

Anca MIRON

UTILIZAREA ENERGIEI ELECTRICE

Suport de curs



U.T.PRESS
Cluj-Napoca, 2025
ISBN 978-606-737-801-6

Anca MIRON

**UTILIZAREA
ENERGIEI ELECTRICE**

Suport de curs



U.T.PRESS

Cluj-Napoca, 2025

ISBN 978-606-737-801-6



Editura U.T.PRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
www.utcluj.ro/editura

Recenzia: Prof.dr.ing. Sorin G. Pavel
Conf.dr.ing. Radu A. Tîrnovan

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2025 Editura U.T.PRESS
Reproducerea integrală sau parțială a textului sau
ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu
acordul prealabil scris al editurii U.T.PRESS.

ISBN 978-606-737-801-6

PREFAȚĂ

Prezentul material didactic este destinat să acopere partea teoretică din programa analitică a disciplinei *Utilizarea energiei electrice*, pentru anul III, studii de licență, specializările din cadrul facultății de Inginerie Electrică.

Suportul de curs a fost conceput ca un material didactic complementar prezentărilor din cadrul orelor de curs, astfel încât noțiunile teoretice acumulate să confere studenților un bagaj de cunoștințe menit să le permită abordarea cu succes a problemelor pe care vor trebui să le rezolve în calitate de specialiști electrotehniști și energeticieni.

Elaborate în această concepție, toate cursurile (capitolele) acestui material didactic sunt logic structurate și beneficiază de o tratare teoretică corespunzătoare, însoțită de exemple pentru o înțelegere mai bună a fenomenelor și instalațiilor prezentate. De asemenea, s-a urmărit ca fiecare curs să fie în concordanță cu cerințele actuale în ceea ce privește cunoștințele studenților, precum și cu dispozitivele și instalațiile moderne care se găsesc în industrie și nu numai. Pe de altă parte, fiecare curs cuprinde și suportul de bază a fenomenelor care explică funcționarea și construcția instalațiilor și dispozitivelor studiate.

În afară de cursurile propriu-zise, care sunt în concordanță cu programa analitică, suportul de curs cuprinde o serie de anexe în care se prezintă detaliat teoriile și legile fizice care susțin materialul teoretic din cursuri. Pentru a veni în ajutorul studenților, a viitorilor ingineri, la începutul cărții, s-a introdus un capitol, “Gândirea inginerească”, care prezintă principalele caracteristici și obiceiuri cognitive ale inginerilor.

Cu toate eforturile depuse, autoarea este convinsă că această formă a prezentului material didactic poate fi îmbunătățită prin continuarea preocupărilor în domeniu, prin sugestiile studenților care îl vor utiliza precum și ale altor specialiști.

Autoarea

CUPRINS

Pagina

Gândirea inginerească.....	7
1. Receptoare și consumatori de energie electrică	
1.1 Introducere.....	9
1.2 Sistemul electroenergetic.....	11
1.3 Receptoarele electrice.....	13
1.4 Consumatori de energie electrică.....	16
1.5 Bibliografie.....	18
1.6 Autoevaluare.....	18
2. Iluminatul electric	
2.1 Introducere.....	20
2.2 Generarea luminii.....	23
2.3 Mărimi și unități fotometrice.....	26
2.4 Bibliografie.....	30
2.5 Autoevaluare.....	30
3. Surse electrice de lumină	
3.1 Introducere.....	32
3.2 Lămpi cu incandescență.....	34
3.3 Lămpi cu descărcări electrice.....	36
3.4 Lămpi cu LED-uri.....	44
3.5 Bibliografie.....	49
3.6 Autoevaluare.....	49
4. Aparate electrice de iluminat	
4.1 Introducere.....	52
4.2 Iluminatul interior.....	55
4.3 Iluminatul exterior.....	59
4.4 Iluminatul arhitectural.....	62
4.5 Iluminatul special.....	63
4.6 Bibliografie.....	64
4.7 Autoevaluare.....	65
5. Instalații electrotermice	
5.1 Introducere.....	67
5.2 Tipuri de instalații electrotermice.....	69

5.3	Propagarea energiei termice (căldurii).....	73
5.4	Indicatorii energetici.....	74
5.5	Bibliografie.....	78
5.6	Autoevaluare.....	78
6.	Încălzirea prin rezistență	
6.1	Introducere.....	80
6.2	Încălzirea directă prin rezistență.....	82
6.3	Încălzirea indirectă prin rezistență.....	87
6.4	Bibliografie.....	100
6.5	Autoevaluare.....	100
7.	Încălzirea prin inducție	
7.1	Aspecte generale.....	103
7.2	Sistemul inductor-piesă.....	107
7.3	Instalații și dispozitive.....	110
7.4	Alimentarea instalațiilor și dispozitivelor.....	120
7.5.	Bibliografie.....	124
7.6	Autoevaluare.....	124
8.	Încălzirea prin arc electric	
8.1	Aspecte generale.....	126
8.2	Caracteristicile de bază.....	127
8.3	Cuptoarele cu arc electric.....	131
8.4	Bibliografie.....	137
8.5	Autoevaluare.....	137
9.	Încălzirea materialelor dielectrice	
9.1	Introducere.....	138
9.2	Caracteristicile încălzirii dielectrice.....	139
9.3	Cuptoarele capacitive.....	141
9.4.	Cuptoarele cu microunde.....	143
9.5	Bibliografie.....	147
9.6	Autoevaluare.....	148
10.	Încălzirea cu fascicul de electroni	
10.1	Introducere.....	149
10.2	Instalații de prelucrare cu fascicul de electroni.....	151
10.3	Bibliografie.....	154
10.4	Autoevaluare.....	155
11.	Sudarea electrică	
11.1	Introducere.....	156

11.2 Metodele de sudare electrică.....	159
11.3 Sudarea cu energie înmagazinată.....	160
11.4. Sudarea rezistivă la înaltă frecvență.....	167
11.5 Bibliografie.....	170
11.6 Autoevaluare.....	170
12. Sudarea cu arc electric	
12.1 Introducere.....	172
12.2 Caracteristicile arcului electric de sudare.....	174
12.3 Parametrii tehnologici ai sudării.....	176
12.4. Procedee de sudare cu arc electric.....	179
12.5 Sursele pentru sudarea cu arc electric.....	189
12.6. Consumul de energie în procesul de sudare.....	194
12.7. Bibliografie.....	195
12.8 Autoevaluare.....	196
13. Sudarea prin presiune	
13.1 Introducere.....	197
13.2 Parametrii electrici ai circuitului de sudare.....	198
13.3 Sudarea cap la cap.....	200
13.4 Sudarea prin suprapunere.....	203
13.5. Parametrii energetici ai sistemului de sudare.....	207
13.6. Bibliografie.....	209
13.7 Autoevaluare.....	209
14. Alte tipuri de receptoare electrice	
14.1 Introducere.....	210
14.2 Receptoare electromecanice.....	211
14.3 Receptoare electronice.....	214
14.4 Bibliografie.....	218
14.5 Autoevaluare.....	218
15. Efectele utilizării energiei electrice	
15.1 Introducere.....	220
15.2 Impactul asupra sistemului electroenergetic.....	223
15.3 Impactul asupra mediului.....	230
15.4 Utilizarea eficientă a energiei electrice.....	231
15.5. Bibliografie.....	232
15.6 Autoevaluare.....	232
16. Protecția pentru prevenirea pericolului de accidente prin electrocutare	
16.1 Introducere.....	234

16.2 Metodele de prevenire a atingerilor directe.....	236
16.3 Metodele de prevenire a atingerilor indirecte.....	239
16.4 Bibliografie.....	243
16.5 Autoevaluare.....	243

Anexe

Anexa 1. Legile radiației termice.....	245
Anexa 2. Teoria lui Planck.....	247
Anexa 3. Descărcările electrice.....	248
Anexa 4. Stabilizarea descărcării electrice.....	250
Anexa 5. Legea lui Fourier și legea lui Newton.....	253
Anexa 6. Vectorul Poynting și ecuațiile lui Maxwell.....	255
Anexa 7. Exerciții și probleme.....	257
Anexa 8. Mărimi fizice și unități de măsură.....	265

GÂNDIREA INGINEREASCĂ

Gândirea inginerescă se referă la modul de gândire al inginerilor atât în rezolvarea problemelor și a sarcinilor la locul de muncă, cât și în viața de zi cu zi.

În literatura de specialitate există multe tipare ale inginerului, însă 6 trăsături sunt definatorii: ***gândirea sistemică, găsirea (definirea) problemei, vizualizarea problemei și a rezultatelor, dorința de a îmbunătăți, adaptarea și rezolvarea creativă a problemelor.***

Gândirea sistemică este caracteristica de top a inginerilor. Cei care au această trăsătură cognitivă, văd problema ca un sistem (întreg), care este alcătuit din subsisteme, fiecare cu punctele slabe și forte. De asemenea, ei înțeleg fiecare componentă a întregului și rolul ei, dar și cum se interconectează și interacționează elementele între ele.

Definirea problemei este esențială pentru un inginer, deoarece prin aceasta el poate să vadă clar de ce are nevoie, să identifice și verifice soluțiile existente, respectiv să investigheze contextul problemei.

Vizualizarea se referă la capacitatea de a face tranziția de la abstract la concret, de a înțelege legile care stau la baza produselor analizate și caracteristicile materialelor utilizate. Acest termen se referă și la crearea unui model mental al problemei și produselor, precum și realizarea unei analize cognitive a soluțiilor.

Dorința de a îmbunătăți este o trăsătură a inginerilor, care alături de alte variabile a dus la dezvoltarea tehnologică. Într-adevăr, inginerul este guvernat de dorința de a încerca neîncetat să facă lucrurile să funcționeze mai bine, de a găsi soluții mai bune la problemele cu care se confruntă, de a crește eficiența produselor. Toate acestea se obțin prin experimentare, metode euristice (bazate pe experiență), prin crearea de machete și prototipuri.

Adaptarea este procesul prin care inginerii testează, analizează, reflectă, regândesc și schimbă produsele și soluțiile (le adaptează la noile cerințe ale clienților, noile schimbări de mediu etc.). Această adaptare se referă și la învățarea continuă, adaptarea gândirii și concepțiilor la timpurile prezente și pentru viitor.

Rezolvarea creativă a problemelor presupune aplicarea unor tehnici din alte domenii pentru a rezolva o problemă inginerescă. Pe de altă parte, acest proces este unul de echipă, astfel include generarea de idei și soluții împreună cu membrii echipei, ascultând și acceptând critica și opiniile tuturor.

Caracteristicile cognitive ale inginerilor nu sunt înnăscute (sau cel puțin nu la nivelul necesar pentru a fi un adevărat inginer), ci ***ele se cultivă, îmbunătățesc și cresc în primul rând prin dorință și voință***, dar și prin: ***curiozitate, colaborare, reflectare, considerație etică, minte deschisă, elasticitate și inventivitate***.

1

Receptoare și consumatori de energie electrică

1.1 Introducere

Energia este o mărime fizică, o funcție de stare a unui sistem fizic definită de suma echivalențelor sale în lucru mecanic asupra exteriorului atunci când trece dintr-o stare dată într-o starea de referință. Astfel ea este asociată interacțiunii dintre două sisteme fizice, mai explicit cuprinde echivalentul de lucru mecanic a acțiunii primului sistem asupra celui de-al doilea (energia transmisă). În acest sens, orice sistem fizic care are o temperatură superioară temperaturii de zero absolut (0 K) cedează energie, orice sistem fizic în mișcare determină energie.

Energia apare sub diferite forme. Prin definiție, forma de energie este energia unui sistem fizic, care se acumulează, transmite sau cedează altor sisteme fizice.

Formele de energie sunt asociate numai anumitor clase de sisteme fizice, care au proprietăți specifice, în consecință se poate spune că ele depind de mărimile de stare mecanice, termice, electrice, chimice etc. Denumirea unei forme de energie este legată de modul ei de manifestare, de purtătorul de energie, sau de proveniența energiei. Printre formele de energie care sunt întâlnite în natură se numără:

- Energie termică – reprezintă energia unui sistem fizic care se manifestă sub formă de căldura ce este transmisă altui sistem fizic de o temperatură mai scăzută;
- Energie nucleară – este forma de energie care se obține în urma unor reacții nucleare care au loc la nivel atomic, și se obține prin reacții de fisiune și fuziune;
- Energie hidraulică – reprezintă capacitatea unui sistem fizic, reprezentat de apă, de a produce lucru mecanic când trece dintr-o stare în alta, datorită energiei sale potențiale;

- Energie solară – este energia produsă de radiațiile solare care sunt capabile să producă căldură, sau electricitate cu ajutorul unor reacții chimice;
- Energie eoliană – reprezintă energia vântului, prin care energia cinetică a acestuia este folosită direct sau transformată în altă formă de energie;
- Energia electrică - este forma de manifestare a energie în jurul sarcinilor electrice în prezența unui câmp electromagnetic.

Formele de energie din punct de vedere al accesibilității lor se împart în primare, intermediare și finale. Dintre acestea energiile primare sunt cele mai accesibile; printre care se numără energia chimică a combustibililor fosili, energia solară, energia eoliană etc. Însă de cele mai multe ori acestea nu se pot utiliza în locul, sub forma și în cantitatea existentă, astfel ele sunt transformate, transportate și stocate direct sau după transformări intermediare. În figura 1.1 este prezentat lanțul transformărilor efectuate asupra unor energii primare.

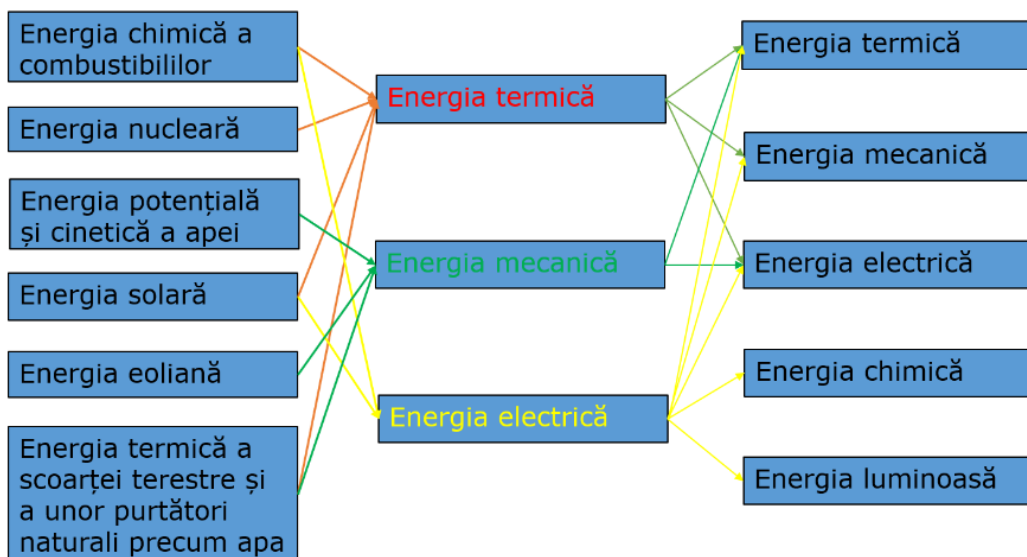


Figura 1.1 Transformarea formelor de energie primare

O formă de energie mai specială este vectorul energetic. Acest termen se referă la o formă de energie produsă de om și ajută la transferul, transportarea și stocarea în timp și spațiu a unei cantități de energie. Câteva exemple de vectori energetici sunt enumerate în continuare:

- Energia electrică;

- Hidrogenul;
- Petrol și derivatele sale;
- Gaze naturale și derivatele sale.

Dintre toate formele de energie folosite în societatea umană, energia electrică se bucură de cea mai mare popularitate, datorită polyvalenței și accesibilității ei. Într-adevăr, energia electrică se poate folosi ca atare, precum și pentru a se obține toate celelalte forme de energie necesare activității umane. De asemenea, energia electrică poate fi ușor transportată și transformată la consumatori / utilizatori în orice altă formă de energie: energie mecanică, energie termică, energie chimică etc.

Energia electrică este produsă, transportată, distribuită și utilizată în cadrul sistemelor electroenergetice.

1.2 Sistemul electroenergetic

Un sistem electroenergetic este ansamblul instalațiilor de producere, transport, distribuție și utilizare a energiei electrice interconectate într-un anumit mod și având un regim comun și continuu de producere și consum a energiei electrice. În figura 1.2 este ilustrată schema electrică monofilară a unui sistem electroenergetic uzual. Se pot observa unitățile de generare (CE, Centrale Electrice), liniile electrice de transport (LEA, Linie Electrică Aeriană), unitățile care cuprind transformatoarele (ST, Stație de Transformare și PT, Post de transformare), liniile electrice de distribuție (pot fi și LES, Linie Electrică Subterană) și consumatorii de energie electrică (C).

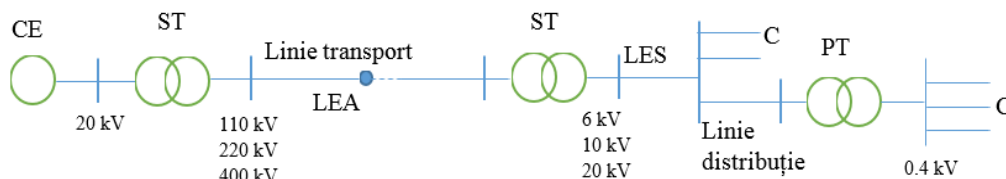


Figura 1.2 Schema electrică a unui sistem electroenergetic

În figura 1.2, LEA este linie electrică aeriană și LES – linie electrică subterană care este linie în cablu.

Continuând lanțul definițiilor, o instalație electrică cuprinde totalitatea echipamentelor electrice interconectate prin diferite tipuri de conductoare

electrice, într-un spațiu dat, formând un singur tot și având un scop funcțional bine determinat, iar echipamentul electric este orice dispozitiv utilizat pentru producerea, transportul, transformarea, distribuția și utilizarea energiei electrice.

Producerea energiei electrice se realizează în instalații tehnologice numite centrale electrice. Procesul de producere a energiei se poate realiza centralizat, când producerea, transportul și distribuția energiei sub forma unor sisteme energetice zonale, naționale (alimentarea cu energie electrică, gaze naturale, benzină etc.) sau chiar internaționale, sau descentralizat. În cazul producerii descentralizate, producerea, transportul și distribuția energiei electrice se efectuează prin realizarea de unități locale amplasate lângă consumatori (încălzirea locuințelor, alimentarea cu energie termică a întreprinderilor industriale etc.).

Centralizarea producerii energiei electrice prezintă pe de o parte următoarele avantaje: (1) creșterea randamentului instalațiilor și reducerea investițiilor specifice precum și a folosirii raționale a energiei primare și (2) se atenuază dependența dintre producerea și consumul de energie și pe de altă parte dezavantajul principal se referă la pierderile și investițiile suplimentare introduse prin transportul la distanțe mari a energiei electrice.

Descentralizarea producerii energiei electrice are punctele forte - permite amplasarea unităților de producere și transformare lângă consumatori, și punctele slabe - dependența accentuată dintre producere și consum, obligă crearea unor sisteme de stocare a energiei și utilizarea unor combustibili superiori.

Producerea energiei electrice în centrale electrice se realizează la tensiuni cuprinse între 2 și 24 kV. În următoarea etapă, energia electrică este transportată prin rețele electrice de înaltă tensiune de 110 și 220 kV. Pentru a scădea pierderile de energie (prin efect Joule-Lenz) în timpul transportului la distanțe mari, de multe ori se utilizează tensiunea foarte înaltă (400 și 750 kV), și tensiunea continuă.

În apropierea marilor concentrații de consumatori (centre industriale și orașe mari) sunt amplasate stații de transformare și interconexiuni unde energia electrică se coboară la niveluri de tensiune necesare consumatorilor. Din aceste puncte ale sistemelor electroenergetice se realizează distribuția energiei electrice prin intermediul liniilor de medie sau joasă tensiune. În rețelele de distribuție de joasă tensiune, există o serie de interconexiuni locale între posturile de transformare.

Utilizarea energiei electrice are loc în cadrul consumatorilor prin intermediul receptoarelor electrice.

1.3 Receptoare electrice

Receptoarele electrice sunt toate echipamentele care transformă în mod voit (cu un scop bine definit) energia electrică primită în alte forme de energie (în această categorie nu intră pierderile de energie care apar în timpul proceselor tehnologice).

Receptoarele electrice se împart în două mari categorii în funcție de scopul lor:

- Receptoare pentru iluminatul electric – lămpile electrice (transformă energia electrică în lumină);
- Receptoare de forță:
 - Electromecanice – motoare electrice, electromagneți și electroventile (transformă energia electrică în lucru mecanic / mișcare);
 - Electrotermice – cuptoare electrice, echipamente de sudură sau lipire (transformă energia electrică în căldură);
 - Electrochimice – băi de electroliză;
- Receptoare electronice – TV etc (folosesc energia electrică pentru a procesa, transmite și înmagazina informație).

Categoriile de receptoare și criteriile de clasificare sunt prezentate succint în figura 1.3.

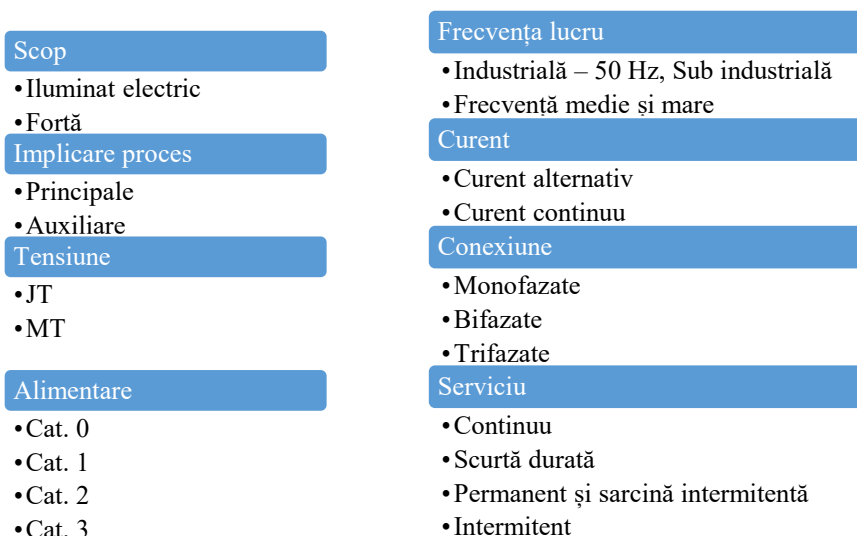


Figura 1.3 Categoriile de receptoare

Din punctul de vedere al participării receptoarelor în procesul de producție, acestea se împart în două categorii:

- Receptoare principale – în această categorie intră majoritatea receptoarelor electrice, iar ele participă nemijlocit la realizarea scopului dorit prin procesul de producție sau asigurarea condițiilor de mediu (iluminat, încălzit, ventilat, transport etc.) necesare pentru buna funcționare a acestora și a activității personalului;
- Receptoare auxiliare – se utilizează pentru realizarea de comenzi și reglări (manuale sau automate), semnalizări etc. Ele joacă un rol important în funcționarea utilajelor cărora le sunt arondate.

Alimentarea receptoarelor electrice într-o întreprindere se face în funcție de caracteristicile electrice ale acestora, modul de funcționare în timp, prezența vârfurilor de curent, încărcare, cerințe privind continuitatea alimentării și amplasarea. Astfel trebuie avute în vedere felul curentului, tensiunea nominală și puterea absorbită a receptorului electric. Pe de altă parte, majoritatea receptoarelor funcționează în curent alternativ la frecvența industrială (50 Hz).

În funcție de puterea absorbită, alimentarea se face în:

- Joasă tensiune, JT – sub 1000 V;
- În medie tensiune, MT – 6...35 kV (motoare electrice asincrone și sincrone, cuptoare electrice cu rezistoare și cu arc, lămpi electrice pentru iluminat).

În ceea ce privește frecvența tensiunii de alimentare, unele receptoare necesită alimentarea la frecvențe mai mici (motoare asincrone rotite lent – mori de ciment) sau mai mari (încălzirea prin inducție) față de frecvența nominală a rețelei (50 Hz).

Din punct de vedere al curentului electric, receptoarele se împart în două mari grupuri - receptoare de c.a și respectiv de c.c.

Receptoarele de c.a. la rândul lor pot fi:

- Monofazate (iluminat, receptoare casnice);
- Bifazate (transformatoare de sudură, cuptoare);
- Trifazate (cupatoare cu arc electric).

Receptoare de c.c. cel mai des întâlnite sunt instalații de acționare pentru băi cu electroliză și utilaje pentru depuneri electrostatice. Pe de altă parte, prezența c.c. este necesară și pentru încărcarea bateriilor de acumulatorilor care se folosesc drept sursă de c.c.

Puterile active, P [W], ale receptoarelor se încadrează într-o gamă largă. Există receptoare care au doar câțiva wați, în această categorie intră lămpile

electrice, ajungând la mii de kilowați [kW] – cuptoare electrice. Unele receptoare sunt și consumatoare de putere reactivă, Q [VAr].

Funcționarea în timp a receptoarelor electrice este caracterizată printr-un anumit regim de funcționare, care reprezintă ansamblul valorilor numerice ale mărimilor electrice și mecanice care reflectă cerințele impuse la un moment dat receptorului. Astfel, se definește *serviciul*, care specifică regimurile, inclusiv a perioadelor de mers în gol și de repaus, a duratei și ordinii de succesiune a lor în timp. Fiecare receptor electric prezintă un serviciu tip, care este serviciul convențional care are unul sau mai multe regimuri constante pe durate de timp.

În raport cu modul de funcționare în timp, determinat de procesele tehnologice există 4 clase de receptoare:

- *Receptoare cu serviciu continuu* – solicită din rețea o putere constantă sau puțin variabilă în jurul puterii nominale pe o durată mare de timp care permite atingerea echilibrului termic al elementelor receptorului;
- *Receptoare cu serviciu de scurtă durată* – serviciu constant pe o anumită durată, în decursul căreia nu se atinge echilibrul termic, urmat de o perioadă de timp în care se ajunge la temperatura mediului ambiant;
- *Receptoare cu serviciu permanent și sarcină intermitentă* – lucrează ciclic timp îndelungat, perioadele de lucru cu sarcină constantă alternând cu perioadele de funcționare în gol;
- *Receptoare cu serviciu intermitent* – funcționează conform unei succesiuni de cicluri identice, fiecare cuprinzând un timp de funcționare la sarcină constantă.

Receptoarele solicită anumite condiții în ceea ce privește continuitatea alimentării cu energie electrică, în funcție de consecințele pe care le are întreruperea alimentării lor asupra utilajelor din care fac parte cât și asupra producției și personalului. În funcție de aceste efecte, receptoarele intră în patru categorii:

- Categoria zero – întreruperea alimentării cu energie electrică poate duce la explozii, incendii, distrugerii grave de utilaje sau pierderea de vieți omenești. În această categorie intră iluminatul de siguranță, instalații de ventilație și evacuare a gazelor nocive sau a amestecurilor explozive, pompe de răcire a furnalelor și cuptoarelor de oțelării, calculatoare de proces.
- Categoria I – întreruperea alimentării duce la dereglarea proceselor tehnologice în flux continuu, necesitând perioade lungi pentru reluarea

activităților la parametrii calitativi și cantitativi existenți în momentul întreruperii. Acestea sunt receptoare precum instalații tehnologice organizate pentru producția de serie mare, în flux continuu, în instalații de cazane, laminoare.

- Categoria II – întreruperea alimentării determină nerealizări de producție, practic numai pe durata întreruperii, care pot fi de regulă recuperate. Majoritatea receptoarelor mașini unelte, cuptoare pentru tratamente termice, instalații de sudură, de acoperiri galvanice etc.
- Categoria III – înglobează restul receptoarelor, la care întreruperea alimentării are consecințe neînsemnate (instalații auxiliare, depozite, ateliere de întreținere, secții de mică producție etc.).

Receptoarele electrice industriale pot fi grupate după specificul instalațiilor din care fac parte, și după modul în care solicită energia de la rețea.

1.4 Consumatori de energie electrică

Consumatorii de energie electrică cuprind totalitatea receptoarelor electrice dintr-un anumit spațiu legate printr-un scop tehnologic funcțional. Astfel ele se împart în:

- Consumatori casnici;
- Consumatori industriali;
- Consumatori terțiari;
- Consumatori comerciali.

Consumatorii casnici sunt în marea majoritate monofazați și alimentați în joasă tensiune 230 V, din rețele de distribuție de 0,4 kV. Puterea medie utilizată este de 1000 W, cu un consum lunar de 100 – 250 kWh. Receptoarele uzuale sunt reprezentate de sursele de lumină, aparate electrocasnice și aparate audio-video, aparate de gătit electrice, TV, PC etc.

Consumatorii casnici trifazați au puteri variabile, și folosesc în special motoare electrice trifazate, sau alte receptoare de forță, trifazate.

Consumatorii industriali sunt de o mare varietate în ceea ce privește nivelul de tensiune și putere, cât și modul de utilizare a energiei. Aceștia sunt alimentați de cele mai multe ori din propria stație de transformare. Ei cuprind receptoare de joasă și medie tensiune. În grupul receptoarelor de joasă tensiune cel mai des intră surse de lumină, aparatură de comandă și semnalizare. Receptoarele de medie tensiune sunt instalații electrotermice, de sudare și motoare.

Consumatorii terțiari sunt cei care asigură serviciile în cadrul societății, și anume: iluminatul public, serviciile medicale, serviciile publice municipale și județene, transportul în comun (tracțiunea electrică). Alimentarea acestor consumatori se face în joasă (iluminatul electric) și medie tensiune (transportul în comun).

Consumatorii comerciali sunt aceia care folosesc energia electrică în activități comerciale și adiacente acestora. Aceștia cuprind receptoare de iluminat, receptoare electrice pentru prepararea și conservarea produselor alimentare etc.

Conform ANRE (Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei), consumatorii de energie electrică se împart în: consumatori casnici, consumatori asimilați, consumatori economici și consumatori preluați în regim de ultimă instanță. Consumatorii casnici au fost definiți anterior, astfel nu se va insista decât asupra celorlalte trei tipuri de consumatori.

Consumatorii asimilați includ receptoare care consumă energie electrică în edificiile de tipul clădirilor de birouri, unități de alimentație, pensiuni, hoteluri, locații comerciale, etc., dar nu au activități economice principale, ci doar consum casnic asimilat.

Consumatorii economici utilizează energie electrică pentru activități comerciale, industriale, de servicii, etc., adică pentru a desfășura activități economice. Deci în această categorie intră consumatorii comerciali și industriali.

Ultima categorie de consumatori se referă la aceia care au un contract de furnizare de energie electrică preluat de către un furnizor de ultimă instanță, în situația în care furnizorul ales inițial nu mai poate furniza serviciul.

O sinteză a tipurilor de consumatori este evidențiată în figura 1.4.

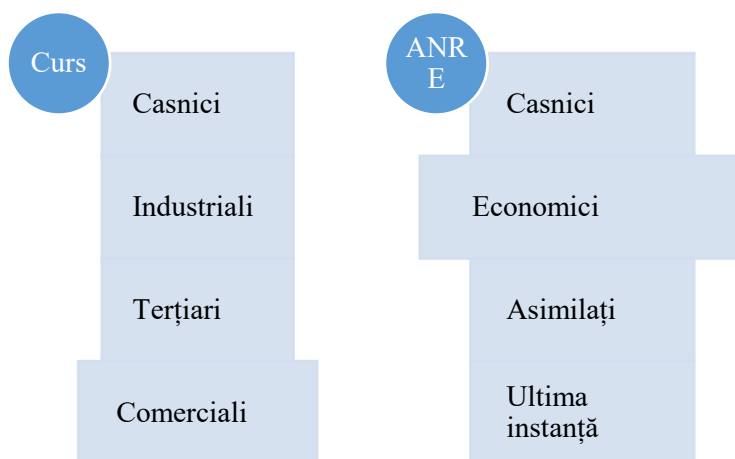


Figura 1.4 Tipuri de consumatori de energie electrică

Baza matematică care se poate folosi pentru a determina caracteristicile consumatorilor și receptoarelor este prezentată în următoarele rânduri.

$$P_{inst} = \sum_{i=1}^n P_i [W], i = \overline{1, n}, \text{ puterea activă instalată} \quad (1.1)$$

$$Q_{inst} = \sum_{i=1}^n Q_i [VAr], i = \overline{1, n}, \text{ puterea reactivă instalată} \quad (1.2)$$

$$S_{inst} = \sqrt{P_{inst}^2 + Q_{inst}^2} [VA],$$

$$S_{inst} = P_{inst} + jQ_{inst} [VA], \quad (1.3)$$

$$S = U \cdot I [VA], \text{ puterea aparentă}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = R \cdot I^2 [W], \text{ puterea activă} \quad (1.4)$$

$$Q = X \cdot I^2 [VAr], \text{ puterea reactivă} \quad (1.5)$$

$$U = Z \cdot I [V], \text{ tensiunea}, \quad (1.6)$$

$$Z = R + jX, Z = \sqrt{R^2 + X^2} [\Omega], \text{ impedanța} \quad (1.7)$$

$$R = \rho \frac{l}{S} [\Omega], \text{ rezistența}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} [\Omega], \text{ reactanța capacitivă} \quad (1.8)$$

$$X_L = 2\pi fL [\Omega], \text{ reactanța inductivă}$$

$$R_S = \sum_{i=1}^n R_i [\Omega], i = 1, n - \text{ număr de rezistențe în serie} \quad (1.9)$$

$$\frac{1}{R_P} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} [\Omega], i = 1, n - \text{ număr de rezistențe în paralel} \quad (1.10)$$

1.5 Bibliografie

- [1]. Silviu Darie, Ioan Vădan, *Producerea, transportul și distribuția energiei electrice*, Vol. 1 – Instalații pentru producerea energiei electrice, U.T. Pres, Cluj-Napoca, 2000.
- [2]. Ioan Șora, Vlad Văzdăuțeanu, Vasile Coita, Dorin Popovici, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Facla, Timișoara 1983.
- [3]. ANRE – legislația privind consumatorii de energie electrică.

1.6 Autoevaluare

- 1) Folosind energia electrică se poate obține:
 Energie termică / Energie chimică / Energie luminoasă
- 2) Vector energetic este
 Energia electrică / Cărbunele / Hidrogenul
- 3) Descentralizarea producerii energiei electrice permite amplasarea unității de producere și transformare lângă consumatori
 Adevărat / Fals
- 4) În funcție de alimentarea receptoarelor acestea de împart în:
 Categoria I, II, III și IV / Categoria A și B / Categoria 1, 2 și 3
- 5) Receptoarele electrice cu serviciu continuu se caracterizează prin funcționarea neîntreruptă timp de ani de zile
 Adevărat / Fals
- 6) Receptoarele electrice cu serviciu intermitent prezintă
 Funcționare după succesiuni de cicluri identice / Consum variabil / Consum constant
- 7) Consumatorul de energie electrică conține aparate și echipamente electrice care îndeplinesc mai multe scopuri tehnologice.
 Adevărat / Fals
- 8) Consumatorii casnici au următoarele caracteristici:
 $P < 3000 \text{ W}$ / $P > 3 \text{ kW}$ / Sunt mulți
- 9) Consumatorii industriali pot să fie alimentați prin propria stație de transformare în IT.
 Adevărat / Fals
- 10) Consumatorii terțiari cuprind următoarele tipuri de receptoare:
 Iluminat electric / Instalații electrotermice metalurgice /
 Motoare electrice

2

Iluminatul electric

2.1 Introducere

Iluminatul este dirijarea luminii spre obiecte sau în jurul acestora, cu scopul de a putea fi văzute. Pe de altă parte, iluminatul electric se caracterizează prin utilizarea receptoarelor electrice, denumite lămpi electrice, pentru a obține și dirija lumina. Astfel, iluminatul electric se referă la transformarea energiei electrice în radiații electromagnetice din spectrul vizibil (lumina) și utilizarea ei cu scopul iluminării.

Istoria iluminatului artificial a început în momentul în care omul a cucerit focul în urmă cu aproximativ 230.000 ani (unele surse de specialitate sugerează că acest eveniment a avut loc acum 1,4 milioane de ani). Ulterior, în societatea umană s-au inventat diferite tipuri de lămpi, care foloseau combustibili precum uleiul pentru a produce lumină.

La începutul secolului al 19-lea a fost inventată prima lampă electrică, care a folosit arcul electric dintre doi electrozi pentru a obține lumina. A urmat lampa cu incandescență, care a avut mai multe variante constructive. De remarcat este lampa cu incandescență a lui Heinrich Goebel, care în 1854 a ajuns la o durată de funcționare record pentru acea perioadă, și anume 220 ore.

Punctul de răspântie în iluminatul artificial a avut loc în 1879, când Thomas Alva Edison a perfecționat lampa cu incandescență aducând-o la o variantă care era foarte asemănătoare cu varianta actuală (figura 2.1). Singura componentă a lămpii care a evoluat este filamentul.

După lămpile cu incandescență au urmat lămpile cu descărcări electrice, și apoi lămpile cu LED-uri, care domină piața actuală a surselor de lumină artificială, datorită versatilității lor.



Figura 2.1 Experimentarea asupra lămpi cu incandescență

În ceea ce privește utilizarea iluminatului electric, istoria acestuia a început cu iluminarea publică și casnică, ajungând apoi să se focalizeze pe iluminatul arhitectural și creșterea eficienței în tehnica iluminatului.

În prezent, iluminatul electric a devenit unul dintre cele mai importante consumatoare de energie electrică, astfel că din producția mondială de energie electrică, 19 % este utilizată în iluminat, iar în Europa 14 %.

Lumina sau radiația luminoasă este o undă electromagnetică capabilă să producă prin intermediul organului vizual (ochiul) o senzație vizuală. Radiațiile luminoase, formează spectrul luminii vizibile (în literatura de specialitate se face referire la lumina ultravioletă sau infraroșie, care nu sunt vizibile pentru ochiul uman) care este caracterizat de lungimi de undă care ocupă domeniul 360...780 nm (nano-metru unitate de măsură, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 1/10^9 \text{ m}$).

Radiațiile luminoase (din motive de simplitate s-a eliminat termenul de vizibil, dar în continuare acest termen se referă doar la radiațiile luminoase vizibile), din punct de vedere a lungimii de undă și a culorii, pot să fie monocromatice sau policromatice.

Astfel, o radiație monocromatică are o singură lungime de undă și o singură culoare, iar radiațiile policromatice sunt radiații complexe obținute prin suprapunerea mai multor radiații monocromatice. Considerând că lumina naturală este o radiație complexă, aceasta se formează prin combinarea tuturor

radiațiilor din spectrul vizibil, care se împarte în 6 zone: violet, albastru, verde, galben, portocaliu și roșu (figura 2.2). Limitele care separă zonele nu pot fi precis definite ci diferă de la un individ (observator) la altul. Având în vedere că percepția luminii este un fapt subiectiv, Comisia Internațională de Iluminat a decis introducerea unui arbitru prin intermediul căruia să se realizeze și analizeze aspectele care țin de percepția luminii. Acest arbitru este Observatorul fotometric de referință, față de care s-au trasat curbele eficacității luminoase relative spectrale pentru regimul de vedere diurn și nocturn (figura 2.3).

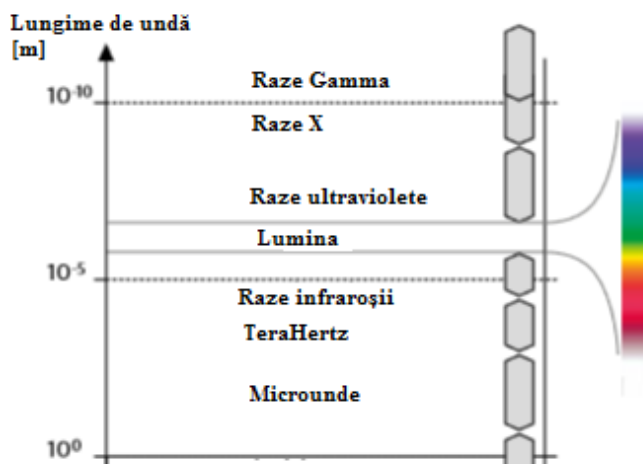


Figura 2.2 Încadrarea spectrului luminii față de restul radiațiilor electromagnetice

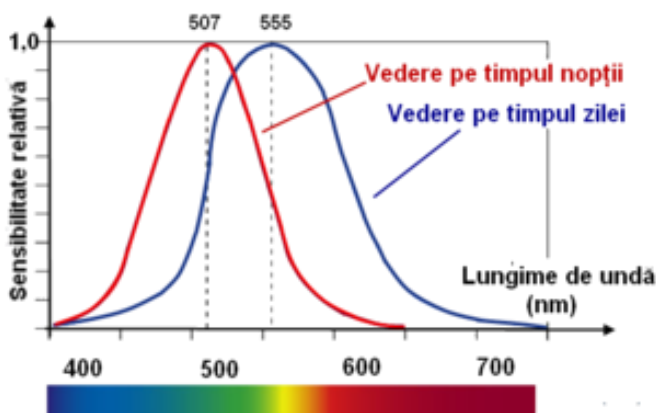


Figura 2.3 Curba eficacității luminoase relative spectrale

Prin analiza graficelor din figura 2.3, se poate observa că sensibilitatea relativă maximă a ochiului uman în timpul zilei este pentru radiația luminoasă de 555

nm, care corespunde culorii verde deschis, iar în timpul nopții pentru verde-turcoaz, 507 nm.

2.2 Generarea luminii

Generarea luminii artificiale prin utilizarea energiei electrice se poate realiza prin trei metode, și anume:

- Prin incandescență – are la bază fenomenul de radiație termică, adică excitarea termică a atomilor;
- Prin electroluminiscentă – folosește excitarea atomilor prin descărcări în gaze;
- Pe cale electronică (diode semiconductoare) – un montaj din elemente semiconductoare cu proprietăți strict programate, care determină spectrul de radiații monocromatice sau policromatice, și formează fluxul luminos.

Generarea luminii prin *incandescență* a pornit de la observația că orice corp încălzit la o anumită temperatură cedează mediului înconjurător o anumită cantitate de energie, căldură – radiații infraroșii. Iar, dacă temperatura de încălzire este mai mare de 525 °C (1 grad Celsius = 274,15 Kelvin), cedarea se face sub formă de radiații electromagnetice infraroșii și luminoase. La baza fenomenului de incandescență stau legile radiației termice, care sunt prezentate în amănunt în anexa A1.

Prin utilizarea incandescenței pentru obținerea luminii artificiale se încearcă simularea fenomenelor care au loc pe suprafața Soarelui (fluxul de lumină naturală este produs de Soare, a cărui temperatură la suprafață este între 6000 – 10000 K). Studiile teoretice au arătat că, pentru a se obține o radiație luminoasă artificială importantă, temperatura corpului incandescent trebuie să fie între 6000-8000 K. Însă în practică, în cazul lămpilor cu incandescență, temperatura filamentului care se folosește pentru a produce lumină nu depășește 3000 K.

Obținerea luminii artificiale folosind fenomenul de *electroluminiscentă*, se bazează pe faptul că descărcările electrice în gaze sau vapori metalici produc radiații luminoase; fenomen intim legat de structurile atomice ale mediului de descărcare. Acest fapt a fost observat și studiat pentru prima dată în 1912 de către N. Bohr. Radiațiile luminoase apar datorită energiei eliberate la trecerea electronilor substanței excitate prin diferite stări, și se explică astfel:

1. Prin ciocnirea cu particule rapide sau cu radiații electromagnetice cu lungimi de undă mică (descărcarea electrică), electronii substanței excitate trec de pe orbitele stabile din jurul nucleului pe orbite de excitație. Numărul

- orbitelor de excitație este limitat, iar cantitatea de energie necesară pentru această mutare este strict determinată de tipul substanței;
2. Electronul nu poate să își mențină poziția pe orbita de excitație, ci tinde să se întoarcă în poziția de echilibru, mai aproape de nucleu;
 3. La revenirea electronului pe orbita sa stabilă, excesul de energie va fi eliberat sub forma unei cuante (flash) de radiație electromagnetică. Acest fenomen este ilustrat în figura 2.4.

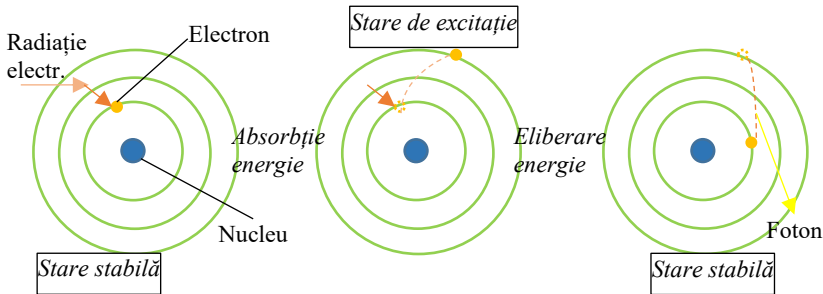


Figura 2.4 Fenomenul de electroluminiscentă

Conținutul de energie al unei asemenea cuante poate fi exprimat prin relația matematică definită de teoria lui Planck (anexa A2):

$$E_h - E_l = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

unde E_h este energia electronului în poziția de excitație,

E_l – energia electronului în starea stabilă,

h – constanta lui Planck,

ν – lungimea de undă a radiației.

În ceea ce privește substanțele folosite pentru obținerea luminii prin electroluminiscentă, studiile au demonstrat că numai elementele chimice aflate sub formă de gaze rarefiate sau vapori metalici produc linii spectrale clare. Aceste elemente chimice sub formă de gaze sunt: Ar, Ne, Xe și Kr. Substanțele folosite în stare de vapori metalice sunt: Hg, Na, Li, K, Ca, Sr, Ba, Tl, In, Dy, Zn și Tm. De asemenea, corpurile solide și gazele aflate la presiune foarte mare emit într-un spectru continuu. Spectrele obținute de la gaze compuse din molecule (CO_2) sau din elemente gazoase comprimate au forma unor benzi spectrale mai largi, care sunt formate din linii spectrale foarte apropiate.

Un fenomen care este des utilizat în iluminat, în special în cadrul lămpilor care folosesc electroluminiscentă este **fluorescența**. Acest fenomen apare la o serie de material solide, care dacă sunt iradiate cu particule rapide sau cu radiații

electromagnetice, vor emite radiații electromagnetice pe lungimi de undă specifice.

Fluorescența se explică în teoria cuantică astfel: o cantă incidentă de energie ridicată va elibera o cantă de energie mică, restul fiind pierdută sub formă de căldură. În plus, radiația incidentă trebuie să aibă tot timpul o lungime de undă mai mică decât cea corespunzătoare materialului fluorescent. În practică, se folosesc amestecuri de materiale fluorescente pentru ca răspunsul spectral să fie cât mai asemănător cu lumina alba.

Fosforescența este fenomenul prin care o substanță aflată la întuneric eliberează energie luminoasă (fotoni) pe care a acumulat-o în timp ce a fost ținută la lumină. Cele mai folosite materiale fosforescente sunt sulfatul de zinc ($ZnSO_4$) și aluminatul de stronțiu ($SrAl_2O_4$).

Generarea luminii pe cale “**electronică**” se bazează pe electroluminiscentă și proprietățile speciale ale materialelor semiconductoare care formează o joncțiune p-n. Materialele semiconductoare sunt elemente chimice care se caracterizează prin:

- Sunt izolatori la o temperatură de 0 K și au diferite grade de conductivitate care crește odată cu temperatura (comportament opus față de cel al metalelor);
- Atomii lor au un număr de 4 electroni de valență;
- Când le sunt adăugate impurități (dopare), care vor crește numărul de goluri (semiconductor de tip p) sau electroni (semiconductor de tip n), conductivitatea se schimbă brusc.

Cele mai utilizate semiconductoare sunt germaniul (Ge) și siliciu (Si) deoarece acestea necesită energie mai puțină pentru a rupe legăturile lor covalente în cristal.

În figura 2.5 este ilustrat fenomenul producerii luminii din interiorul unei joncțiuni p-n. Se poate observa (figura 2.5 a)) materialul p care are un surplus de goluri (dopat cu impurități acceptoare) și materialul n cu un surplus de electroni (dopat cu impurități acceptoare). La trecerea curentului electric prin joncțiune (dinspre n înspre p) sarcinile electrice libere vor determina o migrație a electronilor părții n spre golurile părții p. Electronii și golurile se vor întâlni în zona de contact dintre cele două semiconductoare. Această interacțiune va duce la o combinare electroni-goluri, fenomen care va cauza eliberarea unei cantități de energie sub formă de fotoni, lumină (figura 2.5 b)).

Culoarea radiației luminoase eliberate depinde de tipul semiconductorului. Astfel, radiație infraroșie este produsă de semiconductor galiu-arseniu (GaAs),

radiație monocromatică galbenă sau roșie de semiconductor galiu-arseniu-fosfor (GaAsP), iar radiație roșie sau verde de semiconductor galiu-fosfor (GaP).

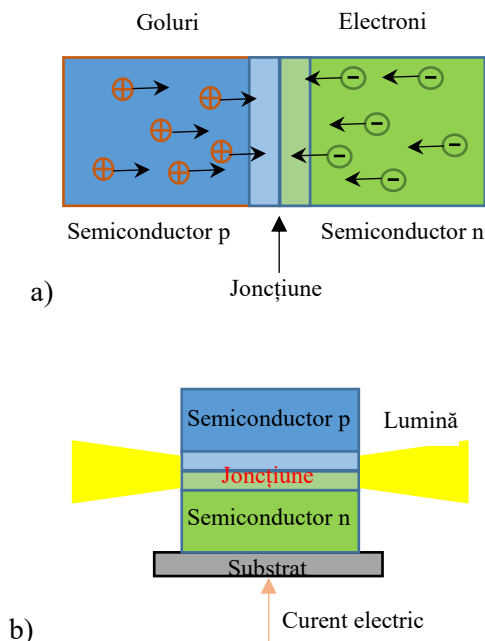


Figura 2.5 Fenomenul de electroluminiscentă în joncțiunea p-n

2.3 Mărimi și unități fotometrice

Lumina este caracterizată prin mărimi energetice evaluate în unități de măsură energetice și prin mărimi fotometrice evaluate în unități de măsură fotometrice.

Mărimile energetice sunt mărimi fizice utilizate pentru caracterizarea și cuantificarea luminii din punctul de vedere al energiei generate, transportate și utilizate.

Mărimile fotometrice sunt mărimi fizico-fiziologice, mărimile caracteristice luminii și fenomenelor luminoase evaluate pe baza senzațiilor luminoase produse. Aceste mărimi au un caracter obiectiv având în vedere că s-au adoptat caracteristicile medii a sensibilității ochiului omenesc în funcție de Observatorul fotometric de referință.

Mărimile fotometrice se referă fie la sursa de lumină, fie la suprafața iluminată. Mărimile prin care se caracterizează sursa de lumină sunt fluxul energetic, fluxul luminos, intensitatea luminoasă, exitanța luminoasă, luminanța

și eficacitatea luminoasă. Mărimile care se referă la suprafața iluminată sunt: iluminarea, exitanța și luminanța.

Fluxul energetic reprezintă energia transportată sau primită sub formă de radiație în unitatea de timp.

Fluxul luminos este partea fluxului energetic percepută de ochi ca senzație vizuală. Deoarece sensibilitatea ochiului nu este aceeași pentru radiații cu diferite lungimi de undă, legătura dintre fluxul luminos și fluxul energetic, radiate pe o anumită lungime de undă, este dată de eficacitatea luminoasă spectrală relativă:

$$v_{\lambda} = \frac{\Phi}{\Phi_e} \quad (2.2)$$

unde Φ este fluxul luminos, [Wl] – wattul luminos;

Φ_e – fluxul energetic.

În tehnica iluminatului se utilizează o altă unitate de măsură – lumen (lm). Lumenul se definește ca fiind fluxul luminos emis într-un unghi solid de un steradian de către o sursă punctiformă și uniformă cu intensitatea luminoasă de o candelă după axa unghiului solid. Legătura dintre lm și Wl este: 1 Wl = 628 lm.

Intensitatea luminosă, I , este o mărime direcțională care caracterizează distribuția fluxului luminos în spațiu, reprezentând fluxul luminos emis în unitatea de unghi solid în jurul unei direcții date. Unitatea de măsură în sistemul internațional (SI) este candela (cd). O candelă reprezintă intensitatea luminoasă în direcția normalei a unei suprafețe cu aria de $1/600000 \text{ m}^2$ a unui corp negru la temperatura de solidificare a platinei (2046,5 K) la presiunea de 101225 N/m^2 .

$$I_{\alpha} = \frac{d\Phi}{d\Omega}, [cd] \quad (2.3)$$

$$I_{med} = \frac{\Phi}{\Omega}, [cd] \quad (2.4)$$

unde I_{α} reprezintă intensitatea luminoasă pe direcția α ;

I_{med} – intensitatea luminoasă medie;

Φ - fluxul luminos, [lm];

Ω – unghiul solid [rad].

Se poate observa din relația (2.4), că intensitatea luminoasă a unei surse variază cu direcția în spațiu. Astfel, în funcție de valoarea intensității luminoase, o sursă de lumină este uniformă dacă $I_{\alpha} = I_{med}$, și neuniformă în sens contrar.

Exitanța (emitanța) luminoasă, M , este densitatea superficială a fluxului luminos emis de o sursă.

$$M = \frac{d\Phi}{dA_s}, [\text{lm}/\text{m}^2] \quad (2.5)$$

În (2.5), A_s este aria suprafeței pe care cade fluxul luminos Φ .

Luminanța (strălucirea luminoasă), L , este o mărime fotometrică care se referă atât la surse de lumină cât și la suprafețe iluminate. Această mărime reprezintă densitatea de intensitate luminoasă, adică raportul dintre intensitatea luminoasă în direcția considerată, datorată elementului de suprafață dA și aria proiecției ortogonale a elementului de suprafață dA din jurul aceluși punct pe un plan perpendicular pe acesta.

$$L = \frac{dI_\alpha}{dA \cdot \cos\theta}, [\text{cd}/\text{m}^2] \quad (2.6)$$

În practica iluminatului prezintă interes sursele de lumină a căror luminanță este constantă pe toate direcțiile. Acest fapt se exprimă cu ajutorul legii lui Lambert:

$$I_\alpha = I_N \cdot \cos\alpha. \quad (2.7)$$

Suprafețele surselor cu $L = \text{const.}$ sunt denumite suprafețe perfect difuzante.

Eficacitatea luminoasă, η , a unei surse electrice este raportul dintre fluxul luminos emis și puterea electrică consumată, precum se observă din relația (2.8).

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, [\text{lm}/\text{W}]. \quad (2.8)$$

Iluminarea, E , reprezintă densitatea de flux luminos primit de o suprafață; are ca unitatea de măsură $[\text{lm}/\text{m}^2] = [\text{lx}]$ – lux, și se caracterizează prin relația:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}, [\text{lx}] \quad (2.9)$$

În practică, deseori se utilizează iluminarea medie:

$$E_{med} = \frac{\Phi}{A}, [\text{lx}] \quad (2.10)$$

$$E = \frac{I_\alpha \cos\theta}{r^2}, [\text{lx}] \quad (2.11)$$

Iluminarea se comportă pe baza unor legi fotometrice - legea pătratelor distanțelor și legea cosinusurilor.

Legea pătratelor distanțelor specifică faptul că iluminarea unei suprafețe este invers proporțională cu pătratul distanței. Pe de altă parte, legea cosinusului arată că iluminarea variază proporțional cu cosinusul unghiului de incidență.

Emitanța luminoasă și *luminanța* unei suprafețe (considerată sursă secundară de lumină prin reflexie) se definesc ca la sursa de lumină primară (prezentate la paragrafele anterioare și descrise matematic prin (2.5) și (2.6)).

Sursele artificiale de lumină se pot clasifica în funcție de temperatura de culoare (valoarea radiației unui corp absolut negru fierbinte, care este asemenea cu aceea a culorii sursei de lumină) și de capacitatea de redare a culorilor de către lumina emisă. Astfel, acestea pot produce o lumină care este percepută ca fiind:

- Albă – cald – până la 3500 K, culoare roșiatică;
- Albă – neutral – 3500-5300 K, culoare albă pură;
- Albă – rece – mai mare de 5300 K, culoare albastruie.

Redarea culorilor este capacitatea unei surse de lumină de a reda culorile obiectelor care le luminează, comparativ cu o sursă de lumină de referință, care este lumina solară. Pentru cuantificare acestei proprietăți a unei surse de lumină, se folosește indicele de redare a culorilor CRI (color rendering index), $R_a = 0 \dots 100$. Redarea culorilor cea mai bună este $R_a = 100$. În luminotehnică, se consideră că o sursă de lumină cu $R_a > 90$ redarea culorilor foarte bună, pe când $R_a > 80$ redarea culorilor bună. O sursă de lumină va fi testată în redarea celor 8 culori de bază, pentru a determina R_a .

Suprafețele pe care cade lumina se comportă diferit, în funcție de structura lor moleculară. Într-adevăr, dacă pe o suprafață a unui corp cade un flux luminos Φ , o parte Φ_α este absorbită de corp, o parte Φ_ρ se reflectă și o parte Φ_δ trece prin corp. Se poate observa legea de conservare a energiei:

$$\Phi = \Phi_\alpha + \Phi_\rho + \Phi_\delta \quad (2.12)$$

Proprietățile fotometrice ale materialelor sunt exprimate prin valorile următorilor factori pozitivi și subunitari:

- Factorul de absorbție $\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}$,
- Factorul de reflexie $\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi}$,
- Factorul de transmisie $\delta = \frac{\Phi_\delta}{\Phi}$.

Din relația (2.12) și definițiile factorilor de absorbție, reflexie și transmisie, se poate deduce:

$$\alpha + \rho + \delta = 1; \quad (2.13)$$

de asemenea, dacă unul dintre coeficienți are valoarea 1, atunci ceilalți sunt nuli. În aceste cazuri particulare, se disting materiale perfect absorbante ($\alpha = 1$),

perfect reflectante ($\rho = 1$), respectiv perfect transparente ($\delta = 1$). Trebuie subliniat faptul că, materialele utilizate în practică se caracterizează prin valori intermediare ale cazurilor limită.

2.4 Bibliografie

- [1]. Nicolae Mogoreanu, *Iluminatul electric*, Curs universitar, Editura Lumina, Chișinău, 2012.
- [2]. Paul Dinculescu, *Surse de lumină, Fenomene de bază și principii de realizare*, Editura Printech, București, 2000.

2.5 Autoevaluare

- 1) Incandescența este metoda de generare a luminii prin:
 - Creșterea temperaturii corpurilor/ Creșterea tensiunii de alimentare a surselor de lumină / Atingerea unei temperaturi de prag a unui corp considerat sursa de lumină
- 2) Mărimile fotometrice se împart în funcție de sursa de lumină și suprafața iluminată.
 - Adevărat / Fals.
- 3) Electroluminiscența este metoda de generare a luminii folosind:
 - Curentul electric / Tensiunea electrică / Descărcări electrice
- 4) În joncțiunea p-n energia luminoasă se obține prin:
 - Combinarea goluri-electroni / Trecerea curentului electric de la p la n / Electroluminiscență
- 5) Fluorescența este folosită în special pentru obținerea luminii la lămpile cu descărcări.
 - Adevărat / Fals.
- 6) Fosforescența este:
 - Proprietatea unor corpuri de a lumina / Capacitatea unor substanțe de a se încălzi cu energie luminoasă

- 7) Temperatura de culoare a luminii albe neuter este 5000 k.
 Adevărat / Fals.
- 8) O sursă electrică de lumină care are $R_a = 91$, are indicele de redare a culorii
 Bun / Foarte bun / Slab
- 9) Iluminarea este o mărime fotometrică care:
 Se măsoară prin lux / Arată densitatea de flux luminos /
 Unitatea de măsură lm/m^2 /
- 10) Un corp cu factorul de reflexie egal cu 0,9 este bun pentru a fi folosit ca reflector
 Adevărat / Fals.

3

Surse electrice de lumină

3.1 Introducere

Lampa electrică (sursa electrică de lumină) este un receptor electric care transformă energia electrică în lumină, energie luminoasă.

Precum s-a prezentat în capitolul precedent, istoria lămpii electrice a început cu lampa cu arc electric, la începutul secolului al 19-lea, a urmat apoi lampa cu incandescență, lampa cu descărcări și ultima generație de lămpi sunt cele cu LED, respectiv OLED. În tot acest timp, s-a urmărit construirea de surse de lumină eficace (care să producă lumină) și eficiente (să aibă puține pierderi de energie electrică).

De-a lungul istoriei, lămpile au evoluat, unele fiind abandonate în favoarea altora mai performante. Acest fapt s-a accentuat după anul 2000, când pe fondul politicii mondiale de reducere a consumului de combustibili fosili, scăderea producerii de CO₂, scăderea impactului asupra mediului și dezvoltare durabilă, în Uniunea Europeană s-au luat următoarele măsuri în ceea ce privește sursele electrice de lumină:

- Începând cu 2009 în U.E. s-a interzis producerea și importul lămpilor cu incandescență de 100 W;
- Începând cu 1 sept. 2010 lămpile cu incandescență de 75 W au fost interzise (nu sunt eficiente energetic);
- Începând cu 1 sept. 2012 sunt interzise toate lămpile cu incandescență;
- Începând cu 1 sept. 2013 noi condiții de eficiență au fost impuse lămpile CFL și cu LED;
- Începând cu 1 sept. 2016 s-au impus noi condiții pentru lămpile halogene;
- Din 2017 lămpile ineficiente energetic (randament < 70 %) sunt interzise.
- În 2020 se preconizează că se vor pune restricții, ca doar sursele de lumină cu eficiența energetică de minim 85 lm per W să fie acceptate.

Pe de altă parte, studiile privind mulțumirea micilor consumatori cu privire la lămpile electrice a arătat că mulți dintre aceștia încă prefer lămpile cu incandescență datorită luminii calde produse.

În ceea ce privește lămpile cu descărcări care folosesc mercur, tot mai multe studii demonstrează toxicitatea lămpilor fluorescente și CFL-urilor (mai denumite și lămpi economice).

Un alt aspect este durabilitatea lămpilor la diferite regimuri de funcționare, respective mediile în care operează. Rezultatele unor teste făcute asupra lămpilor cu incandescență și CFL-uri, au arătat eficiența celor cu incandescență în defavoarea celorlalte.

În ian. 2017 în Nature Nanotechnology – articol privind o nouă lampă cu incandescență care rivalizează cu lămpile cu LED. Din păcate, încă această lampă nu a ajuns să fie produsă la nivel comercial.

Lămpile electrice se caracterizează prin intermediul mai următoarelor mărimi energetice și luminotehnice:

- Puterea activă absorbită, P [W];
- Tensiunea de alimentare, U [V];
- Fluxul luminos emis, Φ_v [lm];
- Intensitate luminoasă, I_v [cd];
- Eficacitate luminoasă, η_v ;
- Clasa energetică, E/T , [kWh/h], A⁺⁺, A⁺, A, B, C, D, E;
- Temperatura de culoare, T [K];
- Luminanța, L_v [cd/m²];
- Durata de funcționare, D [ore];
- Numărul de cicluri On/Off;
- Indicele de redare a culorilor, R_a .

Lămpile electrice clasifică în mai multe categorii, în funcție de diferite criterii. Însă, criteriul principal este metoda de obținere a luminii, în funcție de care lămpile electrice se împart în:

- Lămpi cu incandescență:
 - Convenționale;
 - Halogene;
- Lămpi cu descărcări electrice:
 - Lămpi la joasă presiune;
 - Lămpi la înaltă presiune;
- Lămpi cu LED-uri și OLED-uri.

În funcție de scopul lor, lămpile electrice sunt pentru iluminatul interior, exterior, arhitectural sau special (automobile, iluminat de urgență etc.)

În funcție de forma lămpii, acestea sunt sub formă de balon (denumite și bec), tub, plate etc.

În continuare se vor prezenta caracteristicile constructive, energetice și luminoase ale lămpilor cu incandescență, lămpilor cu descărcări și lămpilor cu LED-uri / OLED-uri.

3.2 Lămpi cu incandescență

Lămpile cu incandescență produc lumină pe baza fenomenului de incandescență. Astfel, acestea emit energie luminoasă prin încălzirea unui filament metalic la o temperatură cuprinsă între 2000 și 3000 K. Performanțele lămpii sunt strâns legate de filamentul folosit, iar caracteristicile energetice, fotometrice și coloristice sunt determinate de temperatura filamentului incandescent. Din această cauză, filamentul este construit din Wolfram (Tungsten, $T_t = 3653$ K) și va funcționa în vid sau în atmosferă de gaz inert. Lămpile cu incandescență emit un spectru continuu de radiații, care se extinde asupra lungimilor de undă vizibile și infraroșii.

Construcția unei lămpi convenționale cu incandescență este ilustrată în figura 3.1. Se poate observa filamentul din Wolfram, prin care trece curentul electric, el fiind susținut de doi electrozi, care sunt izolați și fixați prin intermediul unei monturi de sticlă. Lampa este alimentată prin contactul principal și secundar, care sunt montate în soclu filetat. Filamentul se află într-un balon de sticlă.

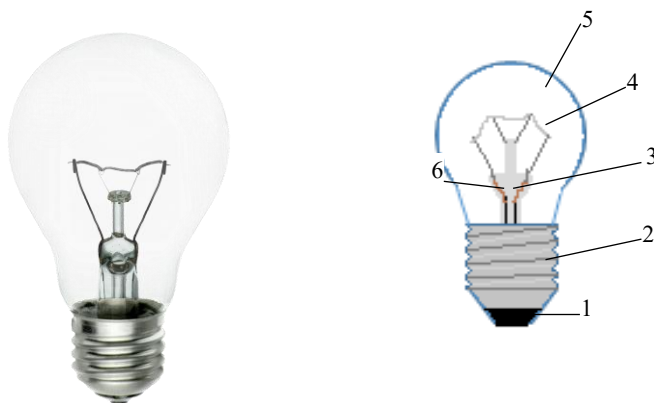


Figura 3.1 Construcția lămpii cu incandescență convenționale

1 – contact central, 2-soclu filetat, 3-montură de sticlă, 4 – filament spiralat din Wolfram, 5-balon de sticlă, 6-eletozi tantal

Eficiența luminoasă a lămpii convenționale variază între 18...22 lm/W, durata de funcționare de 1000 h (după durata de exploatare eficientă – timpul la care fluxul luminos al lămpi ajunge la 80% din valoarea inițială).

Cercetările făcute pentru creșterea eficienței energetice a lămpii au scos în evidență următoarea concluzie teoretică: conform legiilor radiației termice (Kirchhoff, Stefan-Boltzmann, Planck și Wien) mărirea temperaturii filamentului conduce la creșterea eficienței luminoase, dar este limitată la 98 lm/W pentru o temperatură de 6500 K (o temperatură mai mare duce la scăderea eficienței luminoase). De altfel, eficacitatea luminoasă a lămpii este proporțională cu puterea 5,6 a temperaturii absolute a filamentului, iar o temperatură mai mare va duce ca spectrul produs să se schimbe din galben în alb. Însă în practică, se observă că mărirea temperaturii cauzează volatizarea accentuată a filamentului, scăderea duratei de funcționare utilă a lămpii, balonul se înnegrește și fluxul luminos scade. Pentru reducerea efectelor negative datorate creșterii temperaturii, balonul este umplut cu un amestec de 85% argon, krypton și 15% azot, la o presiune de 0,8 atm ($1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar} = 101325 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$).

Pentru a crește durata de funcționare a lămpii, în balon s-au introdus halogenuri (iod, brom) cu scopul de a diminua volatizarea filamentului. Varianta îmbunătățită a lămpii denumită și lampa cu incandescență halogenă (lampa halogenă) are un ciclu regenerativ de iod (brom), care se explică astfel: atomi de Wolfram care se desprind de filament din cauza temperaturii ridicate, se vor prinde de cei de iod, iar la scăderea temperaturii, se vor rupe legăturile chimice, revenind în rețeaua cristalină a filamentului. Datorită acestui fenomen, durata de viață a unei lămpi halogene este dublă față de lampa convențională. Construcția unei lămpi halogene este prezentată în figura 3.2.

Din figura 3.2 se văd diferențele constructive ale unei lămpi halogene față de cea convențională: apariția unui balon secundar din cuarț, în care va arde filamentul într-o atmosferă controlată, îmbogățită cu halogenuri. Acest balon este susținut printr-o centură metalică, care este prinsă de montura de sticlă. De asemenea, se poate observa că dimensiunea filamentului este mult redusă, astfel că se face o economie de material. Trebuie subliniat faptul că lampa halogenă nu pierde din avantajele lămpii convenționale, din contră.

Punctele forte ale lămpilor cu incandescență sunt:

- Componentă spectrală practic completă – redarea corectă a culorilor;
- Schema de alimentare simplă;
- Costuri de investiție reduse;
- Produc o lumină concentrată, care se poate focaliza ușor.

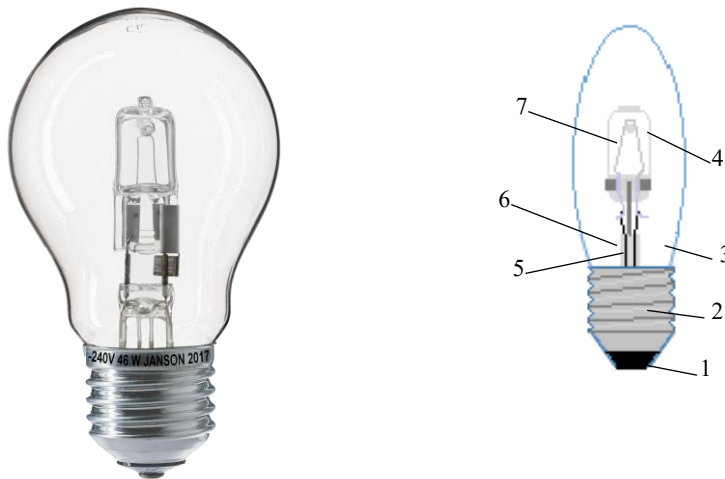


Figura 3.2 Construcția lămpii cu incandescență halogenă

1 – contact central, 2- soclu filetat, 3- balon principal (de protecție), 4 – balon cu halogenuri, 5-electrozi tantal, 6-montură de sticlă, 7-filament din Wolfram

Pe lângă aceste avantaje, lămpile halogene au în plus:

- Flux luminos constant;
- Durată de viață dublă (2000 h);
- Eficiență luminoasă ridicată (22...26 lm/W);
- Redarea culorilor mai bună.

Principalele puncte slabe ale lămpilor cu incandescență sunt: eficiență luminoasă scăzută și durata de funcționare mică.

3.3 Lămpi cu descărcări electrice

Lămpile cu descărcări electrice produc lumină pe baza fenomenului de electroluminiscență în felul următor: la trecerea curentului electric printr-un mediu gazos care conține vapori metalici, sub influența câmpului electric creat între doi electrozi (între care apare descărcările electrice) aflați la o diferență de potențial va apărea o emisie de radiații electromagnetice în spectrul vizibil și ultraviolet.

Lămpile cu descărcări folosesc cel mai adesea mercur (Hg) și sodiu (Na), a căror molecule ajung la starea de vapori metalici saturați atunci când sunt sub efectul descărcărilor electrice. În practică sunt folosite mai multe tipuri de lămpi cu descărcări electrice. Acestea se împart în mai multe categorii:

- În funcție de presiunea din tubul de descărcare:

- Lămpi cu descărcare electrică la joasă presiune (JP) – tubul fluorescent, lampa fluorescent compactă;
- Lămpi cu descărcare electrică la înaltă presiune (IP);
- În funcție de vaporii metalici utilizați:
 - Lămpi cu vapori de Hg;
 - Lămpi cu vapori de Na;
 - Lămpi cu halogenuri metalice.

Lămpile folosesc diferite tipuri de descărcări electrice: townsend, luminiscentă și în arc (mai multe despre acestea în anexa A3). Din cauza utilizării descărcărilor electrice, aceste lămpi au o construcție specială care cuprinde în principal: un tub de descărcare și doi electrozi din Wolfram; celelalte componente constructive variază în funcție de scopul lămpii, substanța activă, presiunea din interiorul tubului de descărcare și tipul descărcării electrice.

