





---

# Cuprins

<b>Cap.1. Principii de fabricație și calitate în Industria Electronică.....</b>	<b>1</b>
1.1. Tendințe în evoluția componentelor electronice.....	1
1.2. Asimilarea în fabricație a produselor electronice.....	2
1.2.1. Studiul tehnico-economic.....	2
1.2.2. Proiectarea electrică.....	4
1.2.3. Modelarea comportării componentelor electronice și proiectarea circuitelor.....	5
1.2.4. Proiectarea constructivă și tehnologică a modulelor (subansamblurilor) și ansamblurilor generale.....	8
1.2.5. Pregătirea fabricației.....	10
1.2.6. Fabricația.....	11
1.2.7. Exploatarea și întreținerea produselor electronice.....	12
1.3. Calitatea în industria electronică.....	12
1.3.1. Definiții. Concepte generale.....	12
1.3.2. Noțiuni despre calitate.....	14
1.3.3. Indicatori de calitate.....	15
<b>Cap.2. Proprietățile tehnice și tehnologice ale materialelor electrotehnice.....</b>	<b>21</b>
2.1. Proprietăți chimice.....	21
2.2. Proprietăți fizice.....	22
2.3. Proprietăți mecanice.....	24
2.3.1. Elasticitatea materialelor metalice.....	26
2.3.2. Plasticitatea materialelor metalice.....	27
2.3.3. Încercarea la tracțiune a materialelor metalice.....	29
2.3.4. Ruperea materialelor.....	31
2.3.5. Fluajul materialelor.....	32
2.3.6. Oboseala materialelor.....	33
2.3.7. Duritatea materialelor.....	34
2.3.8. Reziliența.....	37
2.4. Proprietăți termice.....	37
<b>Cap.3. Conducția electrică.....</b>	<b>41</b>
3.1. Bazele fenomenului conducției electrice.....	41
3.2. Factori care influențează conductibilitatea electrică a materialelor metalice.....	43
3.2.1. Influența temperaturii.....	43
3.2.2. Influența impurităților.....	45
3.2.3. Influența solicitărilor mecanice.....	46
3.3. Supraconductibilitatea.....	47
3.3.1. Aplicații ale materialelor supraconductoare.....	56
3.4. Conducția electrică a semiconducătorilor.....	57
3.4.1. Conducția intrinsecă și conducția extrinsecă.....	57
3.4.2. Factori care influențează proprietățile semiconductoare.....	58
3.5. Proprietățile electroizolante ale materialelor.....	61
3.5.1. Rigiditate dielectrică, polarizare, permitivitate.....	61

3.5.2.	Pierderi în dielectrics .....	63
3.5.3.	Factori care influențează proprietățile electroizolante .....	64
<b>Cap.4.</b>	<b>Materiale conductoare. Metale.....</b>	<b>67</b>
4.1.	Caracteristici generale .....	67
4.2.	Dependență proprietăților materialelor conductoare de diferiți factori .....	67
4.2.1.	Influența temperaturii.....	68
4.2.2.	Influența stării de agregare.....	68
4.2.3.	Influența naturii și conținutului de impurități.....	69
4.2.4.	Influența solicitărilor mecanice .....	71
4.2.5.	Influența tratamentului termic .....	71
4.2.6.	Coroziunea metalelor .....	71
4.3.	Materiale de mare conductivitate electrică .....	73
4.3.1.	Cuprul și aliajele sale .....	73
4.3.2.	Aluminiul și aliajele sale.....	77
4.4.	Materiale conductoare cu mare rezistivitate electrică .....	80
4.4.1.	Materiale pentru rezistoare de precizie și etalon .....	80
4.4.2.	Materiale pentru reostate.....	81
4.4.3.	Materiale utilizate în electrotermie.....	82
4.5.	Materiale conductoare pentru contacte electrice.....	83
4.5.1.	Materiale pentru contacte fixe .....	84
4.5.2.	Materiale pentru contacte de rupere.....	84
4.5.3.	Materiale pentru contacte alunecătoare .....	86
4.6.	Materiale cu utilizări speciale .....	87
4.6.1.	Materiale pentru termobimetale.....	87
4.6.2.	Materiale pentru termocuple.....	87
4.6.3.	Aliaje de lipit .....	88
<b>Cap.5.</b>	<b>Materiale electroizolante .....</b>	<b>91</b>
5.1.	Caracteristici generale .....	91
5.2.	Polarizația temporară a materialelor izolatoare .....	91
5.2.1.	Polarizația electronică .....	94
5.2.2.	Polarizația ionică .....	96
5.2.3.	Polarizația de orientare.....	98
5.2.4.	Polarizația de neomogenitate .....	103
5.3.	Polarizația permanentă a materialelor izolatoare .....	104
5.3.1.	Fenomenul piroelectric .....	104
5.3.2.	Fenomenul piezoelectric.....	105
5.3.3.	Efectul de electret.....	107
5.4.	Dependența proprietăților dielectrice ale materialelor electroizolante de diverși factori.....	108
5.4.1.	Rezistivitatea .....	109
5.4.2.	Rigiditatea dielectrică .....	111
5.4.3.	Permitivitatea electrică .....	116
5.4.4.	Factorul de pierderi .....	118
5.4.5.	Pierderi în materiale dielectrice .....	119
5.5.	Clasificarea materialelor electroizolante.....	122
5.5.1.	Clasificarea după stabilitatea termică .....	122
5.6.	Materiale electroizolante gazoase .....	124
5.6.1.	Aerul .....	124
5.6.2.	Hidrogenul .....	125
5.6.3.	Gaze electronegative .....	125

5.6.4.	Alte gaze.....	126
5.7.	Materiale electroizolante lichide .....	127
5.7.1.	Ouleiul mineral .....	127
5.7.2.	Oleiuri sintetice .....	128
5.8.	Materiale electroizolante solide organice .....	129
5.8.1.	Materiale organice micromoleculare .....	129
5.8.2.	Materiale organice macromoleculare .....	130
5.8.3.	Celuloza și derivații săi .....	135
5.8.4.	Cauciucuri și elastomeri.....	136
5.8.5.	Siliconii.....	137
5.9.	Materiale electroizolante solide anorganice .....	138
5.9.1.	Mica și produsele pe bază de mică.....	138
5.9.2.	Sticlele .....	139
5.9.3.	Ceramica electrotehnică .....	140
5.9.4.	Alte materiale anorganice .....	142
5.9.5.	Lacuri electroizolante .....	142
5.10.	Compounduri .....	144
5.11.	Produse pe bază de rășini sintetice .....	144
5.11.1.	Mase plastice presate.....	144
5.11.2.	Mase plastice stratificate.....	144
5.11.3.	Folii electroizolante .....	145
5.11.4.	Fire și țesături .....	145
5.11.5.	Materiale expandate (poroplaste) .....	146
5.12.	Materiale compozite .....	146
<b>Cap.6.</b>	<b>Materiale magnetice .....</b>	<b>149</b>
6.1.	Proprietăți magnetice generale.....	149
6.1.1.	Pierderi în materiale magnetice .....	153
6.2.	Caracteristici generale ale materialelor magnetice .....	153
6.3.	Dependența proprietăților magnetice de diverși factori .....	155
6.3.1.	Influența temperaturii .....	155
6.3.2.	Influența impurităților.....	156
6.3.3.	Influența solicitărilor mecanice .....	157
6.3.4.	Influenții tratamentelor termice.....	157
6.3.5.	Influența altor factori .....	158
6.4.	Materiale magnetice moi .....	158
6.4.1.	Fierul.....	158
6.4.2.	Oțeluri și fonte.....	159
6.4.3.	Aliaje fier-siliciu .....	159
6.4.4.	Aliaje fier-aluminiu .....	160
6.4.5.	Aliaje nichel-fier .....	160
6.4.6.	Aliaje cu inducție de saturație mare .....	161
6.4.7.	Aliaje eu proprietăți speciale .....	162
6.4.8.	Ferite magnetic moi .....	162
6.4.9.	Materiale magnetodielectrice .....	163
6.5.	Materiale magnetice dure .....	164
6.5.1.	Oțeluri martensitice și aliate.....	165
6.5.2.	Aliaje plastice .....	165
6.5.3.	Aliaje cu magnetostricțiune mică .....	165
6.5.4.	Aliaje pe bază de mangan și din metale prețioase.....	166
6.5.5.	Aliaje cu durificare prin dispersie de fază.....	166
6.5.6.	Ferite magnetic dure .....	167
6.5.7.	Alte materiale pentru magneților permanenți .....	167

6.6.	Materiale cu proprietăți magnetice reduse (nemagnetice) .....	168
<b>Cap.7.</b>	<b>Rezistoare .....</b>	<b>169</b>
7.1.	Elemente de circuit .....	169
7.2.	Rezistoare - generalități.....	171
7.3.	Structura constructivă a rezistoarelor fixe .....	172
7.3.1.	Elementul rezistiv .....	172
7.3.2.	Suportul izolant.....	173
7.3.3.	Terminalele.....	174
7.3.4.	Protecția rezistoarelor la acțiunea factorilor mecano-climatici .....	175
7.4.	Tehnologia de fabricație a rezistoarelor bobinate .....	176
7.4.1.	Tehnologia rezistoarelor bobinate de medie putere .....	176
7.4.2.	Tehnologia rezistoarelor bobinate de mare putere .....	177
7.5.	Tehnologia de fabricație a rezistoarelor peliculare .....	178
7.5.1.	Tehnologia rezistoarelor cu peliculă rezistivă pe bază de carbon.....	178
7.5.2.	Tehnologia rezistoarelor cu peliculă rezistivă pe bază de oxizi metalici .....	181
7.5.3.	Tehnologia rezistoarelor de volum .....	182
7.5.4.	Tehnologia straturilor subțiri pentru fabricarea rezistoarelor.....	183
7.5.5.	Tehnologia straturilor groase.....	185
7.6.	Structura constructivă și tehnologia rezistoarelor variabile (potențioanelor) .....	188
7.6.1.	Tipuri de potențioame.....	188
7.6.2.	Structura constructivă a rezistoarelor variabile.....	189
7.7.	Caracteristicile rezistoarelor fixe.....	191
7.7.1.	Rezistența nominală și toleranța acesteia ( $R, t$ ) .....	191
7.7.2.	Puterea de disipație nominală ( $P_n$ ).....	194
7.7.3.	Tensiunea nominală ( $U_n$ ) .....	194
7.7.4.	Zgomotul rezistoarelor.....	194
7.7.5.	Intervalul temperaturilor de lucru .....	195
7.7.6.	Coeficientul de variație cu temperatură al rezistenței .....	195
7.7.7.	Precizia rezistoarelor .....	195
7.8.	Caracteristicile rezistoarelor variabile .....	196
7.8.1.	Caracteristici electrice .....	196
7.9.	Criterii de alegere a rezistoarelor .....	197
7.10.	Fiabilitatea rezistoarelor .....	198
<b>Cap.8.</b>	<b>Condensatoare.....</b>	<b>201</b>
8.1.	Clasificarea condensatoarelor .....	201
8.2.	Caracteristicile și formele constructive ale condensatoarelor fixe. ....	202
8.2.1.	Capacitatea nominală ( $C_n$ ).....	202
8.2.2.	Tensiunea nominală ( $U_n$ ) .....	204
8.2.3.	Rezistența de izolație ( $R_{iz}$ ) .....	205
8.2.4.	Tangenta unghiului de pierderi ( $tg\delta$ ).....	205
8.2.5.	Intervalul temperaturilor de lucru .....	206
8.2.6.	Coeficientul de variație a capacității cu temperatura ( $\alpha_c$ ).....	207
8.2.7.	Coeficientul de variație a capacității ( $K$ ) .....	207
8.2.8.	Capacitatea specifică .....	207
8.3.	Materiale utilizate la fabricarea condensatoarelor .....	208
8.3.1.	Armăturile.....	208
8.3.2.	Dielectricul.....	208
8.4.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor fixe.....	211
8.4.1.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor ceramice .....	211

