + \Delta t = 273 + 40 + 30 = 343 \text{ [K]};$$

$$T_t = 343 + 5 = 348 \text{ [K]} ; \arccos(343/348) = 0{,}1691 \text{ [rad]}.$$

Prin aplicarea relației:

$$F = \frac{I^2 \cdot L \cdot \pi \cdot H}{16 \cdot \lambda^2} \cdot \frac{1}{\left(\arccos\frac{T_0}{T_t}\right)^2}, \qquad (11)$$

se obține:

$$F = \frac{10^6 \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^8}{16 \cdot 393^2 \cdot 0{,}1691^2} = 533{,}5 \text{ [N]}.$$

Date rezultate în urma experimentelor

Pentru a valida unele date teoretice, a fot realizat un experiment care a avut ca scop stabilirea intensității maxime a unui curent electric și perioada de timp în care, din cauza unor consumatori electrici, conductorul electric parcurs de acest curent electric își mărește temperatura până la nivelul critic când izolația își pierde proprietățile (fig. 12), apărând astfel scurtcircuitul electric.



Fig. 12 Temperatura conductorului după 15 min. de la parcurgerea curentului electric.

După cca. 15 min., primul timp (t_1) de măsurare a datelor. La încărcarea cu aprox. 1 kW, se observă faptul că temperatura a crescut cu aproape 0,5°C față de temperatura inițială (t_0) – temperatura mediului ambiant (cca. 31,5°C).



Fig. 13 Diverse receptoare folosite în cadrul experimentului.

Au fost analizate receptoare pur rezistive pentru a nu ne induce regimuri deformante (fig. 13).

Consumatorii cu caracteristică neliniară, pot influența regimul de temperatură al conductoarelor (în sensul că se încălzesc mai mult). Contactele la un capăt și la celălalt al prelungitorului se mențin la temperatura inițială.

În figura 14 se observă, forma tensiunii, respectiv forma curentului electric pur sinusoidală (fig. 14).

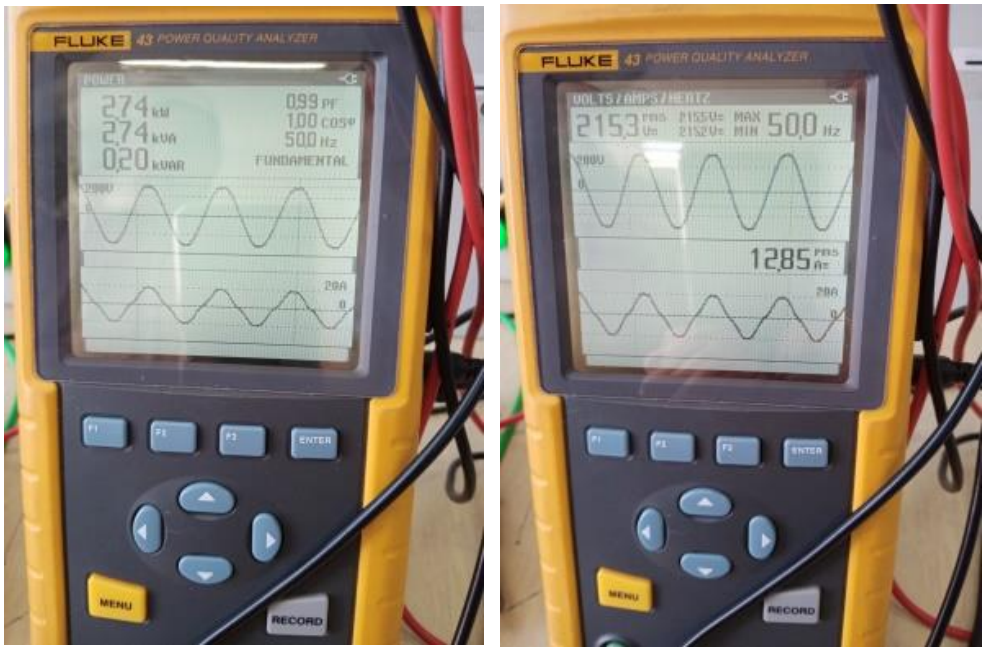


Fig. 14 Forma pur sinusoidală a curentului electric în cadrul experimentului.

La un current de 150 mA, contactele nu se încălzesc, menținându-și proprietățile.

După încă 15 minute, (t_2), s-a ridicat sarcina la 12,84 A (fig. 15). La un interval de 5 minute, temperatura a crescut la peste 50 ºC.



Fig. 15 Diferența de temperatură pe lungimea și în punctele de contact ale conductorului electric după mărirea sarcinii la 12,84 A.

Se observă creșterea temperaturii la capetele conductorului (temperatura la care un obiect poate fi atins fără să producă efecte negative asupra pielii este de 50 ºC).

După încă 11 minute, aproximativ (t_3), temperatura a crescut la 60,1 ºC la un capăt (pe ștecher) și la 64,9 ºC la celălalt capăt (pe priză).

Este respectată condiția: **curent 12,8 A**, sub limita prelungitorului de 16A (impusă de producător prin catalog și prin caracteristicile prelungitorului).

După încă 3 minute, aproximativ (t_4), temperatura este de cca. 62,5 ºC (ștecher) și 64,9 ºC (priză) – în punctele de contact, în condițiile în care există un ușor curent de aer (geam deschis) (fig. 16).



Fig. 16 Temperatura în punctele de contact după cca. 30 min. de la începutul experimentului.

În figura 17 este indicată tempeartura la care cablul îşi pierde caracteristicile izolante şi mecanice.

Concluzii

Se observă că în funcție de condițiile specifice și modul în care este pozat cablul, unele zone se încălzesc mai mult sau mai puțin de altele. Deci, în concluzie, cablul nu se

încălzește uniform pe toată lungimea.

În tabelul 3.9 se arată cum, la un curent electric de 18,39 A și o putere de 3,84 kW, dar la diferite momente, temperatura pe toată lungimea conductorului variază pe parcursul conectării a 2 sau 3 rezistoare la receptor.

Tabelul 1 Temperartura în diferite puncte de contact și pe lungimea cablului în timpi diferiți.

Oră / timp	**Temperatură ștecher [ºC]**	**Temperatură priză [ºC]**	**Temperatură cablu [ºC]**	**Observații**
t_5	80,9	60,5	62,4	2 rezistoare
t_6*	91	65	68,9	2 rezistoare
t_7	100	73,8	76	2 rezistoare
t_8	104	76	80	2 rezistoare
t_9**	134	102	106	3 rezistoare
t_{10}***	79	88	74	0 rezistoare
t_{11}	65,3	78	53	0 rezistoare
* - Au funcționat și contactoarele. Sunt montate doar 2 rezistoare.				
** - Se mai conectează un rezistor, temperatura depășind 100 ºC în cca. 1 min. Se simte miros specific la ambele capete.				
*** - După scoaterea tuturor rezistoarelor.				



Fig. 17 Temperatura critică la care cablul își pierde proprietățile.

Se observă, deci, că proprietatea izolației conductorului electric nu se menține pe toată perioada de utilizare, caracteristicile date de producător fiind strict comerciale (*intensitatea maximă a curentului electric ce poate trece prin conductor nu a fost atinsă*), *trebuind acordată astfel a mare atenție numărului, precum și puterii, consumatorilor pe care îi deservește conductorul în cauză, existând cu certitudine iminența producerii unui scurtcircuit electric* (*datorat efectului termic al curentului electric*) *urmat, cel mai probabil, de un incendiu.*

Stingerea incendiilor la instalații electrice

Cele mai utilizate substanțe pentru stingerea incendiilor la tablourile electrice sunt apa, spuma, pulberile și gazele inerte (dioxid de carbon, azot, inergen etc.). Mijloacele utilizate pentru stingerea incendiilor determină întreruperea procesului de ardere din cauza efectelor pe care aceste medii le au asupra incendiului:

- răcirea zonei de ardere (apa, spuma);
- izolarea zonei incendiate de aerul atmosferic (apa, spuma);
- diluarea gazelor în zona de ardere ce pot întreține și dezvolta focul (apa, gaze inerte);
- inhibarea arderii (pulberi);
- efectul chimic asupra reacțiilor de ardere (pulberi).

Apa este cel mai vechi și mai folosit agent de stingere, fiind cel mai ieftin, uşor de procurat și cu o capacitate de răcire considerabilă. În caz de incendiu, apa este folosită sub formă de jet compact, jet pulverizat, perdea de apă, ceață de apă sau abur. Dimensiunile picăturilor de apă sunt de mare importanță practică, deoarece este necesar ca la focarul incendiului să ajungă cât mai multă apă și să rămână acolo până la evaporarea completă.

Spuma este principalul agent de stingere a lichidelor combustibile mai ușoare decât apa, depozitate în rezervoare sau scurse și acumulate în strat, în caz de deteriorare a depozitelor și instalațiilor tehnologice.

Pulberile uscate sunt un agent de stingere deosebit de eficient. Efectul de stingere al pulberilor se datorează fie componentelor rezultate din descompunerea termică a pulberii (vapori de apă, dioxid de carbon și uneori azot), fie descompunere termică ca reacție endotermă (efect de răcire), fie inhibarea reacția de ardere (efect anticatalitic).

Gazele inerte sunt un bun agent de stingere deoarece, având o densitate mare, se infiltrează rapid în întregul spațiu, înlocuind aerul și privând sursa incendiului de oxigen. Acestea se folosesc **exclusiv pentru stingerea incediilor care se dezvoltă în spații închise** (în interiorul unor clădiri sau construcții).

Dioxidul de carbon este un agent de stingere folosit în multe aplicații. Nu conduce electricitatea și de aceea poate fi folosit pentru stingerea incendiilor și în instalațiile electrice.

Azotul poate fi folosit pentru inertizarea spațiilor sau instalațiilor tehnologice prin înlocuirea parțială a aerului din spațiile respective, pentru diluarea amestecurilor combustibil-aer, pentru stingerea incendiilor în instalații tehnologice sau spații închise, pentru transportul pulberilor de stingere sau acționarea deschiderii automate a instalațiilor fixe de stingere a incendiilor cu ajutorul pulberilor.

Inergenul este un amestec de gaze inerte (52% N, 40% Ar, 8% CO_2) care are proprietatea de a reduce nivelul de oxigen din încăpere astfel încât arderea să nu mai poate fi menținută.

Agentul FM 200® este un freon HFC (R 227ea - heptafluoropropan). Principalul său mecanism de stingere constă în absorbția căldurii, cu o contribuție chimică secundară prin descompunerea termică în flacără.

NOVEC® 1230 este un agent de stingere a incendiilor curat, dezvoltat ca alternativă pentru a înlocui halonii și hidrofluorocarburile (HFC), fiind chimic o fluorocetonă.

Utilizarea de noi materiale sintetice în construcţii şi îmbunătăţirea izolaţiei în clădiri influenţează considerabil modul de comportare al incendiilor. Propagarea lor poate fi foarte rapidă. Astfel, în funcţie de calitatea debitului de aer care le alimentează, se disting următoarele fenomene:

1. ***Fenomenul termic flashover*** corespunde desfăşurării normale a unui incendiu și apare atunci când arderea este alimentată cu comburant în cantitate optimă. Atunci când flashover-ul este iminent, combustibilii prezenţi în încăpere (suprafeţe, obiecte) sunt încălziţi până la atingerea punctului de autoinflamare.

La aproximativ 600°C se produce trecerea bruscă de la un incendiu localizat la un incendiu generalizat. Acesta este fenomenul de „*flashover*". Incendiul, localizat într-o singură parte a volumului, transformă încăperea **într-o vâlvătaie considerabilă**. În medie, un flashover se produce la o temperatură de 600^0C şi dezvoltă o sarcină calorică de circa 7 MW.