Descărcările electrice se realizează între cei doi electrozi ai lămpii, iar distanța relativ mare dintre aceștia și presiunea mică a vaporilor metalici la temperatura ambientală face ca amorsarea lămpii (aprinderea inițială) la tensiunea nominală de alimentare ($U_n = 230$ [V]) să necesite anumite condiții favorabile pentru preionizarea spațiului de descărcare:

- Folosirea electrozilor cu proprietăți emisivive bune (electrozi activați);
- Producerea unei emisii termoelectronice inițiale (prin preîncălzirea electrozilor);
- Producerea unei descărcări electrice inițiale (prin intermediul unor electrozi auxiliari);
- Adăugarea unui gaz auxiliar în tubul de descărcare;
- Introducerea unor elemente exterioare în circuitul electric al lămpii pentru a determina creșterea tensiunii aplicate lămpii în timpul aprinderii.

Lămpile prezintă caracteristici funcționale unitare: (i) tensiunea necesară menținerii descărcării este mai mică decât tensiunea de amorsare și cea nominală a rețelei. De altfel, amorsarea se face la o tensiune net superioară tensiunii nominale a rețelei; (ii) prezența unui dispozitiv extern de stabilizare a descărcării realizat frecvent ca o impedanță liniară înseriată în circuitul electric al lămpii – balast (inductiv, inductiv-capacitiv, electronic, rezistiv) Anexa 4; (iii) elementele de amorsare pot să fie la exteriorul sau interiorul lămpii; (iv) din cauza funcționării intermitente a descărcărilor electrice, lămpile vor produce un spectru discontinuu, eliberând energia luminoasă (radiații electromagnetice de

rezonanță) în punctele de intersecție dintre caracteristica (U/I) arcului electric și cea a balastului.

În continuare se prezintă cele mai cunoscute lămpi cu descărcări: tubul fluorescent, lampa fluorescentă compactă, lampa cu Hg la înaltă presiune, lampa cu Na la înaltă presiune și lampa cu halogenuri metalice. Se va insista pe construcția lămpilor, respectiv fenomenele fizice corespunzătoare. Funcționalitatea și utilizarea lor va fi dezbătută în capitolul următor.

Lampa cu Hg la joasă presiune (tubul fluorescent, lampa fluorescentă) produce radiația de rezonanță în ultraviolet (185; 253,7 nm). Construcția ei este prezentată în figura 3.3. Se observă tubul cilindric de sticlă care poate avea diametrul de 10...40 mm și lungimea de 150...1500 mm, în care este o atmosferă controlată, care conține un gaz inert (de obicei Ar) cu rolul de: a ajuta inițierea și stabilizare a descărcării electrice, a proteja electrozii, creșterea duratei de viață a lămpii și de asemenea în producerea luminii.

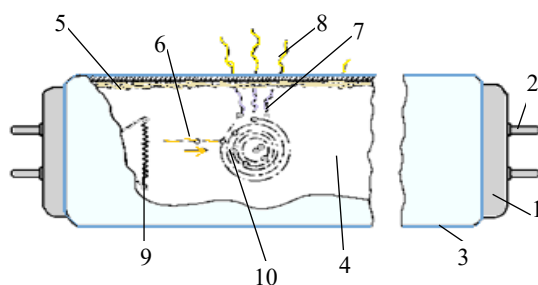


Figura 3.3 Construcția lămpii fluorescente

1 – soclu, 2- pin de alimentare, 3- tub de sticlă, 4 – atmosferă controlată, Ar, 5-strat luminifer, 6-descărcare luminiscentă, 7 – radiație ultravioletă, 8 – radiație vizibilă, 9 – electrod de Wolfram, 10 – atom de Hg

Presiunea din interiorul tubului este de 1-1,5 Pa / 0,006-0,01 mm Hg (presiunea atmosferică este de 101325 Pa / 760 mm Hg / 1,013 Bar). Tot în interiorul tubului se află vapori de Hg, substanța activă. Electrozii de descărcare se află la cele două capete, fiind alimentați prin intermediul celor două socluri cu pini. Aceștia sunt din Wolfram, sub forma de filamente și acoperiți cu un strat activator (oxizi de pământuri rare).

Pe interiorul tubului de descărcare este aplicat un strat de luminofor, care prin fenomenul de fluorescență, crește eficiența lămpii de la 5-7 lm/W la 50-100 lm/W. În calitate de luminofor se folosesc: silicați de Zn, cadmiu și beriliu, boratul de cadmiu, wolframați de Mg și Ca etc. Compoziția stratului de luminofor determină componența spectrală a radiației, temperatura de culoare (2900...6500 K) și factorul de redare a culorilor.

Durata de funcționare a lămpilor fluorescente este de 8...10 mii ore, dar depinde și de numărul de întreruperi.

Punctele forte și slabe ale lămpilor fluorescente sunt:

- Avantaje
 - Eficiență luminoasă ridicată;
 - Durată de funcționare mare;
 - Oferă o lumină difuză – luminarea ambientală.
- Dezavantaje
 - Elemente auxiliare pentru amorsare și menținerea stabili-tății;
 - Componența spectrală discretă a radiației optice discontinue;
 - Fenomenul stroboscopic, deoarece fluxul de lumină oscilează;
 - Reutilizarea lămpii necesită condiții speciale;
 - Sensibile la temperaturi joase ale mediului de funcționare;
 - Factor de putere scăzut.

Lampa fluorescentă compactă (CFL, figura 3.4) a fost introdusă ca o alternativă a lămpii cu incandescență, față de care are o eficiență luminoasă de 4...5 ori mai mare, iar durata de funcționare de 8...10 ori mai mare. CFL (Compact Fluorescent Lamp) funcționează după același principiu ca lampa fluorescentă tubulară, însă construcția este mult modificată prin: compactarea tubului de descărcare, minimizarea dimensiunilor blocului de elemente electronice, care au rol în amorsarea și menținerea descărcării electrice și sunt încorporate în soclul lămpii.

Din punct de vedere al parametrilor fotometrici, CFL este similară cu lampa fluorescentă, dar în plus nu prezintă fenomenul stroboscopic (licărire). Inițierea

descărcării se realizează cu ajutorul unui circuit rezonant LC, care va produce o tensiune de amorsare net superioară tensiunii nominale (aproximativ 1200 V).

În concluzie, punctele forte ale lămpii compacte fluorescente sunt:

- Dimensiune redusă, forme compacte și diverse;
- Varietate mare de puteri nominale;
- Eficiență luminoasă ridicată – 60...90 lm/W;
- Redare bună a culorilor;
- Durata mare de viață – peste 10000 h;

Dacă conține un circuit PFC (Power Factor Corrector) factor de putere unitar.

Din cauza compactării tubului de descărcare, deci reducerea volumului, acesta se va încălzi și de aici dezavantajul dificultății în disiparea căldurii degajate. Pe de altă parte, din cauza utilizării electronici și a descărcării electrice, CFL este o importantă sursă de armonici (curență cu frecvența diferită de 50 Hz).

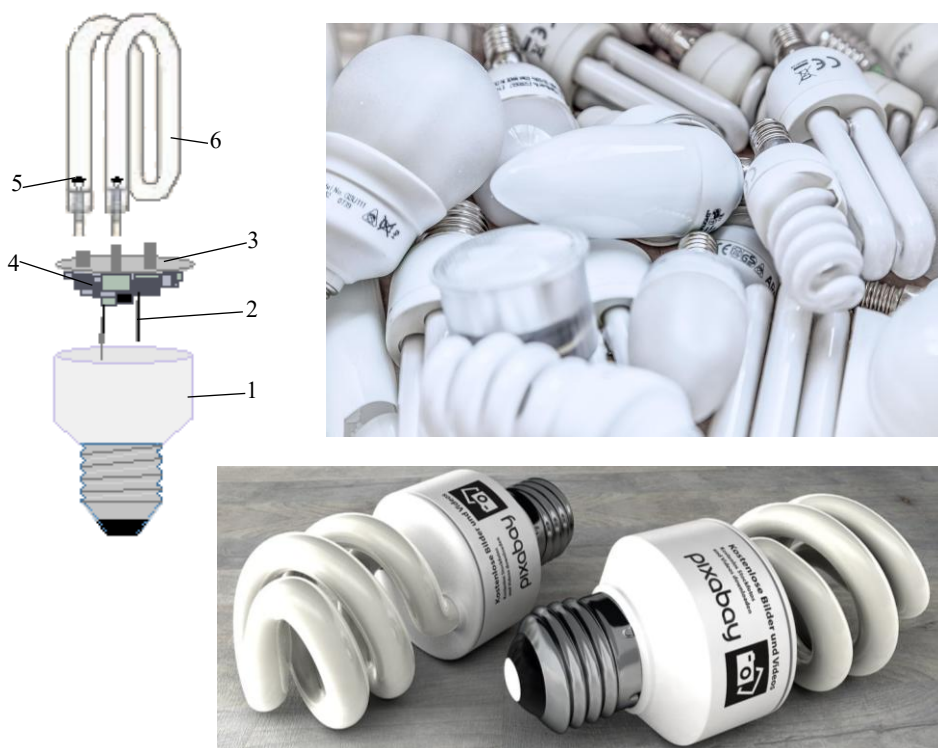


Figura 3.4 Lampa fluorescentă compactă

1-carcasă policarbonat, 2-conductor alimentare, 3-placa de montaj, 4-componente balast electronic, 5- electrod de descărcare, 6-gaz de descărcare

Lampa cu Hg la înaltă presiune folosește descărcarea în arc electric într-un tub de descărcare unde se află vapori de Hg. Fluxul luminos este obținut prin liniile emise în domeniul vizibil de descărcare în vaporii de Hg, la care se adaugă radiațiile din zona roșu-portocaliu ale luminoforului excitat de radiația ultravioletă a descărcării. Construcția lămpii este ilustrată în figura 3.5.

Din construcția lămpii, se observă un tub de descărcare din cuarț, unde are loc descărcarea în arc electric, între cei doi electrozi din Wolfram. În interiorul tubului de descărcare este un gaz inert (Ar și N) și vapori de Hg, presiunea fiind cel puțin 1000 mm Hg. Amorsarea lămpii se face cu ajutorul unui electrod auxiliar (sau doi electrozi auxiliari), care este în circuitul electrodului principal opus, și este în legătură cu o rezistență care limitează valoarea curentului, și funcționează astfel: în momentul alimentării lămpii, între electrodul auxiliar și cel principal alăturat va apărea o descărcare electrică auxiliară, care va determina ionizarea spațiului din interiorul tubului de descărcare; după 3-5 minute, Hg din interior a ajuns în starea de vapori saturați, favorizând apariția arcului electric între electrozii principali.

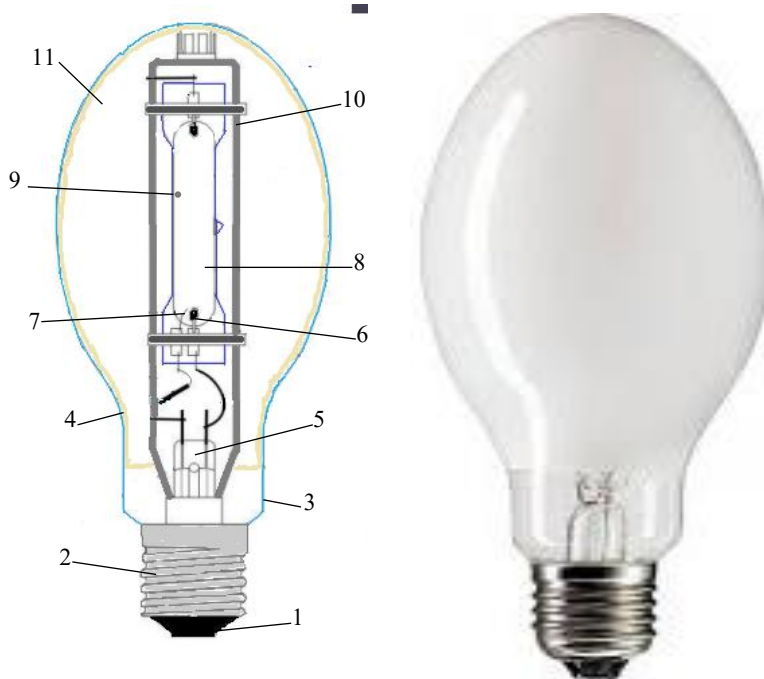


Fig. 3.5. Lampa cu Hg la înaltă presiune

1-contact central, 2-soclu spiralat, 3-balon exterior de sticlă, 4-luminofor, 5-montură de sticlă, 6-electrod principal, 7-electrod auxiliar, 8-tub de descărcare din cuarț (Ar), 9-atom de Hg, 10-suport tub de descărcare, 11-atmosferă controlată (N)

Lampa conține și un balon de sticlă care are pe interior un strat de luminofor; rolul balonului exterior este de a proteja tubul de descărcare contra acțiunilor exterioare, dar și de a limita influența temperaturii exterioare, pe de o parte; iar pe de altă parte de a transforma radiațiile ultraviolete produse de atomii de Hg în radiații din spectrul vizibil.

Deoarece indicele de redare a culorilor este foarte slab, $R_a=40-55$, acest tip de lampă are aplicații în iluminatul exterior.

Avantajele lămpii sunt:

- Cost relativ redus;
- Nu necesită elemente auxiliare pentru amorsare;
- Eficiență luminoasă de 60...80 lm/W;
- Durată de funcționare ridicată (20000 h),

iar dezavantajele:

- Caracteristici reduse de redare a culorilor;
- Durată mare de lansare și relansare (cca. 4 minute);
- Importantă sursă de armonici;
- Prezența fenomenului stroboscopic.

Lampa cu Na la înaltă presiune produce energie luminoasă prin intermediul unei descărcări în arc electric și a vaporilor de Na și Hg într-un mediu de gaz inert la o presiune de aproximativ 250 mm col Hg. Precum se observă în figura 3.6, arcul electric se dezvoltă într-un tub de descărcare, construit din alumina sinterizată transparentă, care este protejat de un balon de sticlă exterior.

Balonul exterior este vidat și îndeplinește același rol ca în cazul lămpii cu Hg la înaltă presiune, diferența constă în faptul că poate să fie transparent, sau cu un strat difuzant. Fluxul luminos produs este în domeniul spectrului vizibil, însă există variante care au și luminofor pe balonul exterior, pentru a mări spectrul vizibil emis.

Amorsarea lămpii se face cu dispozitive exterioare, care vor crește tensiune inițială la 3-4 kV. La fel ca în cazul lămpii cu Hg, tensiunea inițială nu va determina apariția arcului electric, ci vor trece aproximativ 4 minute până când lampa va ajunge la parametrii nominali și randament maxim. Față de lampa cu Hg, atomii de Na sunt cei care produc energia luminoasă, deoarece aceștia au o temperatură de vaporizare mai mică decât cei de Hg, care au rol doar în ionizarea spațiului de descărcare și menținerea descărcării în arc.

Lampa are un indice de redarea culorilor foarte scăzut, $R_a=20...25$, astfel că se folosește pentru iluminatul exterior. Datorită faptului că are eficiența

luminoasă mai ridicată ca lampa cu Hg, până la 150 lm/W și durata de funcționare mare, această lampă este mai mult utilizată decât precedentă.

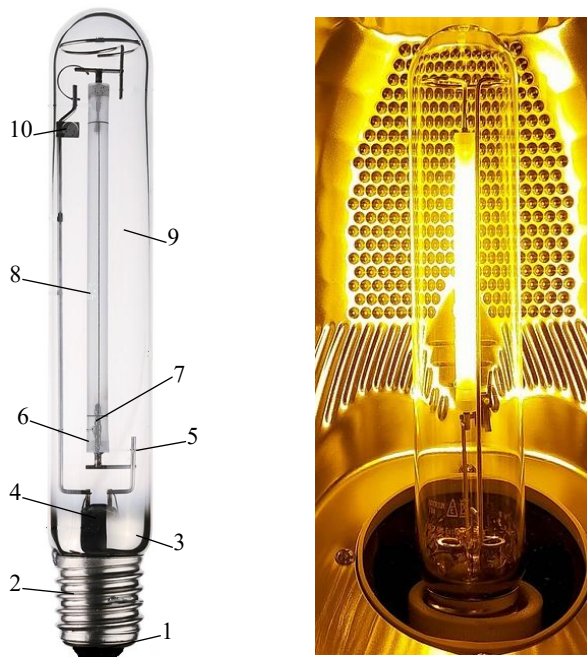


Figura 3.6 Construcția lămpii cu Na la înaltă presiune

1-contact central, 2-soclu spiralat, 3-balon exterior de sticlă, 4-montură de sticlă, 5-suport tub de descărcare, 6-tub de descărcare, 7-electrod de Wolfram, 8- atomi de Na și Hg, în atmosferă cu Ar, 9- mediu vidat, 10-plăcuță pentru absorbția impurităților

Dezavantajele utilizării ei sunt:

- Slaba redare a culorilor;
- Necesitatea unor elemente auxiliare pentru amorsare;
- Costuri ridicate;
- Durata mare a timpului de lansare și relansare;
- Sursă de armonici.

Lampa cu halogenuri metalice își bazează funcționarea ca lampa cu Na: în interiorul unui tub de descărcare se află Hg, care are rol în ionizarea spațiului și menținerea arcului electric, și halogenuri metalice (cel mai adesea ioduri de Na, In și Tl) a căror atomi vor produce energia luminoasă. Tubul de descărcare are dimensiuni mai reduse comparativ cu precedentele lămpi, și poate fi din cuarț, sau alumina siterizată (depinde de substanța activă). Atmosfera din interiorul tubului este cu gaz inert, Ar, unde se află și cei doi electrozi din Wolfram, între care se va dezvolta descărcarea în arc electric. Tubul de descărcare va fi protejat

printr-un balon exterior de sticlă transparentă, deoarece lampa produce radiații electromagnetice în spectrul vizibil.

Lampa este prevăzută cu dispozitive exterioare care ajută la amorsarea și menținerea arcului electric. În figura 3.7 este ilustrată construcția lămpii cu halogenuri metalice.

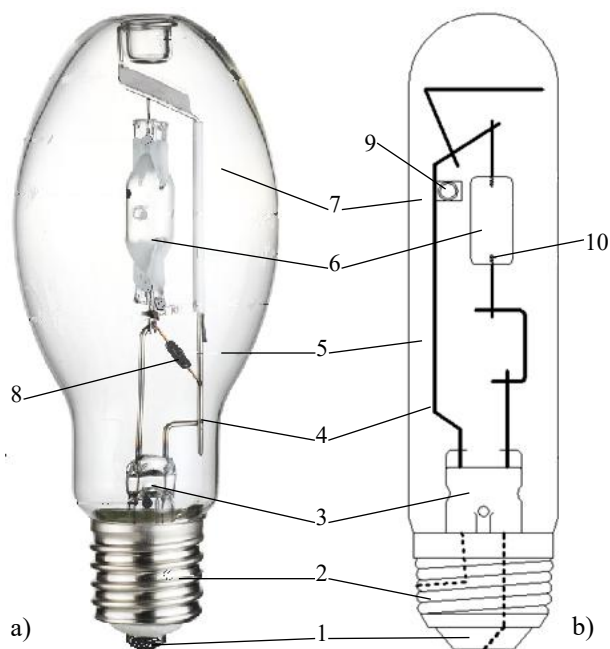


Figura 3.7 Construcția lămpii cu descărcare și halogenuri metalice
1-contact central, 2-soclu spiralat, 3-montură de sticlă, 4-suport tub de descărcare, 5-
balon exterior de sticlă, 6-tub de descărcare, 7-mediul vidat, 8- rezistor, 9- placuța
pentru absorbția impurităților, 10-electrod din Wolfram
a) balon exterior elipsoid, b) balon exterior tubular

3.4 Lămpi cu LED-uri

LED-ul (Lighting Emitting Diode) sau dioda electroluminiscentă este o sursă de lumină monocromatică necoerentă.

LED-ul conține o joncțiune p-n obținută prin prezența contactului dintre două semiconductoare omogene cu conductibilitate diferită. Precum s-a prezentat în capitolul precedent, obținerea luminii într-un LED presupune două procese în joncțiunea p-n: injectarea purtătorilor de sarcină și electroluminiscenta.

LED-urile se împart în mai multe categorii:

- În funcție de formă: sferice (DIP-Dual Inline Packed LED) și plate (SMD – Surface Mounted Device, Micro și COB – Chip on Board LED);
- În funcție de radiația electromagnetică emisă: monocromatice și policromatice (Bi-color, RGB);
- În funcție de puterea lor: de putere mică și de putere mare (>1 W).

Datorită dimensiunilor mici LED-urile se folosesc în foarte multe domenii și aplicații. Câteva exemple sunt: elemente auxiliare cu rol în transmiterea unor mesaje luminoase (echipamente de protecție și avertizare), elemente principale pentru producerea luminii utile, arhitecturale sau pentru decor (aparate de iluminat), elemente principale pentru realizarea unor efecte luminoase (aparate video) etc.

Lămpile cu LED-uri reprezintă ultima generație de surse electrice de lumină, iar calitățile lor energetice și lumino tehnice sunt net superioare în comparație cu a celorlalte surse artificiale de lumină. Printre aceste caracteristici se numără:

- Randament ridicat de transformare a energiei electrice în lumină;
- Spectru de emisie relativ îngust;
- Directivitate înaltă a fluxului emis;
- Tensiune directă joasă;
- Gabarite mici și fiabilitate mare;
- Posibilitatea obținerii luminii albe prin combinarea mai multor LED de diferite tipuri;
- Durata de viață mare (circa 100000 h), eficiență mare 180 lm/W.

Problema cea mai mare în utilizarea LED-urilor este căldura care apare în timpul funcționării. În prezent soluționarea acestui aspect (evacuarea căldurii) se face prin construcția și materialele componente ale lămpii. Având în vedere că, căldura se va elibera în direcția opusă eliberării fascicolului de fotoni joncțiunea p-n de cele mai multe ori se așează pe o placă de bază care are rolul în preluarea excesului de energie calorică. De asemenea se folosesc materiale bune conductoare (Au, Ag, Pt). În figura 3.8 este prezentată construcția unui LED DIP, respectiv a unui LED SMD.

Funcționarea și caracteristicile constructive ale unui LED sferic sunt după cum urmează:

- a) La alimentarea LED-ului, curentul va circula de la anod (partea pozitivă, cu surplus de electroni) spre catod (partea negativă, deficit de electroni);

- b) În interiorul joncțiunii p-n are loc recombinarea goluri-electroni compusă din două fenomene: recombinaere neradiativă și recombinaere radiativă. Primul fenomen apare în toate diodele, în comparație cu al doilea fenomen, care este caracteristic doar LED-urilor, și duce la producerea de fotoni;

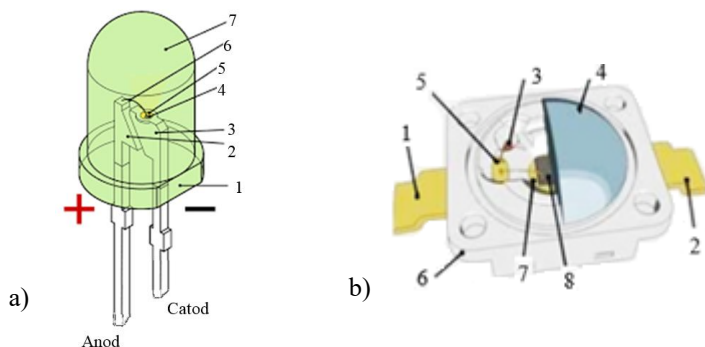


Figura 3.8 Construcția unui LED

- a) DIP LED 1-carcasă transparentă din plastic, 2-stâlp, 3-nicovală, 4-joncțiune p-n, 5-cavitate reflectorizantă, 6-conductor de legătură, 7- lentilă epoxidică; b) SMD LED 1-Catod, 2-Anod, 3-joncțiunea p-n, 4-lentilă, 5-conductor de legătură, 6- carcasă, 7- cavitate pentru evacuarea căldurii, 8-cip
- c) Lumina produsă este unidirecțională, iar pentru cazul prezent este în partea superioară a LED-ului. Totuși, există variante LED la care lumina este emisă prin partea laterală a dispozitivului;
- d) Pentru creșterea producției de lumină, zona de emisie este așezată într-o cavitate reflectorizantă căptușită cu un film subțire de Au;
- e) Elementele 2 și 3 din figura 3.8, adică stâlpul și nicovala, formează cadrul care împreună cu carcasa de plastic ajută la eliminarea excesului de căldură care apare în dispozitiv.

În ceea ce privește LED-urile plate (figura 3.9), acestea au în comun construcția plată, dar ele se deosebesc între ele astfel:

- SMD – este montat sub o suprafață de rășină, iar acesta poate ajunge la temperaturi ridicate atunci când nu are o răcire conform făcută. Produce o lumină slabă, din această cauză este indicat pentru iluminatul spațiilor mai puțin pretențioase ca pasaje de trecere. Eficiența luminoasă este de 60-70 lum/W, cu unghiul de deschidere de 360 grade și posibilitatea construirii

unor produse RGB. Este rezistent la șocuri mecanice și mișcări, dar nu suportă funcționarea continuă;

- Micro și COB– sunt construite ca o matrice de joncțiuni p-n concentrate pe o placă de bază, și acoperite cu silicon. În acest fel gestiunea căldurii este superioară variantelor SMD. Acest fapt le face mai indicate în construirea unor aparate de iluminat cu un serviciu de lucru mai stresant (aprinderi și stingeri repetate, respectiv funcționare prelungită). Eficiența luminoasă ajunge pînă la 120 lum/W, cu o deschidere de 160 grade. Au o mai bună gestiune a fluctuațiilor electrice, iar lumina este multidirecțională.

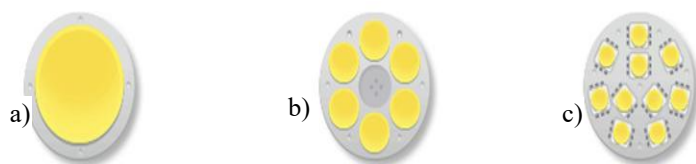


Figura 3.9 Tipuri de LED-uri plate

a) COB, b) Micro, c) SMD

Funcționarea LED-urilor plate este la fel ca în cazul LED-urilor sferice: curentul va circula de la anod la catod, va trece prin joncțiunea p-n producând fotoni.

LED-urile, ca surse electrice de lumină intră în componența lămpilor cu LED-uri, care sunt de o mare varietate și diversitate. În acest capitol se va aborda tema lămpilor cu LED-uri, care au forma de tip balon.

Lămpile cu LED-uri ca înlocuitori ai lămpilor clasice cu incandescență sub formă de bulb, copiază arhitectura externă a celor cu incandescență, dar cea internă este adaptată pentru alimentarea LED-urilor și asigurarea unui flux de lumină distribuit. Figura 3.10 ilustrează arhitectura internă și externă a unei lămpi cu LED-uri de tip bulb. Se observă în imagine că alimentarea se face cu ajutorul unui soclu filetat, de tipul E27 (sau E27). Placa electronică și toate elementele auxiliare ale lămpii sunt localizate în corpul lămpii, într-o carcasă termoizolatoare, care protejează circuitul de alimentare și LED-urile de mediul exterior. În cazul folosirii unor LED-uri de mare putere, această carcasă conține fante cu rol în evacuarea căldurii excesive produse prin funcționarea surselor de lumină. Eliberarea căldurii excesive se face și prin poziționarea LED-urilor pe o placă de interfață electronică. Dirijarea luminii produse înspre exterior și distribuția ei se face prin componente optice dedicate, precum reflectorul alb, placa de reflexie, dar și baloanele lămpii.

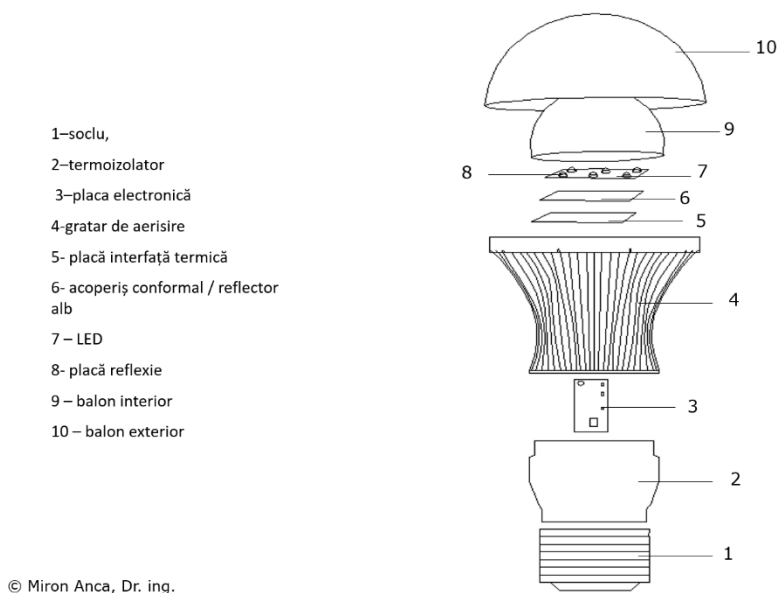


Figura 3.10 Structura unei lămpi cu LED-uri, de tip bulb

În ultimii ani au fost introduse diodele electroluminiscente care folosesc materiale organice, pe bază de C în joncțiunea p-n. Acestea sunt OLED-urile (Organic Lighting Emitting Diode), iar principiul de obținere a luminii este similar LED-urilor: electronii unor materiale solide organice (pe bază de Carbon) se excită la trecerea curentului electric prin ele (semiconductoare), și prin electroluminiscentă vor produce fotoni. Față de LED, un OLED va produce lumină pe toată suprafața sa, precum se poate observa din figura 3.10. O altă calitate luminoasă a OLED-urilor este că generează lumină uniformă, iar căldura este disipată la nivelul întregii suprafețe a sursei de lumină. În ceea ce privește redarea culorilor, aceste surse electrice de lumină, au indicele Ra=93.

Punctele slabe ale OLED-urilor sunt următoarele:

- Durata de viață este mai mică decât la LED;
- Luminozitatea scade cu îmbătrânirea materialului organic.

Aplicațiile OLED-urilor sunt multiple, și se bazează pe faptul că dimensiunea lor este foarte mică și plată, iar lumina produsă apropiată de cea naturală. Printre aceste aplicații, cele mai de succes sunt: elemente componente ale aparatelor video, respectiv surse de lumină decorative.

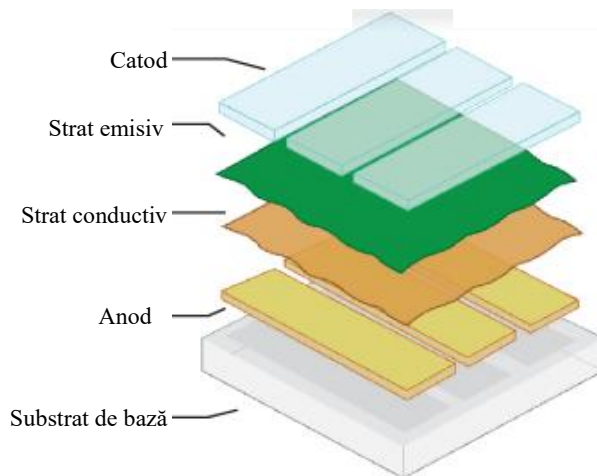


Figura 3.10 Structura unui OLED

3.5 Bibliografie

- [1]. Nicolae Mogoreanu, *Iluminatul electric*, Curs universitar, Ed. Lumina, Chișinău, 2013.
- [2]. Paul Dinculescu, *Surse de lumină, Fenomene de bază și principii de realizare*, E. Printech, București, 2000.
- [3]. The Lighting Handbook, Zumtobel Lighting, The fourth edition, 2013, ISBN 978-3-902940-22-3.
- [4]. Ganslandt R., Hofmann H., Handbook of Lighting Design, 290 pages, ERCO Edition, Published by: Verlag Vieweg, 1992, ISBN 3-528-08895-8.
- [5]. European Directive - Commission Regulation (EC) No 244/2009, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:en:PDF>.

3.6 Autoevaluare

- 1) Sursele electrice de lumină transformă energia electrică în energie luminoasă.
 Adevărat / Fals

- 2) Lampa cea mai eficientă energetic este:
 Lampa cu incandescență / Lampa cu LED / Lampa cu halogenuri metalice / Lampa fluorescență compactă (CFL)

- 3) Lampa care produce lumina cea mai apropiată de lumina naturală este:
 Lampa cu incandescență / Lampa cu LED / Lampa cu halogenuri metalice / Lampa fluorescnetă compactă (CFL)
- 4) Lampa cu incandescență se folosește la iluminatul exterior.
 Adevărat / Fals
- 5) Tubul fluorescent produce radiații luminoase în spectrul
 Vizibil / Ultraviolet / Infraroșu
- 6) CFL-urile sunt lămpi cu descărcare în arc
 Adevărat / Fals
- 7) Lampa cu Na la înaltă presiune folosește ca element de amorsare a arcului electric
 Starter / Balast electronic / Igniter / Electrode auxiliar
- 8) LED-ul este o sursă de lumină monocromatică
 Adevărat / Fals
- 9) LED-urile pot fi de următoarele tipuri
 DIP / OLED / COB / SMD
- 10) OLED-ul are aplicații în:
 Iluminatul interior / Iluminatul exterior / Iluminatul de urgență / Iluminatul decorativ

Exemple suplimentare de lămpi



Lampă cu LED

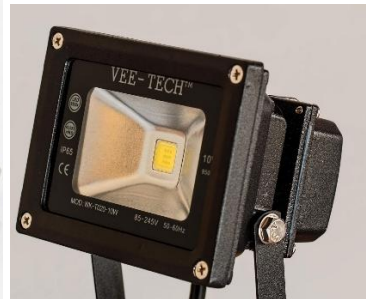
Lampă fluorescentă compactă



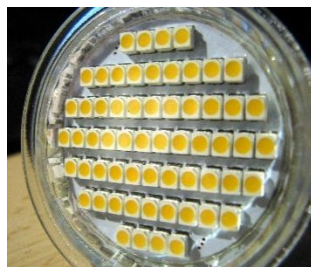
Lampă cu LED-uri



Proiectoare cu LED-uri



Lămpi cu LED-uri



4

Aparate de iluminat

4.1 Introducere

Aparatul de iluminat reprezintă receptorul electric care realizează iluminatul electric. El este constituit din toate piesele necesare pentru producerea luminii, dar și fixarea și protejarea lămpilor precum și pentru conectarea acestora la circuitul de alimentare.

Componentele unui aparat (corp) de iluminat pot fi grupate în două părți cu rol funcțional distinct:

1. sistemul optic, care reduce luminanța lămpii și modifică compoziția spectrală sau distribuția fluxului luminos (reflectoare, refractoare, ecrane difuzante, filtre colorate, grătare de ecranare);
2. armătura, care asigură fixarea lămpii (dulie), alimentarea cu energie electrică, protejarea lămpilor împotriva atingerii, solicitării mecanice, prăfuirii sau umezelii.

Un aparat de iluminat se caracterizează prin următoarele: curba fotometrică, randamentul și unghiul de protecție. El este un receptor monofazat, fiind alimentat la tensiunea rețelei de 230 V.

Curba fotometrică este reprezentarea în plan sub formă polară a intensității luminoase, considerându-se direcția axei optice. Un exemplu de curbă fotometrică este ilustrat în figura 4.1. Aici se poate observa că valoarea intensității luminoase la 80° este de 110 cd, iar la 30° este de 230 cd. Tot din acest grafic se poate determina distribuția luminii în planul aflat în partea de jos a aparatului de iluminat (iluminare directă), respectiv pe partea opusă (iluminare indirectă).

Curba fotometrică se obține din corpul fotometric al corpului de iluminat, care este distribuția spațială a intensității luminoase a aparatului de iluminat.

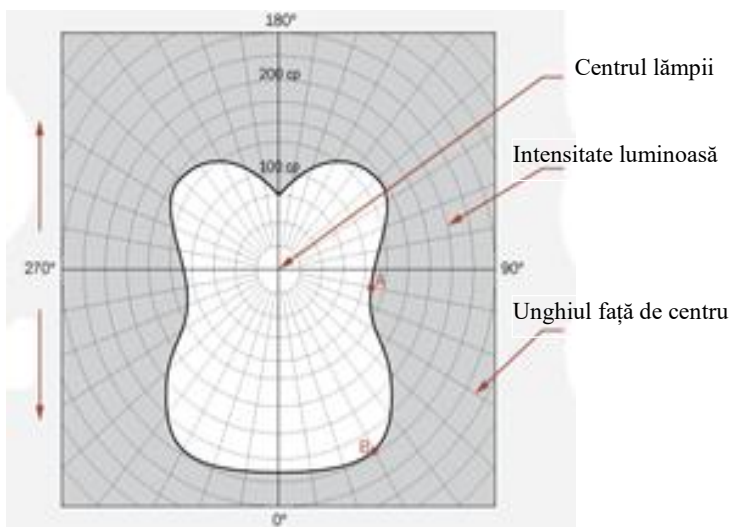


Figura 4.1 Curba fotometrică a unei surse de lumină

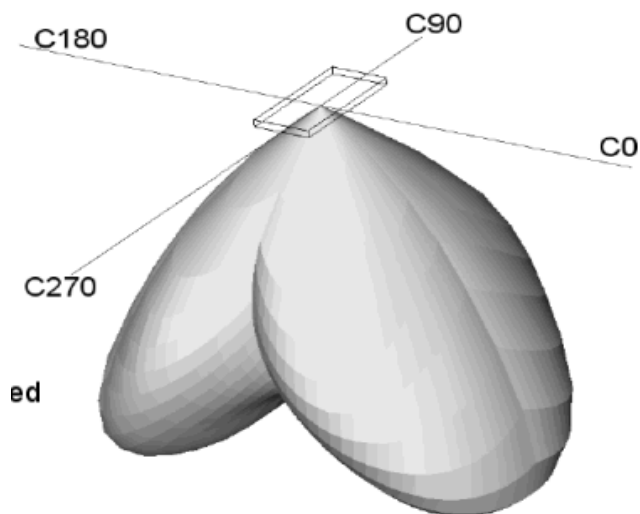


Figura 4.2 Corpul fotometric a unui aparat de iluminat

Randamentul aparatului de iluminat se referă la cât din cantitatea de energie consumată este transformată în lumină, care mai apoi este utilizată pentru realizarea iluminării. În calculul acestui parametru se au în vedere toate elementele componente ale acestuia, mai exact pierderile electrice care apar în elementele de alimentare ale corpului de iluminat, dar și pierderile termice. Acestea din urmă se datorează procesului de transformare a energiei electrice în lumină, dar și faptului că o parte din lumină va rămâne în aparat și se pierde sub formă de căldură. Astfel randamentul total este produsul randamentului sursei de

lumină, a sistemului optic și al armăturii. Dintre elementele componente ale aparatului care influențează acest aspect, sistemul optic este cel care are cea mai mare importanță, fiindcă el acționează direct asupra luminii și poate schimba radical procesul de iluminare.

Unghiul de protecție este unghiul dintre orizontala prin centrul aparatului și linia din plan optic la care sursa de lumină devine vizibilă. Acest parametru furnizează informații legate de sectorul din spațiu în care observarea directă a sursei de lumină este exclusă. În figura 4.3 sunt descrise trei variante de aparate de iluminat cu unghiurile de protecție corespunzătoare.

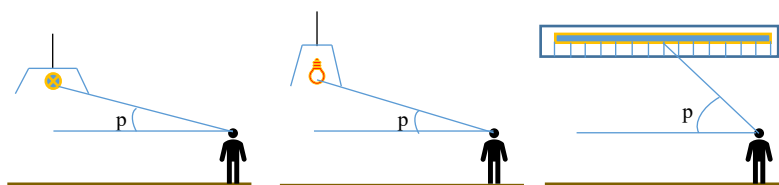


Figura 4.3 Unghiul de protecție

- a) corp de iluminat simplu cu lampă fluorescentă, b) corp de iluminat netransparent cu lampă cu incandescență, c) corp de iluminat cu lamele cu lampă fluorescentă

Aparatele de iluminat se împart în mai multe categorii după:

- Tipul surselor de lumină – pentru lămpi cu incandescență, cu descărcări, cu LED;
- Forma curbei fotometrice – corpuri de iluminat simetrice și nesimetrice;
- În raport cu distribuția fluxului luminos – direct, semidirect, mixt, semiindirect, indirect;
- Mărimea unghiului solid – cu repartiție difuză, largă, mijlocie și concentrată;
- Felul instalației de iluminat – pentru interior, exterior, etanșe și speciale;
- Particularitățile de execuție și de fixare – aplici, plafoniere, pendule (suspendate), portabile și locale (montate pe piese, masă etc.).

Corpurile de iluminat intră în componența instalațiilor de iluminat. Acestea se împart în mai multe categorii în funcție de amplasare și natura surselor de lumină. Astfel sunt instalațiile pentru iluminatul interior, exterior, arhitectural și special. În continuare sunt descrise astectele generale ale aparatele de iluminat folosite în aceste tipuri de instalații.

4.2 Iluminatul interior

Iluminatul interior reprezintă procesul de iluminare artificială a incintelor clădirilor, cu scopul de a crește vizibilitatea, confortul și a crea efecte optice estetice. Acest tip de iluminat joacă un rol esențial în crearea condițiilor necesare pentru desfășurarea într-un mod eficient și confortabil a activităților casnice, recreative, tehnologice, etc. din locuințe, birouri, săli de clasă, spații comerciale sau industriale.

Aparatele de iluminat folosite pentru iluminatul interior trebuie să producă o lumină difuză (ambientală) sau o lumină centrată pe suprafața de lucru. Acestea cuprind lămpi cu incandescență halogene, lămpi cu descărcare electrică la joasă presiune și lămpi cu LED-uri, respectiv OLED (figura 4.4).



Figura 4.4 Aparate de iluminat pentru iluminatul interior

a) corp de iluminat - candelabru, CFL b) corp de iluminat suspendată, c) corp de iluminat – lampă birou, d) corpuri de iluminat suspendate (cu LED-uri)

Aparatele de iluminat pentru care sursele de lumină sunt alimentate prin soclu filetat prezintă o construcție simplă, care se bazează pe sistemul optic, deoarece lămpile se racordează la rețea nemijlocit, fără a avea nevoie de componente auxiliare. În această categorie intră lămpile cu incandescență halogene, CFL-urile și lămpi cu LED-uri (prezentate în capitolul precedent).

În cazul aparatelor de iluminat cu tuburi fluorescente, circuitul de alimentare (variantele uzuală) a lămpilor cuprinde două elemente auxiliare - starterul și balastul. Figura 4.5 ilustrează racordarea la rețea a unei lămpi fluorescente, prin folosirea unui balast inductiv (4.5 a)), capacitiv (4.5 b)), respectiv în montaj duo (4.5 c)) și tandem (4.5 d)).

Starterul SL conectat în paralel cu tubul fluorescent este o lampă cu descărcare luminiscentă în regim licărire. Acesta conține un electrod din bimetal care îndeplinește funcția de micro-întreruptor cu menținerea temporară a contactelor în poziția închis, și îndeplinește funcțiile:

- Preîncălzește electrozii lămpii timp de 0,2...0,6 secunde la o temperatură care asigură emisia termoelectrică suficientă și evaporarea parțială a Hg din tub;
- Întreruperea ulterioară a curentului din circuitul de preîncălzire a electrozilor.

Funcționarea starterului este repetitivă: la punerea sub tensiune, în lampa starter care se amorsează va apărea o descărcare electrică al cărei curent încălzește electrodul din bimetal; se închide contactul cu celălalt electrod asigurând astfel înserierea electrozilor lămpii fluorescente.

Condensatorul din schema de racordare îndeplinește o dublă funcție – contribuie la formarea impulsului de tensiune și formează o cale de scurtcircuit pentru oscilațiile de înaltă frecvență produse de descărcarea din tub.

Balastul inductiv este o bobină cu miez de fier și întrefier conectată în serie cu tubul și având funcțiile:

- Produce un vârf de tensiune la bornele lămpii cu scopul amorsării descărcării în arc;
- Limitează curentul prin lampă la o valoare care să nu ducă la distrugerea electrozilor.

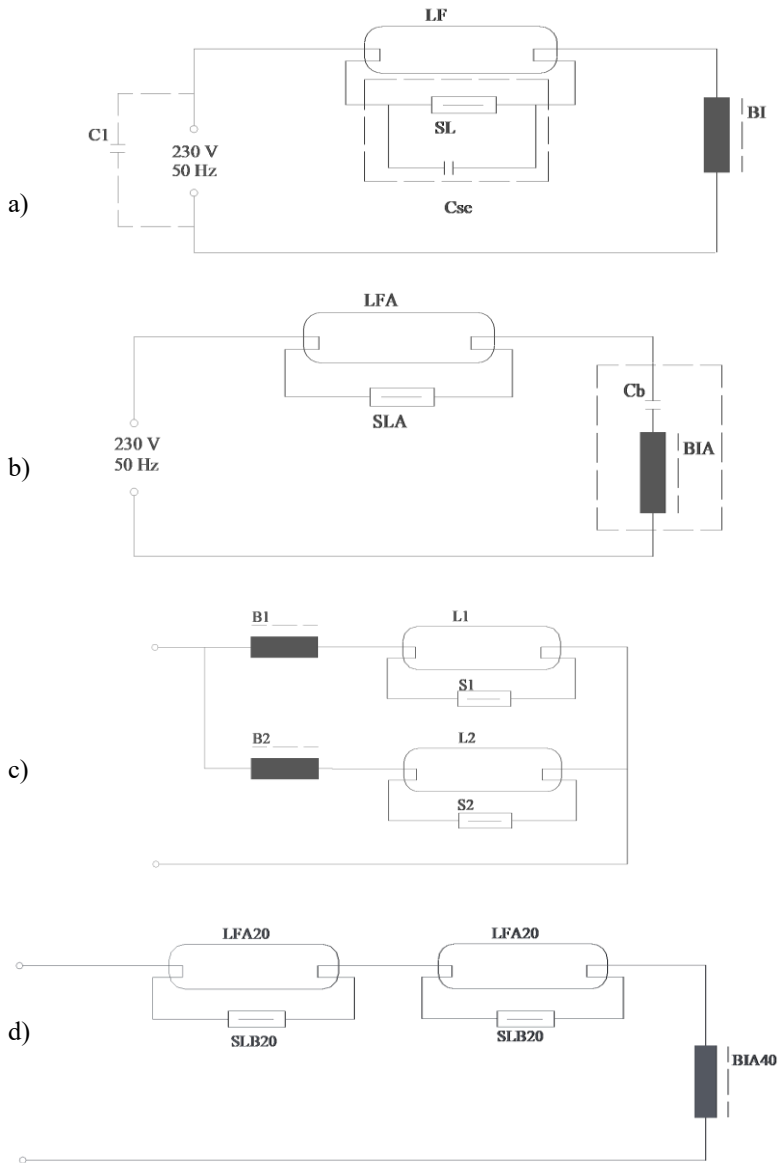


Figura 4.5 Racordarea la rețea a lămpii fluorescente

a) cu balast inductiv b) cu balast capacitiv, c) montaj duo, d) montaj tandem

În prezent varianta cea mai populară este utilizarea balastului electronic. Figura 4.6. ilustrează imaginea reală a unui starter, respectiv a unui balast electronic.

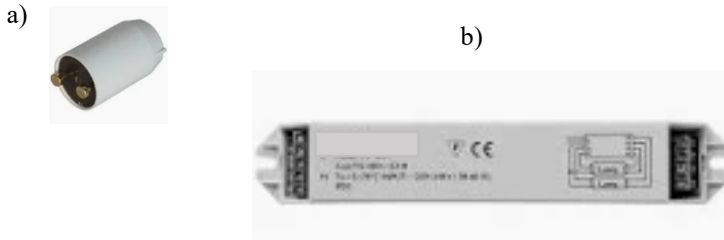


Figura 4.6 Elementele auxiliare de racordare a unui tub fluorescent
a) Starter, b) Balast electronic

Condensatorul legat în serie cu bobina balastului formează balastul capacitiv, care are o funcție suplimentară - creșterea factorului de putere în circuit către valoarea de 0,9, fără de care factorul de putere ia valori sub 0,6.

O altă variantă de alimentare tot mai des întâlnită, este folosirea unui balast electronic. Prin utilizarea acestuia, lampa se alimentează la frecvențe de peste 40 kHz, ceea ce scoate fenomenul stroboscopic (pâlpâire) în afara sensibilității ochiului uman.

Aparatele de iluminat care conțin mai multe lămpi fluorescente prezintă circuite de racordare la rețea în care lămpile sunt montate în paralel (montaj duo) sau serie (montaj tandem). Prin această metodă de racordare, se elimină fenomenul stroboscopic care apare la lămpile cu descărcare electrică. În cazul circuitului în paralel, subcircuitul unei lămpi are caracter inductiv, iar celălalt caracter capacitiv, astfel factorul de putere al circuitului este aproape unitar.

Aparatele de iluminat cu LED-uri, precum cele din figura 4.4., prezintă o structură adaptată nevoilor și preferințelor utilizatorilor, astfel ele, copiază forma vechilor aparate de iluminat care folosesc alte surse de lumină, dar conțin LED-urile necesare, precum și toate elementele auxiliare care ajută la funcționarea optimă a LED-urilor și la distribuția adecvată a luminii.

În figura 4.7. este prezentată schema electrică de principiu a unui apart de iluminat cu 30 de LED-uri, care sunt alimentate la tensiunea nominală a rețelei prin intermediul unui ansamblu electronic compus dintr-un circuit EMC (Electromagnetic Compatibility), un circuit PFC (Power Factor Corrector), și un circuit de redresare.

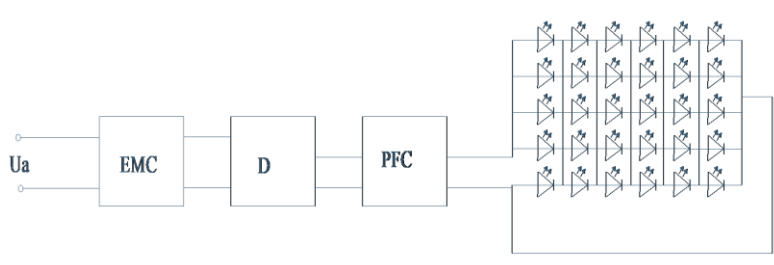


Figura 4.7 Aparat de iluminat cu LED-uri. Schema de principiu
 U_a – tensiunea de alimentare, PFC – circuitul de corecție a factorului de putere,
 EMC – circuitul de transformare a energiei electrice la parametrii necesari LED-
 urilor, D – punte redresoare

Circuitul EMC are rolul de a proteja aparatul de iluminat față de interferențele electromagnetice care vin de la alte dispozitive electronice. Acest circuit cuprinde filtre sau alte elemente electronice dedicate, și sunt construite conform standardelor în vigoare.

Circuitul D cuprinde o punte redresoare care transformă energia electrică din tensiune aletrnativă în energie electrică de tensiune continuu. În acest fel, LED-urile vor avea tensiunea continuă necesară, și le protejează de polarizarea inversă.

Circuitul PFC are rolul de a crește valoarea factorului de putere, astfel încât acesta să respecte condiția ca acesta să nu depășească valoarea de 0,9, conform strandardelor energetice. Trebuie specificat că, nu toate aparatele de iluminat cu LED-uri conțin un astfel de circuit.

4.3 Iluminatul exterior

Iluminatul exterior reprezintă procesul prin care se produce și dirijază lumina produsă prin aparate de iluminat adecvate către zonele și în jurul obiectelor aflate în exteriorul clădirilor, în parcuri, pe străzi, și căile de acces din localități, în orele nopții și ale zilei când nivelul de iluminare rezultat a luminii naturale este scăzut. Rolul iluminatului exterior este în crearea unor condiții de siguranță și securitate, estetic, dar și de a crește timpul de utilizare a spațiului din localități în lipsa luminii naturale.

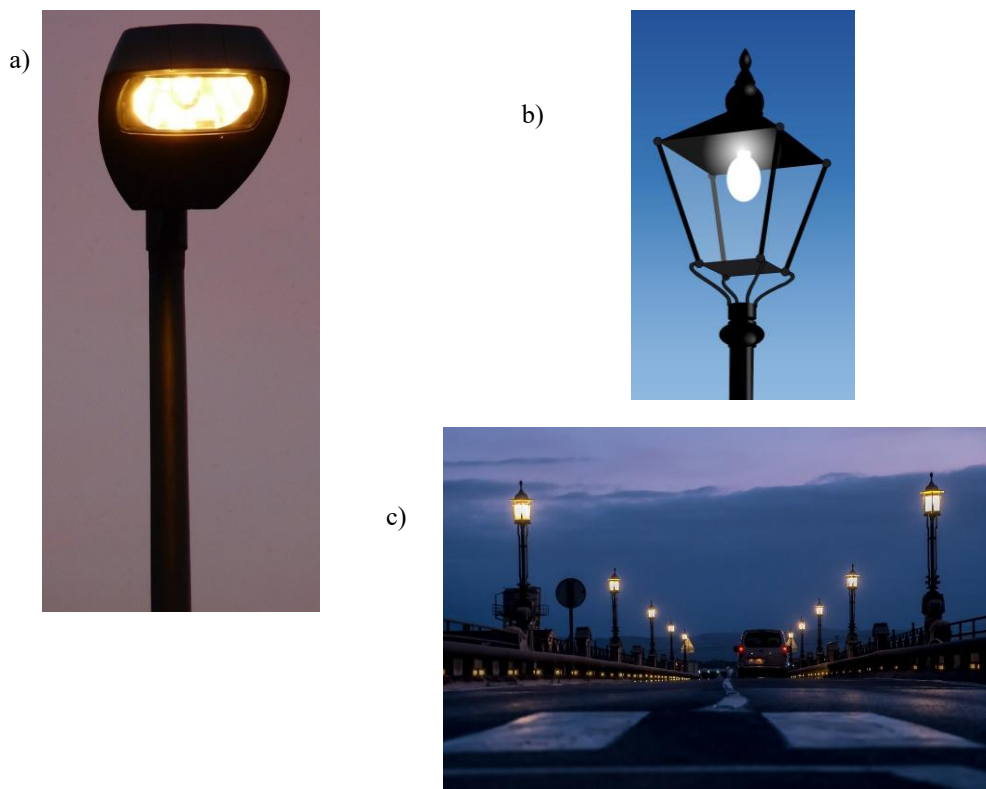


Figura 4.8 Aparat de iluminat dedicate iluminatului stradal

- a) Aparat de iluminat cu LED-uri, distribuție directă, b) Aparat de iluminat cu LED-uri, distribuție indirectă, c) Iluminare stradală

Aparatele de iluminat folosite pentru iluminatul exterior cuprind lămpi cu descărcare electrică la înaltă presiune și lămpi cu LED-uri. Aceste aparate se caracterizează prin următoarele atribute comune:

- Un flux luminos ridicat (>1500 lm);
- Indice de redare a culorilor mic sau mediu;
- Construcție etanșă pentru protecție la factorii de mediu;
- Capacitate de automatizare;
- Rezistență la variație mare a temperaturilor.

Lămpile cu descărcare electrică folosite în mod uzual sunt lămpile cu Hg, cu Na și cu halogenuri metalice la înaltă presiune. Aceste lămpi, ca orice lampă cu descărcări electrice, au nevoie de elemente auxiliare pentru a funcționa corespunzător. În cele ce urmează, se prezintă modul de conectare la rețea a diferitelor tipuri de lămpi cu descărcări la înaltă presiune.

Conectarea la rețea a lămpii cu Hg la înaltă presiune se realizează prin implicarea unui balast electromagnetic, care are rolul de a amorsa și menține arcul electric, dar și limitarea curentului dintre electrozii din tubul de descărcare. Figura 4.9. prezintă schema electrică de alimentare a lămpii cu Hg la înaltă presiune. Se observă balastrul BVA care este înseriat cu lampa, și dimensionat în funcție de puterea lămpii. Din cauza existenței balastului și a arcului electric, factorul de putere scade sub 0,8, astfel se folosește un condensator în paralel cu circuitul lampă – balast, cu rolul de a compensa puterea reactivă. În ultimii ani, acest tip de lampă a scăzut în popularitate, din cauza eficacității luminoase scăzute. Acest fapt, s-a întâmplat în favoarea lămpilor cu Na la înaltă presiune, și a lămpilor cu halogenuri metalice, care au eficacitatea luminoasă mai mare.

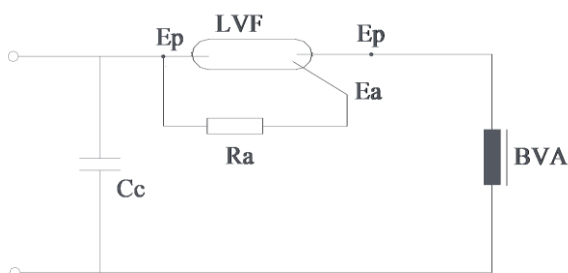


Figura 4.9 Alimentarea la rețea a lămpii cu Hg la înaltă presiune. Schema de principiu. Cc – condensator, Ep – electrozi de descărcare, LVF – tubul de descărcare, Ra – rezistență de amorsare, BVA - balast

Conectarea la rețea a lămpii cu Na la înaltă presiune se face prin intermediul a două elemente dedicate, și anume igniterul și balastul. Schema electrică se regăsește în figura 4.10., unde se observă cele două elemente menționate anterior.

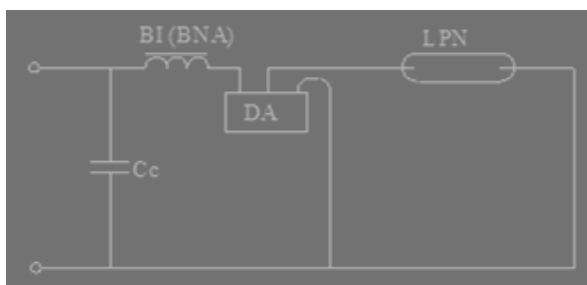


Figura 4.10 Alimentarea la rețea a lămpii cu Na la înaltă presiune. Schema de principiu. Cc – condensator, LPN – tubul de descărcare, BNA – balast, DA - igniter

Rolul balastului, BNA este același ca în cazul lămpii cu Hg la înaltă presiune. Același rol, ca în cazul precedent îl are condensatorul Cc. Igniterul DA are rolul de a amorsa arcul electric dintre electrozi, prin aplicarea unui impuls de tensiune de 4-5 kV.

Conectarea la rețea a lămpii cu halogenuri metalice este asemănătoare celorlalte două lămpi, adică este nevoie de un balast dimensionat în funcție de puterea lămpii, și un dispozitiv care este implicat în amorsarea arcului electric.

Aparatele de iluminat cu LED-uri au forma și puterea în funcție de aplicație și necesitatea nivelului de iluminare (vezi figura 4.8). Luând în considerare schema de principiu din figura 4.7, se poate da un exemplu numeric cu următoarele caracteristici:

- 30 de LED – 5 module,
- Curentul electric nominal de 0,35 A,
- Tensiunea de lucru de 24 V,
- Puterea nominală activă 42 W,
- Fluxul luminos 6000 lm,
- Transformator coborâtor 230/18 V.

4.4 Iluminatul arhitectural

Iluminatul arhitectural reprezintă o categorie specială, care se folosește pentru a scoate în evidență anumite caracteristici arhitecturale ale clădirilor sau operelor de artă exterioare, precum statui și fântâni.

Aparatele de iluminat folosite în scorpuri decorative trebuie să îndeplinească anumite criterii:

- Posibilitatea automatizării.
- Indice de redare a culorii bune.
- Eficacitate luminoasă >80 lm/W.
- Sistem optic dedicat.
- Posibilitatea producerii unei lumini pe diferite lungimi de undă.

Figura 4.11 ilustrează imagini care evidențiază aceste caracteristici ale aparatelor de iluminat dedicate iluminatului arhitectural.

a)



b)



Figura 4.11 Aparat de iluminat dedicate iluminatului architectural

a) Lampă cu LED-uri pentru fațada clădiri, b) Iluminatul architectural a unei biseri

4.5 Iluminatul special

Iluminatul special se referă la aplicațiile în care aparatele de iluminat sunt folosite în situații deosebite, în ceea ce privește întrebuințarea, dar și condițiile de mediu. Câteva exemple sunt:

- Aparatele de iluminat folosite pentru atenționări luminoase în situațiile de urgență.
- Aparatele folosite în condiții de mediu deosebite, precum mediile cu un procent ridicat de particule în suspenție în aer, sau umiditate ridicată.
- Aparatele de iluminat cu rol în atenționarea anumitor pericole.

Figura 4.12. prezintă imagini cu aparate de iluminat folosite în condiții speciale.



Figura 4.12 Aparat de iluminat dedicate iluminatului special

Baza matematică care poate fi folosită pentru a determina caracteristicile lumino-tehnice ale lămpilor și ale aparatelor și instalațiilor de iluminat este prezentată în continuare. Pentru determinarea caracteristicilor energetice se recomandă consultarea bazei matematice din capitolul 1.

eficacitate spectrală a lămpii electrice

$$\nu_{\lambda} = \frac{\Phi}{\Phi_e} \quad (4.1)$$

eficacitate luminoasă a lămpii electrice / aparatului de iluminat

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, [\text{lm/W}] \quad (4.2)$$

iluminare medie a lămpii electrice / aparatului de iluminat

$$E_{med} = \frac{\Phi}{A}, [\text{lx}] \quad (4.3)$$

iluminare pe o anumită direcție a unei lămpi electrice / aparatului de iluminat

$$E = \frac{I\alpha \cdot \cos\theta}{r^2}, [\text{lx}] \quad (4.4)$$

4.6 Bibliografie

- [1]. Nicolae Mogoreanu, *Iluminatul electric*, Curs universitar, Ed. Lumina, Chișinău, 2013.
- [2]. Paul Dinculescu, *Surse de lumină, Fenomene de bază și principii de realizare*, E. Printech, București, 2000.
- [3]. *The Lighting Handbook*, Zumtobel Lighting, The fourth edition, 2013, ISBN 978-3-902940-22-3.
- [4]. Ganslandt R., Hofmann H., *Handbook of Lighting Design*, 290 pages, ERCO Edition, Published by: Verlag Vieweg, 1992, ISBN 3-528-08895-8.
- [5]. European Directive - Commission Regulation (EC) No 244/2009, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:en:PDF>.

4.7 Autoevaluare

- 1) Aparatele de iluminat pot sa fie caracterizate prin:
 Putere / Tensiune nominală / Nivelul de iluminare.
- 2) Tubul fluorescent poate fi alimentat de la rețea fără elemente auxiliare.
 Adevărat / Fals
- 3) Aparatele de iluminat cu LED-uri sunt alimentate cu tensiune continuă.
 Adevărat / Fals
- 4) Lampa cu Na la înaltă presiune are nevoie de balast plus un element auxiliar pentru amorsarea arcului electric.
 Adevărat / Fals

- 5) Aparatele de iluminat cu LED-uri conțin în structura lor următoarele circuite
Redresor / Convertizor de frecvență / Filtre

Exemple de iluminat electric

Iluminat exterior



Iluminat stradal



5

Instalații electrotermice

5.1 Introducere

Instalațiile electrotermice sunt acele instalații electrice în care energia electrică este transformată în energie termică pentru realizarea diferitelor procese tehnologice.

O instalație electrotermică este compusă din totalitatea echipamentelor și dispozitivelor electrice, la care se adaugă sursele proprii de alimentare și aparatele de punere în funcțiune sau reglare utilizate pentru realizarea proceselor pentru care au fost ele construite, și anume procese electrotermice (processe în care energia termică este obținută din energie electrică și se întrebunțează în anumite scopuri tehnologice).

Aplicațiile instalațiilor și dispozitivelor electrotermice sunt unele dintre cele mai numeroase din industrie, alături de cele electromecanice. În paragrafele următoare sunt enumerate aceste aplicații (figura 5.1.):

- Industria metalurgică – topirea sau rafinarea metalelor, încălzirea semifabricatelor etc.
- Industria chimică – reacții chimice, încălzirea recipientelor și coloanelor.
- Industria constructoare de mașini – forjare, uscare, matrițare și călire.
- Industria extractivă – separarea minereurilor.
- Industria materialelor de construcții – topirea sticlei.
- Industria electronică – uscare.
- Industria lemnului – uscare.
- Industria celulozei și hârtiei – uscare.
- Industria alimentară – sterilizare, prepararea hranei.
- Consumatori casnici – încălzirea locuinței, alimentelor și apei.

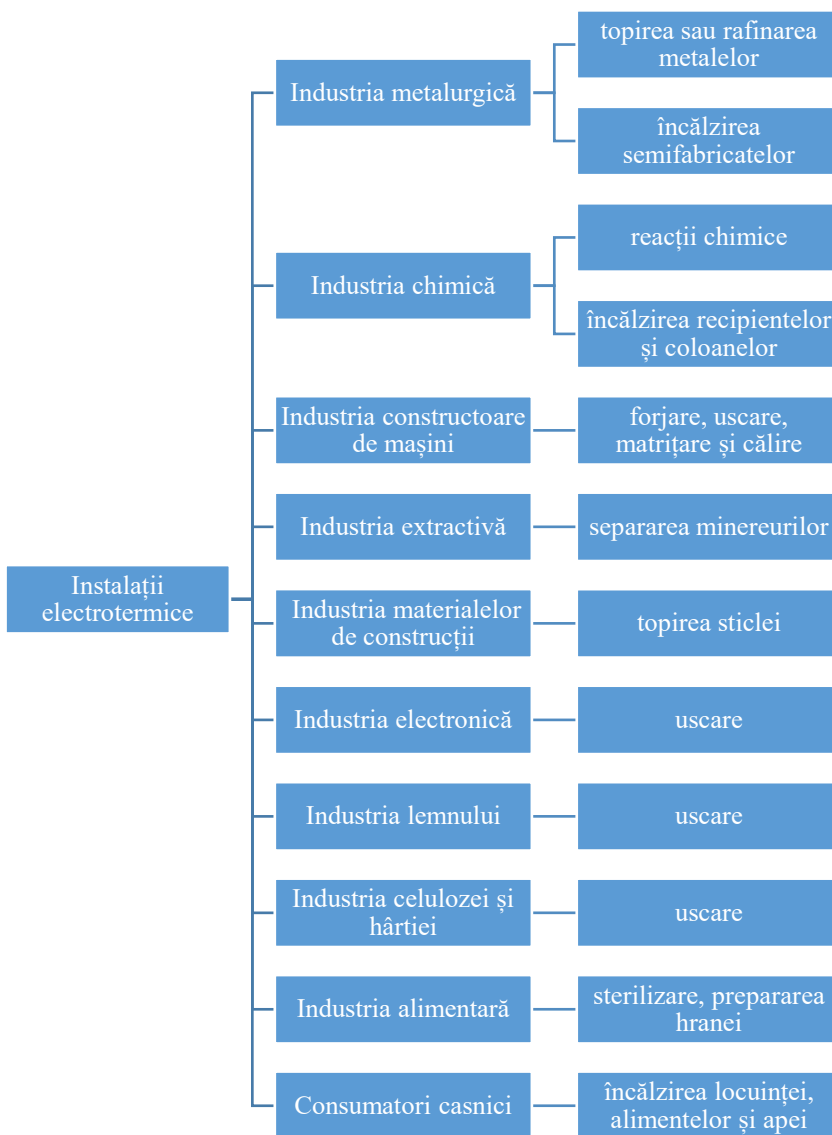


Figura 5.1 Aplicațiile instalațiilor electrotermice

Instalațiile electrotermice având multe aplicații, așa cum se observă din lista anterioară, sunt și foarte diverse în ceea ce privește puterea nominală, temperatura de lucru, dimensiunea, etc.; totuși se pot evidenția câteva caracteristici definitorii ale acestora în raport cu alte instalații folosite în procesele termice.

Aceste avantaje sunt:

1. Temperaturi de lucru mai mari de 2000 °C, putându-se ajunge până la 20000 K. Temperatura de lucru depinde de aplicație, deoarece în cazul dispozitivelor de uz casnic, temperatura este limitată din motive de siguranță. Însă în industria metalurgică temperatura de lucru poate atinge temperaturiile amintite anterior.
2. Realizarea unor densități ridicate de putere, care pot să ajungă până la 100 kW/cm³.
3. Posibilitatea reglării foarte precise a temperaturii. Dispozitivele și instalațiile electrotermice actuale conțin o importantă componentă electronică care ajută la manipulării facile a temperaturii de lucru.
4. Posibilitatea utilizării facile a atmosferelor controlate. Datorită faptului că nu există reziduri de ardere, și alți compuși rezultați pentru a obține energia termică necesară, există posibilitatea creării unor incinte cu atmosfere controlate, cu concentrații diferite de gaze și presiuni de lucru diferite.
5. Instalațiile pot fi aduse rapid în starea de funcționare. Comparativ cu alte tipuri de instalații termice care folosesc alte surse de energie (exemplu – energia calorică a combustibililor fosili), instalațiile electrotermice ajung la temperatura de lucru într-un timp foarte scurt.
6. Se poate realiza o concentrarea precisă a energiei termice în materialele supuse încălzirii. Această caracteristică permite procese tehnologice foarte precise, ceea ce crește calitatea produselor obținute și eficiența totală a instalației.
7. Există posibilitatea mecanizării și automatizării complexe a funcționării.

5.2. Tipuri de instalații electrotermice

Transformarea energiei electrice în energie termică se poate face prin diferite procedee (figura 5.2.):

- Încălzirea prin rezistență – directă și indirectă.
- Încălzirea prin rezistență și radiații infraroșii.
- Încălzirea prin inducție electromagnetică.
- Încălzirea capacitivă.
- Încălzirea cu arc electric.
- Încălzirea în câmp de microunde.
- Încălzirea folosind fascicul de electroni.

Încălzirea directă și indirectă prin rezistență se aplică în construcția cuptoarelor cu rezistoare. În cazul instalațiilor care folosesc încălzirea directă prin rezistență (figura 5.3.), materialul de încălzit, se alimentează direct la tensiunea nominală, ceea ce duce la încălzirea piesei prin efectul Joule-Lenz, respectiv transmiterea căldurii prin conducție termică. În cazul cuptoarelor și dispozitivelor care își bazează funcționarea pe încălzirea indirectă prin rezistență (figura 5.4.), căldura se transmite prin convecție și radiație termică de la sursa de căldură, respectiv prin conducție termică în interiorul piesei de încălzit.

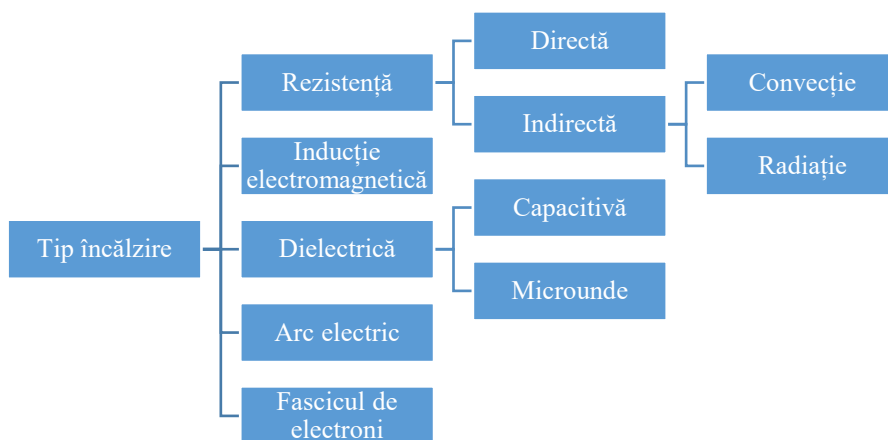


Figura 5.2. Procedee electrotermice. Tipuri de instalații

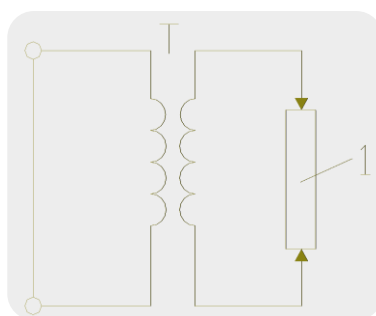


Figura 5.3. Principiu încălzirii directe prin rezistență

Încălzirea indirectă prin rezistență cu transmiterea căldurii prin infraroșii stă la baza instalațiilor și dispozitivelor care au în componență surse de radiații

infraroșii, care se caracterizează prin faptul că sursele de căldură sunt încălzire la o temperatură mai mare de 525 °C.