8.4.2.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu mică.....	213
8.4.3.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu sticlă .....	214
8.4.4.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu hârtie .....	214
8.4.5.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu peliculă din material plastic.....	216
8.4.6.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor electrolitice .....	217
8.5.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor variabile.....	221
8.5.1.	Caracteristicile și construcția condensatoarelor variabile.....	221
8.5.2.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor variabile cu aer.....	223
8.5.3.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor variabile cu dielectric solid .....	224
8.6.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor semireglabile .....	224
8.6.1.	Condensatoare semireglabile cu aer .....	225
8.6.2.	Condensatoare semireglabile cu dielectric anorganic.....	225
8.6.3.	Condensatoare semireglabile cu dielectric organic.....	226
8.7.	Tehnologia de fabricație a condensatoarelor de trecere .....	226
8.8.	Fiabilitatea condensatoarelor .....	227
8.9.	Criterii de alegere a condensatoarelor .....	228
<b>Cap.9.</b>	<b>Bobine.....</b>	<b>233</b>
9.1.	Calculul inductivității .....	233
9.2.	Construcția și tehnologia de fabricație a bobinelor.....	236
9.2.1.	Tipuri constructive de carcase pentru bobinaj.....	236
9.2.2.	Materiale conductoare pentru bobinaj.....	237
9.2.3.	Tipuri de bobinaje .....	239
9.2.4.	Impregnarea bobinajelor .....	242
9.2.5.	Tehnologii de realizare a înfășurărilor.....	243
9.2.6.	Miezuri magnetice pentru bobine .....	244
9.3.	Ecranarea bobinelor .....	249
9.4.	Fiabilitatea bobinelor .....	250
<b>Cap.10.</b>	<b>Alte componente pasive .....</b>	<b>253</b>
10.1.	Rezonatorul piezoelectric .....	253
10.2.	Lămpi cu descărcare în gaz sau în vid .....	254
10.3.	Siguranța fuzibilă .....	255
10.4.	Becul.....	255
10.5.	Electromagnetul, releul .....	256
10.5.1.	Caracteristicile electromecanice ale electromagneților .....	257
10.6.	Contacte electrice .....	257
10.6.1.	Procese fizico-chimice care afectează starea suprafeței de contact .....	261
10.6.2.	Materiale pentru construcția contactelor .....	262
10.7.	Întreprupătoare .....	263
10.8.	Fotorezistorul sau detectorul fotoconductiv .....	264
10.8.1.	Caracteristici specifice fotorezistoarelor.....	265
10.9.	Termistoare.....	267
10.9.1.	Termistoare cu coeficient de temperatură negativ.....	268
10.9.2.	Rezistoare dependente de temperatură cu coeficient de temperatură pozitiv .....	270
10.10.	Varistoare .....	271
10.11.	Descărcătoare electrice.....	273
10.11.1.	Descărcătoare cu rezistență variabilă - DRV .....	274

10.11.2.	Descărcătoare cu rezistență variabilă și suflaj magnetic .....	275
10.11.3.	Parametrii și caracteristicile descărcătoarelor cu rezistență variabilă .....	276
10.11.4.	Descărcătoare cu oxizi metalici .....	278
10.12.	Elemente de afișare .....	278
10.12.1.	Tubul catodic .....	278
10.12.2.	LCD .....	282
10.12.3.	Plasma .....	284
10.12.4.	Plasma vs LCD .....	285

## **Cap.11. Cablaje imprimate..... 289**

11.1.	Generalități .....	289
11.2.	Structura și clasificarea cablajelor imprimate .....	290
11.2.1.	Suportul electroizolant .....	290
11.2.2.	Traseele conductoare .....	290
11.2.3.	Adezivi .....	291
11.3.	Metode și tehnologii de realizare a cablajelor imprimate .....	292
11.3.1.	Realizarea cablajelor imprimate monostrat prin metode de corodare .....	295
11.3.2.	Realizarea fotooriginalului .....	297
11.3.3.	Realizarea cablajelor imprimate multistrat .....	299
11.3.4.	Realizarea cablajelor folosind folia de transfer a desenelor PnP-Blue .....	301
11.4.	Echiparea cablajelor imprimate cu componente electronice .....	302
11.5.	Protecția la perturbații electromagnetice .....	303
11.5.1.	Alegerea tipului de cablaj imprimat .....	306
11.6.	Criterii de montare a componentelor .....	306
11.6.1.	Tehnica lipirii componentelor .....	307
11.7.	Componente pasive pentru SMT .....	309
11.7.1.	Rezistoarele .....	309
11.7.2.	Condensatoare .....	311
11.7.3.	Termistoare .....	313
11.7.4.	Bobinele .....	313
11.7.5.	Înterupătoare SMD .....	313
11.7.6.	Cristale cuarț de tip SMD .....	313



# Cap.1. Principii de fabricație și calitate în Industria Electronică

## 1.1. Tendințe în evoluția componentelor electronice

În actuala etapă de dezvoltare a științei și tehnologiei se înregistrează un avânt deosebit al electronicii și microelectronicii, la pătrunderea ei, practic în orice domeniu de activitate al societății umane. Prin posibilitățile pe care le oferă: miniaturizare și superminiaturizare, viteză de calcul, memorare, amplificare etc. poate răspunde oricărei solicitări. Cum diversitatea acestora poate fi extrem de mare, satisfacerea cerințelor impuse se poate asigura prin sintetizarea lor, prin crearea unor funcții specifice, plecând de la componente care printr-o interconectare corespunzătoare să genereze funcțiile respective.

Electronica începutului de secol este caracterizată prin creșterea gradului de integrare atât la nivelul componentelor electronice cât și la cel al subsansamblurilor și modulelor electronice.

Ofensiva declanșată de industria semiconductoarelor prin coborârea sub bariera de un micrometru (INTEL urmează să treacă la tehnologia CMOS de 0,09 micrometri), folosirea în realizarea circuitelor a unor lățimi ce au în prezent valori de zecimi de micrometru și introducerea noilor tehnologii care utilizează metalizarea cu cupru în loc de aluminiu, au făcut să poată fi incluse în cadrul unui circuit integrat un număr extrem de mare de porți logice și tranzistoare (peste 10 milioane de porți și peste 100 de milioane de tranzistoare) reunite prin conexiuni în funcții complexe. Elementele enumerate se găsesc pe o singură pastilă de siliciu (chip). Circuitele integrate pe bază de siliciu fabricate în prezent conțin până la 2200 de conexiuni fără ca prin aceasta să se considere că s-a atins vreo limită. Drept urmare, a crescut numărul de conexiuni dintre chip și lumea exterioară, mărindu-se în același timp frecvența de lucru a microprocesoarelor. Se preconizează că în foarte scurt timp calculatoarele să conțină microprocesoare de 5 GHz.

Toate aceste performanțe ale componentelor electronice, de neimaginat cu puțin timp în urmă, conduc la conceperea și realizarea de module electronice din ce în ce mai performante. De altfel, așa cum componentele montate pe suprafață (tehnologia SMD – Surface Mounted Device) au revoluționat industria electronică la mijlocul anilor 1980, noile componente din categoria Chip Package, chip Size Package și Flip Chip vor provoca modificări importante în industria electronică viitoare. Prin urmare, vor avea loc modificări și în ceea ce privește modulele electronice și aparatura electronică în general, atât din punctul de vedere al proiectării cât și al tehnologiilor de fabricație. Dacă se corelează noile dimensiuni, pe care se preconizează că le vor avea componentele electronice (cu circa 20 %

mai mari ca ale chip-ului de siliciu), cu duritatea din ce în ce mai mare a componentelor conținute de modulele electronice, rezultă de la sine concluzia că la conceperea modulelor este nevoie de folosirea unor programe care să permită automatizarea proiectării.

## 1.2. Asimilarea în fabricație a produselor electronice

### 1.2.1. Studiul tehnico-economic

Studiul tehnico-economic reprezintă un act de concepție cu implicații hotărâtoare în stabilirea parametrilor tehnici și economici ai viitorului produs electronic, și nu numai, ce urmează a fi proiectat. La nivelul studiului tehnico-economic se abordează o serie de probleme și anume:

- stabilirea unei soluții de principiu pentru funcționarea produsului nou;
- precizarea unor materiale și tehnologii utilizate la fabricarea viitorului produs;
- eventualele dezvoltări ale unor capacități de producție;
- piața internă și piața externă a produsului;
- programarea asimilării noului produs etc.

Prin prisma acestor aspecte studiul tehnico-economic reprezintă una dintre cele mai importante activități din succesiunea activităților ce se întreprind pentru asimilarea unui nou produs.

Pentru elaborarea studiului tehnico-economic este necesar să se acorde o importanță deosebită *studiului de marketing*. Acest studiu va *preciza anumite condiții specifice* legate de:

- gradul de saturație al pieței;
- segmentarea pieței;
- corelarea unor funcții ale produsului cu necesitățile utilizatorului etc.

În baza datelor oferite de studiul tehnico-economic, se validează *tema de proiectare*, în varianta care corespunde în cea mai mare măsură strategiei și politicii economice a firmei, prin luarea în considerație a unor factori tehnici, economici și sociali.

*Tema de proiectare* trebuie să conțină toate datele în măsură să exprime *concret, exact și complet* comanda. Aceasta urmează să prezinte succesiv parametri tehnico-economici pe care trebuie să-i aibă în vedere proiectantul la elaborarea documentației tehnice pentru fabricarea noului produs.

Principalele date conținute în tema de proiectare sunt:

- destinația și condițiile de exploatare ale produsului;
- caracteristicile de bază ale acestuia;

- cerințele principale din punct de vedere constructiv și funcțional;
- parametri garanțați;
- standardele sau normele interne;
- indicatori tehnico-economici și de exploatare;
- volumul producției (numărul de produse și eșalonarea în timp a acestora).

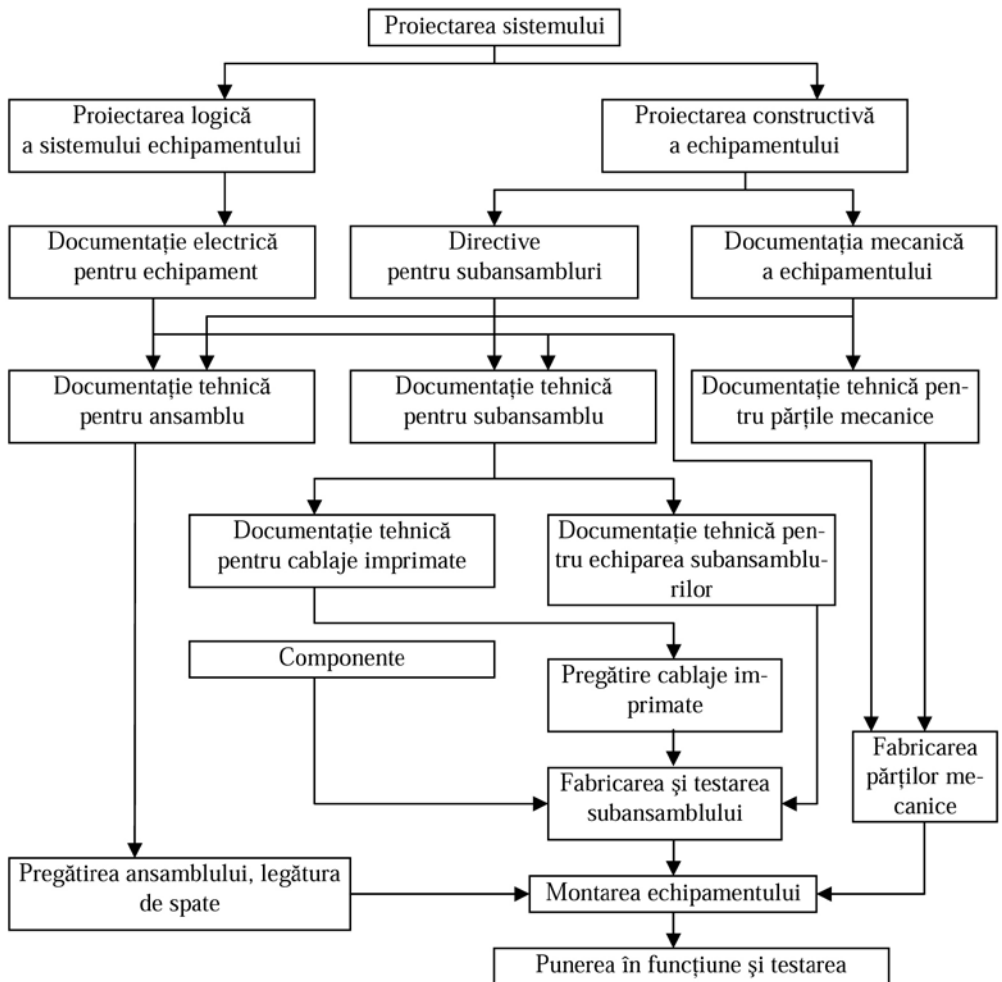


Figura 1-1 Etapele principale ale unui lanț tehnologic

Dezvoltarea, fabricația, întreținerea și utilizarea unui echipament trebuie tratate ca o unitate și în acest sens se vorbește despre un lanț tehnologic. Prin aceasta se consideră totalitatea pașilor individuali care pornesc de la cercetare și conduc apoi prin construcția echipamentului, pregătirea documentației tehnice și a mijloacelor de fabricație (SDV-urilor), fabricația, testarea, repararea

subansamblurilor, montarea echipamentelor, punerea lor în stare de funcționare și în final, la testarea întregului echipament. În Figura 1-1 se indică principalele etape ale lanțului tehnologic corespunzător realizării unui echipament electronic.