2. ***Fenomenul termic backdraft*** este definit ca un **accident termic** dificil de prezis, care apare în condiţiile următoare:

- volum închis sub presiune;
- combustie incompletă;
- căldură considerabilă;
- fisurarea elementelor de compartimentare.

Este de ajuns o fisură în elementele de compartimentare pentru ca amestecul combustibil, alimentat din nou cu comburant, să reintre în zona de inflamabilitate. La contactul cu focarul iniţial, se produce o explozie violentă. Toată încăperea se aprinde instantaneu şi o „limbă de flăcări", datorată suprapresiunii, va apare în deschiderea creată. Acesta este fenomenul *backdraft*.

Vizibile numai din exteriorul volumului afectat, semnele care induc apariţia iminentă a unui backdraft sunt:

- nu este vizibilă prin ferestre nicio flacără clară sau lumină, exceptând jarul sau câteva mici flăcări albastre de combustie a CO;
- geamurile, acoperite de funingine, devin negre şi opace, şi pot vibra uşor sub efectul căldurii şi al presiunii interioare;
- fumul gros şi închis la culoare, de o culoare neobişnuită, iese sub forma unor bufeuri prin interstiţii, prin zona tocurilor de la uşi, pe unde intră, de obicei, aerul proaspăt, dând impresia că incendiul respiră;
- sunetele sunt amortizate, nu se aude nici un zgomot al unui incendiu în interiorul încăperii;
- uşile, încuietorile şi mânerele lor sunt foarte calde la atingere.

Inflamarea fumului poate echivala cu o explozie dacă amestecul „comburant-combustibil" se situează în proporţii optime favorizând astfel o reacţie rapidă de combustie.

Intervențiile pentru stingerea incendiilor la tablourile electrice se pot face cu mijloace fixe, care sunt părți componente ale echipamentelor respective, sau cu mijloace mobile, manipulate de personalul de intervenție.

Mijloace/instalații pentru stingerea incendiilor

Sistemul fix de stingere cu ceață de apă este cel mai simplu și mai ieftin sistem de stingere, folosind o cantitate mică de apă.

Domeniile de utilizare sunt multiple: depozite de lichide inflamabile, posturi de transformare electrice; rezervoare de gaz; galerii de cabluri etc. Instalația de stingere cu

ceață este asociată în prezent cu un sistem de detectare a incendiului care acționează deschiderea supapelor solenoide, precum și cu un tablou de comandă care declanșează alarma de incendiu (fig. 18). Duzele de refulare sunt alimentate cu apa din rețeaua de distribuție prin intermediul unui filtru care îndepărtează particulele cu dimensiunea mai mare de 500 microni. Acestea generează o ceață de apă pulverizată fină, conică și direcțională, unde dimensiunea picăturilor este de ordinul 20 până la 200 de microni. Geometria specială a acestor duze permite utilizarea lor la presiune joasă, fără a necesita un agent de presurizare, ceea ce duce la o simplificare a instalației față de sistemele de înaltă presiune și la un preț mai mic. Instalarea poate funcționa în mod automat sau manual.



Fig. 18. Sistem fix de stingere cu ceață de apă în acțiune și duză de pulverizare.

Sistemul fix de stingere cu gaze inerte. Aceste instalații reprezintă cea mai răspândită opțiune în România ca sistem de stingere a incendiilor în spații închise, datorită capacității de a minimiza daunele aduse bunurilor și persoanelor din spațiul protejat. În comparație cu apa, care este un excelent agent de stingere datorită capacității sale de a opri procesul de ardere și de a absorbi căldura degajată, instalațiile de gaze inerte asigură și protecția activelor, agentul de stingere nelăsând reziduuri și nereacționând cu materialele din interiorul spațiului protejat. Domenii de utilizare: depozite sau spații cu produse de valoare, spații de depozitare sau utilizare a aparatelor și echipamentelor electrice, hale sau fabrici și garaje auto.

Mijloacele mobile de stingere a incendiilor sunt într-o mare varietate de dimensiuni și capacități, pot funcționa cu apă, pulberi, spumă sau gaze inerte, și pot fi transportate manual, pe cărucioare sau autopropulsate. Dintre acestea, cele mai importante sunt următoarele:

- *Stingătoare de mare capacitate, transportate pe roți*;
- *Mijloace autopropulsate pentru stingerea incendiilo;*
- *Sistemul de stingere a incendiilor cu impuls (IFEX)*.

Agentul de stingere este trimis cu viteză foarte mare, într-o fracțiune de secundă, direct în focarul focului. Propulsia agentului de stingere se realizează cu aer comprimat, având o presiune de circa 2,5 MPa. Agentul de stingere este în primul rând apă, dar sistemul poate folosi majoritatea agenților de stingere, chiar și agenți speciali utilizați pentru stingerea incendiilor metalice. Impulsul creat de viteza mare de evacuare, peste 100 m/s, și suprafața mare de răcire permit stingerea eficientă a incendiilor de la o distanță sigură. Incendiile din aparatele electrice de medie tensiune pot fi stinse cu apă. În acest caz, distanța minimă care trebuie păstrată este de numai 1 metru.

Ca prim prototip recent apărut, pistolul de stingere a incendiilor cu impuls IFEX® (fig. 19) *este piesa centrală a tehnologiei cu impuls de stingere a incendiilor*. Flacăra este practic suflată, fiind stinsă instantaneu, atât prin impact, cât și prin întreruperea aportului de oxigen. Aparatul poate fi purtat pe spate de către operator sau montat pe un vehicul autopropulsat.



Fig. 19 Pistolul de stingere a incendiilor cu impuls IFEX®

Mijloace de protecţie la arc electric în reţele de joasă tensiune

Statisticile privind incendiile pun în evidenţă faptul că 95% din acestea se produc în clădiri. Dintre acestea în 25% dintre cazuri iniţierea este de natură electrică.

Una dintre cauzele principale care asigură sursa de foc este arcul electric care se formează la întreruperea conductoarelor în urma încălzirii excesive sau în cazul unor contacte slabe. Arcul electric format asigură trecerea în continuare a curentului electric prin circuit dar forma tensiunii la bornele de utilizare este deformată, iar curentul electric prezintă întreruperi, având valori nenule doar pe durata arderii arcului electric.

După aprinderea arcului la tensiunea U_{am} (momentul t_1) tensiunea la bornele de utilizare rămâne practic constantă până în momentul t_2 când curentul electric din circuit trece prin valoarea zero. Reaprinderea arcului electric are loc în semiperioada următoare la momentul t_3 când tensiunea ajunge la valoarea U_{am}.

Echipamentele de tip AFDD (*Arc Fault Detection Device*), bazate pe tehnologie cu microprocesoare, asigură o monitorizare continuă a formei curbelor de tensiune şi de curent electric în circuit şi au funcţia de a limita apariţia incendiilor datorate arcului electric din circuitele electrice prin întreruperea circuitului în care a apărut arcul electric, pe baza analizei formei tensiunii şi a curentului electric din circuit (fig. 20).

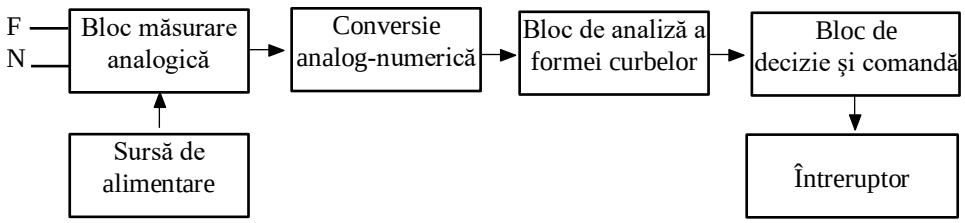


Fig. 20 Schema de principiu a unui echipament AFDD.

Echipamentele de tip AFDD devin obligatorii în instalaţiile joasă tensiune care alimentează zone cu risc important de extindere a incendiului:

– clădiri cu ventilaţie forţată;

– clădiri cu densitate ridicată de persoane (teatre, cinematografe, săli de concert);

– clădiri cu dificultăţi de evacuare;

– clădiri care cuprind cantităţi importante de materiale inflamabile (depozite de cereale, depozite de hârtie etc.).

Protecţia la apariţia arcului electric în tablourile electrice

Majoritatea defectelor electrice în tablourile de joasă sau medie tensiune sunt însoţite de apariţia arcului electric. Deconectarea circuitului care alimentează arcul electric în cel mult 100 ms după apariţia acestuia permite evitarea unor consecinţe grave, care pot determina importante incendii în aceste instalaţii.

Arcul electric este însoţit de emisii importante de lumină în spectrul vizibil şi în spectrul ultraviolet. Echipamentele de tip LAD (*Light Arc Detector*) includ un senzor de lumină în spectrul ultraviolet specific arcului electric, un convertor opto-electronic, un bloc numeric de analiză şi comparare a semnalului cu semnale caracteristice şi un bloc de decizie (fig. 21). În unele modele este inclus şi un senzor de zgomot pentru a prelucra emisiile sonore specifice apariţiei arcului electric.

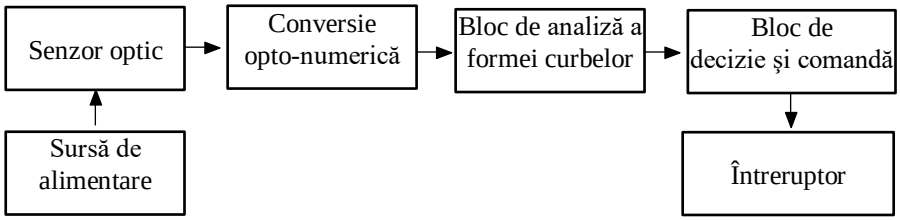


Fig. 21 Schema de principiu a unui echipament LAD.

Detectarea emisiei luminoase a arcului electric {10···30 [kLux]} într-un interval de timp de circa 2,5 [ms] şi transmiterea comenzii de deconectare a circuitului de alimentare la 5···10 [ms] din momentul apariţiei arcului electric, permite limitarea duratei de ardere a arcului electric şi deci de formare a componentelor care asigură iniţierea incendiului.

Sistemul LAD este inclus în sistemele de protecţie din dulapurile electrice de medie şi joasă tensiune, în incintele cu transformatoare MT/JT precum şi în dulapurile electrice de conexiuni, în special în zonele cu pericol de incendiu.

Protecţia prin întreruperea curentului electric de scurgere

Defecte ale izolaţiei cablurilor de joasă tensiune pot conduce la apariţia unor curenţi electrici de scurgere care, în trecere spre zone cu potenţial zero (pământ), pot parcurge porţiuni cu pericol de incendiu. Deconectarea circuitului în care apar curenţi electrici de scurgere are un rol important în asigurarea securităţii personalului datorită atingerii directe a circuitului sub tensiune dar asigură şi limitarea pericolului de incendiu prin eliminarea rapidă a acestor curenţi electrici. Sistemele actuale de protecţie diferenţială (fig. 22) utilizând relee RCD (*Residual Current Device*) asigură deconectarea în cel mult 40 [ms] la apariţia unui curent electric de fugă peste 30 [mA].

Într-o instalaţie electrică intactă, curentul electric de scurgere i_S este nul iar curentul electric de fază i_F este egal ca valoare cu curentul electric i_N din conductorul neutru.

Suma celor doi curenţi electrici este nulă, iar bobina B a releului diferenţial RCD nu este alimentată. La apariţia unui curent electric de scurgere i_S curentul electric din conducorul neutru este mai mic iar dacă diferenţa este peste 30 [mA] releul RCD este acţionat şi alimentarea cu energie electrică este întreruptă. Valoarea de 30 [mA] asigură şi protecţia la o eventuală atingere a conductorului sub tensiune de către o persoană.