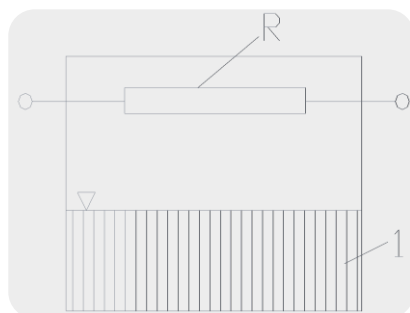
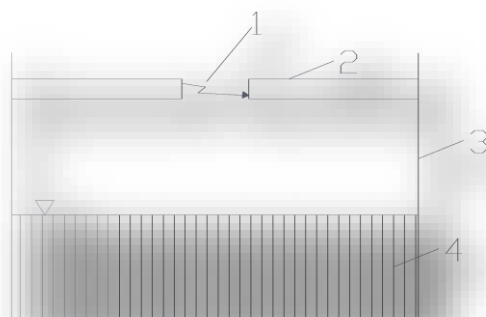


Figura 5.4. Principiu încălzirii indirecte prin rezistență

Cuptoarele cu arc electric (figura 5.6.) se împart în două categorii, și anume producerea arcului electric direct între electrodul de descărcare și piesa de încălzit, respectiv indirect, când arc electric apare între doi electrozi, iar căldura produsă se transmite prin convecție și radiație piesei de încălzit. Energia termică în interiorul pieselor se propagă prin conducție termică.

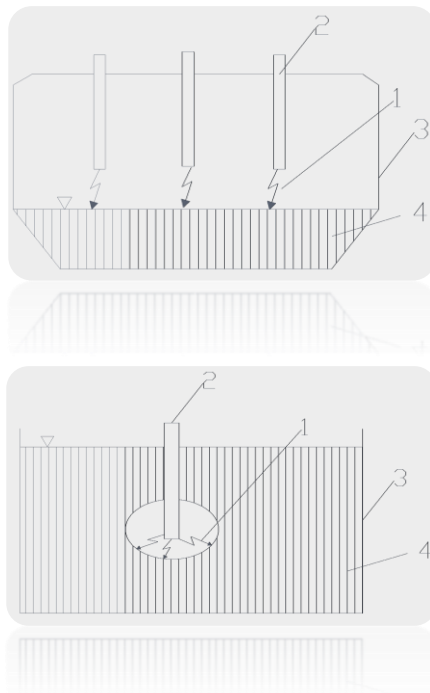
Încălzirea prin inducție electromagnetică are la bază producerea căldurii prin efectul Joule-Lenz, precum și datorită apariției curenților turbionari. Acest tip de proces electrotermic este abordat în două tipuri de instalații:

- Cuptoare pentru topirea cu creuzet sau canal.
- Instalații pentru încălzirea în profunzime, superficială sau aplicații speciale.



1 – arc electric, 2 – electrod, 3 – cuptor, 4 - șarja

Figura 5.5 Principiu încălzirii cu arc electric



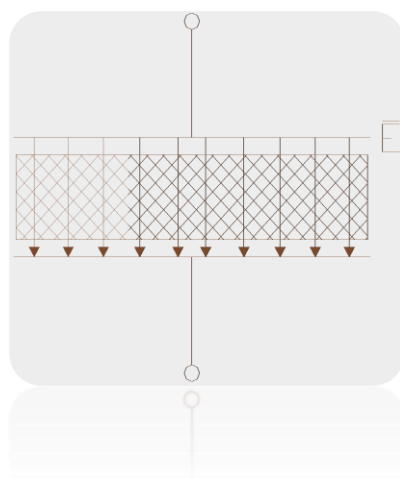
1 – arc electric, 2 – electrod, 3 – cuptor, 4 - șarja

Figura 5.6. Principiu încălzirii cu arc electric

Materialele dielectrice (izolatoare electrice) sunt încălzite folosind abordarea încălzirii capacitive și cu câmp de microunde. Cuptoarele capacitive (figura 5.7.) au la origine efectul termic al pierderilor prin conducție electrică și histerezis electric. Caracteristic acestui tip de cuptoare este faptul că instalația cuprinde un condensator de putere, iar piesa de încălzit se va introduce între armăturile condensatorului, având rol de dielectric. În cazul cuptoarelor cu microunde, incinta unde se introduce piesa de încălzit se închide ermetic, iar generatoarele de microunde vor produce radiații la frecvențe radio, în spectrul 0,3 ... 300 GHz.

Încălzirea prin fascicul de electroni este folosită în aplicațiile unde este nevoie de mare precizie. La baza acestui proces electrotermic stă transformarea în căldură a energiei cinetice a unui flux de electroni care bombardează suprafața încălzirii / a piesei. Instalațiile care folosesc încălzirea cu fascicul de electroni au o construcție specială pentru a crea condițiile necesare producerii și accelerării

fluxului de electroni la viteze suficient de mari pentru a produce energia cinetică corespunzătoare.



E – valoarea câmpului electric

Figura 5.7. Principiu încălzirii prin inducție electromagnetică

5.3. Propagarea energiei termice (căldurii)

Propagarea energiei termice produsă de instalațiile și dispozitivele electrotermice se realizează prin conducție termică, convecție termică și radiație termică (radiații electromagnetice infraroșii) (figura 5.7.).

Conducția termică presupune transmiterea căldurii în interiorul unui mediu (solid, lichid sau gazos) la nivel de molecule. Astfel, în interiorul piesei de încălzit, energia termică se propagă de la moleculele care au energie termică superioară, înspre cele cu energie termică mai mică, pentru echilibrarea energiei termice în interiorul piesei de încălzit.

Convecția termică se referă la transferul energiei termice la suprafața unui solid spălat de un lichid sau gaz (fluid). În consecință, piesa de încălzit primește energia termică de la sursa de căldură indirectă prin intermediul unui mediu suplimentar fluid.

Transferul energiei termice prin radiație electromagnetică termică presupune transmiterea căldurii între corpuri cu temperaturi diferite prin radiație electromagnetică. Caracteristic acestui proces de transfer al energiei termice este faptul că sursa de căldură are o temperatură mai ridicată de 779 K, astfel încât

aceasta va elibera energia termică sub formă de radiații electromagnetice în spectrul infraroșii.

Radiațiile infraroșii produse de sursa de energie termică lovesc material de încălzit, care apoi sunt reflectate, absorbite sau transmise. Radiațiile infraroșii reflectate reprezintă aprox. 4 % (materiale organice), restul fiind absorbite, adâncimea de pătrundere a acestora este de 10 mai mare la radiațiile infraroșii scurte (lungimea de undă $< 2 \mu\text{m}$) față de cele lungi (lungimea de undă $> 10 \mu\text{m}$).

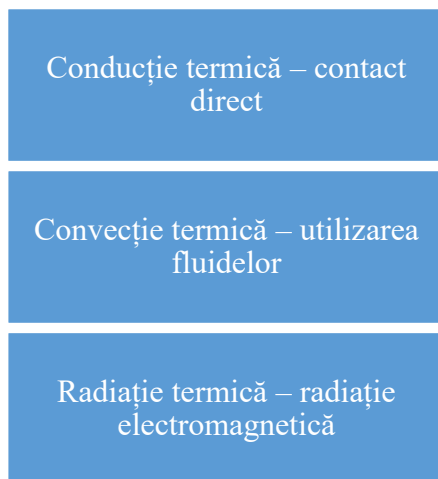


Figura 5.8 Transmiterea căldurii în procesele electrotermice

Rata de transmitere a radiațiilor infraroșii depinde de:

- Temperatura inițială a corpului.
- Temperatura radiatorului (sursei de căldură).
- Caracteristicile fizice ale obiectelor (forma și proprietățile suprafețelor).

5.4. Indicatorii energetici

Din punct de vedere energetic, toate instalațiile electrotermice pot fi caracterizate prin cinci indicatori:

1. Randamentul;
2. Factorul de putere;
3. Puterile – activă, reactivă și aparentă.
4. Consumul specific de energie;
5. Productivitățile.

O altă caracteristică a instalațiilor electrotermice este schema electrică echivalentă, a cărei formă generală este ilustrată în figura 5.9.

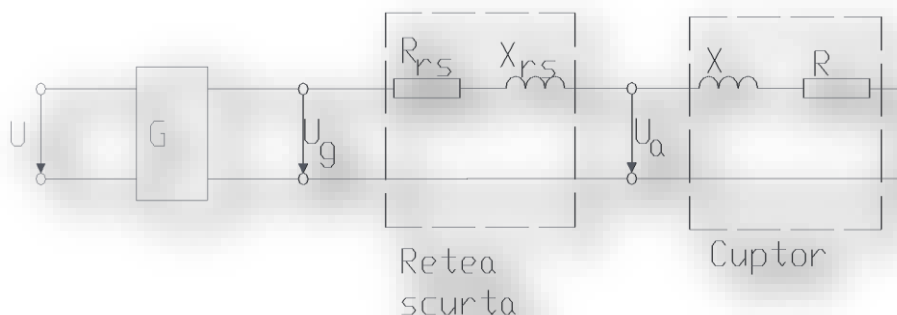


Figura 5.9 Schema electrică echivalentă generală a unei instalații electrotermice

În figura 5.9, se poate observa tensiunea de alimentare U , care alimentează generatorul G a instalației. Generatorul instalației are rolul de a transforma caracteristicile energiei electrice (tensiune, frecvență, polaritate) de la alimentare, în energie electrică cu caracteristici necesare funcționării eficiente a instalației electrotermice. Următoarea componentă a instalației este rețeaua scurtă, care are rolul de a transporta energia electrică de la generator înspre cuptor (sau componenta dedicată realizării procesului electrotermic). Tensiunea aplicată rețelei scurte este notată cu U_g , iar cea de la bornele cuptorului este U_a . Rețeaua scurtă și cuptorul sunt reprezentate prin impedanțele corespunzătoare, compuse din rezistență și inductanță.

Randamentul instalației electrotermice poate fi explicat prin intermediul diagramei Sankey din figura 5.10, respectiv relațiilor (5.1) și (5.2).

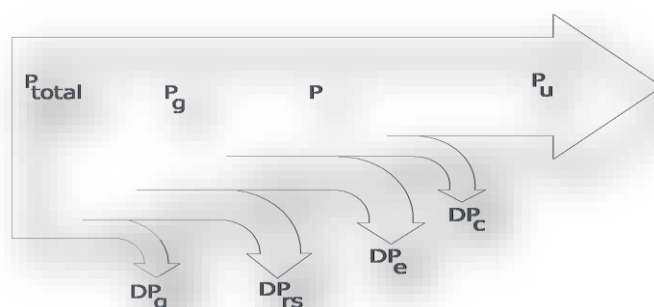


Figura 5.10. Diagrama Sankey a unei instalații electrotermice

$$\eta_{total} = \frac{P_u}{P_{total}} 100 = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_g + \Delta P_{rs} + \Delta P_t + \Delta P_e} 100 [\%] \quad (5.1)$$

$$\eta_{total} = \eta_g \cdot \eta_{rs} \cdot \eta_c [\%] \quad (5.2)$$

Notațiile din figura 5.10 și relațiile (5.1) și (5.2) au următoarea însemnătate:

- P_{total} – puterea totală a instalației, P_g – puterea absorbită de generator, P – puterea absorbită de cuptor, P_u – puterea activă folosită util în procesul termic, ΔP_g – pierderile de putere în generator, ΔP_{rs} – pierderile de putere în rețeaua scurtă, ΔP_e – pierderi electrice în cuptor, $\Delta P_{c/t}$ – pierderi termice în cuptor.
- η_{total} – randamentul total, η_g – randamentul generatorului, η_{rs} – randamentul rețelei scurte, η_c – randamentul cuptorului.

Puterea utilă, care reprezintă puterea necesară încălzirii masei m [kg] a încărcăturii, de la temperatura inițială v_i la temperatura finală v_f în timpul t [s], se poate determina prin folosirea relației (5.3). Considerând calculul randamentului doar pentru cuptor, fapt caracteristic dispozitivelor de mici dimensiuni găsite la consumatorii casnici relația pentru randamentul dispozitivului este (5.4).

$$P_u = \frac{m \cdot c \cdot (\vartheta_f - \vartheta_i)}{t} = \frac{m \cdot i}{t} [W] \quad (5.3)$$

$$\eta_c = \frac{P_u}{P} 100 = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_t + \Delta P_e} 100 [\%] \quad (5.4)$$

Despre pierderile termice se poate spune că depind de soluția constructivă a cuptorului, adică încălzirea pereților incintei la temperatura de lucru, pierderile spre exterior prin pereți, orificile și ușile cuptorului, încălzirea instalațiilor auxiliare de susținere și transport a încărcăturii și încălzirea atmosferei din cuptor.

Puterile, factorul de putere și consumul specific sunt caracteristici de bază ale instalațiilor și dispozitivelor electrotermice din punct de vedere a indicatorilor electroenergetici.

$$P = R \cdot I^2 [W] \quad (5.5)$$

$$Q = X \cdot I^2 [VAr] \quad (5.6)$$

$$P_{total} = \frac{P_u}{\eta_{total}} \quad (5.7)$$

$$Q_{total} = Q + X_{rs} I^2 + Q_{g0} - Q_c \quad (5.8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (5.9)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (10)$$

$$e = \frac{P \cdot t}{m} = \frac{i}{\eta_c} \text{ [kWh/kg, tonă, bucăți,]} \quad (5.11)$$

Unde P este puterea activă a instalației electrotermice, Q – puterea reactivă a instalației electrotermice, S – puterea aparentă, $\cos\varphi$ – factorul de putere, P_{total} – puterea totală a instalației absorbită de la rețeaua de alimentare, X_{rs} – reactanța rețelei scurte, i – entalpia, Q_{g0} - puterea reactivă a generatorului, Q_c - puterea reactivă produsă de sistemul de compensare a puterii reactive.

Alte caracteristici comune ale tuturor instalațiilor electrotermice se referă la construcția acestora, respectiv a materialelor utilizate în construcția acestora. Aceste materiale se împart în două mari categorii: materiale refractare și materiale termoizolante.

Materialele refractare sunt materiale nemetalice (în general anorganice), care indiferent de compoziție, se topesc (rezistă) la temperaturi mai mari de 1450 °C. Într-adevăr, refractaritatea se referă la funcțiile de rezistență la temperaturi ridicate, rezistență la deformare și rezistență la coroziune, deci această proprietate face referire la gradul de topire termică. Când materialul se înmoaie într-o anumită măsură, temperatura formată este un indice fizic al acestuia. Despre materialele refractare în ceea ce privește dispozitivele electrotermice se pot afirma următoarele:

- Ele se folosesc în construcția căptușelilor interioare ale camerei sau băii cuptorului.
- Au temperatură mare de lucru, și anume 1400...2000°C, rezistență mecanică la temperaturi mari.
- Cele mai folosite materiale refractare sunt silica, argila, argila refractară, alumina, magnezita, compuși ai zirconului, aliaje oțel sau fontă cu crom / crom-nichel.

Materialele termoizolante sunt materiale folosite pentru a menține temperatura în interiorul cuptorului, reducând pierderile de căldură și îmbunătățind eficiența energetică. Aceste materiale sunt, de obicei, rezistente la temperaturi ridicate și pot include vată ceramică, polistiren expandat sau

extrudat, cărămizi diatomitice, vermiculit granular, silicoalumina, azbest, azbociment, vată de zgură, de sticlă sau minerală.

Aceste materiale intră în zidăria cuptoarelor, sub forma unui strat, pentru ca carcasa metalică exterioară a cuptorului să nu depășească 60-80°C.

Despre cele mai populare materiale termoizolante se pot afirma următoarele:

- Vata ceramică - este un material rezistent la temperaturi extreme, utilizat în cuptoarele industriale și în izolația semineelor. Acest tip de vată poate rezista la temperaturi de până la 1260°C.
- Polistirenul - un material popular și accesibil, polistirenul expandat sau extrudat, este folosit pentru izolația exterioară și interioară a cuptoarelor. Polistirenul extrudat este mai dur și mai rezistent, fiind recomandat pentru izolații subterane și în zone cu cicluri de îngheț-dezgeț.
- Cărămizile diatomitice – cărămizi din spumă termoizolantă oferă protecție la incendii și sunt utilizate în construcții.
- Vermiculitul granular - acesta poate fi folosit în cuptoare pentru a crea o barieră suplimentară de izolație, împreună cu alte materiale termoizolante.
- Mortarul pentru etanșare - mortarul este folosit pentru a etanșa rosturile dintre blocurile izolante și pentru a preveni scurgerile de căldură

5.5. Bibliografie

- [1]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998.
- [2]. Sergio Lupi, *Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating*, Springer, 2018.

5.6. Autoevaluare

1) Avantajele utilizării încălzirii utilizând energia electrică sunt:

- Randament ridicat / Posibilitatea automatizării / Dimensiuni mici /
- Gama de puteri este mare

2) Printre instalațiile termoelectrice sunt:

- Cuptoarele cu rezistență / Cuptoarele din fontă / Cuptoarele capacitive / Cuptoarele cu fascicul de electroni

- 3) În cadru încălzirii directe prin rezistență corpul de încălzit este direct parcurs de curentul electric:
 Adevărat / Fals
- 4) Transmiterea căldurii în interiorul unui mediu se face prin fenomenul de:
 Conducție termică / Convecție termică / Radiație termică
- 5) Cuptoarele cu rezistoare pot fi folosite pentru tratamentele termice ale materialelor metalice.
 Adevărat / Fals

6

Încălzirea prin rezistență

6.1. Introducere

Instalațiile și dispozitivele electrotermice din această categorie își bazează funcționarea pe efectul Joule-Lenz al curentului care parcurge materialul de încălzit (încălzire directă) sau elementele rezistive speciale (încălzirea indirectă). Dar, indiferent de construcția și propagarea căldurii, aceste instalații și dispozitive au următoarele caracteristici comune:

1. Legea lui Joule – Lenz - Ambele se bazează pe principiul conform căruia energia electrică este convertită în căldură prin rezistor:

$$E = R \cdot I^2 \cdot t [J], [Ws] \quad (6.1)$$

unde E este cantitatea de căldură / energie termică produsă de rezistor, R este valoarea rezistenței rezistorului parcurs de curent $[\Omega]$, I este valoarea efectivă a curentului $[A]$, iar t este timpul, $[s]$.

2. Utilizarea energiei electrice - Energia electrică este singura formă de energie folosită, astfel nu este implicată nicio ardere sau reacție chimică.
3. Încălzirea controlată – Ambele încălziri prin rezistență permit un control precis al temperaturii folosind setări de tensiune, curent sau timp.
4. Fără piese mobile - Ambele sisteme nu au de obicei piese mecanice în zona de încălzire (piesele care sunt parcurse de curentul electric sunt fixe), ceea ce le face fiabile și necesită întreținere redusă.
5. Generarea instantanee de căldură - Căldura este generată aproape instantaneu după aplicarea curentului, astfel ambele metode fiind potrivite pentru procese rapide de pornire/oprire.
6. Funcționarea silențioasă - Nu se generează zgomot sau vibrații în timpul funcționării.

7. Proces de energie curată – Încălzirea prin rezistență este curată, deoarece nu produce gaze de ardere, fum sau poluanți.
8. Necesitatea unei izolații electrice - Izolația este necesară pentru a preveni scurtcircuitele și a asigura siguranța utilizatorului.
9. Transferul de căldură este fundamental - Conducția termică (și uneori convecția sau radiația) joacă un rol în transferul de căldură, fie către material, fie în interiorul acestuia.
10. Utilizat în aplicații industriale și casnice - Ambele se găsesc în procese industriale (cuptoare de încălzire, figura 6.1. b) și în aparate electrocasnice (prăjitoare de pâine, fiare de călcat, încălzitoare, figura 6.1.a.).

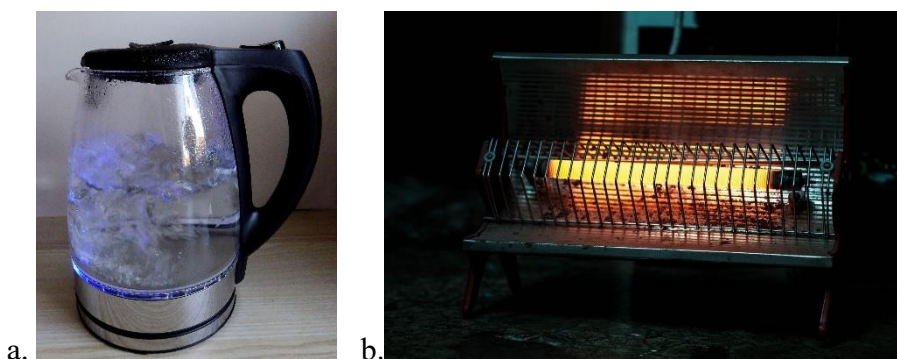


Figura 6.1. Aparate electrotermice – încălzirea prin rezistență

În următoarele capitole se vor prezenta cele două mari clase de dispozitive și instalații care folosesc încălzirea directă prin rezistență, respectiv încălzirea indirectă prin rezistență. Aceasta din urmă se împarte în două clase, și anume încălzirea prin convecție termică și încălzirea prin radiație termică. Categoriile de receptoare menționate anterior sunt evidențiate în diagrama din figura 6.2.

Încălzirea directă prin rezistență

- Instalație pentru tratarea semifabricatelor metalice
- Cuptoare pentru tratarea pieselor metalice

Încălzirea indirectă prin rezistență

- Convecție termică – cuptorul electric cu convecție
- Radiație termică – panouri încălzitoare cu radiații infraroșii

Figura 6.2. Clasificarea receptoarelor electrotermice

6.2. Încălzirea directă prin rezistență

În încălzirea directă prin rezistență, materialul care trebuie încălzit este el însuși elementul rezistiv, rezistorul. Mai exact, curentul trece direct prin piesa de prelucrat, care se încălzește datorită propriei rezistențe.

Configurația de bază a unui dispozitiv care folosește încălzirea directă prin rezistență cuprinde doi sau mai mulți electrozi, care sunt conectați la o sursă de tensiune și piesa de prelucrat care este plasată între electrozi. În momentul alimentării dispozitivului, curentul trece prin electrozi și piesa de prelucrat, iar proprietatea rezistivă a materialului face ca acesta să se încălzească intern, în tot volumul piesei.

Electrozii sunt realizați din materiale caracterizate de rezistivitate electrică mică (se folosește ca material de fabricație de obicei cuprul sau grafitul), având forme dedicate procesului tehnologic.

Piesa de prelucrat trebuie să fie dintr-un material care are trei caracteristici obligatorii, și anume: (1) conductivitate electrică adecvată (piesa de prelucrat trebuie să fie cel puțin moderat conductivă, deși nu foarte conductivă (precum cuprul), deoarece o conductivitate ridicată ar reduce încălzirea rezistivă.), (2) toleranță termică mare (trebuie să reziste la temperatura generată fără a se deteriora structural) și (3) rezistență uniformă (pentru a asigura o încălzire uniformă, rezistivitatea electrică pe volum trebuie să fie relativ constantă). Din aceste afirmații rezultă că materialul piesei de prelucrat este cel puțin metalic, de obicei feros.

Acest tip de încălzire se împarte în încălzirea în c.c. și încălzirea în c.a., atunci când se ia în considerare natura curentului cu care lucrează instalația. Cele care funcționează în c.a. pot să fie monofazate (alimentare fază-neutru de lucru) sau trifazate (alimentare cu sistem trifazat de tensiuni cu sau fără nul) în funcție de puterea instalațiilor de încălzire. Un alt aspect al acestor instalații este serviciul, care poate fi continuu sau de scurtă durată (acest aspect se observă la schemele electrice de principiu din figura 6.3). Din punctul de vedere al mediului în care se află piesa de prelucrat, aceste instalații pot fi deschise (figura 6.3.) sau închise (figura 6.4, cuptoare).

Acest procedeu de încălzire a materialelor metalice asigură viteze mari de încălzire, productivități și randamente ridicate. Dar, este necesar curenți foarte mari (kA), la tensiuni mici (sub 42 V), care se obțin de la transformatoare

coborâtoare în a căror secundar este conectată sarcina. În consecință, apar probleme de siguranță din cauza acestor curenți mari. Aceste probleme se rezolvă printr-o izolație adecvată și deconectări automate corespunzătoare, în plus piesa de prelucrat trebuie izolată electric de alte sisteme.

Productivitatea mare a acestor sisteme își are originea din posibilitatea controlului mărit a acestora. Într-adevăr, se poate controla:

- Curentul, prin care se ajustează intensitatea termică a piesei de prelucrat;
- Tensiunea, cu ajutorul căreia se controlează curentul;
- Timpul ajută la controlul cantității de energie folosită în procesul de încălzire;
- Presiunea de contact afectează densitatea de curent și eficiența încălzirii;
- Geometria materialului influențează rezistența și, prin urmare, profilul de încălzire.

Randamentul foarte ridicat care intră în intervalul 90-100%, apare deoarece aproape toată energia electrică este transformată în căldură în interiorul piesei de prelucrat. De altfel, pierderile care apar, se datorează în principal rezistenței de contact a electrodului și pierderilor de căldură în mediul înconjurător.

Un alt aspect important îl reprezintă uniformitatea temperaturii din interiorul piesei de prelucrat, care depinde de omogenitatea materialului, secțiunea transversală a piesei, amplasarea și presiunea electrozilor, dar și simetria traseului de curent.

Un dezavantaj al instalațiilor care se bazează pe încălzirea directă prin rezistență este cerința de răcire, care apare în situațiile în care procesul tehnologic generează căldură dincolo de toleranța materialului, electrozii sau componentele învecinate trebuie protejate, și în sistemele de mare putere, se pot utiliza electrozi răciți cu apă.

Relațiile matematice prin care se caracterizează procesul de încălzire directă prin rezistență este descrisă prin relațiile (6.1), (5.5) și (6.2).

$$\Delta T = \frac{E}{mc} [K] \quad (6.2)$$

unde ΔT este diferența de temperatură dintre starea inițială și starea finală a piesei de prelucrat, m – masa piesei, E – energia termică determinată cu relația (6.1), c – capacitatea termică specifică, care este o constantă de material [$J/(kg \cdot K)$].

Pentru determinarea pierderilor de căldură datorate conducție, convecție și radiației termice și determinarea randamentului (menționat și explicat matematic

în capitolul precedent), este nevoie de implicarea legilor radiației termice din Anexa 1, dar și legea lui Fourier și legea răcirii a lui Newton descrise în Anexa 5.

Încălzirea directă prin rezistență se folosește pentru două tipuri de procese tehnologice: încălzirea directă a semifabricatelor metalice și obținerea diferitelor compuși în cuptoare electrice speciale.

Încălzirea directă a semifabricatelor metalice se realizează prin intermediul instalațiilor electrotermice deschise; piesa de prelucrat este în aerul atmosferic. Figura 6.3 ilustrează schemele monofilare de principiu a două instalații pentru prelucrarea semifabricatelor. Se observă în figură două tipuri de instalații, și anume cu funcționare continuă (figura 6.3.b.), respectiv funcționare intermitentă (figura 6.3.a.). În cazul funcționării intermitente, electrozii sunt sub formă de cleme de prindere, care vor prinde piesa de prelucrat de dimensiune redusă. Instalația cu serviciu continuu este prevăzută cu electrozi sub formă de role, care au rolul de a transmite curentul la piesa de prelucrat de lungimi mari, dar și de a mișca piesa.

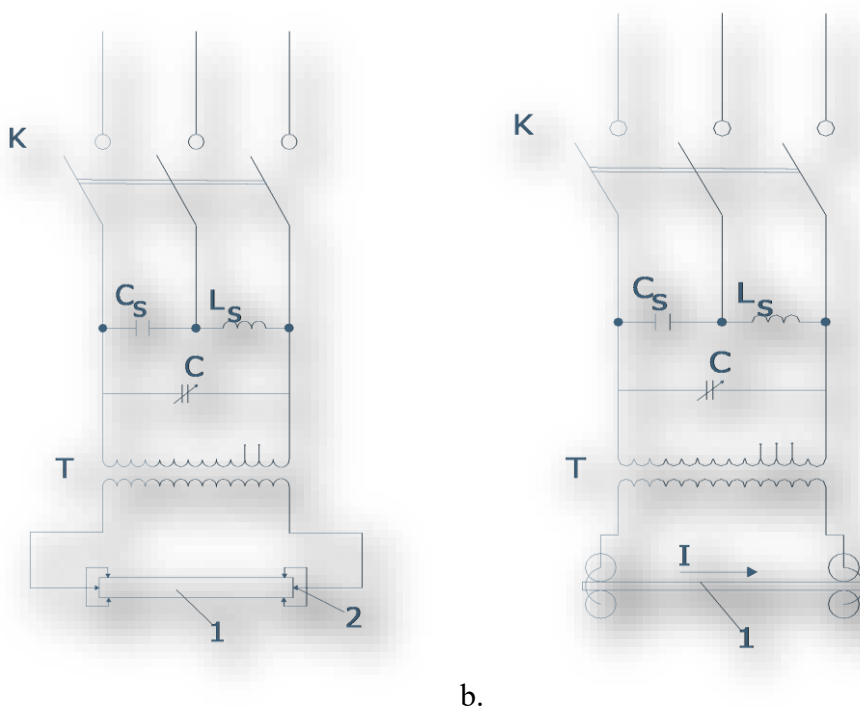


Figura 6.3. Instalații pentru încălzirea directă prin rezistență
 1 – piesa de prelucrat, 2 – electrozi, T – autotransformator, C – condensator de compensare, Cs + Ls – filtru a componentelor armonice, K – contactor trifazat, I – curentul prin piesa de prelucrat

În aceste instalații, piesele de prelucrat, adică semifabricatele sunt prinse cu ajutorul unor contacte sau bancuri din bronz sau cupru răcite cu apă. Specific acestor instalații sunt curenții mari de ordinul 4...10 kA, și puteri de 0,1...10 MVA.

Încălzirea directă prin rezistență în instalațiile închise, adică cuptoarele electrice, are aceeași caracteristici ca în cazul instalațiilor deschise, diferența constă în faptul că materialul de prelucrat se află într-o încălț specială, camera cuptorului unde este supus procesului tehnologic de încălzire.

Materialul de prelucrat, denumit și încărcătură, la cuptoarele cu încălzire directă prin rezistență poate solidă, lichidă sau metalică în electroliți topiți.

- Cuptoarele cu încărcătură solidă – încălzirea semifabricatelor metalice sub formă de bare, țevi, sârme; cuptoare pentru grafitare și producerea carborundului.
- Cuptoarele cu încărcătură lichidă – încălzirea apei, topirea sticlei folosind c.a. sau rafinarea Al utilizând c.c.
- Cuptoarele cu băi de săruri – folosesc c.a. pentru încălzirea încărcăturilor metalice în electroliți topiți.

Cuptoarele cu încărcătură solidă, adică cuptoarele pentru grafitare și producere a carborundului sunt descrise schematic în figură 6.4.

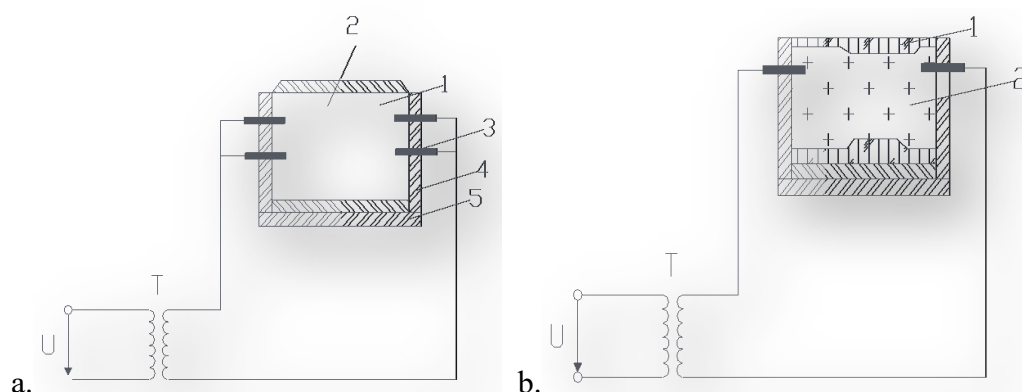


Figura 6.4. Instalații pentru încălzirea directă prin rezistență – cuptoare

U – tensiunea de alimentare, T – transformator, 2 – încărcătura, 3 – electrozi, 4 și 5 peretii speciali ai cuptorului din materiale refractare și termoizolatoare, a. 1- material de adaus, b. 1 capacul cuptorului

Cuptoarele electrice pentru grafitare (procesul prin care se acoperă cu grafit piese metalice cu scopul de a le îmbunătăți proprietățile electrice) și producerea de carbunuri sunt folosite pentru producerea industrială a grafitului și carbunului (SiC, material folosit pentru rectificarea materialelor mai dure, de exemplu produse din fontă dură turnată, titan și materiale ceramice pentru scule așchietoare). Procesul de încălzire în aceste cuptoare se realizează treptat, astfel se efectuează o încălzire lentă până la 2400...2700°C, urmată de răcire lentă 7...13 zile. Tensiunile la care se lucrează au valori de 50 – 120 V, ele obținându-se cu ajutorul unor transformatoare coborâtoare de puteri de până la 10 MVA.

În concluzie, avantajele și dezavantajele încălzirii directe prin rezistență sunt sintetizate în figura 6.5.

<p>Încălzire rapidă. Eficiență ridicată. Configurare simplă. Proces curat (fără fum sau flăcări deschise). Dimensiune compactă a sistemului. Control preciz. Întreținere minimă (în special în sistemele de alimentare în stare solidă).</p>	<p>Funcționează doar cu materiale conductiv. Risc de încălzire neuniformă dacă rezistivitatea este inconsistentă. Niveluri ridicate de curent necesită o infrastructură specială (cabluri groase, contactoare robuste). Uzura electrozilor și degradarea contactelor în timp. Risc de formare a arcului electric la contacte dacă nu sunt întreținute corespunzător.</p>
--	--

Figura 6.5. Avantajele și dezavantajele încălzirii directe prin rezistență

Tendențele în domeniul încălzirii directe prin rezistență sunt:

- Utilizarea electronicii de putere în stare solidă (bazată pe IGBT) pentru control de precizie.
- Sisteme automate de monitorizare a contactelor folosind inteligența artificială.
- Integrarea cu producția inteligentă (Industria 4.0).
- Sisteme de recuperare a energiei pentru reutilizarea căldurii reziduale.

Baza matematică care poate fi utilizată pentru a rezolva problemele legate de încălzirea directă prin rezistență este prezentată în mare parte în capitolul 1 și capitolul 5, unde sunt relațiile matematice pentru determinarea caracteristicile energiei electrice, a parametrilor electrici și a indicatorilor energetici. Determinarea energiei calorice (6.3) și puterii active (6.4) asociată. Relația (6.3) este o variantă a relației (6.2).

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T [J] \quad (6.3)$$

Unde E este energia calorică produsă atunci când se trece de la o temperatură inferioară, T_i , la una superioară, T_f , $\Delta T = T_f - T_i$ [K], m – masa corpului, [kg], c – capacitatea calorică specifică [kJ/(kgK)] sau [J/(kgK)].

$$P = \frac{E}{t} \left[\frac{J}{s} \right], [W] \quad (6.4)$$

6.3. Încălzirea indirectă prin rezistență

Încălzirea indirectă prin rezistență este un proces tehnologic în care energia electrică este convertită în căldură folosind un element de încălzire rezistiv, dar obiectul încălzit nu este în contact direct cu elementul. În schimb, căldura este transferată prin conducție, convecție sau radiație termică de la elementul încălzit la obiectul de încălzit. Principiul de funcționare a încălzirii indirecte prin rezistență este ilustrată în figura 6.6.

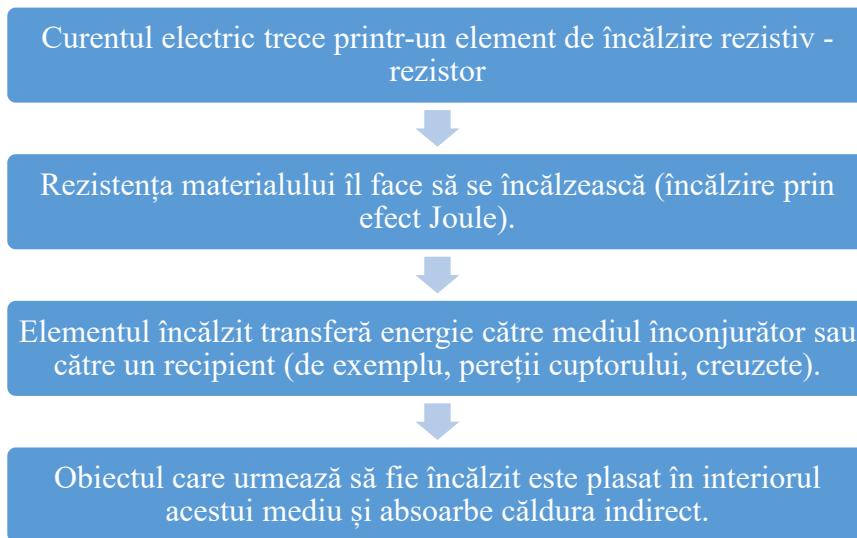


Figura 6.6. Principiul de funcționare al încălzirii indirecte prin rezistență

Caracteristic acestui tip de încălzire prin rezistență este faptul că, căldura dezvoltată prin efectul Joule-Lenz în elementele încălzitoare (rezistoarele cuptorului, sau a dispozitivului electrotermic) se transmite prin convecție și radiație termică către obiectul / piesa de încălzit, iar în interiorul acesteia se propagă prin conducție termică. Figura 5.4 ilustrează grosier principiul de funcționare al unui cuptor cu rezistoare.

Dacă se ia în considerare metoda principală de propagare a căldurii de la sursă înspre corpul care se încălzește, atunci receptoare de forță care își bazează funcționarea pe acest tip de încălzire se împart în două clase mari, și anume dispozitive / instalații electrotermice cu rezistoare și cu surse de radiații infraroșii. În consecință, în acest capitol, cele două tipuri de receptoare vor fi tratate separat.

6.3.1. Încălzirea prin convecție termică

Acest subcapitol cuprinde caracteristicile de bază și tipurile de dispozitive și instalații industriale, care folosesc în principiu încălzirea prin convecție termică. Astfel, cele mai populare receptoare electrotermice sunt cuptoarele electrice cu rezistoare.

Există o mare varietate de tipuri constructive de cuptoare cu rezistoare cu încălzire indirectă utilizate la tratamente termice și încălziri, topirea metalelor și aliajelor, cuptoare de laborator, aparate pentru încălzirea locuințelor.

Tipuri de cuptoare cu rezistoare în funcție de serviciul de funcționare se pot clasifica în cuptoare cu funcționare continuă, unde materialele care se încălzesc se deplasează în mod continuu sau periodic în interiorul cuptorului, de la intrare spre ieșire. Deplasarea pieselor de prelucrat se face prin intermediul diferitelor sisteme automatizate, care au ca element de deplasare o bandă, lanț, role, transportor elicoidal, elevatori cu Cu, vatră mobilă, grătar oscilant. Avantajul acestor cuptoare puternic automatizate este productivitate mare și consum specific de energie redus.

Cuptoare cu funcționare intermitentă, sunt cea de-a doua categorie mare de instalații electrotermice. Specific acestora este faptul că materialele nu își modifică poziția în timpul încălzirii, ciclul de funcționare cuprinde încărcarea, încălzirea în cuptor și descărcarea.

Din punct de vedere al mediului de încălzire, cuptoarele și dispozitivele electrotermice cu rezistoare pot să fie cu aer, vid, gaze de protecție, gaze de reacție, băi de săruri sau băi de zgură.

Aceste receptoare se pot alimenta în joasă tensiune (receptoare monofazate sau trifazate) sau în medie tensiune (receptoare trifazate). Cele alimentate la joasă tensiune sunt receptoare care au puterea de maxim 50 kW, în consecință, cele alimentate în medie tensiune (până la 20 kV) sunt receptoare de putere mare.

Un alt aspect care trebuie luat în considerare este temperatura de lucru, întrucât aceasta influențează construcția cuptorului. Mai mult, valorile temperaturii determină decisiv tipul elementelor încălzitoare și structura pereților cuptorului. Astfel, cuptoarele se împart în trei categorii: temperatură joasă (sub 650 °C), medie (650 – 1100 °C) și înaltă (peste 1100 °C).

Cuptoarele cu temperatură joasă de funcționare se caracterizează prin faptul că transmiterea căldurii de la rezistorul încălzit înspre piesa de prelucrat se face prin convecție termică, folosindu-se fluidul din incintă (aer, gaz special etc.). Construcția acestor cuptoare cuprinde pereți formați numai din stratul de izolație termică, consolidat în interior și exterior cu ajutorul unor carcase metalice.

Cuptoarele cu temperatură medie de funcționare folosesc transmiterea căldurii prin radiație (convecția 5%). Din cauza temperaturii mai ridicate, pereții cuptorului sunt dintr-un material termoizolant și un strat de material refractar.

Cuptoarele cu temperatură înaltă de lucru prezintă zidărie din trei straturi: primul strat din material refractar compact, al doilea strat din material refractar ușor și al treilea strat din material termoizolator pentru izolație termică. O situație specială este în cazul cuptoarelor cu vid sau atmosferă protectoare, unde se înlocuiește zidăria refractară cu ecrane de cărbune, grafit, molibden sau wolfram. În aceste cuptoare, din cauza temperaturii foarte ridicate apar presiuni mari care exercită forțe suplimentare asupra pereților cuptorului. Astfel, partea superioară a cuptoarelor se realizează sub formă de boltă pentru a asigura rezistența mecanică, iar ușa se acoperă cu un strat de vopsea de aluminiu, care reduce coeficientul de transmitere a căldurii.

Aplicațiile industriale ale încălzirii indirecte prin rezistență sunt enumerate în continuare:

- Tratamentele termice ale metalelor
 - Tratamente termice primare (recoacere, normalizare);
 - Tratamente termice secundare (călire, îmbătrânire);
 - Tratamente termochimice (nitruare etc.);
 - Lipire, emailare, cositorire;
 - Sintetizarea pulberilor.
- Tratamentele termice ale nemetalelor
 - Încălzirea materialelor plastice pentru producerea, sudare sau lipire;

- Arderea produselor ceramice;
- Tratamentul termic al sticlei, sudarea și lipirea sticlei;
- Uscarea materialelor: lemn, hârtie, vopsele, lacuri etc.;
- Încălzirea apei;
- Procese tehnologice în industria alimentară și chimică.

Dispozitivele de uz casnic care se bazează pe încălzirea indirectă prin rezistență și propagarea căldurii prin convecție termică sunt foarte variate. Acestea au caracteristic faptul că sunt alimentate în joasă tensiune (monofazate - 230 V sau trifazate - 400 V tensiune de linie) și au puteri foarte variate. Ele se folosesc pentru prepararea hranei (cuptor electric, figura 6.7; cafetieră etc.), obținerea și menținerea confortului (centrală electrică pentru obținerea apei menajere și a agentului termic etc.), și realizarea altor activități caracteristice consumatorilor casnici (mașină de spălat, fier de călcat etc.).

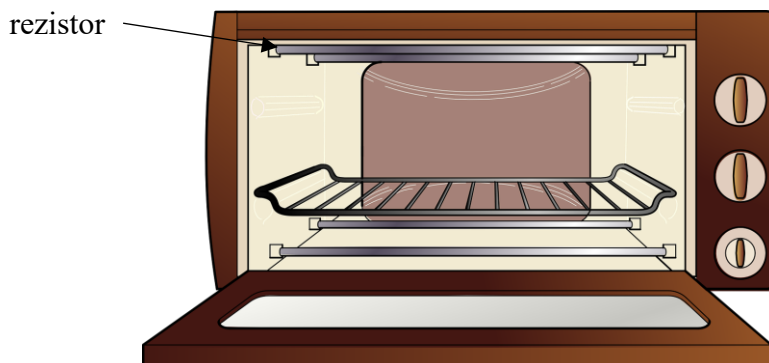


Figura 6.7. Dispozitiv electrotermic de uz casnic – cuptor electric

O sinteză a tipurilor de cuptoare cu rezistoare folosite în aplicațiile industriale este ilustrată în figura 6.8.

Din punct de vedere termic, cea mai importantă componentă a instalației electrotermice este rezistorul. Astfel, acesta trebuie confecționat dintr-un material care trebuie să aibă următoarele proprietăți:

- Temperatură admisibilă ridicată - Rezistorul transformă energia electrică în căldură, astfel încât atinge în mod natural temperaturi ridicate în timpul funcționării. Dacă punctul de topire sau temperatura de degradare a materialului este prea scăzută, acesta se poate înmuia, topi sau descompune în condiții normale de funcționare. Prin urmare, materialul rezistorului trebuie să aibă un punct de topire ridicat și o rezistență termică ridicată pentru a funcționa în siguranță și continuu la temperaturi

ridicate. Materiale precum kantalul și nichelul sunt folosite, întrucât rezistă la temperaturi de peste 1000°C cu ușurință.

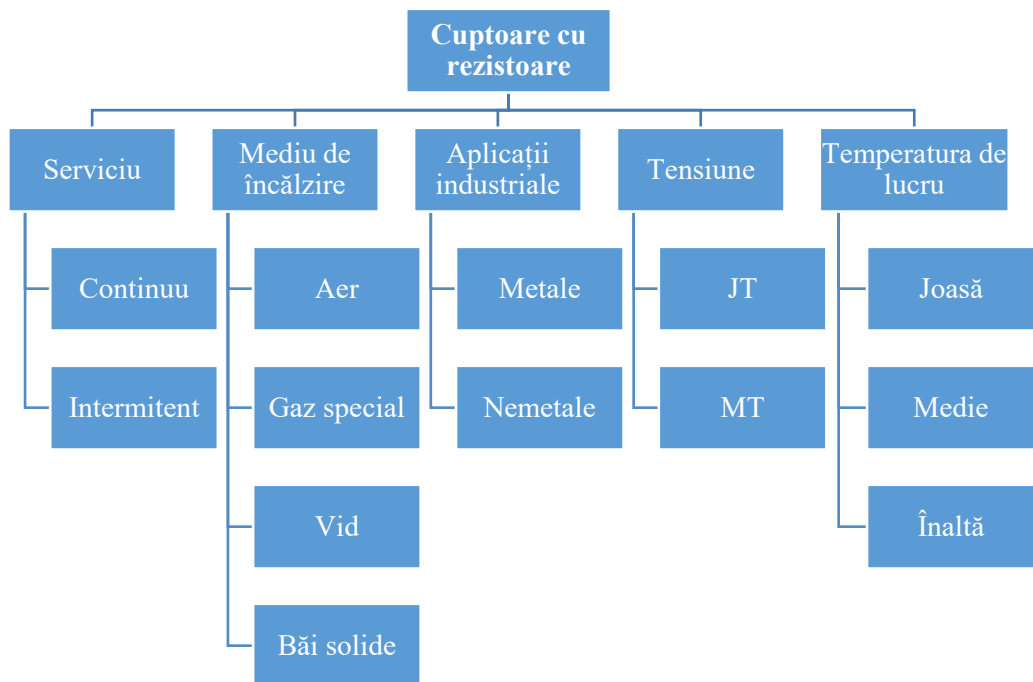


Figura 6.8. Clasificarea cuptoarelor cu rezistoare

- Stabilitate chimică la temperatura maximă de lucru - La temperaturi ridicate, multe materiale suferă oxidare, nitridare sau coroziune, în special în aer sau în atmosfere industriale. Acest lucru poate modifica rezistența materialului, îi poate reduce integritatea structurală și îi poate scurta durata de viață. Un material stabil termic își menține compoziția chimică și integritatea suprafeței, asigurând performanțe și durabilitate constante. În consecință se folosesc aliajele sau materialele rezistente la oxidare cu straturi protectoare de oxid.
- Stabilitate mecanică la temperatura maximă de lucru - Dilatarea termică, fluajul și modificările microstructurale (cum ar fi creșterea granulelor sau fragilizarea) pot cauza deformarea sau fracturarea materialului în timp. Rezistorul trebuie să își mențină forma, rezistența la tracțiune și integritatea structurală în timpul ciclurilor repetate de încălzire. Stabilitatea mecanică asigură fiabilitatea, în special în sistemele expuse la vibrații sau mișcare.

- Rezistivitate mare - Materialele cu rezistivitate ridicată generează mai multă căldură pe unitatea de lungime pentru un curent dat. Rezistența mai mare înseamnă o rezistență mai mare pentru o geometrie dată, ceea ce duce la o încălzire eficientă fără a necesita rezistențe foarte lungi sau groase. De asemenea, ajută la menținerea dimensiunii fizice compacte a încălzitorului. Materiale precum nicrom (aliaj nichel-crom) ($\sim 1,10\text{--}1,50 \mu\Omega\cdot\text{m}$) sunt ideale.
- Coeficient de temperatură al rezistivității mic - Majoritatea materialelor cresc în rezistivitate odată cu temperatura. O valoare scăzută pentru acest parametru înseamnă că rezistența se modifică doar ușor odată cu schimbarea temperaturii, ceea ce asigură o degajare termică stabilă și previzibilă. Acest lucru este esențial pentru un control precis al temperaturii și pentru evitarea fluctuațiilor termice sau a subîncălzirii în timpul funcționării.
- Materialul să nu îmbătrânească - „Îmbătrânirea” se referă la modificări pe termen lung ale microstructurii sau compoziției chimice a materialului (cum ar fi oxidarea, schimbările de fază sau recristalizarea), care pot altera rezistența, pot reduce rezistența mecanică sau pot provoca fragilitate. Un material care nu îmbătrânește își păstrează caracteristicile de performanță în timp, reducând întreținerea și prelungind durata de viață operațională.
- Coeficient de dilatare mic - Dilatațiile termice mari pot duce la solicitări mecanice, fisuri sau defectarea rezistorului sau a structurilor sale de montare în timpul ciclurilor de încălzire și răcire. Un coeficient de dilatare termică scăzut asigură stabilitatea dimensională, menține un contact bun cu structurile de susținere și minimizează oboseala termică.
- Ieftine, ușor de prelucrat și preluat - Chiar dacă un material are performanțe termice bune, acesta trebuie să fie viabil din punct de vedere economic pentru producția de masă și întreținerea pe teren. Prelucrarea ușoară înseamnă că poate fi tras în fire, panglici sau bobine, modelat în forme sau atașat la terminale. Manipularea sigură și simplă reduce, de asemenea, costurile cu forța de muncă și minimizează riscurile de instalare. Astfel, materialul trebuie să fie ușor de tras în fire sau format în benzi/bobine și manipulat în siguranță.

Rezistoarele se împart în mai multe categorii în funcție de materialul din care sunt fabricate. În consecință, sunt rezistoare metalice, materiale ceramice și

metalo-ceramice, cărbune și grafit. Ele pot fi descoperite, care radiază liber / acoperite (înglobate). Cele mai folosite materiale ca elemente încălzitoare sunt aliajele pe bază de Cr-Ni, Cr-Ni-Fe, Cr-Al-Fe, și carborundul (silica).

Popularitatea acestor dispozitive electrotermice pleacă de la punctele forte ale lor. Pentru o mai bună înțelegere a avantajelor și dezavantajelor încălzirii prin convecție termică s-a realizat diagrama comparativă din figura 6.9.

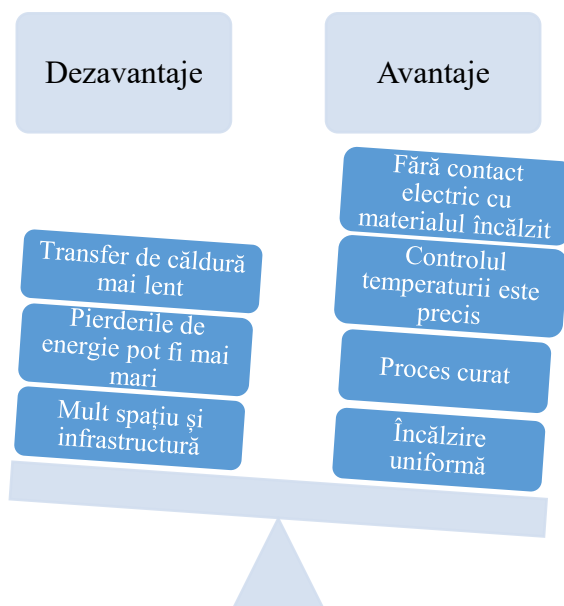


Figura 6.9. Avantajele și dezavantajele cuptoarelor cu rezistoare

Avantajele încălzirii indirecte prin rezistență, față de încălzirea directă prin rezistență sau alte tipuri de încălzire sunt:

- Încălzire uniformă pe toată suprafața cu care vine în contact fluidul care preia căldura. Dar, precum s-a prezentat anterior, transmiterea căldurii depinde și de caracteristicile fizice ale piesei de prelucrat.
- Proces curat față de încălzirea folosind alte surse de căldură, precum arderea combustibililor, care au ca efect producerea de reziduri gazoase și solide.
- Controlul temperaturii este precis, întrucât există posibilitatea automatizării și ajustării adecvate a parametrilor care influențează temperatura sursei de căldură.
- Foarte important este faptul că nu există contact electric direct cu materialul de încălzit, contrar încălzirii directe prin rezistență.

Baza matematică care poate fi utilizată pentru a rezolva problemele legate de încălzirea indirectă prin rezistență și convecție termică este prezentată în capitolul 5 și în subcapitolele precedente.

6.3.2. *Încălzirea prin radiație termică*

Încălzirea prin radiație termică se caracterizează prin temperatura foarte ridicată a sursei de căldură. Această temperatură permite eliberarea energie termice sub formă de radiații electromagnetice din spectrul infraroșii.

Radiațiile infraroșii, IR (InfraRed), prezintă următoarele caracteristici:

1. Lungimi de undă cuprinse între aproximativ 700 nm și 1 mm și frecvențe cuprinse între aproximativ 300 GHz și 400 THz.
2. Nu sunt vizibile ochiului uman, dar pot fi detectate de senzori de căldură și pot fi simțite ca și căldură. Figura 6.10 prezintă radiațiile IR.



Figura 6.10. Ilustrarea radiațiilor IR

3. Ca toate radiațiile electromagnetice, radiațiile infraroșii se deplasează cu viteza luminii.
4. Are proprietăți speciale prin care induce căldură - când radiația IR interacționează cu un material, aceasta poate fi absorbită. Această absorbție excită moleculele din material, făcându-le să vibreze și să se rotească mai rapid. Această mișcare moleculară crescută se traduce printr-o creștere a temperaturii, care este resimțită ca și căldură.
5. Similar luminii vizibile, radiația infraroșie poate fi refractată, reflectată și polarizată.
6. Se împart în trei clase în funcție de lungimea de undă: scurte/apropiate (0,76 – 2 μm), medii (2-40 μm) și lungi/îndepărtate (40-1000 μm).

Sursele de radiații IR (denumite în literatura de specialitate și radiatoare IR), care intră în componența dispozitivelor și instalațiilor electrotermice, și conțin în principal un rezistor care se încălzește la o anumită temperatură în procesul de transformare a energiei electrice în energie termică.

Tipurile de surse tehnice de radiații infraroșii se clasifică în funcție de poziția maximului radiațiilor termice emise. Astfel, sunt:

- Surse de radiații infraroșii scurte, $\lambda=0,76...2 \mu\text{m}$;
- Surse de radiații infraroșii medii, $\lambda=2...4 \mu\text{m}$;
- Surse de radiații infraroșii lungi, $\lambda=4...6 \mu\text{m}$.

Sursele de radiații infraroșii scurte (denumite și radiatoare luminoase) funcționează la temperaturi de lucru ridicate, astfel ele derivă direct din lampa electrică cu incandescență, radiațiile infraroșii reprezentând 90 % din energia radiată de acestea. Studiile au demonstrat că energia electrică absorbită este transmisă în IR în proporție de 88 %. O altă trăsătură a acestor radiatoare luminoase este timpul rapid în care se ajunge la parametrii nominali, care este mai mic de 1 s. Durata de viață a acestor surse de radiații IR este de aproximativ 5000 h, atunci când se distruge filamentul conductor. Un avantaj al acestor surse este faptul că nu poluează în nici o etapă a vieții lor (fabricație, utilizare și reciclare). Două dintre cele mai populare surse de radiații IR scurte sunt lămpile cu incandescență pentru IR și lămpile tubulare din cuarț transparent.

Lămpile cu incandescență pentru radiații infraroșii (figura 6.11) au în componență un filament din wolfram, încălzit la 1800-2600 K. O astfel de lampă are un balon din sticlă de formă parabolică, în interiorul căruia este un reflector aluminizat, balonul este umplut cu N și are calota mățuită pentru distribuția uniformă a energiei radiate. Aceste lămpi au inerție termică scăzută, astfel pot să li se facă controlul atât manual cât și automat.

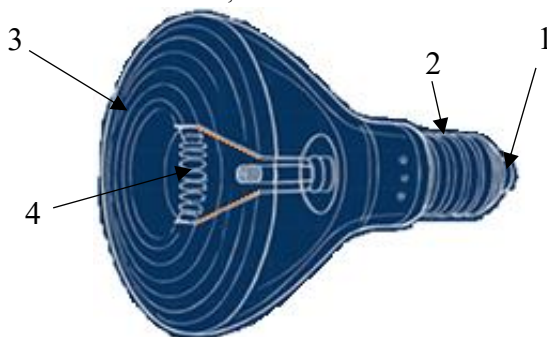


Figura 6.11. Lampă cu incandescență pentru IR. 1 – contactul central, 2–soclu filetat, 2 – balon parabolic din sticlă mățuită, 4 – filament din wolfram

Lămpile tubulare din cuarț transparent (figura 6.12) conțin un filament spiralat din tungsten încălzit la 1300–2000 K, sau din Cr-Ni încălzit la 1200 K. Filamentul spiralat este introdus într-un tub din cuarț transparent cu diametrul de 10 mm și lungimea de 0,5...1 m. Tubul din cuarț este umplut cu azot sau halogenuri și este plasat în reflectoare metalice din aluminiu polizat sau elaxat pentru a dirija radiațiile IR și a crește eficiența radiatorului final. Aceste surse de radiații IR au o densitate de putere care poate ajunge la 60 kW/m²; ajung la parametrii nominali în 20...60 s, când au o culoare roșie-portocalie. Față de sursele prezentate anterior, tuburile din cuarț transparent au eficiență de iradiere mai redusă, care ajunge la 70...80 %.

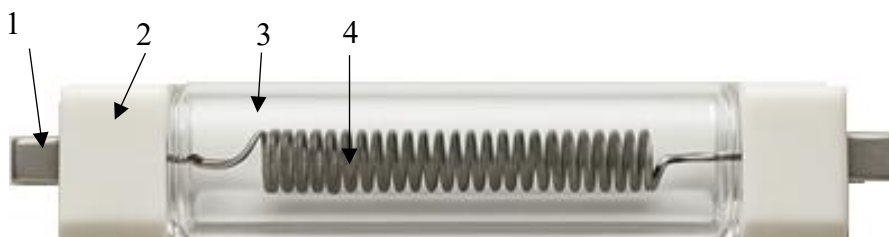


Figura 6.12. Lampă tubulară din cuarț transparent pentru IR scurte. 1 – contact alimentare, 2 – manșon electroizolant, 3 – tub cuarț transparent, 4 – conductor filetat Ni-Cr

Sursele de radiații IR medii cele mai populare sunt *lămpile tubulare din cuarț opac* (figura 6.13). Aceste radiatoare emit radiații IR prin încălzirea filamentului filetat din interior la 1200 °C, apoi tubul de cuarț opac absoarbe radiațiile și preia rolul de radiator secundar, având temperatura de 1100 °C, și emițând radiații cu lungimea de undă de $\lambda=2...4 \mu\text{m}$. Radiatoarele tubulare cu lungimi de 0,5... 4 m sunt montate în reflectoare din aluminiu.



Figura 6.13. Lampă tubulară din cuarț opac pentru IR medii. 1- pin alimentare, 2- manșon din material electroizolant, 3 – tub cuarț opac, 4 – filament Cr-Ni

Sursele pentru radiații infraroșii lungi ($\lambda > 4 \mu\text{m}$) se numesc și surse întunecate. Acestea conțin un rezistor încălzit la temperaturi sub 900 K, care poate fi învelit în materiale ceramice sau metalice. În funcție de materialul care

devine sursa secundară de căldură, deoarece acesta preia energia calorică de la filamentul încălzit, sursele de radiații IR lungi se împart în două categorii: radiatoare tubulare metalice și radiatoare ceramice.

Radiatoarele tubulare metalice (figura 6.14) au o sârmă spiralată din Cr-Ni încălzită la 400...600 °C introdusă într-un tub metalic din oțel sau oțel refractar cu $\varnothing=100$ mm. Sârma este izolată față de tub cu un praf de oxid de Mg. Se utilizează împreună cu un reflector metallic.

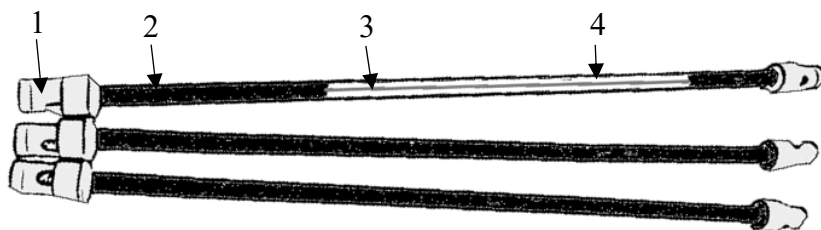


Figura 6.14. Radiator tubular metalic pentru IR lungi. 1- terminal alimentare cu manșon ceramic electroizolant, 2 – tub metalic, 3 – filament Ni, 4 – oxid de Mg cu rol electroizolator

Radiatoarele ceramice (figura 6.15) se compun dintr-un rezistor de încălzire (Cr-Ni sau kanthal) înglobat într-un înveliș din material ceramic cu rol de radiator secundar. Temperatura de lucru este de 300...700 °C, astfel emit atât radiații infraroșii lungi cât și medii. Eficiența acestor radiatoare întunecate ajunge până la 95 %.

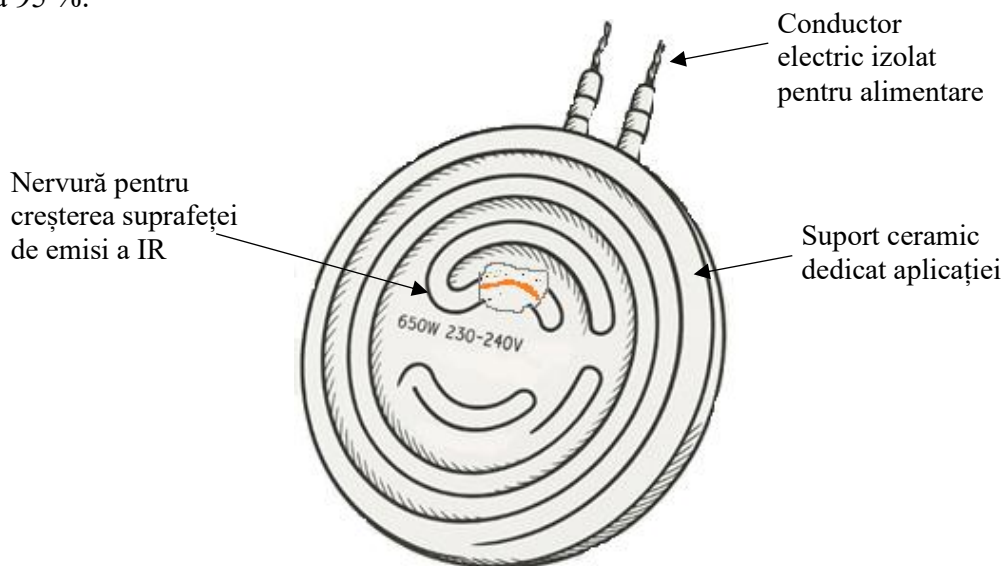


Figura 6.15. Radiator ceramic pentru IR lungi

În plus față de sursa propriu-zisă de radiații IR, dispozitivele conțin și componente auxiliare pentru reflexie (dirijarea IR înspre obiectul de încălzit) folosite sunt reflectoare individuale metalice sau din Au, tub de cuarț dublu aurit și reflector plat ceramic sau metalic sub formă de casetă.

Din cauza temperaturii foarte ridicate unele radiatoare de IR sunt răcite cu apă sau aer răcit pentru a preveni supraîncălzirea.

Încălzirea cu radiații infraroșii are mai multe avantaje față de încălzirea indirectă prin rezistență care implică convecția termică:

- Timp de încălzire redus față de încălzirea prin convecție;
- Instalații simple și ieftine care permit modificări constructive ulterioare;
- Reglare precisă a temperaturii;
- Condiții sigure de curățare, siguranță și funcționare;
- Permite încălzirea materialelor inflamabile sau foarte pure;
- Prezintă randament optim (consum minim de energie electrică) atunci când lungimea de undă a maximului energiei radiate coincide cu lungimea de undă a maximului de absorbție a corpului supus încălzirii.

Instalațiile și dispozitivele electrotermice care folosesc surse de radiații infraroșii pentru a realiza procesul de încălzire pot să fie sub formă de cuptoare electrice sau varianta deschisă (piesa de încălzit se află în mediul ambiant).

Instalațiile și dispozitivele cu radiații IR sunt folosite pentru:

- Utilizarea cea mai frecventă este în uscarea lacurilor și vopselelor aplicate pe metale sau alte materiale:
 - Lacul are factor de absorbție redus, iar suportul are factor de absorbție mare;
 - Stratul de lac este puternic absorbant, rolul suportului fiind neglijabil.
- Industria încălțăminte, chimico-farmaceutice, textile, a lemnului, construcțiilor de mașini etc.
- Sectorul zootehnic la creșterea animalelor și a păsărilor tinere, precum și a tratamentelor medicale;
- Aplicațiile în industria alimentară s-au înmulțit în ultimii ani.

Cuptoarelor cu radiații infraroșii sunt tot mai des folosite datorită avantajelor încălzirii prin radiații IR. Caracteristicile cuptoarelor cu surse de radiații IR sunt la fel cu a celorlalte cuptoare menționate anterior, adică au funcționare

intermitentă sau continuă. În plus, față de celelalte cuptoare, acestea au următoarele caracteristici:

- Radiatoarele IR pot să fie poziționate deasupra obiectelor de încălzit sau sub acestea (aplicațiile sunt mai rare);
- Aplicații în care încălzirea prin IR se combină cu încălzirea prin convecție pentru a controla temperatura aerului și umiditatea din instalație;
- Controlul temperaturii se realizează prin utilizarea electronicii de putere precum sistemul de comandă bazat pe tiristoare;
- Cea mai simplă metodă de control este prin utilizarea mai multor radiatoare IR care vor fi alimentate sau deconectate cu ajutorul unor întreruptoare.

Baza matematică care poate fi folosită pentru rezolva problemele asociate încălzirii prin radiații IR este enumerată în capitolele 1 și 5, precum și subcapitolelor precedente. În plus, relația matematică următoare, care ajută la determinarea puterii termice radiată.

$$P_q = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_i^4) \left[\frac{J}{s} \right] \quad (6.5)$$

Unde A este aria suprafeței emiseive [m^2], ϵ – emisivitatea radiatorului, σ – constanta lui Stefan-Boltzman, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$, T_f - temperatura finală, T_i - temperatura inițială.

6.4. Bibliografie

- [1]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998.
- [2]. Infrared heating, C. Skjoldebrand, ABB Automation System, pg. 209 – 231.
- [3]. Infrared heating for food and agricultural processing, Prof. Da-Wen Sun, University of Ireland, Dublin.

6.5. Autoevaluare

- 1) Încălzirea cu radiații are aplicații în:

- Zootehnie / Industria alimentară / Metalurgie
- 2) Radiațiile infraroșii se clasifică ca fiind apropiate sau îndepărtate
 Adevărat / Fals
- 3) Radiațiile infraroșii de interes sunt situate în intervalul:
 0,76 ... 5 μm / 2 μm ... 1 mm / 0,76...10 μm
- 4) Instalațiile de încălzire cu IR funcționează în regim continuu sau intermitent:
 Adevărat / Fals

Activitate

Dați exemple de aplicații ale încălzirii directe și indirecte prin rezistență.

Exemple de dispozitive electrotermice – încălzirea prin rezistență

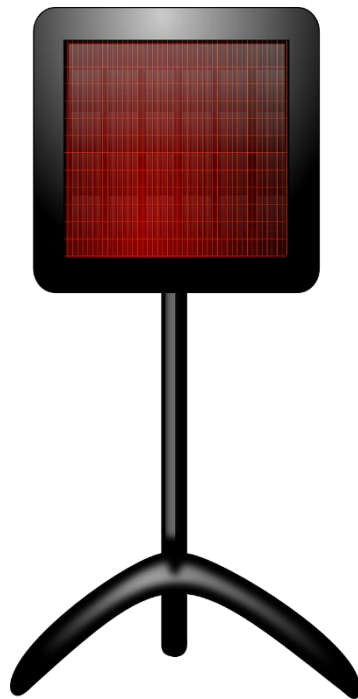
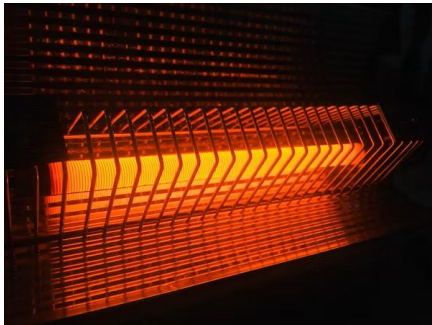


- Saună cu surse de radiații IR



Lampă cu radiații IR folosită în laborator pentru încălzirea mostrelor

Panouri radiante cu tuburi din cuarț transparent și opac



7

Încălzirea prin inducție electromagnetică

7.1 Aspecte generale

Încălzirea prin inducție se bazează pe pătrunderea energiei electromagnetice într-un conductor masiv (piesă), situat în câmpul magnetic variabil în timp produs de o bobină (inductor). Figura 7.1. ilustrează grosier principiul încălzirii prin inducție cu elementele principale: inductor și piesă, adică sistemul inductor-piesă.

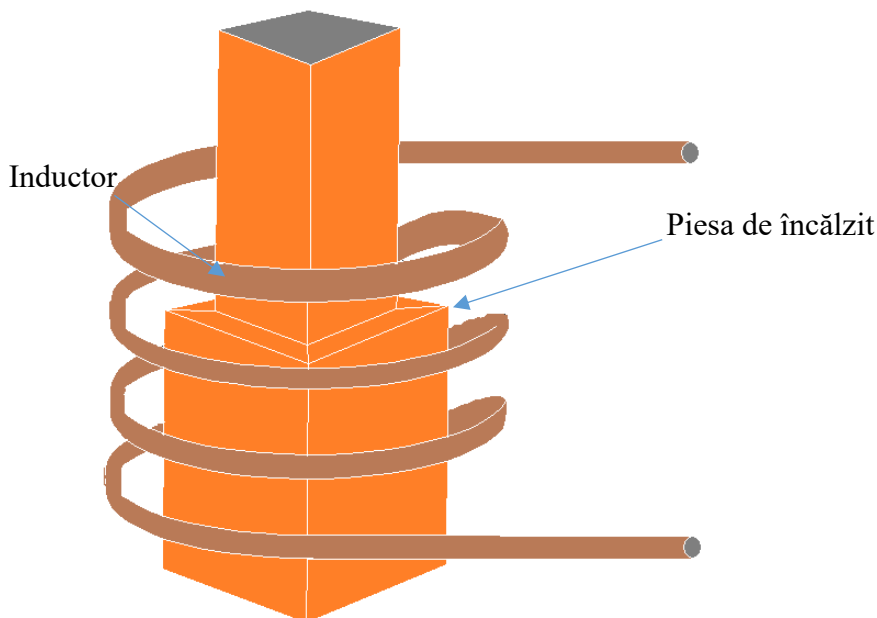


Figura 7.1. Încălzirea prin inducție. Sistemul inductor-piesă

Încălzirea se produce prin efectul Joule-Lenz al curenților turbionari induși. În sistemul inductor-piesă, curenții turbionari sunt refulați la exteriorul conductoarelor (efectul pelicular) și suportă influența curenților din

conductoarele învecinate (efectul de proximitate). Efectul pelicular se referă la tendința curentului alternativ de a curge în apropierea suprafeței unui conductor, mai degrabă decât uniform prin secțiunea sa transversală, atunci când este expus la câmpuri magnetice de înaltă frecvență. Drept urmare, curenții turbionari induși de câmpul electromagnetic din piesa de prelucrat sunt concentrați în apropierea suprafeței sale (piesa), provocând încălzirea localizată a suprafeței. Efectul de proximitate se referă la concentrarea curentului alternativ într-un conductor datorită prezenței în apropierea conductorilor care transportă energie electrică de tensiune alternativă. Câmpul magnetic al conductorului din apropiere influențează distribuția curentului, forțându-l să se concentreze pe părțile suprafeței conductorului celei mai apropiate de conductorul adiacent.