## 1.2.2. Proiectarea electrică

Inginerului proiectant de circuite i se indică comportarea funcțională a unui circuit sau bloc, denumite și *modul electronic* și i se cere să proiecteze interconexiunile elementelor componente astfel încât modulul electronic (subansamblul) respectiv și, respectiv ansamblul complet să aibă caracteristicile prescrise.

Îndeplinirea acestor cerințe nu este ușoară. Pentru aceasta inginerul are nevoie de experiență, pricepere și intuiție. El trebuie să cunoască perfect *proprietățile de circuit ale componentelor electronice* disponibile și să aibă capacitatea de a putea *prevedea comportarea circuitelor* formate prin interconectarea acestor componente.

Cunoașterea proprietăților de circuit ale componentelor electronice permite stabilirea unui model al comportării componente, care, de obicei, de exprimă sub forma unor circuite echivalente constituite din elemente idealizate și abstractizate.

*Anticiparea comportării circuitelor* formate prin interconectarea componentelor electronice are la bază descrierea matematic a interconexiunilor circuitelor echivalente componentelor fizice, ceea ce face obiectul teoriei circuitelor (rețelelor).

*Modulele electronice* sunt structuri fizice alcătuite din componente electronice și neelectronice destinate să satisfacă cerințele funcționale ce ar urma să le prezinte aparatul și/sau echipamentul care le conține.

Un modul electronic se bazează pe o reuniune de componente ce pot fi grupate în două categorii diferite. Una conține toate componentele electronice, mecanice, electromecanice, optice etc., fabricate de firme specializate, de cele mai multe ori în cantități uriașe. Este vorba aici de *componentele normalizate* (standardizate) care se află prezente în cataloagele de firmă, iar la conceperea subansamblului (modulului electronic) sunt extrase din datele de catalog informațiile referitoare la componentele care vor aparține modulului proiectat. Componentele normalizate sunt concepute, proiectate și fabricate de mari concernes internaționale. Asupra performanțelor componente normalizate, proiectantul modulului electronic nu poate interveni și reprezintă o condiție inițială de la care se pleacă în conceperea schemei electrice ce va sta la baza modulului.

A doua categorie de componente o constituie *structurile de interconectare* și spre deosebire de componentele normalizate, sunt dedicate aplicației ce urmează a fi creată sau altfel spus sunt *specifice unui anumit modul electronic*.

S-ar putea face observația că în etapa proiectării schemei electrice și ulterior modulului electronic, componentele normalizate ce alcătuiesc modulul electronic există fizic, chiar și dacă numai în cataloage, iar structurile de interconectare nu există. Ele, ulterior gândirii schemei electronice, urmează să fie concepute și apoi fabricate pentru a deveni, la rândul lor, componente. Acest din urmă aspect dorește să scoată în evidență responsabilitatea majoră ce revine inginerului proiectant în etapa proiectării electrice.

### 1.2.3. Modelarea comportării componentelor electronice și proiectarea circuitelor

Una dintre problemele importante ale tehnologiei electronice este alegerea și utilizarea rațională a componentelor de circuit. Pentru ca inginerul electronist să poată soluționa cu succes această problemă are nevoie de caracterizarea sau descrierea exactă a comportării electrice a componentelor. Orice modelare a comportării electrice a unui component *constituie un circuit echivalent*.

Găsirea unui circuit echivalent al unei componente implică executarea unor măsuri asupra comportării sale la borne, iar proprietățile măsurate folosesc ca model pentru componenta în cauză și se pot prezenta sub formă de *relații funcționale* stabilite empiric. Trebuie remarcat faptul că determinarea comportării la borne a componentelor nu poate furniza informații decât despre comportarea acestora în condițiile concrete în care s-a efectuat măsurarea. Nu există posibilități de extrapolare a acestor rezultate în legătură cu comportarea componentei în condiții modificate.

Dacă unele mărimi variabile la bornele componentei depind nu numai de valorile instantanee ale celorlalte variabile, ci și de viteza de variație a acestora, este necesar ca măsurătorile la borne să se efectueze în *regim dinamic*, adică în condiții care să corespundă cât mai mult cu cele reale, în care va lucra componenta în cauză.

Modelarea comportării unei componente începe cu o *analiză teoretică a comportării fizice* și cu *interpretarea măsurătorilor*. Pe baza unei astfel de analize, inginerul poate să descrie fenomenele electrice printr-un grup de relații funcționale, ale cărei variabile sunt de regulă *tensiunile la borne și curenții*, inclusiv vitezele de variație ale valorilor lor.

Devine astfel posibilă analiza comportării circuitului în care este folosită componenta respectivă, cu ajutorul metodelor numerice și grafice.

De multe ori există necesitatea analizei comportării circuitelor prin utilizarea unei game largi de metode analitice. Aceasta impune adoptarea pentru componente a unor circuite echivalente pentru care relațiile funcționale reflectă de fapt interconectarea corespunzătoare a unor *elemente de circuit idealizate*. Aceste elemente de circuit reprezintă abstracții definite matematic, care exprimă relații simple între curenți și tensiuni sau între vitezele de variație ale acestora și care sunt foarte larg folosite în calculul și proiectarea circuitelor. La modelarea diferitelor componente fizice în circuit se va folosi un număr mai mare sau mai mic de elemente de circuit idealizate, după complexitatea componentei și după precizia dorită descrierii comportării acesteia.

Pe baza analizei comportării fizice interne a componentei (dispozitivului), inginerul *stabilește configurații de elemente idealizate, caracteristice comportării componentei*.

Pentru ca procesul de modelare să fie complet este necesar să se efectueze măsurători în condițiile reale de lucru. În acest fel se poate determina cantitativ comportarea la borne a componentei, precum și valorile concrete ale diferiților parametri ce caracterizează elementele idealizate din schema echivalentă.

Precizia cu care circuitul echivalent descrie componenta trebuie să fie considerată corespunzătoare numai pentru aplicația respectivă. O precizie sporită

a modelului atrage după sine sporirea complexității circuitului echivalent, care implică dificultăți mai mari în analiza circuitului în care este folosită componenta respectivă.

O remarcă importantă care trebuie făcută în acest context este aceea că *este important să se aleagă un model care să nu fie mai complicat decât cere însăși natura aplicației și precizia descrierii.*

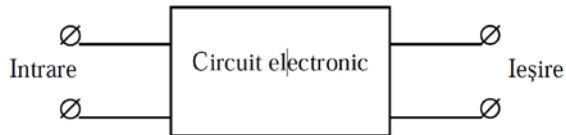


Figura 1-2 Schema bloc a unui circuit electronic

*Proiectarea electrică a circuitelor* vizează determinarea parametrilor elementelor componente, pentru ca circuitul să îndeplinească funcția cerută. De regulă, funcția cerută se exprimă prin mărimile electrice de la bornele de ieșire ale circuitului (Figura 1-2), în funcție de mărimile electrice de la intrarea circuitului (ca date ale problemei) și de parametrii elementelor componente care formează circuitul și care constituie necunoscutele problemei.

În proiectarea circuitelor inginerul electronist apelează la diferite modele matematice, care să descrie cât mai fidel comportarea componentelor electronice în interconexiunile lor din circuite.

În general numărul ecuațiilor care se pot scrie la proiectarea unui circuit este mai mic decât numărul necunoscutelor problemei, ceea ce determină pe proiectant să decidă asupra alegerii potrivite pentru o parte din parametrii necunoscuți. De aici rezultă posibilitatea obținerii mai multor variante de soluții și necesitatea optimizării rezultatului.

Pentru ca schemele electrice proiectate și realizate fizic să asigure funcția electrică cerută, este necesar să se aibă în vedere faptul că circuitele echivalente ale componentelor care au format configurația topologică a schemei realizate reprezintă numai în mod aproximativ comportarea structurii fizice, ceea ce impune ca *experimentarea de laborator* să însoțească proiectarea prin calcul. Rezultatele experienței pot determina reconsiderarea schemelor echivalente ale componentelor, modelarea inițială nefiind cea corespunzătoare. Se reiau calculele, după care se cere o nouă verificare experimentală. Ciclul se poate repeta de mai multe ori. Aceasta constituie una dintre particularitățile proiectării în electronică.

În proiectarea electrică a circuitelor electronice este necesar să se țină seama de faptul că în fabricarea componentelor electronice există mulți *factori care determină o abatere aleatoare a parametrilor* acestora de la valorile prescrise, în jurul unor valori medii. Aceste abateri sunt determinate de factori ca: *neomogenitatea materiei prime, variația în timp a condițiilor de fabricație* (de exemplu, temperatura unor incinte, gradul de acuratețe, gradul de oboseală al operatorilor etc.), *erori în măsurarea diferiților parametri ai mediului, precum și a mărimilor care caracterizează componentele etc.* Abaterile parametrilor de la anumite valori prescrise constituie așadar un fenomen obiectiv. Deoarece la realizarea fizică a circuitelor în timpul fabricației se folosesc componente care nu au parametri de lucru riguros egali cu cei rezultați din proiectare, orice temă de

proiectare a circuitelor electronice permite ca parametrii de ieșire ai acestora să se afle în limite admise, denumite *toleranțe*.

Calcululele efectuate la proiectarea circuitelor electronice conduc la determinarea așa-ziselor *toleranțe globale* care țin seama atât de toleranțele de fabricație, cât și de variația parametrilor componentelor în timpul exploataării (în special datorită îmbătrânirii materialelor) eventual și de alți factori neluați în considerare de fabricanții de componente electronice.

De cele mai multe ori activitățile incluse în sistemul de concepție și fabricație reprezintă acțiuni de rutină cu impact minor în planul creativității, al conceperii schemei electronice, dar cu repercusiuni majore asupra funcționării și costului circuitului (subansamblului electronic). Apariția calculatoarelor a condus la folosirea lor în activitățile de proiectare. Pe măsura creșterii performanțelor lor și a apariției de programe de aplicație performante, calculatoarele au fost incluse în automatizarea activităților impuse în sistemul de concepție și fabricație. Dacă inițial *software*-ul de aplicații a fost orientat cu prioritate spre eliberarea factorului uman de la activitățile extrem de obositoare și cu satisfacții profesionale reduse cum ar fi trasarea legăturilor dintre componentele electronice plasate pe substratul modulului electronic, cu timpul s-au creat programe care acoperă practic întreaga gamă de activități ce sunt incluse în sistemul de concepție și fabricație. S-au dezvoltat programe care să permită conceperea schemei electrice direct cu calculatorul și ulterior crearea modulelor electronice, respectiv a structurii de interconectare precum și programe care să efectueze *simularea funcționării și optimizarea schemei electronice, analiza termică și de fiabilitate a modulului electronic, analiza compatibilității electromagnetice sau analiza integrității semnalelor*.

Analiza compatibilității electromagnetice stabilește în ce măsură modulul (subansamblul) electronic depășește în funcționare o limită admisă a influențării electromagnetice a mediului ambiant.