Releele RCD sunt montate şi în circuitele trifazate; în circuitele de alimentare a tabourilor electrice locale, pentru a se asigura selectivitatea protecţiilor sunt montate relee diferenţiale RCD setate la un curent electric de 300 [mA].

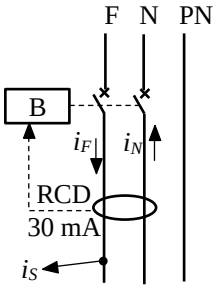


Fig. 22 Schema de principiu a unui releu de protecţie diferenţială (RCD). Schema de principiu a unui echipament LAD.

Constatări

Analiza datelor obținute prin monitorizarea valorilor electrice pe parcursul unei săptămâni, precum și a înregistrărilor la un moment dat, permite formularea următoarelor concluzii generale:

- tensiunea la barele de alimentare se încadrează în parametrii admiși din punct din vedere al standardelor de calitate a energiei electrice privind frecvența, valoarea efectivă a tensiunii, nesimetria, nivelul de flicker;

- secțiunea de analiză prezintă un consum de energie electrică însoțit de distorsiuni importante, ceea ce determină un factor de putere scăzut; îmbunătățirea factorului de putere prin montarea unei baterii de condensatoare poate fi ineficientă, în condițiile în care, pentru o tensiune distorsionată la barele de alimentare, bateria de condensatoare amplifică distorsiunea și poate duce la o reducere a factorului de putere;

- bateria de condensatoare poate deveni eficientă doar dacă se iau măsuri de limitare a distorsiunii curbelor care caracterizează consumul în zona analizată; pentru analiza comportării bateriei de condensatoare în situație de distorsiune este necesar să se considere, diferit, cele două noțiuni de factor de putere:

- în cazul secțiunii analizate o pondere importantă o are puterea deformantă, ceea ce impune ca soluția propusă să se bazeze mai întâi pe limitarea puterii deformante, prin limitarea distorsiunii curbelor curentului electric și să se adopte o soluție de limitare de puterii reactive.

Procesul de propagare

Propagarea unui incendiu se defineşte ca fiind extinderea arderii către materialele combustibile cele mai apropiate, fiind un proces dinamic extrem de complex, care poate

implica un mare număr de fenomene care se înterpătrund şi care implică combustibilul, oxigenul, CO_2, H_2O, CO, N_2.

Caracterisicile cele mai importante ale fenomenului de propagare a incendiului sunt:

– viteza de propagare;

– acceleraţia de propagare a incendiului;

– presiunea frontului de foc;

– zona de dezvoltarea din faţa incendiului caracterizată de temperatură şi lungime.

Căldura degajată pe durata arderii materialului combustibil contribuie la dezvoltarea continuă a incendiului.

Inflamabilitatea este o măsură a posibilităţii de aprindere a vaporilor unui material combustibil. Cele mai multe dintre matrialele combustibile din interior sunt textile și materiale plastice care se aprind la temperaturi relativ scăzute {150-250[ºC]}, dar materialele laminate datorită realizării lor sub presiune se aprind la temperaturi mai ridicate {circa 400[ºC]}.

Interacțiunile dintre un incendiu și mediul local, care include combustibili, condiţiile meteorologice și topografia, pot produce modele foarte complexe de propagare a incendiului, care în prezent nu sunt complet elucidate. Înțelegerea proceselor fizice care stau la baza acestor moduri complexe de propagare a incendiului este esenţială pentru dezvoltarea modelelor matematice ale proceselor de propagare a incendiului și elaborarea măsurilor de limitare a efectelor acestuia.

De remarcat că în timpul procesului de ardere a materialului combustibil organic poate să apară fum şi gaze toxice.

Modelele actuale pentru analiza propagării incendiului sunt fie în întregime empirice, fie semi-empirice. Aproape toate se bazează pe fenomenul de radiaţie către mediul inflamabil până la temperatura de aprindere cu propagare ulterioară. Viteza de propagare a unui incendiu, este foarte sensibilă la curenţii curenţii de aer locali. De asemenea, trebuie avute în vedere caracteristicile mediului combustibil şi conţinutul de umiditate al acestuia. Viteza de propagare a unui incendiu poate fi considerată o măsură a riscului determinat de incendiu cu apariţia unor daune importante.

Propagarea incendiului implică transferul de căldură de la sursa de căldură la mediul combustibil care va fi încălzit până la punctul de aprindere. Procesul de transfer termic poate avea loc prin:

- radiaţia de la flacără la mediul combustibil;
- radiaţia de la combustibilul în stare de pirolizare către mediul combustibil;
- conducţia termică prin mediul combustibil;
- conducţia termică în afara mediului combustibil;
- încălzirea convectivă a mediului combustibil de către gazele fierbinți din flacără;
- radiaţia din partea încălzită a mediului combustibil;
- răcirea convectivă a mediului ambiant.

Efectul conducţiei se manifestă pe o durată foarte redusă. Pentru un incendiu care se propagă cu viteza u într-un combustibil cu conductivitate termică λ, densitate ρ și căldură specifică c, temperatura din combustibil (datorită conducției) scade exponențial înaintea focului de forma $\lambda/(\rho,u)$, care este mai puțin de 0,001 m în aproape toate cazurile practice. Astfel că, în mod obişnuit, fenomenele de conducţie termică prin

mediul combustibil şi în afara mediului pot fi neglijate.

Viteza de dezvoltare a incendiului de depinde în principal de:

- tipul materialului combustibil;
- temperatura iniţială;
- presiunea;
- geometria sistemului;
- umiditatea mediului;
- prezenţa curenţilor de aer.

Curenţii de aer din zona incendiului au o pondere importantă în stabilirea vitezei de propagare a focului, determinând atât accelerarea încălzirii radiative, dar şi creşterea aportului răcirii convective. În mare măsură efectele depind de modul de dezvoltare al curenţilor de aer: liniar, rafale, turbulent, intermitent.

În figura 23 este indicată influenţa curenţilor de aer asupra dezvoltării incendiului.

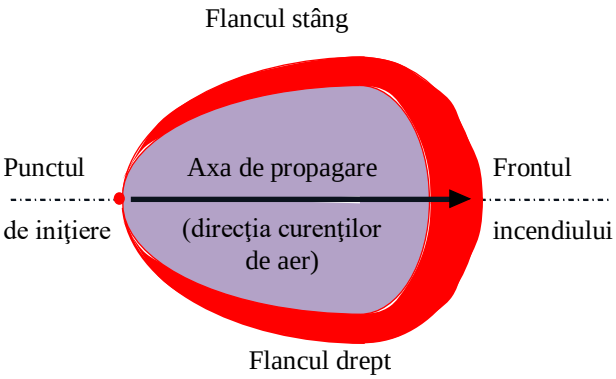


Fig. 23 Propagarea incendiului sub influenţa curenţilor de aer.

Pe baza unui mare număr de observaţii, viteza pe propagare R [m/s] a unui incendiu pe o suprafaţă plană poate fi determinată din relaţia empirică:

$$R = 4{,}36 \cdot W \cdot \mathrm{f}(M) \cdot \mathrm{e}^{\frac{v}{v_0}}, \qquad (12)$$

în care W este masa materialului combustibil pe unitatea de suprafaţă [kg/m^2], v – viteza curentului de aer [m/s], $v_0 = 6{,}9$ m/s – viteza de referinţă, M [%] – umiditatea relativă.

Funcţia $f(M)$ are expersiile:

$$\begin{aligned} f(M) &= \mathrm{e}^{-0.0897 \cdot M}, && \text{pentru } M < 18{,}8\%; \\ &= 0.127 \cdot (30 - M), && \text{pentru } 18{,}8\% < M < 30\%; \\ &= 0, && \text{pentru } M > 30\% \end{aligned} \qquad (13)$$

Ca exemplu, se consideră cazul uzual al unui spaţiu în care materialul combustibil are o densitate de 4 [kg/m^2], umiditatea materialului este 15%, iar viteza curenţilor de aer este 10 [m/s]. Rezultă: R=19,35 [m/s].

Desigur că valoarea obţinută are caracter informativ, propagarea fiind determinată de un complex de factori, în primul rând de condiţiile concrete de la locul de producere a incendiului. Viteza mare de dezvoltare a incendiilor determinate de cauze electrice şi creşterea rapidă a temperaturii pot conduce la afectarea gravă a pompierilor din zonă.

Metode și procedee folosite în cercetarea cauzelor incendiilor

În scopul soluţionării problemelor ce se ridică în legătură cu cercetarea cauzei incendiilor, se folosesc o gamă amplă de metode, procedee şi tehnici din domenii diferite. Acestea pot fi grupate astfel :

1. Metode logice de raționament, cum sunt: identificarea, deducţia, analiza şi sinteza, comparaţia, presupunerea şi excluderea etc.

2. Măsurarea urmelor sau a obiectelor, determinarea formelor şi examinarea structurii acestora cu mijloace optice (lupă, microscop etc.).

3. Procedee şi mijloace tehnico-ştiinţifice (fizico-chimice) de cercetare şi expertizare, ce permit în principal :

- determinarea parametrilor de ardere a materialelor utilizând bomba calorimetrică, cuptorul de determinare a incombustibilităţii, blocul incandescent şi alte aparate pentru stabilirea temperaturii de inflamare şi aprindere a materialelor solide şi lichidelor combustibile, panoul radiant, analiza termodiferenţială cu ajutorul termoderivatografului, determinarea indicelui de oxigen etc.;
- stabilirea prin calcul a bilanţului energetic al materialelor şi substanțelor aflate la locul incendiului;
- identificarea prezenței în cenuşa, zgura, funinginea, topiturile sau materialele preluate de la locul incendiului a unor substanțe (mai ales a iniţiatorilor sau acceleratorilor de ardere) sau a unor componenţi din structura lor. Aceasta se poate realiza aplicând procedeele: iluminiscenţei emise sub acţiunea radiaţiei ultraviolete, a radiaţiei X sau altor tipuri de radiaţii excitante, analizei spectrale, cromatografiei, activării radioactive, polarimetriei, electroforezei etc.;
- determinarea modificărilor apărute în structura metalelor și a altor materiale, în urma solicitării termice şi a fenomenelor fizico-chimice la care au fost supuse în timpul incendiului (analiza metalografică, microscopia electronică etc.);
- analizarea şi compararea suprafețelor şi a contururilor obiectelor (metoda deplasării suprafeţelor).

4. Experimentări pentru determinarea modului în care ard unele materiale aflate la locul incendiului şi a fenomenelor ce însoţesc procesele de combustie.

5. Reconstituirea unor aspecte privind situaţia anterioară incendiului, care se poate face la obiectivul incendiat, în alte obiective asemănătoare sau în laborator. Aceasta prezintă unele limite, dând rezultate pozitive numai în unele cazuri, deoarece apar numeroase greutăţi în reproducerea integrală a condiţiilor ce existau în momentul iniţierii incendiului, ce nu pot fi întotdeauna cunoscute în totalitate.

Pentru a se realiza o cercetare a cauzelor de incendiu în mod ştiinţific este necesară o clasificare a urmelor de incendiu, deoarece numai prin cunoaşterea temeinică a acestora se poate ajunge la rezultatul dorit. Această clasificare este perfectibilă şi poate fi completată cu date noi. În continuare este prezentată o variantă de clasificare a acestor urme, clasificare care ţine seama de principiile generale ale tacticii şi tehnicii criminalistice.