Baza matematică a încălzirii prin inducție se bazează pe vectorul Poynting și ecuațiile lui Maxwell, care sunt prezentate în Anexa 6.

Un parametru important al încălzirii prin inducție este adâncimea de pătrundere a curenților turbionari.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} [m] \quad (7.1)$$

Unde δ – adâncimea de pătrundere a curenților turbionari, ρ - rezistivitatea electrică a piesei, μ – permeabilitatea electrică a piesei, f – frecvența.

Adâncimea de pătrundere δ reprezintă distanța de la suprafața conductorului până la un plan paralel cu acesta, în care amplitudinea câmpului magnetic scade la 36,7 % din valoarea maximă H_0 existentă la suprafață (figura 7.2). Pe această distanță, densitatea de curent scade de “e” ori, iar puterea activă de “e²” ori, iar 76,5 % din puterea activă care pătrunde în corpul metalic se transformă în căldură.

Din analiza relației matematice (7.1), reiese că adâncimea de pătrundere depinde de:

- Frecvență – cuptoarele destinate topirii sau încălzirii în profunzime sunt alimentate la frecvențe joase, iar cele pentru căliri superficiale la frecvențe înalte.
- Caracteristicile fizice ale materialului – la buni conductori electrici (Cu, Al) apare o adâncime de penetrare mai mică, astfel curenții se concentrează puternic în apropierea suprafeței, deci necesită frecvențe mai mici pentru o încălzire mai profundă. Materialele feromagnetice (Fe, OL), cu permeabilitate magnetică mare, au o adâncime de pătrundere mai mică, în consecință încălzirea este foarte localizată la suprafață, în special la

temperaturi mai scăzute, înainte ca proprietățile magnetice să scadă. În cazul metalelor nemagnetice (OL inoxidabil, Al) apar adâncimi de penetrare mai mari decât cele feromagnetice la aceeași frecvență.

- Temperatura de lucru și temperatura inițială a piesei - Pe măsură ce temperatura crește, atât conductivitatea, cât și permeabilitatea se modifică astfel: conductivitatea electrică a metalelor scade de obicei odată cu temperatura, ceea ce duce la creșterea adâncimii de penetrare. Materialele feromagnetice își pierd proprietățile magnetice (temperatura Curie, de exemplu, $\sim 770^{\circ}\text{C}$ pentru fier), în consecință, apare o creștere dramatică a lui δ odată ce permeabilitatea magnetică scade. Efectul temperaturii inițiale este următorul: piesele reci determină adâncime de penetrare mai mică (în special în materialele feromagnetice), deci încălzirea începe la suprafață. Pe măsură ce piesa se încălzește, adâncimea de penetrare crește, ducând la o încălzire mai uniformă dacă frecvența este adecvată.

Analizând relațiile matematice și principiul inducției electromagnetice, avantajele încălzirii prin inducție electromagnetică sunt: (1) căldura se dezvoltă în materialul care urmează a fi încălzit, astfel apare o viteză mai mare de încălzire, față de cuptoarele cu încălzire indirectă, (2) construcția instalațiilor este mai simplă, permițând utilizarea vidului sau a atmosferei de protecție, (3) automatizarea funcționării în condițiile producției în flux și (4) condițiile de lucru sunt mult îmbunătățite, reducând poluarea mediului ambiant.

(1) În încălzirea prin inducție, curenții turbionari sunt induși direct în interiorul piesei de prelucrat, provocând încălzire rezistivă (Joule) din interior. Acest lucru contrastează cu cuptoarele convenționale (pe gaz, electrice), unde căldura trebuie transferată de la suprafețele externe spre interior prin conducție sau convecție, unde procesul de încălzire este mai lent. Drept rezultat, apar rate rapide de încălzire, atingând temperaturile țintă în secunde sau minute, în funcție de material și geometrie; permite un control precis al profilelor de încălzire, ideal pentru procese precum călirea suprafeței, lipirea sau topirea; eficiența energetică este crescută, deoarece se pierde mai puțină căldură în mediul înconjurător.

(2) Sistemele de încălzire prin inducție utilizând inductoare, nu necesită contact fizic direct cu piesa de prelucrat. În plus, absența gazelor de ardere, a elementelor de încălzire sau a căptușelilor refractare complexe simplifică proiectarea sistemului. Acest aspect este important, întrucât ansamblul inductor-piesă se integrează ușor în camere etanșe pentru medii în vid sau atmosfere de gaze inerte (de exemplu, argon, azot), astfel se previne oxidarea, decarburarea

sau contaminarea materialelor reactive în timpul încălzirii, ceea ce este esențial pentru industria aerospațială, a semiconductorilor și a metalurgiei. De acest avantaj se beneficiază în practică în cazul cuptoarelor de topire prin inducție pentru metale prețioase sau aliaje de titan, care funcționează adesea în vid sau în gaze inerte pentru a menține puritatea.

(3) Încălzirea prin inducție este extrem de controlabilă prin intermediul componentelor electronice (frecvență, putere, timp), fiind ideală pentru integrarea în linii de fabricație automatizate. Astfel este posibilă repetabilitatea precisă a ciclurilor de încălzire, ceea ce determină un nivel constant al calității a produselor, precum și comenzi programabile pentru încălzire complexă în mai multe etape. O altă consecință importantă a acestui avantaj este posibilitatea integrării cu sisteme robotizate sau benzi transportoare pentru producție în linie complet automatizată.

(4) Încălzirea prin inducție nu implică flăcări deschise, ardere sau eliberare de gaze nocive (precum CO_2 , NO_x), adică o calitate mai bună a aerului la locul de muncă. Cuptoarele cu inducție electromagnetică funcționează cu zgomot redus în comparație cu cuptoarele cu arc electric. În plus, încălzire este localizată, astfel împrejurimile rămân mai reci, îmbunătățind confortul lucrătorilor. În consecință, apare o nevoie mai mică de sisteme de ventilație/exhaustare, deci costuri mai mici ale infrastructurii. În concluzie, aceste dispozitive au o eficiență electrică mai mare, emisii reduse de gaze cu efect de seră atunci când sunt alimentate cu surse regenerabile de energie electrică.

Dezavantajul principal este necesitatea în cazul multor instalații a unor surse de alimentare la o frecvență diferită de 50 Hz, ceea ce ridică costul instalațiilor.

Principalele aplicații ale încălzirii prin inducție electromagnetică sunt:

- Topirea sau menținerea în stare caldă a metalelor (oțel, fontă, cupru, aluminiu, zinc, magneziu și a aliajelor lor) în cuptoare cu creuzet sau canal.
- Încălzirea în profunzime a semifabricatelor (oțel, cupru, aluminiu etc.) ce urmează a fi prelucrate la cald prin forjare, matrițare, presare, laminare etc.
- Călire superficială a pieselor metalice.
- Aplicații speciale (topirea fără creuzet, agitarea inductivă și transportul electromagnetic al metalelor topite, încălzirea recipientilor, sudarea și lipirea metalelor).

Instalațiile și dispozitivele electrotermice care se bazează pe inducție electromagnetică pot fi alimentate la frecvență joasă (sub 50 Hz), industrială (50 sau 60 Hz), medie (100...10000 Hz) sau înaltă (10 kHz...10 MHz).

Frecvența joasă se utilizează la agitatoarele inductive și la transportoarele electromagnetice. Frecvența industrială se folosește la cuptoarele cu creuzet și canal, și unele aplicații ale încălzirii în profunzime. Frecvența medie se utilizează la alimentarea cuptoarelor cu creuzet, încălzirea în profunzime, călirea superficială și sudare. Frecvența înaltă este folosită pentru călire și sudare.

7.2. Sistemul inductor-piesă

Sistemul inductor-piesă stă la baza instalațiilor și dispozitivelor electrotermice prin inducție. Figura 7.2 ilustrează schematic sistemul inductor-piesă, unde sunt evidențiate următoarele caracteristici ale procesului de încălzit și ale elementelor sistemului: H_0 – intensitatea câmpului magnetic la suprafața piesei, I_1 – curentul electric prin inductor, I_2 – curentul prin piesă, U – tensiunea de alimentare a inductorului, h_1 – înălțimea inductorului, g_1 – grosimea inductorului, d_1 – lățimea inductorului, $a \times b$ – dimensiunile conductorului inductorului, h_2 – înălțimea piesei, d_2 – lățimea piesei, g_2 – grosimea materialului piesei.

Sistemul inductor-piesă poate fi analizat ca un transformator în aer, cu un singur conductor ca secundar.

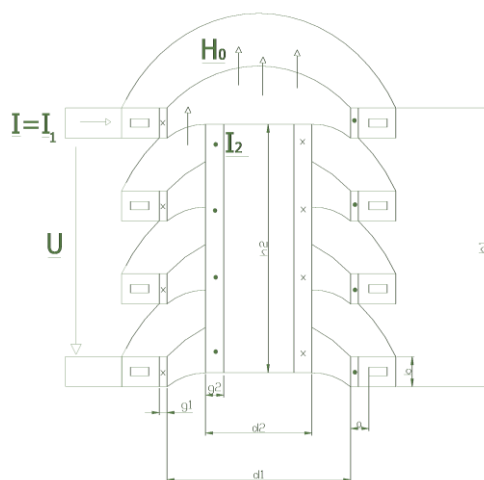


Figura 7.2. Sistemul inductor-piesă

Mărimile caracteristice pot fi determinate analitic pe baza principiului transformatorului în aer (figura 7.3):

- Puterea absorbită de corpul încălzit

$$\underline{S}_2 = H_0^2 \frac{\rho_2}{\delta_2} (k_{R2} + jk_{X2}) \cdot A_2 \text{ [VA]} \quad (7.2)$$

- Rezistența corpului încălzit

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2}{h_2 \delta_2} k_{R2} \text{ [\Omega]} \quad (7.3)$$

- Reactanța internă a corpului

$$X_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2}{h_2 \delta_2} k_{X2} \text{ [\Omega]} \quad (7.4)$$

- Puterea aparentă absorbită

$$\underline{S}_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{h_1 \delta_1 g} N^2 (k_{R1} + jk_{X1}) \cdot I_1^2 \text{ [VA]} \quad (7.5)$$

- Puterea activă absorbită

$$P_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{h_1 \delta_1 g} N^2 \cdot k_{R1} \cdot I_1^2 \text{ [W]} \quad (7.6)$$

- Puterea reactivă absorbită

$$Q_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{h_1 \delta_1 g} N^2 \cdot k_{X1} \cdot I_1^2 \text{ [VA}r\text{]} \quad (7.7)$$

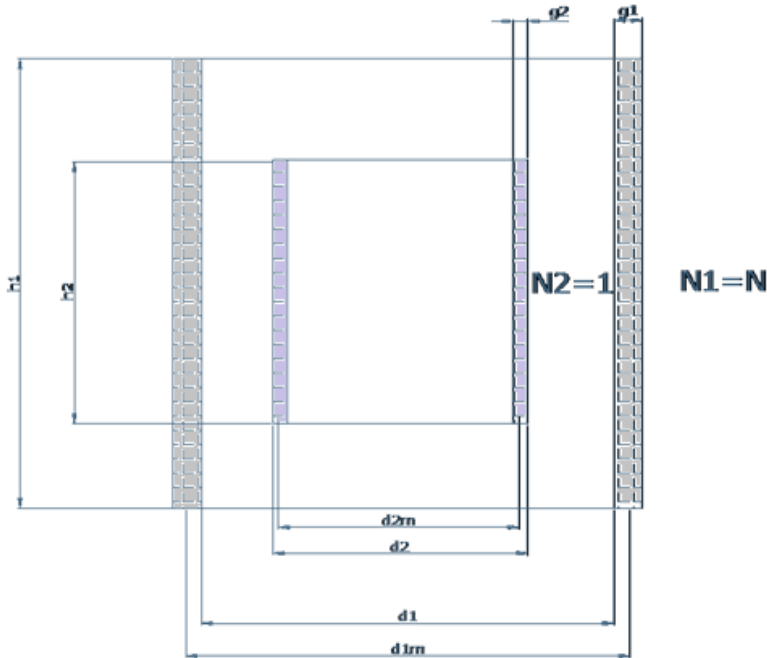


Figura 7.3. Dimensiunile fizice ale sistemului inductor-piesă

Schema electrică echivalentă a transformatorului în aer este prezentată în figura 7.4. Ecuțiile schemei electrice echivalente sunt exprimate prin relația (7.8). Schema electrică din figura 7.4. se poate exprima sub forma schemei din figura 7.5, dacă parametrii piesei (secundar) se exprimă față de inductor (primar).

$$\begin{cases} \underline{U} = (R_1 + j\omega L_I)\underline{I}_1 + j\omega M\underline{I}_2 \\ 0 = j\omega\underline{I}_1 + (R_2 + j\omega L_{II})\underline{I}_2 \end{cases} \quad (7.8)$$

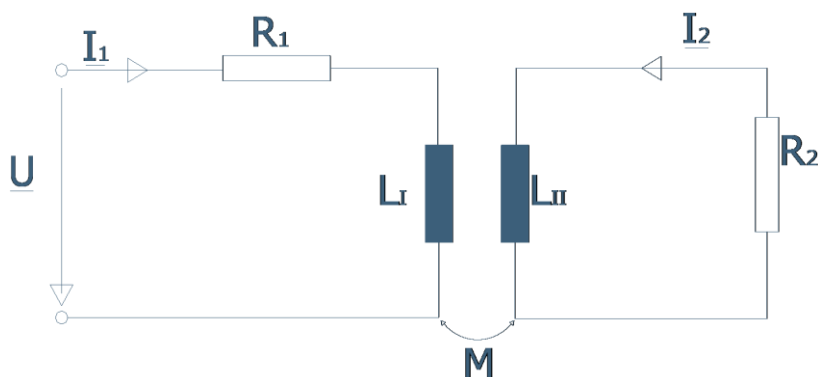


Figura 7.4. Schema electrică echivalentă a transformatorului în aer

Randamentul electric al procesului de încălzire se poate exprima folosind parametrii electrice conform relației (7.9).

$$\eta_e = \frac{P_2}{P} = \frac{R_2' I_1^2}{R_1 I_1^2 + R_2' I_1^2} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2'}} \quad (7.9)$$

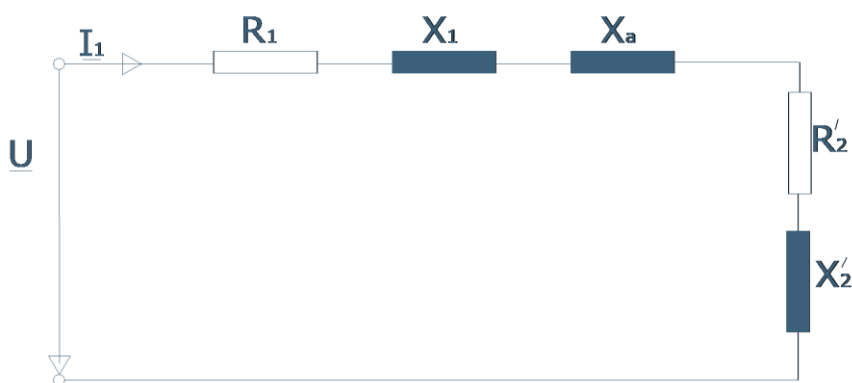


Figura 7.5. Schema electrică echivalentă a transformatorului în aer

Factorul de putere se poate calcula prin relația

$$\cos\varphi = \frac{R}{X} = \frac{R}{\sqrt{R^2+X^2}} \approx \frac{R}{X} = \frac{R_1+R'_2}{X_1+X'_a+X'_2} \quad (7.10)$$

Valoarea maximă a factorului de putere este 0,707 și se obține în situația ideală în care $d_1=d_2$ (diametrul piesei este egal cu diametrul intern a inductorului – caz imposibil). Valoarea scăzută și variabilă cu temperatura va determina utilizarea condensatoarelor comutabile pentru compensarea consumului ridicat de putere reactivă al sistemelor de încălzire prin inducție.

7.3. Instalații și dispozitive

Aplicațiile încălzirii prin inducție se împart în cuptoare cu inducție și instalații pentru încălzirea la suprafață și în profunzime.

Cuptoarele cu inducție au o largă utilizare în industria pentru elaborarea oțelurilor de calitate superioară și a metalelor și aliajelor neferoase. În acest sens sunt folosite cuptoare cu creuzet și cuptoare cu canal.

7.3.1. Cuptoare cu creuzet

Cuptoarele cu creuzet se caracterizează prin faptul că nu au miez feromagnetic. O schemă de bază (secțiune transversală) a unui cuptor cu creuzet este ilustrată în figura 7.6, unde se poate observa inductorul care se află la exterior, iar creuzetul (vas rezistent la temperaturi foarte ridicate, care poate fi metalic sau ceramic în funcție de aplicație) în interior. Materialul de topit se află în interiorul creuzetului; topirea materialului survine prin intermediul curenților turbionari induși atât în material (șarjă), cât și în creuzet (în cazul creuzetelor metalice).

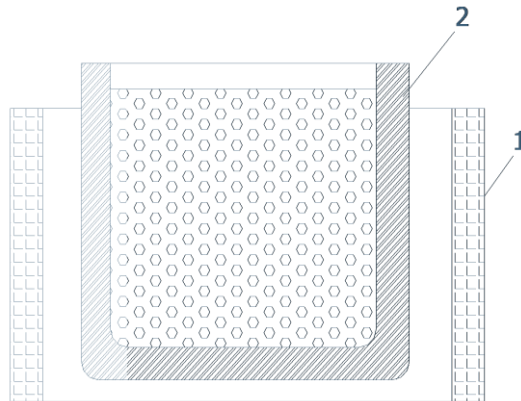


Figura 7.6. Schema de bază a unui cuptor cu creuzet. 1 – inductor, 2 - creuzet

Componentele principale ale unui cuptor cu creuzet sunt:

1. Bobina de inducție / inductorul – Înfășurată în jurul creuzetului; realizată din cupru și răcită.
2. Creuzetul – Din material refractar; conține materialul care urmează a fi topit.
3. Generatorul de frecvență – Produce curent alternativ de frecvență înaltă (de la câțiva kHz la sute de kHz sau chiar MHz).
4. Sistemul de răcire cu apă – Necesitat din cauza pierderilor termice din bobină și componentele electrice.
5. Izolația termică și carcasa – Pentru siguranță și eficiență energetică.

Inductorul se realizează din țevi de Cu, ovale, rotunde sau dreptunghiulare răcite cu aer sau apă. La răcirea cu aer, densitatea admisă a curentului este de 3-5 A/mm², dar la cele cu apă ajunge până la 50-70 A/mm².

Creuzetele sunt cilindrice, puțin îngustate în partea inferioară. Grosimea peretelui creuzetului rezultă ca o soluție optimă pentru a scădea pierderile termice și electrice. Materialele constructive cele mai populare ale creuzetelor sunt: oțel, carbură de siliciu, grafit sau ceramică refractară, adică materiale refractare.

Cuptoarele sunt alimentate la frecvența de 50 Hz sau la frecvențe medii, frecvența industrială fiind optimă la cuptoarele de topit oțel cu capacitatea de 3-5 tone. Frecvența joasă (50-500 Hz) este folosită la cuptoarele pentru topirea fontelor și a OL. Alimentarea la frecvențe de 1-10 kHz este folosită pentru tratarea aliajelor și metalelor neferoase, iar frecvența înaltă (10 kHz – 1 MHz) este folosită la cuptoarele dedicate unor procese tehnologice mai precise și la topirea metalelor prețioase.

Pentru compensarea factorului de putere, care scade foarte mult și ajunge la 0,2...0,25, se folosesc condensatoare statice cu scopul compensării puterii reactive. Determinarea necesarului de putere reactivă pentru creșterea factorului de putere peste 0,9 se poate calcula prin relațiile:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (7.11)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \quad (7.12)$$

$$Q = \operatorname{tg}\varphi \cdot P \quad (7.13)$$

$$Q_{BC} = Q_{real} - Q_{ideal} \quad (7.14)$$

Unde Q_{BC} – este puterea reactivă necesară, a bateriilor de condensatoare, Q_{real} este puterea reactivă în situația în care nu se face compensarea (factorul de putere de 0,2), iar Q_{ideal} - este puterea reactivă corespunzătoare situației în care factorul de putere este peste 0,9.

Figura 7.7 ilustrează varianta 3D a secțiunii transversale a cuptorului cu creuzet din figura 7.6.



Figura 7.7.* Cuptor cu creuzet – versiune 3D

Randamentul unui cuptor cu creuzet se poate determina prin parcurgerea următorilor pași:

1. Determinarea energiei totale consumate

$$E_{cons} = P \cdot t \text{ [kWh]} \quad (7.15)$$

Unde P – puterea activă a cuptorului, [W], t – timpul de funcționare, [h].

2. Determinarea energiei utile folosită pentru topire

$$E_{util} = m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot L_f \text{ [kJ]} \quad (7.16)$$

Unde m – masa materialului, [kg], c – căldura specifică [kJ/(kg°C)], ΔT – diferența de temperatură, [°C], L_f - căldura latentă de fuziune (dacă materialul e topit) [kJ/kg].

$$E_{util} = \frac{E_{util}}{3600} [\text{kWh}] \quad (7.17)$$

3. Calculul randamentului.

$$\eta_{cuptor} = \frac{E_{util}}{E_{cons}} \cdot 100 [\%] \quad (7.18)$$

Randamentul cuptoarelor cu creuzet variază între 25–85%, în funcție de tip:

- Cuptoare de inducție moderne: 60–85%;
- Cuptoare cu rezistență: 30–50%;
- Cuptoare improvizate sau cu izolație slabă: sub 30%.

Pierderile apar prin radiație și convecție în pereții cuptorului, pierderi prin izolație și pierderi în sistemul de alimentare și conversie electrică.

Un alt exemplu al unui cuptor cu creuzet este ilustrat în figura 7.8, care este varianta cea mai populară utilizată în topirea materialelor prețioase. În figură se poate observa inductorul, creuzetul, șarja topită, componenta de alimentare și control, care este situată sub sistemul creuzet+inductor și sistemul de prindere a creuzetului pentru evacuarea metalului topit.

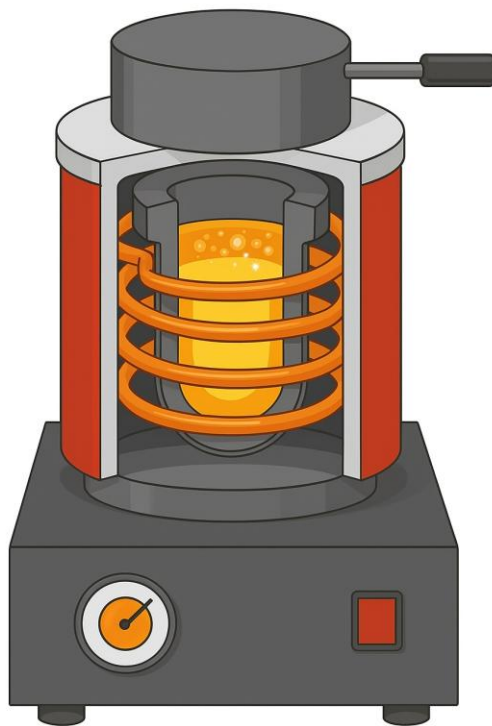


Figura 7.8.* Cuptor cu creuzet – inductor protejat de peretele exterior

7.3.2. *Cuptoare cu canal*

Cuptoarele cu canal sunt un tip special de cuptoare cu inducție, care sunt utilizate în mod frecvent pentru menținerea temperaturii și topirea parțială a metalelor, în special în turnătoriile de fontă și aluminiu. Acestea se deosebesc de cuptoarele cu creuzet prin geometria lor și modul în care se realizează inducția. Astfel, metalul topit este stocat într-un vas mare (receptor sau baie), iar în partea de jos a cuptorului există unul sau mai multe canale în formă de „U”. În jurul acestor canale este poziționată bobina de inducție, care încălzește metalul local, în interiorul canalului, care prin convecție naturală și mișcare electromagnetică, căldura este transferată din canal în baia principală.

Componente principale ale unui cuptor cu canal sunt:

1. Canal de inducție – realizat din material refractar și care conține bobina în jurul metalului lichid.
2. Bobină de inducție – înfășurată în jurul canalului în formă de U; conectată la un generator de curent alternativ.
3. Baie principală – volumul mare de metal lichid care nu este în contact direct cu bobina.
4. Miez feromagnetic (opțional) – folosit uneori pentru a concentra fluxul magnetic.
5. Izolație refractară – pentru a conserva căldura și a proteja structura.

Acest tip de cuptoare bazate pe inducție electromagnetică se caracterizează prin faptul că au o funcționare continuă, astfel sunt ideale pentru menținerea temperaturii metalului în procese industriale. Mai mult, aceste cuptoare au un randament ridicat, datorită circulației naturale a metalului între canal și baie, iar inducția este localizată, deci căldura este generată doar în canal, apoi distribuită prin convecție.

Cuptoarele cu canal sunt utilizate în turnătorii de fontă, unde se folosesc pentru menținerea metalului lichid la temperaturi precise înainte de turnare. De asemenea, ele sunt implicate în producerea aliajului de Al în cadrul unor procese continue. Alte aplicații ale cuptoarelor cu canal sunt în preîncălzirea metalului înainte de turnarea automată sau în turnarea sub presiune și menținerea temperaturii în linii de producție, unde cuptoarele cu canal pot funcționa zile întregi fără oprire.

Capacitatea acestor cuptoare este mare, și poate ajunge până la zeci de tone, în cazul cuptoarelor dedicate procesării oțelurilor.

Alimentarea cuptoarelor se face la frecvență industrială, joasă sau înaltă, în funcție de tipul șarjei, adică materialul care se topește.

Dezavantajul acestor cuptoare se referă la necesitatea menținerii unei părți de metal topit în intervalul dintre două șarje consecutive pentru a asigura continuitatea circuitului secundar.

O sinteză detaliată a avantajelor și dezavantajelor cuptoarelor cu canal este ilustrată în figura 7.9.

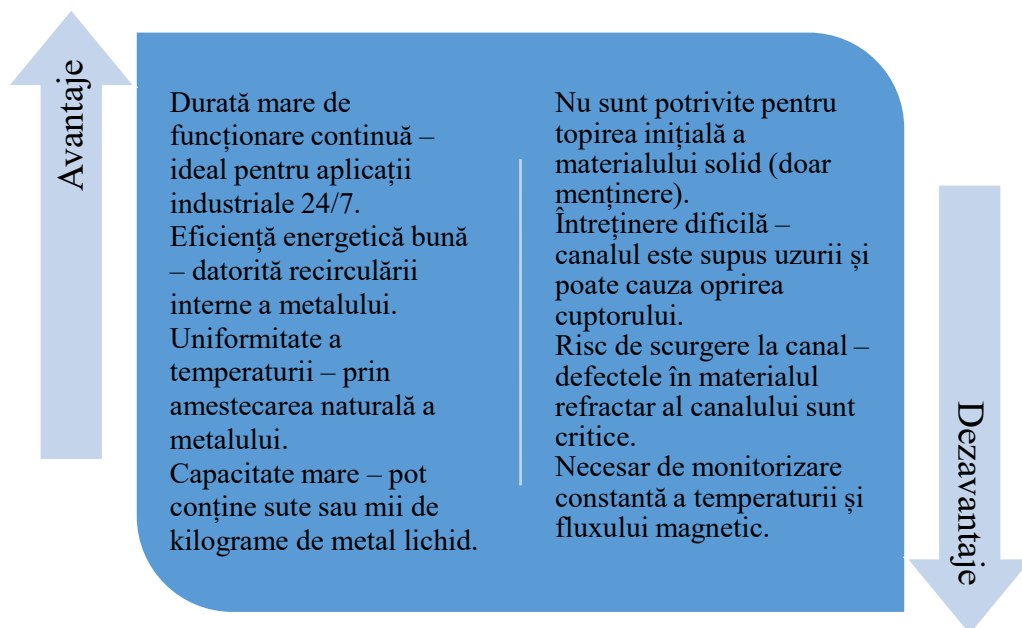


Figura 7.9. Avantajele și dezavantajele cuptoarelor cu canal

Cuptoarele cu canal se împart în două mari categorii, în funcție de poziționarea canalului, mai exact, cu canal vertical și cu canal orizontal.

Cuptoarele cu canal orizontal au miezul feromagnetic într-un plan vertical, iar metalul de topit este așezat într-un canal orizontal de secțiune practic constantă.

Figura 7.10 ilustrează schema de bază a unui cuptor cu canal orizontal. În figură se observă miezul feromagnetic în jurul căruia este inductorul, care la rândul lui este prins în interiorul canalului.

În practică, cuptoarele cu canal orizontal sunt mai frecvent utilizate decât cele cu canal vertical. Acest fapt se datorează construcției mai simple și ușor de întreținut, precum și a eficienței transferului termic și a reciclării. Într-adevăr, canalele orizontale facilitează circulația naturală a metalului între canal și baia principală, asigurând o uniformizare mai bună a temperaturii, iar convecția este

mai eficientă în aceste sisteme. Accesul la canalul orizontal este mai ușor pentru revizii sau reparații, iar în cazul cuptoarelor mari, modul orizontal permite schimbarea inductoarelor fără golirea completă a cuptorului.

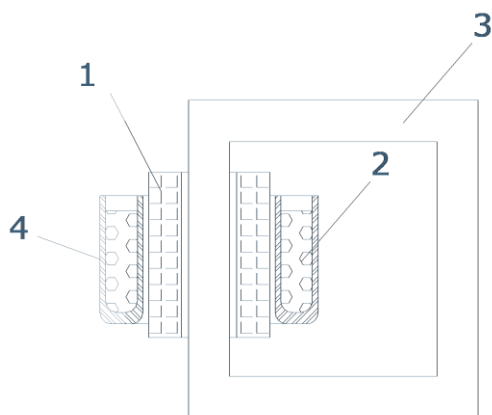


Figura 7.10. Schema de principiu a unui cuptor cu canal orizontal. 1 – inductor, 2 – șarjă, 3 – miez feromagnetic, 4 – vasul cuptorului

O altă variantă de cuptor cu canal orizontal este prezentată în figura 7.11, unde se observă faptul că miezul feromagnetic susține pe un jug - alimentarea, iar pe celălalt jug vasul sub formă de canal.

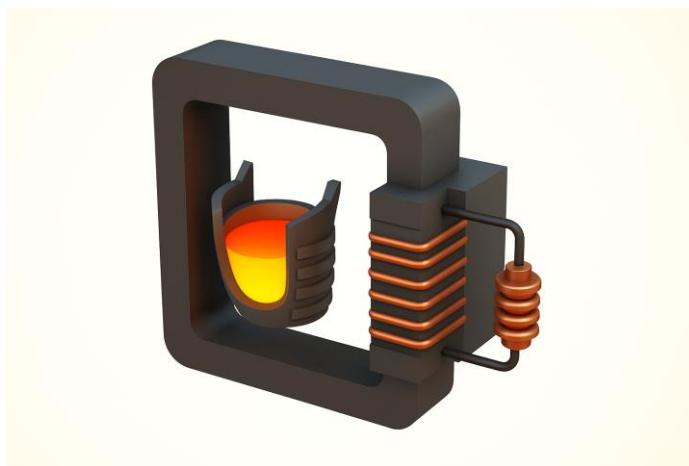


Figura 7.11.* Cuptor cu canal orizontal

În concluzie, cuptoarele cu canal orizontal sunt cele mai utilizate, datorită:

- Robusteții;
- Ușurinței în exploatare;
- Adaptabilității la producția industrială continuă.

Cuptoarele cu canal vertical (figura 7.12) au miezul feromagnetic într-un plan orizontal și canalul de secțiune variabilă, mai redusă în partea inferioară, care se transformă în partea superioară într-un rezervor în care se găsește majoritatea metalului topit.

Structura de bază a unui cuptor cu canal vertical cuprinde canalul de inducție, care este dispus vertical, sub baia de metal lichid; bobina de inducție, care este înfășurată în jurul canalului vertical, de obicei sub forma unei spirale drepte. Între canal și baia principală există o legătură verticală directă, iar metalul circulă prin convecție naturală.

Cuptoarele cu canal vertical sunt folosite în situațiile în care sunt spații foarte restrânse sau configurații speciale unde orientarea canalului orizontal este imposibilă. De asemenea, aceste cuptoare se folosesc și în aplicații experimentale.

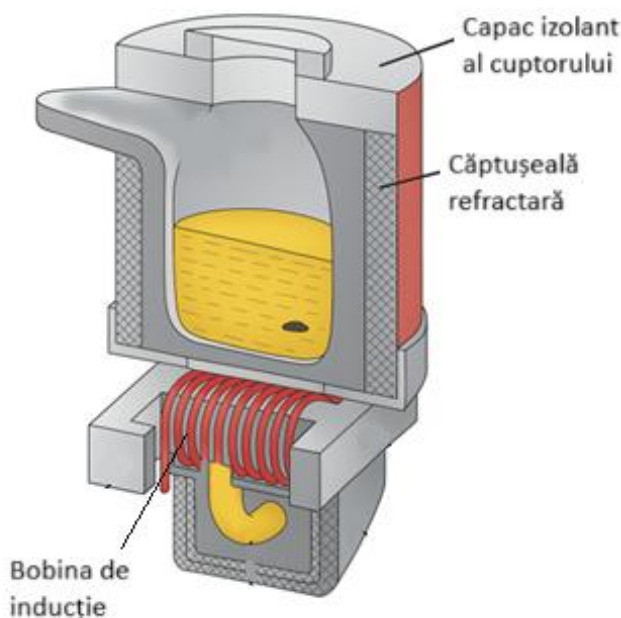


Figura 7.12. Cuptor cu canal vertical

În concluzie, cuptoarele cu canal vertical sunt utile în aplicații de nișă sau în spații limitate, dar nu au versatilitatea și întreținerea ușoară oferite de cuptoarele cu canal orizontal. Totuși, pot fi o alegere eficientă pentru procese industriale specifice sau continue, unde fiabilitatea și densitatea energetică sunt prioritare.

7.3.3. *Încălzirea la suprafață și în profunzime*

Încălzirea la suprafață se folosește de regulă pentru realizarea unui tratament de călire a metalelor, iar încălzirea în profunzime este utilizată pentru semifabricate care urmează a fi prelucrate la cald prin forjare, matrițare, presare sau îndoire.

Încălzirea la suprafață

Scopul acestui tip de încălzire prin inducție, este de a realiza o încălzire doar a suprafeței sau a unui strat exterior subțire al materialului. Astfel, ea se folosește pentru călirea suprafeței (de exemplu, angrenaje, arbori), brazare, și lipire.

Principiul de funcționare este următorul: se utilizează curenți de înaltă frecvență (100 kHz - 1 MHz), iar datorită efectului pelicular, curenții induși se concentrează în apropierea suprafeței, provocând o încălzire localizată la suprafață. În consecință, adâncimea de penetrare este mică, în general sub 1 mm, dar poate ajunge până la câțiva mm, în funcție de frecvență și material. Factori de control prin care se ajustează procesul de încălzire sunt frecvența (frecvență mai mare determină adâncime de pătrundere mai mică), conductivitatea și permeabilitatea magnetică a materialului (la materialele feromagnetice penetrare este mai mică).

În cazul încălzirii la suprafață (prezentată în figura 7.13, unde se observă tratarea termică a unei țevi cu rolul de călire), folosesc curenți de frecvență medie (2-10 kHz) și înaltă frecvență (0,1-10 MHz).



Figura 7.13.* Încălzirea la suprafață

Alte caracteristici ale încălzirii la suprafață sunt:

- Durata de încălzire trebuie să fie mică pentru a reduce pierderile de căldură prin conducție în restul materialului;
- Încălzirea la suprafață cu scopul de călire, poate fi continuă sau discontinuă. Călirea discontinuă este simultană, iar călirea continuă poate fi progresivă sau succesivă.
- Echipamentul electric al instalației de călire conține sursa de alimentare și un transformator de adaptare, cu sau fără circuit feromagnetic.
- Tensiunea secundară este redusă (35-75 V) și raportul de transformare variabil.

Încălzire în profunzime

Scopul dispozitivelor dedicate încălzirii în profunzime este încălzirea întregii secțiuni transversale sau a volumului materialului, fără a ajunge în stadiu de topire. Astfel, aplicațiile sunt în forjare (deformare plastică), recoacere și preîncălzire pentru formarea la cald.

Principiul de funcționare a acestor dispozitive este următorul - utilizează curenți de frecvență joasă (de obicei 50 Hz până la 10 kHz) pentru a forma curenții turbionari induși care pătrund mai adânc în material. Adâncimea de penetrare este mare, de la câțiva mm până la centimetri, în funcție de material și frecvență.

Factorul principal care influențează major încălzirea în profunzime și care se poate controla ușor este frecvența. Astfel, cu cât frecvența este mai mică, cu atât încălzirea este mai profundă. Un aspect important este alegerea formei bobinei pentru a se potrivi geometriei piesei de prelucrat pentru o încălzire uniformă. Figura 7.14 prezintă o aplicație a încălzirii în profunzime.

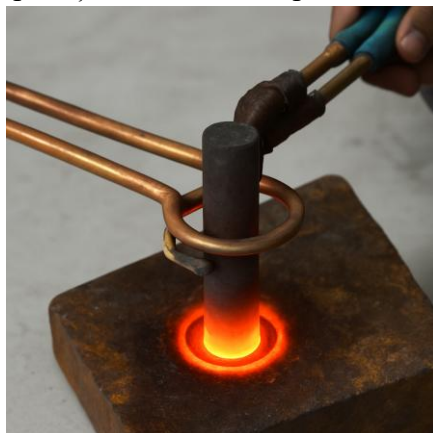


Figura 7.14.* Încălzirea în profunzime

Încălzirea în profunzime se mai folosește la tratarea termică a tablelor pentru uscarea lacurilor și a vopselelor, precum și la recoacerea pieselor.

Avantajul principal al încălzirii în profunzime constă în timpul relativ redus de încălzire, ceea ce dă posibilitatea de a construi agregate automatizate de înaltă productivitate care să încadreze ușor fluxurile tehnologice de prelucrare.

Pentru productivitate maximă trebuie ca diametrul piesei să fie de cel puțin trei ori adâncimea de pătrundere a curentului în metalul cald.

7.4. Alimentarea instalațiilor și dispozitivelor

Alimentarea instalațiilor și dispozitivelor bazate pe încălzirea prin inducție electromagnetică se face cu surse speciale, care în funcție de frecvența generată, se împart în:

- Frecvență joasă – generatoare sincrone rotite lent și cicloconvertoare cu tiristoare.
- Frecvență industrială – transformatoare sau autotransformatoare.
- Frecvență medie – multiplicatoare feromagnetice, generatoare sincrone, convertoare cu tiristoare.
- Frecvență înaltă – generatoare cu tranzistoare și tuburi electronice.

Surse de joasă frecvență (până la ~400 Hz)

Cele mai folosite tipuri de dispozitive utilizate în alimentarea instalațiilor sunt generatoare sincrone cu rotație lentă și cicloconvertoare cu tiristoare.

Generatoare sincrone (figura 7.15) - aceste mașini generează curent alternativ la frecvențe joase prin rotirea mecanică la o viteză mai mică decât viteza sincronă. Motorul principal mecanic (cum ar fi o turbină cu abur sau gaz) acționează dispozitivele.

Cicloconvertoare - acestea convertesc direct frecvența industrială (50/60 Hz) într-o frecvență de curent alternativ mai mică (de exemplu, 10-100 Hz) folosind tiristoare fără o legătură de curent continuu intermediară.

Avantajele acestor surse de frecvență joasă sunt următoarele trei - potrivire pentru piese mari care necesită penetrare profundă a căldurii, eficiență bună la frecvențe joase, și posibilitatea obținerii unei puteri mare de ieșire.

Dezavantajele acestor surse sunt: generatoarele sincrone sunt voluminoase și scumpe, iar cicloconvertoarele necesită sisteme de control complexe.

Aplicațiile acestor surse sunt în încălzirea țagelilor pentru forjare și încălzirea plăcilor sau barelor metalice mari.



Figura 7.15. Generator sincron – imagine conceptuală

Surse de frecvență industriale (50/60 Hz)

Sursele de frecvență industrială sunt în principal de două tipuri, și anume transformatoare și autotransformatoare (figura 7.16).

Aceste dispozitive cresc sau scad valoarea efectivă a tensiunii de alimentare. Aplicațiile simple de încălzire prin inducție pot utiliza direct frecvența industrială, deși acest lucru este rar pentru încălzirea prin inducție, deoarece penetrarea și eficiența sunt slabe la 50/60 Hz.

Avantajele acestor surse sunt următoarele: construcție simplă, robustă și ieftină, și mai ales ușor de găsit. Contrar, dezavantajele sunt următoarele - frecvența industrială este prea mică pentru încălzirea eficientă prin inducție a pieselor mici sau încălzirea suprafețelor, și nu este utilizată în mod obișnuit pentru încălzirea prin inducție electromagnetică pură, decât dacă este combinată cu alte metode.

Aceste surse sunt implicate în aplicații industriale precum preîncălzirea pieselor mari, preîncălzirea țevelor și a plăcilor în metalurgie, și încălzirea materialelor nemetalice unde efectul pelicular nu este o problemă.

Surse de medie frecvență (500 Hz – ~10 kHz)

Cele mai populare surse de medie frecvență sunt multiplicatoarele feromagnetice de frecvență, generatoarele sincrone de viteză medie, și invertoarele cu tiristoare (convertoare cu comutare de linie + invertor). Funcționarea acestor dispozitive este explicată în continuare.

Multiplicatoarele feromagnetice convertesc curentul alternativ de 50/60 Hz la o frecvență mai mare folosind elemente cu miez feromagnetic care rezonază la frecvențe mai mari. Invertoarele cu tiristoare convertesc curent continuu

rectificat în curent alternativ de medie frecvență folosind circuite controlate prin tiristoare. Generatoarele sincrone sunt mașini mecanice care generează direct frecvență medie.

Avantajele și dezavantajele acestor surse de frecvență sunt prezentate în figura 7.17.

Aplicații ale acestor surse sunt în forjare și formare, precum și călirea suprafeței componentelor de dimensiuni medii.

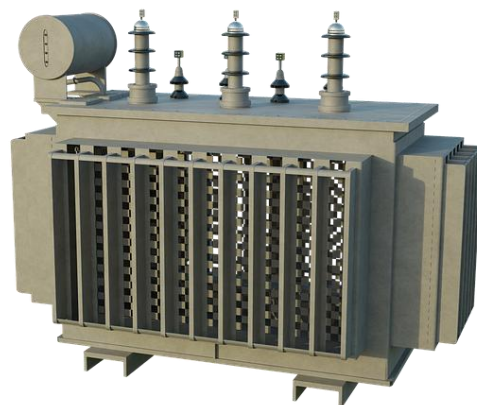
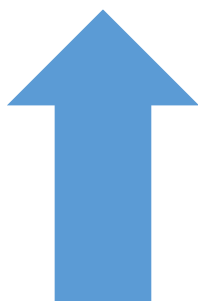


Figura 7.16. Transformator – imagine conceptuală



Echilibru bun între adâncimea de penetrare și eficiența de încălzire.

Convertoarele tiristoare oferă frecvență și putere controlabile.

Potrivite pentru componente de dimensiuni intermediare.



Multiplicatoarele feromagnetice sunt relativ rare astăzi.

Convertoarele tiristoare sunt voluminoase și necesită sisteme de răcire.

Figura 7.17. Avantajele și dezavantajele surselor de medie frecvență

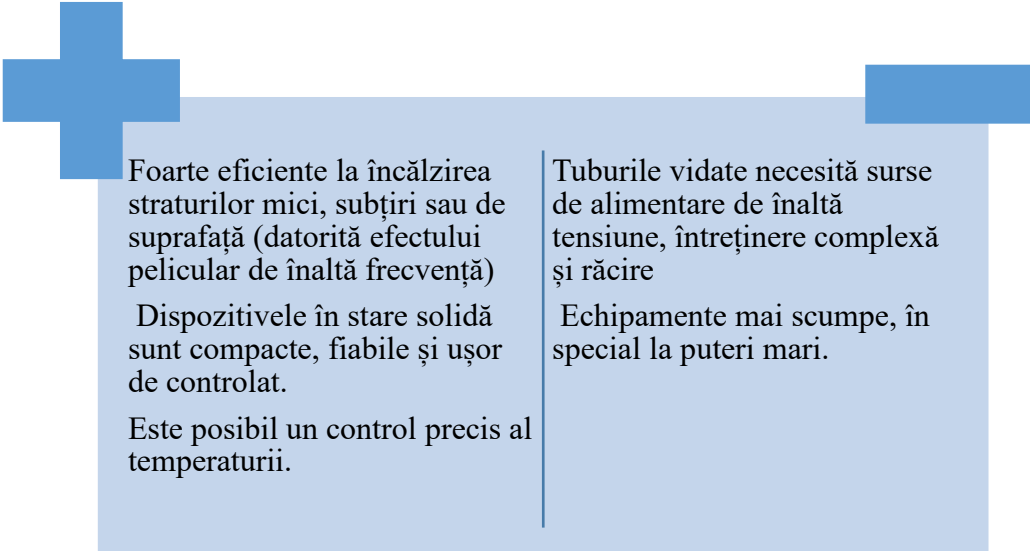
Surse de înaltă frecvență (interval >10 kHz până la MHz)

Exemple de surse de înaltă frecvență sunt generatoare în stare solidă (IGBT, MOSFET) și generatoare cu tuburi vidate (triode, tetrode, magnetrone, Clistrone).

Principiul de funcționare al generatoarele în stare solidă este următorul - utilizează tranzistoare de putere (IGBT, MOSFET) în circuite invertoare rezonante sau bazate pe PWM (Pulse Width Modulation) pentru a genera curent alternativ de înaltă frecvență. Funcționarea tuburilor vidate este după cum urmează - circuitele oscilatoare cu tuburi vidate amplifică semnalele la niveluri de radiofrecvență sau microunde.

Punctele forte și punctele slabe ale acestor surse de frecvență înaltă sunt sintetizate în figura 7.18.

Surselor de înaltă frecvență sunt folosite în procesele de lipire prin inducție, tratamentul termic al componentelor mici sau de precizie, fabricarea dispozitivelor medicale, industria semiconductorilor, și topirea loturilor mici de metale prețioase.



<p>Foarte eficiente la încălzirea straturilor mici, subțiri sau de suprafață (datorită efectului pelicular de înaltă frecvență)</p> <p>Dispozitivele în stare solidă sunt compacte, fiabile și ușor de controlat.</p> <p>Este posibil un control precis al temperaturii.</p>	<p>Tuburile vidate necesită surse de alimentare de înaltă tensiune, întreținere complexă și răcire</p> <p>Echipamente mai scumpe, în special la puteri mari.</p>
--	--

Figura 7.18. Punctele forte și punctele slabe ale surselor de înaltă frecvență

Figura 7.19 cuprinde imagini cu generatoarele folosite în cadrul instalațiilor bazate pe încălzirea prin inducție.

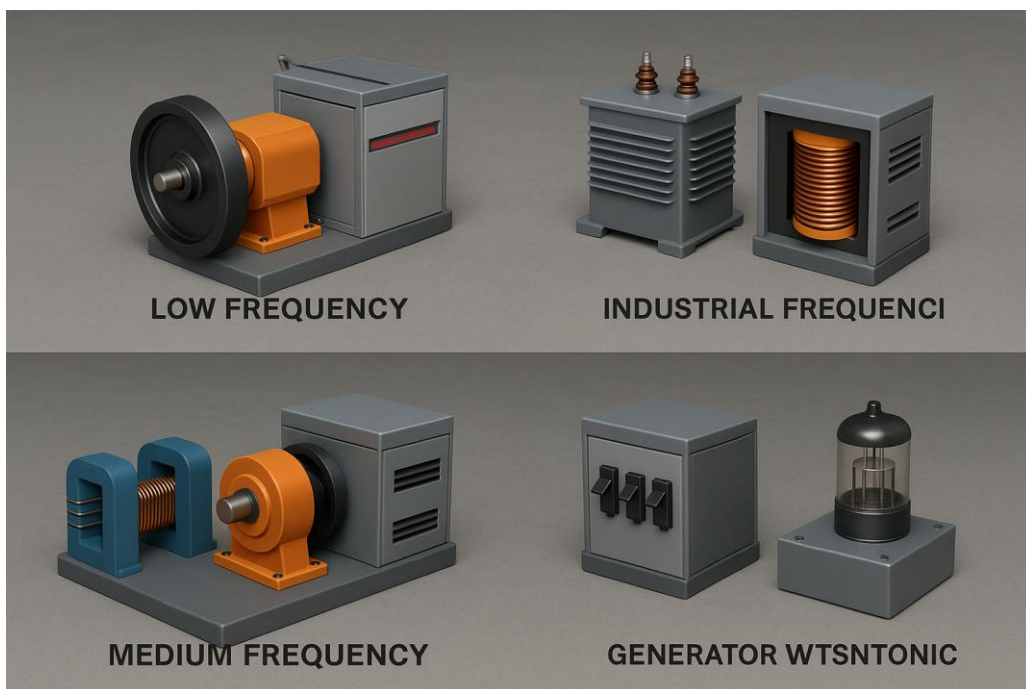


Figura 7.19.* Generatoare folosite în încălzirea prin inducție

7.5. Bibliografie

- [1].Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1997.
- [2].Nereus Fernandes, *Induction Heating – Theory and Applications*, 2018, ResearchGate.

Observație – figurile notate cu “*” au fost create folosind programe dedicate, de inteligență artificială generativă și nu reflectă în totalitate realitatea, ci au rol informativ.

7.6. Autoevaluare

- 1). Fenomenele care stau la baza încălzirii prin inducție electromagnetică sunt Efectul pelicular / Efectul de proximitate / Efectul curenților turbionari

2). Adâncimea de pătrundere a unui curentilor turbionari este direct proporțională cu frecvența.

Adevărat / Fals

3). Aplicațiile industriale ale încălzirii prin inducție sunt

Cuptoarele cu creuzet / Cuptoarele cu vas orizontal / Încălzirea superficială

4). Cuptoarele cu creuzet nu prezintă miez feromagnetic.

Adevărat / Fals

5). Cuptoarele cu canal prezintă următoarele variante

Cuptoare cu canal vertical / Cuptoare cu canal orizontal / Cuptoare cu oblic

6). Generatoare ale instalațiilor electrotermice bazate pe inducție electromagnetică sunt

Autotransformatoare / Generatoare sincrone / Convertoare cu tiristoare /
Generatoare asincrone

7). Principalul dezavantaj al instalațiilor electrotermice bazate pe încălzirea prin inducție este necesitatea automatizării.

Adevărat / Fals

8

Încălzirea cu arc electric

8.1. Aspecte generale

Încălzirea cu arc electric este un proces de obținerii a căldurii, care se bazează pe cantitatea de căldură dezvoltată în arcul electric stabilit între electrozii separați de un mediu gazos ionizat, la o tensiune electrică corespunzătoare. Arcul electric produce temperaturi foarte ridicate, care sunt suficiente pentru a topi sau vaporiza majoritatea metalelor și materialelor.

Încălzirea arcului este guvernată de legea lui Joule (pierderile electrice prin rezistență, care se determină prin relația matematică:

$$\Delta P = R \cdot I^2 [W] \quad (8.1)$$

În cazul acestui proces tehnologic, legea amintită se aplică astfel: când curentul electric trece prin gazul ionizat (plasmă), rezistența mediului generează căldură. Temperatura din coloana arcului poate ajunge de obicei între 6000°C și 8000°C și până la 20000°C în sisteme specializate, cum ar fi arcurile cu plasmă. Această căldura generată este transmisă prin conducție termică (contact direct a arcului electric cu materialul de procesat), convecție termică (flux de gaze fierbinți produse în jurul arcului electric) și radiație termică (radiațiile infraroșii și vizibile rezultate din apariția arcului electric).

În cadrul încălzirii cu arc electric se folosesc mai multe tipuri de arc electric:

- Arcul de curent continuu – poate fi de polaritate pozitivă sau negativă, și implicat în diferite caracteristici de încălzire. Arcurile de curent continuu sunt stabile și mai ușor de controlat.
- Arcul de curent alternativ – are polaritate alternativă (cicluri pozitive/negative). Acest tip de arc electric este mai dificil de întreținut, dar util în unele aplicații de topire a metalelor.

- Arcul transferat – se caracterizează prin faptul că acest tip de arc electric se transferă de la electrod la piesa de prelucrat, și este utilizat în tăierea cu arc cu plasmă și în cuptoare pentru încălzire directă.
- Arcul netransferat - arcul rămâne între doi electrozi, fără a exista o legătură directă cu materialul de procesat. În consecință, căldura este transferată la piesa de prelucrat prin convecție și radiație termică.

8.2. Caracteristici de bază

Componentele principale ale unei instalații care se bazează pe încălzirea prin arc electric sunt: (1) electrozii, care sunt fabricați din materiale conductoare precum grafit, cupru, tungsten sau carbon, (2) gazul ionizat (plasmă), care poate fi aer (pentru arcuri de bază) sau gaze inerte precum argon, heliu, hidrogen sau azot pentru scopuri speciale și (3) sursa de alimentare, care sunt surse de curent înalt și joasă tensiune capabile să furnizeze sute până la mii de amperi, iar curentul continuu este adesea utilizat pentru arcuri stabile.

Principiul de funcționare al arcului electric folosit în instalațiile dedicate se bazează pe etapele descrise în figura 8.1 – inițierea, formarea plasmei, încălzirea susținută și transferul de căldură.

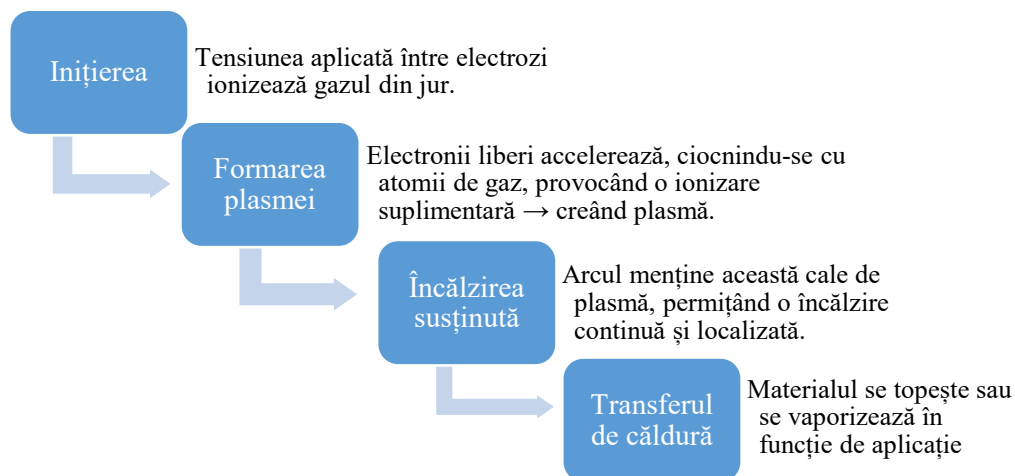


Figura 8.1. Etapele funcționării arcului electric

Arcul electric de plasmă are două caracteristici de bază și anume (1) temperatura plasmei - poate depăși 20000°C în medii controlate și (2) gaze

utilizate - adesea argon, azot, hidrogen sau amestecuri de gaze pentru optimizarea caracteristicilor arcului.

Factorii de stabilitate a arcului electric sunt următorii:

- Materialul electrodului – se folosesc materiale refractare, precum W, care oferă o durată de viață și o stabilitate mai bună.
- Lungimea arcului - arcurile mai scurte sunt mai stabile, iar arcurile mai lungi, care se caracterizează prin tensiune mai mare sunt mai susceptibile la fluctuații.
- Tipul și presiunea gazului - gazele inerte îmbunătățesc stabilitatea prin reducerea oxidării.
- Alimentarea - alimentarea cu curent continuu oferă un arc mai stabil. Comparativ, arcurile de curent alternativ pot suferi instabilitate din cauza inversării polarității.
- Sistemul de răcire - duzele sau electrozii sunt răciți cu lichid, în cazul în care sunt utilizați în arcuri de mare putere pentru a menține stabilitatea sistemului.

Un aspect important în utilizarea încălzirii cu arc electric este metoda de aprindere a arcului electric. În cadrul încălzirii cu arc electric se folosesc trei metode de aprindere a arcului: pornirea prin atingere, pornirea în înaltă frecvență și prin arc pilot.

Pornirea prin atingere implică contactul scurt dintre electrod și piesa de lucru, care inițiază arcul, mai exact electrodul atinge fizic piesa de lucru (sau alt electrod) și apoi este retras. Drept efect, apare un scurtcircuit, un curent ridicat, care determină încălzirea localizată intensă și apoi se inițiază ionizarea și la final formarea arcului electric.

Pornirea de înaltă frecvență implică apariția unei scântei, care ionizează spațiul liber pentru a porni arcul fără contact cu electrodul. Metoda de pornire prin înaltă frecvență presupune utilizarea unui curent alternativ de înaltă frecvență și înaltă tensiune suprapus pe circuitul principal, care ionizează spațiul dintre electrozi. Efectul acestui tip de pornire este următorul - se ionizează gazul, care determină reducerea tensiunii de străpungere, și apoi formarea unui arc fără contact.

Arcul pilot este un arc secundar mic, care este stabilit mai întâi, ceea ce ajută la crearea arcului principal chiar și cu materiale neconductive. Efectul acestui tip de pornire este menținerea unei ionizări stabile, permițând aprinderea fără a atinge piesa de lucru.

Baza matematică (tensiunea pe arc, puterea și energia) care este legată de încălzirea prin arc electric și instalațiile bazate pe încălzirea cu arc electric este următoarea:

$$U_a = k \cdot L [V] \quad (8.2)$$

Unde U_a este tensiunea arcului electric, k – constantă care depinde de electrozi, gaz și curent, L – lungimea arcului.

$$P = U \cdot I [W] \quad (8.3)$$

Unde P este puterea consumată, U – tensiunea de alimentare, I – curentul instalației.

$$q \propto R \cdot I^2 [J] \quad (8.4)$$

Unde q este fluxul termic este proporțional cu produsul dintre rezistență și curentul la pătrat, mai mult curent determină o rată de încălzire mai mare, iar rezistența plasmei afectează și ea eficiența.

În încălzirea cu arc electric trebuie avute în vedere niște considerații de siguranță - riscul de radiații, interferența electromagnetică, riscurile de incendiu și focurile toxice. Riscurile de radiații se referă la apariția radiațiilor ultravioletoare (UV) și a infraroșii (IR), care pot provoca leziuni oculare și arsuri. Din această cauză sunt necesare echipamente speciale de protecție pentru personalul de lucru. Un efect al arcului electric este posibilitatea apariției unor probleme de interferență electromagnetică, care poate afecta funcționarea componentelor electronice. În consecință, este necesară o ecranare adecvată în zonele sensibile. Având în vedere că se lucrează cu temperaturi foarte mari și descărcare electrică, există riscuri de incendiu. Astfel, trebuie menținute medii sigure de incendiu pentru a preveni accidente din cauza apariției scânteilor și materialelor topite. Focurile toxice sunt un alt dezavantaj al încălzirii cu arc electric. Aceste focuri sunt generate în special la procesarea metalelor acoperite sau vopsite, astfel este nevoie de utilizarea unor extractoare de fum și ventilație.

Avantajele și dezavantajele utilizării instalațiilor cu arc electric sunt sintetizate în figura 8.2. Într-adevăr, temperaturile extrem de ridicate care se dezvoltă fac posibilitatea implicării acestor instalații pentru topirea și procesarea la scară industrială. Mai mult, încălzirea localizată reduce impactul asupra materialelor din jur. Un alt avantaj al instalațiilor bazate pe încălzirea cu arc electric este versabilitatea în ceea ce privește varietatea materialelor ce pot fi prelucrate, respectiv proceselor ce se pot realiza, adică topire, tăiere, sau chiar sintetizarea

nanoparticulelor. În final, cel mai important avantaj este eficiența, care în cazul sistemelor cu arc transferat, aproape toată căldura este direcționată către țintă.

Dezavantajele încălzirii cu arc electric se referă la consumul ridicat de energie, uzura electrozilor, emisia de vapori nocivi și complexitatea sistemelor. Analizând mai în detaliu aceste dezavantaje, se poate afirma că instalațiile electrotermice implică costuri ridicate, atât din perspectiva faptului că pentru a funcționa au nevoie de cantități mari de energie electrică, dar și din cauza că este nevoie de investiții suplimentare pentru înlocuirea continuă a electrozilor uzați, precum și pentru sistemele de extracție și evacuarea vaporilor nocivi și sistemele complexe de control, răcire și mecanismele de siguranță.

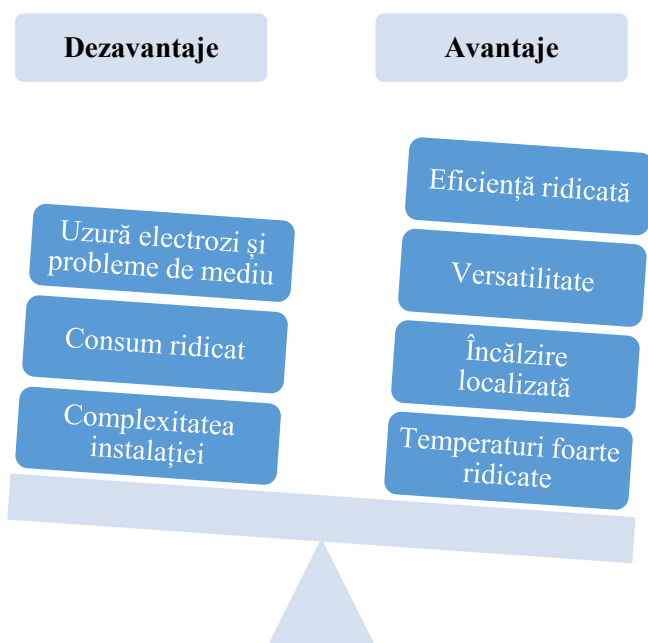


Figura 8.2. Avantajele și dezavantajele încălzirii cu arc electric

Aplicațiile încălzirii cu arc electric sunt în principale trei, și anume cuptoare cu arc electric, sudarea cu arc electric și tăierea cu arc electric. Acest capitol se focalizează pe cuptoarele cu arc electric, care vor fi prezentate în detaliu în subcapitolul care urmează.

8.3. Cuptoarele cu arc electric

Cuptoarele cu arc electric sunt receptoare electrotermice, care au o construcție specială. Sistemul de alimentare și schema monofilară a unui cuptor cu arc electric se regăsesc în figura 8.3.

Alimentarea cuptorului se realizează în medie tensiune, 6-20 kV. Circuitul electric de alimentare are rolul de a transmite șarjei puterea absorbită din rețeaua de distribuție la valorile necesare ale curentului și tensiunii.

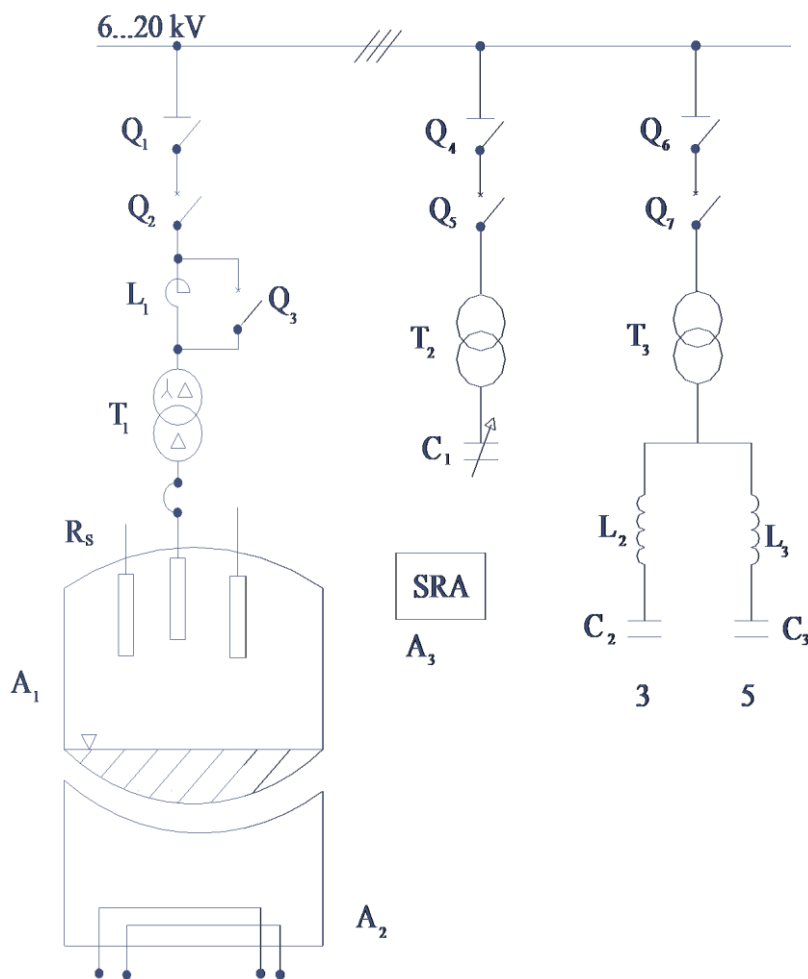


Figura 8.3. Schema monofilară de alimentare a unui cuptor cu arc electric. Q_1, Q_4, Q_6 – separatoare, Q_2, Q_3, Q_5 și Q_7 – întrerupătoare, T_1, T_2, T_3 – transformatoare coborâtoare, L_1 – bobină de reactanță, R_s – rețeaua scurtă a cuptorului, A_1 – cuptorul propriu-zis, A_2 – agitator inductiv, A_3 – sistemul de control al cuptorului, C_1 – condensator de compensare a puterii reactive, L_2, C_2, L_3, C_3 – condensatoare și bobine, componente a sistemului de filtrare a armonicilor 3 și 5

Principalele elemente care sunt în legătură directă cu cuptorul propriu-zis sunt instalația de înaltă tensiune, transformatorul cuptorului, rețeaua scurtă, agitatorul inductiv și instalația de reglare automată a sistemului de măsură (SRA).

Instalația de înaltă tensiune cuprinde aparatele de conectare (întreruptoare și separatoare), bobina de reactanță pentru limitarea curentului de scurtcircuit, condensatoare pentru creșterea factorului de putere la valoarea neutrală, comutabile în trepte, filtre absorbante pentru micșorarea sau limitarea armonicilor de ordinul 3 și 5.

Transformatorul cuptorului are un domeniu mare de reglare a tensiunii secundare, astfel ca tensiunea în secundar se poate modifica în trepte. Conexiunile transformatorului sunt Δ -Y în primar și Δ în secundar, iar tensiunile din primar, $U_1=6...20$ kV, și secundar, $U_2 = 65...850$ V.

Rețeaua scurtă face legătura electrică dintre transformator și electrozi ($l = 10...30$ m) și este parcursă de curenți foarte mari (peste 10 kA). Această rețea se realizează din cabluri flexibile cu conductoare de Cu, răcite cu apă sau aer.

Agitatorul inductiv se utilizează la cuptoarele cu capacitatea de peste 15 t. Rolul agitatorului este de a produce amestecarea băii de metal topit în fazele care succed topirii.

Sistemul de reglare automată a SRA are rolul de a menține constantă lungimea arcului electric prin deplasarea electrolizilor.

Schema electrică echivalentă a sistemului cuptorului este ilustrată în figura 8.4. Se poate observa din schema electrică echivalentă faptul că se neglijează curentul de magnetizare al transformatorului în raport cu curentul de sarcină, adică circuitele din primarul transformatorului sunt raportate la secundar.

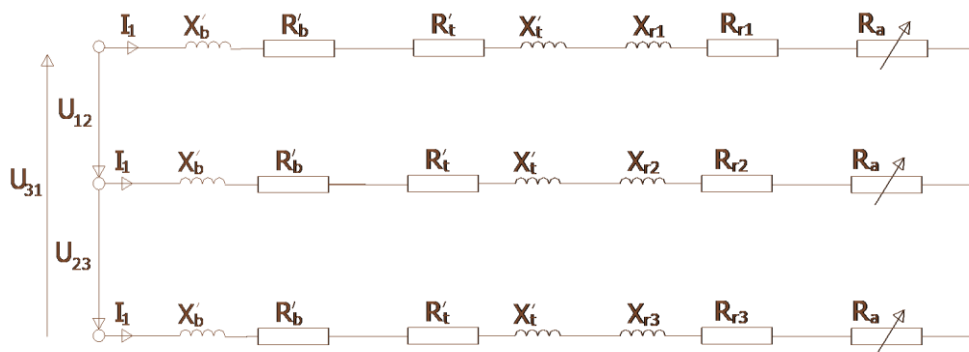


Figura 8.4. Schema electrică echivalentă a sistemului cuptorului. X_b' – inductanța bobinei de reactanță, R_b' – rezistența bobinei de reactanță, R_t' și X_t' – rezistența și reactanța transformatorului, X_{r1} , X_{r2} , X_{r3} , R_{r1} , R_{r2} , R_{r3} – reactanțele și rezistențele rețelei scurte, R_a – rezistența variabilă a arcului electric

Cuptoarele cu arc electric se împart în mai multe categorii în funcție de mai multe criterii. Figura 8.5. sintetizează tipurile de cuptoare în funcție de trei criterii.

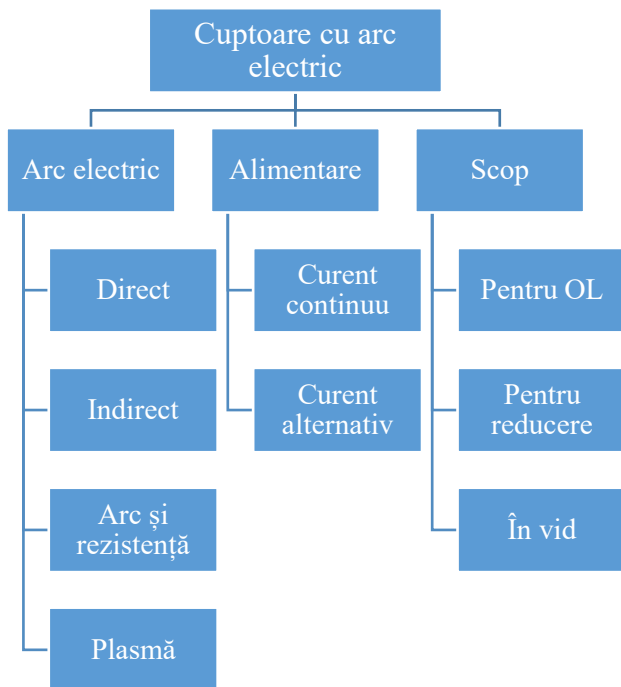


Figura 8.5. Tipuri de cuptoare cu arc electric.

După modul de producere a arcului electric, cuptoarele pot fi cu acțiune directă, cu acțiune indirectă, cu arc cu plasmă și cu arc și rezistență.