*Analiza integrității semnalelor* evidențiază felul în care structura de interconectare, prin elementele parazite (capacități, inductanțe, rezistențe) pe care le conține și care de fapt reprezintă elemente de circuit ce trebuie incluse în schema electrică, modifică funcționarea electrică inițială, adică a schemei simulate înaintea luării în considerație a felului în care sunt conectate între ele circuitele schemei electrice. *Se poate face aprecierea că s-a ajuns la situația de a putea realiza și analiza în mod virtual un model electronic*. Aceste programe performante contribuie în mod hotărâtor la scurtarea la maximum a duratei de concepere, ceea ce în literatura americană de specialitate se întâlnește sub sintagma *time to market*. Deținerea în sistemul de concepție și fabricație de programe performante contribuie la reducerea numărului de iterații proiectare–experimentare–prototip, ajungându-se uneori chiar la eliminarea lor, în acest fel fiind micșorat costul general al produsului, ceea ce reprezintă un factor esențial în asigurarea competitivității companiei. În acest context este necesar ca între activitățile sistemelor de concepție și fabricație să se asigure o adaptabilitate. Aceasta înseamnă că rezultatul (*output*) pentru o etapă să poată fi preluat ca intrare (*input*) pentru o activitate ulterioară și acest lucru să se desfășoare fără ca factorul uman care realizează transferul să adauge informații suplimentare.

## 1.2.4. Proiectarea constructivă și tehnologică a modulelor (subansamblurilor) și ansamblurilor generale

### Studiul de design

Activitatea de proiectare modernă a subansamblurilor și ansamblurilor electronice începe cu un studiu de design.

*Studiul de design are ca scop determinarea soluției generale cu privire la forma, dimensiunile principale, politica de tipizare a blocurilor, prescripțiile ergonomice și estetica produsului.*

Rolul coordonator pe care îl are design-ul în proiectarea produsului electronic a apărut ca o necesitate socială, deoarece impactul produsului cu lumea înconjurătoare nu trebuie să provoace reacții negative, de respingere. Din acest considerent, proiectantul de produse electronice își extinde preocupările de la produsul singular la întreg sistemul din care face parte, planificând întreaga activitate, antrenând specialiști din diferite domenii de activitate pentru dezvoltarea produsului și anticiparea anumitor situații.

Este un mod nou de abordare a creației industriale, în care metodologia design-ului își are locul bine stabilit, design-ul fiind cel ce sintetizează și valorifică informațiile provenite din studiile de psihologie, sociologie, marketing, tehnologie și analize economice.

Participarea design-ului la creația industrială este cu atât mai importantă cu cât societatea tinde să renunțe la standardizare în favoarea diversificării. Aceasta este strâns legată de tehnologiile automatizate și de nivelul industrial al fiecărei țări. Pe măsură ce tehnologiile devin tot mai complexe, costul diversificării devine comparabil cu cel al standardizării, deoarece trecerea de la o fabricație la alta se face cu întreruperi minime în procesul tehnologic.

Automatizarea industrială se îndreaptă tot mai mult spre diversificare și nu spre serii mari standardizate. Ideea seriilor mari standardizate ce par a fi economice se dovedește a fi falsă, deoarece, pe zi ce trece, produsele respective își găsesc tot mai puțini cumpărători, apărând stocuri nevandabile.

Design-ul poate pune la dispoziția industriei electronice produse care satisfac o gamă cât mai mare de preferințe, realizate cu un consum cât mai mic de materiale și energie, generând o evoluție permanentă a tehnologiei și culturii prin calitățile funcționale și estetice pe care le conferă produselor industriale.

În prezent, în domeniul industriei electronice se folosesc structuri din aluminiu și mase plastice, care permit utilizarea unor tehnologii de mare productivitate, obținerea unor calități estetice superioare și a unor mase foarte reduse.

*Design-ul aparatelor presupune rezolvarea următoarelor probleme: structura aparatelor, finisajul aparatelor și inscripționarea acestora.*

În ceea ce privește *structura aparatelor* este necesar să se abordeze separat structura aparatelor electronice de laborator și structura aparatelor electronice de uz casnic, care include și grupa aparatelor portabile.

În cazul unui studiu de caz pentru aparatura electronică de laborator s-a dovedit a fi economică realizarea de profiluri din aluminiu, deoarece seriile de aparate sunt mici și diverse din punct de vedere al gabaritului. Nu sunt lipsite de interes nici profilurile din tablă de oțel ambutisate și acoperite galvanic cu diferite metale (Zn, Cd ș.a.).



Existența pe plan mondial a mai multor *sisteme modulare* (cum ar fi de exemplu, modulul de 20 mm și modulul de 19") a dus la impunerea unui sistem liber pe cele trei dimensiuni. Dacă la aceasta se mai adaugă faptul că se utilizează sertare interschimbabile și suprapunerea de aparate pentru economie de spațiu și dacă se ține seama și de posibilitățile de transport și de costul scăzut, apare ca o necesitate adaptarea sistemului profilurilor de aluminiu la aparatura electronică de laborator.

Pentru aparatura de uz casnic, problema unui sistem constructiv unitar este mai dificilă, deoarece intervine o relație nouă și deosebit de importantă, *confortul de utilizare*, rezultat din relația intimă dintre om și obiect. Pornind de la acest parametru, toate celelalte ar trebui, în măsura posibilităților, să participe la realizarea unei relații optime utilizator–produs. Dacă nu se ține cont de acest lucru se poate ajunge la o întrebuintare anevoioasă sau chiar la respingerea produsului de către beneficiar.

*Calitățile ergonomice* ale produsului devin preponderente în studiul de design și, de cele mai multe ori, sistemul constructiv adoptat este îndreptat *spre o tehnologie de prelucrare a maselor plastice sau de turnare sub presiune a aluminiului*, dacă este justificată.

Destinația produsului, determină, printre altele și alegerea tipului corespunzător de masă plastică: polietilenă, polipropilenă, polistiren, ABS, PVC etc. Acestea au prețuri diferite care variază și în funcție de aditivii care se adaugă masei de bază (în special coloranți, antistatizanți etc.).

Ținând seama de marea diversitate de produse electronice, cu diferite destinații, sunt de luat în calcul și *tehnologiile hibride* în sistemele constructive ale aparaturii electronice, cum sunt: *profiluri din aluminiu + tablăambutisată (și acoperită)*; *aluminiu turnat sub presiune + mase plastice*; *folii din mase plastice + profiluri de aluminiu, materiale compozite etc.*

*Finisajul aparatelor* presupune utilizarea unor materiale care se diversifică din ce în ce mai mult, o dată cu punerea la punct a noii tehnologii de fabricație, de acoperire etc.

În funcție de condițiile climatice, de materialele ce compun structura aparatelor se pot folosi pentru finisaj diverse variante, cum ar fi: *vopselurile plastice de tip poliuretanic și vinilic* ce dau efecte de calitate foarte bune, sunt rezistente la condițiile mecano-climatice cele mai dificile, având diferite culori. Aceste vopseluri se pot aplica pe toate tipurile de materiale utilizate la confecționarea structurii aparatelor electronice. Se folosesc deopotrivă *lacuri lucioase și mate*.

Inscripționarea aparatelor a făcut salturi remarcabile de la pantografiere la fotografiere și în ultima vreme serigrafie, ce permite imprimarea unui număr nelimitat de culori pe același panou.

Pentru cazuri deosebite se poate folosi și inscripționarea cu *fascicul laser*, care nu dislocă material ci modifică structura materialului supus radiației, creând o diferență de culoare între zona radiată și materialul de bază neradiat. Design-ul subansamblurilor (modulelor) este marcat de *tipizarea blocurilor funcționale* care trebuie prelungită până la sistemul lor constructiv și la elementele mecanice și electrice de legătură.

### **Elaborarea și omologarea prototipului**

*Realizarea prototipului* unui produs este utilă, în principal, pentru a verifica funcționalitatea acestuia în limitele performanțelor stabilite.

Este necesar să se aibă în vedere totodată și concluziile studiului de design, precum și posibilitățile de reproductibilitate în vederea producției, urmărindu-se intuirea de detaliu a construcției definitive, a tehnologiei și a sculelor.

Design-ul oricărui aparat sau echipament electronic este, înainte de toate, o *construcție mecanică*, ce trebuie să funcționeze ireproșabil. În această construcție intervin, de regulă, o serie de elemente constructive de mecanică fină. Dar, în afară de aceasta, funcționalitatea este grevată de servituții esențiale din punct de vedere electronic. De aceea, răspunderea realizării prototipului revine inginerului electronist. Din motive economice, prototipul se execută numai cu scule existente sau cu dispozitive simple, în secții speciale de prototipuri, utilizând multă manoperă de prelucrare, ajustaj, montaj și reglaj, pe baza unei documentații constructive provizorii și, pe cât posibil, folosind materiale și metode de execuție cât mai apropiate de cele ce vor fi utilizate în producție.

*Omologarea prototipului* constă în verificarea performanțelor obținute de prototip prin *încercări și măsurători de laborator*, de către proiectant și de către un organ neutru, pentru a se putea sesiza greșelile sistematice și subiective.

Rezultatele încercărilor și măsurărilor se înscriu într-un buletin de încercări, care joacă un rol important în aprecierea produsului.

### **Proiectul de execuție și documentația tehnologică**

Pe baza rezultatelor obținute la elaborarea, încercarea și măsurarea prototipului, precum și a recomandărilor făcute la omologarea acestuia, se trece la realizarea construcției definitive. Se precizează fiecare detaliu constructiv (formă și dimensiuni, tratament, material, acoperire protectoare, amplasarea organelor de fixare, a pieselor de reglaj etc.), se stabilesc forma și traseele circuitelor electrice și design-ul. În această etapă de asimilare a produsului se indică și *tehnologiile de fabricație*, și se *definitivează* desenele de detaliu și de ansamblu. Rezultatul acestei faze se concretizează prin *proiectul de execuție*, care urmează să fie corectat, parțial, într-o fază ulterioară.

Pe baza desenelor de execuție și a mărimii seriei de fabricație se stabilesc tehnologiile de fabricație, mașinile unelte și echipamentele necesare, SDV-urile, spațiile de producție, fluxurile tehnologice, specializarea utilajelor, punctele și dispozitivele de control, modul de circulație al pieselor și subansamblurilor între faze, planurile de debitare a materialelor, pregătirea și transportul lor la locul de muncă, consumurile specifice și estimarea timpilor de execuție, ceea ce constituie *documentația tehnologică*. Documentația tehnologică se materializează în fișe tehnologice (proceduri de lucru).

#### **1.2.5. Pregătirea fabricației**

Pregătirea fabricației cuprinde următoarele activități:

- proiectarea și execuția sculelor, verificatoarelor și dispozitivelor (SDV-uri);

- proiectarea și execuția utilajelor nestandardizate de fabricație și control.

La elaborarea proiectelor de SDV-uri și utilaje concură unități specializate de proiectare, iar la execuția acestora, matrițerii și secțiile de automatizare.

O atenție deosebită se acordă sculelor complexe (cu care se execută mai multe operații simultan) și sculelor multiple (pentru mai multe piese simultan), în vederea creșterii productivității utilajelor.

De asemenea, se urmărește alimentarea automată a mașinilor, separarea discurilor și controlul statistic sau automat, automatizarea unor operații de pregătire și montaj al pieselor.

Pentru verificarea, sortarea și reglarea subansamblurilor și montajelor electrice, magnetice, electromagnetice și electronice se proiectează și se execută dispozitive și utilaje tehnologice, care să permită operații rapide și obiective, vizând pe cât posibil automatizarea lor.

După definitivarea SDV-urilor și a utilajelor se trece la *execuția unui prototip cu scule*, a cărei funcționalitate demonstrează că piesele executate cu SDV-uri sunt corespunzătoare.

*Executarea seriei zero* (care cuprinde un număr de exemplare, ce se stabilește în funcție de mărimea seriei de fabricație) se face după testarea prototipului cu SDV-uri și definitivarea sculelor și utilajelor. În această etapă se experimentează fabricația în condiții de producție și cu personalul de producție.

În această fază se corectează și se completează documentația de fabricație, care capătă forma definitivă.

Din lotul seriei zero, se încearcă și se măsoară în laboratoare un eșantion format dintr-un număr de exemplare, prelevat conform normativelor.

Buletinul cu rezultatele acestor încercări și măsurători servește la *omologarea produsului*.

După omologarea produsului, se execută o nouă *documentație corectată și completată* pe baza observațiilor și a recomandărilor comisiei de omologare a produsului.

## 1.2.6. Fabricația

Procesul de fabricație cuprinde următoarele activități:

- aprovizionarea cu materii prime și materiale;
- procesele tehnologice de fabricație pentru piese și subansambluri;
- fabricarea de piese și subansambluri;
- montajul produselor și reglajul acestora;
- ambalarea și desfacerea.