În principiu, daunele *D* determinate de incendii pot fi calculate din relaţia generală:

$$D = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot \sum_{j=1}^{e} p_{ji}, \qquad (14)$$

în care λ_i este probabilitatea de apariţie a incendiului i , p_{ji} – daunele la echipamentele j

pe durata incendiului *i*.

Desigur că probabilitatea λ_i poate fi determinată pentru zone cu pericol de incendiu în urma unor studii pe durată mare.

SIMULAREA NUMERICĂ A INCENDIILOR

Un subiect de actualitate și deosebit de important din punct de vedere al proiectării construcțiilor și instalațiilor în privința cerinței fundamentale de securitate la incendiu îl reprezintă partea de modelare a incendiilor.

Având în vedere existența unui număr mare de victime și a pagubelor materiale rezultate în urma incendiilor, depășindu-le chiar și pe cele datorate seismelor, prin realizarea unei modelări a incendiului cât mai corectă se urmărește respectarea cerințelor legislației în domeniu privind salvarea utilizatorilor. Astfel, astăzi cel mai des sunt uzitate trei metode de modelare:

- modelul matematic: în cadrul căruia temperatura interioară este considerată ca parametru principal, având aceeași valoare la un moment dat în întreg spațiul analizat ca fiind unitar, dar modificându-se în funcție de timp;
- modelul zonelor: în care spațiul analizat este împărțit în două zone: una mai caldă în partea superioară și una mai rece în partea inferioară, respectând totodată condiția unei temperaturi identice la un moment inițial care variază în funcție de timp;
- modelul de câmp: reprezintă cea mai realistă modelare a incendiilor și care presupune rezolvarea ecuațiilor chimice și fizice în fiecare punct al spațiului analizat.

Astfel, pentru modelarea unui incendiu folosind una, două sau toate metodele prezentate mai sus cel mai folosit este un program software numit F.D.S. (Fire Dynamic Simulator). Programul este conceput pentru rezolvarea numerică a unei forme particulare a ecuațiilor Navier-Stokes, analizând viteze mici de circulație a aerului, cu variații de căldură și gaze arse.

Legile fizice care descriu procesul de propagare a unui incendiu ca fluid gazos cuprind un sistem termo-fluidodinamic care definesc un set de 6 ecuații diferențiale cu 6 necunoscute: cele trei componente ale vitezei, presiunea, temperatura și densitatea. Acest sistem de ecuații (care este cunoscut ca ecuațiile Navier-Stokes) este puternic cuplat și sensibil: o mică schimbare a condițiilor inițialele poate duce la traiectorii în spațiul soluției care sunt complet diferite unele de altele.

Concluzii

Prima versiune oficială a FDS, lansată în 2000, a vizat simulările la scară largă ale mișcării fumului din incendii prescrise, bine ventilate, ideală pentru lucrările de proiectare în care viteza de eliberare a căldurii incendiului nu este prezisă de model, ci de proiectant. Versiuni îmbunătățite au fost implementate în versiunile 2 (2001), 3 (2002) și 4 (2004). Îmbunătățirile treptate ale acestor rutine, împreună cu introducerea procesării paralele și a diferitelor caracteristici specifice incendiului au condus la versiuni care oferă date mai apropiate de realitate.

În timpul investigațiilor NIST privind prăbușirea World Trade Center și incendiul Station Nightclub, a devenit destul de evident ce trebuia făcut cu FDS pentru a face din acesta un instrument eficient pentru reconstituirea incendiilor. Până în acel moment, FDS a fost folosit de comunitatea FPE pentru aplicații de proiectare și, într-o oarecare măsură, pentru lucrări criminalistice, dar sfera investigațiilor a împins modelul la limite.

Până în 2005, era clar că FDS avea să aibă nevoie de o revizuire majoră, așa că trebuie creată o nouă versiune (FDS 5) care să crească dramatic flexibilitatea și funcționalitatea modelului. Lucrările s-au desfășurat pe două fronturi largi - faza gazoasă și faza solidă. Pe scurt, ardere mai bună și piroliză mai bună. Versiunea 5 a fost lansată în 2007. A inclus o revizuire majoră a parametrilor de intrare și a constructelor. În următorii trei ani, s-au adăugat treptat îmbunătățiri, iar în 2010 au început lucrările la FDS 6, care a început testarea beta în toamna anului 2012. FDS 6 a fost lansat oficial în toamna anului 2013. De atunci s-au adus îmbunătățiri treptate hidrodinamicii, chimie și calcule cu ochiuri multiple. Soluția HVAC, o completare cheie a modelului, a fost inclusă și în versiunea 6 și a fost îmbunătățită în mod constant.

CONCLUZII GENERALE

Un rol important în evaluarea riscului de incendiu în instalaţiile electrice este cunoaşterea caracteristicilor curbelor de tensiune şi de curent electric din zona analizată.

Receptoarele electrice moderne, care utilizează elemente cu caracteristici neliniare, introduc distorsiuni armonice ale curentului electric și, respectiv, tensiunii în rețeaua de alimentare, determinând creșterea pierderilor de putere activă, supracurent electric în conductorul neutru al rețelele trifazate și încălzirea conductoarelor, supratensiune în nodurile rețelei sau bornele echipamentelor și perturbaţii în funcționarea lor.

În cadrul unui studiu la un utilizator industrial la care s-a constatat un regim nesinusoidal puternic, însoțit de încălzirea accentuată a unor conductoare electrice în diferite zone, autorul a studiat acest fenomen pentru a evidenția perturbațiile și a stabili o metodologie de calcul a efectului termic suplimentar care se produce. Primele înregistrări au arătat prezența unor curenți electrici puternici nesinusoidali. În aceste condiții, a fost stabilită necesitatea monitorizării tpe timp îndelungat pentru a avea informațiile complete.

S-au făcut și măsurări pentru a analiza forma curentului electric absorbit. Schema analizată cuprinde două plecări, fiecare dintre ele alimentează receptoare puternic neliniare.

Măsurările au fost efectuate pe circuitul secundar de joasă tensiune al transformatorului de alimentare al secțiunii analizate.

În analiza distorsiunilor curbelor de tensiune și de curent electric este necesar a lua în considerare diferențiat cele două noțiuni privind factorul de putere. Pentru analiza funcționării datelor utilizate au fost monitorizate următoarele mărimi electrice principale:

- variația valorii efective a tensiunilor de fază;
- variația valorii efective a curentului electric pe faze;
- variația factorului de distorsiune a tensiunii;
- variația nivelului armonicelor de rangul 5 și 7;
- variația de factorului de nesimetrie;
- variația indicatorului de flicker pe termen lung și apariția unor situații tranzitorii.

Actualmente incendiile determinate de instalații electrice reprezintă o parte importantă, peste 25% din totalul incendiilor, provocând atât distrugeri semnificative de bunuri materiale, cât și pierderi de vieți omenești. În același timp, incendiile la instalațiile electrice sunt și o amenințare ascunsă; pot izbucni chiar și atunci când, aparent, lucrurile sunt în ordine. În consecință, este necesară o atenție permanentă

pentru înlăturarea cauzelor acestora, precum și pentru dezvoltarea și utilizarea mijloacelor de stingere eficiente și rapide.

Cauzele frecvente ale incendiilor la instalațiile electrice sunt încălzirea conductoarelor și apariţia arcurilor electrice generate de imperfecțiunea contactelor.

Întrucât încălzirea conductoarelor se datorează creșterii intensității curenților electrici, fie din cauza supraîncărcărilor, fie din cauza scurtcircuitelor cauzate de izolarea necorespunzătoare a acestora, este necesar ca personalul de întreținere să verifice în permanență starea cablajului și puterea receptoarelor conectate la rețea.

Cel mai important lucru este însă setarea corectă a elementelor de protecție a circuitului electric (întreruptoarelor) și controlul permanent al stării tehnice de funcționare a acestora.

Un alt lucru, la fel de important, este verificarea permanentă a stării tehnice de funcționare a contactelor electrice, atât fixe, cât și mobile, în special prize și întreruptoare, pentru a evita formarea descărcărilor electrice care duc la supraîncălzirea și aprinderea acestora.

Condiția esențială pentru limitarea consecințelor unui incendiu electric este detectarea acestuia în faza inițială și intervenția rapidă pentru stingerea acestuia. De aceea este necesară instruirea permanentă a tuturor persoanelor care se află sau lucrează în încăperi unde funcționează echipamente electrocasnice, astfel încât să poată observa orice situații în care s-ar putea produce un incendiu la instalațiile electrice și să acționeze rapid pentru a-l preveni.

Mijloacele de stingere trebuie să fie, de asemenea, la îndemână, încărcate cu agenți corespunzători și verificate pentru funcționarea corectă, pentru a fi utilizate până la intervenția personalului calificat. Întrucât *apa este interzis a fi folosită pentru stingerea incendiilor la instalații electrice,* s-a demostrat că aburul, dar *în special ceața de apă, este deosebit de eficientă pentru stingerea incendiilor ale căror cauze de dezvoltare sunt de natură electrică.*

Foarte importantă este și instalarea mijloacelor fixe, automate de stingere și alarmare în zonele permanent nesupravegheate, unde există echipamente electrice sau electronice în funcțiune, sub tensiune.

Căldura este o formă de transfer de energie microscopică şi dezordonată (energie internă), datorită unor diferenţe de temperatură. Acest transfer are loc spontan de la sistemul cu temperatura mai ridicată către cel cu temperatura mai coborâtă, respectând ireversibilitatea postulată de principiul al doilea al termodinamicii. Sunt importante obiectivele generale ale transferului de căldură:

- determinarea sau asigurarea fluxului termic între două sisteme;
- determinarea sau asigurarea unei distribuţii de temperaturi compatibilă cu normele de siguranţă;
- optimizarea proceselor specifice transferului de energie sub formă de căldură.

Înţelegerea mecanismelor fizice prin care se realizează modurile de transfer, precum şi cunoaşterea ecuaţiilor de cuantificare a fluxului de energie transportat sunt esenţiale în aplicaţii.

Condiţiile generale de desfăşurare a proceselor de transfer de căldură se referă la precizarea unor caracteristici de material sau de proces, precum:

- corpul este omogen sau eterogen;
- corpul este izotrop sau anizotrop,
- corpul conţine sau nu surse interioare de căldură cu o distribuţie volumică dată;
- regimul termic este staţionar sau tranzitoriu;

- propagarea fluxului termic este este uni, bi sau tridimensional.

În aparatele electrice în funcţiune se dezvoltă necontenit căldură în virtutea transformării unei părţi din energia electromagnetică în energie termică.

Ca urmare a căldurii degajate în aparat, temperaturile diferitelor părţi ale acestuia cresc până la temperatura limită, corespunzătoare regimului staţionar, când întreaga căldură degajată este cedată mediului ambiant. În regim staţionar, aparatul posedă o anumită încărcătură termică, energie care se păstrează în stare potenţială până în momentul deconectării aparatului, când acesta nu mai primind energie de la sursă, căldura acumulată este disipată integral, în mod progresiv, în mediul mai rece.

Sursele principale de căldură în aparatele electrice sunt în special părţile lor active: conductoarele parcurse de curentul electric şi miezurile de fier străbătute de fluxuri magnetice variabile în timp. Cu cât încărcarea aparatului este mai mare, cu atât mai importante vor fi şi pierderile de energie electrică din aparat şi deci vor fi mai ridicate, în condiţii egale de răcire, supratemperaturile în diferitele lui părţi.

Admiţându-se supratemperaturi mai ridicate în aparat, se pot obţine de la acesta puteri mai mari, toate celelalte condiţii menţinându-se identice. În funcţie de materialele utilizate şi condiţiile de exploatare, solicitarea termică trebuie să respecte limitele maxime admise pentru temperatura de regim staţionar. Procesul transmisiei termice la căile de curent parcurse de curenţii alternativi are un caracter mai complicat.