Cuptoarele cu acțiune directă (figura 8.6) se caracterizează prin faptul că arcul electric se stabilește între electrozi (din cărbune sau din materialul care trebuie topit) și șarjă.

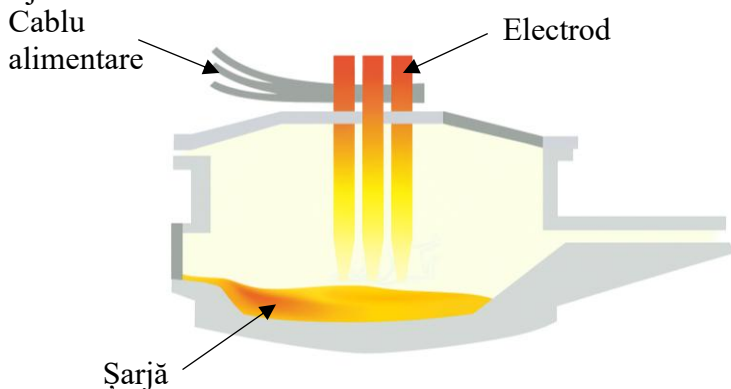


Figura 8.6. Cuptor cu arc electric cu acțiune directă

Aceste cuptoare cu arc electric sunt cel mai des folosite pentru producerea oțelurilor.

Cuptoarele cu acțiune indirectă presupune ca arc electric se stabilește între doi electrozi, iar căldura este transmisă șarjei prin radiație (acestea sunt mai puțin utilizate azi datorită densităților reduse de curent electric suportate de electrozii așezați orizontal și supuși la încovoiere). Dar, aceste cuptoare se utilizează atunci când contactul direct cu electrozii nu este de dorit.

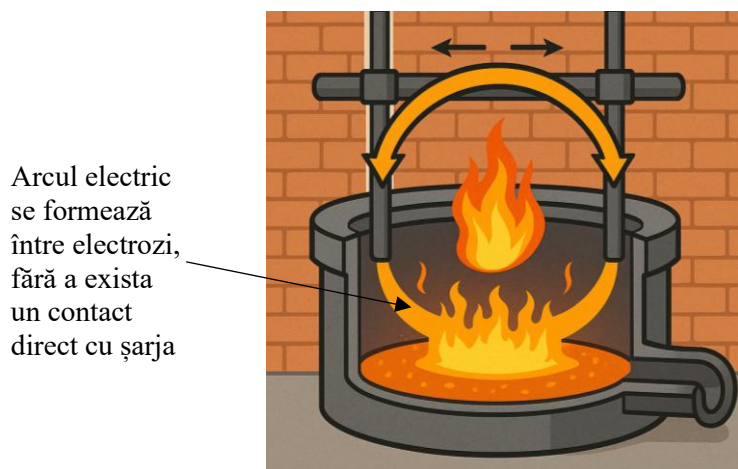


Figura 8.7.* Cuptor cu arc electric cu acțiune indirectă

Cuptoarele cu arc cu plasmă (figura 8.8) utilizează torțe cu plasmă pentru temperaturi extrem de ridicate. Acest tip de cuptoare cu arc electric este ideal pentru metale refractare, rafinarea aliajelor sau prelucrarea deșeurilor.

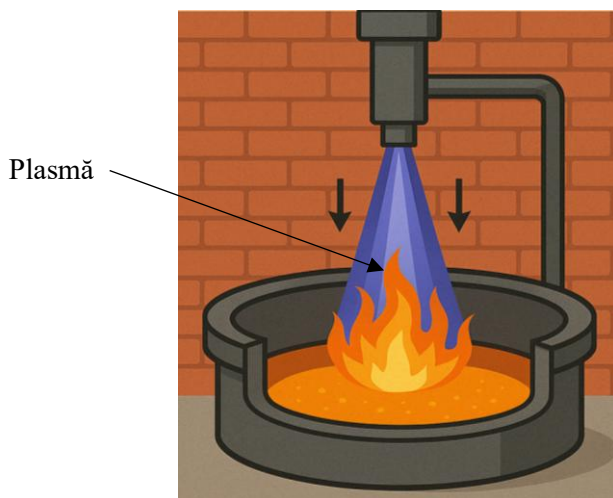


Figura 8.8.* Cuptor cu arc electric cu plasmă

Cuptoarele cu arc și rezistență se diferențiază de celelalte tipuri de cuptoare cu arc electric prin faptul că, electrozii sunt cufundați în masa materialului de topit, care are o rezistență electrică suficient de mare pentru a face posibilă amorsarea arcului electric. Încălzirea este produsă atât prin arc cât și prin rezistența materialului.

Din punct de vedere al alimentării, cuptoarele cu arc electric pot fi de curent alternativ sau de curent continuu. Cele de curent alternativ sunt monofazate sau trifazate, acestea fiind cele mai utilizate având în vedere puterile necesare și continuitatea arcului electric.

Din punct de vedere al utilizării, cuptoarele cu arc electric se clasifică în:

- Cuptoare pentru elaborarea oțelurilor.
- Cuptoare cu arc electric în vid.
- Cuptoare pentru reducere.

Cuptoarele cu arc electric pentru elaborarea oțelurilor sunt alimentate, în general, în curent alternativ trifazat și sunt cuptoare cu acțiune directă. Aceste receptoare electrotermice funcționează în regim intermitent, cuva fiind golită după fiecare șarjă, iar pornirea se realizează cu încărcătură solidă. Astfel de cuptoare se utilizează ca utilaje primare de topire în turnătorii. În acest context, capacitatea cuptoarelor poate fi mică (masa încărcăturii este sub 10 tone), medie (masa șarjei este între 10 și 100 tone) și mare (masa încărcăturii este mai mare de 100 tone).

Cuptoarele cu arc electric dedicate obținerii oțelurilor au următoarele avantaje, față de celelalte tipuri de cuptoare care se folosesc tot în același scop:

- Construcție robustă.
- Flexibilitate din punct de vedere al materialului încărcăturii.
- Capacități foarte mari (ajunge până la 400 t).
- Puteri unitare ridicate.
- Posibilități de automatizare a desfășurării procesului tehnologic (calculatoare de proces).

Principalele dezavantaje se referă la trei aspecte, și anume: solicitarea termică puternică a capacului și pereților cuptoarelor, variația mare a puterii (25...100 % P_u) între fazele regimului tehnologic, factorul de putere scăzut și variația consumului de energie reactivă, baia de metal topit are o agitație redusă, și zgomot ridicat.

Trebuie menționat faptul că acest tip de cuptoare sunt foarte populare în industria oțelului, astfel în 2010 în SUA 50% din producția de OL era obținută folosind cuptoare cu arc electric.

Cuptoarele pentru elaborarea oțelurilor așa cum s-a specificat, au un serviciu intermitent, a cărui ciclu de funcționare se desfășoară în șase etape: încărcarea șarjei, topirea, rafinarea și eliminarea impurităților, testarea materialului, evacuarea șarjei și eliminarea zgurii.

Un alt aspect care trebuie menționat este că pentru a obține o căldură mai mare, se injectează cărbune și O₂. Aproximativ 35 % din căldura din cuptoar se datorează acestei injecții. Energia injectată este precis controlată pentru a obține conținutul dorit de C (carbon) a produsului finit.

În timpul procesului tehnologic de elaborare a oțelului, se eliberează mai mulți compuși chimici, care au diferite surse, și în diferite procente. Acești compuși și compoziția lor sunt enumerați în tabelul 8.1.

Tabelul 8.1. Compușii chimici rezultați în timpul procesului tehnologic

Substanța	Sursa	Procentul compoziției
CaO	Șarjă	40 - 60 %
SiO ₂	Oxigenare	5 - 15 %
FeO	Oxigenare	10 - 30 %
MgO	Șarja, dolomită	3 - 8 %
CaF ₂	Șarjă - zgură fluidizată	
MnO	Oxigenare	2 - 5%
S	Absorbit din oțel	
P	Oxigenare	

Cuptoarele cu arc în vid se alimentează în curent continuu. Ele se utilizează pentru obținerea metalelor de mare puritate, prin retopire. Astfel, se obțin metale greu fuzibile și active din punct de vedere chimic precum oțeluri speciale, aliaje pe bază de titan, tantal, molibden și carburi metalice.

Cuptoarele electrice pentru reducere utilizează încălzirea combinată cu arc electric și rezistență. În cazul acestor cuptoare cu arc electric, electrozii alimentați în curent alternativ fiind cufundați în șarja, care este compus dintr-un amestec de minereu, materiale de adaus, cărbune etc. În consecință, aceste receptoare electrotermice se utilizează pentru producerea feroaliajelor, siliciului, aliajelor pe bază de siliciu, carburi de calciu etc.

8.4. Bibliografie

[1].Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1997.

[2].Kingsley Posiyano, *The Electric Arc Furnace*, Scribd.

Observație – figurile notate cu “*” au fost create folosind programe dedicate de inteligență artificială generativă și nu reflectă în totalitate realitatea, ci au rol informativ.

8.5. Autoevaluare

- 1) Stabilizarea arcului electric este necesară:
 În c.c. / În c.a.
- 2) Avantajele cuptoarelor cu arc electric sunt:
 Robustețe / Capacitate mare a încărcăturii / Posibilitatea automatizării / Factor de putere ridicat
- 3) Cuptoarele cu arc electric pot fi:
 Cu vid/ Cu acțiune directă / Cu acțiune mixtă
- 4) Aplicațiile cuptoarelor cu arc sunt în domeniul:
 Prelucrării oțelurilor/ Aliajelor speciale/ Topirii Fe

9

Încălzirea materialelor dielectrice

9.1. Introducere

Materialele dielectrice sunt materiale în esență electroizolatoare, deci prin ele nu va trece curentul electric atunci când este aplicată o tensiune. La aplicarea unei tensiuni, apar însă unele schimbări la nivel atomic, care se referă la fenomenul de polarizare. În concluzie, materialele dielectrice nu conduc curentul electric, dar pot suporta câmpuri electrostatice. Cele mai comune materiale dielectrice sunt materialele plastice, sticla, mica, materialele ceramice, hârtia impregnată și aerul.

Încălzirea dielectrică înseamnă tratarea termică a materialelor electroizolatoare prin utilizarea unor receptoare electrotermice. Acest tip de încălzire se bazează pe fenomenul dezvoltării de căldură într-un material dielectric omogen și izotrop plasat într-un câmp electric uniform. Încălzirea materialului dielectric apare ca o consecință a concentrării energiei în volumul piesei de încălzit sub formă de pierderi.

Pierderile de putere activă dezvoltate în material sunt pierderi prin conducție (materialul nu este perfect izolant) și pierderi prin histerezis dielectric determinate de fenomenele de polarizare.

Încălzirea materialelor dielectrice este determinată de efectul de polarizare în câmp electric a acestora, polarizare exprimată printr-o stocare de sarcină electrică. Fenomenul de polarizare care apare, din punct de vedere al localizării lui se împarte în patru categorii:

- Polarizarea electronică – distorsionarea orbitelor electronilor datorită aplicării câmpului electromagnetic.
- Polarizarea atomică (ionică) – distorsionarea atomilor din cadru moleculelor.

- Polarizarea de orientare – orientarea, prin aplicarea câmpului electromagnetic a moleculelor deja polarizate permanent datorită legăturilor lor chimice.
- Polarizarea sarcinii spațiale – acumularea de sarcină la nivelul discontinuităților de material datorită migrării unor purtători de sarcină sub influența câmpului electromagnetic aplicat.

9.2. Caracteristicile încălzirii dielectrice

Materialele izolatoare electric se tratează termic folosind câmpul electric de înaltă frecvență creat cu ajutorul unei surse corespunzătoare. Astfel, când materialele dielectrice sunt plasate într-un câmp electric alternativ, materialele dielectrice sunt polarizate. Dar, din cauza frecării moleculare și a proceselor de relaxare, această polarizare este în întârziere față de câmpul aplicat, disipând energia sub formă de căldură. Această încălzire este cuantificată prin pierderile dielectrice și depinde de trei parametri: frecvența câmpului electric aplicat, tangenta unghiului de pierderi și pierderile de putere activă.

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \operatorname{tg}\delta V [W] \quad (9.1)$$

Unde P sunt pierderile de putere activă, f – frecvența câmpului electric [Hz], E – intensitatea câmpului electric [V/m], ε_0 – permitivitatea în vid, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m], ε_r – permitivitatea relativă a materialului dielectric, V – volumul materialului de procesat [m³], $\operatorname{tg}\delta$ – tangenta unghiului de pierderi.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (9.2)$$

Unde ε_r' - constanta dielectrică, ε_r'' - factorul de pierderi dielectrice.

Factorul de pierderi dielectrice depinde de natura materialului, de prezența impurităților, frecvență, temperatură și intensitatea câmpului electric. Pentru a se obține valori suficient de mari a pierderilor în dielectric, se folosesc frecvențe de 0,5 ... 300 MHz.

Pentru ca un material dat să poată fi încălzit în mod eficient folosind încălzirea capacitivă trebuie ca el să îndeplinească condiția (permitivitatea relativă și tangenta unghiului de pierderi):

- Încălzire bună - $\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta > 1$.
- Încălzire posibilă - $\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta = 0,01 \dots 1$

- Încălzire imposibilă - $\epsilon_r t g \delta < 0,01$.

Densitatea de putere poate fi crescută și prin mărirea câmpului electric. Iar, creșterea tensiunii poate cauza străpungerea dielectricului, de aceea se lucrează la valori ale câmpului electric de 80...300 V/mm, mai frecvent între 80...160 V/mm. Tensiunea depășește rar 15 kV pentru a evita descărcările incomplete.

Conținutul de apă este foarte important, deoarece apa este un dielectric aparte. Tabelul 9.1 subliniază caracteristicile dielectrice ale apei în funcție de temperatură.

Tabel 9.1. Caracteristicile dielectrice ale apei

$\Theta(^{\circ}\text{C})$	0	20	40	60	80	90
ϵ_r	88	80	73	67	61	55
$\epsilon_r t g \delta$	2,7	3	3,7	4,6	5,5	5,7

Factorii care influențează cel mai mult pierderile dielectrice sunt conținutul de apă, frecvența câmpului și temperatura. Tabelul 9.2. indică valorile constantei de pierderi și a factorului de pierderi a mai multor materiale dielectrice în funcție de frecvență.

Tabel 9.2. Constanta de pierderi și factorul de pierderi

Material	Constanta dielectrică		Factorul de pierderi	
	La 9 MHz	La 2450 MHz	La 9 MHz	La 2450 MHz
Lemn umed	2,6	2,1	0,1	0,07
Lemn uscat	2	1,9	0,04	0,01
Hârtie	3,5	3,5	0,4	0,4
Nylon	5,2	3	0,09	0,04
Poliester	4	4	0,04	0,04
Lână umedă	1,2	-	0	-
Cauciuc	2,5	2,5	0,08	0,03

Aplicațiile industriale ale încălzirii materialelor dielectrice sunt cuptoarele capacitive și cuptoarele cu microunde. În plan casnic, cuptoarele cu microunde sunt aplicațiile încălzirii materialelor dielectrice.

9.3. Cuptoarele capacitive

Cuptoarele capacitive folosesc frecvențe în domeniul radio frecvenței (RF), 10-100 MHz. Încălzirea capacitivă se utilizează în special pentru uscări, astfel că temperatura de lucru nu depășește 150 °C.

Schema de bază monofilară a unui cuptor capacitiv este ilustrată în figura 9.1. De asemenea, în această figură sunt ilustrate și diagrama fazorială și schema electrică echivalentă a unui cuptor capacitiv, care poate fi ușor considerat un condensator real.

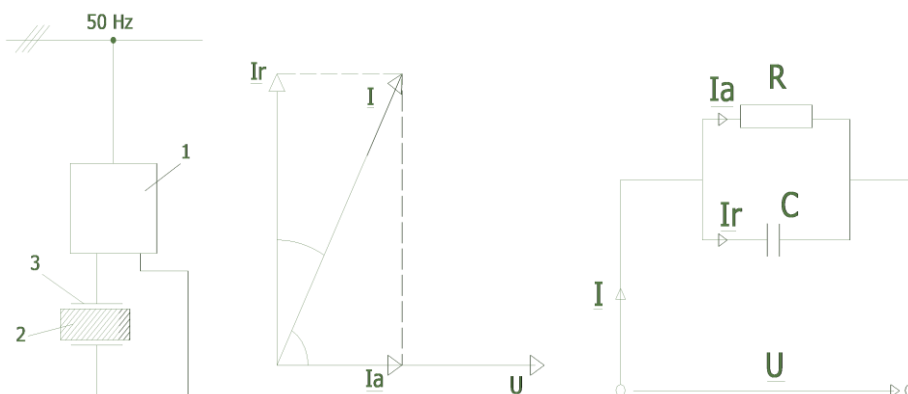


Figura 9.1. Schema de bază a unui cuptor capacitiv. 1 – generator de înaltă frecvență de RF, 2 – piesa de prelucrat, 3 – armăturile condensatorului

Așa cum se observă în figura 9.1, un cuptor capacitiv funcționează prin plasarea materialului care urmează să fie încălzit între doi sau mai mulți electrozi, formând un condensator, iar materialul de încălzit este dielectricul condensatorului. Se aplică un câmp electric alternativ de frecvență mare (RF – Radio Frecvență), iar pierderile dielectrice din material transformă energia electromagnetică în căldură. Cuptoarele capacitive sunt utilizate în principal pentru încălzirea dielectrică - încălzirea materialelor neconductive de electricitate (izolante) precum materialele plastice, textilele, lemnul, ceramica sau alimentele, în realizarea proceselor tehnologice de uscare. Frecvențele radio sunt folosite pentru uscarea lemnului și a hârtiei datorită faptului că uscarea se realizează din interior spre exterior, prevenind întărirea suprafeței sau întărirea carcasei (stratul exterior uscat captează umezeala în interior). Viteza de uscare este mai rapidă decât uscarea convențională cu aer cald sau convectivă. Mai mult,

se păstrează calitatea produselor, iar eficiența energetică este ridicată pentru produse umede sau groase.

Frecvențele din spectrul radiofrecvenței utilizate în industrie sunt 13,56 MHz, 27,12 MHz (cea mai comună pentru uscarea lemnului și a hârtiei) și 40,68 MHz. Aceste frecvențe sunt alese pentru a evita interferențele cu rețelele de comunicație (reglementate ca benzi industriale, științifice și medicale).

Construcția unui cuptor capacitiv este precum cea din figura 9.2, unde se pot observa electrozii cu plăci paralele (figura 9.2-1) sau condensatoare cu bandă transportoare, generatorul RF (figura 9.2-3) produce tensiunea alternativă de înaltă frecvență, sistemul de reglare (figura 9.2-4) pentru a potrivi impedanța de sarcină (materialul uscat – figura 9.2-5) cu generatorul, carcasa ecranată (figura 9.2-2) pentru a preveni interferențele electromagnetice în zona înconjurătoare și mecanism transportor pentru procese de uscare continuă.

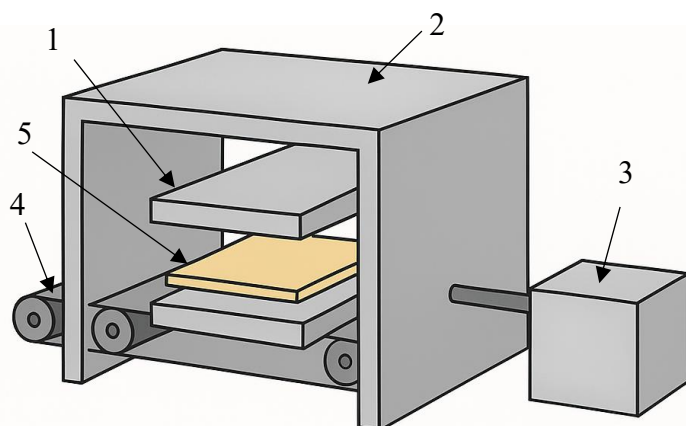


Figura 9.2.* Cuptor capacitiv cu RF

Avantajele cuptoarelor capacitive rezultă din faptul că încălzirea este volumetrică (internă și externă simultan) și rapidă a materialelor electroizolatoare, plus capacitatea cuptoarelor de a încălzi foarte eficient produsele umede.

Limitările acestor cuptoare cu RF fac referire la aplicabilitatea cuptoarelor doar în cazul materialelor neconductoare, necesitatea utilizării unor generatoare de RF specializate, nevoia unei ecranări electromagnetice necesare pentru protejarea mediului și a operatorilor și posibilitatea unei defecțiuni dielectrice dacă tensiunea este prea mare.

O instalație electrotermică capacitivă dedicată uscării lemnului este ilustrată în figura 9.3.

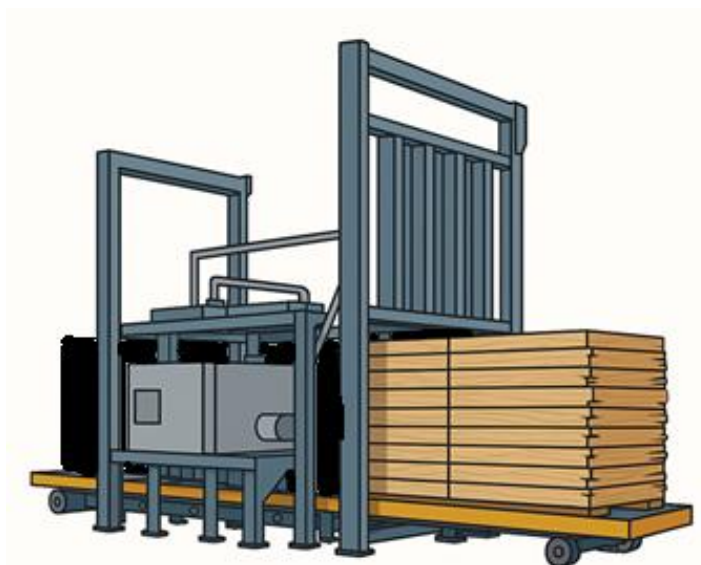


Figura 9.3.* Instalație capacitivă dedicată uscării lemnului

9.4. Cuptoare cu microunde

Cuptoarele cu microunde lucrează cu frecvențe mai mari de 100 MHz, însă în mod uzual se folosește frecvența de $\sim 2,45$ GHz. Aceste receptoare în funcție de scopul lor se împart în două mari categorii, și anume de uz casnic și de uz industrial.

Cuptoarele (casnice) cu microunde cuprind următoarele componente principale:

- O sursă de alimentare de tip magnetron sau klystron;
- Ghidul de undă – care transmite energia de la sursă spre produs;
- Aplicatorii – transferă energia produsului care trebuie încălzit.

Pentru a evita pierderile de radiații, toți aplicatorii au forma unor incinte închise, de forme mai mult sau mai puțin complexe care conțin produsul și undele electromagnetice.

Figura 9.4. prezintă o imagine de principiu a unui cuptor cu microunde de uz casnic. În imagine se poate observa surse de microunde, adică klystronul (1), ghidul de undă (2) și aplicatorul (3). În plus, se observă ventilatorul metallic care distribuie microundele în incinta de coacere, și placa rotitoare, care prezintă un sistem de rotire a mâncării pentru o distribuire uniformă a microundelor. Mai

trebuie specificat că geamul spre exterior este prevăzut cu o plasă metalică, a cărei ochiuri sunt suficient de mici pentru a preveni ”scurgeri ”de microunde la exterior. Întrucât frecvența radiațiilor electromagnetice folosite de tip microunde este de 2,45 GHz, adică o lungime de undă de 12,2 cm.

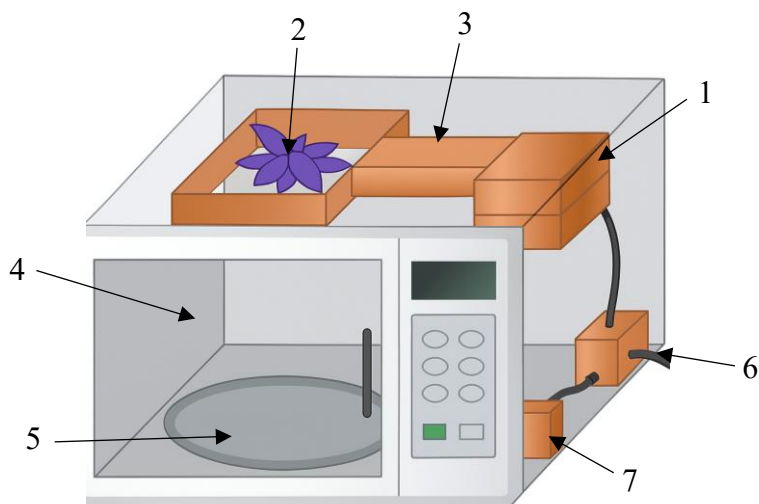


Figura 9.4.* Cuptor cu microunde dedicat uzului casnic. 1 – magnetron, 2 – ventilator, 3 – ghid de unde, 4 – aplicator (incinta de coacere), 5 – placă rotitoare, 6 – cablu de alimentare, 7 – sistem de control și comandă

Utilizarea cuptoarelor cu microunde în industrie se explică din necesitatea prelucrării termice a unor materiale industriale, care sunt sensibile când sunt încălzite, neputând fi uscate la presiunea atmosferică. Luând în considerare acest aspect, prin implicarea încălzirii cu microunde, se obține o valoare a temperaturii de fierbere micșorată sub presiune - aceste materiale pot fi procesate într-o atmosferă parțial vidată, și se poate mări considerabil puterea de procesare a materialelor în cazul incintei vidate.

Succesul procesării la frecvență înaltă în aplicațiile industriale este asigurat de utilizarea unei metode mixte, combinând-o cu alte forme de energie convențională, precum aerul cald, vapori, și alte metode electrice cum ar fi radiațiile infraroșii, tehnica pompării de căldură etc.

Întrucât aceste instalații cu microunde au puteri active de peste 90 kW, rezultă necesitatea unor generatoare de microunde având randamentul mare, pentru a evita pierderile de energie. Mai mult, puterea generată trebuie să aibă frecvența stabilă și fără neliniarități pentru a respecta regulile internaționale privind alocarea frecvențelor. În consecință, componenta principală a instalațiilor

industriale cu microunde sunt sursele de microunde, care în momentul de față se folosesc două dispozitive, și anume klysteron și magnetron.

Magnetronul se caracterizează printr-o capacitate de producere a unei cantități mari de putere, având un randament avantajos, precum și stabilitate a frecvenței și cost relativ scăzut.

Magnetronul este o incintă electronică vidată constând dintr-un anod de cupru sub forma unei structuri rezonante, iar în centrul acesteia fiind plasat catodul ce emite electroni. Acesta poate fi comparat cu un motor asincron monofazat, având o pereche de câmpuri magnetice care se rotesc în sens invers unul față de celălalt. În figura 9.5 se prezintă clar acest fenomen, de generare a microundelor din interiorul magnetronului.

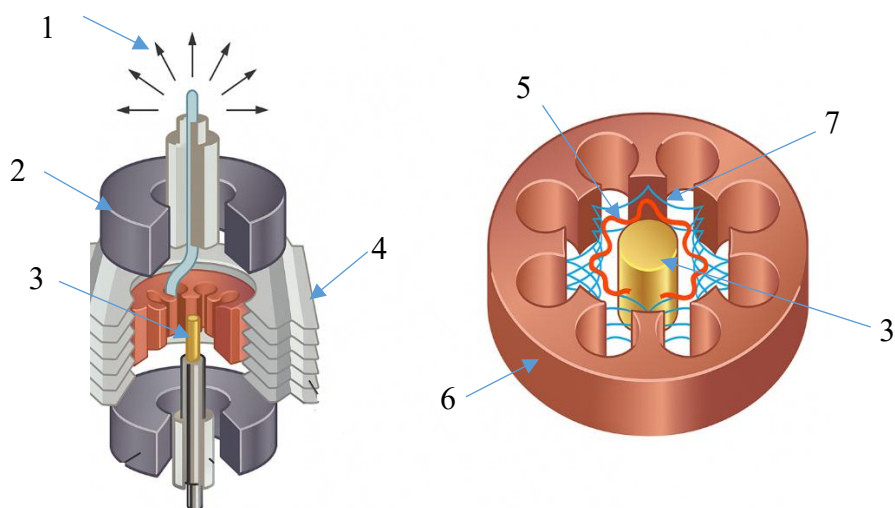


Figura 9.5.* Construcția magnetronului. 1 – microunde, 2 – magnet, 3 – catod, 4 – aripioare de răcire, 5 – traseul electronilor, 6 – anod, 7 – câmpuri electromagnetice de frecvență radio

Cele mai importante caracteristici ale magnetronului sunt:

- Puterea de ieșire crește odată cu creșterea tensiunii aplicate;
- Puterea de ieșire crește odată cu descreșterea câmpului magnetic;
- Căldura este disipată pe anod deoarece electronii ajung la el cu o viteză dată și energia lor cinetică asociată este transformată în căldură;
- Pentru a emite electroni, catodul este încălzit printr-un dispozitiv electric auxiliar și, de obicei, este necesar să treacă un timp astfel încât catodul să atingă temperatura de funcționare înaintea aplicării tensiunii ultraînalte anod-catod;

- Generează o cantitate mare de putere, având un randament ridicat și o densitate mare a puterii disipate.

În unele magnetroane, curentul de încălzire a catodului este redus liniar prin mărirea curentului anodic în unul, doi sau trei pași.

În cazul magnetroanelor de putere mică, dispozitivul auxiliar este deconectat la aplicarea tensiunii ultraînalte. Magnetroanele de putere mică au, de obicei, magneți permanenți și sunt controlate numai prin reglarea tensiunii anodice.

Magnetroanele de putere mare necesită utilizarea răcirii cu aer sau lichid, cu scopul de a evita obținerea unor valori ridicate ale puterii reflectate, precum și a unor sisteme automate de mare viteză pentru a asigura protecția magnetronului în cazul funcționării necorespunzătoare. Răcirea poate să se realizeze cu apă sau cu aer. Mai mult, se utilizează senzori de temperatură conectați la anod, precum și posibilitatea deconectării anodului la apariția unui supracurent, sau prin inversarea de curent, dar și utilizarea unui ventilator.

Klystronul este un amplificator direcțional, care are o stabilitate a frecvenței excelentă. Acesta este utilizat în practică dacă lărgimea benzii de frecvență alocate este mai mică de 2% din lungimea de undă. Acest fapt determină costuri suplimentare aferente, care vor face ca această instalație să nu fie mereu rentabilă din punct de vedere economic.

Elementele de bază ale unui klystron și rolul lor sunt următoarele:

- Tunul de electroni (catod) – are rolul de a emite electroni prin emisie termionică; electroni care sunt accelerați de tensiunea anodică.
- Electrozii de focalizare - câmpurile electrostatice sau magnetice focalizează fasciculul pentru a evita divergența.
- Cavitata de intrare (aglomerare) - modulează viteza electronilor prin suprapunerea unui câmp RF.
- Tubul de derivă (spațiu de derivă) - permite electronilor modulați în viteză să formeze fascicule.
- Cavități intermediare (opțional) - componentă suplimentară pentru o amplificare mai mare.
- Cavitata de ieșire (captare) – aici electronii grupați induc un curent RF, extragând puterea RF.
- Colectorul - absoarbe fasciculul de electroni utilizat; de obicei răcit cu apă sau aer.
- Anvelopa de vid - menține vidul ridicat pentru propagarea fasciculului de electroni.

Funcționarea unui klystron începe prin încălzirea catodului care eliberează electroni, care apoi sunt accelerați sau încetiniți în cavitatea de tip Buncher. În următoarea etapă se formează fascicule de electroni de frecvență din banda radio, care apoi sunt colectați, iar căldura este disipată.

Din punct de vedere a construcției, acest tip de dispozitive se împart în mai multe clase:

- Klystronul cu două cavități – este cea mai simplă construcție.
- Klystronul cu mai multe cavități – conține în plus cavități intermediare, care determină câștig și eficiență mai mari.
- Klystron reflex – are o singură cavitate, iar fasciculul de electroni este reflectat și autooscilant.
- Klystron cu undă călătoare – combină caracteristicile tuburilor cu undă călătoare și ale klystronilor.
- Klystron cu interacțiune extinsă - folosește interacțiunea rezonantă pentru o amplificare compactă, cu bandă largă.

O comparație între magnetron și klystron este sintetizată în tabelul 9.3.

Tabelul 9.3. Comparație între magnetron și klystron

Caracteristică	Klystron	Magnetron
Stabilitatea frecvenței	Excelentă	Slabă
Puterea rezultată	Foarte mare	Mare
Precizia controlului	Excelentă	Limitată
Costuri	Mari	Mici
Dimensiune	Mare	Compact
Tip aplicații	Cercetare, industrie specializată	Cuptoare industriale de uz general

9.5. Bibliografie

- [1].Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1997.
- [2].ElectricalGuide (IEEEGuide) – Working, Advantages & Applications.

[3]. Taylor & Francis Knowledge – Dielectric Heating in Industry.

Observație – figurile notate cu “*” au fost create folosind programe dedicate de inteligență artificială generativă și nu reflectă în totalitate realitatea, ci au rol informativ.

9.6. Autoevaluare

1) Avantajele încălzirii capacitive sunt:

Încălzire uniformă / Automatizare / Prietenoasă cu mediul înconjurător

2) Încălzirea la înaltă frecvență se bazează pe:

Polazarea electronilor/ Polarizarea moleculelor/ Polarizarea învelișului materialului

3) Încălzirea prin microunde folosește generatoare de înaltă frecvență.

Adevărat / Fals

10

Încălzirea cu fascicul de electroni

10.1.Introducere

Încălzirea cu fascicul de electroni presupune utilizarea ca sursă termică un fascicul de electroni concentrat, având o viteză mare și, ca urmare, o energie cinetică mare, care bombardează componentele de prelucrat cauzând o încălzire locală concentrată, care poate să producă o temperatură mai mare decât temperatura de topire a materialului prelucrat. Într-adevăr, la impactul fasciculului de electroni cu componentele de prelucrat, energia acestuia se transformă în căldură și are loc o încălzire locală, rapidă a materialului prin conducție. Odată cu creșterea puterii specifice a fasciculului, profilul zonei se modifică, la puteri specifice până la valori de 96 W/cm^2 , sub acțiunea vaporilor produși se formează un tub capilar, înconjurat de un înveliș subțire de material topit. Mai mult, la puteri specifice de 98 W/cm^2 , se produce eliminarea explozivă a învelișului topit și o străpungere a materialului pe întreaga grosime a sa. Cele mai multe procese se desfășoară în vid, deoarece atmosfera ar provoca o frânare și dispersie a fasciculului. Principiul de funcționare a încălzirii cu fascicul de electroni este sintetizat în figura 10.1.

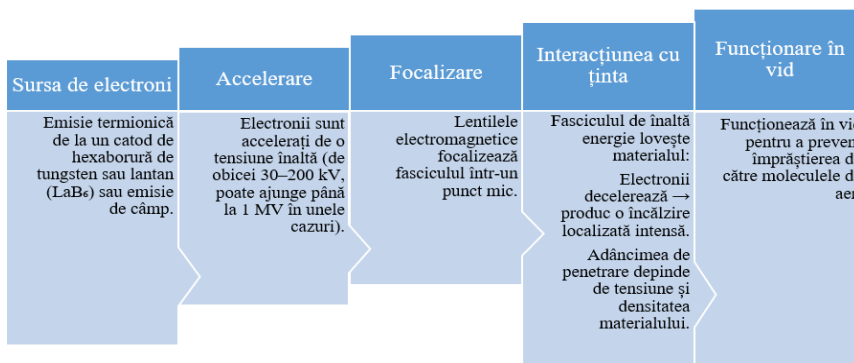


Figura 10.1. Principiul de funcționare a încălzirii cu fascicul de electroni

Elementul primar, care stă la baza fenomenelor fizice ce au loc la prelucrarea cu fascicul de electroni, este particula elementară cu sarcină negativă – electronul – caracterizat prin sarcina: $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C (Columb), masa - $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, raza - $r_e = 2,82 \cdot 10^{-5}$ m, și sarcina specifică - $e/m_e = 1,759 \cdot 10^{11}$ C/kg.

Accelerarea electronilor pentru a le crește viteza, și deci energia cinetică se poate realiza pe două căi: (1) prin aplicarea unui câmp electric și (2) prin aplicarea unui câmp magnetic.

Densitatea de curent realizată depinde de trei factori, și anume: caracteristicile termofizice ale emițătorului respectiv (catod), temperatura de încălzire și proprietățile suprafeței catodului.

Densitatea curentului se impune a fi de valori cât mai ridicate - supraîncălzirea emițătorului duce la o evaporare accentuată a metalului de bază, și implicit, la scăderea duratei de funcționare a acesteia.

Avantajele încălzirii cu fascicul de electroni sunt următoarele:

- Densitate energetică extrem de mare, astfel este posibilă topire localizată.
- Penetrare profundă pentru metale dense.
- Zonă de încălzire foarte precisă (dimensiune mică a punctului < 1 mm posibilă).
- Încălzire fără contact, deci fără contaminare.
- Mediu în vid, în consecință oxidarea și contaminarea sunt reduse la minimum.
- Eficiență ridicată, întrucât aproximativ 90% din energia cinetică este transformată în energie termică.
- Ușor programabil pentru automatizare în configurații industriale.

Punctele slabe în utilizarea încălzirii cu fascicul de electroni rezultă din faptul că procedeul de prelucrare cu fascicul de electroni are și următoarele neajunsuri - generarea radiației X în timpul prelucrării, astfel sunt necesare măsuri speciale de protecție precum ecrane dedicate. Alte limitări care apar în utilizarea acestui tip de încălzire sunt: (1) necesitatea unei cavități de lucru cu vid înalt, ceea ce face echipamentele costisitoare, (2) echipamentele sunt complexe, ele conținând surse de înaltă tensiune și sisteme de răcire, deci sunt greu de întreținut, (3) nu este potrivită pentru materiale neconductoare, cu excepția cazului în care sunt acoperite, și (4) gradientii termici pot duce la fisurarea materialelor fragile dacă nu sunt controlați.

10.2. Instalații de prelucrare cu fascicul de electroni

Instalațiile de prelucrare cu fascicul de electroni sunt folosite pentru tratamente termice, cu scopul de a durifica materialele, de a crea o duritate superioară și de a crește rezistența la oboseală (oboseala unui material se referă la slăbirea lui cauzată de acțiuni repetate (tensiuni ciclice) în timp efectuate asupra lui, chiar dacă aceste solicitări sunt sub limita materialului. Deci, creșterea rezistenței la oboseală înseamnă creșterea capacității materialului de a rezista la aceste cicluri repetate de solicitare fără a dezvolta fisuri sau a se deteriora). Astfel, aceste instalații sunt folosite în:

- Electrotehnică și mecanică fină;
- Automobile, aparatura de comutație;
- Mașini agricole, litografia, doparea materialelor;
- Aplicarea de straturi superficiale;
- Topire.

Componentele de bază ale unui sistem industrial de încălzire cu fascicul de electroni, precum și rolul lor sunt prezentate în tabelul 10.1.

Tabelul 10.1. Componentele unei instalații cu fascicul de electroni

Nr.	Componentă	Rol
1	Tun de electroni	Generează și accelerează electronii
2	Generator de înaltă tensiune	Furnizează energia necesară (30-200 kV)
3	Lentile magnetice	Focalizează fasciculul de electroni
4	Bobine de deviere	Dirijează fasciculul pentru încălzirea modelului
5	Cameră de vid	Menține vidul necesar
6	Suport pentru țintă/piesă de prelucrat	Sușține materialul care urmează să fie încălzit
7	Sistem de răcire	Elimină excesul de căldură din zonele înconjurătoare

Instalațiile electrotermice bazate pe încălzirea cu fascicul de electroni sunt folosite în industrie, în laboratoarele de cercetare și combinat. În funcție de acest criteriu, aceste instalații se împart în trei mari categorii – industriale, cercetare și

mixte (cercetare și industriale). Figura 10.2 ilustrează aceste categorii și prezintă exemple din industrie, cercetare și mixte.

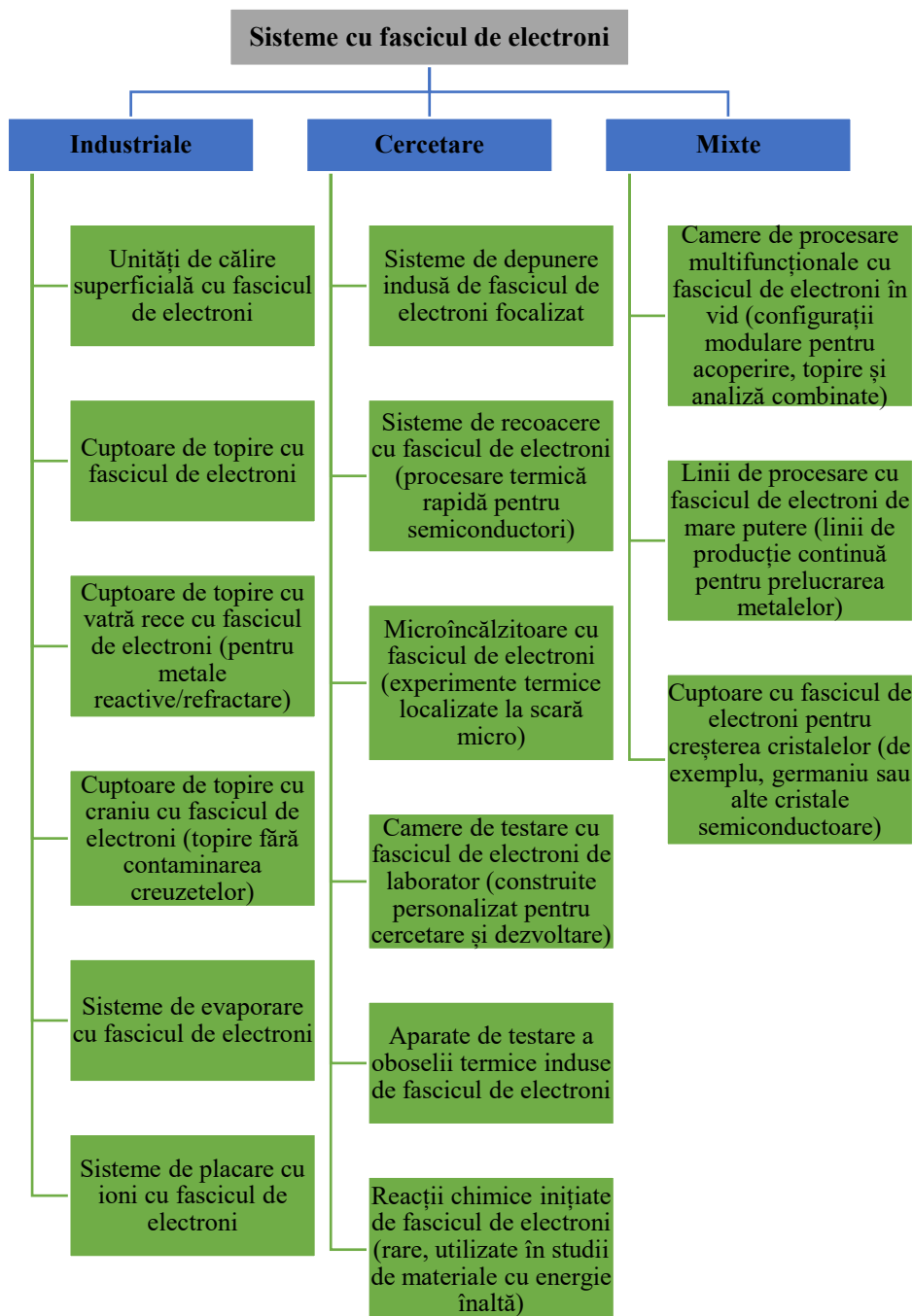


Figura 10.2. Instalații de încălzire cu fascicul de electroni

În continuare vor fi descrise mai în amănunt trei sisteme cu fascicul de electroni, din fiecare categorie menționată. Aceste sisteme au în comun utilitatea și popularitatea lor.

Cuptor de topire cu fascicul de electroni

Acest receptor electrotermic este un cuptor industrial în vid care utilizează un fascicul intens de electroni pentru a topi metale pentru purificare, producerea de aliaje sau turnare. În consecință, acest cuptor este folosit pentru rafinarea metalelor la scară largă sau turnarea aliajelor speciale.

Principiul de funcționare al acestui cuptor se poate explica succint prin trei etape:

1. Încărcătura metalică solidă este plasată într-un creuzet (adesea răcit cu apă denumit și „creuzet craniu”).
2. Fasciculul de electroni topește metalul.
3. Impuritățile se evaporă în vid, astfel rezultă un metal de înaltă puritate.

Sectoarele industriale unde este implicat cu succes sunt industria aerospațială pentru a obține aliaje de titan și nichel, sectorul nuclear în procesarea termică a zirconului și tantalului pentru piese de reactor, și în industria metalurgică atunci când se procesează materiale refractare precum wolframul (tungstenul) și molibdenul.

Acest cuptor este folosit în industrie, chiar dacă prețul este ridicat, datorită avantajelor care vin prin implicarea lui, și anume - posibilitatea manipulării sigure a metalelor de înaltă performanță și producția de metale critice, de înaltă puritate.

Microcuptor cu fascicul de electroni

Microcuptorul cu fascicul de electroni este un cuptor cu fascicul de electroni la scară mică, utilizat în laboratoare pentru:

- Experimente termice pe probe mici de materiale.
- Experimente de creștere a cristalelor.
- Topire la scară micro, formare de aliaje sau tratamente termice.

Funcționarea acestui cuptor este asemănătoare cu receptorul prezentat anterior, deci începe printr-un fascicul de electroni focalizat, care încălzește probe mici în interiorul unei camere de vid. În punctele de căldură, se pot atinge temperaturi de mii de grade Celsius, iar atmosfera controlată/vid pentru evitarea contaminării.

Acest tip de cuptor este folosit în cercetarea din știința materialelor, studierea proprietăților termice ale metalelor/ceramicii și prepararea aliajelor la scară mică. Aceste microcuptoare sunt alese pentru cercetare datorită punctelor forte aduse de utilizarea lor, precum încălzire precisă și localizată pentru cercetare și dezvoltare a materialelor avansate, flexibilitate (ele sunt implicate atât în laboratoarele de fizică, cât și în cele de materiale), dimensiuni mici, și ușor de controlat. În concluzie, aceste cuptoare sunt ideale pentru experimente înainte de scalare la utilizare industrială.

Sistem de evaporare cu fascicul de electroni

Un sistem de evaporare cu fascicul de electronic este un sistem de acoperire industrial/de laborator în care încălzirea primară se face prin fasciculul de electroni pentru a evapora materialele solide.

Funcționarea acestui sistem cu fascicul de electroni este reprezentată grafic în figura 10.3.

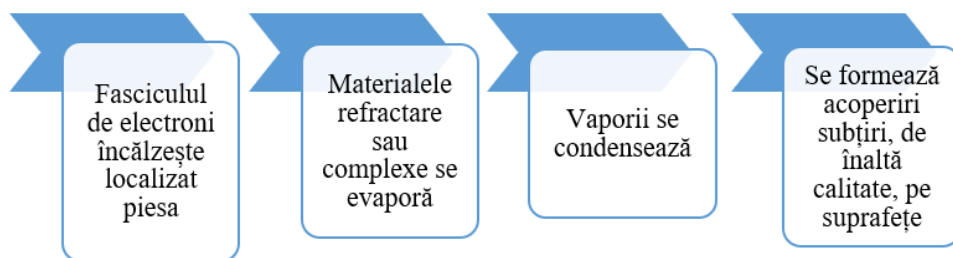


Figura 10.3. Funcționare sistemului de evaporare cu fascicul de electroni

Aceste sisteme se utilizează în optică, electronică și acoperiri metalice sau ceramice atât în industrie, cât și în laboratoare. În plus, ele sunt folosite atât în industrie cât și în cercetare, întrucât ele sunt esențiale pentru acoperiri de înaltă performanță.

10.3. Bibliografie

- [1]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998.
- [2]. *Fundamentals of Electron Beam Exposure and Development*, Capitolul 2 *Nanofabrication* (Springer, 2012). Accesibil ca fișier via ResearchGate.
- [3]. J. B. Rosenzweig, *Fundamentals of Beam Physics*, 2003, Oxford Univ. Press.

10.4. Autoevaluare

- 1) Încălzirea cu fascicul de electroni are aplicații în:
 Prelucrarea metalelor / Industria alimentară / Prelucrarea sticlei

- 2) Încălzirea cu fascicul de electroni are ca prim avantaj posibilitatea procesării materialelor foarte pure.
Adevărat / Fals

- 3) Instalațiile cu fascicul de electroni sunt foarte costisitoare din cauza elementelor de protecție care trebuie considerate.
Adevărat / Fals

- 4) Prima etapă în încălzirea cu fascicul de electroni este producerea electronilor prin încălzirea unui material special.
Adevărat / Fals

11

Sudarea electrică

11.1. Aspecte generale

Sudarea electrică este o metodă de îmbinare nedemontabilă a părților componente metalice ale unui ansamblu utilizând căldura degajată de trecerea curentului electric în zona de contact a pieselor de îmbinat. Datorită încălzirii locale are loc combinarea, în cordonul de sudură a atomilor celor două elemente care se sudează și a materialului de adaos.

În prezent se consideră că peste 45% din producția de piese de oțel se obține prin procedee de sudare electrică. Astfel, se poate afirma că sudarea electrică este unul dintre cei mai importanți receptoare de energie electrică.

Sudarea electrică se caracterizează prin șapte elemente definitorii care se regăsesc la toate tipurile de sudare electrică. Acestea sunt descrise în figura 11.1., unde este prezentat cazul particular al sudării cu arc electric.

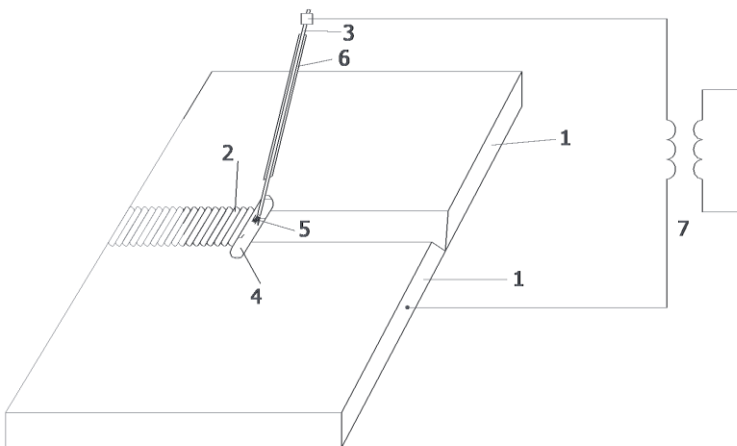


Figura 11.1. Principiu de funcționare a sudării electrice. 1-piesă de sudare, 2- cordonul de sudură, 3-electrod de sudare, 4-baia metalică, 5-arc electric, 6- înveliș electrod, 7- transformator

Elementele caracteristice ale sudării electrice sunt:

- Elementele metalice de îmbinare (figura 11.1. -1) - Acestea sunt piesele metalice care trebuie îmbinate prin sudare. De obicei, sunt din aceleași materiale sau din materiale compatibile pentru a forma o legătură puternică. Câteva exemple uzuale sunt plăci de oțel, țevi, profile structurale.
- Cordonul de sudare (figura 11.1. -2) - Bandă metalică solidificată formată de-a lungul îmbinării după sudare. În literatura de specialitate se mai găsește și sub denumirea de cusătură de sudură sau îmbinare sudată. Cordonul de sudare are o geometrie specifică: lățime, înălțime, adâncime de penetrare, în funcție de tehnică și parametri.
- Electroductul (figura 11.1. -3) – Un electrod este conductorul prin care curentul intră în zona de sudare. Există două tipuri de electrozi, și anume electrozi consumabili, care se topesc și devin parte a sudurii, și electrozi neconsumabili, care nu se topesc. Rolul electrodului este de a genera arcul electric atunci când este adus în apropierea piesei de prelucrat.
- Baia metalică (figura 11.1 -4) - Numită și baie de sudură, este regiunea topită localizată formată în locul în care arcul electric topește metalul de bază și materialul de adaos. Funcție acestei este următoarea: după solidificare, formează cordonul de sudură (îmbinarea). Calitatea sudurii depinde de controlul adecvat al acestei băi topite (dimensiune, temperatură, formă).
- Arcul electric (figura 11.1 -5) - Arcul electric este o descărcare de plasmă la temperatură înaltă creată între electrod și piesa de prelucrat (se folosește în sudarea cu arc electric). Temperatura ajunge până la 5000–6000°C sau mai mult, astfel se obține energia termică necesară pentru topirea metalului de bază și a materialului de umplură. Se formează atunci când electrodul este aproape de piesa de prelucrat și circuitul este complet.
- Învelișul de protecție - Pentru a preveni contaminarea (oxidarea, absorbția de azot) în timpul sudării, este necesară protecție pentru baia topită. Aceasta este asigurată de acoperire cu flux (înveliș de protecție în sudarea cu electrod electrostatic, figura 11.1.-6), produce un ecran de gaz și zgură, sau gaz de protecție (Argon, CO₂ sau amestecuri). Funcția înveliș de protecție este de a preveni reacțiile chimice cu gazele atmosferice care ar slăbi sudura. Din acest înveliș de protecție în timpul sudării se formează un strat de zgură, care protejează în timpul răcirii și este așchiat ulterior.

- Sursa de alimentare electrică (figura 11.1. -7) - Sursa de alimentare furnizează energia electrică necesară pentru sudare, transformând-o în energie termică prin arc. Tensiunea oferită de aceste generatoare de sudare este între 20-100 V, iar curentul variază de la 50 A, și poate să ajungă până la 1000 A, în funcție de procesul tehnologic și de nevoile procesului. Rolul acestei componente a unui sistem de sudare electrică este de a controla curentul, tensiunea și polaritatea pentru a se potrivi procesului de sudare și materialelor.

Un element adițional care nu apare în figura anterioară, este sârma de sudură, care este un fir sau o tijă metalică care se topește în timpul sudării pentru a ajuta la umplerea îmbinării dintre metalele de bază, atunci când este folosit electrodul neconsumabil. Acest element are funcția de a compensa pierderea de material din metalele de bază și asigură rezistența mecanică și continuitatea îmbinării. Adesea, acest element este selectat pentru a se potrivi sau a completa materialul de bază în ceea ce privește compoziția.

Avantajele sudării electrice sunt multiple, și anume: (1) îmbinări puternice și permanente (produce îmbinări de înaltă rezistență și durabile, care adesea mai puternice decât materialele de bază în sine, dacă sunt realizate corect); (2) gamă largă de aplicații (poate fi utilizată pentru a îmbina aproape toate metalele și aliajele, inclusiv oțel, oțel inoxidabil, aluminiu, cupru etc. Mai mult, este potrivit atât pentru table subțiri, cât și pentru plăci groase); (3) flexibilitate în poziție (sudarea poate fi efectuată în diferite poziții, și anume plat, orizontal, vertical, de sus, deci este utilă în construcții, reparații, conducte și construcții navale); (4) economic și eficient (cost mai mic decât unele metode mecanice de pentru îmbinări permanente, astfel se economisește material, în consecință este potrivită pentru producția de masă cu procese automatizate); (5) nu este nevoie de găuri sau suprapuneri (comparativ cu procesele de nituire sau înșurubare, sudarea nu necesită găurire, păstrând astfel rezistența materialului); (6) productivitate ridicată (sudarea robotizată este utilizată pe scară largă în industria auto și în cea prelucrătoare); (7) portabilitate (aparatele electrice de sudură sunt relativ compacte și portabile, în special aparatele de sudură cu inverter, astfel se permite reparații la fața locului în locații îndepărtate sau greu accesibile); (8) adaptabilitate la diferite medii (cu o selecție adecvată a metodelor de sudare, aceasta se poate realiza în diverse medii, precum în interior, în exterior, sau sub apă); (9) varietate de procese (sunt disponibile multe tipuri de sudare electrică pentru a satisface cerințele specifice); (10) adaos minim de greutate (îmbinările

sudate nu adaugă o greutate suplimentară semnificativă, fiind ideale pentru aplicații aerospațiale, auto și structurale).

Unul dintre avantajele sudării electrice, este faptul că, echipamentele pentru sudarea electrică sunt importante surse de perturbații electromagnetice care sunt injectate în rețeaua de distribuție. Echipamentele pentru sudarea electrică au nevoie de o energie electrică de calitate pentru a funcționa la parametri optimi și a realiza un proces tehnologic corespunzător.

11.2. Metode de sudare electrică

Procedeele de sudare electrică se împart în două mari categorii:

- Sudarea cu arc electric / prin topire – se caracterizează prin încălzirea locală a elementelor de îmbinare până la o temperatură superioară temperaturii de topire a acestora. Sudarea prin topire folosind energia electrică se împarte în următoarele categorii: cu arc electric, prin efect Joule, cu curenți de înaltă frecvență, cu jet de electroni, și cu plasmă.
- Sudarea prin presiune / prin rezistență – se caracterizează prin faptul că temperatura în zona contactului dintre cele două elemente care se îmbină este sub temperatura de topire, astfel este nevoie de o presiune pentru a se realiza îmbinarea. Sudarea prin presiune poate fi prin efect Joule-Lenz, cu curenți de înaltă frecvență, și cu energie electrostatică.
- Sudarea specială - categorie specială de sudare este sudare prin presiune la rece sau sudarea prin deformare plastică fără încălzire. Sudarea cu electrozгурă este folosită pentru secțiuni groase; zgura oferă căldură și protecție. Sudarea cu știfturi sudează un știft metalic pe o piesă de lucru plată prin arc. Sudarea cu percuție folosește descărcarea electrică și presiunea pentru piese mici.

Un alt criteriu de clasificare a receptoarelor de forță, pentru sudare, este tipul curentului electric folosit. Astfel, sunt sisteme de sudare care folosesc curentul continuu, iar altele folosesc curentul alternativ în sisteme monofazate, respectiv trifazate. Dacă se iau în considerare modul de realizare a sudării electrice, echipamentele pot să fie manuale, automate sau semiautomate. În funcție de electrozii folosiți, sudarea electrică poate fi cu electrozi consumabili, și electrozi neconsumabili. Un ultim criteriu care se poate lua în considerare este metoda de

protecție, care poate fi printr-un înveliș de protecție a electrozilor folosiți, sau un gaz de protecție, sau un material de protecție, adică fluxul.

O sinteză a tipurilor de sudare electrică este ilustrată în figura 11.2.

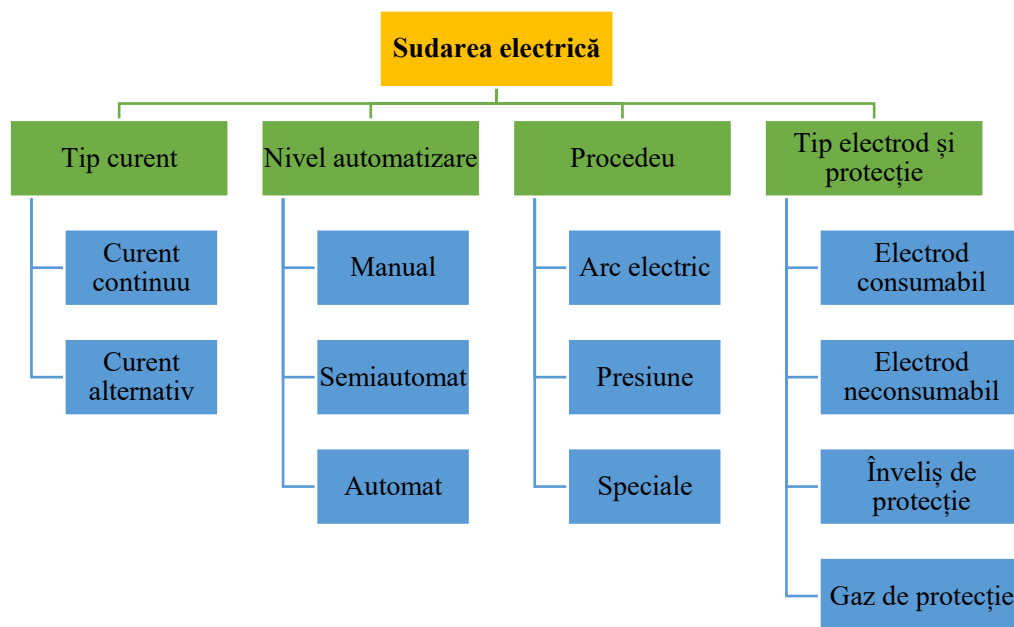


Figura 11.2. Metode de sudare electrică

În continuare se vor prezenta două tipuri de sudare electrică, care sunt mai rar întâlnire, și doar în situații speciale.

11.3. Sudarea cu energie înmagazinată

Sudarea electrică cu energie înmagazinată este o variantă specială a sudării prin presiune cu impulsuri de curent electric.

Acest tip de sudare se caracterizează prin faptul că energia necesară desfășurării procesului este înmagazinată în câmp electromagnetic și apoi transferată sub formă de impuls de curent cu caracteristici impuse de tipul operației de sudare.

Acest procedeu de sudare electrică se aplică în cazul unor regimuri de lucru foarte dificile, și anume - îmbinarea unor materiale greu sudabile, valori ridicate ale energiei necesare procesului de sudare, condiții stricte privind reproductibilitatea caracteristicilor fiecărui punct de sudură.

Principalul avantaj este determinat de faptul că acumularea energiei se face într-un interval de timp relativ mare, rezultând valori reduse ale puterii absorbite de la sursa de alimentare, în timp ce cedarea energiei se face rapid.

Alte avantaje ale acestui tip de sudare sunt:

- Durata foarte redusă a procesului de sudare (1/500...1/50 s);
- Randamentul ridicat – reducerea energiei consumate și o valoare redusă a pierderilor termice;
- Posibilitatea reglării precise și simple a parametrilor de sudare;
- Manevrabilitatea reglării precise a echipamentelor sau instalațiilor de sudare;
- Nu apare necesitatea atmosferei de protecție.

Procedeul de sudare se folosește pentru îmbinarea pieselor foarte fine, a pieselor din aliaje pretențioase, a aliajelor ușoare, în industria electronică, optică, mecanică fină etc.

În funcție de modul în care se înmagazinează energia, sistemele de sudare cu energie înmagazinată se împart în două mari categorii: sudarea electrică cu energie înmagazinată în câmp electric sau în câmp magnetic. În continuare se descriu cele două metode de sudare cu energie înmagazinată.

11.3.1. Sudarea electrică cu energie înmagazinată în câmp electric

În cazul acestui tip de sudare, energia se înmagazinează cu ajutorul bateriilor de condensatoare. Figura 11.3 ilustrează schema electrică de bază a unui astfel de sistem, unde se explică schematic cum se realizează acest proces de înmagazinare a energiei în câmp electric prin intermediul bateriilor de condensatoare.

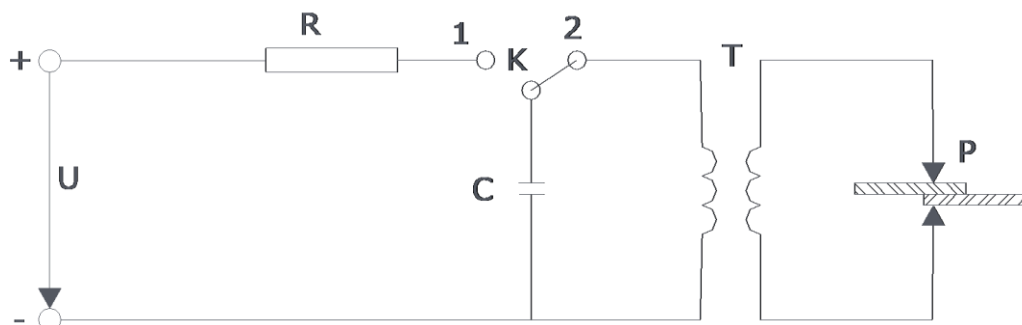


Figura 11.3. Schema electrică a sudării electrice cu energie înmagazinată în câmp electric. U – tensiunea de alimentare continuă, R – rezistor, C – condensator, P – piesele de sudat, K – contact, T – transformator.

În regimul de încărcare al bateriei de condensatoare, comutatorul K este pe poziția 1, iar curentul este limitat de rezistorul R. În regimul de descărcare, comutatorul este plasat pe 2 și se realizează un circuit de descărcare prin primarul transformatorului de sudare, a cărui secundar este conectat la postul de sudare. În primul regim de lucru, viteza de încărcare a bateriei de condensatoare depinde de amplitudinea tensiunii de alimentare și de parametrii electrici ai circuitului.

În timpul utilizării acestui procedeu, pot să apară trei regimuri de descărcare - aperiodic, aperiodic critic și oscilant amortizat.

Regimul aperiodic apare pentru cazul în care între rezistența totală a circuitului, condensatorul de încărcare și inductanța circuitului este următoarea relație matematică:

$$R_2 > 2\sqrt{L_2/C} \quad (11.1)$$

Regimul aperiodic se referă la modul în care se comportă curentul de descărcare în timp. Mai exact, aperiodic înseamnă neoscilant - este o descărcare a condensatorului amortizată critic sau supraamortizată fără oscilații.

Regimul aperiodic critic rezultă pentru situația în care există egalitate între parametrii amintiți anterior, adică relația matematică:

$$R_2 = 2\sqrt{L_2/C} \quad (11.2)$$

Un regim critic aperiodic apare într-un circuit RLC atunci când circuitul este amortizat critic. Aceasta înseamnă că, după descărcarea condensatorului, curentul revine la zero cât mai repede posibil, fără oscilații. Deci, acesta este cel mai rapid răspuns non-oscilant.

Regimul oscilant amortizat apare pentru cazul în care rezistența totală a circuitului este mult mai mică decât inductanța și capacitatea.

$$R_2 < 2\sqrt{L_2/C} \quad (11.3)$$

Regimul oscilant amortizat se referă la comportamentul unui circuit RLC (atunci când se descarcă cu oscilații amortizate). Acest lucru se întâmplă atunci când rezistența fiind mică și, prin urmare, energia stocată în condensator oscilează înainte și înapoi între condensator și inductor, pierzând treptat energie în favoarea rezistenței. Amortizant se referă la reducerea treptată a amplitudinii - oscilațiile scad în timp până când dispar.

Deși regimul aperiodic este mai convenabil din punctul de vedere al transferului de energie, în practică echipamentele pentru sudare lucrează în regim oscilant având în vedere durata mai redusă a procesului.

Curentul în circuitul prezentat are expresia:

$$i_{cs} = i_{cp} \cdot k = k \cdot \frac{0,95 \cdot U}{\omega \cdot L_2} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) \quad (11.4)$$

Unde i_{cs} este curentul prin circuitul sistemului de sudare [A], i_{cp} – curentul de vârf sau amplitudinea curentului în timpul descărcării oscilatorie [A], k – constantă de proporționalitate, care se referă adesea la eficiența circuitului, geometria sau caracteristicile specifice de transfer de energie. Scalează curentul de vârf pentru a se potrivi cu comportamentul real al circuitului, U - tensiunea inițială de încărcare a condensatorului, astfel reprezintă sursa de energie stocată în câmpul electric înainte de descărcare [V], L_2 - inductanța circuitului de sudură sau a bobinei secundare a unui transformator. Controlează schimbul de energie dintre câmpul electric și curent, δ – factorul de amplificare sau constanta de atenuare — reprezintă pierderea de energie pe unitatea de timp, în principal din cauza pierderilor rezistive sau a pierderilor prin arc. O valoare mai mare a acesteia va determina o descreștere mai rapidă a curentului. $e^{-\delta t}$ - termen de descreștere exponențială — arată cum oscilațiile scad în amplitudine în timp din cauza pierderilor.

Această abordare, prin înmagazinarea energiei în câmp electric, permite un bun control al procesului tehnologic prin posibilitatea simplă de modificare a energiei înmagazinate și a timpului de încărcare, respectiv de descărcare a bateriei de condensatoare. Aceste avantaje au făcut ca înmagazinarea în câmp electric să fie preferată față de înmagazinarea în câmp magnetic.

Există mai multe variante de echipamente pentru sudarea cu energie înmagazinată în câmpul electric.

O instalație pentru sudarea prin energie înmagazinată în câmp electric are următoarele blocurile funcționale:

- Blocul de alimentare - are ca scop furnizarea energiei electrice pentru încărcarea bateriei de condensatoare. Blocul de alimentare are nevoie de stabilitate, deci are tensiunea de alimentare trebuie să fie stabilă pentru a încărca uniform condensatoarele. Blocul de alimentare include siguranțe, protecție la supratensiune și circuite de izolare. Unele sisteme avansate utilizează surse de alimentare în comutație reglate pentru o încărcare mai rapidă și controlată.
- Blocul de condensatoare - stochează energia electrică care va fi eliberată într-un impuls scurt și intens în timpul sudării. Acest bloc, de obicei, conține o baterie de condensatoare electrolitice sau cu impulsuri de mare

capacitate. Capacitate condensatoarelor epinde de energia de descărcare dorită; de obicei în mF pentru sudarea industrială. Condensatoarele sunt adesea aranjate în paralel (sau în serie paralelă) pentru a atinge capacitatea și tensiunea necesare. Blocul de condensatoare cuprinde și senzorii de tensiune, care monitorizează nivelul de încărcare. În plus, unele sisteme au senzori de temperatură pentru protecția condensatoarelor.

- Blocul de comandă pentru încărcarea bateriei de condensatoare - controlează și reglează procesul de încărcare a bateriei de condensatoare în siguranță și eficient. Astfel, acest bloc pornește/oprește procesul de încărcare, monitorizează tensiunea și curentul în timpul încărcării, și reglează viteza de încărcare pentru a evita suprasolicitarea. Caracteristici de siguranță ale blocului sunt următoarele: întrerupere la supratensiune și protecție termică. Sistemele avansate pot preseta nivelurile de încărcare în funcție de sarcina de sudare. În consecință, interfața diferă, întrucât poate fi manuală (butoane) sau digitală (ecran tactil, interfață PLC).
- Blocul de comandă pentru descărcarea bateriei de condensatoare - gestionează eliberarea controlată a energiei stocate către electrozii de sudură în timpul sudurii. Acest bloc conține elemente de comutare precum tiristoarele sau IGBT-urile, care sunt utilizate în mod obișnuit pentru descărcarea controlată. Cu același scop pot fi utilizate eclatoarele, dar în modele mai simple. Declanșare este activată de operator sau de o secvență automată de sudare. Durata descărcării este controlată cu precizie - de obicei milisecunde sau mai scurtă. Include interblocări pentru a preveni descărcarea accidentală. Caracteristici opționale care se pot regăsi în acest bloc sunt: lățime și energie ale impulsurilor reglabile pentru controlul caracteristicilor sudurii, și sisteme de feedback pentru monitorizarea calității sudării (în mașinile avansate).
- Postul de sudare care conține electrozii de sudare.
- Sistemul de răcire - în special în aplicații cu consum mare de energie pentru răcirea condensatoarelor și a electronicii de putere.
- Interblocările de siguranță - asigură că nu se produce nicio descărcare decât dacă sunt îndeplinite toate condițiile de siguranță.
- Sistemele de monitorizare și feedback - utilizate în producția automată pentru verificarea sudurilor.

11.3.2. Sudarea electrică cu energie înmagazinată în câmp magnetic

Procedeul se bazează pe înmagazinarea energiei în câmpul magnetic al unor transformatoare speciale cu întrefier. Schema electrică monofilară a acestui procedeu este ilustrată în figura 11.4.