După intrarea în fabricație, produsul este urmărit sistematic prin operații de control care au rolul de a identifica toate detaliile care tind ca produsul să nu fie conform și intervenind cu corecturile necesare. Dintre cauzele care conduc la obținerea unor produse neconforme se pot desprinde: nerespectarea riguroasă a detaliilor tehnologiei de către executanți; calitatea necorespunzătoare a SDV-urilor

și utilajelor și uzurii acestora; calitatea necorespunzătoare a materialului; controlul necorespunzător.

Produsul este supus unor verificări periodice, urmărind respectarea condițiilor tehnice prescrise în documentația tehnică sau în caietul de sarcini și la nevoie se vor lua măsuri intervenind pe fluxul tehnologic acolo unde este cazul.

În condițiile în care pentru unele subansambluri pentru care există un sistem integrat de proiectare și fabricație (așa cum este cazul modulelor electronice), intervenția pe fluxul tehnologic este foarte ușor de făcut, și atunci când se constată o problemă tehnică pe linia de fabricație ea poate fi rezolvată prin intervenții în etapa de proiectare, dacă este cazul, și toată această acțiune se poate desfășura într-un timp foarte scurt.

### **1.2.7. Exploatarea și întreținerea produselor electronice**

Exploatarea rațională și întreținerea produselor electronice în exploatare constituie una dintre condițiile esențiale ale satisfacerii cerințelor beneficiarului.

Printre problemele tehnice ridicate de exploatarea și întreținerea produselor electronice se remarcă:

- organizarea serviciului de exploatare;
- constituirea stocului de piese de schimb;
- evidența comportării aparatelor și echipamentelor electronice din punctul de vedere al fiabilității;
- organizarea inspecțiilor și reînnoirilor;
- organizarea depanării etc.

Datorită complexității din ce în ce mai sporite a echipamentelor electronice, își face loc tot mai mult tendința ca exploatarea și întreținerea (asigurarea mentenanței) să rămână în sarcina producătorului. În aceste condiții, producătorul este nevoit să-și creeze unități de „service”.

În prezent, pe lângă o calitate deosebită a produselor, asigurarea de către firma producătoare de echipamente a unui „service” corespunzător, constituie una din condițiile cuceririi și menținerii pieței.

## **1.3. Calitatea în industria electronică**

### **1.3.1. Definiții. Concepte generale**

În condițiile unei dezvoltări fără precedent și a unei concurențe din ce în ce mai acerbe, înregistrate în special în domeniul industriei electronice (în ultimii 30 de ani în microelectronică complexitatea a crescut cu un factor de aproximativ patru la fiecare trei ani), problema asigurării calității produselor capătă o importanță din ce în ce mai mare.

Creșterea deosebită a importanței calității a fost determinată, în principal, de sporirea continuă a exigenței clienților și a societății, creșterea complexității produselor și a proceselor de realizare a acestora.

Atenția acordată problemei calității pune în lumină, însă și dificultatea unei definiții a acesteia, care să fie atât completă, cât și precisă.

În sensul cel mai cuprinzător, *calitatea este însușirea unui produs de a satisface o necesitate reală*. În sensul cel mai precis, *calitatea reprezintă proprietatea ca performanțele produsului să se înscrie între limitele specificate*.

Ambele definiții sunt perfectibile. Prima nu permite constituirea unei măsuri a calității, iar a doua presupune existența unui proiect perfect, în care toate performanțele și limitele lor sunt prevăzute cu exactitate, ceea ce, în realitate nu este posibil. Cele două definiții se completează. De aceea, definiția precisă este utilizată ca fundament al teoriei matematice a calității, fiind mereu amendată și extinsă în lumina definiției complete.

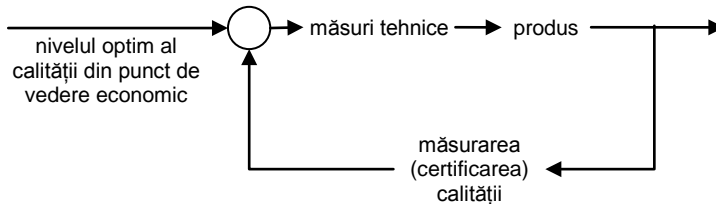


Figura 1-3 Controlul cibernetic al nivelului de calitate

Domeniul tehnologiei electronice, prin dinamismul lui, a condus la conturarea unei concepții noi în domeniul calității, concepție care s-a impus și în domenii mai tradiționale. Dezvoltarea unei teorii a calității capabile să dea o măsură exactă a calității produselor a însemnat un pas fundamental în cadrul acestei concepții, care se axează pe păstrarea unui nivel controlabil al calității, optim din punct de vedere economic.

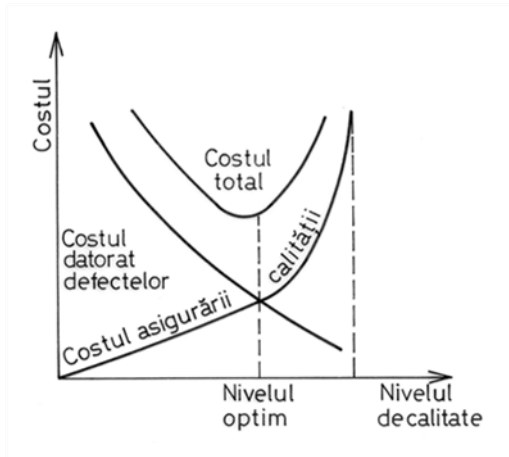


Figura 1-4 Nivelul optim al calității

În Figura 1-3 se pun în evidență două trăsături esențiale ale concepției actuale în domeniul calității.

Prima trăsătură care se desprinde este aceea că *scopul activității de control nu este îndreptat înspre creșterea calității cu orice preț, ci spre menținerea unui nivel optim al acesteia*. Nivelul optim de calitate, apreciat din punct de vedere al costurilor, rezultă punând în balanță cheltuielile legate de consecințele unei calități slabe a produselor (produse cu mai multe neconformități) cu cheltuielile datorate asigurării calității (Figura 1-4).

În acest sens este necesar ca în domeniul teoriei calității să se utilizeze modelele statistico-matematice, acestea fiind singurele modele capabile să ofere concluzii rapide și sigure la un nivel de precizie prestabil.

### 1.3.2. Noțiuni despre calitate

Caracterul dinamic al tehnologiei electronice implică în afara precizării riguroase a noțiunii de calitate, și o îmbogățire a conținutului ei, în special în ceea ce privește caracterul evolutiv în timp. În domeniile tradiționale, metodele coeficienților de siguranță garantau faptul că, dacă un produs este corespunzător la momentul realizării sale, el își păstrează proprietățile un timp suficient de lung comparativ cu durata lui de utilizare.

Evoluția rapidă a materialelor și tehnologiilor de fabricație aplicate la construcția componentelor electronice și a aparaturii electronice face ca o asemenea metodă să fie inoperantă. Prin urmare în cadrul noțiunii de calitate se operează cu următorii parametri: *conformitatea, fiabilitatea și mentenabilitatea*.

*Conformitatea include conținutul tradițional al noțiunii de calitate: proprietatea ca produsul să fie corespunzător din punct de vedere al condițiilor impuse prin proiect și din punct de vedere al cerințelor beneficiarului.*

Conform acestui concept în baza standardului actual de asigurare a calității (SR EN ISO 9001) orice abatere a produsului de la condițiile impuse poartă denumirea de *neconformitate*.

*Fiabilitatea reprezintă domeniul calității care se referă la evoluția în timp a performanțelor produsului. Aceasta se definește ca fiind proprietatea unui produs (sistem, subsistem, aparat, componentă) de a-și păstra performanțele în limitele stabilite într-un interval de timp și în condiții determinate.*

Ea se notează cu R (*Reliability*) și se exprimă prin probabilitatea ca funcția cerută să fie îndeplinită în timpul unei anumite perioade de timp T – fără ca unitatea (produsul) respectivă să se defecteze. După cum rezultă din definiție, fiabilitatea ne dă probabilitatea ca în timpul perioadei T să nu se producă nici o defectare care să influențeze îndeplinirea funcției cerute – la nivelul (produsului) unității considerate. Aceasta nu înseamnă că părțile redundante n-au voie să se defecteze. Dimpotrivă, ele pot să se defecteze și – fără întreruperi la nivelul unității considerate, dar cu ajutorul mentenanței – pot fi menținute în funcțiune. Din acest motiv realizarea fiabilității dorite la produsele realizate cu ajutorul tehnicii și tehnologiilor moderne reprezintă o problemă mult mai greu de rezolvat decât în cazul produselor tehnice realizate cu tehnici mai puțin automatizate.

Alături de costurile de fabricație și de parametrii tehnici și fizici ai produsului respectiv, fiabilitatea este un factor hotărâtor de evaluare. Tehnica

fiabilității – ca latură a sistemului de asigurare a calității – are sarcina de a recunoaște din vreme toate posibilitățile de defectare, să descopere cauzele și să prevadă măsurile care să împiedice apariția defectelor.

În acest context fabricantul de componente electronice se va preocupa de fizica mecanismelor de defectare și, pe această bază, va trebui să găsească o tehnologie care să poată asigura o fiabilitate optimă a componentelor corespunzătoare unui nivel de calitate optim, din punct de vedere al costurilor.

Dimpotrivă, misiunea principală a fabricantului de aparatură și echipamente electronice este de a realiza – cu ajutorul componentelor pe care el nu le poate influența, practic, în nici un fel și care au o fiabilitate destul de scăzută – sisteme tehnice cu fiabilitate impusă (de obicei ridicată).

*Mentenabilitatea reprezintă capacitatea de restabilire a performanțelor* determinată de asigurarea eficienței în exploatare a produsului. Ca și fiabilitatea, mentenabilitatea este un parametru de concepție al sistemelor electronice. Ea este o calitate a echipamentului în întregime, care-l face ușor de reparat la locul de utilizare, sau – dacă este vorba despre un echipament mic – în atelier. Mentenabilitatea este realizată favorabil, dacă media timpului total de diagnostic, reparație, înlocuire și control este inferioară valorii dorite pentru toate defectările relativ frecvente pentru un echipament.

### 1.3.3. Indicatori de calitate

Toate laturile noțiunii de calitate sunt descrise prin modele statistico-matematice, pe baza cărora se definesc *indicatorii de calitate*, mărimi ce caracterizează cantitativ calitatea unui produs.

Pentru a defini indicatorii de calitate se va considera în continuare că este vorba despre un produs electronic, caracterizat printr-o singură performanță. Această restrângere nu diminuează generalitatea definițiilor.

#### Indicatori de conformitate

Conform interpretării statistice, caracteristica măsurabilă  $y$  este o variabil aleatoare continuă, caracterizată de o anumită densitate de probabilitate  $f(y)$ .

Pentru exemplificare, se prezintă în Figura 1-5, o densitate de probabilitate normală, model statistic des (dar nu exclusiv) utilizat în analiza conformității produselor. În ansamblul său, densitatea de probabilitate asociată caracteristicii  $y$  descrie complet conformitatea produsului.

Mai sintetic, aceasta poate fi exprimată prin media  $\mu$  și dispersia  $\sigma$  ale caracteristicii, interpretate ca variabile aleatoare, și prin proporția de defecte  $p$  dată de probabilitatea de depășire a limitelor de toleranță. Se obțin, astfel, trei indicatori de conformitate dependenți. Media  $\mu$  și dispersia  $\sigma$  sunt indicatori utilizați îndeosebi în controlul prin măsurare, iar proporția de defecte  $p$  în controlul atributiv. Se observă că proporția de defecte  $p$  este cu atât mai redusă cu cât media este mai apropiată de centrul câmpului de toleranță și cu cât dispersia este mai mică. Definițiile matematice ale indicatorilor de conformitate sunt date în Tabelul 1-1.