În acest caz, datorită efectului pelicular şi efectului de proximitate, densitatea de curent şi respectiv pierderile specifice nu au o distribuţie uniformă în secţiunea căilor de curent. Rezolvarea solicitărilor termice ale căilor de curent, într-un asemenea caz complicat, întâmpină mari dificultăţi, de aceea pentru calculele practice se fac o serie de aproximări. Astfel se consideră că pierderile specifice sunt uniform distribuite şi sunt constante.

Modificarea stărilor de funcţionare ale aparatelor electrice se caracterizează printr-un regim de lucru nestaţionar, care este însoţit de solicitări termice tranzitorii, determinate de procesele de încălzire şi răcire.

Printre cele mai caracteristice solicitări termice tranzitorii ale aparatelor electrice, legate de regimul lor de lucru, menţionăm:

a) procesul încălzirii aparatelor pe durata alimentării la reţea, până la atingerea regimului termic staţionar;

b) procesul răcirii după deconectarea de la reţea;

c) procesul încălzirii la sarcină de scurtă durată;

d) procesul încălzirii la regim periodic intermitent, şi

e) procesul încălzirii la regimul de scurtcircuit.

Se mai pot produce solicitări termice tranzitorii (adesea cu caracter aleatoriu) datorită unor surse interne de căldură, legate de funcţionarea normală a aparatelor sau în caz de avarie (apariţia arcului electric între contacte sau în cazul unei avarii prin arcul de conturnare, gaze şi vapori fierbinţi de metal etc.).

În toate cazurile menţionate, elementele metalice şi dielectrice vor fi puternic solicitate termic, diminuând fiabilitatea aparatului.

ANEXE

Calculele și demostrațiile de detaliu, precum și anumite studii de caz, au fost incluse în teză în cadrul unor anexe prezentate pe scurt în capitolul următor.

Transferul de căldură într-o bară cilindrică

În regim staţionar, fluxul termic generat în bară trebuie să egaleze fluxul termic transmis fluidului de răcire de la exterior. Această condiţie permite ca temperatura suprafeţei barei să fie menţinută la o valoare constantă t_s. Ecuaţia de bilanţ termic pentru elementul de volum de grosime *dx* şi suprafaţă *S*, este:

$$q_v \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot L = \Phi_{r+dr} - \Phi_r \,, [\mathrm{W}] \tag{15}$$

unde:

$$\Phi_r = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dt}{dr} \tag{16}$$

şi

$$\Phi_{r+dr} = \Phi_r + \frac{d\Phi_r}{dr} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dt}{dr} - 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \frac{d}{dr}\left(r \cdot \frac{dt}{dr}\right) \cdot dr. \tag{17}$$

Se remarcă faptul că, în prezenţa surselor interioare de căldură, fluxul termic nu mai este independent de coordonata *r*. Fluxul Φ transferat la suprafaţa barei corespunde pentru *r=R* şi reprezintă exact fluxul termic generat de surse în volumul barei.

În cazul transferului termic convectiv la exteriorul barei bilanţul de energie termică la suprafaţa barei este:

$$-\lambda \cdot \left.\frac{dt}{dr}\right|_{r=R} = \alpha \cdot \left(t_s - t_f\right). \tag{18}$$

Transferul termic într-un tub cilindric

În cazul tubului cilindric cu suprafaţa interioară izolată termic se consideră un tub izolat termic la interior, iar la exterior se află în contact cu un fluid de temperatură t_f. Este de remarcat faptul că, în ipoteza unui regim termic staţionar (constant în timp), nu se poate vorbi decât de un fluid de răcire $\left(t_f < t_e\right)$ capabil să preia energia termică generată la interiorul tubului. Dacă se consideră transferul termic convectiv, condiţiile la limită se exprimă sub forma:

$$\begin{aligned} \left.\frac{dt}{dr}\right|_{r=R_i} &= 0\,; \\ -\lambda \cdot \left.\frac{dt}{dr}\right|_{r=R_e} &= \alpha \cdot \left[t_e - t_f\right], \end{aligned} \tag{19}$$

reprezentând un flux termic unitar nul la suprafaţa presupusă izolată perfect şi, respectiv, egalitatea dintre fluxul termic unitar cedat prin conducţie la suprafaţa răcită şi cel preluat de fluid prin convecţie.

Pentru $r = R_e$, se obţine temperatura exterioară t_e, precum şi căderea totală de temperatură $t_e - t_i$. Fluxul termic Φ transferat prin suprafaţa exterioară a tubului se obţine din gradientul temperaturii la $r = R_e$ (legea lui Fourier) sau din balanţa de energie pe întregul perete. Conform acesteia din urmă, energia termică generată în volumul peretelui trebuie complet evacuată (transferată mediului exterior) pentru asigurarea unui regim termic permanent (constant) în perete:

$$\Phi = q_v \cdot \pi \cdot \left({R_e}^2 - {R_i}^2\right) \cdot L =$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot (t_i - t_e) \cdot \frac{(R_e/R_i)^2 - 1}{(R_e/R_i)^2 - 2 \cdot \ln(R_e/R_i) - 1} [\mathrm{W}], \qquad (20)$$

unde L este lungimea tubului.

Efectuând o nou balanţă de energie, de data aceasta la suprafaţa exterioară a tubului $(r = R_e)$, rezultă că fluidul de răcire trebuie să preia fluxul termic Φ în întregime:

$$\Phi = \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot L \cdot \left(t_e - t_f\right) [\mathrm{W}], \qquad (21)$$

coeficientul de transfer termic convectiv între perete şi fluid fiind precizat de α.

Transferul termic prin peretele cilindric al unui conductor parcurs de curent electric

Modelul analizat corespunde unui conductor cilindric izolat parcurs de curent electric și amplasat în aer liber.

Geometriile radiale (cilindrice sau sferice) sunt adesea expuse unui gradient de temperatură numai pe direcţia radială şi, de aceea, pot fi tratate ca unidimensionale. În regim constant şi în lipsa surselor interioare de căldură, astfel de sisteme pot fi analizate fie pornind de la relația diferenţială a conducţiei, fie pornind de la forma corespunzătoare a relației lui Fourier. În continuare, sistemele cilindrice vor fi analizate prin prima metodă, iar cele sferice prin cea de-a doua metodă.

Se consideră un perete cilindric tubular, cu diametrul interior D_1, diametrul exterior D_2 şi lungimea L mult mai mare decât razele. În interiorul tubului se dezvoltă căldură, definită de temperatură $t_{f,i}$, iar în exterior este o zonă rece, de temperatură $t_{f,e}$. Coeficienţii de transfer de căldură convectivi (între cele două zone şi suprafeţele peretelui cilindric) corespunzători sunt α_i şi α_e.

În regim constant, relația diferenţială a conducţiei în coordonate cilindrice are forma:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda \cdot r \frac{\partial t}{\partial r}\right) = 0\,. \qquad (22)$$

Semnificaţia fizică a relației (22) devine evidentă dacă se consideră forma corespunzătoare a legii lui Fourier. Astfel, fluxul termic Φ transferat conductiv (difuziv) pentru o suprafaţă cilindrică este dat de expresia:

$$\Phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dt}{dr} = -\lambda \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot L) \cdot \frac{dt}{dr} = -2 \cdot \pi \cdot L \cdot \left(\lambda \cdot r \frac{dt}{dr}\right). \qquad (23)$$

unde $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$ este aria suprafeţei perpendiculare pe direcţia transferului de căldură.

Comparaţia relațiilor (22) şi (23) arată că fluxul termic Φ este constant în direcţia radială, ceea ce corespunde unei energii termice constante pentru peretele (corpul) considerat. Regimul termic constant din perete presupune un câmp invariant de temperatură $t(r)$.

Transferul termic în cazul unui conductor izolat electric

Se consideră cazul din figura A4.1 al unui perete cilindric tubular alcătuit din două straturi concentrice de materiale diferite. Distribuţia de temperatură s-a reprezentat în ipoteza că rezistenţa termică de contact între straturi, R_t^{ct}, este semnificativă. Peretele desparte o zonă caldă având temperatura $t_{f,i}$ de o zonă rece având temperatura $t_{f,e}$.

Coeficienţii de transfer de căldură convectivi sunt α_i, şi α_e, consideraţi constanţi de-a lungul lungimii L a peretelui cilindric.

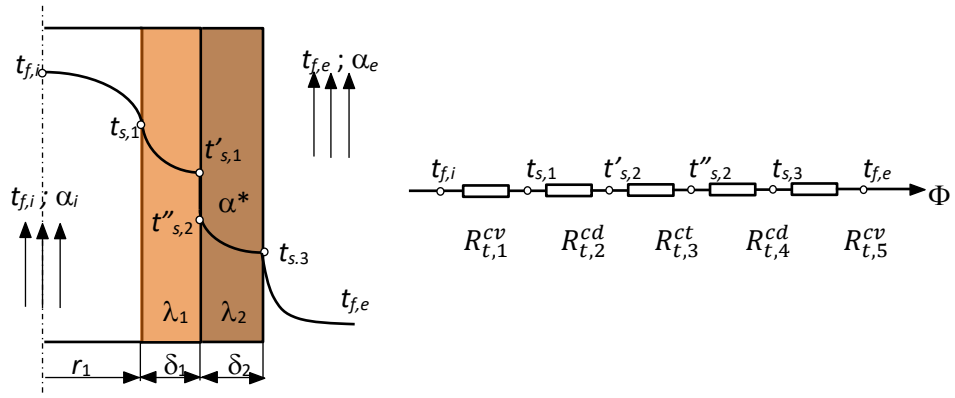


Fig. 24 Distribuţia de temperatură şi circuitul termic echivalent pentru un perete cilindric tubular multicompozit (neomogen) cu straturi concentrice.

Fluxul termic Φ transmis de la zona caldă la zona rece este constant în condiţiile unui regim constant.

Încălzirea conductoarelor electrice*

Conductoarele electrice neizolate parcurse de curent electric reprezintă o sursă de căldură datorită efectelor termice determinate de efectul Joule.

În cazul de faţă, poate fi adoptată ipoteza acceptabilă că raza R a conductorului cilindric este mult mai mică decât lungimea L a acestuia şi, deci, pentru calculul modului de evaluare a câmpului termic, se poate adopta un model bidimensional (fenomenul fiind identic în orice secţiune în lungul conductorului). În aceste condiţii, câmpul termic în orice secţiune transversală a conductorului prezintă variaţii numai de direcţia radială conform relaţiei lui Poisson:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \qquad (24)$$

în care t este temperatura [K], r – raza curentă [m] , p – puterea specifică disipată în conductor [W/m^3], λ – conductivitatea termică [W/(m×K)].

***Studiu de caz**:

Se consideră un conductor din cupru {ρ_{Cu} = 0,018·10^{-6} [Ωm]} cu aria secţiunii transversale A = 2,5[mm^2] {r_c = 0,892[mm]}, situat în aer cu temperatura mediului ambiant t_f = 20[°C], parcurs de un curent electric I = 25[A] {densitatea de curent electric $j = I/A$ = 25/2,5 = 10 [A/mm^2]} şi puterea specifică $q_v = j^2 \cdot \rho_{Cu}$ = 1,8·10^6 [W/m^3] {Φ/L = 4,5 [W/m]}, având o izolaţie cu grosimea δ_{iz} = 0,5[mm] {r_{iz} = 0,00139 [m]}, în condiţiile unui coeficient de transmisivitate între izolaţie şi mediul înconjurător α_{iz} = 10 [W/(m^2×K)], conductivitatea termică a materialului izolant λ_{iz} = 0,12 [W/(m×K)], temperatura pe suprafaţa de separaţie dintre conductor parcurs de curent electric şi izolaţie va fi:

$$t_R = 2{,}20 + 51{,}52 + 20 = 73{,}72\ [°C].$$

Din relaţia (16) rezultă că temperatura la suprafaţa exterioară a izolaţiei este:

$$t_{iz} = 71{,}52\ [°C].$$

În cazurile reale, temperatura la suprafaţa de separaţie dintre conductor şi izolaţie, precum şi temperatura la suprafaţa exterioară a izolaţiei pot atinge valori care pot genera surse de incendiu dar şi o degradare a calităţilor izolante ale izolaţiei.