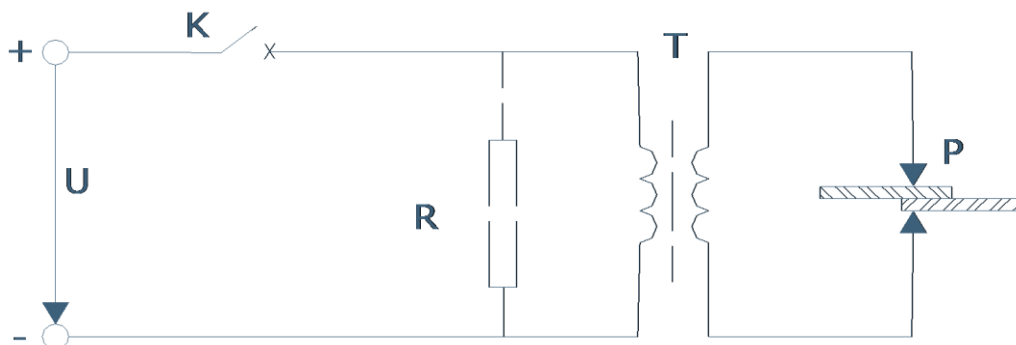


Figura 11.4. Schema electrică a sudării electrice cu energie înmagazinată în câmp magnetic

Funcționarea de principiu a acestui tip de sudare este următoarea - la închiderea întrerupătorului K, în primarul transformatorului de sudare apare un curent care crește rapid spre o valoare limită impusă de tensiunea de alimentare și de impedanțele din circuit. De asemenea, este folosit un releu pentru a deconecta circuitul la atingerea unei valori prestabilite.

Energia înmagazinată în circuitul magnetic și disipată în circuitul de sudare este:

$$W_m = \frac{L \cdot I_m^2}{2} [\text{Wh}] \quad (11.4)$$

Unde L – inductivitatea circuitului [H], I_m – curentului maxim a circuitului [A].

Elementul principal al acestui tip de echipament este transformatorul special cu întrefier (figura 11.3. - T). Alimentarea este asemănătoare cu cea de la echipamentele cu energie înmagazinată în câmp electric, iar comanda pentru încărcare și descărcare se realizează prin intermediul unui tiristor.

Echipamentul conține un bloc de comandă care asigură comenzile pentru intrarea în funcțiune (în conducție) a tiristorului, respectiv blocarea acestuia și modificarea tensiunii de alimentare, în consecință a curentului electric în circuit

11.3.3. Aplicații industriale ale sudării cu energie înmagazinată

Principala aplicație este îmbinarea în puncte sau în relief a tablelor subțiri. În figura 11.5 sunt ilustrate mai multe abordări în utilizarea acestui procedeu de sudare.

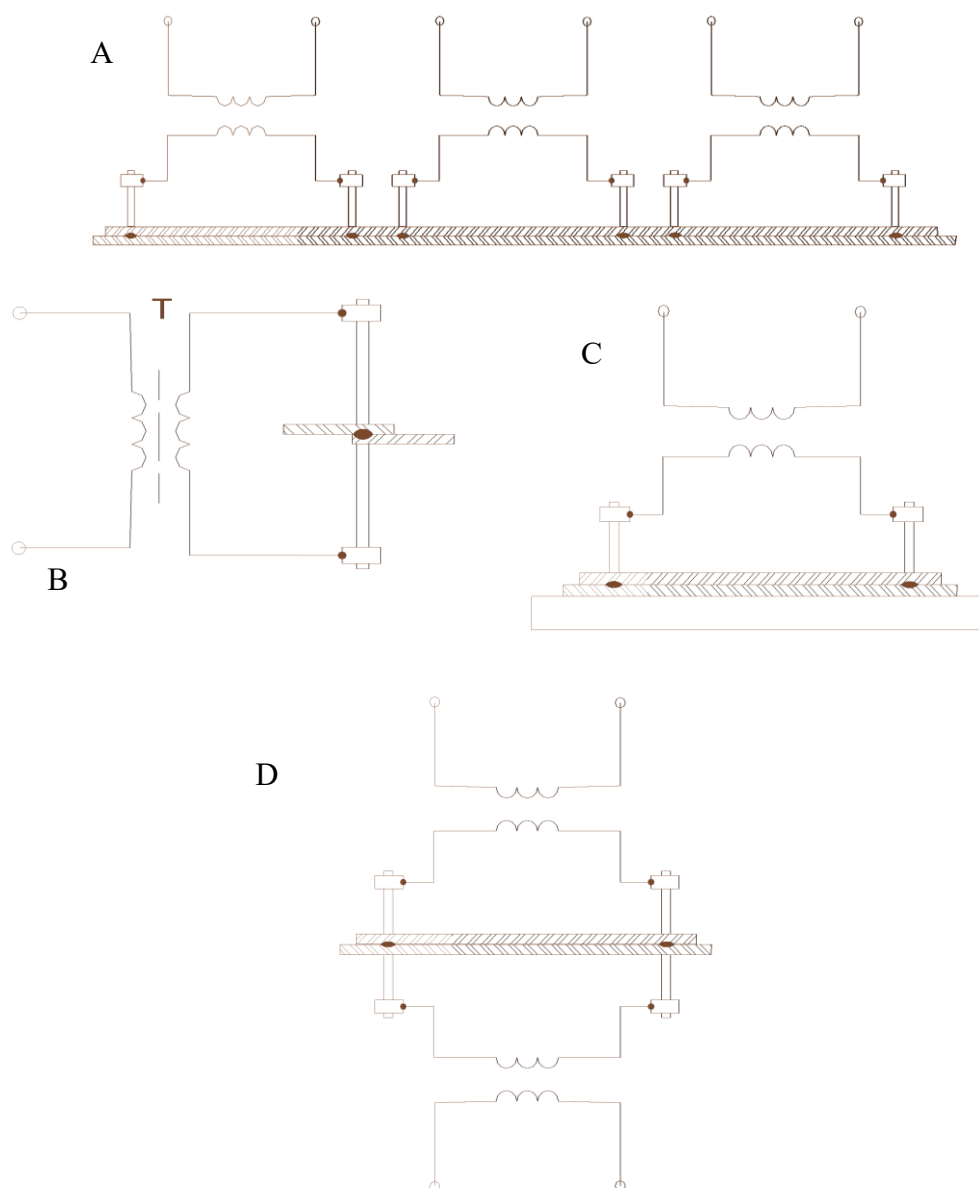


Figura 11.5. Aplicații industriale ale sudării cu energie înmagazinată. A- Trei sisteme de sudare, cu 6 electrozi, B- Un sistem de sudare și cu doi electrozi, C- Un sistem de sudare, cu doi electrozi și suport pentru sudare, D- Table sudate prin două sisteme de sudare cu patru electrozi.

În aceste aplicații, de obicei se utilizează energia înmagazinată în baterii de condensatoare de 0,1...2000 mF, cu tensiune la borne de 500...700 V și energie acumulată de 0,03...150 kJ.

11.4. Sudarea rezistivă la înaltă frecvență

Sudarea rezistivă la înaltă frecvență (numită și sudare prin radiofrecvență sau sudare dielectrică) intră în categoria procedeelor de sudare prin presiune, și se bazează pe căldura disipată prin efect Joule Lenz la trecerea curentului electric de înaltă frecvență prin zona de contact a pieselor care trebuie îmbinate, plus presiunea exercitată asupra zonei de contact. Frecvența folosită este de obicei 3 MHz până la 100 MHz, adesea în jur de 13,56 MHz sau 27,12 MHz. Câmpul electromagnetic face ca moleculele polare din materiale să oscileze, generând căldură internă din cauza pierderilor dielectrice, înmuind materialul și permițând fuziunea sub presiune. Sudarea la înaltă frecvență este utilizată pentru materiale plastice, și piese metalice subțiri.

Acest procedeu de sudare (sudarea rezistivă la înaltă frecvență) face parte din sudarea la înaltă frecvență, care se împarte în trei tipuri, și anume sudarea prin încălzire dielectrică, sudarea rezistivă la înaltă frecvență și sudarea prin inducție la înaltă frecvență. Primul procedeu menționat este utilizat pentru materiale plastice. Câmpul electric încălzește materialul din cauza pierderilor dielectrice. Astfel, sunt folosite pentru a obține produse gonflabile, interioare auto, ambalaje, genți medicale. Sudarea rezistivă la înaltă frecvență este implicată în sudarea metale. Astfel, curenții de înaltă frecvență încălzesc marginile pieselor metalice, și anume țevi de oțel, tuburi, profile metalice. Sudarea cu inducție la înaltă frecvență se utilizează o bobină de inducție pentru a încălzi materiale conductoare (de obicei metale). Astfel, procedeul este implicat în producția de țevi, componente electrice.

Elementele componente de bază a unui sistem de sudare la înaltă frecvență sunt: generator de înaltă frecvență (generează energie radiofrecvență, de obicei 3–100 MHz), electrozi sau cap de sudură, sistem de presare sau prindere, sistem de răcire, panou de control și ecranare / carcasă.

Figura 11.6 prezintă schema electrică monofilară a procedurii de sudare rezistivă la înaltă frecvență. Din imagine se observă că sistemul de sudare are serviciu continuu. Contactele K_1 și K_2 sunt la o distanță de 30...200 mm de

punctul P în care are loc îmbinarea. Contactele pot fi plasate pe partea superioară, inferioară sau direct pe suprafețele dintre rost ale semifabricatelor care se îmbină.

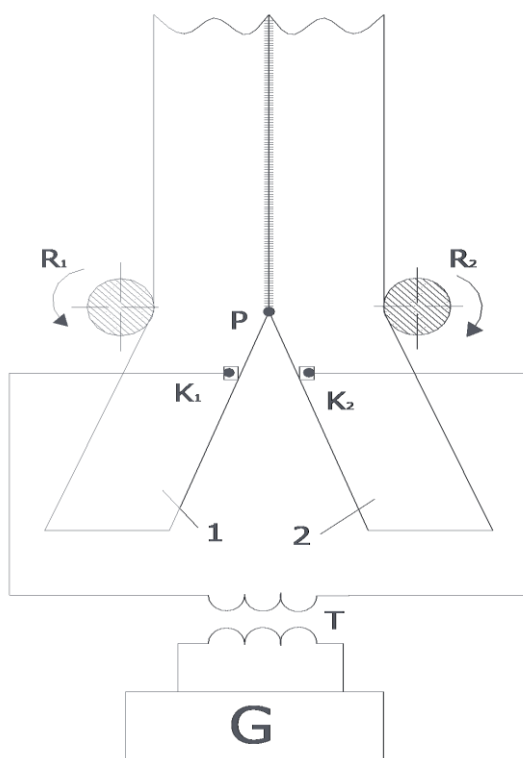


Figura 11.6. Schema de principiu a sudării rezistive la înaltă frecvență. G – generator, T – transformator, 1,2-piesele de sudare, P – punctul de sudare, K₁, K₂ – contactele de sudare, R₁, R₂ – role de sudare

Cea mai simplă și fiabilă metodă se consideră cea cu contactele plasate pe suprafețele superioare ale marginilor de îmbinat, soluția fiind cea mai întâlnită în practică. Contactele sunt conectate la bornele de ieșire ale unui transformator alimentat de la generatorul de înaltă frecvență. Rolele asigură presarea mecanică a elementelor de îmbinat.

În componența sistemului de sudare se folosește un circuit magnetic realizat dintr-un material de permeabilitate magnetică mare și plasat în interiorul semifabricatului coaxial cu acesta, deasemenea și a unui circuit magnetic exterior în lungul marginilor de îmbinare, cu scopul de a limita efectul curentului electric apărut pe semifabricate datorită efectului pelicular și de proximitate. Lungimea acestor circuite se alege de 3...6 ori distanța dintre contacte și punctul de

îmbinare. Contactele electrice pot să fie de tip alunecător sau rotitor (figura 11.5), apăstate cu o forță de 0,2...1 kN, respectiv 10...30 kN.

Materialul constructor al contactelor trebuie să fie bun conductor electric și termic, să aibă un punct de topire ridicat și proprietăți superioare de rezistență mecanică. Contactele se construiesc din wolfram și aliaje pe bază de wolfram ca și bronzurile. Densitatea de curent la piesele de contact este de 20...70 A/mm², dar se poate ajunge și la 150...1500 A/mm².

Materialele actuale pentru contacte permit obținerea următoarelor performanțe:

- 1...7 km de cusătură pentru contactele alunecătoare, la semifabricatele laminate la cald.
- 20...50 km de cusătură în cazul contactelor alunecătoare, la semifabricatele laminate la rece.
- Circa 30 zile de lucru pentru contacte rotitoare (400 kW, 440 kHz, 3500 A)

Aplicațiile sudării rezistive la înaltă frecvență sunt următoarele: (i) sudarea spirală a țevilor cu pereți subțiri. Țevi cu grosimea de 0,8...1,5 mm și raportul diametru al țevii și dublul grosimii tablei de 100...250. Se obțin țevi cu diametrul de 150...300 mm. Viteza de lucru este de 10...30 m/min. – o productivitate ridicată de sudare a țevilor; (ii) sudarea nervurilor pe țevi. Utilizată în realizarea țevilor pentru schimbătoarele de căldură. Sunt sudate nervuri drepte sau în spirală

Se utilizează concentratoare (active și pasive) de câmp pentru uniformizarea temperaturilor de îmbinat; (iii) sudarea pe lungime a unor piese de dimensiuni finite. Prin plasarea în paralel a celor două piese, la o distanță minimă care să nu ducă la străpungerea spațiului dintre ele; (iv) sudarea benzilor. Benzile din metale cu caracteristici diferite sunt destinate confecționării ferăstraielelor. Se folosește un metal caracterizat de o rezistență mecanică ridicată și un metal suport, pentru a scădea prețul produsului finit; (v) realizarea sârmelor bimetalice. Sârme din oțel-cupru, oțel-aluminiu, aluminiu-cupru etc. Se obțin prin sudarea conductoarelor concentrice din materiale diferite; (vi) preîncălzirea fabricatelor groase. Grosimea fabricatelor de 10...20 mm se face în vederea sudării sub un strat de flux a pieselor suprapuse reconstrucției prin acoperirea cu sudură.

Avantajele sudării rezistive la înaltă frecvență:

- Îmbinări puternice și curate — În special pentru materiale plastice polare, producând suduri aproape fără sudură.
- Încălzire rapidă — Încălzirea volumetrică internă duce la timpi de ciclu mai scurți.

- Încălzire localizată — Doar zona îmbinării este încălzită; materialul din jur rămâne rece.
- Potrivit pentru automatizare — Foarte potrivit pentru producția de masă.
- Precizie ridicată — Control excelent asupra dimensiunilor și rezistenței sudurii.
- Prietenos cu mediul — Nu este nevoie de adezivi sau solvenți.

Dezavantajele acestui tip de sudare rezultă din faptul că este limitată la anumite materiale (funcționează cel mai bine pe materiale plastice polare și materialele plastice nepolare necesită aditivi sau nu pot fi sudate). Mai mult, acest echipament este costisitor întrucât generatoarele de radiofrecvență și sistemele de ecranare pot fi scumpe, și generatoarele de radiofrecvență pot necesita întreținere regulată. Configurarea complexă necesită reglarea frecvenței, a designului electrodului și a temporizării pentru rezultate optime. Acest dispozitiv ridică probleme de sănătate și siguranță, astfel necesită ecranare pentru a proteja operatorii de expunerea la radiațiile radiofrecvență.

11.5. Bibliografie

[1]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998

11.6. Autoevaluare

- 1) Sudarea electrică cu energie înmagazinată se folosește la materialele:
 - Greu sudabile / Care necesită regimuri de lucru dificile / Din aliaje de oțel și Mg
- 2) Sudarea electrică rezistivă la înaltă frecvență se folosește:
 - La sudarea țevilor / La sudarea nervurilor pe țevi / La sudarea plăcilor de dimensiuni mici
- 3) Sudarea electrică este o metodă de îmbinare nedemontabilă a părților componente metalice ale unui ansamblu.
 - Adevărat / Fals

4) Sudarea prin presiune se caracterizează prin faptul că materialul de sudat se topește.

Adevărat / Fals

12

Sudarea cu arc electric

12.1. Introducere

Procedeul de sudare cu arc electric utilizând arcul electric se bazează pe încălzirea locală, în zona de contact a pieselor de îmbinat, datorită descărcării electrice care apare între un electrod și baia metalică. Temperatura rezultată conduce la topirea atât a marginilor celor două componente metalice care urmează a fi îmbinate, cât și a materialului electrodului. Astfel, apare o zonă cu material topit în care se amestecă materialul celor trei componente. Prin deplasarea electrodului, în lungul liniei de îmbinare, la marginea băii, în sensul opus mișcării are loc reducerea temperaturii și solidificarea materialului lichid. Odată cu realizarea sudării este nevoie și de deplasarea electrodului, care se topește, înspre zona de îmbinare, pentru a asigura o lungime constantă a arcului electric. Figura 12.1. ilustrează fenomenul explicat anterior.

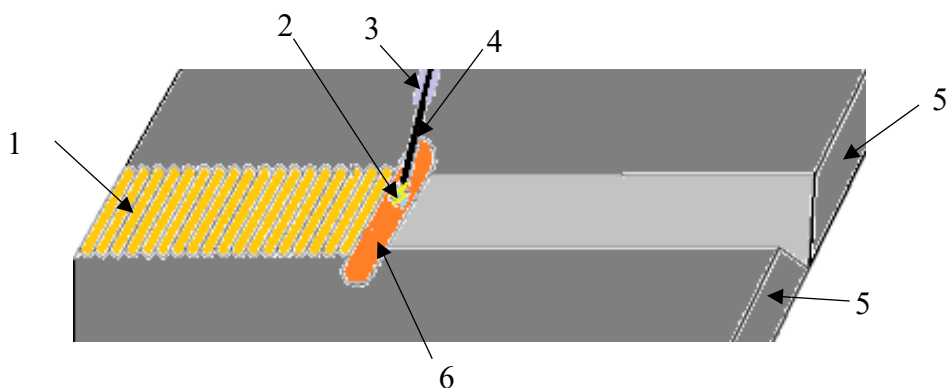


Figura 12.1. Sudarea cu arc electric. 1 – cordonul de sudură, 2 – arcul electric, 3 – învelișul de protecție a electrodului de sudare, 4 – electrodul de sudare, 5 – piesă de sudare

Electrozii de sudare utilizați pot să fie de mai multe feluri:

- Fuzibili sau infuzibili, dacă se consideră implicarea lor în cordonul de sudură. Cei fuzibili sau consumabili se vor topi, astfel cordonul de sudură va fi format din materialul electrodului de sudare combinat cu materialul pieselor sudate. Electrozi nefuzibili sau neconsumabili, au rol doar în formarea arcului electric, întrucât ei nu se vor topi în timpul procesului de sudare cu arc electric.
- Pot sau nu să aibă înveliș de protecție, dacă se consideră existența unui strat de material protector care să învelească la exterior electrozi. Cei cu înveliș protector sunt folosiți în sudare cu arc electric în electrozi fuzibili, iar cei fără înveliș de protecție sunt implicați în sudarea cu arc electric în mediul de gaze, sau în flux.

Sudarea cu arc electric se face prin folosirea unei surse de alimentare care, în funcție de procedeul de sudare poate să fie de tensiune alternativă sau continuă. Utilizarea tensiunii continue determină arc electric continuu, care în funcție de polaritate va cauza focalizarea căldurii înspre piesa de sudat, sau înspre electrodul de sudare. Implicarea tensiunii alternative prin care rezultă un arc electric alternativ, cauzează ca energia dezvoltată să fie distribuită egal la piesă și electrod.

Un alt aspect, care trebuie luat în considerare este modul în care se deplasează piesele de sudat și electrodul. Astfel, deplasarea pieselor și a electrodului poate fi automată, semiautomată, și manuală.

În cazul variantei manuale, atât piesele, cât și mișcările electrodului sunt realizate manual, de către sudor. Acest tip de sudare se folosește în special în situațiile în care este necesar ca zona de sudare este greu accesibilă de către un aparat voluminos, sau cordonul de sudură are caracteristici geometrice complexe, care sunt greu de implementat printr-un robot de sudare.

Varianta semiautomate presupune ca una dintre aceste mișcări să fie realizate automat de către un sistem mecanic dedicat, iar restul de către personalul specializat.

În consecință, sudarea automată înseamnă că toate mișcările necesare sunt realizate automatizat cu ajutorul unui robot de sudare. Acest tip de sudare se folosește în situațiile în care procedeul de sudare prezintă caracteristici repetitive și ușor de copiat și automatizat.

12.2. Caracteristicile arcului electric de sudare

Arcul electric reprezintă o descărcare electrică autonomă, caracterizată printr-o mare densitate de curent, stabilită la valori reduse ale tensiunii pe arc.

Descărcarea autonomă în gaze sau vapori metalici este determinată de:

- Ionizarea continuă (termoelectrică) a acestora, produsă de electronii emiși de electrozii încălziți prin trecerea curentului electric (emisii termoelectrică).
- Aplicarea unei tensiuni de aprindere U_{ap} , dependentă de natura gazului sau a vaporilor metalici și de distanța dintre electrozi.

Temperatura în coloana arcului este de cca. 6000 K și crește cu presiunea, iar la electrozi de 3000 – 5000 K.

Caracteristicile tensiunii arcului electric în funcție de curentul electric prin el pot fi statice sau dinamice.

Caracteristica statică a arcului $U_a=f(I_a)$ corespunde arcului de curent continuu, respectiv valorilor efective pentru arc de curent alternativ. Această caracteristică reprezintă totalitatea punctelor de echilibru staționar pe care le poate lua descărcarea în arc, și despre care se pot afirma următoarele: (1) are o alură descrescătoare și (2) mărimea distanței “ l ” dintre electrozi are drept rezultat creșterea tensiunii arcului la aceeași valoare a curentului.

Caracteristica dinamică $u_a=f(i_a)$ reprezintă dependența dintre mărimile arcului electric la variația rapidă a curentului alternativ. Variația nu poate fi urmărită de tensiune datorită inerției termice a descărcării, rezultând tensiuni diferite pe arc la aceeași valoare a curentului. Deci apare un fenomen de histerezis.

Proprietățile arcului în curent alternativ sunt:

- Curentul trece de două ori prin valoarea zero în timpul perioadei de variație a tensiunii.
- Arcul se aprinde la valoarea U_{ap} și se stinge la valoarea U_{st} de 27 ori pe secundă, f fiind frecvența tensiunii de alimentare.
- Arcul este o rezistență neliniară, determinând variația nesinusoidală a tensiunii și curentului arcului, deci apariția armonicilor superioare în componența curentului și a tensiunii.
- Arcul electric este un consumator deformant, în consecință afectează în mod negativ calitatea energiei electrice. Acest lucru va afecta toate receptoarele legate în același timp la rețea în apropierea aparatului de sudură.

Pentru realizarea arcului electric, cu o densitate de curent mare și tensiune redusă este nevoie de două condiții: (1) realizarea condițiilor pentru amorsarea descărcării și (2) realizarea condițiilor de stabilitate a canalului de descărcare format.

Îndeplinirea acestor condiții depinde de natura și parametrii gazului în care are loc descărcarea, natura electrozilor sau a materialelor între care are loc formarea canalului de descărcare, caracteristicile tensiunii de alimentare.

În reprezentarea electrică, arcul electric poate fi considerat ca un circuit RL sau RLC, așa cum este evidențiat în figura 12.2.

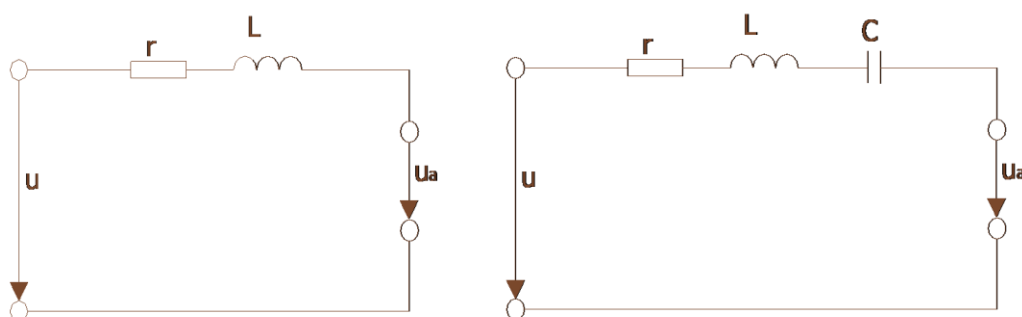


Figura 12.2. Scheme electrice echivalente ale arcului electric. u – tensiunea de alimentare, u_a – tensiunea pe arcul electric, r , L – rezistența și inductivitatea echivalente ale arcului electric (arcul electric este văzut ca un circuit RL), rLC – arcul electric este văzut ca un circuit RLC

Coloana arcului electric, de lungime practic egală cu distanța dintre electrozi, are o stare termică ridicată, gazul puternic ionizat și are caracteristici de plasmă. Energia termică degajată depinde atât de energia degajată în canalul de plasmă la trecerea curentului electric cât și de pierderile termice în exterior.

Stabilizarea arcului electric este necesară pentru a asigura aprinderea sa după ce curentul trece prin zero și pentru a limita creșterea curentului datorită alurii descrescătoare a caracteristicii statice a arcului. Pentru reaprinderea arcului, în momentul trecerii curentului I prin zero, este nevoie ca tensiunea u_s , variabilă în timp, a sursei de alimentare să depășească valoarea tensiunii de aprindere U_{ap} , $u_s \geq U_{ap}$. Pentru asigurarea amorsării arcului este necesar ca lungimea acestuia să fie cât mai redusă, iar curentul prin arc să aibă o valoare cât mai mare, pentru a se asigura ionizarea intensă a spațiului dintre electrozi.

Arcul electric în serie cu un rezistor, R

Arcul electric se poate aproxima cu o rezistență variabilă R_a . Arcul electric în serie cu un rezistor va arde cu pauze, având efecte nefavorabile, asupra stabilității acestuia. Apare și un defazaj între u_a și i_a , fapt ce determină valori scăzute ale factorului de putere.

Arcul electric în serie cu o bobină

Datorită inductivității L_b a bobinei, curentul este defazat în urma tensiunii de alimentare. Dacă la timpul $t = 0$, $u_s \geq U_{ap}$ este satisfăcută, arcu se reaprinde instantaneu. Bobina are un efect pozitiv asupra arderii stabile a arcului electric.

12.3. Parametrii tehnologici ai sudării

Regimul de transfer al metalului de la electrod spre zona de îmbinare determină parametrii arcului electric: arc scurt, arc lung (spray), pulsat, sinergic. Arcul electric lung asigură un regim de transfer prin picături foarte fine fiind numit și arc spray, astfel el este utilizat pentru îmbinările la marginile recipientelor.

Principalii parametri tehnologici care determină caracteristicile cordonului de sudură sunt:

- Intensitatea curentului electric - este unul dintre cei mai critici parametri în sudarea electrică. Aceasta afectează direct căldura generată în zona de sudură, influențând topirea atât a electrodului, cât și a materialului de bază. La sudarea cu un curent mai mic decât valoarea recomandată, arcu electric devine instabil. Această instabilitate duce la un aport insuficient de căldură, rezultând o fuziune slabă între materialul electrodului și metalul de bază. În consecință, sudura poate avea întreruperi, pori sau penetrare incompletă, reducând semnificativ rezistența mecanică. În schimb, sudarea cu un curent mai mare decât cea recomandată generează căldură excesivă, provocând supraîncălzirea electrodului. Acest lucru poate duce la degradarea sau stropirea stratului protector de flux de pe electrod. În plus, pot apărea arderi, porozitate crescută și formarea de fisuri sau incluziuni în sudură, compromițând calitatea acesteia.
- Tensiunea arcului electric - se referă la diferența de potențial pe arc în timpul procesului de sudare. Aceasta influențează lungimea arcului, care la rândul său afectează lățimea și forma băii de sudură. Tensiunea arcului depinde de tipul de electrod utilizat și variază de obicei între 18...40 V în

sudarea manuală cu arc. O tensiune a arcului mai mare produce, în general, o cusătură mai largă și mai plată datorită unui arc mai lung, dar poate crește și riscul de stropire și poate reduce penetrarea sudurii. O tensiune a arcului mai mică duce la o cusătură mai îngustă și mai profundă, cu o penetrare mai bună, dar poate necesita o abilitate mai mare pentru a menține stabilitatea arcului. Deși tensiunea influențează în primul rând lățimea cusăturii, impactul acesteia asupra penetrării și rezistenței cusăturii este secundar în comparație cu intensitatea curentului.

- Viteza de sudare - se referă la viteza cu care electrodul se mișcă de-a lungul îmbinării. Aceasta are un impact direct asupra: aportului de căldură pe unitatea de lungime, formei cordonului de sudură și penetrării. Viteza excesivă provoacă o fuziune incompletă, iar viteza scăzută determină supraîncălzirea și o calotă prea mare. Viteza corectă de sudare asigură o îmbinare uniformă, fără defecte.
- Energia liniară - estimează cantitatea de căldură degajată în zona cusăturii pe unitate de lungime.

$$E = \frac{U \cdot I}{v} [J/mm] \quad (12.1)$$

Unde U este tensiunea pe arc [V], I – curentul electric [A], v – viteza de sudare [mm/s].

O energie liniară ridicată determină o penetrare profundă, risc de supraîncălzire și creștere a granulelor. Dimpotrivă, o energie liniară scăzută provoacă o fuziune slabă și îmbinări fragile. Controlul energiei liniare este esențial pentru a evita defectele metalurgice și a obține proprietățile mecanice dorite ale sudurii.

- Lungimea canalului arcului electric - se referă la distanța dintre vârful electrodului și baia de sudură topită. Un arc scurt duce la o penetrare mai profundă și la o sudură mai stabilă, dar necesită mai multă precizie. Un arc lung crește tensiunea arcului și lărgeste baia de sudură, dar prezintă riscul de stropire, porozitate și lipsă de topire. Menținerea unei lungimi a arcului constante și optime este vitală pentru obținerea unei suduri de calitate.
- Forma și polaritatea tensiunii de alimentare - Echipamentul de sudură poate furniza fie curent continuu, fie curent alternativ, cu polarități specifice alese în funcție de tipul de material și de electrod. Curentul continuu cu electrod pozitiv determină o penetrare mai profundă, și este utilizat în mod obișnuit pentru sudarea oțelului. Curentul continuu cu electrod negativ cauzează o topire mai rapidă a electrodului, utilizată pentru table subțiri. Folosirea

curentului alternativ echilibrează aportul de căldură atât pe electrod, cât și pe piesa de prelucrat, astfel este potrivit pentru aluminiu și alte metale neferoase. Forma tensiunii de alimentare (de exemplu, lină sau pulsată) poate influența, de asemenea, stabilitatea arcului și formarea stropilor.

- Tensiunea de mers în gol - gol este tensiunea prezentă la bornele echipamentului de sudură atunci când arcul nu este amorsat. În instalațiile tipice pentru sudarea manuală cu arc, tensiunea efectivă în gol ajunge până la 80 V. Tensiunile mai mari în gol facilitează amorsarea arcului, în special atunci când se utilizează electrozi acoperiți cu un strat protector gros. Cu toate acestea, considerațiile de siguranță limitează tensiunile în gol la valori sigure pentru a preveni șocurile accidentale sau formarea arcurilor electrice.

Figura 12.3 prezintă o secțiune transversală prin cordonul de sudură. Astfel, se pot observa caracteristicile geometrice ale acestuia, și anume lățime, adâncime, dar și ale zonei influențate termic, care se află în jurul canalului de sudură, și nu intră în componența acestuia, dar ale cărui proprietăți fizice sunt modificate din cauza temperaturii la care a fost expus canalul de sudură în timpul procedurii de sudare.

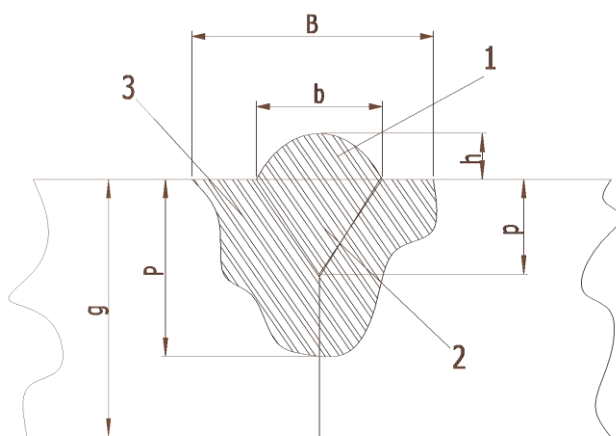


Figura 12.3. Caracteristicile cordonului de sudură. 1-calota de sudură, 2-canalul de sudură, 3 – zona influențată termic, b – lățimea canalului de sudură, B – lățimea zonei influențată termic, h – înălțimea calotei de sudură, p – adâncimea canalului de sudură, P – adâncimea zonei influențată termic, g – grosimea pieselor sudate

12.4.Procedee de sudare cu arc electric

Sudarea cu arc electric se împarte în mai multe categorii în funcție de caracteristicile procedului; acestea sunt:

- Sudarea cu arc electric cu electrozi înveliți.
- Sudarea cu arc electric sub flux.
- Sudarea cu arc electric în mediu de gaze.
- Sudarea cu arc electric trifazat.

12.4.1. Sudarea cu electrozi înveliți

Sudarea cu arc electric cu electrozi înveliți (prezentată în figura 11.1) este un proces de sudare manual în care se stabilește un arc electric între un electrod acoperit cu flux și piesa de lucru. Căldura arcului topește atât electrodul, cât și materialul de bază, creând o baie de sudură care se solidifică pentru a forma îmbinarea sudurii. Stratul protector de pe electrod arde în timpul sudării, producând gaze de protecție și zgură care protejează metalul topit de contaminarea atmosferică.

Tipul electrozilor se alege în special în funcție de caracteristicile materialelor de sudat, astfel:

- La oțelurile cu mai puțin de 0,25 % C se folosesc electrozi acizi și titanici.
- La oțeluri cu mai mult de 0,25 % C se utilizează electrozi de tipul menționat anterior, doar că este necesară preîncălzirea materialelor (la cusături solicitate termic se utilizează electrozi bazici).
- La sudarea țevelor se folosesc electrozi celulozici.
- La sudarea pieselor subțiri, cu margini răsfrânte, pot fi utilizați electrozi nefuzibili din cărbune.

Funcțiile învelișului protector al electrozilor sunt următoarele:

1. Funcția de ionizare – menținerea arcului electric.
2. Funcția de protecție – gaze care protejează baia metalică.
3. Funcția moderatoare – se formează crustă / zgură, care după răcirea cordonului de sudură se elimină.
4. Funcția purificatoare – elementele din înveliș se îmbină cu substanțele nedorite din baia metalică.
5. Funcția de aliere – substanțe din înveliș care participă la realizarea băii metalice.

6. Funcția de susținere – formarea zgurei pentru prevenirea prelingerii.
7. Funcția de liant – ajută la aderarea substanțelor din baia metalică.

Electrozii folosiți în sudarea cu arc electric și electrozi înveliți au diametrul $d_e = 1,6 \dots 6$ mm, și lungimea $L_e = 350$ mm sau 450 mm, care se alege în funcție de materialul pieselor, și caracteristicile fizice ale canalului de sudură.

Alegerea electrodului depinde de grosimea piesei de sudat, așa cum reiese din tabelul 12.1.

Tabelul 12.1. Relația dintre diametrul electrodului și grosimea piesei

Grosime piesă [mm]	1...2,5	3	4...5	6...12	>12
Diametru electrod [mm]	1,6...2,5	3,25	3,25...4	4...5	5...6

Pentru alegerea intensității curentului de sudare poate fi utilizată relațiile:

$$I_s = 2,5 \cdot d_e^2 + 35,5 \cdot d_e - 18 \text{ [A]} \quad (12.2)$$

$$I_s = 2,7 \cdot d_e^2 + 27 \cdot d_e - 11 \text{ [A]} \quad (12.3)$$

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 10 \text{ [V]} \quad (12.4)$$

Relația (12.2) se folosește pentru sudarea pieselor metalice din OL cu puțin C (oțel moale), iar (12.3) pentru a determina curentului la sudarea pieselor metalice din aliaje neferoase și oțeluri dure. Tensiunea pe arc se determină cu o singură relație, (12.4).

Puterea disipată în timpul procesului de sudare se calculează cu relația matematică:

$$P = R \cdot I_s^2 = 4 \cdot \frac{L_e}{\pi} \cdot \rho_e \cdot \left(\frac{I_s}{d_e}\right)^2 \text{ [W]} \quad (12.5)$$

Unde R este valoarea rezistenței electrice a electrodului, $[\Omega]$, ρ este rezistivitatea materialului electrodului, $[\Omega \text{ m}]$, iar celelalte mărimi au fost explicate anterior.

Rezistența electrodului pe lungimea liberă se determină cu ajutorul ecuației:

$$R_L = \rho_e \cdot \frac{L_L}{\pi \cdot d_e^2} \text{ [\Omega]} \quad (12.6)$$

Unde L_L este lungimea liberă a electrodului, $[\text{mm}]$, ρ_e - rezistivitatea materialului, $[\Omega \text{ m}]$.

Întrucât, acest procedeu de sudare este unul manual, calitatea îmbinării depinde într-o importantă măsură de calitatea sudorului.

Pe durata procesului, sudorul trebuie să efectueze acțiunile: deplasarea pe verticală a electrodului, deplasarea în lungul traseului cordonului de îmbinare, o mișcare de pendulare a electrodului, plus urmărirea modul de topire al electrodului, modul de topire al pieselor și formarea zgurii și modul de depunere a acesteia.

12.4.2. Sudarea sub flux

Sudarea sub flux (denumită și sudarea cu arc scufundat) este un proces de sudare cu arc electric în care arcul este scufundat sub o pătură de flux granular (amestec de minerale). Arcul este ascuns vederii, iar fluxul protejează baia de sudură de contaminarea atmosferică.

Fluxul are următoarele funcții:

- Protejează baia de sudură de oxidare și contaminare.
- Stabilizează arcul.
- Modelează cordonul de sudură.
- Aduagă elemente de aliere metalului sudat (opțional, în funcție de tipul de flux).
- Formează zgură, care plutește la suprafață și este ciobită după răcire.

Figura 12.4. ilustrează schema de principiu a sudării cu arc electric sub flux. Precum se observă în imagine, formarea cusăturii are loc prin topirea intensă, sub flux, a electrodului de sudare (sârmă) și a marginilor pieselor. Rolele au rolul de a mișca electrodul de sudare, odată cu topirea lui.

Procedeu poate avea loc automat, în cazul în care se realizează cusături lungi, rectilinii sau circulare sau semiautomate pentru îmbinări scurte, cu forme complicate sau piese unicate, încărcarea cu aliaje dure, electronituire sau reabilitarea unor piese.

Electrodul de sudare, fluxul și regimul de sudare sunt alese în funcție de materialul pieselor de îmbinat. Tabelul 12.2. arată legătura dintre grosimea pieselor și diametrul electrodului.

Determinarea curentului de sudare se poate determina cu relația matematică:

$$I_s = 21 \cdot d_e^2 + 24 \cdot d_e + 270 [A] \quad (12.7)$$

Valoarea curentului de sudare variază în intervalul 400 – 1200 [A].

Tabelul 12.2. Relația dintre diametrul electrodului și grosimea piesei

Grosime piesă [mm]	2...6	6...9	10...14	14...16
Diametru sârmei electrod [mm]	2	3	4...5	5...6

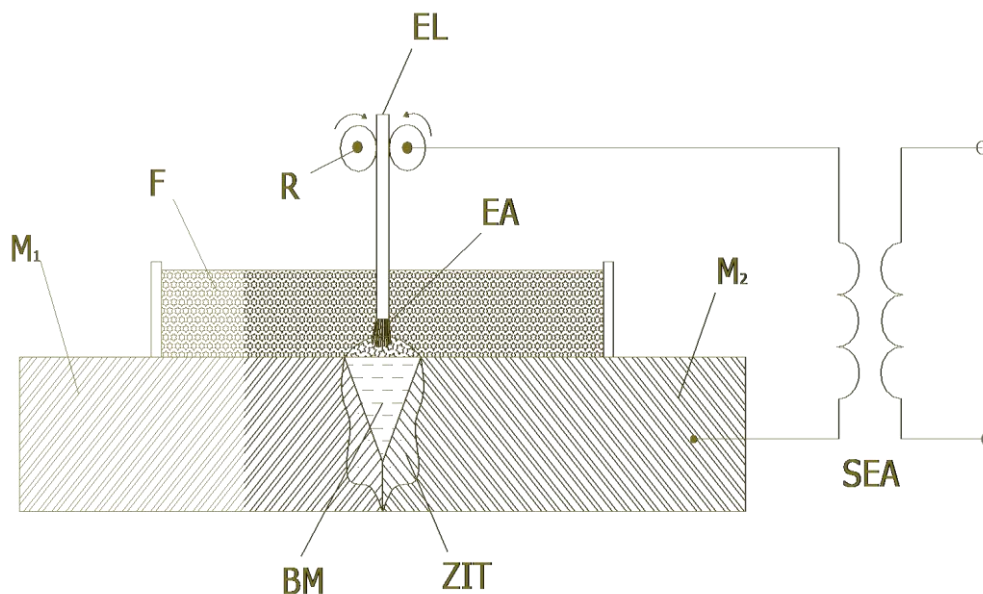


Figura 12.4. Schema de principiu a sudării sub flux. EL – electrod, R – rolă, F – flux, EA – arc electric, M₁ și M₂ – piese de sudat, BM – baia metalică, ZIT – zona influențată termic, SEA – sistem de alimentare

Tensiunea pe arc electric se determină în funcție de curentul de sudare cu ajutorul relației matematice:

$$U_a = 2,125 \cdot 10^{-2} \cdot I_s + 16,5 \text{ [V]} \quad (12.8)$$

Valoarea tensiunii pe arc poate lua valori în intervalul 25 – 42 [V].

Alți parametrii importanți ai sudării sub flux sunt viteza de sudare, care poate fi de la 40 m/h (40 de metri de cusătură metalică într-o oră) și ajunge la 120 m/h, și lungimea liberă a electrodului sârmă, care se determină cu relația (12.9).

$$L_L = 10 \cdot d_e \text{ [mm]} \quad (12.9)$$

Avantajele principale ale acestui procedeu sunt:

- Productivitate ridicată - Sudarea cu arc acoperit este una dintre cele mai productive metode de sudare. Acest fapt se datorează principiului de funcționare prin care electrodul sârmă este alimentat continuu prin

intermediul rolei și astfel permite rate de sudare foarte mari, adesea de 4 până la 10 ori mai mari decât sudarea manuală cu arc. În consecință, sudarea poate fi realizată mai rapid și în treceri continue mai lungi, ceea ce reduce timpul de manoperă și crește viteza de fabricație, ceea ce este important în special în industriile grele, cum ar fi construcțiile navale și oțelăriile structurale.

- Calitate ridicată a îmbinării - Sudurile realizate cu ajutorul electrodului scufundat sunt curate, rezistente și uniforme. Acest avantaj rezultă din faptul că arcul este complet scufundat în flux, ceea ce previne contaminarea cu gaze atmosferice precum oxigenul și azotul. Fluxul rafinează, de asemenea, metalul topit de sudură și îndepărtează impuritățile. Deci, rezultatul este suduri finale cu porozitate redusă, incluziuni minime, proprietăți mecanice excelente și integritate structurală ridicată.
- Piesele cu grosime sub 20 mm nu necesită încălzire prealabilă - Pentru multe componente din oțel cu grosimea de până la ~20 mm, preîncălzirea nu este necesară înainte de sudare. Acest aspect se explică prin aportul ridicat de căldură al sudurii sub flux și baia de sudură controlată care previne fisurarea sau structurile fragile în grosimi moderate. Acest lucru simplifică procesul și reduce timpul de pregătire și costurile energetice, în special în comparație cu alte procese de sudare care necesită preîncălzire pentru materiale mai groase.
- Se folosește sârmă neînvelită ca electrod de sudare – Acest procedeu utilizează sârmă goală sau plină fără nicio acoperire externă cu flux. Comparativ cu electrozii acoperiți (utilizați în sudarea cu electrozi înveliți), care se consumă mai repede, produc mai multe deșeuri și necesită înlocuire frecventă, electrodul sârmă nu are aceste funcții slabe. Deoarece, fluxul granular înlocuiește nevoia de electrozi înveliți și durează mai mult, îmbunătățind eficiența. Alimentarea cu sârmă este mai consistentă, mai ieftină și mai potrivită pentru automatizare, ceea ce duce la un cost per sudură mai mic.
- Nu este necesară protecția sudorului contra radiațiilor luminoase - Deoarece arcul este complet acoperit de stratul de flux, care blochează radiațiile ultraviolete și infraroșii intense. În procese precum sudarea cu electrozi înveliți, sudorii trebuie să poarte viziere închise la culoare pentru a evita arsurile ochilor și pielii cauzate de arc. Dar la acest procedeu, arcul este invizibil și ferit de vedere atâta timp cât stratul de flux este intact. Astfel, rezultă un mediu de lucru este mai sigur și mai confortabil, iar

echipamentul de protecție suplimentar este mai puțin critic, în special pentru sistemele automate.

O variantă a sudării sub flux este sudarea în baie de zgură, procedeu care este folosit pentru îmbinarea prin sudare de elemente cu grosimi de la 100 mm până la 1 m.

O altă variantă este prin folosirea mai multor electrozi. Acest procedeu se utilizează în următoarele cinci situații:

1. Este necesară o rată mare de depunere - sudarea componentelor mari sau a îmbinărilor lungi (de exemplu, conducte, carene de nave, recipiente sub presiune cu pereți groși).
2. Sudarea secțiunilor foarte groase - îmbinarea plăcilor cu grosimea de peste 30-40 mm, în special în aplicații structurale sau de utilaje grele.
3. Sunt necesare cordoni de sudură largi - îmbinarea sudurii necesită un cordon larg pentru a asigura o acoperire completă sau pentru a respecta toleranțele geometrice.
4. Pentru a echilibra aportul de căldură și forma sudurii - este necesar un profil specific al cordonului de sudură sau un control termic.
5. Pentru productivitate în liniile de sudură automate – în sistemele automate sau robotizate unde viteza este critică (de exemplu, sudarea cu fascicul în construcții).

12.4.3. Sudarea în mediu de gaze

Sudarea cu arc electric în mediu de gaze presupune utilizarea arcului electric care se stabilește între un electrod sârmă continuu (nu tijă limitată precum electrozi înveliți) și piesa de lucru. Un gaz de protecție este utilizat pentru a proteja baia de sudură topită de contaminarea atmosferică (oxigen, azot, hidrogen). Electrocul conduce electricitatea și acționează ca material de adaos. Pentru protejarea băii de metal topit sunt utilizate gaze inerte (argon, heliu) sau gaze active (CO_2). În ambele situații, gazul de protecție nu intră în reacție chimică cu metalul lichid.

Principiul de bază și elementele componente ale acestui procedeu de sudare cu arc electric în mediu de gaze cu electrod nefuzibil este prezentat în figura 12.5. Precum se observă în figură, tensiunea de alimentare este aplicată între electrod și piesele de sudat, electrodul (care poate fi și fuzibil, dar atunci lipsește sârma de sudură) este situat în interiorul pistolului (torța) de sudare, fiind înconjurat și deci protejat de gazul folosit.

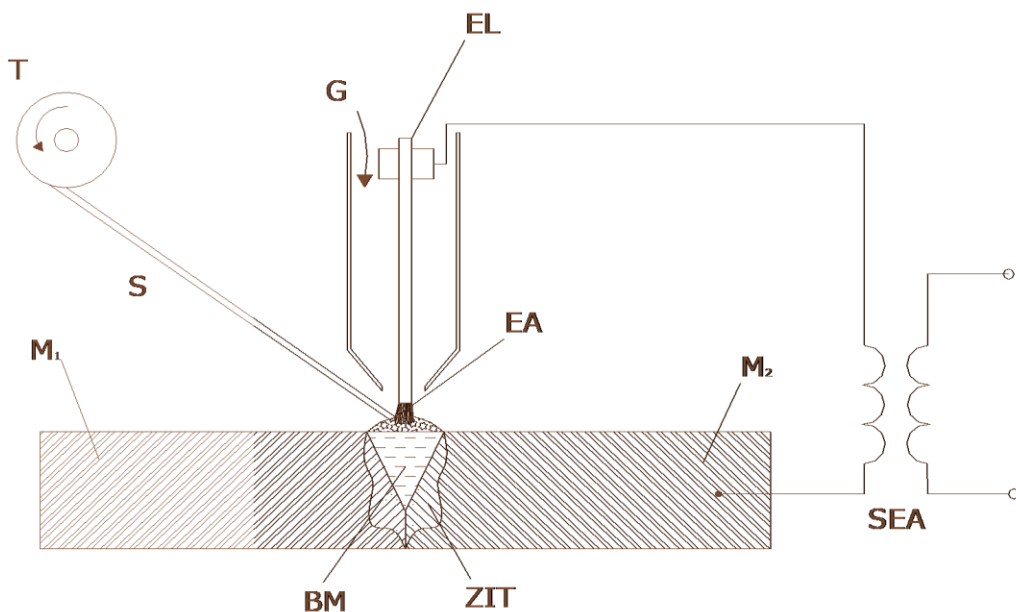


Figura 12.5. Schema de principiu a sudării cu gaz de protecție. EL – electrod, T – tambur cu sârmă, S – sârmă de sudură, EA – arc electric, M_1 și M_2 – piese de sudat, BM – baia metalică, ZIT – zona influențată termic, SEA – sistem de alimentare, G – gaz de protecție

Sudarea cu arc electric în mediu de gaze inerte se poate face automat, semiautomat sau manual. Ca gaz de protecție se folosește în mod uzual Ar, care asigură o protecție corespunzătoare zonei lichide, fiind mai greu decât aerul.

Acest tip de sudare se împarte în două mai categorii, în funcție de tipul electrozilor. Astfel, este procedeul de sudare cu electrozi nefuzibili (WIG – Wolfram Inert Gas) din wolfram, care este folosit pentru sudarea pieselor subțiri. În acest procedeu de sudare se folosește o sârmă adițională, care se topește și intră în baia metalică. Al doilea procedeu, denumit MIG (Metal Inert Gas) folosește electrozi fuzibili, care se topesc și intră în baia metalică. În funcție de intensitatea curentului în canalul arcului electric, forma picăturilor de metal este diferită. Astfel, la curent electric de valoare redusă rezultă picături mari și o pătrundere mică. Pentru curent de valoare mare rezultă picături mici și deci o pătrundere mare.

Forma și caracteristicile cusăturii sudate depinde de lungimea arcului electric și de gazul folosit pentru protecție. Gazul folosit depinde de caracteristicile pieselor de sudat. Astfel, sunt folosite următoarele combinații:

- Ar+O₂, pentru oțeluri moi și slab aliate.
- Ar+H₂, cusătură de calitate bună, tensiuni de lucru ridicată.

- Ar+He, sudarea pieselor din Al.
- Ar+CO₂ și Ar+O₂, sudarea pieselor din Al și Mg.

Relațiile matematice care stau la baza sudării WIG sunt următoarele:

$$I_s = 14 \cdot d_e - 5 [A] \quad (12.10)$$

$$I_s = 67 \cdot d_e - 37 [A] \quad (12.11)$$

$$I_s = 92 \cdot d_e - 42 [A] \quad (12.12)$$

Unde (12.10) este folosită pentru sudarea DC+ (alimentarea la tensiune continuă, de polaritate pozitivă, cu electrodul de sudare legat la polaritatea ”+”, iar piesa de sudat la polaritatea ”-”, 70% din căldură este generată în electrod), (12.11) este pentru determinarea curentului de sudare în cazul alimentării la tensiune alternativă, iar (12.12) este folosită pentru sudarea DC- (alimentarea la tensiune continuă, de polaritate negativă, cu electrodul de sudare legat la polaritatea ”-”, iar piesa de sudat la polaritatea ”+”, 70% din căldură este generată în piesă).

Curentul de sudare ia valori efective între 3 și 1000 [A], tensiunea pe arc are valori între 8 și 30 [V], viteza de sudare este de 5...50 [cm/min], electrodul sârmă are valori ale diametrului de 1...6,3 [mm], iar debitul de gaz de 4...12 [l/min].

Valoarea diametrului electrodului în funcție de grosimea piesei de sudat este prezentat în tabelul 12.3.

Tabelul 12.3. Legătura diametru electrod – grosime material

Diametrul electrodului [mm]	Grosimea materialului [mm]	Curent [A]
1,6	Up to 0,8	< 50A
2,4	0,8 to 3,2	50 – 150A
3,2	3,2 to 6,4	150 – 300A
4,0	6,4 to 9,5	300 – 400A
4,8	9,5 to 12,7	400 – 500A
6,4	12,7 to 19,1	> 500A

Sudarea cu arc electric în mediu activ (CO₂) (denumită și sudarea MAG – Metal Active Gas) se execută în regim automat sau semiautomat. Sudarea cu acest gaz este avantajoasă întrucât, acest gaz este ieftin, dar trebuie să fie pur, fără vapori de apă. Procedul MAG este folosit pentru sudarea tablelor subțiri și a celor groase, dar mai subțiri de 20...25 mm. Diametrul electrodului,

intensitatea curentului de sudare și tensiunea la bornele arcului electric se aleg în funcție de tipul și grosimea materialelor. În unele situații, pentru a reduce cantitatea de metal pierdută prin stropi, pentru reducerea dimensiunilor picăturilor de metal ca și pentru a mări stabilitatea arcului electric se adaugă la gazul de bază și circa 27% O₂.

O variantă a procedurii MAG este procedeul combinat de sudare cu CO₂ și sub flux.

Curentul de sudare în cazul procedurilor de sudare MAG și MIG se calculează în funcție de necesitatea caracteristicilor arcului electric.

$$I_s = 125,5 \cdot d_e - 32,25 \text{ [A]} \quad (12.13)$$

$$I_s = -67 \cdot d_e^2 + 370 \cdot d_e - 78 \text{ [A]} \quad (12.14)$$

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 13,34 \text{ [V]} \quad (12.15)$$

Unde (12.13) se folosește în cazul unui arc electric scurt, iar (12.14) pentru arc spray.

Aceste două procedee de sudare cu electrozi fuzibili se caracterizează prin următoarele valori ale parametrilor de sudare:

- Curentul de sudare: 5...500 [A].
- Tensiunea pe arc electric: 16...35 [V].
- Viteza de sudare: 30...150 [cm/min].
- Diametrul electrodului: 0,6...3,2 [mm].
- Debitul de gaz: 10...25 [l/min].

12.4.4. Sudarea cu arc electric trifazat

Utilizarea arcului electric trifazat oferă importante avantaje tehnologice și o reducere a nesimetriei curenților electrici din rețeaua trifazată de alimentare.

La sudarea cu arc electric trifazat electrozi pot fi dispuși paralel (figura 12.6 - schema stânga) sau în unghi (figura 12.6 – schema dreapta). În figură se observă că două dintre cele trei faze sunt conectate la cei doi electrozi, iar a treia fază este conectată la piesa de sudat.

Utilizarea arcului electric trifazat conduce la o ardere mai stabilă față de cazul arcului electric monofazat. Întrucât reaprinderea fiecărui arc electric se face la o tensiune mai redusă având în vedere faptul că spațiul dintre electrozi rămâne în permanență ionizat.

Schema electrică monofilară de principiu a unui sistem de sudare cu arc trifazat este ilustrată în figura 12.7.

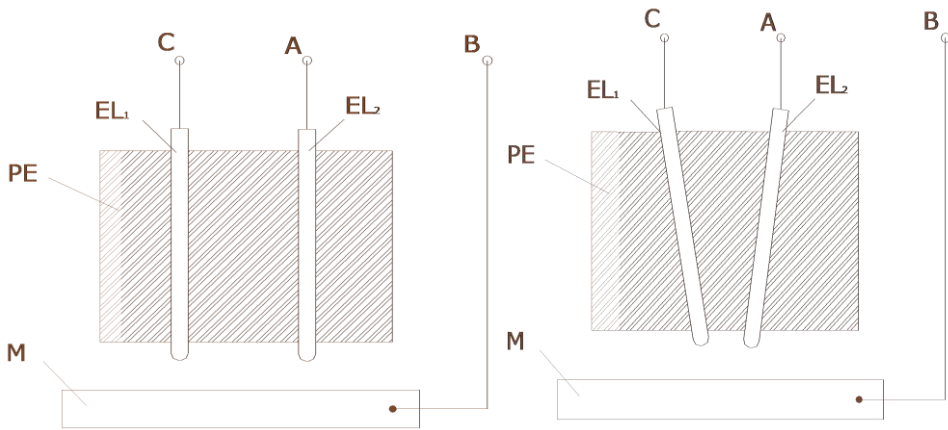


Figura 12.6. Sudarea cu arc electric trifazat. EL – electron, A,B,C – fazele sistemului trifazat de alimentare, M – piesa de sudat, PE – sistemul de susținere a electrozilor

În figura 12.7. se observă sistemul de alimentare a aparatului de sudură, unde faza A și C sunt conectate la electrozi, iar faza B la piesele de sudat. În mod uzual se reglează inductivitățile bobinelor pentru ca valorile curenților ca și a tensiunilor să fie egale.

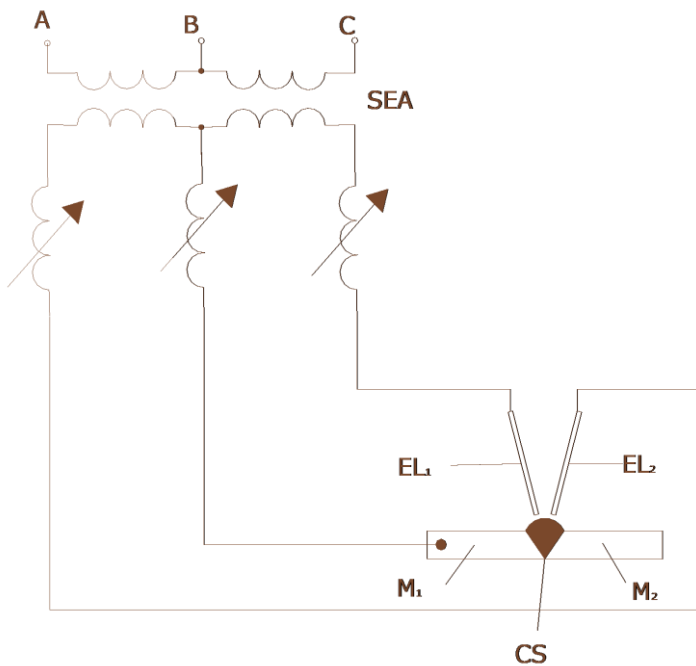


Figura 12.7. Sudarea cu arc electric trifazat. EL – electron, A,B,C – fazele sistemului trifazat de alimentare, SEA – sursa de alimentare a sistemului de sudare, M – piese de sudat, CS – cusătura de sudare

Un avantaj important este faptul că se poate regla intensitatea curentului electric (prin reglarea inductivităților), ceea ce permite o repartiție optimă a căldurii, creșterea productivității și calității sudurii.

Pentru modificarea inductivităților pot fi realizate și tensiuni diferite la bornele arcelor electrice.

12.5. Surse pentru sudarea cu arc electric

În funcție de forma curentului în arcul electric, sursele pentru alimentarea instalațiilor de sudare sunt:

- De tensiune alternativă, la frecvență fundamentală.
- La tensiune continuă.
- De înaltă frecvență.
- Cu curent pulsat.

Sursele trebuie să permită reglarea valorii curentului în circuitul de sudare pentru a asigura adaptarea la grosimea materialelor care se sudează și a valorii tensiunii la bornele arcului electric.

Din relația (12.16) rezultă cele trei metode de reglare a regimului de lucru: (1) modificarea tensiunii de mers în gol (figura 12.18, A), (2) modificarea impedanței a circuitului (figura 12.18, B) și (3) combinarea celor două (figura 12.18, C).

$$\underline{I_A} = \frac{U_0 - U_A}{Z} [A] \tag{12.16}$$

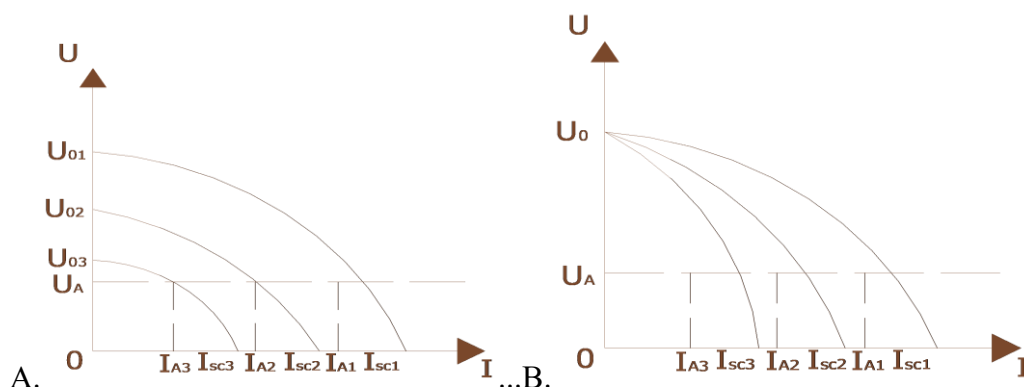


Figura 12.8. Caracteristica U-I a surselor de sudare

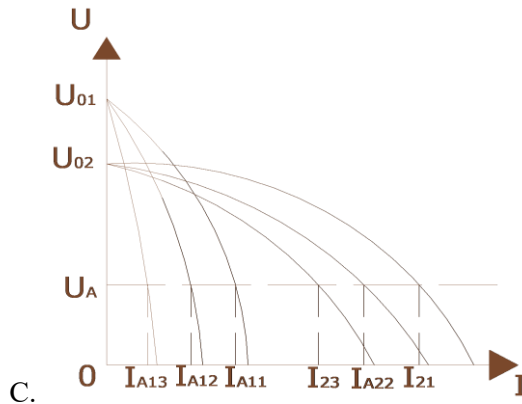


Figura 12.8. Caracteristica U-I a surselor de sudare

12.5.1. Surse de tensiune alternativă

În mod uzual sunt folosite transformatoare de sudare monofazate, de construcție specială care asigură în secundar tensiunea necesară amorsării, iar prin forma caracteristicii externe tensiune-curent realizarea arderii stabile a arcului electric.

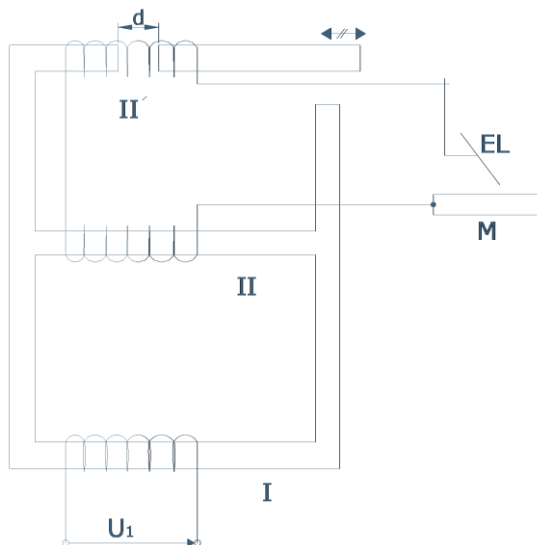


Figura 12.9. Transformator de sudare

Transformatorul de sudare este caracterizat prin impedanță predominant inductivă, iar pentru modificarea curentului de scurtcircuit și a caracteristicii externe pot fi adoptate două măsuri: (1) modificarea reactanței X a circuitului și (2) modificare tensiunii de mers în gol.

Pentru obținerea transformatoarelor de sudare se folosesc următoarele două variante clasice de transformatoare, și anume cu dispersie magnetică normală, caracteristică tensiune-curent rigidă și bobină suplimentară (transformatoare de sudare cu bobină inclusă, respectiv cu bobină exterioară), și cu dispersie magnetică mare, caracteristică tensiune-curent căzătoare (transformator cu șunt magnetic, transformator cu bobină mobilă).

La sudarea cu arc electric trifazat pentru realizarea sursei de alimentare, pot fi adoptate soluțiile:

- Două transformatoare de sudare monofazate, conectate în Y, cu trei bobine conectate pe fazele secundare.
- Un transformator de sudare trifazat.
- Trei transformatoare de sudare monofazate conectate în D sau Y, pe fiecare dintre fazele din secundar fiind plasate câte o bobină reglabilă.

12.5.2. Surse de tensiune continuă

Sursele de tensiune continuă, în variantele clasice, sunt de două tipuri: generatoare rotative și redresoare de sudare.

Sursele de sudare cu generatoare rotative trebuie să satisfacă condițiile: să asigure tensiunea minimă la aprindere a arcului electric, să prezinte inerție electromagnetică redusă, să permită reglarea într-o gamă largă de curenți de sudare, să permită funcționarea în paralel, și să prezinte o caracteristică exterioară puternic căzătoare.

Tensiunea la bornele de ieșire se determină cu relația matematică:

$$U_g = U_A = E - R \cdot I_A = k \cdot \Phi_e - R \cdot I_A [V] \quad (12.17)$$

Unde k - constantă de proporționalitate (depinde de mașină și de geometria circuitului magnetic), E - forța electromotoare a generatorului, Φ_e - fluxul magnetic în circuitul de excitație.

Specific generatoarelor rotative pentru sudare este o înfășurare de excitație demagnetizată, parcursă de un curent de sudare care determină reducerea fluxului total.

Realizarea caracteristicilor căzătoare se obține în special printr-o alegere adecvată a sistemului de excitație al mașinii:

- Generatoare de sudare cu excitație separată și excitație serie antagonistă – GESSA.
- Generatoare de sudare cu excitație derivație și excitație serie antagonistă – GEDSA.

- Generatoare de sudare cu poli divizați – GPD.
- Generatoare de sudare cu câmp transversal – GCT.
- Generatoare de sudare cu trei poli – G3P.

Utilizarea semiconductoarelor de putere a permis realizarea unor surse de sudare de tensiune continuă fiabile, cu caracteristici externe corespunzătoare și cu parametri economici avantajoși.

În general sursele de sudare cu redresoare utilizează o schemă trifazată, rezultând o încărcare simetrică a fazelor rețelei, o solicitare mai redusă a diodelor redresoare și o încărcare mai bună a fazelor transformatorului.

În practică, sursele de sudare cu redresoare se realizează după varinatele, și anume puternic căzătoare (WIG), căzătoare și rigidă (surse universale), și puțin căzătoare (MIG și MAG).

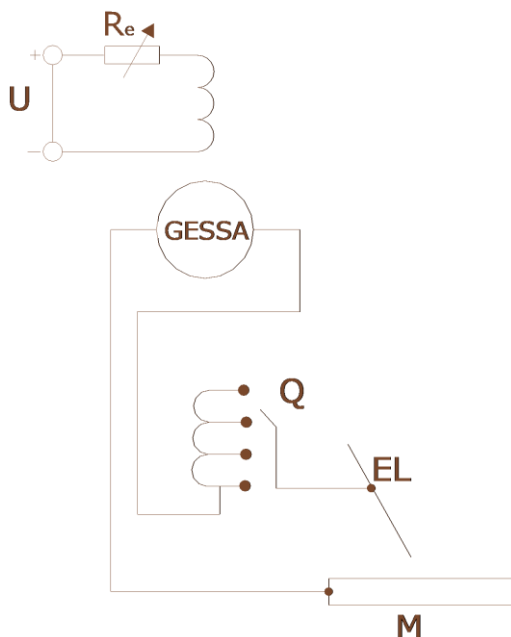


Figura 12.10. Transformator de sudare. EL – electrod, M – piesa de sudat, U – tensiune continuă de alimentare, Re – reostat, Q - contactor

Sursele cu inverter pentru sudare cu arc electric are următoarele componente (figura 12.11): redresor primar necomandat, filtru intermediar de tensiune continuă, blocul de inverter primar, transformatorul de adaptare la înaltă frecvență, redresorul secundar, filtrul de ieșire. În plus pot să aibă invertoare secundare și alte blocuri pentru amorsarea și desfășurarea proceselor de sudare.

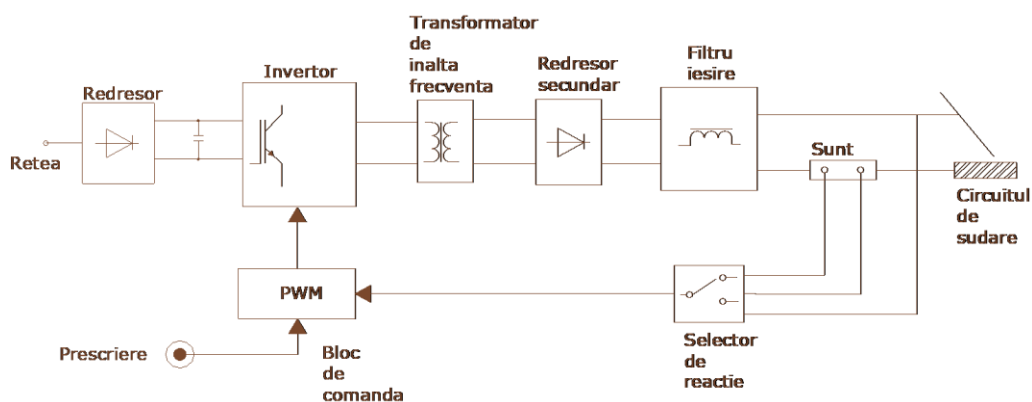


Figura 12.11. Schema electrică a sistemului de sudare

Sursa de putere cu invertor face parte din familia redresoarelor comandate indirect. Elementul comun tuturor redresoarelor pentru sudare este transformatorul de adaptare. Principiul sursei cu invertor se bazează pe comutația la înaltă frecvență, iar blocul de comandă este conectat în circuitul primar al transformatorului de adaptare. Frecvența de funcționare ajunge la 20...100kHz, astfel principala performanță a sursei cu invertor este portabilitate și accesibilitate la locurile de muncă, iar controlul rapid al fenomenelor din arcul electric de sudare este de asemenea o caracteristică a surselor cu invertor. Datorită flexibilității și performanțelor dinamice, aceste surse sunt folosite la diverse procedee de sudare

12.5.3. Surse pentru roboți de sudare

Caracteristic surselor de sudare pentru roboți de sudare este faptul că prezintă timpi de răspuns reduși, posibilitatea adaptării rapide la procesul programat și existența unui sistem de stabilire a traseului de sudare.

Sursele cuprind etaje de putere tranzistorizate, fără elemente inductive, parametrii curentului de sudare fiind controlați de circuitul electronic.

Figura 12.12. prezintă diagrama electrică a unui robot de sudare, care conține următoarele elemente:

- T – sistem de transmitere a datelor de la utilizator. Aceste date sunt informațiile legate de ceea ce are de făcut robotul de sudare. Datele pot fi transmise prin intermediul unui program specializat, și a unei interfețe grafice dedicate
- Rd – sistem de citire a datelor. Acest este un program specializat care interpretează sarcina primită de la utilizator și o transformă în date utile, care pot fi folosite mai departe de către robot.

- C – controler. Această componentă gestionează robotul de sudare, în sensul că reglează mișcările acestuia și logica de control.
- Tr – sistem de execuție, deci realizează fizic mișcările robotului de sudare.
- TC – traductor de curent (transformator de curent).
- R – regulator. Această componentă corectează parametrii robotului pentru a corecta deviațiile apărute, în urma comparației datelor citite din sistemul de sudare cu cele programate
- K – unitate de comandă a sistemului de control a electrodului, care compară datele introduse, cerute de utilizator, cu cele transmise de traductoarele de curent și tensiune.
- DT – transformator de tensiune / traductor de tensiune.
- AE – arc electric
- M – piesa de sudat.