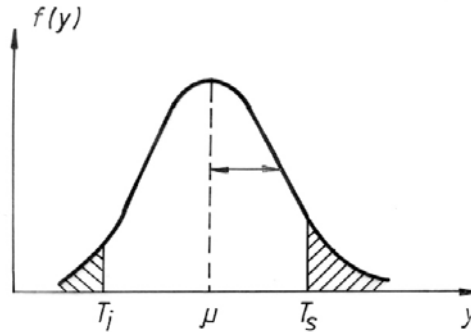


Figura 1-5 Definierea indicatorilor de conformitate

Tabelul 1-1 Simboluri și definiții matematice pentru principalii indicatori de conformitate

Indicator	Simbol	Definiție
Densitatea de probabilitate a performanței	$f(y)$	Limita raportului între probabilitatea ca performanța să fie situată în intervalul $(y, y + \Delta y)$ și mărimea acestui interval, când $\Delta y \rightarrow 0$ : $f(y) = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{P(y \leq Y < y + \Delta y)}{\Delta y}$
Media caracteristicii măsurabile	$\mu$	Valoarea medie a performanței produsului: $\mu = \int_0^{\infty} y \cdot f(y) dy$
Dispersia caracteristicii măsurabile	$\sigma$	Dispersia performanței produsului: $\sigma = \int_0^{\infty} (y - \mu)^2 f(y) dy$
Proporția defectelor	$p$	Probabilitatea ca performanța să fie în afara limitelor de toleranță $T_i$ și $T_s$ : $p = \int_0^{T_i} f(y) dy + \int_{T_s}^{\infty} f(y) dy$

O cale mai directă este utilizarea noțiunii de defectare în timp: performanța  $y$  se modifică printr-un proces aleator nestaționar, atingând la un moment dat limita câmpului de toleranță, moment la care se produce defectarea produsului. Durata de la un moment inițial oarecare (la care se știe că produsul este corespunzător) până la defectare este o variabilă aleatoare, ce caracterizează statistic fiabilitatea produsului.

Indicatorii de fiabilitate sunt mărimi caracteristice ale acestei variabile aleatoare, cum ar fi: *funcția de repartiție*, *densitatea de probabilitate*, *media*, *dispersia* etc. Simbolurile și definițiile lor matematice sunt cuprinse în Tabelul 1-2. Dintre indicatorii cuprinși în această tabelă, cea mai mare importanță pentru caracterizarea produselor electronice o au funcția de fiabilitate  $R(t)$ , rata de defectare  $z(t)$  și media timpului de funcționare  $m$ . Este de dorit ca toate valorile



acestor trei indicatori să fie precizate în vederea caracterizării produsului, în caz contrar rezultând o viziune unilaterală asupra fiabilității acestuia.

**Tabelul 1-2 Simboluri și definiții matematice pentru principalii indicatori de fiabilitate**

Indicator	Simbol	Definiție	Unitate de măsură
Funcția de repartiție a timpului de funcționare	$F(t)$	Probabilitatea ca un produs să se defecteze în intervalul $(0, t)$ : $F(t) = P(T \leq t)$	-
Funcția de fiabilitate	$R(t)$	Probabilitatea ca un produs să funcționeze fără defectare în intervalul $(0, t)$ , în condiții determinate: $R(t) = P(T > t)$	-
Densitatea de probabilitate a timpului de funcționare	$f(t)$	Limita raportului dintre probabilitatea de defectare în intervalul $(t, t + \Delta t)$ și mărimea intervalului $\Delta t$ , când $\Delta t \rightarrow 0$ : $f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t}$	ore <sup>-1</sup>
Rata (intensitatea) de defectare	$z(t)$	Limita raportului dintre probabilitatea de defectare în intervalul $(t, t + \Delta t)$ condiționată de buna funcționare în intervalul $(0, t)$ și mărimea intervalului $\Delta t$ , când $\Delta t \rightarrow 0$ : $z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t / T > t)}{\Delta t}$	ore <sup>-1</sup>
Media timpului de funcționare fără defectări: -MTTF; -MTFF; -MTBF	$m$	Valoarea medie a timpului de funcționare: $m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$	ore
Dispersia timpului de funcționare	$D$	Momentul centrat de ordinul doi al timpului de funcționare: $D = \int_0^{\infty} (t - m)^2 f(t) dt$	ore <sup>2</sup>
Abaterea medie pătratică a timpului de funcționare	$\sigma$	$\sigma = \sqrt{D}$	ore
Cuantila timpului de funcționare	$t_F$	Timpul în care un produs funcționează cu o anumită probabilitate $(1 - F)$ : $P(T \leq t_F) = F$	ore

*Funcția de fiabilitate* reprezintă probabilitatea de bună funcționare într-un interval de timp bine determinat, sau altfel spus, îndeplinirea cu succes a unei misiuni bine precizate.

În domeniul componentelor electronice, un astfel de indicator este mai puțin util decât *media timpului de funcționare până la defectare*. Acest din urmă indicator nu necesită precizări suplimentare pentru definirea lui și permite o ierarhizare comodă a componentelor din punctul de vedere al fiabilității. Din contră, în cazul sistemelor electronice, funcția de fiabilitate este un indicator mai adecvat, deoarece un sistem poate fi inferior altuia, în medie, dar superior în condiții de utilizare particulare.

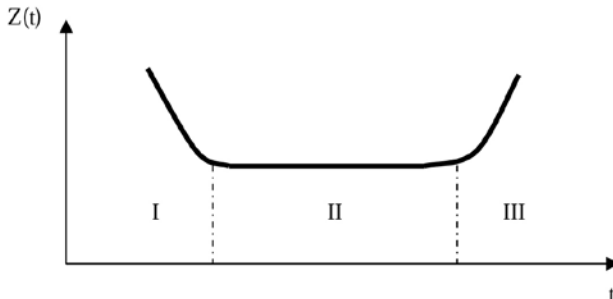
**Observații:**

1. După caz, în loc de ore, indicatorii de fiabilitate pot fi exprimați în număr de acționări, cicluri de funcționare etc.
2. Funcția de fiabilitate pe un interval  $(t_1, t_2)$  se definește prin relația:

$$R(t_1, t_2) = \frac{R(t_2)}{R(t_1)}$$

3. Media timpului de funcționare reprezintă valoarea medie a timpului de funcționare până la defectare (*MTTF*), în cazul produselor nereparabile, sau până la prima defectare (*MTFF*), în cazul produselor reparabile. Dacă repararea poate fi asimilată cu înlocuirea, reprezintă valoarea medie a timpului de funcționare între două defectări succesive (*MTBF*).

În sfârșit, *rata de defectare* prezintă importanță deoarece permite o distincție între tipurile de uzură ale produselor (Figura 1-6).



**Figura 1-6 Rata de defectare**

În Figura 1-6 se prezintă cea mai generală formă a ratei de defectare. În această reprezentare se disting trei zone (perioade):

- în prima perioadă, rata de defectare scade (*uzură negativă*) și probabilitatea de defectare a sistemului este cu atât mai scăzută cu cât vârsta acestuia este mai mare;
- în a doua perioadă, caracterizată de o perioadă de defectare constantă, *uzura sistemului este nulă*;
- în a treia perioadă, rata de defectare devine *pozitivă*.

Duratele celor trei perioade diferă de la un produs la altul. În cazul componentelor electronice, perioada uzurii nulă sau aproape nulă este destul de îndelungată, în timp ce în cazul echipamentelor, cea mai întinsă este, în general, perioada uzurii negative, cu o viteză de scădere mică a ratei de defectare (o pantă mică a curbei de variație).

*Exprimarea analitică a indicatorilor de fiabilitate se bazează pe adoptarea unei anumite legi de repartiție a timpului de funcționare până la defectare. Aceste legi de repartiție caracterizează categorii largi de produse, fără să se poată stabili o corespondență biunivocă între legea de repartiție și produsul considerat.*

**Tabelul 1-3 Simboluri și definiții matematice pentru principalii indicatori de fiabilitate**

Indicator	Legea de repartiție a timpului de funcționare			
	Exponențială	Normală	Weibull	Log-normală
$F(t)$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\Phi\left(\frac{t - m_0}{\sigma_0}\right)$	$1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$\Phi\left(\frac{\ln(t) - m_0}{\sigma_0}\right)$
$R(t)$	$e^{-\lambda t}$	$\Phi\left(\frac{m_0 - t}{\sigma_0}\right)$	$\exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$\Phi\left(\frac{m_0 - \ln(t)}{\sigma_0}\right)$
$f(t)$	$\lambda - e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - m_0}{\sigma_0}\right)^2\right]$	$\frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$\frac{1}{t\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t) - m_0}{\sigma_0}\right)^2\right]$
$z(t)$	$\lambda$	$\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m_0 - t}{\sigma_0}\right)^2\right]$	$\frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta}$	$\frac{1}{t\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t) - m_0}{\sigma_0}\right)^2\right]$
$m$	$\frac{1}{\lambda}$	$m_0$	$\gamma + \eta\gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$	$\exp\left(m_0 + \frac{\sigma_0^2}{2}\right)$
$D$	$\frac{1}{\lambda^2}$	$\sigma_0^2$	$\eta^2\left[\gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) + \gamma^2\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)\right]$	$\exp(2m_0 + \sigma_0^2) \cdot [\exp(\sigma_0^2 - 1)]$
$\sigma$	$\frac{1}{\lambda}$	$\sigma_0$	$\eta\sqrt{\gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) + \gamma^2\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}$	$\exp\left(m_0 + \frac{\sigma_0^2}{2}\right)\sqrt{\exp(\sigma_0^2 - 1)}$
$t_F$	$\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1}{1 - F}$	$m_0 + \Phi^{-1}(F)\sigma_0$	$\gamma + \eta\sqrt{\ln \frac{1}{1 - F}}$	$\exp\left[m_0 + \Phi^{-1}(F)\sigma_0\right]$

**Observații:**

- $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  este funcția Laplace, iar  $\Phi^{-1}$  este inversa acesteia.
- $\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty t^{\gamma-1} \cdot \exp(-t) dt$  este funcția Euler de speța 1.

În tabela 1.3 sunt prezentate legile de repartiție cele mai utilizate pentru caracterizarea fiabilității componentelor și a sistemelor electronice și se dau expresiile indicatorilor de fiabilitate pentru fiecare lege de repartiție în parte.

Se poate observa că, în cazul legii de repartiție exponențiale, se obține o rată de defectare constantă și egală cu parametrul  $\lambda$  al legii, ceea ce face ca această lege de repartiție să fie foarte mult utilizată în domeniul aprecierii fiabilității componentelor și sistemelor electronice. De asemenea, se poate aprecia că, în cazul acestei legi, rata de defectare este inversul mediei timpului de funcționare, astfel încât, oricare dintre acești doi indicatori poate fi adoptat pentru caracterizarea sintetică a fiabilității unui sistem.

În toate cazurile în care ipoteza unei rate de defectare constantă este justificată, se preferă utilizarea acesteia în locul mediei timpului de funcționare,

eliminându-se astfel inconvenientul subiectiv al unor valori ale ratei de defectare  $\lambda \cong 10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ ore}^{-1}$ , iar anumite tipuri de circuite integrate ating chiar valori de  $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ ore}^{-1}$ . Exprimând asemenea nivele de fiabilitate cu ajutorul mediei timpului de funcționare s-ar crea impresia falsă a imposibilității defectării prin comparație cu scara umană a valorilor timpului. De exemplu, un circuit integrat cu rata de defectare  $\lambda = 10^{-6} \text{ ore}^{-1}$  are o medie a timpului de funcționare de un milion de ore. Funcția sa de fiabilitate într-un interval de funcționare de un an (10 000 de ore) este de 0,99, ceea ce, pentru o singură componentă, nu este deloc exagerat.

Noțiunea de calitate nu este epuizată prin definirea indicatorilor de conformitate, fiabilitate și mentenabilitate. În prezent standardele de calitate, ca de altfel toate standardele din România, se aliniază la normele Comunității Europene.

## Cap.2. Proprietățile tehnice și tehnologice ale materialelor electrotehnice

Cunoașterea exactă a proprietăților materialelor electrotehnice reprezintă o cerință fundamentală pentru utilizarea corectă a acestora. Într-adevăr, introducerea într-un agregat a unui material cu proprietăți incompatibile cu mediul în care se află acesta poate avea consecințe nedorite atât asupra duratei de viață a agregatului însuși, cât și asupra instalațiilor electrice aferente.

Domeniile de utilizare a materialelor electrotehnice fiind foarte largi, iar solicitările la care acestea sânt supuse fiind foarte diferite (atât ca natură cât și ca intensitate), nu se poate face o împărțire strictă a proprietăților materialelor în „principale” și „secundare”. Aceasta cu atât mai mult cu cât o serie de proprietăți neelectrice (termice, mecanice) considerate ca „secundare” constituie, de foarte multe ori, criteriile de bază în alegerea materialelor pentru realizarea ansamblurilor fundamentale ale instalațiilor electrice. De aceea se impune o cunoaștere completă a tuturor proprietăților materialelor.