Temperatura maximă din centrul conductorului poate fi determinată pe baza relaţiei (7):

$$t_{\max} = t_R + \frac{q_v}{4 \cdot \lambda_{\mathrm{Cu}}} \cdot r_c^2 \,. \tag{25}$$

Pentru t_R = 73,72°C, $q_v = 1{,}8 \cdot 10^6$ [W/m^3]; r_c = 0,000892 m şi λ_{Cu} = 400 =>:

$$t_{\max} = 73{,}72 + \frac{1800000}{4 \cdot 400} \cdot (0{,}000892)^2 = 73{,}72[°\mathrm{C}].$$

Încălzirea cablurilor multifilare

Pentru un cablu cu *n* conductoare identice, cu rezistenţa electrică *r* parcurse de acelaşi curent electric *I*, se degajă o cantitate de căldură corespunzătoare puterii de pierderi Φ:

$$\Phi = n \cdot R_e \cdot I^2 \,, \tag{26}$$

care determină un flux termic q_l pe unitatea de lungime:

$$q_l = \frac{\Phi}{L} = n \cdot \frac{\rho_c}{\pi \cdot r_c^2} \cdot I^2 \ [\mathrm{W/m}], \tag{27}$$

Un cablu pentru alimentarea unui receptor trifazat cuprinde 5 conductoare, dintre care 3 sunt active (fazele A, B şi C), un conductor neutru (N) şi un conductor de protecţie (PE) (fig. A6.1). În mod obişnuit conductoarele N şi PE nu sunt parcurse de curent electric şi deci nu aduc apor la încălzirea cablului.

În calculele practice, mănunchiul celor *n* conductoare este reprezentat ca un conductor echivalent cu raza r_{ech} având aceeaşi arie transversală cu cele *n* conductoare:

$$r_{\mathrm{ech}} = r \cdot \sqrt{n} \,. \tag{28}$$

Încălzirea unui cablu monofazat cu 3 fire

Dintre cele trei conductoare numai două sunt parcurse de curent, cel de-al treilea fiind conductorul de legare la pământ (PE). Ca urmare, pentru *n*=2, fluxul liniar de căldură generat este:

$$q_l = n \cdot \frac{\rho_c}{A} \cdot I^2 = 2 \cdot \frac{1{,}68 \cdot 10^{-8}}{1{,}5 \cdot 10^{-6}} 16^2 = 5{,}734 \ [\mathrm{W/m}].$$

Densitatea de curent este:

$$d_c = \frac{I}{A} = \frac{16}{1{,}5} = 10{,}66 \ [\mathrm{A/mm^2}] = 10{,}667 \cdot 10^6 [\mathrm{A/m^2}].$$

Sursa internă volumică de căldură are mărimea:

$$q_v = \rho_c \cdot d_c^2 = 1.68 \cdot 10^{-8} \cdot (10{,}667 \cdot 10^6)^2 = 1{,}912 \cdot 10^6 \ [\mathrm{W/m^3}].$$

Presupunând că acest cablu este pozat în aer liber având temperatura $t_f = 25$ [°C], trebuie determinată valoarea coeficientului de convecție pentru aer liniștit, fără curenți, considerând diametrul mediu al mantalei conductorului D_e=8,4 [mm].

Problema se rezolvă prin aproximații succesive, plecând de la o valoare inițială a coeficientului de convecție, $\alpha = 5$ [W/(m^2×K)], arbitrar aleasă.

Plecând de la această valoare se determină temperatura suprafeței exterioare a conductorului:

$$t_e = t_f + \frac{q_l}{\pi \cdot D_e \cdot \alpha} = 25 + \frac{5{,}734}{\pi \cdot 8{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 5} = 68{,}46\ [°\text{C}],$$

rezultând temperatura medie de calcul a proprietăților fizice:

$$t_{mf} = 0{,}5 \cdot (t_f + t_e) = 0{,}5 \cdot (25 + 68{,}46) = 46{,}73[°\text{C}].$$

Modelul de calcul al contactului electric

În cazul modelului sferei de conductivitate infinită, rezultă că între două semispații, 1 și 2, care modelează elementele de contact, conducția electrică se stabilește prin intermediul unei sfere de rază *a* și de conductivitate infinită. Liniile de current electric sunt radiale, iar suprafețele echipotențiale sunt sferice. Densitatea de curent electric este constantă pe suprafața unei sfere de rază *r*.

În cazul modelului elipsoidului turtit, imaginat de Holm R., rezultă ca semispațiile 1 și 2, de conductivitate infinită sunt în atingere prin intermediul unui elipsoid turtit, ca în figura A8.1 b); suprafețele echipotențiale sunt elipsoizi confocali, care au drept elipsoid de bază elipsoidul turtit.

Pentru a *calcula rezistența electrică între suprafața echipotențială a elipsoidului de bază (ca loc de contact)* și *suprafața altui elipsoid confocal echipotențial*, se folosește analogia formală, care există între relațiile care caracterizează câmpul electric staționar al curentului electric continuu într-un mediu conductor și relațiile care caracterizează câmpul electric într-un dielectric neîncărcat.

Rezistența electrică a contactului plan

În realitate, în cazul *contactului dintre două suprafețe plane*, conducția curentului are loc la atingerea metalică printr-un număr mare de contacte punctiforme (care formează micro suprafețe de contact). Dacă punctele de atingere sunt presupuse identice, atunci rezistența totală a contactului cu *n* puncte de atingere R_{tn} va fi de *n* ori mai mică decât rezistența de trecere corespunzătoare contactului punctiform.

Din punct de vedere *fenomenologic*, în primele momente atingerea are loc într-un număr redus de puncte de contact. Apoi, materialul pieselor de contact se strivește, ariile suprafețelor elementare de contact se măresc, are loc apropierea pieselor de contact și, în consecință, apar noi puncte de contact. Procesul creșterii lui *n* va continua atâta timp cât *apăsarea specifică*:

$$p = \frac{F}{A_F} = \frac{F}{n \cdot \pi \cdot a^2}, \tag{29}$$

este mai mică decât strivirea admisibilă σ.

Rezistenţa electrică a unui contact linear

Un contact linear este realizat dintr-o piesă 1 plană și o piesă segment de cilindru 2, în atingere sub acţiunea forței de apăsare *F*, ca în figura 25.a).

Modelul matematic al contactului linear constă dintre-o bandă de conductivitate infinită și grosime cu aria $2 \cdot a \cdot l$ care stabilește conducția electrică dintre piesele 1 și 2. Aria benzii de lățime $2 \cdot a$ și lungimea *l* se obține cu relația:

$$2 \cdot a \cdot l = \frac{F}{H}. \tag{30}$$

Ca și în cazul contactului punctiform, raza *r* a cilindrului de contact fiind relativ

mare ($r \approx 50$ ... 60 mm) nu joacă un rol semnificativ în stabilirea rezistenţei de contact.

În figura 25 b) se prezintă o secțiune transversală în modelul de calcul al contactului linear. Suprafețele echipotențiale sunt eclipse confocale; elipsa de bază este dreaptă de lungime $2 \cdot a$. Liniile de curent electric sunt hiperbole ortogonale la elipse.

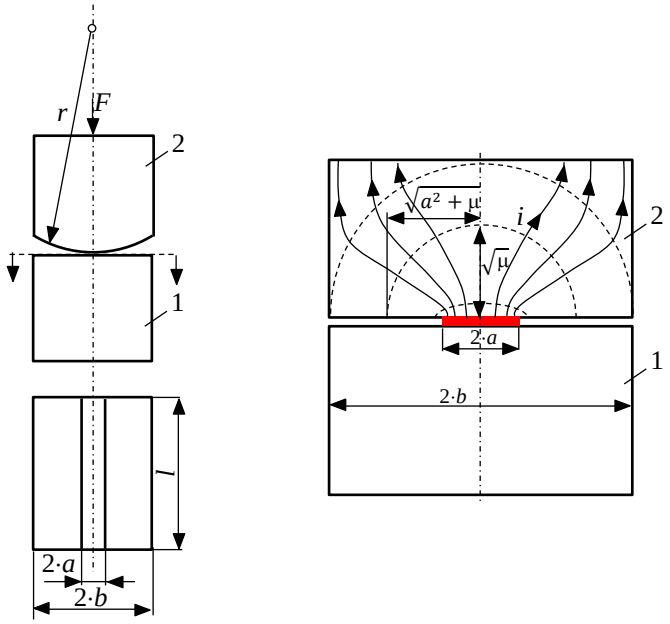


Fig. 25 Contact linear:
a) - suprafața de contact; b) - modelul de calcul.

Pentru calculul rezistenţei de strictiune se foloseşte analogia care există între relațiile care descriu câmpul electric într-un dialectic și câmpul electric obținut prin trecerea curentului electric continuu printr-un mediu conductor.

Rezistenţa electrică a unui contact plan cu deformare

Deși în domeniul tehnic contactul plan se realizează cu deformația plastică a vârfurilor de material care vin în atingere, numărul punctelor de contact rămâne redus (3 ... 20), iar aria ocupată este extrem de mică față de aria aparentă de contact. În aceste condiții se poate considera în figura A9.1 că $d >> a$.

În construcția de aparate și instalații electrice se folosesc, la realizarea contactelor de suprafață, și piese din Cu argintate sau cositorite. În acest caz convine ca să se considere rezistivitatea materialului de bază și duritatea materialului de protecție.

În tabelul 2 s-a considerat rezistența specifică superficială $R_{ss} = 10^{-12}[\Omega \times m^2]$, iar cifra Prandtl $\xi = 0{,}45$. Este de remarcat faptul că la un contact nou, cu suprafața de contact nealterată, contribuția rezistenţei de strictiune este preponderentă, în timp ce la un contact cu suprafața de contact alterată, contribuția rezistenţei peliculei superficiale este preponderentă, la formarea rezistenţei totale.

Tabelul 2 Valori pentru *c*, *m* și *e* - din relația (6) în sistemul S.I.