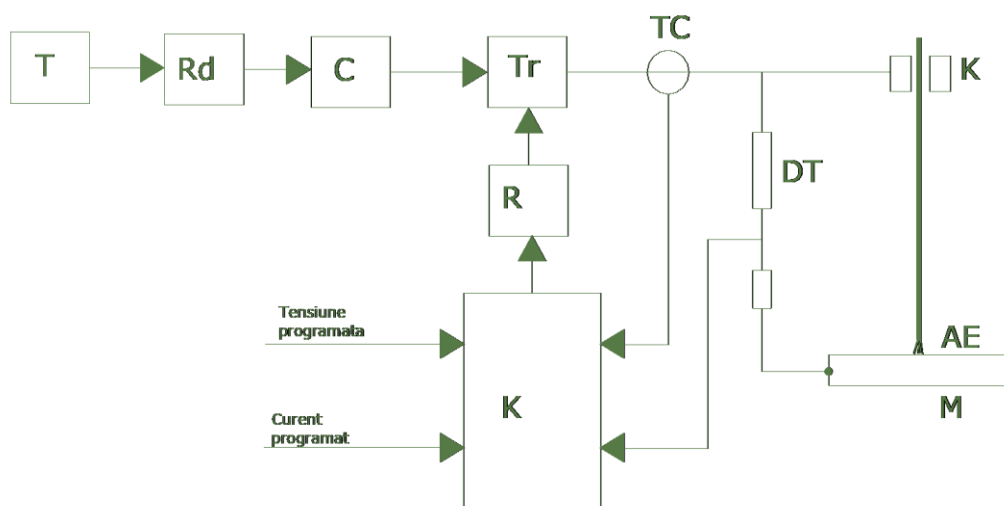


Figura 12.12. Diagrama de funcționare a unui robot de sudare

Principalele avantaje ale utilizării calculatoarelor de proces în conducerea roboților de sudare: existența sistemelor interactive, posibilitatea consultării și utilizării în alte mașini programele testate pe o mașină, și menținerea în memoria calculatorului a programului optimizat pentru o anumită configurație.

Principalele dezavantaje ale roboților de sudare sunt prețul ridicat și flexibilitate limitată. Într-adevăr, aceștia sunt mult mai scumpi decât alte sisteme de sudare, și mai mult sunt dedicați unor sarcini de lucru foarte limitate.

12.6. Consumul de energie în procesul de sudare

Energia electrică necesară în procesele de sudare poate fi determinată dacă se cunosc parametrii procesului. Energia electrică utilizată:

$$W = P_s \cdot t_s + P_0 \cdot t_0 \text{ [kWh]} \quad (12.18)$$

Puterea activă necesară echipamentului de sudare pe durata procesului poate fi calculată:

$$P_s = \frac{U_A \cdot I_A}{\eta_A} \text{ [kW]} \quad (12.19)$$

Durata efectivă poate fi determinată în funcție de cantitatea de material care urmează a fi depusă în cusătură:

$$t_s = \frac{c_s \cdot L_s \cdot A_i \cdot \gamma}{m_0} \text{ [s]} \quad (12.20)$$

În cazul calculului consumului de energie electrică într-o întreprindere cu ample instalații de sudare este necesar a avea în vedere toate procedeele utilizate precum și dezvoltarea pe care o are fiecare procedeu în parte.

Una dintre metodele de limitare a consumului de energie electrică în procesele de sudare este controlul duratei de mers în gol a surselor de alimentare.

12.7. Bibliografie

- [1]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998
- [2]. "Electric Arc Welding" – Lincoln Electric Co., 1918.
- [3]. "Welding Fabrication" – Lake Washington Institute of Technology, 2024. (iunie 2025 - <https://openwa.pressbooks.pub/lwtechweldingfabrication/front-matter/introduction/>)
- [4]. "Introduction to Welding" – Open WA Pressbooks, 2023. (iunie 2025 - <https://openwa.pressbooks.pub/welding1/>)

12.8. Autoevaluare

1). Sudarea cu arc electric se realizează atât în curent continuu, cât și în curent alternativ.

Adevărat / Fals

2). Sudarea cu electrozi înveliți este în principal un procedeu de sudare manual.

Adevărat / Fals

3). Sudarea sub flux are avantajul de a nu fi nevoie de echipament de protecție a sudorului.

Adevărat / Fals

4). Sudarea în mediu de gaze se realizează doar cu electrozi fuzibili.

Adevărat / Fals

5). Sudarea cu arc electric trifazat este mai avantajos decât sudarea cu arc electric monofazat.

Adevărat / Fals

13

Sudarea prin presiune

13.1.Introducere

Sudarea prin presiune este o operație de îmbinare nedemontabilă a unor piese metalice, realizată prin presarea acestora și încălzirea datorită efectului Joule-Lenz la trecerea curentului electric prin zona de contact. Astfel, prin aplicarea condițiilor necesare de temperatură și presiune se obține o rețea cristalină comună de atomi ai celor două corpuri care se sudează.

Caracteristicile principale ale sudării prin presiune sunt sursa de căldură (relația matematică (13.1), care depinde de rezistența sistemului de sudare, curentul și timpul de sudare), presiunea aplicată pieselor, starea zonei de contact, materialele care se sudează, timpul de sudare și mediul în care se realizează procedeul de sudare (care de obicei este fără protecția unui mediu gazos dedicat).

$$Q = R \cdot I_s^2 \cdot t [J], [Ws], [Wh] \quad (13.1)$$


Presiunea exercitată asupra pieselor este realizată prin implicarea electrozilor, care sunt și componentele de transmitere a curentului electric. Această forță mecanică poate fi constantă sau crescătoare. De asemenea, ea se poate exercita în timpul sau după încălzirea zonei de contact.

Starea zonei de contact poate fi topită sau nu; iar în funcție de aceasta, se determină tipul procedurii de sudare, cu sau fără topirea zonei de contact.

Materialele din care sunt compuse piesele care se sudează sunt metale similare ca compoziție chimică, cu conductivitate electrică și termică bună. Aceasta, deoarece o diferență prea mare între caracteristicile electrice ale materialelor face greu de realizat sudarea.

Timpul de sudare este foarte scurt, el ia valori de la câteva milisecunde până la secunde.

Avantajele și dezavantajele sudării prin presiune sunt enumerate în figura 13.1.



Dezavantaje	Avantaje
<ul style="list-style-type: none">•Limitat la metale similare sau compatibile•Necesită un control precis al curentului, timpului și presiunii•Echipamentul poate fi mare și scump•Proiectarea îmbinărilor este restrictivă (în principal simetrie axială sau geometrii specifice)	<ul style="list-style-type: none">•Nu este necesar material de adaos•Îmbinări de înaltă rezistență•Proces foarte rapid•Reproductibilitate bună•Sudura curată (fără flux, fără fum)•În stare solidă (fără risc de defecte metalurgice la topire)

Figura 13.1. Avantajele și dezavantajele sudării prin presiune

Cele mai întâlnite procedee de sudare electrică prin presiune sunt sudarea cap la cap și sudarea prin suprapunere, care vor fi prezentate mai în detaliu în subcapitolele următoare.

13.2. Parametrii electrici ai circuitului de sudare

Electrozii utilizați la sudarea în puncte (suprapunere) sunt fixați în portelectrozi de formă cilindrică. Figura 13.2. ilustrează o secțiune transversală prin electrozi, port-electrozii de Cu, și brațele de broz, împreună cu mărimile care definesc dimensiunile fizice ale acestora. Electrozii sunt cei care transmit energia electrică pentru a se obține căldura necesară sudării. Aceștia sunt fixați prin port-electrozi, care de cele mai multe ori sunt răciți cu apă. Legătura de la transformatorul de sudare se face prin intermediul unor brațe de bronz (tubulare), care sunt de asemenea răcite cu apă.

Mărimile urmărite sunt rezistența electrică a circuitului, curentul electric din circuit și caracteristicile electrice și dimensionale ale brațelor de bronz – diametrul, rezistența, inductivitatea.

Rezistența electrică a circuitului:

$$R_{ap} = 2R_{pe} + 2R_{el} + 2R_b [\Omega] \quad (13.2)$$

Unde R_{pe} este rezistența electrică a unui port-electrod, R_{el} este rezistența electrică a unui electrod, iar R_b este rezistența electrică a unui braț de bronz.

Curentul de calcul:

$$I_c = I_s \sqrt{DA} [A] \quad (13.3)$$

Unde I_s este curentul de sudare, iar DA este factorul de sarcină, și ia valori în intervalul 0...1, și reprezintă raportul dintre timpul efectiv de sudare din timpul total de lucru. De exemplu, poate lua valoarea 0,25, ceea ce înseamnă că $\frac{1}{4}$ din timpul de lucru a fost utilizat efectiv pentru sudare.

Rezistența electrică a brațelor de bronz, a electrozilor, și a port-electrozilor se calculează prin relațiile matematice:

$$R_b = \rho_b \frac{L_1}{A_b} [\Omega] \quad (13.4.1)$$

$$R_{pe} = \rho_{Cu} \frac{L_2}{A_{Cu}} [\Omega] \quad (13.4.2)$$

$$R_{el} = \rho_{el} \frac{L_3}{A_{el}} [\Omega] \quad (13.4.3)$$

Unde ρ_b este rezistivitatea materialului brațelor de bronz, ρ_{Cu} – rezistivitatea cuprului, ρ_{el} – rezistivitatea materialului electrozilor, A_b - aria unui braț de bronz, A_{el} – aria unui electrod, A_{Cu} – aria unui port-electrod, L_1 – lungimea unui braț de bronz, L_2 – lungimea unui port-electrod, L_3 – lungimea unui electrod.

Inductivitatea brațelor de bronz:

$$L = \frac{\mu_0}{4} \left[a \cdot \ln \frac{4ab}{D_b(a+c)} + b \cdot \ln \frac{4ab}{D_b(c+b)} - 2(a + b - c) \right], [H] \quad (13.5)$$

Unde parametrii ecuației sunt mărimile enumerate în figura 13.2., și anume D_b – lățimea externă a brațelor din bronz, a – distanța de la brațele de bronz la sistemul

de prindere, adică lungimea lor, b – distanța dintre brațele de bronz, adică lățimea lor, iar μ_0 – permeabilitatea vidului, $\mu_0 = 4\mu \cdot 10^{-7} [H/m]$.

Cu ajutorul acestor mărimi se poate caracteriza corespunzător din punct de vedere electric sistemul de sudare în zona unde se realizează procedeul.

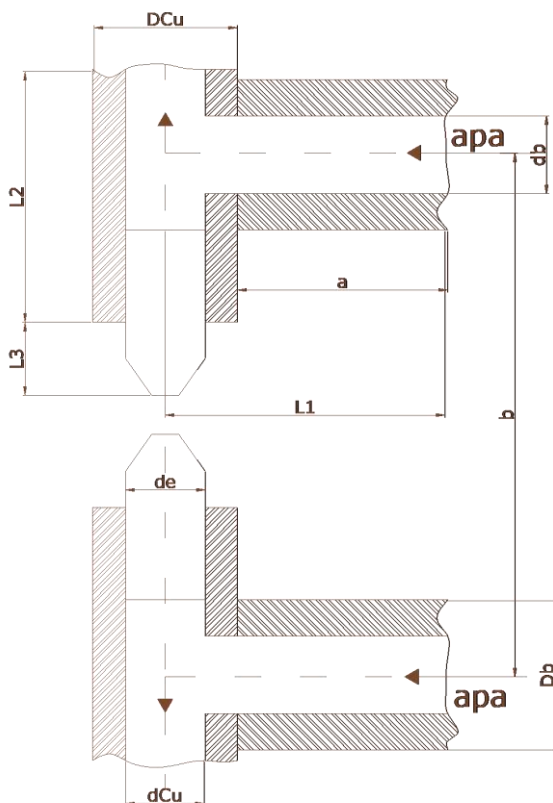


Figura 13.2. Secțiune transversală prin sistemul de sudare. D_{Cu} – lățimea externă port electrozilor, d_{Cu} – lățimea internă a port electrozilor, d_e – diametrul electrozilor, D_b – lățimea externă a brațelor din bronz, d_b – lățimea internă a brațelor din bronz, L_3 – lungimea liberă a electrozilor, L_2 – lungimea port electrozilor, L_1 – lungimea brațelor din bronz, a – distanța de la port electrozi la sistemul de prindere, b – distanța dintre port electrozi

13.3. Sudarea cap la cap

Sudarea cap la cap este utilizată pentru îmbinarea (prelungirea) semifabricatelor sub formă de bare, bare de armături pentru construcții, țevi, șine de cale ferată etc.

Figura 13.3 prezintă schema de principiu a sudării cap la cap. În imaginile din figură s-a scos în evidență (în mod grosolan, care nu este în concordanță cu realitatea) regularitățile din zona de contact, aspect care duce la creșterea rezistenței în zona de contact. De asemenea, se poate observa în prima imagine, că prima piesă este fixă, iar a doua este mobilă, fiind cea prin care se exercită forța mecanică de presiune.

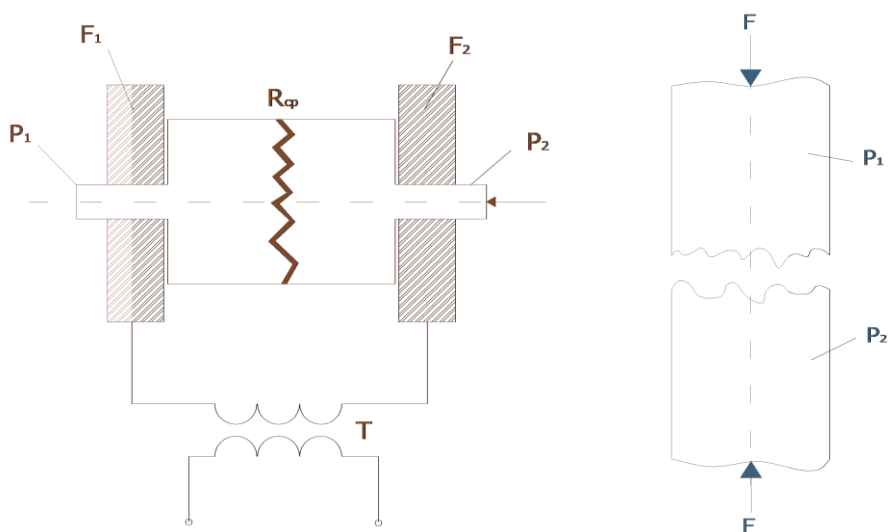


Figura 13.3. Sudarea cap la cap. F – forța mecanică de presiune, P_1 și P_2 – piesele de sudat, T – transformator de sudare, R_{cp} – rezistența zonei de contact

Îmbinarea se poate face fără topire (prin refulare) sau prin topire (continuă sau discontinuă).

13.3.1. Sudarea cap la cap fără topire

Corpurile care se îmbină sunt prinse între două perechi de fălci, dintre care o pereche este fixă (solidară cu batiul mașinii, figura 13.3.), iar cealaltă pereche este mobilă, și asigură presarea cu o forță prestabilă.

Zona de contact este încălzită la o temperatură inferioară temperaturii de topire, atunci când curentul electric trece prin zona de contact având rezistența electrică R_{cp} .

Sursa de alimentare este în mod uzual un transformator de curent mare. La trecerea curentului electric prin zona de contact, aceasta se încălzește, astfel se asigură o deformare plastică mai ușoară a celor două piese aflate sub acțiunea forței F . Pe durata procesului de sudare, rezistența electrică a pieselor crește, iar rezistența electrică în zona de contact scade. În plus, forța de presare se reduce

odată cu creșterea temperaturii de îmbinare. Durata trecerii curentului electric depinde în mare măsură de regimul de lucru adoptat.

Caracteristicile îmbinării depind de temperatura maximă atinsă la sfârșitul procesului de încălzire (pentru piese din oțel moale 1150...1250 °C), densitatea curentului electric în circuitul de sudare (pentru oțel moale 20...60 A/mm², iar pentru materiale neferoase și oțeluri aliate 40...180 A/mm²) și de durata trecerii curentului electric prin zona de îmbinare (0,15...15 s).

Regimurile care folosesc curent mare (regimuri dure) și care conduc la durate minime de încălzire (0,1...1 s) sunt specifice îmbinării materialelor sensibile la temperatură (oțeluri aliate, materiale ușor fuzibile – aluminiu și aliajele sale).

Regimurile cu durată relativ mare (până la 15 s) de trecere a curentului electric (regimuri lente), cu încălzire treptată a pieselor sunt specifice îmbinării pieselor din materiale mai puțin sensibile la temperatură (oțel moale).

Forța mecanică pentru asigurarea presiunii necesare depinde de natura materialului pieselor supuse îmbinării și de regimul de lucru:

- Pentru bare din oțel moale se asigură o presiune de 0,15...0,3 Gpa.
- Pentru materialele neferoase se asigură o presiune de 0,1...0,15 Gpa.

Tensiunea dintre electrozii mașinii de sudare este de 1...16 V, iar curentul prin zona de îmbinare poate ajunge la zeci de kA.

În cazul în care se sudează două piese metalice din materiale diferite, cu conductivități termice și electrice diferite, se asigură o lungime mai mare la piesa cu conductivitate termică mai mare.

Avantajul principal al acestui procedeu de sudare este productivitatea mare, fiind posibilă o producție de serie.

Dezavantajul cel mai însemnat al procedurii este faptul că nu se asigură o îmbinare de calitate superioară din cauza oxizilor care apar pe durata sudării în zona de contact, precum și impuritățile de pe capetele celor două piese.

Instalația de sudare are o importantă parte mecanică și o instalație electrică specifică.

13.3.2. Sudarea cap la cap cu topire

La acest procedeu de sudare, cele două piese se află permanent în contact (sub presiune de circa 250 daN/cm²) sau sunt în contact intermitent (în această variantă apar descărcări electrice sub formă de scânteii în momentul desfacerii contactului).

Sudarea cap la cap cu topire cuprinde patru etape principale:

1. Preîncălzirea – materialele sunt preîncălzite la o temperatură inferioară temperaturii de topire. Această etapă se poate realiza prin controlul intensității curentului în circuit.
2. Topirea – temperatura din zona de contact crește peste limita de topire, ceea ce va duce la topirea pieselor în zona de contact. Într-adevăr, această etapă se realizează prin asigurarea contactului între cele două piese și presarea lor cu o forță relativ redusă. Zona de contact se caracterizează printr-o rezistență electrică mare, un număr relativ redus de puncte aflate în contact redus și un număr mare de descărcări electrice sub formă de scânteie (ploaie de scânteie).
3. Refularea – apare sudarea pieselor, și refularea materialelor la exterior în zona de contact. Adică, se realizează deformarea plastică necesară sudării.
4. Încălzirea pentru tratarea termică a zonei de îmbinare – zona sudată se reîncălzește pentru a efectua tratarea necesară și finalizarea sudării. Această etapă se face dacă este nevoie realizarea unui tratament termic al îmbinării.

În unele variante ale sudării cap la cap prin topire, poate lipsi una sau mai multe etape. Astfel, dacă lipsește prima etapă are loc o îmbinare cu topire directă, iar dacă nu este necesară tratarea termică a îmbinării realizate lipsește cea de a patra etapă.

Parametrii care determină calitatea încălzirii sunt: densitatea curentului electric, viteza de topire, forța de compresiune, viteza de refulare, lungimea liberă inițială.

La sudarea cap la cap cu topire, o atenție deosebită este acordată pregătirii capetelor pieselor.

Mașinile pentru sudarea cap la cap, în funcție de modul de realizare a forței de compresie sunt mecanice, pneumatice, hidraulice, și manuale. Sistemele manuale folosesc forța de presiune exercitată de sudor cu ajutorul unor unelte dedicate. Sistemele pneumatice se bazează pe forța exercitată cu ajutorul aerului comprimat. Presiunea aerului mișcă un piston sau un actuator care apoi aplică forța de sudare. Sistemele hidraulice utilizează fluide incompresibile (de obicei ulei) sub presiune pentru a genera o forță mare, controlabilă. Un cilindru hidraulic sau o presă asigură forța de sudare necesară. Forța mecanică este generată prin mijloace mecanice — came, pârghii, arcuri, șuruburi sau volante — mai degrabă

decât prin presiunea fluidului sau a aerului. Forța este transmisă prin legături mecanice.

Mașinile utilizate pentru sudarea cap la cap prin topire au puteri de 10...200 kVA, asigură viteze de topire de 1...1,5 mm/s, iar durata procesului este de 4...40 s. Pentru producții de serie, este posibilă automatizarea procesului de sudare cap la cap cu topire.

13.4.Sudarea prin suprapunere

Procedeul de sudare prin suprapunere este utilizat pentru îmbinarea pieselor metalice sub formă de table, benzi etc.

Există două variante de sudare prin suprapunere, și anume - sudarea în puncte prin suprapunere și sudarea în linie prin suprapunere.

13.4.1. Sudarea în puncte prin suprapunere

În cazul sudării în puncte, piesele sub formă de table, benzile sunt strânse între doi electrozi alimentați de un transformator de curent mare. Figura 13.4 ilustrează acest procedeu.

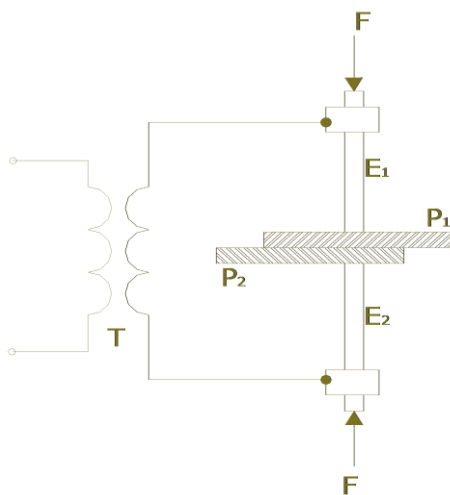


Figura 13.4. Sudarea în puncte prin suprapunere. T – transformator de sudare, F – forța de presiune, E – electrod, P – piesa de sudat

Tensiunea dintre electrozi este de 5...10 V. Iar, curentul electric în circuit depinde de grosimea tablelor sudate, ajungând la kA.

Etaple procesului de sudare presupune:

1. Inițial cele două piese se prind între cei doi electrozi și se asigură presarea cu o forță prestabilă.
2. Se asigură conectarea celor doi electrozi la sursa de alimentare.
3. La trecerea curentului electric în zona de contact a celor două materiale, pe axa electrozilor (densitatea de curent maximă) se degajă o cantitate importantă de căldură care determină topirea locală, cu realizarea unui nucleu de metal topit (depinde de durata și intensitatea curentului în circuit).
4. După întreruperea curentului electric are loc solidificarea zonei lichide și obținerea unui punct de sudură cu structură dendritică (dendrită – pojghiță arborescentă, de substanță minerală, pe fisurile și planurile de stratificare ale rocilor).

Pe durata întregului proces, forța de apăsare este menținută constantă. În sistemul de sudare, electrozii asigură apariția căldurii, dar sunt și elementele care transmit forța de apăsare.

Materialul electrozilor trebuie să aibă o bună conductivitatea termică și electrică, stabilitate la temperaturi înalte, să nu formeze aliaje cu materialul pieselor de sudat, să reziste la încălziri și răciri repetate, și să prezinte rezistență ridicată la uzură și oxidare.

Materialele folosite pentru confecționarea electrozilor sunt: Cu electrolitic tras la rece, aliaje de beriliu și Cu-Be, aliaje Cu-Cr-Zn, wolfram+cupru, wolfram+argint.

Variante ale sudării în puncte prin presiune sunt ilustrate în figura 13.5.a și 13.5.b.

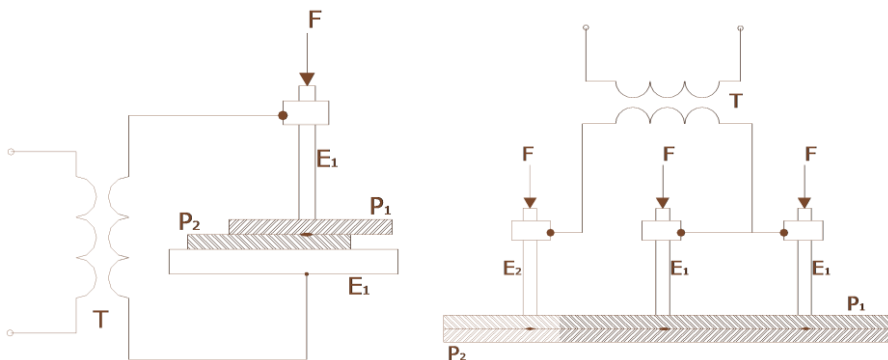


Figura 13.5.a Variante ale sudării în puncte prin presiune

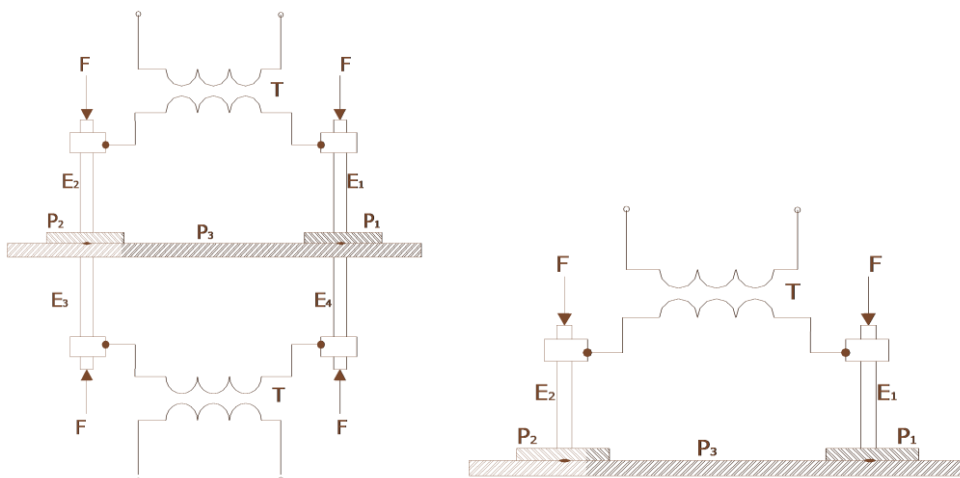


Figura 13.5.b Variante ale sudării în puncte prin presiune

Puterea aparentă necesară sudării, pentru piese de aceeași grosime se determină prin relația matematică:

$$S = k \cdot g, [kVA] \quad (13.6)$$

Utilajele acestui procedeu de sudare lucrează cu forțe de 0,3...1,35 kN și curenți de 5...7,5 kA. Pentru a se asigura caracteristicile corespunzătoare îmbinării trebuie să se asigure corelarea principalilor parametri: intensitatea curentului de sudare, durata procesului și forța de apăsare a electrozilor.

Corelația dintre parametri se poate face cu ajutorul relației:

$$I_s^2 \cdot \sqrt{\frac{t_s}{F}} = 0,31 \cdot 10^6 \cdot (1,5g\sqrt{g} + 1) \quad (13.7)$$

13.4.2. Sudarea în linie prin suprapunere

Principiul este asemănător sudării în puncte. Astfel, electrozii de forma unor role din Cu se deplasează în lungul zonei care urmează a fi sudată. Figura 13.6. prezintă schematic acest tip de sudare.

În funcție de forța de apăsare și de intensitatea curentului electric în circuit, se realizează o cusătură continuă cu o lățime de 2...3 mm.

În funcție de diagrama curentului de sudare, de variația forței de apăsare și a modului de parcurgere a spațiului, se utilizează mai multe variante ale acestui procedeu.

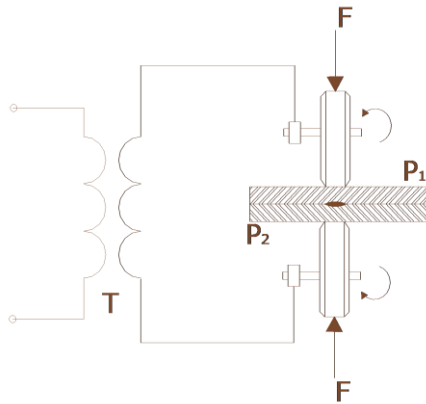


Figura 13.6. Sudarea în linie prin suprapunere. T – transformator de sudare, F – forța de presiune, E – electrod, P – piesa de sudat

Forma, dimensiunile și poziționarea rolor de sudare depind de configurația concretă a pieselor de îmbinat. Figura 13.7. prezintă forma zonei de contact și a poziționării rolor.

Viteza de antrenare a rolor influențează căldura disipată în zona de îmbinare și determină forma și dimensiunile nucleului lichid.

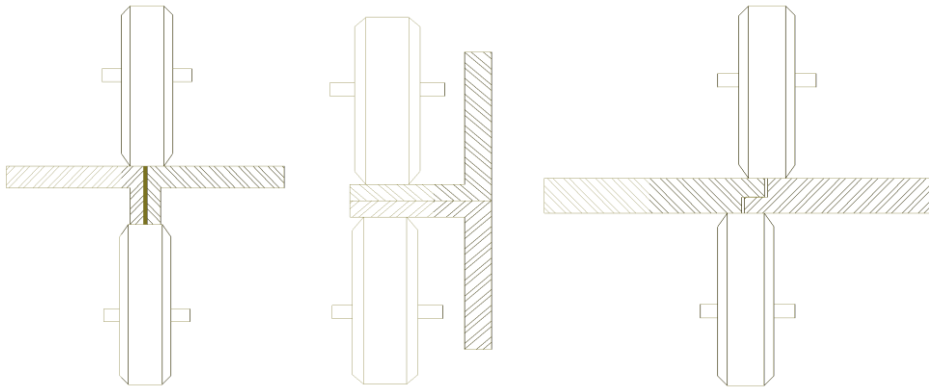


Figura 13.7. Sudarea în linie prin suprapunere. Variante de sudare.

Intensitatea curentului electric de sudare este de 1,5...2 ori mai mare decât în cazul sudării aceluiași piese prin puncte și determină lățimea cusăturii. Iar, forța de apăsare este de 1,1...1,3 mai mare, comparativ cu sudarea în puncte.

Instalațiile de sudare prin puncte și în linie cu impulsuri de curent sunt specifice industriei moderne .

Instalațiile sunt realizate sub formă de roboți de sudare, iar controlul procesului este realizat de către automatele programabile care asigură comanda

întreruptoarelor statice, controlează amplitudinea curentului în circuit și forța de apăsare, precum și asigură poziționarea electrozilor în zona de îmbinare.

13.5. Parametrii energetici ai procesului de sudare

Sistemul de sudare prin presiune poate fi considerat ca un transformator în scurtcircuit, astfel schema electrică echivalentă a instalației de sudare se poate reprezenta precum în figura 13.8. Schema cuprinde rezistențele și reactanțele din primarul și secundarul transformatorului, iar punctul de sudură este reprezentat prin rezistența de contact, care are o valoare mare din cauza porozității materialului în zona de contact.

La determinarea valorii impedanțelor din circuitul de sudare este necesar a acorda o atenție deosebită determinării corecte a valorii parametrilor din zona de sudare, care este descrisă în detaliu în figura 13.9.

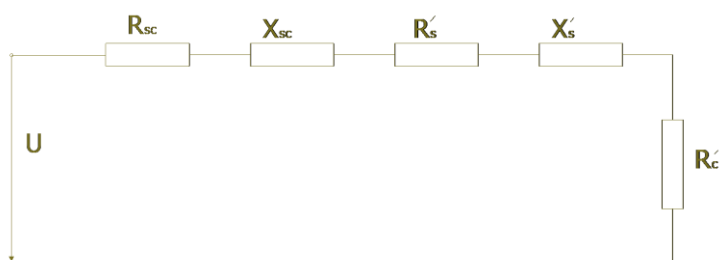


Figura 13.8. Schema echivalentă a sistemului de sudare prin presiune. U – tensiunea de alimentare, R_{sc} , X_{sc} – rezistența și reactanța de scurtcircuit a primarului transformatorului de sudare, R'_s , X'_s – rezistența și reactanța din secundarul transformatorului, raportate la primar, R_c – rezistența în zona de contact, raportată la primar

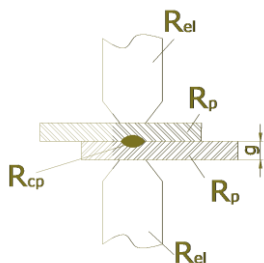


Figura 13.9. Descriere detaliată a rezistenței din zona de contact. R_{el} – rezistența electrodului, R_p – rezistența piesei, R_{cp} – rezistența punctului de contact, g – grosimea pieselor

Din figura precedentă se poate concluziona că rezistența R_c este compusă din rezistența pieselor, rezistența punctului de contact și rezistența electrozilor.

$$R'_c = 2R'_p + 2R'_{el} + R'_{cp} [\Omega] \quad (13.8)$$

Intensitatea curentului electric are relația matematică:

$$I'_s = \sqrt{\frac{Q}{\eta \cdot R'_c \cdot t_s}} [A] \quad (13.9)$$

Unde Q este energia produsă în timpul procesului de sudare, t_s – timpul de sudare, iar η – randamentul procesului de sudare.

Randamentul procesului de sudare este:

$$\eta = \frac{R'_c}{R_{sc} + R'_c + R'_s} 100 [\%] \quad (13.10)$$

Factorul de putere al instalației de sudare este:

$$\lambda = \cos\varphi = \frac{R_{sc} + R'_c + R'_s}{\sqrt{(R_{sc} + R'_c + R'_s)^2 + (X_{sc} + X'_s)^2}} \quad (13.11)$$

13.6. Bibliografie

[1]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998.

13.7. Autoevaluare

- 1) În timpul procesului de sudare prin presiune temperatura de contact dintre piesele de sudat este superioară temperaturii de topire ale acestora:
 - Adevărat / Fals

- 2) Tensiunea de lucru la sudare cap la cap este de:
 - 230 V / 16 V / 20 kV

3) Sudarea prin suprapunere se poate realiza:

În puncte / În linie / Circular

4) Sudarea în linie are nevoie de mai multă forță de presiune decât în cazul sudării în puncte.

Adevărat / Fals

14

Alte receptoare de energie electrică

14.1.Introducere

În sistemele electrice moderne, diversitatea receptoare electrice reflectă gama largă de funcții pe care le îndeplinește electricitatea în sectoarele industrial, comercial și casnic. După analizarea receptoarelor de iluminat și electrotermice (căldură și sudură) în capitolele anterioare, acest capitol se concentrează pe două clase din ce în ce mai importante, și anume receptoare electromecanice și receptoare electronice. Aceste două tipuri diferă semnificativ prin funcția, construcția și interacțiunea lor cu sursa de alimentare cu energie electrică. Astfel, fiecare clasă de receptoare va avea dedicat un subcapitol.

Următorul subcapitol, se va focaliza pe receptoarele electromecanice, care intră în categoria receptoarelor de forță. În secțiunea dedicată lor nu se va insista asupra părții matematice și a principiului de funcționare, întrucât aceste informații au fost predate în cadrul altor cursuri. În cadrul secțiunii dedicate receptoarelor electromecanice, se va insista pe caracteristicile energetice a receptoarele ca aparate per ansamblu, și nu pe motoarele electrice, care sunt elemente componente ale lor și au fost detaliat predate anterior.

În secțiunea dedicată receptoarelor electronice, din nou, nu se va insista asupra detaliilor, ci asupra caracteristicilor energetice ale aparatelor propriu-zise.

În timp ce receptoarele tradiționale, cum ar fi lămpile și încălzitoarele, se comportă în mare măsură ca sarcini liniare și rezistive (se face referire aici la receptoarele simple, care nu conțin multă electronică), receptoarele electromecanice și electronice sunt adesea neliniare și pot introduce putere reactivă, distorsiuni armonice și tranzitorii în sistemul electroenergetic. Ca atare, prezența lor necesită o proiectare atentă a sistemelor de protecție, a dispozitivelor de filtrare și a echipamentelor de control.

Mai mult, utilizarea pe scară largă a receptoarelor electronice și electromecanice este esențială pentru dezvoltarea rețelelor inteligente, a sistemelor de automatizare și a infrastructurilor de gestionare a energiei.

14.2.Receptoare electromecanice

Receptoarele electromecanice sunt caracterizate prin capacitatea lor de a converti energia electrică în mișcare mecanică sau forță. Această clasă include dispozitive precum motoarele electrice, solenoizii și electromagneții, care sunt utilizate pe scară largă în aplicații variind de la automatizare industrială la electrocasnice. Funcționarea lor este de obicei guvernată de principiile electromagnetismului și reprezintă adesea unele dintre cele mai mari consumatoare de energie componente dintr-o instalație. Comportamentul dinamic al receptoarelor electromecanice, în special în ceea ce privește curentul de pornire, caracteristicile cuplu-viteză și cerințele de control, face ca integrarea lor în sistemele electrice să fie atât o preocupare tehnică, cât și una economică.

Caracteristicile de bază ale acestor receptoare se referă la:

- Conversia energiei - receptoarele electromecanice transformă energia electrică în energie mecanică, de obicei sub formă de mișcare de rotație (motoare, ventilatoare, pompe), mișcare liniară (solenoizi, actuatoare), sau forță (electromagneți). Mecanismul de bază de conversie a energiei se bazează pe interacțiunea dintre conductorii care transportă curent și câmpurile magnetice (forța Lorentz). În mașinile rotative, cum ar fi motoarele, cuplul rezultă din forța magnetică care acționează asupra unei bucle de curent.
- Principiul de funcționare - majoritatea dispozitivelor electromecanice funcționează pe baza unuia dintre cele două efecte electromagnetice, și anume inducția electromagnetică și atracția / repulsia magnetică. Primul fenomen se aplică mașinilor rotative, cum ar fi motoarele cu inducție și alternatoarele. Conform legii lui Faraday, un câmp magnetic variabil induce o tensiune într-un conductor. Atracție/repulsie magnetică se utilizează în solenoizi și electromagneți, unde un câmp magnetic atrage un miez feromagnetic pentru a genera mișcare mecanică.
- Tipul de sarcină - predominant inductivă, cu curent de pornire și putere reactivă ridicate. Deci, receptoarele electromecanice se comportă ca sarcini inductive. Acestea consumă putere activă P pentru a efectua lucru mecanic

și putere reactivă Q pentru a menține câmpurile magnetice. Aceasta introduce un factor de putere de obicei între 0,7–0,9 pentru motoarele standard. Modelul electric în forma simplificată a unui motor în condiții de stare staționară (funcționează constant) poate fi modelat ca o sarcină RL, adică:

$$Z=R+jX_L [\Omega] \quad (14.1)$$

unde R este rezistența statorului, $X_L = \omega L$ este reactanța inductivă.

Puterea aparentă este:

$$S=P+jQ=UI [\text{VA}] \quad (14.2)$$

- Comportamentul dinamic - parametrii precum cuplul, viteza, alunecarea și inerția sarcinii influențează performanța. Într-adevăr, receptoarele electromecanice au un comportament tranzitoriu în timpul pornirii, al modificărilor de sarcină sau al variațiilor de viteză. Parametrii dinamici cheie includ curent de pornire ridicat, în special pentru motoarele cu inducție cu colivie (de 5-8 ori curentul nominal), timpul de accelerare, și caracteristicile cuplu-viteză. Modelul dinamic pentru motoarele cu inducție - circuitul echivalent (pe fază) cu rotor include impedanța statorului (14.3), componenta de magnetizare (14.4), și impedanța rotorului (14.5), care este variabilă, depinzând de alunecare.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 [\Omega] \quad (14.3)$$

$$Z_1 = jX_m || R_m [\Omega] \quad (14.4)$$

$$Z_1 = \frac{R_2}{s} + jX_2 [\Omega] \quad (14.5)$$

Unde s este alunecarea, $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$.

- Sursa de alimentare - dispozitivele electromecanice pot fi alimentate la tensiune continuă (motoare de curent continuu cu sau fără perii, solenoizi), tensiune alternativă monofazată (motoare mici, electrocasnice) și tensiune alternativă trifazată (motoare industriale, HVAC, compresoare). Motoarele trifazate oferă o eficiență mai bună, pornire automată și o producție mai lină a cuplului.
- Controlul - dispozitivele electromecanice necesită sisteme de control pentru a regla pornirea și oprirea, viteza și cuplul, direcția de rotație, și protecția (supracurent, suprasarcină, blocare). Sistemele moderne utilizează contactoare, rele, demaroare moi pentru controlul de bază,

acționări cu frecvență variabilă pentru controlul vitezei motoarelor de curent alternativ, servomotoare și controlere pentru motoare pas cu pas pentru poziționare precisă.

Receptoarele electromecanice se găsesc în aproape toate sectoarele. Acestea sunt responsabile pentru generarea mișcării, ridicarea obiectelor, mutarea materialelor și acționarea sistemelor mecanice. Figura 14.1. ilustrează succint aplicațiile industriale, comerciale și casnice și din infrastructură.

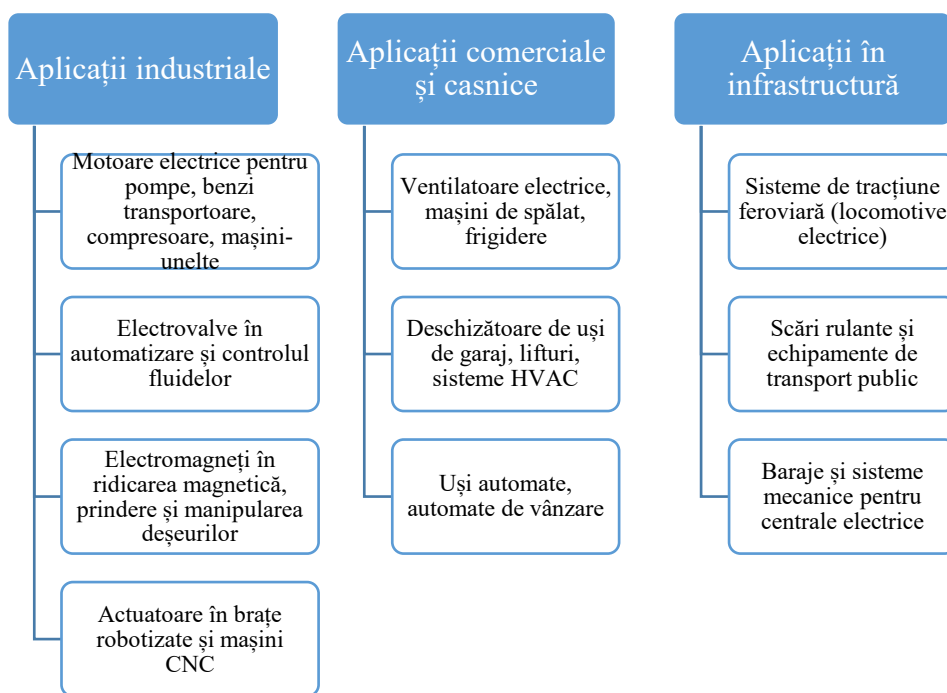


Figura 14.1. Aplicațiile receptoarelor electromecanice

Punctele forte ale receptoarelor electromecanice se referă la eficiența ridicată în convertirea energiei electrice în energie mecanică, gama largă de dimensiuni și puteri (de la motoare cu fracțiuni de cai putere la sute de kilowați), fiabilitatea și durata lungă de viață operațională cu o întreținere corespunzătoare, controlabilitatea (viteza, cuplul și direcția pot fi reglate fin cu electronice moderne) și standardizarea (dimensiuni și dimensiuni de montare standardizate, disponibile pe scară largă).

Comparativ, punctele slabe sunt rezultatul existenței curentului de pornire (pornirea motoarelor mari poate produce vârfuri de curent de 5–8 ori curentul nominal), a consumului de putere reactivă (natura inductivă duce la un factor de

putere scăzut dacă nu este compensat), a uzurii mecanice (piesele mobile, precum lagăre și perii, se degradează în timp), a necesității unui control complex (unele aplicații necesită sisteme de control avansate, precum servomotoare, motoare pas cu pas), și a sensibilității la suprasarcină (se poate supraîncălzi sau bloca sub suprasarcină susținută).

Datorită comportamentului lor inductiv și dinamic, receptoarele electromecanice necesită adesea protecție la suprasarcină și scurtcircuit (siguranțe, rele termice), soft starter pentru a reduce stresul mecanic, condensatoare de corecție a factorului de putere pentru a reduce necesarul de putere reactivă, și protecție la supratensiune pentru a proteja împotriva vârfurilor de tensiune.

14.3.Receptoare electronice

Receptoarele electronice sunt concepute nu pentru a produce lucru mecanic sau căldură, ci pentru a procesa, stoca, transmite sau gestiona informații. Acestea includ o gamă vastă de dispozitive, cum ar fi computere, televizoare, telefoane mobile, echipamente de comunicații și electronică de control. Aceste dispozitive consumă de obicei mai puțină energie decât receptoarele de forță, dar impun comportamente electrice complexe asupra rețelei. Dependența lor de tehnologia semiconductorilor, sursele de alimentare în comutație și circuite digitale, introduce noi provocări în ceea ce privește calitatea energiei, compatibilitatea electromagnetică și eficiența energetică.

Receptoarele electronice sunt esențiale în tehnologia informației, comunicații, sistemele de măsurare și automatizarea. Comportamentul lor în rețeaua electrică este adesea neliniar și pot introduce distorsiuni armonice, tranzitorii de comutație și un factor de putere scăzut din cauza metodelor lor interne de conversie a energiei.

Caracteristicile principale ale receptoarelor electronice sunt:

1. Consumul de energie pentru procesarea informațiilor - energia electrică este utilizată intern de porți logice, microcontrolere, afișaje, amplificatoare de semnal etc.
2. Consumul redus de energie - adesea funcționează în intervalul de la miliwați la câteva sute de wați, dar sunt utilizate pe scară largă, ceea ce duce la un consum total semnificativ.

3. Conversia internă a energiei - se utilizează surse de alimentare în comutație, convertoare CC-CC sau adaptoare CA-CC, care introduc componente de comutație de înaltă frecvență și curenți de intrare neliniari.
4. Comportamentul electric neliniar – din cauza redresoarelor și a surselor de comutație, aceste dispozitive nu consumă curent sinusoidal, nici măcar de la o sursă de tensiune sinusoidală. Deci, ele pot genera armonici, și astfel pot afecta calitatea energiei și determină necesitatea utilizarea unor filtre dedicate sau corecția factorului de putere.
5. Sensibilitatea ridicată la calitatea alimentării - fluctuațiile de tensiune, zgomotul și abaterile de frecvență pot cauza funcționarea defectuoasă, pierderi de date sau daune permanente.

Receptoarele electronice nu sunt modelate prin sarcini rezistive sau inductive, ci prin impedanță neliniară și circuite producătoare de armonice. Relația de bază a curentului poate fi

$$i(t) = I_{v\grave{a}r f} \sin(\omega t) f(t) [A] \quad (14.6)$$

Unde $f(t)$ este o funcție pulsată sau trunchiată (nesinusoidală), care duce la o formă de undă de curent distorsionată.

Modelul simplificat al unui receptor electronic tipic include un redresor în punte cu diode de intrare, un condensator de curent continuu și un tranzistor de comutație de înaltă frecvență. Pentru analiza rețelei, receptoarele electronice sunt reprezentate ca sarcini neliniare cu THD (distorsiune armonică totală) ridicat, factor de putere scăzut (cu excepția cazului în care este corectat) și curenți de funcționare mici, dar neneglijabili.

Receptoarele electronice sunt folosite în multe ramuri ale societății umane, astfel ele sunt implicate în gestionarea de date, semnale, imagini, funcții de control sau comunicare. O listă amănunțită a aplicațiilor este:

- Electronica de larg consum - televizoare, radiouri, smartphone-uri, console de jocuri, sisteme audio/video, telecomenzi și termostate digitale.
- Sistemele informatice și de calcul - computere desktop, laptopuri, servere, imprimante, scanere, switch-uri de rețea, automatizare birotică: routere, modemuri, unități NAS.
- Electronica industrială - controlere logice programabile (PLC-uri), SCADA și HMI (interfețe om-mașină), senzori industriali și aparate de condiționare a semnalului.

- Echipamentele medicale și de laborator - aparate ECG, pompe de perfuzie, spectrometre și cromatografe, sisteme de monitorizare și înregistrare a datelor pentru spitale.
- Măsurarea și instrumentația - osciloscoape, multimetre, analizoare de putere, controlere integrate pentru bancuri de testare, plăci de achiziție de date și sisteme cu microcontrolere.
- Sistemele de comunicații - routere Wi-Fi, stații de bază mobile, receptoare satelit, emițătoare radio, unități de control al antenei și amplificatoare de semnal.

Avantajele și dezavantajele receptoarelor electronice sunt sintetizate în figura 14.2.

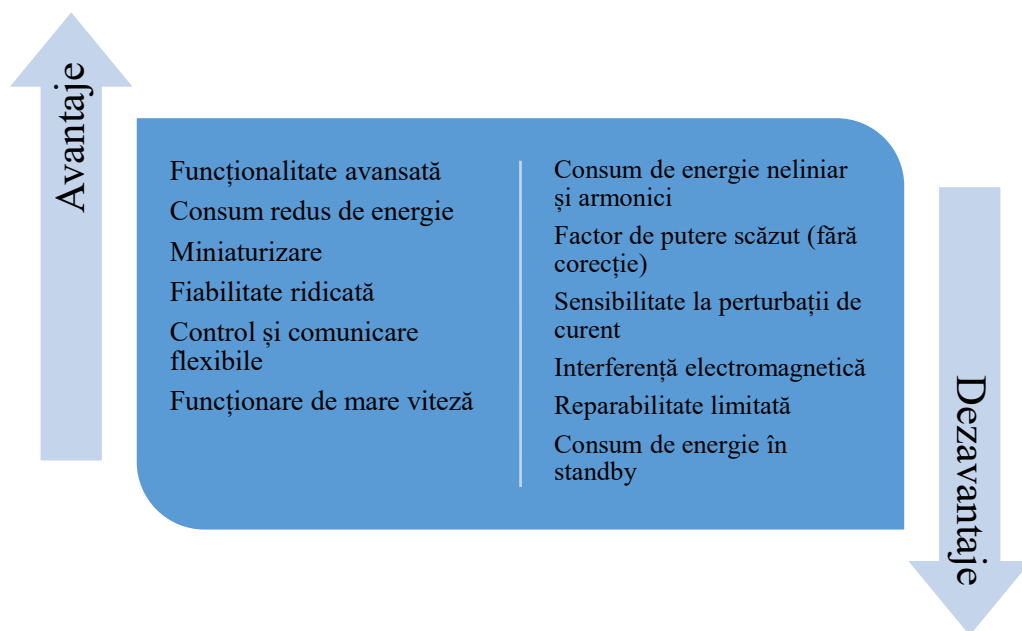


Figura 14.2. Avantajele și dezavantajele receptoarelor electronice

Din figura 14.2. reiese că receptoarele electronice sunt aparate care pot efectua operațiuni complexe precum, controlul logic, filtrarea de semnal, stocarea și procesarea de date. Toate acestea la un consum redus de energie; rezultă că ele sunt foarte eficiente din punct de vedere energetic (majoritatea dispozitivelor au puterea activă nominală sub 100 W, multe sub 10 W). În plus, datorită dezvoltării tehnologice din ultimul deceniu, în special a microelectronicii moderne, aceste receptoare sunt miniaturizate, și permit modele compacte cu inteligență

artificială încorporată. Datorită faptului că nu au piese mobile, și uzura mecanică este minimă, astfel aceste receptoare au o durată lungă de viață, în special componentele în stare solidă. Un alt avantaj, care se referă la control și comunicare flexibile, reiese din faptul că aceste receptoare pot interacționa cu alte sisteme prin serial, USB, Ethernet, wireless etc. Sistemele electronice pot comuta, calcula sau transmite informații în microsecunde până la nanosecunde, ceea ce le face să lucreze la viteze foarte mari.

Dezavantajele menționate în figura 14.2. detaliate sunt: (1) consum de energie neliniar și armonici – sursele de alimentare în comutație și redresoarele introduc armonici, provocând distorsiuni de tensiune, supraîncărcare neutră și interferențe electromagnetice în medii sensibile; (2) factor de putere scăzut (fără corecție) - poate consuma curent în impulsuri scurte, rezultând un factor de putere slab de deplasare și distorsiune; (3) sensibilitate la perturbații de curent - circuitele electronice sunt vulnerabile la supratensiune, subtensiune, zgomot electric și supratensiuni de trăsnet; (4) interferență electromagnetică - convertoarele de comutare emit interferențe electromagnetice, care pot afecta dispozitivele de comunicații, medicale și de precizie. În consecință există necesitatea de ecranare și filtre; (5) reparabilitate limitată - electronicele moderne (în special dispozitivele compacte montate la suprafață) sunt dificil de reparat - adesea considerate de unică folosință; (6) consum de energie în standby - multe receptoare electronice consumă energie „fantomă” atunci când sunt inactive sau în standby (de exemplu, televizoare, routere), contribuind la risipa de energie.

În finalul prezentării tuturor tipurilor de receptoare electrice este introdusă o sinteză comparativă între ele în tabelul 14.1. Se observă că s-au luat în considerare funcția, modelul electric, exemple, puterea nominală, sensibilitatea la probleme în alimentare, interferența electromagnetice și reparabilitatea receptoarelor.

Tabelul 14.1. Comparație între receptoarele electrice

Criteria	Iluminat	Încălzire	Sudare	Electromecanice	Electronice
Funcția	Producere lumină	Producere căldură	Unește piese prin căldură sau presiune	Producere forță sau mișcare	Manipulează informație

Model electric	Rezistiv și inductiv	Rezistiv, inductiv, capacitiv	Neliniar, adesea pulsant	Inductiv, dinamic	Neliniar, în comutație
Exemple	LED, CFL,	Cuptoare, furnale	Sudarea cu arc	Ventilatoare, lifturi	TV, PC
Putere nominală	5–500 W	500 W – MW	2–50 kW	10 W – >100 kW	0,5–500 W
Sensibilitate la probleme în alimentare	Mică	Mică	Mare	Medie	Mare
Reparabilitate	Posibilă	Moderată	Moderată	Părțile mecanice pot fi înlocuite	Adesea imposibilă
Interferență electromagnetică	Mică	Neglijabilă	Mare	Medie	Mare

14.4. Bibliografie

- [1]. U.S. DOE “Electrical Science, Fundamentals Handbook” (4 volumes).
 [2]. Tony R. Kuphaldt, *Lessons in Electric Circuits*.
 [3]. Syed T. Ahmed & Syed M. Basha, *Analog Electronic Circuits: Principles and Fundamentals*.
 [4]. Thomas F. Schubert Jr. & Ernest M. Kim, *Fundamentals of Electronics: Devices and Circuit Applications*.

14.5. Autoevaluare

- 1) Receptoarele care nu au fost prezentate în primele capitole ale cărți sunt:
 Receptoarele de putere / Receptoarele mecanice / Receptoarele electroenergetice.
- 2) Receptoarele electromecanice transformă energia electrică în mișcare.
 Adevărat / Fals.
- 3) Receptoarele electronice folosesc energia electrică pentru a manipula informație.
 Adevărat / Fals.

4) Receptoarele electromagnetice au curent de pornire egal cu valoarea curentului nominal.

Adevărat / Fals.

5) Receptoarele electronice sunt robuste, astfel ele nu sunt afectate de calitatea energiei electrice.

Adevărat / Fals.

6) Receptoarele electromecanice și electronice se modelează folosind impedanțe complexe.

Adevărat / Fals.

15

Efectele utilizării energiei electrice

15.1. Introducere

Utilizarea energiei electrice se referă la transformarea energiei electrice în alte forme de energie, în timpul proceselor tehnologice. Aceste procese au loc în receptoarele electrice, care intră în componența consumatorilor de energie electrică.

Receptoare electrice se împart în mai multe categorii în funcție de scopul lor, și anume:

- Aparat de iluminat – folosesc energia electrică pentru a obține lumină.
- Instalații electrotermice – transformă energia electrică în căldură.
- Sisteme de sudare electrică – folosesc energia electrică pentru a realiza procese de sudare electrică.
- Sisteme electromecanice – transformă energia electrică în mișcare sau forță.
- Aparat electronice – folosesc energia electrică pentru a gestiona informație.

Receptoarele electrice, în funcție de caracteristicile și funcționarea lor pot afecta în mod negativ sistemul electroenergetic și mediul înconjurător (fauna, flora și societatea umană).

Impactul negativ al receptoarelor electrice asupra sistemului energetic și mediului rezultă din caracteristicile lor electrice și operaționale - în special, din elementele componente, metoda de construcție, comportamentul nelinier tensiune-curent și modurile de funcționare.

Elementele componente ale receptoarelor pot să fie din categoria elementelor inductive (motoare și transformatoare), astfel ele consumă putere reactivă, ceea ce cauzează reducerea factorului de putere, și în consecință este nevoie de mai

mult curent, deci apar pierderi mai mari în linii și transformatoare. Aceste pierderi semnifică un consum mai mare de energie, care dacă provine din arderea coombustibililor fosili, înseamnă mai multe emisii de CO₂. De asemenea, elementele capacitive (filtre și baterii de condensatoare), dacă nu sunt coordonate corespunzător, pot provoca fenomene de rezonanță, și apariția supratensiunilor, plus amplificarea armonicilor. Elementele componente pe bază de semiconductoare (redresoare, invertoare) comută brusc curenții, astfel ele cauzează apariția armonicilor de curent, care ulterior distorsionează tensiunea de alimentare, și în final perturbă alte echipamente. Dacă receptoarele conțin elementele de descărcare (lămpi cu arc, cuptoare), care se caracterizează prin instabilitate, atunci apar probleme flicker de tensiune, și în consecință probleme de calitate a energiei electrice pentru consumatorii și receptoarele din apropierea punctului de alimentare a receptorului perturbant.

Metoda de construcție a receptoarelor poate avea un impact negativ în primul rând prin proiectarea deficitară a acestora. Astfel, construcția eronată a înfășurărilor și a miezurilor cauzează pierderi suplimentare în fier (pierderi magnetice) și cupru (pierderi electrice), rezultând un randament mai mic, și un curent de funcționare mai mare. Ecranarea inadecvată implică interferențe electromagnetice, care afectează sistemele electrice învecinate, iar izolația necorespunzătoare determină un lanț de defecțiuni, care pot duce chiar la întrepreri neplanificate și probleme de stabilitate a rețelelor electrice. Construcția deficitară a receptoarelor micșorează durata de viață a acestora, și deci înlocuiri mai frecvente, o creștere a necesarului de materie primă și în final o mai mare poluare industrială.

Caracteristicile neliniare U-I ale receptoarelor precum cuptoarele cu arc electric și acționările cu viteză variabilă crează armonici de curent și apoi tensiune, care ulterior cresc temperatura de funcționare a transformatoarelor, cablurile, și condensatoarele. Mai mult, armonicile pot interfera cu semnalele de comunicație și dispozitivele de protecție. Variațiile receptoarelor cu serviciu intermitent și instabil cauzează fluctuații ale tensiunii, și apoi flicker, care poate produce disconfort și potențiale daune altor echipamente sensibile.

Modul de funcționare al receptoarelor afectează negativ astfel:

- Pornirea motoarelor mari se realizează printr-un curent de pornire ridicat, ceea ce determină căderi de tensiune mari, și posibilitatea afectării stabilității tensiunii.

- Comutarea frecventă cauzează regimuri tranzitorii, și declanșarea aparatului de protecție, ceea ce are un impact negativ asupra fiabilității sistemului.
- Funcționarea la putere mică, subnominală, de multe ori înseamnă o eficiență scăzută, și deci pierderi mai mari pe unitatea de putere.
- Funcționarea defectuoasă sau supraîncărcată provoacă defecțiuni și întreruperi, și deci nevoia reconfigurării rețelei.

O sinteză a impactului receptoarelor electrice asupra mediului și sistemului electroenergetic este prezentată în tabelul 15.1.

Tabelul 15.1. Impactul receptoarelor electrice

Caracteristică receptoare electrice	Impact asupra sistemului energetic	Impact asupra mediului
Elemente componente	Putere reactivă, armonici, flicker	Mai multe pierderi, mai mult CO ₂ ; materiale toxice; deșeuri electronice
Metoda de construcție	Pierderi, interferențe electromagnetice, defecțiuni	Consum mai mare de energie, și deci mai multe emisii; mai multe deșeuri din cauza duratei de viață mai scurte
Caracteristici neliniare	factor de putere mic, flicker, armonici	Pierderi suplimentare, mai multe emisii CO ₂ ; supradimensionarea infrastructurii; deșeuri electronice
Modul de funcționare	Căderi de tensiune, tranzitorii, instabilitate	Energie irosită, rezultând mai multe emisii; mai mult zgomot; mai multe deșeuri de întreținere

15.2. Impactul asupra sistemului electroenergetic

Receptoarele electrice pot afecta atât regimul de funcționare a întregului sistem electroenergetic, cât și elementele componente ale acestuia. Analizând mai în detaliu, se poate afirma că aceste receptoare pot avea un impact negativ asupra regimului staționar de funcționare, dar pot cauza și regimuri tranzitorii nefavorabile celorlalte elemente componente ale sistemului electroenergetic, cât și altor receptoare conectate la sistemul electroenergetic.

Receptoarele electrice pot afecta în mod negativ regimul staționar de funcționare a sistemului electroenergetic și cauza:

- Regim nesinusoidal de funcționare.
- Regim dezechilibrat de funcționare.
- Variații de lungă durată a tensiunii.

15.2.1. Regimul nesinusoidal de funcționare

Regimul nesinusoidal de funcționare este caracterizat prin forme de undă a curentului și/sau tensiunii nesinusoidale, sau afectate de distorsiune armonică.

Distorsiunea armonică a unei curbe reprezintă o abatere periodică, în regim permanent, de la forma sinusoidală a curbei (de tensiune sau de curent electric) de frecvență caracteristică sistemului analizat.

Tipurile de distorsiune armonică sunt componentele continue, armonicile, interarmonicile, impulsurile de comutație și zgomotele. Figura 15.1 ilustrează forme de undă nesinusoidale.

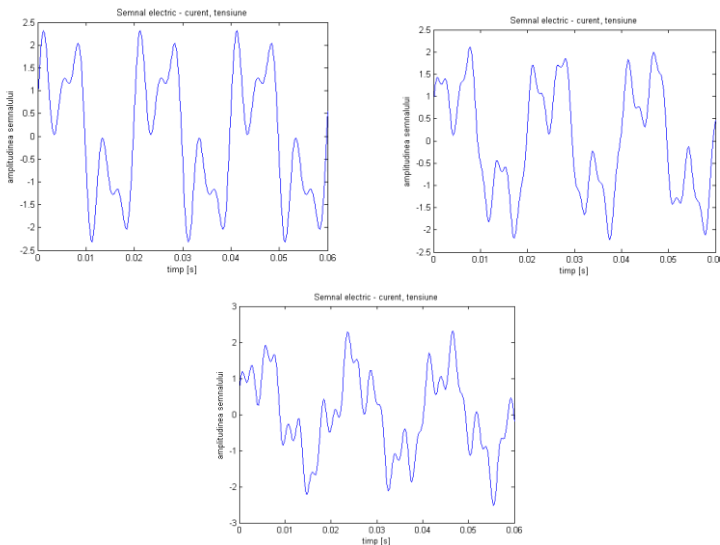


Figura 15.1. Forme de undă nesinusoidale

Sursele curenților armonici se regăsesc la consumatori, care conțin receptoare deformante, adică receptoare care injectează în rețea curenți nesinusoidali. Sursele de tensiuni armonice se regăsesc la generatoare.

O definiție a receptoare deformante este următoarea - echipamentele industriale sau casnice care înglobează dispozitive electronice sau care funcționează pe baza descărcărilor în arc electric, și au o caracteristică U-I neliniară.

Echipamentele industriale sunt principalele receptoare electrice care introduc armonice de curent. Acestea sunt considerate surse de curenți armonici indentificabile. Receptoarele care se regăsesc la consumatorii casnici nu trebuie neglijate, deoarece intră în categoria surselor de curenți armonici neidentificabile. Acestea, chiar dacă au putere instalată mai redusă, pot reprezenta o importantă sursă de distorsiuni armonice deoarece sunt foarte numeroase.

Sursele de curenți deformați sunt bobinele cu miez din fier, arcul electric, și electronica de putere (redresoare, variatoare etc.). În consecință, receptoarele deformante sunt:

- Aparatele de iluminat care conțin lămpi cu descărcări, LED, din cauza arcului electric și a componentelor electronice.
- Instalațiile electrotermice de inducție, capacitive, cu microunde, și cu arc electric.
- Sudarea electrică.
- Receptoarele electronice și electromecanice.

În funcție de elementele sistemului electroenergetic care sunt afectate, efectele distorsiunilor armonice se pot împărți în trei categorii: (1) efecte negative apărute în rețelele electrice, (2) efecte negative apărute la consumatori și (3) efecte care influențează negativ rețelele de comunicație.

În funcție de comportarea în regim deformant de funcționare, receptoarele electrice se împart în două categorii:

- Prima categorie cuprinde echipamente sensibile la curenții distorsionați care parcurg aceste echipamente sau la tensiunile deformate aplicate la bornele echipamentului.
- Categoria a doua de echipamente cuprinde instalații sincronizate cu tensiunea sinusoidală a rețelei electrice și care sunt afectate de perturbații funcționale în prezența distorsiunilor armonice ale tensiunii.

Analiza distorsiunilor armonice se realizează cu ajutorul transformatei Fourier, iar măsurarea armonicilor se face prin implicarea analizoarelor de calitate a energiei electrice, care au implementată transformata Fourier rapidă.

Curbele de curent sau tensiune sunt periodice, ele pot fi descrise prin funcții cu proprietatea:

$$f(t) = f(t \pm kT) \quad (15.1)$$

Transformata Fourier și coeficienții acesteia:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (15.2)$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \approx \frac{1}{2p} \sum_{i=1}^{2p} f(t_i) \quad (15.3)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{2p} f(t_i) \cos \frac{n\pi i}{p} \quad (15.4)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{2p} f(t_i) \sin \frac{n\pi i}{p} \quad (15.5)$$

Unde p este numărul de eșantioane a semnalului analizat.

Cuantificarea armonicilor se face prin indicatorii de calitate, care în cazul armonicilor sunt:

Nivelul (ponderea) armonici de tensiune

$$\gamma_n = \frac{U_n}{U_1} 100 [\%] \quad (15.6)$$

Factorul de formă

$$k_f = \frac{U_{ef}}{U_{med}} \quad (15.7)$$

Factorul de distorsiune

$$\delta_I = \frac{I_d}{I_1} 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} 100 [\%] \quad (15.8.1)$$

$$\delta_U = \frac{U_d}{U_1} 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} 100 [\%] \quad (15.8.2)$$

15.2.2. Regimul nesimetric de funcționare

Un sistem trifazat simetric de mărimi sinusoidale (tensiune sau curent electric) se caracterizează prin cei trei fazori reprezentativi, care sunt egali în modul, respectiv defazați succesiv, unul față de altul, cu un unghi egal cu $2\pi/3$ radiani. (120°). În caz contrar regimul este nesimetric, figura 15.2. ilustrează fazorii unui sistem nesimetric de tensiune, respectiv forma de undă a unui sistem trifazat nesimetric de tensiune.

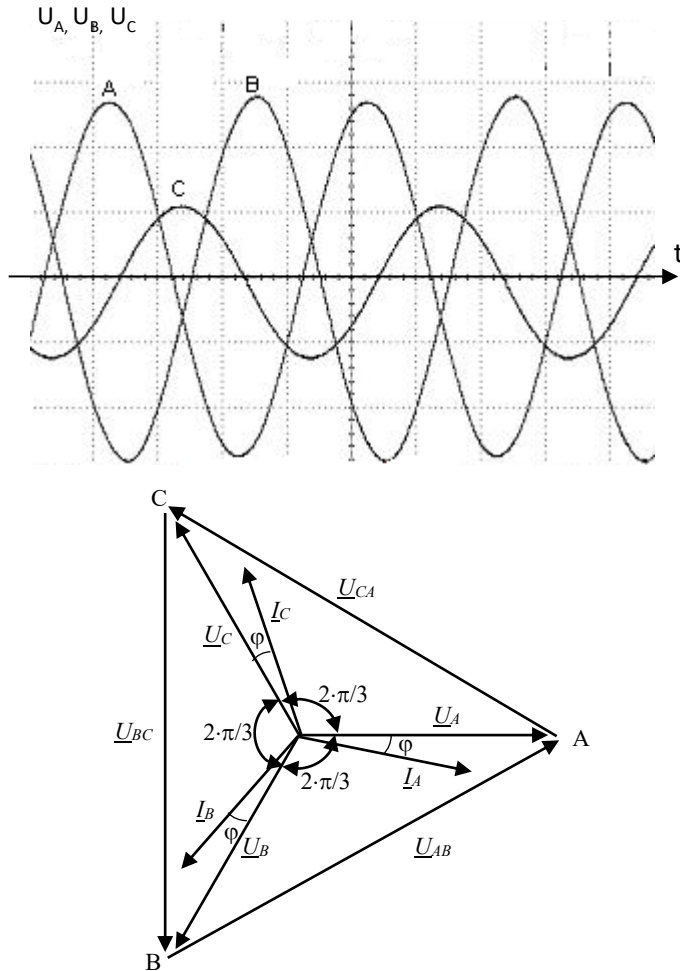


Figura 15.2. Regim nesimetric de tensiune

Regimul nesimetric poate fi temporar sau permanent. Regimul nesimetric permanent poate fi determinat de:

- Sarcinile inegale pe cele trei faze ale rețelei de alimentare de tensiune alternativă trifazată.

- Receptoarele monofazate repartizate inegal pe cele trei faze (iluminat stradal, consumatori casnici etc.).
- Receptoarele bifazate (aparate de sudare electrică, cuptoare electrice de inducție la frecvență industrială, tracțiune electrică etc.).
- Receptoarele trifazate dezechilibrate (cuptoare cu arc electric).
- Impedanțele diferite ale liniilor electrice pe cele trei faze (în special liniile electrice aeriene).

Regimul nesimetric temporar este cauzat de apariția unor defecte – puneri la pământ bifazate și monofazate.

Efectele nesimetriilor se manifestă asupra echipamentelor electrice (mașini electrice rotative, transformatoare, baterii de condensatoare, convertoare statice de putere) și rețelelor de transport și distribuție ale consumatorilor și ale sistemului energetic național.

În analiza efectelor regimurilor nesimetrice asupra receptoarelor trifazate de energie electrică este necesar a se lua în considerare influența inegalității în modul a amplitudinilor tensiunilor trifazate, respectiv influența defazajelor, diferite de $2\cdot\pi/3$, între tensiunile de fază.

Nesimetria tensiunilor determină reducerea puterii reactive furnizată de bateriilor de condensatoare. Nesimetria curenților cauzează în principal producerea de pierderi suplimentare în rețelele electrice de transport și distribuție, precum și în rețelele industriale, cu consecințe negative asupra randamentului de transfer al energiei. Regimul nesimetric are ca efect diminuarea randamentului instalațiilor de redresare și poate conduce la deteriorarea condensatoarelor filtrelor de netezire (apare o armonică de curent de rangul 2, proporțională cu factorul de netezire, care supraîncarcă condensatoarele din filtru).

Măsurarea și cuantificarea regimului nesimetric pleacă de la teorema Stokvis-Fortescue. Pe baza teoremei lui Stokvis – Fortescue, un sistem trifazat de fazori oarecare se poate descompune în trei sisteme trifazate, dintre care două sisteme simetrice de succesiune diferită - unul pozitiv și altul negativ - și unul de succesiune zero, așa cu arată figura 15.3.

Măsurarea regimului nesimetric se face cu aparate de măsură dedicate, iar cuantificarea regimului nesimetric se realizează prin indicatori de calitate a energiei electrice dedicați, adică factorii de nesimetrie negativă (15.11), respectiv zero de tensiune (15.12).