### 2.1. Proprietăți chimice

Deoarece materialele electrotehnice se utilizează fie grupate în diferite scheme de izolație, fie în contact direct cu mediul înconjurător sau cu alte medii utilizate ca agenți de răcire, prezintă o importanță deosebită cunoașterea *compatibilității* fiecărui material față de corpurile cu care vine în contact. Un exemplu clasic de incompatibilitate îl constituie izolarea directă a conductoarelor din cupru cu cauciuc vulcanizat, deoarece cuprul reacționează cu sulfurile (pe care îl extrage din cauciuc) ceea ce determină o deteriorare rapidă a izolației.

*Coroziunea* reprezintă acțiunea distructivă, chimică sau electrochimică, pe care o serie de agenți chimici (oxigenul, apa, acizii etc.) o exercită asupra corpurilor (în special asupra metalelor). Din acest punct de vedere, sensibilitatea unui material depinde de natura și gradul său de puritate, de natura și concentrația impurităților pe care le conține, precum și de caracteristicile agenților activi conținuți în mediile cu care materialul vine în contact.

*Solubilitatea* unui material se apreciază prin cantitatea de substanță care trece în soluție în unitatea de timp de pe unitatea de suprafață a materialului sau prin concentrația soluției saturate a materialului dizolvat într-un solvent dat. O substanță se dizolvă mai ușor într-un solvent de aceeași natură chimică și care conține în moleculele sale grupări de atomi asemănătoare cu ale substanței date. Astfel, hidrocarburile saturate solide nepolare sau slab polare (parafina etc.) se

dizolvă ușor în hidrocarburi lichide (benzen etc), substanțele polare se dizolvă ușor în lichide polare etc. Solubilitatea scade cu scăderea temperaturii și cu creșterea gradului de polimerizare a substanței de dizolvat.

*Rezistența la solvenți* reprezintă capacitatea unui material de a-și păstra proprietățile atunci când vine în contact cu un solvent lichid sau cu vaporii săi.

*Indicele de aciditate*  $I_a$  caracterizează dielectricii lichizi și reprezintă cantitatea de hidroxid de potasiu (KOH), măsurată în mg, necesară pentru neutralizarea acizilor organici existenți într-un gram din materialul considerat, în cazul uleiului de transformator, indicele de aciditate are valori cuprinse între 0,03 și 0,05 mg KOH/g.

## 2.2. Proprietăți fizice

*Porozitatea*  $P$  a unui corp se definește prin raportul dintre volumul porilor  $V_p$  și volumul total  $V_t$  al corpului  $P = V_p/V_t$ .

Porozitatea prezintă importanță îndeosebi în cazul materialelor electroizolante. Acestea pot prezenta pori deschiși, semiînchiși sau închiși, cele care conțin primele două tipuri de pori nefiind utilizate în medii umede decât impregnate. Cele mai reprezentative materiale poroase sunt produsele pe bază de celuloză (la care porozitatea poate ajunge la 50%).

*Permeabilitatea față de aer*  $P_a$  se caracterizează prin volumul de aer  $V_a$  care străbate, într-un interval de timp  $\Delta t$ , o suprafață de arie  $A$  a unei mostre de material de grosime  $h$ , datorită diferenței dintre presiunile  $p_1$  și  $p_2$  ale aerului pe cele două fețe ale mostrei de încercat:

$$P_a = \frac{V_a \cdot h}{A(p_1 - p_2) \Delta t} \left[ \frac{m^4}{N \cdot s} \right] \quad (1)$$

Pentru hârtie electrotehnică de 0,01 m,  $P_a = 3,2 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{m^4}{N \cdot s} \right]$ .

*Permeabilitatea la umiditate*  $P_u$  caracterizează capacitatea unui corp de a se opune trecerii vaporilor de apă prin el și prezintă o importanță deosebită în alegerea materialelor pentru protecția împotriva umidității (lacuri de acoperire, mantale pentru cabluri etc.) (Tabelul 2-1).

Se determină cu relația:

$$P_u = \frac{m \cdot h}{A(p_1 - p_2) \Delta t} \left[ \frac{kg \cdot m}{N \cdot s} \right] \quad (2)$$

în care  $m$  reprezintă masa vaporilor de apă, iar  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $A$ ,  $h$  și  $\Delta t$  au aceeași semnificație ca în Tabelul 2-1. Valorile sale depind de natura și structura materialelor și sunt cuprinse între  $2,11 \cdot 10^{-16} \left[ \frac{kg \cdot m}{N \cdot s} \right]$  (pentru polietilenă) și  $7 \cdot 10^{-13} \left[ \frac{kg \cdot m}{N \cdot s} \right]$  (pentru acetat de celuloză).

Tabelul 2-1 Higroscopicitatea și permeabilitatea la umiditate a unor materiale electroizolante

Materialul	Higroscopicitatea după 24 de ore în apă [%]	Permeabilitatea la umiditate $10^{15} \frac{kg \cdot m}{N \cdot s}$
Rășină fenolică	0,1...0,4	100
Polietilenă	0,01	2...4
Polistiren	0,01...0,05	56...73
Policlorură de vinil	0,01...1,0	10...23
Polimetacrilat	0,3...0,5	85
Rășini epoxi	0,1...0,4	21...23
Poliamide	0,04...2,0	233
Rășini melaminice	0,5...0,7	-

*Umiditatea U* reprezintă cantitatea de apă aflată într-un material și se exprimă în procente față de cantitatea maximă de apă pe care o poate conține materialul. Această caracteristică este legată de porozitatea corpului, de umiditatea și temperatura mediului înconjurător, precum și de intervalul de timp în care corpul se află în mediul considerat. După un anumit timp corpul ajunge la o umiditate de echilibru  $U_e$ , a cărei valoare depinde de natura și temperatura mediului ambiant. În cazul materialelor polare (sticlă, mică etc.) la care interacțiunea dintre moleculele de apă și material este mai puternică decât cea dintre moleculele de apă se formează o pătură de apă la suprafața materialului. Pentru corpurile fibroase se stabilește o umiditate convențională: aceasta reprezintă valoarea umidității de echilibru a materialului aflat în aer, în condiții normale de presiune, temperatură și umiditate ( $p=10 \text{ N/m}^2$ ,  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $U_{r,aer} \text{ -}65\%$ ).

*Umiditatea relativă* a aerului reprezintă raportul dintre presiunea vaporilor de apă aflați efectiv în aerul din atmosferă și presiunea vaporilor necesari pentru a satura atmosfera.

*Higroscopicitatea H* reprezintă valoarea umidității de echilibru a unui corp și se determină cu relația  $H = (m' - Hm)/Hm$ , în care  $Hm$  reprezintă masa corpului în stare uscată, iar  $m'$  masa corpului ținut timp de 24 h în aer la temperatura normală ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) și  $U_r = 100\%$ . Deoarece pătrunderea umidității provoacă modificări ale proprietăților electrice ale corpurilor, higroscopicitatea se poate determina și prin măsurarea variației permitivității sau conductivității electrice a acestora.

*Absorbția de apă  $A_a$*  caracterizează capacitatea corpurilor de a absorbi și reține apa. Se determină cu relația  $A = (m'' - m)/m''$ , unde  $m$  reprezintă masa corpului în stare uscată, iar  $m''$  masa corpului ținut, un anumit interval de timp, în apă. Absorbția de apă ia valori cuprinse între 0,006% (în cazul polietilenei) și 70% (în cazul fibrei Vulcan).

*Vâscozitatea dinamică  $\eta$*  caracterizează starea de fluiditate a unui lichid și se poate determina cu relația:

$$\eta = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{pr^4 \Delta t}{V \cdot l} \left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right] \quad (3)$$

unde  $V$  reprezintă cantitatea de lichid ce trece în intervalul de timp  $\Delta t$  sub acțiunea presiunii  $p$ , printr-un vas capilar de lungime  $l$  și rază  $r$ .

Vâscozitatea cinematică  $\nu$  reprezintă raportul dintre vâscozitatea dinamică  $\eta$  și densitatea  $\rho$  a lichidului ( $\nu = \eta/\rho$ ) și se măsoară în  $\text{m}^2/\text{s}$ . În cazul uleiului de transformator vâscozitatea cinematică are valoarea  $3,5 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  la  $20^\circ\text{C}$  și  $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  la  $50^\circ\text{C}$ .

## 2.3. Proprietăți mecanice

Piese confectionate din materiale metalice (metale sau aliaje), folosite cu cea mai mare pondere în construcția de mașini și utilaje, sunt supuse în timpul utilizării (exploatării) la acțiunea unor **încărcări mecanice (forțe) exterioare**. Ca efect al acțiunii forțelor exterioare, în aceste piese se creează așa-numitele **forțe interioare sau eforturi** și piesele se deformează.

Pentru a pune în evidența existența forțelor interioare se consideră un corp metalic aflat în echilibru sub acțiunea unui sistem de forțe  $F_1, F_2, F_n$ , așa cum se arată în Figura 2-1 a. Secționând corpul cu un plan virtual (imaginar)  $S$ , se obțin părțile  $I$  și  $II$ , având suprafețele de separare  $S_1$  și  $S_2$ . Pentru menținerea echilibrului părților  $I$  și  $II$  este necesar ca, pe fiecare element de arie  $\Delta A$  al suprafețelor de separare, să acționeze câte o forță interioară de legătura  $\Delta F$ , așa cum se prezintă în Figura 2-1 b. Folosind relația:

$$p_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (4)$$

se definește (în orice punct curent  $P$  asociat unui element de arie  $\Delta A$  al suprafețelor de separare) mărimea vectorială  $p_n$ , numită **tensiune (mecanică) totală sau vector tensiune**, care caracterizează distribuția eforturilor (forțelor interioare) pe unitatea de suprafață a unei secțiuni (virtuale) considerate într-o piesă solicitată mecanic; intensitatea (modulul) vectorului tensiune se măsoară în  $\text{N}/\text{m}^2$  (sau  $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

Conform definiției,  $p_n$  depinde în principal de intensitatea forței  $\Delta F$ , determinată de intensitățile forțelor exterioare și de orientarea elementului de arie  $\Delta A$  (definită de poziția și orientarea planului virtual de secționare  $S$ ). Vectorii tensiune  $p_n$ , corespunzători tuturor orientărilor posibile ale elementului de arie  $\Delta A$  asociat unui punct curent  $P$ , definesc **starea de tensiuni mecanice** în punctul respectiv.

Vectorul tensiune  $p_n$  din orice punct curent  $P$  al secțiunii virtuale  $S$  se poate descompune în două componente: o componentă  $a$ , numită **tensiune (mecanică) normală**, orientată după normala  $n$  a secțiunii  $S$  și o componentă  $T$ , numită **tensiune (mecanică) tangențială**, orientată după o direcție situată în planul secțiunii  $S$ , așa cum se poate observa în Figura 2-1 c.



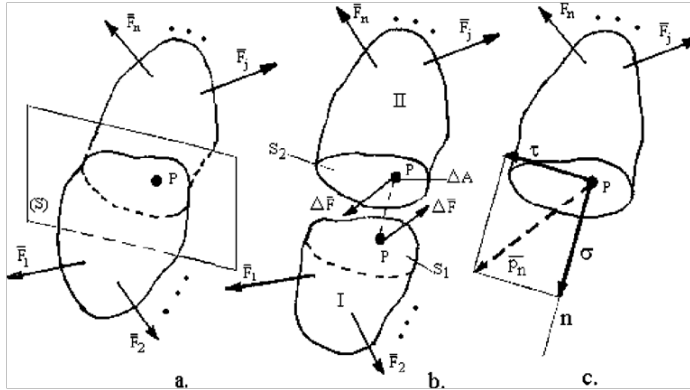


Figura 2-1 Schemele de definire a tensiunilor mecanice în corpurile solide supuse acțiunii unor forțe (încărcări) exterioare

Deformațiile produse corpului de solicitările exterioare depind de stările de tensiuni ce se creează sub acțiunea acestor solicitări. Așa cum se prezintă în Figura 2-1, în funcție de tipul tensiunilor mecanice care acționează, **deformațiile** elementelor de volum ale corpului pot fi: **deformații liniare (alungiri sau scurtări)**, produse prin acțiunea tensiunilor normale și **deformații unghiulare (lunecări)**, produse prin acțiunea tensiunilor tangențiale.