Materialul	***c***	***m***	***e***
Argint	$0{,}842 \times 10^{-4}$	0,6	$2{,}25 \times 10^{-4}$
Cupru[1]	$0{,}935 \times 10^{-4}$	0,6	$2{,}48 \times 10^{-4}$
Aluminiu	$1{,}342 \times 10^{-4}$	0,6	$1{,}35 \times 10^{-4}$
Sintetizare Cu-W[1]	$1{,}972 \times 10^{-4}$	0,6	$12{,}60 \times 10^{-4}$
Cupru cositorit	$0{,}596 \times 10^{-4}$	0,6	$0{,}225 \times 10^{-4}$
Cupru argintat	$0{,}918 \times 10^{-4}$	0,6	$2{,}25 \times 10^{-4}$

Încălzirea contactelor în regim de lungă durată

Pentru analiza încălzirii contactelor la trecerea unui curent electric de durată sunt folosite mai multe modele de calcul:

a) modelul sferei de conductivitate infinită (fig. 26);

b) modelul elipsoidului turtit (fig. 27);

Dacă se notează cu ρ rezistivitatea materialului celor două semispaţii, rezistenţa electrică a unui semispaţiu sferic de grosime d*r* rezultă:

$$\mathrm{d}R = \frac{\rho \cdot dr}{2 \cdot \pi \cdot r^2}, \tag{31}$$

iar rezistenţa electrică a semispaţiului sferic rezultă:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \int_a^{\infty} \frac{\mathrm{d}r}{r^2} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a}. \tag{32}$$

Rezistenţa electrică de contact R_c a celor două semisfere cu atingere a sferei de conductivitate infintă rezultă de două ori mai mare decât valoarea indicată în relaţia (32):

$$R_c = \frac{\rho}{\pi \cdot a} \tag{33}$$

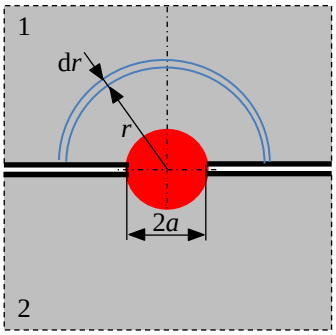


Fig. 26 Modelul sferă de conductivitate infinită

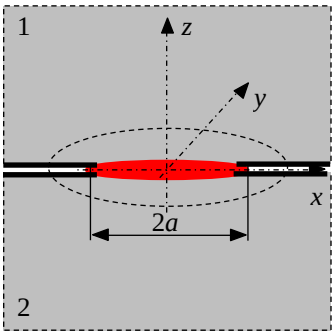


Fig. 27 Modelul elipsoid turtit

Dacă, de exemplu, contactul sub formă de sferă între cele două materiale din *Ag* ρ_{Ag}=0,0165·10^{-6} [Ω×m], iar sfera de contact are o rază de 2[mm], rezultă o rezistenţă de:

$$R_c = \frac{0{,}0165 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 2{,}63 \cdot 10^{-6}\ [\Omega].$$

Tubul de curent electric

Pentru efectuarea calculelor se fac următoarele ipoteze:

a) Fluxul termic dezvoltat în fiecare tub este transmis către exterior numai prin tubul de curent electric propriu. Nu există transfer de căldură între punctele învecinate *m* și *n*, care se presupun a se afla la aceeași temperatură.

b) Supratemperatura cea mai mare se află pe aria ΔA_0, care definește și o suprafață izotermă, ca urmare a faptului că în zona de contact se află strictiunea cea mai mare.

c) Elementele de contact sunt realizate din același material omogen și izotrop.

Prin trecerea curentului electric *I* printr-un tub de curent electric se definesc suprafețe echipotențiale și izoterme, considerând suprafața ΔA_0 cu parametri de referință în ce privește potențialul electric V = 0, supratemperatura Δt și temperatura absolută

$T=T_t$. O arie ΔA_∞ situată foarte departe, teoretic la infinit, este caracterizată prin $V=U/2$, unde U este tensiunea pe contact $\Delta t = 0$, $T=T_0$.

Se observă că *suprafețele echipotențiale sunt și izoterme*, datorită faptului că fluxuri termice egale parcurg rezistențe termice egale. În adevăr expresia rezistențelor electrice R și termice R_t, pentru un segment de tub de curent electric cuprins între suprafața de bază ΔA_0 și suprafața echipotențială ΔA_{01} situată la distanța dn față de ΔA_0, sunt:

$$dR = \frac{dn}{\sigma \cdot \Delta\vec{A}_{01}}; \tag{34}$$

$$dR_t = \frac{dn}{\lambda \cdot \Delta\vec{A}_{01}}. \tag{35}$$

unde:

$\Delta\vec{A}_n$ - reprezintă o valoare medie a ariei pe distanța dn;
σ - conductivitatea electrică;
λ - conductivitatea termică.

Influenţa forţei de apăsare

Pentru deformația plastică se introduce $a = \sqrt{F/(\pi \cdot H)}$ și rezultă relația de dependență între forța F și temperatura Tt:

$$F = \frac{i^2 \cdot L \cdot \pi \cdot \mathrm{H}}{16 \cdot \lambda^2} \cdot \frac{1}{\left(\arccos\frac{T_0}{T_t}\right)^2}. \tag{36}$$

Regimul adiabatic de încălzire

În cazul regimului adiabatic, pentru a calcula încălzirea în acest regim, se consideră relația generală a încălzirii prin conductivitate în medii cu surse:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_1} \cdot \Delta t + \frac{\Phi_1}{c_1}. \tag{37}$$

Dacă considerăm modelul sferic de contact și procesul fizic ca fiind adiabatic:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\Phi_1}{c_1}, \tag{38}$$

unde Φ_1, puterea dezvoltată în unitatea de volum este la distanța r de centrul sferei de contact:

$$\Phi_1 = \rho \cdot J^2 = \rho_0 \cdot \left[1 + \alpha_R \cdot \left(t_p + t\right)\right] \cdot \frac{i^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot r^4}. \tag{39}$$

În cazul regimului injecției frontale de putere, elementele de contact sunt fixate pe căi de curent electric care au extindere preferențială, și anume după lungimea conductorului. Relația căldurii poate descrie procesul încălzirii în regim de scurtp durată în ipotezele:

- căldura se propagă după o singură dimensiune spațială;
- sursa de căldură este concentrată pe suprafața frontală a contactului și provine din efectul Joule al rezistenței de stricțiune.

În afara rezistenței de stricțiune numai există alte surse de căldură, deci în relația căldurii $p_1=0$

Influenţa supratemperaturii

Relația de dependență între rezistența electrică R_t a contactului încălzit și rezistența electrică R_0 a contactului neîncălzit se detemină cu ajutorul teoriei potențialului. Cu referire la această teorie se consideră două stricțiuni, și anume:

- stricțiunea $S(\lambda, \rho)$, în care λ și ρ depind de temperatură;
- stricțiunea $S_0(\lambda_0, \rho_0)$, în care $\lambda=\lambda_0$ și $\rho=\rho_0$, iar ρ și λ nu depind de temperatură;

Pentru cele două stricțiuni variația elementră de potențial este:

$$\mathrm{d}V = \rho \cdot \frac{\mathrm{d}n}{\Delta A_n} \cdot i; \;\; \mathrm{d}V_0 = \rho_0 \cdot \frac{\mathrm{d}n}{\Delta A_n} \cdot i. \tag{40}$$

Deorece dependența rezistivității cu temperatura este de forma $\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_R \cdot t)$, din relațiile (40) se deduce:

$$\mathrm{d}V = \mathrm{d}V_0 \cdot (1 + \alpha_R \cdot t). \tag{41}$$

Date experimentale în instalaţii industriale

Pentru verificarea condițiilor de încălzire a conductoarelor electrice, a fost studiată distorsiunea curentului electric în instalațiile electrice industriale. Pentru început a fost verificată corectitudinea secvenţei fazorilor de tensiuni și curenți electrici

Deformarea puternică a curbelor și abaterea față de forma sinusoidală este determinată de numărul mare de convertoare de frecvență utilizate pentru alimentarea motoarelor electrice, care nu sunt echipate cu sisteme de limitare a nivelului de distorsiune.

Bibliografia tezei de doctorat

[1] *** MAI – IGSU. Analiza operativă pe perioada 01.01 – 31.12.2021, București, 2022;

[2] *** EuroFSA (European Fire Safety Allance), EU - wide data on residential fires, Beverwijk, Netherlands, 2022;

[3] *Stoica G.V.*, Contribuții la realizarea sistemelor automate, distribuite, de supraveghere și alarmare la incendii – Teza de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții (UTCB), București 2022;

[4] *Calotă S., Temian G., Știru V., Duduc G.I., Golgojan I.P*, Manualul Pompierului, Ed. Imprimeriei de Vest, Oradea, 2009, ISBN 978-973-704-110-4;

[5] *Pavel D.I.*, Studii și referate de specialitate în domeniul stingerii incendiilor, Ed. SITECH, Craiova, 2019. ISBN 978-606-11-3932-0;

[6] *Babrauskas V.*, Research on Electrical Fires, The States of the Art, Fire Safety Science - Proceedings of the Ninth International Symposium, 2009, pp. 3-18;

[7] *** MDRT - Normativ pentru proiectarea și executarea instalațiilor electrice aferente clădirilor, I7-2011, MO Part. I, nr. 802 bis, 2011;

[8] *Lipan L.L., Dimitriu S., Sbora L.M.*, Power factor in installations with non-linear receivers and heating elements of the power cables of various equipment, UPB Sci. Bull., Series C, Vol. 84, Iss. 1, 2022, pp.261-274, ISSN 2286-3540;

[9] *Lipan L.L., Dimitriu S.*, The experimental research of compressors in a pet bottles factory for soft drinks, UPB, Sci. Bull., Series C, Vol. 83, Iss. 4, 2021, pp.345-362, ISSN 2286-3540;

[10] *Mocanu C.I.*,Bazele electrotehnicii. Teoria câmpului electromagnetic, Ed. Didactică şi Pedagigică, Bucureşti 1991, pg.583, ISBN 973-30-1097-9;

[11] *Golovanov N., Lăzăroiu G.C.*, Effects of symmetrical and unsymmetrical sags on induction motors, UPB, Sci. Bull., Series C, Vol. 68, Iss. 2, 2006, pp.63-78, ISSN 2286-3540;

[12] *Hortopan Gh.*, Aparate electrice, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1980;

[13] *Petrica I.*, Aparate electrice, Vol 1, Ed. Eftimie Murgu, Reșița, 2001, ISBN 973-826-03-04;

[14] *Popescu G.*, Inițierea/postinițierea unui incendiu. Concepte conexe - partea I [56]- Proceed, a XIII-a Conf. Națională Multidisciplinară, Dorin Pavel, Sebeș, 2013, pp. 409-416;

[15] *Popescu G., Bălănescu L.V.*, Prevenirea incendiilor la autovehicule, Ed. MAI, București, 2005, ISBN 973-8307-94-5;

[16] *ScriGroup*, Agenți de stingere, www.scrigroup.com/educatie/ chimie/Agenti-de-stingere-Apa-HO-Abur82326.php;

[17] *PROEXTOP*® Stingerea incendiilor cu ceață de apă, Stingere Incendii Ceață Apă, Turbine Atomizare Apă | ProexTop;

[18] *EOROSTING*® Instalații PSI, Echipamente Antiincendiu - Sistem Antiincendiu - Consultanta PSI (eurosting.ro);

[19] *Pavel D. I., Constantinescu A.*, Utilizarea instalaţiilor fixe, semifixe şi mobile necesare obţinerii spray-ului de apă, Conferința a 4-a a hidrotehnicienilor din România "Dorin Pavel", vol. I, Ed. Printech, Bucureşti, 2006, pp 129-140, ISBN 973-718-486-6;

[20] *BLUE® fire solutions*, Soluții de stingere a incendiilor, stingere incendiu - Blue Fire Solutions;

[21] *BONPET®* Dispozitiv automat de stingere a incendiilor, bonpet.ro/index.php/dispozitiv-automat-destinat-stingerii-incendiilor-bonpet;

[22] *BONTPETSYS®* Sistem antiincendiu, Functionare Sistem antiincendiu BONPETSYS (N fiole);

[23] *ELIDE FIRE®* Balon pentru stingerea incendiilor Automatic Fire Extinguishing Ball - ELIDE FIRE ®;

[24] *IFEX ® TECHNOLOGIES* Pistol pentru stingerea incendiilor cu impuls, impulse fire-fighting processes for effective firefighting › IFEX Technologies GmbH (ifex3000.com);

[25] *Tincu, IF; Păcurar, D; Tincu, RC; Becheanu, C;* Influence of Protein Intake during Complementary Feeding on Body Size and IGF-I Levels in Twelve-month-old Infants, Ed. Balkan Med J.2020 Jan; 37(1):54-55;