Relațiile (15.9) descriu modul în care se descompune sistemul nesimetric, care conține fazorii \underline{A}_1 , \underline{A}_2 , \underline{A}_3 , prin intermediul sistemelor simetrice de succesiune pozitivă, negativă și zero (descriși prin relațiile (15.10)).

$$\underline{A}_1 = \underline{A}^0 + \underline{A}^+ + \underline{A}^-, \quad (15.9.1)$$

$$\underline{A}_2 = \underline{A}^0 + a^2 \cdot \underline{A}^+ + a \cdot \underline{A}^-, \quad (15.9.2)$$

$$\underline{A}_3 = \underline{A}^0 + a \cdot \underline{A}^+ + a^2 \cdot \underline{A}^-. \quad (15.9.3)$$

$$\underline{A}^0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_3), \quad (15.10.1)$$

$$\underline{A}^+ = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_1 + a \cdot \underline{A}_2 + a^2 \cdot \underline{A}_3), \quad (15.10.2)$$

$$\underline{A}^- = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_1 + a^2 \cdot \underline{A}_2 + a \cdot \underline{A}_3). \quad (15.10.3)$$

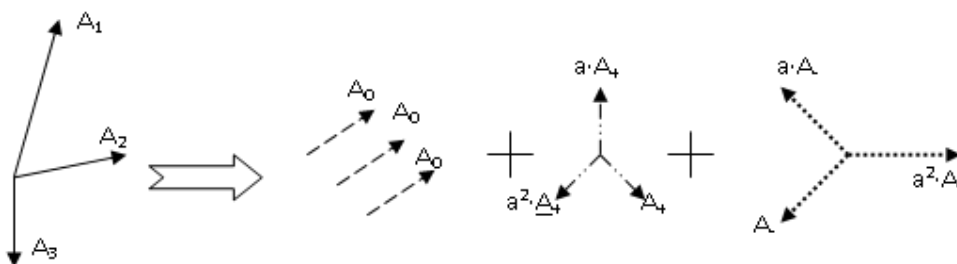


Figura 15.3. Transformarea sistemului nesimetric în trei sisteme simetrice

Factorul de succesiune negativă a tensiunii:

$$k_U^- = \frac{U^-}{U^+} \quad (15.11)$$

Factorul de succesiune zero a tensiunii:

$$k_U^0 = \frac{U^0}{U^+} \quad (15.12)$$

15.2.3. Regimul de funcționare de scurtă durată sau tranzitoriu

Unele receptoare electrice cu sarcină variabilă cauzează fluctuații de tensiune (în special de funcționarea intermitentă sau cu șocuri de putere a unor receptoare). Figura 15.4. prezintă forma de undă a tensiunii în cazul fluctuațiilor de tensiune.

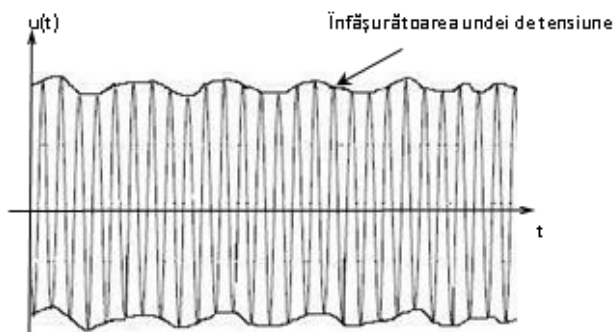


Figura 15.4. Fluctuații de tensiune

În funcție de nivelul tensiunii rețelei de alimentare, aceste receptoare sunt reprezentate de:

- Frigidere, ascensoare, aparate de sudură în rețelele de joasă tensiune.
- Pompe, locomotive electrice, laminoare în rețelele de medie tensiune.
- Cuptoare cu arc, cuptoare cu inducție, laminoare în rețelele de înaltă tensiune.

Un consumator poate să producă el însuși goluri de tensiune în propria instalație în absența oricărei perturbații din rețeaua de alimentare. Aceste goluri de tensiune se produc ca urmare a apariției uneia dintre următoarele cauze:

- Scurtcircuite în rețeaua internă.
- Funcționarea unor instalații ce au un curent mare la pornire.
- Exploatarea unor instalații cu sarcină fluctuantă.

Un gol de tensiune este caracterizat cantitativ de trei mărimi, și anume amplitudine, durată și frecvență de apariție, care se observă în figura 15.5.

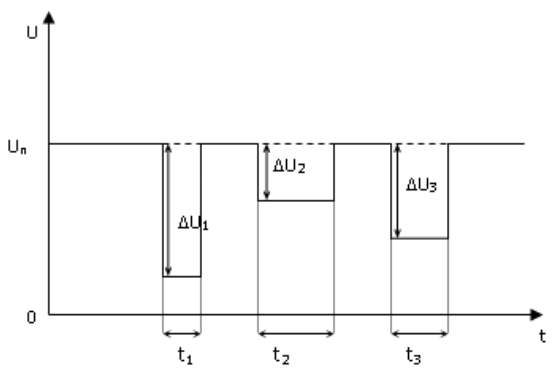


Figura 15.5. Goluri de tensiune

15.3. Impactul asupra mediului

Instalațiile electrice, respectiv receptoarele electrice pot afecta mediul înconjurător (flora, fauna, societatea umană) prin poluarea apei, a aerului, a solului, fonică și luminoasă.

Poluarea mediului apare din cauza materialelor folosite, cât și a procesului tehnologic. Figura 15.6 ilustrează modul în care utilizarea energiei afectează mediul.

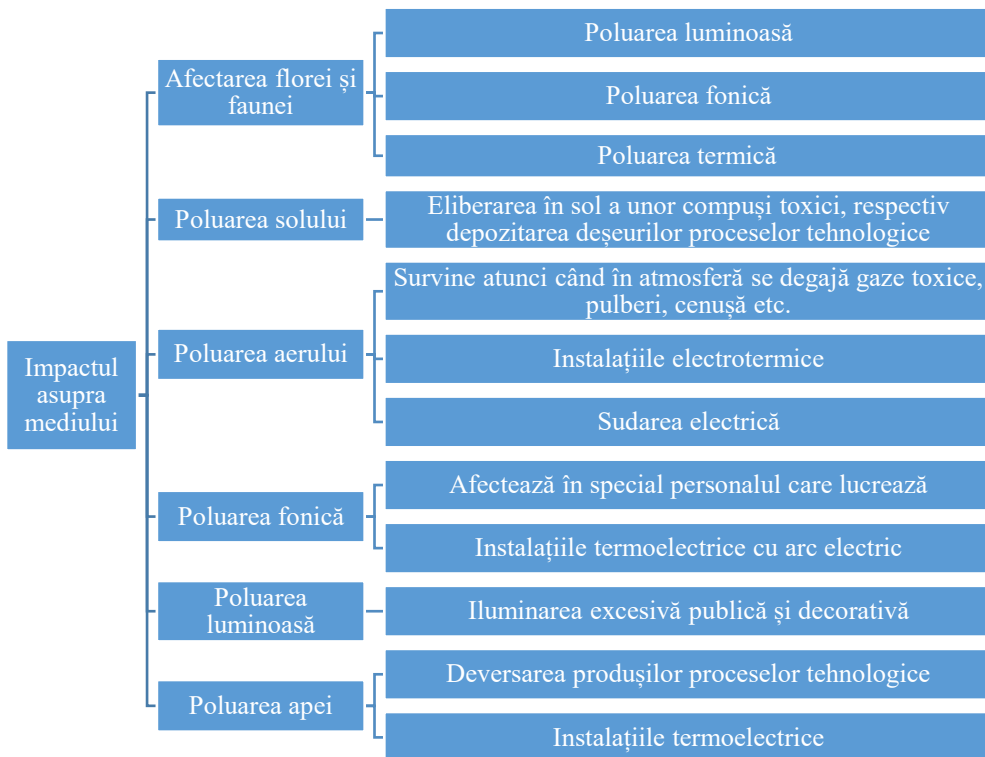


Figura 15.6. Impactul receptoarelor electrice asupra mediului

Materialele specializate (semiconductori, gaze, precum și mercurul) în tot procesul tehnologic, adică extracția, procesarea și eliminarea produc poluare și deșeuri toxice.

Construcția necorespunzătoare a receptoarelor electrice afectează indirect mediul, prin faptul că deteriorarea prematură cauzează înlocuirea timpurie, și deci irosirea materiei prime, și a resurselor de energie. Aceste pierderi semnifică un consum mai mare de energie, care dacă provine de la arderea coombustibililor

fosili, înseamnă mai multe emisii de CO₂. Mai mult, defectiunile și reparațiile frecvente înseamnă mai multe materiale utilizate pentru piese de schimb și întreținere, în consecință un impact industrial mai mare.

15.4.Utilizarea eficientă a energiei electrice

Măsurile care pot fi luate pentru a utiliza eficient energia sunt:

- Reducerea consumului de energie electrică – această măsură se poate realiza prin promovarea aparatelor electrocasnice eficiente energetic (iluminat LED, dispozitive din clasa A+++), utilizarea contoarelor inteligente și a sistemelor de gestionare a energiei pentru monitorizarea și controlul consumului, încurajarea schimbărilor comportamentale (campanii de conștientizare, stimulente pentru un consum redus), implementarea managementului axat pe cerere (Demand Side Management) și mutarea sarcinilor în afara orelor de vârf, utilizarea automatizării în clădiri (HVAC inteligent, controlul iluminatului, senzori de ocupare).
- Stocarea energiei – se poate realiza prin următoarele acțiuni: dezvoltarea stocării prin baterii la scară de rețea (Li-ion, baterii cu flux), integrarea stocării hidroelectrice prin pompare acolo unde este posibil, utilizarea stocării termice (stocarea gheții pentru răcire, săruri topite pentru centrale solare), încurajarea stocării descentralizate (baterii casnice, sisteme de conectare a vehiculelor electrice la rețea (V2G)).
- Reducerea pierderilor de energie prin transport - modernizarea liniile de transport cu linii de înaltă tensiune și pierderi reduse (de exemplu, HVDC), utilizarea cabluri supraconductoare acolo unde este posibil pentru nodurile critice, optimizarea rețeaua cu rețele inteligente și monitorizare în timp real pentru a minimiza pierderile și plasarea sursele de generare mai aproape de sarcini (generare distribuită).
- Dezvoltarea unor tehnici avansate de producere și utilizare a energiei electrice - extinderea energiei regenerabile (solară, eoliană, hidroelectrică de mică putere, geotermală), dezvoltarea sistemelor de cogenerare (CHP) care utilizează căldura reziduală, îmbunătățirea electronicii de putere pentru o mai bună integrare și control, investiții în rețele inteligente pentru o mai bună echilibrare a sarcinii, auto-reparare și reziliență, și cercetarea

tehnologiilor emergente: fuziune, energie nucleară de generație următoare, bioenergie avansată.

Managementul inteligent în industrie, care este de altfel componenta societății umane care utilizează cea mai mare pondere a energiei electrice prin reducerea pierderilor și utilizarea variantelor optime energetice în procesul tehnologic. Astfel, în industrie se recomandă:

1. Adoptarea unor tehnologii și echipamente tehnologice avansate cu randamente superioare.
2. Folosirea unor programe de recuperare a pierderilor de energie (căldura din gaze ale cuptoarelor, apa fierbinte etc.).
3. Mărirea eficienței prin producerea combinată a energiei electrice și termice
4. Îmbunătățirea izolației clădirilor sociale și industriale – reducerea pierderilor.
5. Organizarea corespunzătoare a consumului de către agenții casnici.
6. Economisirea resurselor ne-regenerabile.
7. Utilizarea surselor regenerabile pentru producerea energiei electrice.
8. Economia de energie în toate etapele producerii, transportului, distribuție și utilizării energiei electrice.

15.5. Bibliografie

- [1]. Raport privind starea mediului în România, Ministerul mediului, România.
- [2]. Marilena Ungureanu, Mircea Chindriș, Ioan Lungu, *Utilizări ale energiei electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1998.

15.6. Autoevaluare

1) Regimul deformant de funcționare:

Este permanent / este caracterizat prin interarmonici și armonici / determină funcționarea mai bună a componentelor electronice

2) Regimul nesimetric de funcționare:

Poate să fie temporar, transitoriu sau permanent / este cuantificat prin factorul de nesimetrie totală / produce încălzirea suplimentară a motoarelor electrice

3) Instalațiile electrotermice pot să determine:

Poluarea apei / poluarea aerului / poluarea luminoasă / poluarea fonică

4) Poluarea este în principal cauzată de tipul materialelor supuse procesului tehnologic

Adevărat / Fals

16

Metode pentru prevenirea pericolului de accidente prin electrocutare

16.1.Introducere

Metodele pentru prevenirea pericolului de accidente prin electrocutare se împart în două mari categorii, și anume metode pentru prevenirea electrocutării prin atingere directă, respectiv prin atingere indirectă.

Atingerea directă se referă la electrocutare (trecerea curentului electric prin om, atunci când este supus la o diferență de potențial) prin atingerea elementelor active electric ale unei instalații, precum conductoarele unei înfășurări, liniile electrice, secundarul unui transformator etc.

Atingerea indirectă este termenul folosit pentru a defini electrocutarea în condițiile intrării în contact cu elemente pasive conductive ale unei instalații, care în urma unui defect au ajuns sub tensiune. Exemple de astfel de situații sunt - punerea defectuoasă sub tensiune a carcasei metalice de protecție a unui dispozitiv, sau deteriorarea izolației unui conductor electric.

Aceste două evenimente, atingerea directă și indirectă, trebuie evitate și prevenite întrucât energia electrică este periculoasă pentru om, iar electrocutarea poate avea efecte fatale. În acest sens, limitele parametrilor energiei electrice în ceea ce privește siguranța omului sunt următoarele:

- Tensiunea electrică – tensiunea de atingere (diferența de potențial la care este supus corpul uman) este un factor critic. Valoarea considerată nepericuloasă este sub 50 V la tensiune alternativă (sau 120 V la tensiune continuă). Standardele dedicate consideră aceste valori sigure pentru pielea uscată în condiții normale. Peste aceste valori, riscul de accident prin electrocutare cu efecte dăunătoare crește. În consecință, sunt necesare măsuri speciale de protecție. Trebuie specificat că pielea umedă scade

semnificativ limitele de tensiune de atingere sigură, la o valoare de până la 25 V în tensiune alternativă (limită de siguranță în condiții de umiditate).

- Curentul electric – gravitatea impactului electrocutării depinde în principal de valoarea curentului electric care trece prin corp, ci nu doar de valoarea tensiunii de atingere. Impactul electrocutării în funcție de valoarea efectivă a curentului electric în varianta alternativă (c.a.) este următorul:
 - 0,5 – 1 mA – este gradul de percepție.
 - 1 – 5 mA – provoacă furnicături ușoare.
 - 5 – 10 mA – este sub pragul de nedesprindere (cel electrocutat poate să rupă contactul cu zona aflată sub tensiune).
 - 10 – 30 mA – apar contracții musculare, iar desprinderea de locul aflat sub tensiune este dificilă și aproape imposibilă.
 - 30-50 mA – în funcție de traseul curentului electric prin om, poate apărea paralizia respiratorie.
 - Mai mare de 50 mA – în funcție de traseul curentului electric prin om, poate apărea fibrilație ventriculară (este afectat muschiul inimii).
 - Mai mare de 100 mA – dacă traseul curentului electric este prin zona inimii, atunci există posibilitatea mare de a apărea efecte cardiace fatale.

Pentru curent continuu, pragurile sunt puțin mai mari (electrocutarea în curent continuu este în general mai puțin periculoasă decât electrocutarea în curentul alternativ la același valoare a curentului).

- Timpul – Pericolul crește dramatic odată cu durata evenimentului electrocutării. Pragul de fibrilație ventriculară la un curent electric 30 mA timp de 500 ms poate fi fatal, la fel și pentru un curent de 100 mA timp de 100 ms. În consecință, dispozitivele de protecție sunt proiectate să deconecteze în 30–300 ms.
- Energia – cantitatea de energie furnizată prin electrocutare trebuie luată în considerare pentru arsuri și leziuni interne. În cazul unui eveniment tipic de electrocutare, unde cantitatea de energie este scăzută, contează foarte mult traseul curentului, care dacă este prin inimă, poate cauza decesul. În situația unei electrocutări printr-o defecțiune unde este implicată o cantitatea mare de energie (cum ar fi arcul electric), aceasta prezintă în plus pericole termice.
- Rezistența electrică echivalentă a corpului uman – rezistența electrică totală pe care o întâlnește curentul electric atunci când trece printr-o

persoană (de exemplu, de la o mână la alta sau de la o mână la picior). În consecință, aceasta nu este constantă, ci depinde de starea pielii (uscată, umedă, rănită), suprafața de contact, presiunea de contact, traseul prin corp, frecvența și tensiunea. Valoarea rezistenței totale se determină ca suma dintre rezistența pielii și rezistența internă a corpului. Ultima valoare este în general constantă și ia valori între 300 și 500 Ω . Rezistența pielii are valori mai variate. Astfel, rezistența pielii uscate este între 1k Ω și 100 k Ω , rezistența celei umede între 300 Ω și 1 k Ω , iar rezistența pielii vătămate ia valori mult sub acestea. Din acest punct de vedere, cel mai periculos traseu a curentului electric în caz de electrocutare este mână – mână, iar cel mai puțin periculos este deget – cot.

În continuare se prezintă metodele pentru prevenirea pericolului de accident prin electrocutare, care a survenit în urma evenimentelor de atingere directă, respectiv atingere indirectă.

16.2. Metode de prevenire a atingerilor directe

Protecția împotriva atingerii directe trebuie să fie fiabilă în timpul funcționării normale, iar pentru defecțiuni, este nevoie de măsuri suplimentare de protecție pentru prevenirea atingerii indirecte, care este tema următoarei secțiuni a acestui capitol.

Metodele de prevenire a atingerilor directe sunt: izolația părților sub tensiune, folosirea barierei și a carcaselor, amplasarea în zone greu accesibile, utilizarea tensiunilor de alimentare foarte joase, folosirea obstacolelor, izolația suplimentară și etichete și instrucțiuni de utilizare.

Izolația părților active ale instalațiilor și dispozitivelor electrice aflate în mod uzual sub tensiune este o metodă principală de prevenire a accidentelor prin electrocutare – atingere directă. Această metodă presupune acoperirea tuturor conductoarelor sub tensiune cu o izolație durabilă, care trebuie să reziste la solicitări mecanice, termice și de mediu. Astfel, la conductoarele electrice este izolația PVC (figura 16.1), iar la uneltele dedicate muncii la instalații electrice este carcasa din plastic turnat. La unele cabluri, izolația cuprinde și ecrane pentru a preveni interferențe electromagnetice.



Figura 16.1. Izolația cablurilor electrice

Abordarea prin utilizarea barierelor și carcaselor presupune amplasarea părțile sub tensiune în interiorul unei carcasei sau în spatele barierelor care previn contactul accidental. În aceste situații, deschiderile trebuie să fie suficient de mici pentru a împiedica un deget sau o unealtă să ajungă la părțile sub tensiune. Exemple din această categorie de metode sunt panouri de distribuție, cutii de joncțiune cu capace, dulapuri încuiate.

Amplasarea în zone greu accesibile este o soluție prin care părțile aflate sub tensiune sunt poziționate în zone unde oamenii nu le pot atinge în mod normal. Figura 16.2. ilustrează un post de transformare poziționat pe stâlp.



Figura 16.2. Post de transformare poziționat la înălțime

O altă abordare folosită în unele țări este utilizarea tensiunii extra-joase, care implică utilizarea unor circuite de siguranță cu tensiune foarte joasă (≤ 50 V tensiune alternativă sau ≤ 120 V tensiune continuă), astfel încât contactul să nu provoace un curent electric periculos. În acest sens, transformatoarele sau sursele de alimentare izolate sunt utilizate pentru a limita tensiunea.

Obstacolele fizice care descurajează sau împiedică atingerea neintenționată, este o altă metodă de prevenire a electrocutării prin atingere directă. De exemplu, folosirea de balustrade, ecrane, bariere care nu închid complet, dar limitează accesul. Aceasta este o măsură de bază, de obicei combinată cu supravegherea sau accesul restricționat. Figura 16.3. ilustrează o astfel de situație.



Figura 16.3. Metodă de protecție și atenționare – pericol de electrocutare

Izolația suplimentară, precum izolația dublă sau ranforsată pentru unelte manuale sau aparate portabile. Acest tip de izolație oferă protecție chiar dacă izolația de bază nu funcționează, deoarece izolația suplimentară este o izolație independentă aplicată pe lângă izolația de bază pentru a oferi protecție în cazul în care izolația de bază se defectează. Deci, izolația suplimentară trebuie să fie separată fizic de izolația de bază, iar ea trebuie să fie suficient de robustă pentru a rezista la solicitări mecanice, căldură, umiditate. Izolația suplimentară trebuie testată pentru rezistență dielectrică, care să fie mai mare decât izolația de bază singură.

Etichetarea și folosirea instrucțiunilor de avertizare este o altă abordare. Deoarece, deși nu reprezintă o barieră fizică, etichetarea și instrucțiunile clare ajută la prevenirea deschiderii accidentale sau a contactului cu piesele sub tensiune.

În concluzie, pentru prevenirea electrocutării prin atingerea directă, se folosesc metode de protecție de bază.

16.3. Metode de prevenirea atingerilor indirecte

Prevenirea electrocutării prin atingere indirectă presupun următoarele abordări:

1. Împământare de protecție – este o metodă principală, care constă în conectarea tuturor părților metalice expuse la pământ (masă). În consecință, dacă un defect pune carcasa sub tensiune, curentul de defect curge către pământ, creând o cale de scurtcircuit. Mai mult, acest curent de defect ridicat declanșează siguranțele sau întrerupătoarele de circuit pentru a deconecta rapid alimentarea. Schemele de legare la pământ TN, TT și IT sunt proiectate având în vedere acest lucru.
2. Deconectarea automată a alimentării – este o abordare care presupune combinarea cu protecții prin legare la pământ. În cazul unui defect, dispozitivul de protecție trebuie să deconecteze circuitul într-un timp specificat. De exemplu, în sistemele TN, o siguranță sau un întrerupător automat ar trebui să se declanșeze în 0,4 secunde pentru circuitele finale ≤ 32 A. Condiția de funcționare este ca impedanța buclei de defect trebuie să fie suficient de mică pentru a asigura suficient curent de defect pentru a declanșa întrerupătorul. Figura 16.4. ilustrează un tablou electric cu aparatură de protecției.

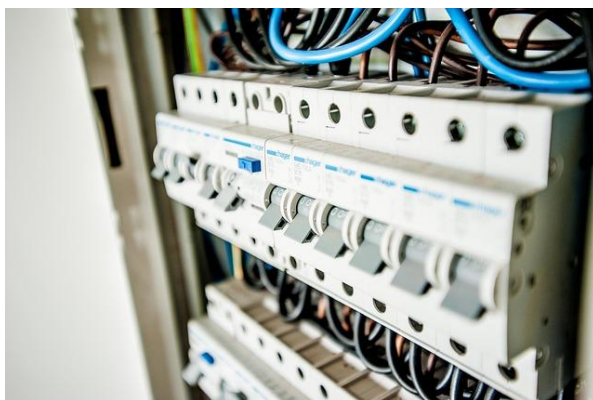


Figura 16.4. Aparatură de protecție în tablou electric

3. Dispozitivele de curent rezidual / Întrerupătoarele de circuit de defect la masă - primele detectează dezechilibrul dintre conductoarele de fază și cele neutre, iar dacă există scurgeri de curent (de exemplu, printr-o persoană la pământ), acestea declanșează. Curentul nominal de declanșare este 30mA

pentru protecție personală. În cazul schemelor de protecție TT este esențial ca impedanța buclei de împământare să fie mare.

4. Conexiunea echipotențială – presupune conectarea tuturor părților conductoare expuse din instalație împreună, într-un nod comun. Astfel, se asigură că nu apare nicio diferență de potențial periculoasă între părțile pe care o persoană le-ar putea atinge simultan. Această abordare este o abordare tipică pentru băi, bucătării, țevi metalice, HVAC.
5. Izolația dublă sau ranforsată (echipamente clasa II) - dacă împământarea de protecție este impracticabilă, se utilizează aparate cu izolație dublă. Iar, dacă izolația de bază nu funcționează, izolația suplimentară împiedică carcasa să intre sub tensiune. În consecință, nu există părți conductoare expuse care pot deveni sub tensiune.
6. Separarea electrică suplimentară – implică folosirea unui transformator de izolare pentru a alimenta un singur dispozitiv. În situația în care există un singur circuit de ieșire izolat de pământ, un singur defect nu va provoca un șoc periculos. Această abordare este adesea utilizată pentru unelte portabile pe șantierele de construcții.
7. Utilizarea tensiunilor foarte joase sau joase – această abordare se mai numește și alimentarea la tensiune foarte joasă de siguranță, prin care sistemul electric protejat este atât limitat în tensiune, cât și izolat față de pământ. În consecință, chiar dacă apare o defecțiune, tensiunea este atât de mică încât riscul de electrocutare este minim. Dacă se utilizează tensiuni joase, funcționarea este similară situației de alimentare la tensiuni foarte joase, dar circuitul poate fi legat la pământ.

Împământarea de protecție combinată cu deconectarea automată a alimentării este cea mai importantă metodă pentru prevenirea atingerii indirecte. Astfel, în continuare se vor prezenta în amănunt aceste metode de protecție.

16.3.1. Împământarea de protecție

Împământarea de protecție presupune ca toate părțile conductoare expuse (carcase metalice, rame) sunt conectate la pământ printr-un conductor de împământare (PE). Astfel, dacă apare un defect (de exemplu un conductor activ sub tensiune care atinge carcasa metalică), curentul de defect, care apare în situația atingerii carcasei de către o persoană, curge către pământ prin conductorul PE, nu prin persoană (procentul curentului electric care trece prin om nu are o valoare periculoasă). Comparativ, fără împământare carcasa metalică

rămâne sub tensiune, iar persoana care o atinge completează circuitul înspre pământ, și astfel apare electrocutarea periculoasă. Deci, cu împământare, carcasa este legată la PE, iar calea curentului de defect va fi cea cu impedanța mai mică, iar curent de defect mare va alege această cale care poate însemna închiderea circuitului prin priza de pământ de protecție sau prin protecția la supracurent, care se declanșează și întrerupere alimentarea.

Schemele de protecție de împământare sunt TN, TT și IT.

Schema TN

Semnificația literelor este următoarea: T - conectare directă a punctului neutru al alimentării la pământ (de exemplu, punctul stea al transformatorului este legat la pământ); N - părțile conductive expuse, sunt conectate la aceeași împământare, dar printr-un conductor PE (nulul de protecție).

Subtipuri ale acestei scheme sunt:

- TN-S - Conductori PE și N (nulul de lucru) sunt separați pe toată suprafața instalației protejate.
- TN-C - Conductorul PEN combinat (nul de lucru și cel de protecție combinate).
- TN-C-S - Conductorul PEN combinat de la transformator, iar apoi separat pentru a fi diferență între PE și N în interiorul instalației.

Această schemă de protecție funcționează astfel: la apariția unui defect și a tensiunii pe carcasa metalică, și apoi a unui curent de defect ridicat, acesta curge prin PE, se întoarce prin N și ajunge la întrerupătorul automat care se declanșează rapid. Principiu de funcționarea a acestei scheme de protecție este sintetizat în figura 16.5.

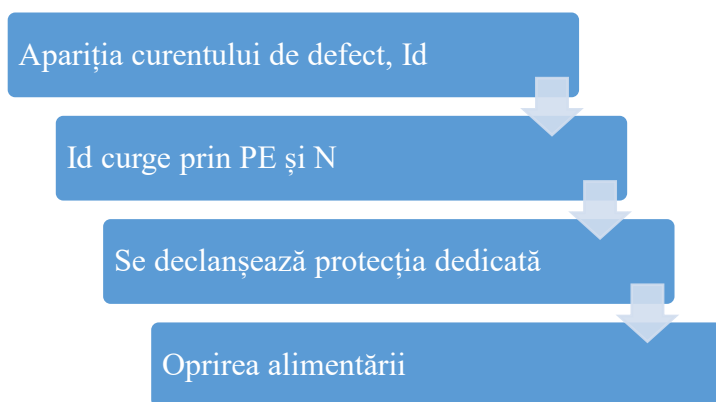


Figura 16.5. Principiu de funcționare a schemei de protecție TN

Această schemă de protecție este principala metodă în cazul consumatorilor casnici, și a instalațiilor în care protecția prin legarea direct la pământ nu este posibilă.

Schema TT

În cazul acestei scheme de protecție, literele TT, au următoarea semnificație:

- T - punctul neutru al alimentării este legat la pământ.
- T - părți conductoare expuse ale instalației / dispozitivului sunt legate la pământ, în mod local printr-un electrod de împământare / priză de pământ.

Principiul de funcționare în cazul acestei scheme de protecție se bazează pe impedanța redusă a prizei de pământ, care va fi calea de scurgere a curentului de defect. În cazul receptoarelor de putere mare, pe această cale de scurgere la pământ se instalează aparatură dedicată de protecție, care va opri alimentarea circuitului defect în cel mai scurt timp.

Această schemă de protecție este principala metodă de protecție în instalațiile unde este posibilă conectarea locală la pământ a receptoarelor electrice.

Schema IT

Semnificația literelor folosite în schema IT este următoarea:

- I - nulul alimentării este izolat de pământ (sau legat la pământ printr-o impedanță ridicată).
- T - componentele conductive expuse sunt legate la pământ local.

Aspectul cheie a acestei scheme este faptul că primul defect (un defect de izolație) nu provoacă curent periculos, iar alimentarea rămâne activă. Dar, un al doilea defect înseamnă deconectare obligatorie.

Această schemă de protecție este adesea utilizat în spitale, mine sau unde continuitatea în alimentarea cu energie electrică este critică.

În cadrul acestei scheme de împământare, se folosesc dispozitive de monitorizare a izolației, care detectează primul defect, iar apoi protecția la defect trebuie proiectată pentru a gestiona al doilea defect.

16.3.2. Aparat de protecție

Legarea la pământ singură nu oprește curgerea curentului electric. Aparatele de protecție au rolul ca atunci când apare un defect, ele să deconecteze alimentarea suficient de rapid pentru a menține tensiunea de atingere

nepericuloasă. Dispozitive de protecție sunt siguranțele, întrerupătoare de circuit automate și aparatele pentru protecție suplimentară. Timpul de deconectare necesar specifică timpii maximi de deconectare, care pentru circuitele finale $\leq 32A$ în cazul schemelor TN / TT este de 0,4 s (400 ms). Pentru circuitele de distribuție, acest timp poate să ajungă până la 5 s. Acest lucru asigură că tensiunea de defect să nu persiste suficient de mult timp pentru a dăuna unei persoane.

Dispozitivele pentru deconecarea automată a alimentării (siguranțe fuzibile și întrerupătoare automate) au rolul ca la apariția unei defecțiuni, să întrerupă automat alimentarea suficient de repede pentru a preveni persistența tensiunilor de atingere periculoase.

Un întrerupător diferențial detectează diferența dintre curentul din conductoarele de fază și cel neutru. Dacă tot curentul iese prin fază și se întoarce prin neutru, înseamnă că nu este nicio problemă. Dacă o parte din curent se scurge în altă parte (de exemplu, printr-o persoană la pământ), ceea ce înseamnă că există un dezechilibru, acesta declanșează circuitul. Avantajul acestor dispozitive este faptul că ele detectează curenți de scurgere mici pe care siguranțele și întrerupătoarele automate nu îi pot detecta.

16.4. Bibliografie

- [1]. Anca Miron, Andrei C. Cziker, *Utilizări ale Energiei Electrice. Suport pentru laborator*, UTPRESS, 2018.
- [2]. IEC “Electrical Installation Guide” by Schneider Electric.
- [3]. “Basic Protection and Fault Protection”.

16.5. Autoevaluare

1. Valoarea efectivă a curentul alternativ maxim admisibil în este de 50 mA.
Adevărat / Fals.
2. Valoarea tensiunii de atingere considerată periculoasă este 120 V.
Adevărat / Fals.
3. Rezistența electrică a omului are două componente, și anume rezistența pielii și rezistența internă.

Adevărat / Fals.

4. Protecția prin legare la pământ în rețele cu nulul izolat, se folosește pentru instalațiile unde continuitatea în alimentare este importantă.

Adevărat / Fals.

5. Protecția prin legare la nul este principala metodă de protecție la consumatorii casnici.

Adevărat / Fals.

Anexe

Anexa 1. Legile radiației termice

Legile radiației termice descriu relația dintre temperatura unui obiect și intensitatea și distribuția radiației electromagnetice pe care o emite acesta datorită temperaturii lui. Două legi principale guvernează relația menționată, și anume legea Stefan-Boltzmann și legea lui Kirchhoff a radiației termice.

Legea lui Stefan-Boltzmann

Această lege afirmă că energia termică radiantă totală emisă de o suprafață este proporțională cu puterea a patra a temperaturii sale absolute. În consecință, un obiect mai fierbinte emite mai multe radiații și la lungimi de undă mai scurte. Legea este adesea exprimată prin relația (A1.1), care însă se aplică doar corpurilor negre (obiecte teoretice care absorb toată radiația termică incidentă, care ajunge pe suprafața lui).

$$E = \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (\text{A1.1})$$

unde E este excitanța radiantă (energia emisă pe unitatea de suprafață pe unitatea de timp), $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$ este constanta lui Stefan-Boltzmann, iar T [K] este temperatura absolută.

Pentru un corp real, relația devine:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (\text{A1.2})$$

unde ε este emisivitatea suprafeței emițătoare, care are valori între 0 și 1, deci pentru corpul negru $\varepsilon = 1$.

Pentru a determina puterea emisă de un corp real se folosește relația:

$$P = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W]} \quad (\text{A1.3})$$

unde A este aria suprafeței corpului emițătorului.

În situația în care este necesară determinarea puterii emise de o sursă, ca diferența dintre două stări caracterizate de temperaturi diferite, se folosește relația:

$$P = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \text{ [W]} \quad (\text{A1.4})$$

unde T_1 este temperatura mai scăzută, iar T_2 este temperatura mai ridicată.

Legea lui Kirchhoff a radiației termice

Această lege afirmă că pentru un corp în echilibru termic, raportul dintre emisivitatea sa (capacitatea de a emite radiații) și absorbția sa (capacitatea de a absorbi radiațiile) este egal cu emisivitatea unui corp negru la aceea temperatură. Cu alte cuvinte, un bun absorbant de radiații la o anumită lungime de undă este, de asemenea, un bun emițător la aceea lungime de undă. Această lege se poate descrie matematic prin relația (A1.5).

$$\varepsilon(\lambda, T) = \sigma(\lambda, T) \quad (\text{A1.5})$$

unde λ este lungimea de undă, T este temperatura, ε este emisivitatea, iar σ este absorbtivitatea.

Legea deplasării lui Wien

Această lege leagă temperatura unui corp negru de lungimea de undă la care emite cea mai mare cantitate de radiație. Pe măsură ce temperatura unui corp negru crește, lungimea de undă maximă a radiației emise se deplasează către lungimi de undă mai scurte (spre capătul albastru al spectrului). Din această lege se poate deduce și faptul că obiectele care au temperature mai reduse, precum corpul uman emit radiații în spectrul infraroșu.

Legea lui Planck

Această lege descrie distribuția radiației electromagnetice emise de un corp negru în funcție de lungimea de undă și temperatură. Este o lege fundamentală din care pot fi derivate legile de deplasare ale lui Stefan-Boltzmann și Wien. Relația matematică a legii lui Planck este:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T k_B}} - 1} \quad (\text{A1.6})$$

unde $B(\lambda, T)$ este radinața spectrală [$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^3)$], λ este lungimea de undă [m], T este temperatura absolută [K], $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [$(\text{m}^2 \text{ kg})/\text{s}$] – constanta lui Planck, $c = 3 \cdot 10^8$ [m/s] – viteza luminii, iar $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$ [J/K] este constanta lui Boltzmann.

În concluzie, legea lui Stefan-Boltzmann descrie energia totală emisă, legea lui Kirchhoff leagă emisia și absorbția, legea deplasării lui Wien leagă temperatura de lungimea de undă maximă, iar legea lui Planck oferă distribuția completă a radiației emise.

Anexa 2. Teoria lui Planck

Teoria lui Planck introduce ideea că energia se poate cuantifica, și anume: radiația electromagnetică este emisă sau absorbită în pachete discrete de energie, denumite cuante sau fotoni. Energia fiecărui foton este dată de relația matematică:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} [J] \quad (A1.1)$$

unde E este energia fotonului, h este constanta lui Planck, c este viteza luminii, iar λ – lungimea de undă.

Prin această teorie s-a revoluționat înțelegerea asupra luminii și a undelor electromagnetice. Într-adevăr, această lege a pus bazele conceptului de dualitate undă-particulă, care sugerează că lumina și alte forme de radiație electromagnetică prezintă caracteristici atât ale undelor, cât și ale particulelor.

Un alt aspect important a teoriei lui Planck este faptul că aceasta a rezolvat „catastrofa ultravioletă”, o discrepanță între fizica clasică și observațiile experimentale ale radiației corpului negru. Teoria clasică a prezis o cantitate infinită de energie la frecvențe înalte, în timp ce teoria lui Planck a prezis corect o cantitate finită.

În luminotehnică, teoria lui Planck este esențială în dezvoltarea și construcția diferitelor surse de lumină, în special LED-urile, deoarece prin relația amintită se poate determina lungimea de undă a surselor de lumină în funcție de energia produsă și de materialul folosit.

Anexa 3. Descărcările electrice

În fizica descărcărilor gazoase, în special atunci când se lucrează cu gaze ionizate și conducție electrică prin gaze, tipurile de descărcări electrice sunt clasificate în funcție de curent, tensiune, presiune și fenomenele fizice implicate.

Descărcarea electrică cu fluxul cel mai redus de electroni, adică valoarea cea mai mică a curentului este descărcarea Townsend. Aceasta apare fără a produce o lumină vizibilă, electronii liberi sunt accelerați de un câmp electric slab, ionizează moleculele de gaz prin coliziuni; curentul și tensiunea sunt scăzute. Acest tip de descărcare este auto-susținută doar în anumite condiții (feedback prin ioni pozitivi sau fotoni).

Descărcarea luminiscentă este caracterizată printr-un nivel mediu al curentului, presiune scăzută și strălucire, care apare în anumite regiuni (strălucirea catodului, spațiul întunecat Faraday etc.). Mecanismul acestei descărcări este ionizarea susținută care duce la o strălucire vizibilă în gaz. Acest tip de descărcare apare în lămpile electrice care se folosesc în reclame neon, afișaje cu plasmă și instrumente analitice. Descărcarea luminiscentă poate avea o strălucire normală (curentul crește, dar tensiunea rămâne constantă) sau strălucire anormală (tensiunea crește odată cu creșterea curentului, pe măsură ce este utilizat întregul catod).

Descărcarea cu arc electric are o valoare ridicată a curentului și o valoare scăzută a tensiunii, mai mult, apare o strălucire puternică și o temperatură ridicată. Mecanismul de formare a acestui tip de descărcare este următorul: se formează plasmă densă permițând curgerea unui curent mare; materialul electrodului se poate vaporiza. Descărcarea cu arc este utilizată în sudură, lămpi și cuptoare.

Descărcarea Corona are loc la tensiune înaltă și câmpuri neuniforme (de exemplu, în jurul marginilor ascuțite), și se caracterizează prin apariția unui zgomot șuierat și strălucire slabă. Mecanismul de formare a descărcării Corona este descompunerea parțială a aerului - ionizarea are loc într-o regiune localizată. Acest tip de descărcare este utilizată în echipamente de înaltă tensiune, generatoare de ozon, precipitatoare electrostatice.

Descărcarea prin scânteie este bruscă și tranzitorie; caracteristicile cheie sunt sunet puternic și bliț luminos. Mecanismul de producere a acestui tip de descărcare este ionizarea rapidă care duce la descompunere și la un impuls de

curent mare de scurtă durată. Acest tip de descărcare este utilizată în bujii, fulgere și generatoare de impulsuri.

Descărcare prin barieră dielectrică are ca atribut principal plasma netermică, ea fiind produsă când electrozii sunt separați de un dielectric, iar între ei apar microdescărcări. Această descărcare este folosită în televizoare cu plasmă, producția de ozon, tratarea suprafețelor.

Descărcarea streamer este etapa intermediară între coroană și scânteie; ea este observată în inițierea fulgerului și sistemele de alimentare pulsată. Fenomenul descărcării streamer se explică printr-un front de ionizare cu expansiune rapidă în câmpuri electrice puternice.

Legătura dintre curent și tensiune pentru diferite tipuri descărcări electrice este ilustrată în figura A3.1.

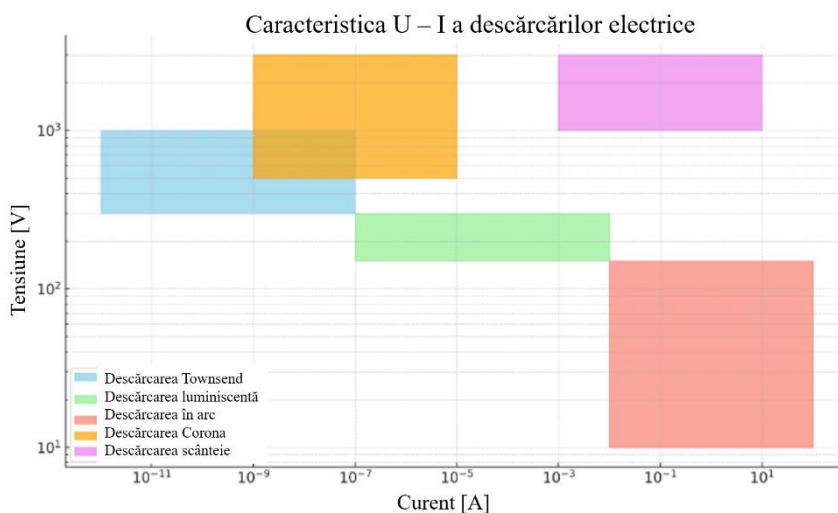


Figura A3.1. Legătura curent-tensiune în cazul descărcărilor electrice

Anexa 4. Stabilizarea descărcărilor electrice

Stabilizarea descărcării electrice este crucială în circuitele care implică stocare capacitivă, echipamente de înaltă tensiune sau aplicații de putere pulsată.

Există mai multe circuite de stabilizare a descărcărilor electrice, mai mult sau mai puțin complexe.

Cel mai simplu circuit este prin utilizarea unui **rezistor**. În cadrul acestui circuit, unde rezistorul este înseriată cu descărcarea electrică, acesta limitează curentul și disipă energia sub formă de căldură. Acesta încetinește descărcarea prin opunerea rezistenței la trecerea curentului.

În cazul lămpilor electrice, utilizarea unui rezistor pentru stabilizarea unei descărcări electrice, cum ar fi o descărcare luminescentă într-un gaz, ajută la prevenirea tranziției descărcării către o formă mai instabilă, cum ar fi un arc. Prin limitarea fluxului de curent, rezistorul reduce energia disponibilă pentru creșterea descărcării, făcând-o mai stabilă și prevenind un comportament neregulat. Un rezistor plasat în serie cu calea de descărcare limitează cantitatea de curent care poate curge prin circuit. Acest lucru previne supratensiunile bruște de curent care ar putea destabiliza descărcarea. Prin limitarea curentului, rezistorul controlează și tensiunea pe spațiul de descărcare, ajutând la menținerea descărcării într-o stare stabilă, dorită. În unele cazuri, rezistorul ajută la prevenirea tranziției descărcării de la o stare de energie mai mică, cum ar fi o descărcare luminescentă, la o stare de energie mai mare, cum ar fi un arc, care este mai instabilă și potențial dăunătoare. Figura A4.1. este ilustrată caracteristica tensiune-curent în cadrul unui tub fluorescent.

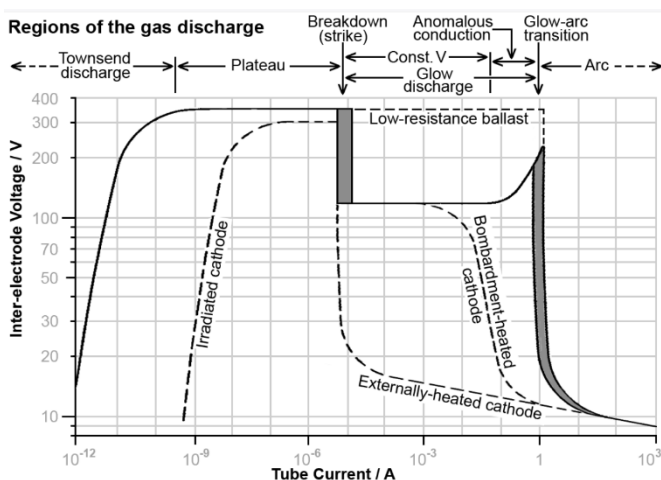


Figura A4.1. Caracteristica tensiune-curent a unui tub fluorescent [1]

O **bobină** se opune variațiilor de curent, astfel încetinește rata cu care curentul crește sau scade, dar nu disipă energie.

Utilizarea unei bobine pentru stabilizarea unei descărcări electrice într-un circuit de alimentare a unei lămpi, limitează cantitatea de curent, prevenind încălzirea excesivă sau deteriorarea. Bobinele se opun schimbărilor de curent, netezind eficient impulsurile de curent într-un circuit de descărcare. Acest lucru ajută la menținerea unui arc sau a unei străluciri stabile și constante, crucial pentru aplicații precum iluminatul.

Limitarea curentului se realizează astfel - bobinele limitează în mod inerent rata de schimbare a curentului prin stocarea energiei în câmpul lor magnetic și eliberarea acesteia atunci când fluxul de curent se modifică. Prin rezistența la fluctuațiile rapide de curent, bobinele ajută la menținerea unei descărcări stabile. Acest lucru este important pentru aplicații precum lămpile de descărcare, unde este necesar un arc stabil pentru o funcționare corectă. În unele cazuri, inductorii (bobinele) sunt utilizați pentru a proteja dispozitivul de descărcare sau restul circuitului de deteriorarea cauzată de curentul excesiv.

Când este inițiată o descărcare, poate apărea o supratensiune mare de curent din cauza aplicării bruște a tensiunii. Un inductor încetinește această supratensiune inițială, prevenind potențialele daune. Bobinele ajută la netezirea impulsurilor de curent în circuitul de descărcare, reducând natura „pornit-oprit” a curentului și creând o strălucire sau un arc mai stabil. Aceste dispozitive pot stoca energie în câmpul lor magnetic în timpul descărcării, iar această energie stocată poate fi eliberată pentru a ajuta la menținerea descărcării.

Bobinele sunt utilizați în mod obișnuit în lămpile de descărcare, cum ar fi reclamele neon și luminile fluorescente, pentru a menține un arc sau o strălucire stabilă și consistentă. Mai mult, aceste elemente electrice sunt utilizate și în diverse alte dispozitive electrice unde este necesar controlul și stabilitatea curentului, cum ar fi sursele de alimentare și circuitele electronice.

În esență, inductorii joacă un rol crucial în stabilizarea descărcărilor electrice prin limitarea fluctuațiilor de curent, prevenirea deteriorării și asigurarea funcționării consecutive.

Un **circuit L-C**, format dintr-un condensator și o bobină, poate fi utilizat pentru a stabili o descărcare electrică prin crearea de oscilații care previn o descărcare bruscă și necontrolată. Când un condensator încărcat este conectat la o bobină, condensatorul se descarcă, trimițând curent prin inductor. Bobina stochează energie într-un câmp magnetic, iar pe măsură ce condensatorul se descarcă, curentul din bobină se acumulează. În cele din urmă, condensatorul este

complet descărcat, iar energia este stocată în bobină. Cu toate acestea, câmpul magnetic al inductorului se prăbușește, inducând un curent care reîncarcă condensatorul cu polaritate opusă. Acest proces se repetă, creând oscilații între câmpul electric al condensatorului și câmpul magnetic al inductorului.

Circuitul L-C permite o descărcare controlată și oscilatorie în loc de o descărcare bruscă și abruptă. Oscilațiile asigură o eliberare mai graduală și mai uniformă a energiei. Bobina stochează energie în câmpul său magnetic, iar condensatorul stochează energie în câmpul său electric. Acest lucru permite un transfer de energie între cele două componente, creând un model de descărcare ciclică. Schimbul continuu de energie dintre bobină și condensator are ca rezultat oscilații, care pot fi utilizate pentru a modula sau stabiliza descărcarea.

Circuitele L-C sunt utilizate în oscilatoare pentru a genera semnale oscilante, care pot fi utilizate în diverse aplicații. În radio și televiziune, circuitele L-C sunt utilizate pentru a acorda circuitele la frecvențe specifice, asigurându-se că sunt recepționate doar semnalele dorite. Circuitele L-C pot fi utilizate în aplicații de electronică de putere pentru a stabiliza tensiunea și curentul.

În esență, circuitul L-C acționează ca un tampon, prevenind o descărcare bruscă și necontrolată prin crearea unei eliberări controlate, oscilatorii de energie.

Alte circuite folosite pentru stabilizarea descărcării electrice sunt:

- Circuit rezistor – condensator;
- Circuit rezistor-bobină-condensator;
- Circuit resistor-condensator;
- Electronice.

[1] https://www.g3ynh.info/disch_tube/intro.html (Accesat iunie 2025).

Anexa 5. Legea lui Fourier și legea lui Newton

Legea lui Fourier a conducției termice

Legea lui Fourier descrie modul în care energia termică este condusă printr-un material datorită unui gradient de temperatură. Aceasta afirmă că energia termică se transferă din regiunile calde în cele reci, iar rata de transfer a căldurii este proporțională cu gradientul de temperatură și cu conductivitatea termică a materialului.

Forma matematică a acestei legi pentru o singură dimensiune este următoarea:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{A5.1})$$

Unde q este fluxul de căldură, [W/m], k – conductivitatea termică a materialului, [W/(m·K)], $\frac{dT}{dx}$ – gradientul de temperatură, [K/m]. Semnul negativ indică faptul că fluxul de căldură este în direcția descreșterii temperaturii.

Plecând de la ecuația anterioară, se poate obține o variantă a acesteia prin care se determină rata totală de transfer de căldură.

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{A5.2})$$

Unde Q este rata transferului de căldură, [W], A – o arie transversală uniformă.

Această lege se folosește în trei situații:

- 1) Determinarea conducției căldurii prin solide (de exemplu, tije metalice, pereți).
- 2) Proiectarea izolației termice.
- 3) Modelarea conducției termice în stare staționară sau tranzitorie.

Legea răcirii a lui Newton

Legea răcirii a lui Newton descrie modul în care un obiect pierde căldură către mediul înconjurător prin convecție (adică transfer de căldură datorită mișcării fluidelor, cum ar fi aerul sau apa). Legea afirmă că rata pierderii de căldură este proporțională cu diferența de temperatură dintre obiect și mediul său.

Matematic, această lege se exprimă prin următoarea relație matematică:

$$Q = hA(T_s - T_f) \quad (A5.3)$$

Unde Q este rata de transfer de căldură prin convecție, [W], h – coeficientul de transfer termic prin convecție, [W/(m²K)], A - suprafața prin care se pierde căldură [m²], T_s - temperatura suprafeței obiectului, [°C] sau [K], T_f - temperatura fluidului ambiant, [°C] sau [K].

În cazul în care se dorește adaptarea pentru răcire dependentă de timp (formă diferențială) se ia în considerare relația:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_f) \quad (A5.4)$$

Unde T este temperatura obiectului la momentul t , k - constantă în funcție de suprafață, masă, căldură specifică și h .

Prin rezolvarea ecuației anterioare se obține soluția:

$$T(t) = T_f + (T_0 - T_f)e^{-kt} \quad (A5.5)$$

Această relație matematică descrie descreșterea exponențială a temperaturii în timp.

Această lege se folosește în următoarele aplicații:

- Răcirea obiectelor încălzite (de exemplu, răcirea metalului fierbinte în aer).
- Studii HVAC și confort termic.
- Estimarea timpului de răcire a componentelor.
- Proiectarea radiatoarelor și a radiatoarelor.

Anexa 6. Vectorul Poynting și ecuațiile lui Maxwell

Vectorul Poynting \mathbf{S} (figura A6.1) reprezintă puterea pe unitatea de suprafață (W/m^2) transportată de un câmp electromagnetic. Acesta este definit ca:

$$\bar{\mathbf{S}} = \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}} \quad [\text{VA}/\text{m}^2] \quad (\text{A6.1})$$

Unde $\bar{\mathbf{S}}$ este vectorul Poynting, $\bar{\mathbf{E}}$ – intensitatea câmpului electric, $\bar{\mathbf{H}}$ – intensitatea câmpului magnetic.

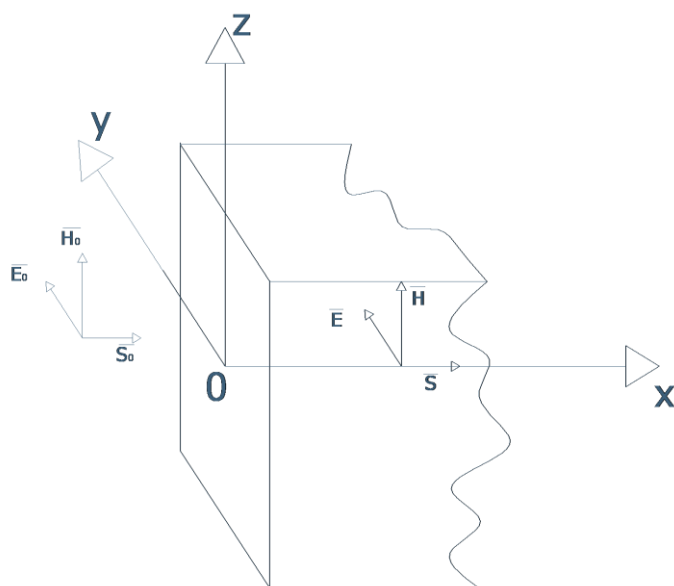


Figura A6.1. Ilustrarea grafică a vectorului Poynting

Direcția vectorului Poynting indică direcția de propagare a energiei, iar magnitudinea vectorului Poynting este rata fluxului de energie pe unitatea de suprafață.

Ecuațiile lui Maxwell în forma generală este:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{J}} + \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{D}}}{\partial t} \right) \\ \text{rot } \bar{\mathbf{E}} = - \frac{\partial \bar{\mathbf{B}}}{\partial t} \\ \text{div } \bar{\mathbf{B}} = 0 \\ \text{div } \bar{\mathbf{E}} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A6.2})$$

În regim permanent sinusoidal, utilizând reprezentarea în complex simplificat a câmpurilor magnetic și electric:

$$\underline{E} = \underline{E} \cdot \underline{H}^* = S_a + jS_r \quad (\text{A6.3})$$

$$\underline{E} = H_0^2 \cdot \frac{\rho}{\delta} \cdot (k_R + jk_X) \text{ [VA/m}^2\text{]} \quad (\text{A6.4})$$

Unde k_R și k_X sunt funcții ale rezistenței, respectiv reactanței interne a piesei.

Puterea absorbită de corp având suprafața A_c este:

$$\underline{S}_c = S_a \cdot A_c + jS_r \cdot A_c = P_c + jQ_c \text{ [VA]} \quad (\text{A6.5})$$

Anexa 7. Exerciții și probleme

1. Determinarea puterii active instalate a unui consumator.

Date de intrare: Un consumator de energie electrică are 3 receptoare (R1, R2 și R3), care se caracterizează prin următoarele puteri: $P_{R1} = 1000 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R1} = 0,8$, $P_{R2} = 1500 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R2} = 0,9$, $P_{R3} = 800 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R3} = 0,6$.

Se cere determinarea puterii active instalate a consumatorului de energie electrică.

2. Determinarea puterii aparente a unui consumator.

Date de intrare: Un consumator de energie electrică are 3 receptoare (R1, R2 și R3), care se caracterizează prin următoarele puteri: $P_{R1} = 1000 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R1} = 0,8$, $P_{R2} = 1500 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R2} = 0,9$, $P_{R3} = 800 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R3} = 0,6$.

Se cere determinarea puterii aparente totale a consumatorului de energie electrică.

3. Determinarea puterii unui consumator la un moment în timp.

Date de intrare: Un consumator de energie electrică a consumat energie electrică într-o lună (30 zile) $E = 980 \text{ kWh}$.

Se cere să se determine care este puterea activă medie a consumatorului de energie electrică.

4. Determinarea factorului de putere și a puterii reactive a unui consumator.

Date de intrare: Un consumator de energie electrică are 3 receptoare (R1, R2 și R3), care se caracterizează prin următoarele puteri: $P_{R1} = 1000 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R1} = 0,8$, $P_{R2} = 1500 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R2} = 0,9$, $P_{R3} = 800 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R3} = 0,6$.

Se cere determinarea puterii reactive și a factorului de putere a consumatorului de energie electrică.

5. Determinarea energiei consumate de către un consumator de energie electrică.

Date de intrare: Un consumator de energie electrică are 3 receptoare (R1, R2 și R3), care se caracterizează prin următoarele puteri: $P_{R1} = 1000 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R1} = 0,8$, $P_{R2} = 1500 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R2} = 0,9$, $P_{R3} = 800 \text{ W}$, $\cos\Phi_{R3} = 0,6$.

Se cere determinarea energiei consumată de consumatorul de energie electrică într-o săptămână, dacă receptoarele funcționează câte trei ore zilnic.

6. Determinarea curentului prin om în cazul atingerii indirecte (fără protecție prin legare la pământ / nul), în funcție de rezistența omului și a suprafeței pe care se află omul.

Date de intrare: Un muncitor fără echipament de protecție cu rezistența internă echivalentă $R_h = 1000 \Omega$, lucrează cu un echipament monofazat (rețea de joasă tensiune cu nulul legat la pământ prin prize de pământ, $R_{p0} = 4 \Omega$), stând pe asfalt uscat din beton ($R_{iz} = 10000 \Omega$). Din cauza unui defect, carcasa echipamentului intră în contact cu faza, deci este la tensiunea rețelei. La atingerea carcasei, muncitorul se electrocutează prin atingere indirectă.

Se cere determinarea curentului care trece prin om în momentul electrocutării.

7. Determinarea tensiunii de atingere în cazul atingerii indirecte (considerând datele de la problema 6).

Date de intrare: Datele și soluția de la problema 6.

Se cere determinarea tensiunii la care este supus omul în momentul electrocutării.

8. Determinarea curentului prin priza de pământ de protecție, și a căderii de tensiune pe aceasta, în cazul unei atingeri indirecte.

Date de intrare: La echipamentul monofazat se realizează schema de protecție TT, adică protecția prin legare la pământ. Valoarea prizei de pământ de protecție este de 4Ω . Datele sunt cele de la problema 6 (tensiunea de defect este egală cu tensiunea rețelei (230 V), rezistența omului este de 1000Ω , rezistența de izolație 10000Ω și a prizei de pământ de exploatare este 4Ω).

Se cere determinarea curentului care trece prin priza de pământ în momentul electrocutării, și căderea de tensiune pe aceasta.

9. Determinarea rezistenței prizei de pământ.

Date de intrare: Având situația de la problema 6, se realizează schema de protecție TT, se cunoaște rezistența omului de 1000Ω , rezistența de izolație (a suprafeței pe care se află omul) are valoarea de 10000Ω , iar priza de pământ de exploatare a rețelei este de 4Ω . Tensiunea de defect de 230 V, curentul prin om de 10 mA.

Se cere determinarea rezistenței electrice a prizei de pământ.

10. Determinarea eficacității luminoase a unei lămpi electrice.

Date de intrare: O lampă cu incandescență de putere $P = 40 \text{ W}$ este alimentată la tensiunea de fază a rețelei, și are fluxul luminos $\Phi = 490 \text{ lm}$, iar intensitatea luminoasă $I_{\text{med}} = 39 \text{ cd}$.

Se cere să se determine eficacitatea luminoasă a lămpii electrice.

11. Determinarea eficienței luminoase relative a unei lămpi electrice.

Date de intrare: O lampă CFL având $P = 15 \text{ W}$ este alimentată la tensiunea de 230 V . Fluxul luminos al acesteia este $\Phi = 750 \text{ lm}$. Se cunoaște că o sursă ideală monocromatică de 1 W are fluxul luminos de 683 lm .

Se cere să se determine eficiența luminoasă a lămpii electrice.

12. Compararea diferitelor tipuri de lămpi electrice (în vederea determinării variantei celei mai bune din punct de vedere luminotehnic.)

Date de intrare: Lămpile electrice de la problemele anterioare trebuie comparate.

Se cere să se compare tipurile de lămpi studiate în funcție de eficacitatea și eficiența lor luminoasă.

13. Determinarea iluminării unei suprafețe luminată de o lampă electrică.

Date de intrare: O lampă cu incandescență de putere $P = 40 \text{ W}$ este alimentată la tensiunea de fază a rețelei, și are fluxul luminos $\Phi = 490 \text{ lm}$, iar intensitatea luminoasă $I_{\text{med}} = 39 \text{ cd}$. Lampa este amplasată pe tavanul unei încăperi, la înălțimea față de sol, $h = 2,5 \text{ m}$. Punctul X unde se dorește calcularea iluminării este pe sol, la un unghi de 45° .

Se cere să se determine nivelul de lumină care ajunge în punctul X.

14. Determinarea eficienței energetice relative a unui aparat de iluminat.

Date de intrare: Un aparat de iluminat tip pendul are ca sursă de lumină o lampă cu LED (lampă LED). Fluxul luminos al lămpii este 600 lm . Fluxul luminos al aparatului de iluminat este de 200 lm .

Se cere să se determine eficiența luminoasă relativă a aparatului de iluminat.

15. Determinarea parametrilor (Z , R , X) unei lămpi electrice / aparat de iluminat.

Date de intrare: O lampă cu incandescentă de 40 W și o lampă CFL de 15 W sunt alimentate la tensiunea rețelei. Factorul de putere a CFL este $\cos\varphi = 0,54$.
Se cere să se determine parametrii electrici ai lămpii electrice și ai aparatului de iluminat.

16. Determinarea curentului absorbit de un aparat de iluminat / o lampă electrică
Date de intrare: O lampă cu incandescentă de 40 W și o lampă CFL de 15 W sunt alimentate la tensiunea rețelei. Factorul de putere a CFL este $\cos\varphi = 0,54$.
Se cere să se determine curentul absorbit de lampa electrică.

17. Creșterea eficienței energetice.
Date de intrare: Un consumator are doar 10 lămpi cu incandescentă de 60 W ($\Phi = 900$ lm), și dorește să crească eficiența energetică a instalației de iluminat.
Se cere să se determine două soluții pentru creșterea eficienței energetice a instalației de iluminat a consumatorului.

18. Calculul parametrilor unei lămpi electrice cu LED-uri.
Date de intrare: O lampă cu LED-uri ($P = 6$ W) este alimentată la $U = 230$ V, factorul de putere a lămpii este $\cos\varphi = 0,7$.
Se cere să se determine parametrii electrici ai unei lămpi electrice cu LED-uri.

19. Calculul caracteristicilor energiei electrice pentru alimentarea unui LED.
Date de intrare: Un LED are nevoie de tensiunea de $U_{LED} = 2$ V și curentul de $I_{LED} = 10$ mA. Sursa de alimentare este de $U_s = 5$ V. Se dorește alimentarea LED-ului.
Se cere să se determine caractreisticile energiei electrice pentru alimentarea unui LED.

20. Determinarea randamentului unui echipament electrotermic.
Date de intrare: Un cuptor pentru uz casnic are puterea de 1500 W. Acesta se folosește pentru coacerea a unei pâine de 1 kg, folosindu-se o tavă de aluminiu emailat. Temperatura mediului ambiant se consideră a fi 20 °C, iar temperatura din cuptor este de 250 °C. Timpul de coacere este de aproximativ 1 h.

21. Determinarea randamentului unei instalații electrotermice.
Date de intrare: Un cuptor pentru uz industrial, industrial alimentară are puterea de 20 kW. Acesta se folosește pentru coacerea biscuiților, și are 12 etaje (100

biscuiți per tavă, 10 g per biscuitele, 1 tavă per etaj). Pentru coacere se folosesc tăvi de aluminiu. Temperatura mediului ambiant se consideră a fi 20 °C, iar temperatura din cuptor este de 200 °C. Timpul de coacere este de aproximativ 15 min. Rețeaua scurtă a cuptorului este un cablu de alimentare trifazat de 30 m, $s = 10 \text{ mm}^2$, Cu. Factorul de putere al cuptorului este 0,9, rezistivitatea cablu $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

22. Determinarea energiei calorice produse de sursele de RI.

Date de intrare: Un radiator ceramic (sursă de RI) de 650 W (12 cm x 12 cm) se alimentează la 230 V.

23. Determinarea caracteristicilor surselor de RI ale unei instalații electrotermice.

Date de intrare: Un consumator industrial dorește să folosească surse de RI pentru uscarea unor folii de hârtie de dimensiunea A0 (80 cm x 118,8 cm). De câte radiatoare va avea nevoie? Care va fi energia calorică produsă de instalație timp de 1 h. Se știe că frecvența optimă a undelor electromagnetice IR absorbite de hârtie este între 1,4 și 1,6 μm .

24. Determinarea randamentului instalației electrotermice cu surse de RI.

Date de intrare: O instalație electrotermică (40 kW) cuprinde un cuptor sub formă de tunel având lungimea de 5 m, lățimea de 1,5 m (suprafața de lucru), are 17 tuburi din cuarț opac de 4 m, diametrul 2 cm (2000 W per tubul), fiind folosit pentru sterilizarea hranei (creșterea temperaturii conservei la 180 °C timp de 15 min). O conservă are următoarele caracteristici: material Al, diametrul 10 cm, înălțimea 15 cm, 700 g. Eficiența energetică a tuburilor din cuarț este de 0,80. Alimentarea se face în JT, 50 Hz; cuptorul este alimentat prin 3 cabluri monofazate de 10 m, $s = 10 \text{ mm}^2$, Cu. Factorul de putere al cuptorului este 0,92, rezistivitatea cablu $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

25. Determinarea adâncimii de pătrundere a curenților turbionari (încălzirea prin inducție).

Date de intrare: La încălzirea prin inducție a unei bare pline de Fe de diametru 1 cm se folosește frecvența de 200 kHz.

26. Determinarea caracteristicilor inductor-piesă. (încălzirea prin inducție) – frecvența de lucru, puterea absorbită de piesă, puterea inductorului

Date de intrare: O bară de OL inoxidabil de 50 cm, diametrul 4 cm trebuie încălzită la 600 °C pentru a putea fi prelucrată. Tensiunea de alimentare este de 230 V.

27. Determinarea randamentului instalației electrotermice. (încălzirea prin inducție)

Date de intrare: Un mini cuptor cu inducție de 3500 W (puterea instalației) este folosit pentru topirea metalelor prețioase precum aur, argint și cupru. Capacitatea creuzetului este de 2 kg, alimentarea monofazată se face la 220 – 240 V, 50 Hz, temperatura maximă 1600 °C. Se topește 2 kg de Au (temperatura de topire a Au este 1064 °C, timp de topire 2 min). Cablul de alimentare are 20 m, Cu, 6 mm², factorul de putere este 0,8, inductorul din Cu are randamentul de 0,80.

28. Ridicarea curbei de sarcină zilnică a unui cuptor electric.

Date de intrare: Un cuptor pentru elaborarea OL are capacitatea de 80 t, fiind alimentat printr-un transformator de 60 MVA, tensiunea secundară 400-900 V, curentul în secundar 44 kA. Consumul cuptorului într-o zi a fost de 88 MWh, când a avut 4 încărcături de 60 t, 50 t, 80 t și 30 t, care au fost produse între orele 00:00 și 07:00. Timpul de topire a unei încărcături este de 1 h, regimul de lucru fiind: 0 min pornire, 15 min 25%, 30 min 60%, 45 min 10%, 60 min 5%.

29. Determinarea caracteristicilor unei instalații care are cuptor electric (transformator, baterie de condensatoare).

Date de intrare: Un cuptor electric pentru fabricarea oțelurilor, având capacitatea de 20 t. Factorul de putere al cuptorului este 0,5. Trebuie să se determine caracteristicile transformatorului și a bateriei de condensatoare. Consumul cuptorului este de 400 [kWh] per tonă pentru topirea șarjei timp de 2 h.

30. Determinarea pierderilor dielectrice și a constantei de pierderi dielectrice.

Date de intrare: Un metru cub (1 m³) de hârtie sub formă de foi este supus uscării timp de 40 s într-un cuptor capacitiv care lucrează la frecvența de 10 MHz, iar intensitatea câmpului electric este de 1 kV/m.

31. Determinarea randamentului instalației capacitive.

Date de intrare: Un cuptor capacitiv folosit pentru uscarea lemnului, lucrează la frecvența de 0,5 MHz, puterea sursei de RF este de 60 kW (factorul de putere este de 0,7), intensitatea câmpului electric este de 200 V/cm. Dimensiunea

plăcilor este de 5 x 3 m, temperatura de lucru 50 °C. Într-o zi s-au uscat 15 m³ de cherestea. Alimentarea se face la 6 kV, folosind un cablu trifazat de 10 mm², Cu, 30 m.

32. Determinarea randamentului instalației cu microunde.

Date de intrare: Un cuptor cu microunde de uz casnic având puterea de 800 W este folosit pentru prepararea a 500 g legume congelate, procesul durează 15 min. Temperatura inițială -10 °C, iar cea finală 100 °C.

33. Determinarea parametrilor electrici ai unui echipament electrotermic.

Date de intrare: Un receptor electrotermic are puterea de 1000 W, factorul de putere 0,8 și este alimentat la 230 V.

34. Determinarea factorului de putere, a puterii reactive, a energiei consumate și a curentului absorbit de un echipament electrotermic.

Date de intrare: Un echipament electrotermic are puterea activă de 5000 W, puterea aparentă de 6500 VA este alimentat printr-un cablu trifazat, la tensiunea de linie de 400 V. Echipamentul funcționează 5 ore zilnic timp de 10 zile.

35. Determinarea consumului de energie din timpul procesului de sudare cu arc electric.

Date de intrare: Un echipament de sudare cu arc electric, cu electrozi înveliți bazici este folosit pentru sudarea unor țevi de OL inoxidabil, diametrul exterior 6 cm, diametrul interior 5,7 cm. Sudorul a lucrat 5 h, timpul efectiv de sudare 3 h.

36. Determinarea caracteristicilor procesului de sudare folosind un echipament de sudare cu arc electric.

Date de intrare: Un echipament de sudare cu arc electric sub flux este folosit pentru sudarea unei conducte metalice care are grosimea materialului de 14 mm.

37. Determinarea puterii active utilizate în timpul sudării de echipamentului de sudare cu arc electric.

Date de intrare: Un echipament de sudare cu arc electric în mediu de gaze este folosit pentru sudarea a două piese metalice din Al, utilizând un electrod de wolfram de diametru 3 mm. Electrocul este conectat la sursa de alimentare, astfel încât căldura dezvoltată în timpul sudării este concentrată în el. Randamentul de

sudare cu arc electric este de 0,5 pentru un curent mai mic de 175 A, și de 0,67 pentru un curent de sudare mai mare de 175 A.

38. Determinarea parametrilor electrici ai circuitului de sudare prin presiune.

Date de intrare: Un echipament de sudare prin presiune are următoarele dimensiuni ale sistemului de sudare: diametru electrozi 1 cm, diametrul exterior al portelectrozilor de Cu de 1,8 cm, lungimea liberă a electrodului 3 cm, lungimea portelectrozilor 10 cm, diametru brațelor de bronz 2 cm, lungimea brațelor de bronz 20 cm. Electrozii sunt din wolfram, portelectrozii și brațele din bronz.

39. Determinarea factorului de putere și energia consumată de echipamentul de sudare într-o zi dacă funcționează 8 h, iar timpul efectiv de lucru este de 5 h.

Date de intrare: Un echipament de sudare folosește un curent de 5 kA la tensiune de 10 V. Tensiunea de alimentare este de 230 V. Puterea aparentă a echipamentului este 15 kVA. Puterea la mersul în gol este de 20% din puterea în sarcină.

Anexa 8. Mărimi fizice și unități de măsură

- I [A] – curentul electric
- U [V] – tensiunea electrică
- P [W] – puterea activă
- Q [VAr] – puterea reactivă
- S [VA] – puterea aparentă
- R [Ω] - rezistența electrică
- X [Ω] – reactanța electrică
- X_L [Ω] – reactanța inductivă
- X_C [Ω] – reactanța capacitivă
- Z [Ω]– impedanța electrică
- t [s] – timpul
- T [K] – temperatura (termodinamică), [°C] (ambientală)
- E [Wh] – energia electrică (folosit și notația W)
- E [J] – energia termică (denumită și Q în termodinamică)
- ρ [$\Omega \cdot m$]– rezistivitatea electrică
- l [m] – lungimea
- A [m²] – secțiunea / aria
- f [Hz] – frecvența
- σ [S/m] – conductivitatea electrică
- μ [H/m] – permeabilitatea magnetică
- ϵ [F/m] – permitivitatea electrică
- C [F] – capacitatea electrică
- L [H] – inductivitatea electrică
- $\cos \varphi$ – factorul de putere (adimensional), se mai folosește termenul PF