[26] https://ro.wikipedia.org/wiki/Triunghi_de_foc#/media/Fi%C8%99ier:Fire_triangle.svg;

[27] *Sbora L.M., Dimitriu S., Pavel D.I., Lipan L.L.,* Fires at electrical switchboards and their extinguishing possibilities, UPB Sci. Bull., Series C, Vol. 84, Iss. 1, 2023, pp.261-274, ISSN 1223-7027;

[28] ***O.I.G. - Ordinul Inspectorului General nr.1416/I.G. din 29.07.2013 pentru aprobarea Ghidului privind tehnica și tactica stingerii incendiilor Nivel I – ISU 04, pp. 23-42, București 2013;

[29] Baines P,G., *Physical mechanismus for the propagation of surface fires*, Math. Comput.Modelling, vol.13, No.12, 1990;

[30] Golovanov N., Şora I., *Electrotermie şi Electrotehnologii*, vol. I *Electrotermie*, Ed. Tehnică, Bucureşti,1997;

[31] Frey P., Leys N., Scherding C., *Maths in Action in Contemporary Archaeology*: *numerical simulation of fire propagation in Roman Buildings*, vol.11, 2022, https://doi.org/10.5802/msia.21;

[32] James G. Quintiere, *Fundamentals of Fire Phenomena*, Willey, 2006;

[33] Douglas Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, Willey 2011;

[34] https://stiriest.ro/2023/10/05/batrana-carbonizata-in-urma-unui-incendiu-dotul-ei-a-suferit-arsuri-de-gradele-i-si-ii;

[35] https://www.newsbucovina.ro/actualitate/185733/foto-video-incendiu-gura-humorului-au-ars-complet-toate-apartamentele-de-la-mansarda-unui-bloc-16-echipaje-de-pompieri-au-intervenit-si-au-limitat-incendiul-la-mansarda-au-salvat-o-casa-blocuri;

[36] https://skylux.ro/produse/compartimentare-la-incendiu;

[37] https://www.romania-actualitati.ro/stiri/romania/incendiu-cu-degajare-de-substante-toxice-la-o-hala-din-afumati-ilfov-id129818.html;

[38] *** *General requirements for arc fault detection devices*, Standard IEC 62606;

[39] *** *Electrical installation guide*, Schneider Electric, 2016;

[40] *** https://new.abb.com > arc fault protection sistem rea;

[41] https://www.ebihoreanul.ro/stiri/incendiu-violent-cinci-blocuri-cuprinse-de-flacari-in-craiova-181135.html;

[42] *Chindriş M., Sudria I, Andreu A.* - Poluarea armonică a reţelelor electrice industriale. Ed. MEDIAMIRA, Cluj – Napoca, 1999;

[43] *F. Chiriac, A. Leca, M. Pop, s.a.* - Procese de transfer de căldură și de masă în instalațiile industriale (Heat and mass transfer processes in industrial installations), Bucharest, Ed. Tehnică, 1982;

[44] Sbora L., Încălzirea conductoarelor și contactelor electrice – Matlab, Referat doctorat nr.3, nov. 2022;

[45] Bejan A. – Termodinamică tehnică avansată, Ed. Tehnică, 1996;

[46] Darie E. – Termotehnică curs, Facultatea de Pompieri;

[47] Dănescu Al. şi colab. – Termotehnică şi maşini termice, E.D.P. Bucureşti, 1985;

[48] Dănescu Al. şi colab. – Lexicon de Termodinamică şi maşini termice, Volumele 1,2,3,4, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1985;

[49] Hütte – Manualul inginerului, fundamente, Ed. Tehnică, 1995;

[50] Golovanov, N., Popescu, G., Dumitrana, T., Coatu, S. - Evaluarea riscurilor generate de descărcările electrostatice, Ed. Tehnică, Bucureşti, 2000;

[51] Golovanov, N., Popescu, G. - Fenomene de încărcare electrostatică în industrie, ca surse de incendii şi explozii - Îndrumător legislativ, economic şi tehnic, nr. (428/431) / 1999, Editura I.L.E.T., Bucureşti, 1999;

[52] Golovanov, N., Popescu, G. - Încărcarea electrostatică a lichidelor inflamabile din instalaţiile de transport şi stocare, Pompierii Români nr 12/1992;

[53] Popescu, G. - Elemente de fenomen privind producerea sarcinilor electrostatice la încărcarea sau descărcarea cisternelor auto sau de cale ferată, "Alo, 981!", nr. 6 (36) /1995;

[54] Kimura S., Darie E., Okajima A., Kiwata T., Mizushima M. – Mixed Convection Heat Transfer with Different Side-Wall Temperatures, Thermal and Fluid Engineering, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series B, nr. 1/2002, pag. 169-174;

[55] Leonăchescu N., Şandru E., Cartas V., Mihăilă C., Caluianu V. – Probleme de Termotehnica, EDP, 1981. 8. Leonăchescu N. – Termotehnica, EDP, 1981;

[56]*** Lexicon de termodinamică şi maşini termice (4 volume), Ed. Tehnică, 1985;

[57]*** Manualul Inginerului Termotehnician, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1986;

[58] Moisil G. – Termodinamica, Ed. Academiei, 1988;

[59] Petrescu Stoian şi colab. – Termotehnică şi maşini termice, E.D.P. Bucureşti, 1978;

[60] Petrescu S., Petrescu V. – Metode şi modele în termodinamica tehnică, Ed. Tehnică, 1988;

[61] Leca A, Mladin E., Stan M. – Transfer de căldură şi masă, Ed. Tehnică, 1998;

[62] Sbora L. – Conducţie termică. Stand experimental, Lucrare de licenţă - Facultatea de Pompieri, Bucureşti, 2009;

[63] Sbora L. – Elemente de modelare a transferului de căldură în bare cilindrice metalice, Lucrare de disertație - Facultatea de Pompieri, Bucureşti, 2011;

[64] Pimsner V., Vasilescu C.A., Petcovici A., – Termotehnică şi maşini termice, Culegere de probleme, E.D.P. Bucureşti, 1976;

[65] Popa Bazil, Vintilă C., – Termotehnică şi maşini termice, E.D.P. Bucureşti, 1977;

[66] Radcenco V. – Termodinamica generalizată, Ed. Tehnică, 1994;

[67] Reconstruction and up grading of steam power plants by means of topping, parallel powering and boosting by gas-turbines. Aspects of Economical Powel Generation in Romania, Siemens/KWV seminar, Bucureşti, octombrie 1994;

[68] Stanciu D., Marinescu M. – Termodinamică tehnică, Ed. Printech, 2002;

[69] Theil H., Negru D., Jădăneanţ M. – Termotehnică şi maşini termice, Litografia I.P. Traian Vuia Timişoara, 1989;

[70] Crăciun, I., Calotă, S., Lencu, V. - Stabilirea şi prevenirea cauzelor de incendiu, ediţia a II-a, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1999;

[71] *** D.G.P.S.I. - 004 - Dispoziţii generale privind reducerea riscurilor de incendiu generate de încărcările electrostatice, aprobate prin O.M.I. nr. 108/2001;

[72] Bercovici, M., Arie, A., Poeată, A. *REȚELELE ELECTRICE. Calculul electric*, Editura Tehnică , Bucureşti, (1974);

[73] Surdu, C. „*Prevenirea incendiilor la instalații electrice*" – Lucrare de licență, Academia de Poliţie „Alexandru Ioan Cuza " - Facultatea de Pompieri, Bucureşti (2009) ;

[74] http://home.howstuffworks.com;

[75] http://www.loconet.com;

[76] http://www.preferatele.com;

[77]Gheorghiu N. ş.a. - Echipamente electrice, E.D.P., 1981;

[78] Selischi A. - Echipamente electrice. Îndrumar de laborator, Litografia I.P.B., București, 1986;

[79] Selischi A., Dedu G., Guzun B. - Echipamente electrice. Îndrumar pentru lucrăride laborator şi aplicaţii practice, Litografia U.P.B., București, 1994;

[80] Hortopan Gh. - Aparate electrice, E.D.P., București,1984;

[81] Hortopan Gh. ş.a. - Probleme de aparate electrice, E.D.P., București, 1982;

[82] Mircea I. - Instalaţii şi echipamente electrice. Ghid teoretic şi practic, E.D.P., București,1996;

[83] Chiuţă I. ş.a. - Testarea transformatoarelor de măsură, Ed. I.C.P.E., București, 2001;

[84] Pleşca A. ş.a. - Protecţia prin siguranţe fuzibile a dispozitivelor semiconductoare de putere, Ed. Gheorghe Asachi, Iași, 2001;

[85] Adam M. - Monitorizarea şi diagnosticarea întreruptoarelor de putere, Editura Gheorghe Asachi, Iași, 2001;

[86] Peicov A. - Aparate electrice de joasă tensiune. Proiectare şi construcţie, Editura Scrisul românesc, Craiova, 1988;

[87] Cănescu T. - Aparate electrice de joasă tensiune. Îndreptar, Ed. Tehnică, București, 1977;

[88] Barbu I. - Siguranţe electrice de joasă tensiune,Ed. Tehnică, București, 1983;

[89] Adam M., Baraboi A. - Echipamente electrice.vol. 1, Ed. Gheorghe Asachi, Iași, 2002;

[90] Adam M., Baraboi A. - Echipamente electrice.vol. 2, Ed. Gheorghe Asachi, Iași, 2002;

[91] Gheorghiu N. - Echipamente electrice pentru centrale şi staţii, E.D.P., București, 1975;

[92] Hortopan Gh., ş.a.- Aparate electrice de joasă tensiune, Ed. Tehnică, București, 1969;

[93] Conecini I., ş.a. – Cartea electricianului din staţii electrice şi posturi de transformare, Ed. Tehnică, București, 1986;

[94] Pantea Al. - Probe şi verificări la transformatoarele de putere, Ed. Tehnică, București, 1983;

[95] Prescripții de proiectare a părții electrice a centralelor şi staţiilor. vol. 1, ICEMENERG, București, 1980;

[96] *** Prescripții de proiectare a părții electrice a centralelor şi staţiilor. vol. 2, ICEMENERG, București, 1980;
[97] Gavrilă H. - Electrotehnică şi echipamente electrice. vol. 1, E.D.P., București, 1994;
[98] Gavrilă H. - Electrotehnică şi echipamente electrice. vol. 2, E.D.P., București, 1994;
[99] Herscovici B. ş.a. - Aparate electrice de înaltă tensiune. Îndreptar, Ed. Tehnică, București, 1983;
[100] Nitu V. ş.a. - Instalațiile electrice ale centralelor şi staţiilor, Ed. Tehnică, București, 1972;
[101] Dinculescu P. - Instalații şi echipamente electrice,E.D.P., București, 1981;
[102] Furnică E. - Întrerupătoare cu vid, Editura Gheorghe Asachi, Iași 2002;
[103] Mircea I. - Instalații şi echipamente electrice, E.D.P, București, 2002;
[104] Suciu C. – Criminalistică, E.D.P., București, 1972;
[105] *** Buletinul pompierilor, nr. 3/1979, Ed. Ministerului de interne, București, 1979;
[106] lt.col. Chilom I., Stoian R. – Metodologia cercetării cauzelor incendiilor, Editura Ministerului de interne, București, 1987;
[107] https://www.nist.gov;
[108] https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Road-Map;
[109] Favia M., *Assessment of the software Fire Dynamics Simulator* (FDS) *for fire simulation in train convoyes*, – Tesi di Laurea Magistrale, Universita di Padova, P2017;
[110] McGrattan K.B. ş.a., *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide*, NISTIR 6467.