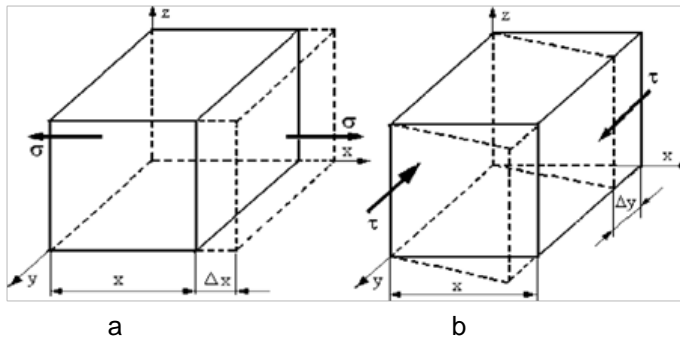


Figura 2-2 Tipuri de deformații produse de tensiunile mecanice: a - deformații liniare; b - deformații unghiulare

Pentru exprimarea analitică a dependențelor dintre tensiunile create sub acțiunea solicitărilor mecanice exterioare și deformațiile produse, se definesc **deformațiile specifice liniare (alungiri sau scurtări specifice)  $\varepsilon$**  și **deformațiile specifice unghiulare (lunecări specifice)  $\gamma$** , cu relațiile:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}; \gamma = \frac{\Delta y}{y} \quad (5)$$

Comportarea unei piese la solicitările mecanice produse de forțele exterioare depinde de anumite însușiri specifice materialului metalic din care este confecționată piesa, numite **proprietăți mecanice**. De obicei, proprietățile

mecanice ale unui material metalic se determină prin **încercări mecanice**, constând din solicitarea unor epruvete (probe cu configurații și dimensiuni bine definite, prelevate din materialul supus cercetării) în condițiile adecvate evidențierii proprietăților urmărite. Cu ajutorul încercărilor mecanice se obțin date calitative privind comportarea materialelor în condițiile de solicitare corespunzătoare acestor încercări și valorile unor mărimi fizice sau convenționale, numite **caracteristici mecanice**, care se pot utiliza ca parametri cantitativi de exprimare a proprietăților mecanice.

### 2.3.1. Elasticitatea materialelor metalice

**Elasticitatea** este proprietatea unui material de a se deforma sub acțiunea solicitărilor mecanice și de a reveni la forma inițială când solicitările și-au încetat acțiunea.

S-a stabilit pe cale experimentală că, în cazul în care solicitările mecanice aplicate asupra unei piese creează stări de tensiuni capabile să producă numai deformații elastice ale materialului acesteia, este valabilă **legea lui Hooke**, adică *dependența dintre tensiunile generate de solicitările mecanice și deformațiile specifice de natură elastică produse este liniară*. Astfel, în cazul unei piese metalice care suferă deformații elastice sub acțiunea unei solicitări de întindere sau compresiune mono-axială, starea de tensiuni generată în piesă este caracterizată numai printr-o tensiune normală  $\sigma$  și legea lui Hooke are următoarea formulare analitică:

$$\sigma = E \cdot s \quad (6)$$

$s$  fiind deformația specifică liniară (de natură elastică) a materialului piesei, măsurată pe direcția tensiunii  $\sigma$ . De asemenea, în cazul unei piese metalice care suferă deformații elastice sub acțiunea unei solicitări de forfecare pură, starea de tensiuni generată în piesă este caracterizată numai printr-o tensiune tangențială  $\tau$  și legea lui Hooke are următoarea exprimare analitică:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (7)$$

$\gamma$  fiind lunecarea specifică (de natură elastică) a materialului piesei, produsă pe direcția tensiunii  $\tau$ . Factorii de proporționalitate  $E$  și  $G$ , care intervin în formulările particulare (3) și (4) ale legii lui Hooke, sunt caracteristici (constante) proprii materialului piesei solicitate, ce exprimă capacitatea materialului de a se opune acțiunii de deformare elastică exercitate de solicitările mecanice exterioare; caracteristica  $E$  este denumită **modul de elasticitate longitudinală**, iar caracteristica  $G$  - **modul de elasticitate transversală**.

Deformarea elastică a cristalelor care alcătuiesc structura pieselor metalice se realizează prin modificarea distanțelor interatomice și schimbarea parametrilor structurii cristaline (rețelei spațiale) și se produce la orice valoare a solicitărilor.

Deformarea elastică a materialelor (pieselor) metalice cu structură policristalină se realizează prin deformarea cristalelor componente conform mecanismului anterior prezentat. Comportarea la deformare și valorile caracteristicilor elastice ( $E$  și  $G$ ) ale materialelor metalice policristaline sunt

determinate în principal de natura și intensitatea forțelor de legătură dintre atomii care alcătuiesc cristalele (dependente de compoziția chimică a materialului, de tipul și de parametrii structurii sale cristaline) și sunt influențate în măsură nesemnificativă de factorii structurali modificabili prin prelucrări tehnologice, cum ar fi forma și dimensiunile cristalelor, tipul și densitatea imperfecțiunilor structurii cristaline (vacanțe, dislocații, limite de cristale, limite de subcristale) etc.

### 2.3.2. Plasticitatea materialelor metalice

**Plasticitatea este proprietatea unui material de a se deforma sub acțiunea solicitărilor mecanice și de a nu reveni la forma inițială (de a-și menține configurația obținută prin deformare) când solicitările și-au încetat acțiunea.**

S-a stabilit pe cale experimentală că, în cazul în care solicitările mecanice aplicate asupra unei piese creează stări de tensiuni capabile să producă deformații plastice ale materialului acesteia, legea lui Hooke își pierde valabilitatea (dependența dintre tensiunile generate de solicitările mecanice și deformațiile specifice produse nu mai este liniară).

Cercetările experimentale și studiile teoretice efectuate au evidențiat următoarele aspecte privind deformarea plastică a cristalelor metalice:

- Deformarea plastică a cristalelor care alcătuiesc structura materialelor metalice se realizează, în mod obișnuit, prin alunecarea unor zone ale cristalelor, (v. Figura 2-3), de-a lungul unor plane cristalografice numite **plane de alunecare**, sub acțiunea tensiunilor tangențiale  $\tau$  generate de solicitările mecanice aplicate asupra acestor materiale; deformarea plastică apare numai dacă tensiunile tangențiale  $\tau$  depășesc o anumită valoare;

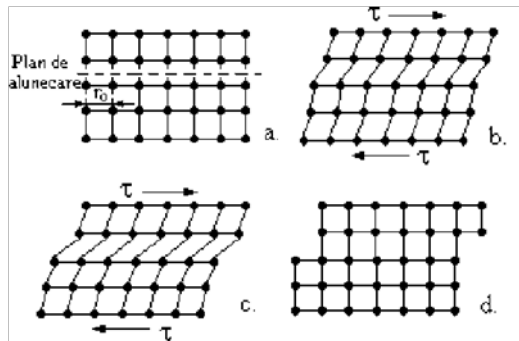


Figura 2-3 Mecanismul deformării plastice prin alunecare în absența dislocațiilor

- Planele de alunecare ale cristalelor metalice sunt planele cristalografice cu densitate atomică maximă. În fiecare plan de alunecare, direcțiile preferențiale de realizare a proceselor de alunecare sunt direcțiile cu densitate atomică maximă. Un plan de alunecare împreună cu o direcție de alunecare conținută în acesta formează un **sistem de alunecare**; structurile cristaline CFC, având cel mai mare număr de sisteme de alunecare, prezintă cea

mai bună capacitate de deformare plastică, în timp ce structurile cristaline HC, fiind caracterizate prin numărul cel mai redus de sisteme de alunecare, prezintă plasticitate scăzută.

- Deformarea plastică prin alunecare a cristalelor metalice reale (cu imperfecțiuni ale structurii cristaline) se realizează prin mecanismul ilustrat în Figura 2-4, bazat pe **deplasarea dislocațiilor în planele de alunecare ale cristalelor**. Acest mecanism al deformării plastice a cristalelor metalice a fost confirmat prin cercetări experimentale.

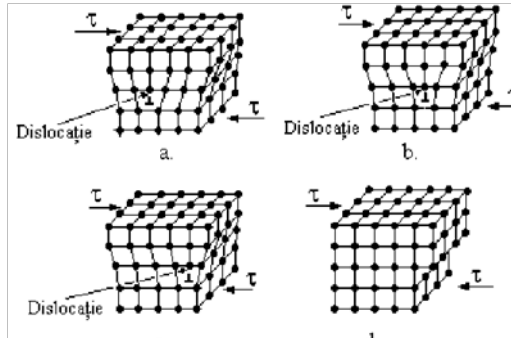
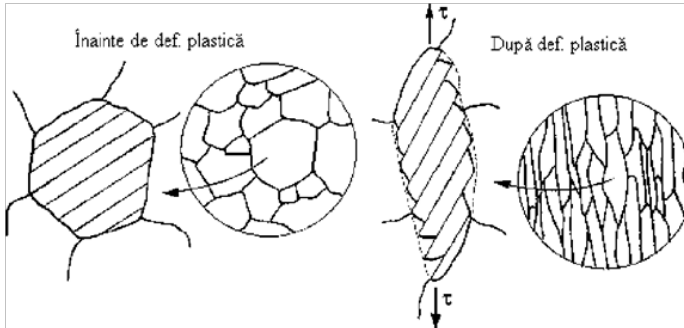


Figura 2-4 Mecanismul deformării plastice prin alunecare în prezența dislocațiilor

- Procesul de deformare plastică prin alunecare nu conduce la micșorarea numărului de dislocații conținute în cristale, ci la mărirea acestuia (creșterea densității de dislocații), deoarece, la deplasarea în lungul planelor de alunecare, multe din dislocații întrunesc condițiile transformării în surse Frank-Read (surse de dislocații). De asemenea, procesul de deformare plastică bazat pe deplasarea dislocațiilor în lungul planelor de alunecare determină blocarea mișcării multor dislocații, datorită interacțiunii acestora cu obstacolele întâlnite (alte dislocații, vacanțe, impurități etc.). Datorită acestor fenomene (creșterea densității de dislocații și blocarea mișcării unor dislocații), pe măsură ce procesul de deformare plastică a unui cristal avansează, crește intensitatea tensiunii tangențiale  $\tau$  care asigură continuarea procesului (crește rezistența la deformare a materialului cristalin), fenomen numit **ecruisare (întărire) prin deformare plastică**.

*Deformarea plastică a unui material metalic (a unei piese metalice) cu structură policristalină începe în cristalele având planele de alunecare orientate cel mai favorabil în raport cu sistemul de solicitare al materialului (piesei); în aceste cristale tensiunile tangențiale dezvoltate prin acțiunea solicitărilor mecanice exterioare au intensități maxime și este posibilă demararea procesului de deformare plastică (bazat pe mecanismul descris anterior, de deplasare prin alunecare a dislocațiilor). Dislocațiile deplasate în interiorul cristalelor în primele secvențe ale procesului de deformare plastică sunt blocate la limitele dintre cristale (unde nivelul energetic este mai ridicat și se face trecerea spre cristalele vecine, cu alte orientări ale planelor cristalografice) și apare fenomenul de ecrusare. Mărin*

*intensitatea solicitărilor mecanice la care este supus materialul (piesa), procesul de deformare plastică poate continua, fie prin realizarea condițiilor de deplasare a dislocațiilor în planele de alunecare ale altor cristale, fie prin continuarea deplasării dislocațiilor blocate la marginea cristalelor.*



**Figura 2-5 Mecanismul deformării plastice a structurilor policristaline și formării structurii fibroase**

În baza mecanismului descris anterior rezultă că, mărind suficient solicitările la care este supus un material cu structură policristalină, se poate obține deformarea plastică globală (generală) a acestuia. Într-o astfel de situație, materialul policristalin va prezenta o **structură fibroasă** de tipul celei prezentate în Figura 2-5, deoarece cristalele (grăunții cristalini) din care este alcătuit își modifică forma poliedrică (echiaxială) inițială, alungindu-se în direcția eforturilor care le-au produs deformarea. *Orientarea unidirecțională a cristalelor materialelor metalice policristaline deformate plastic, denumită **textură de deformare**, produce anizotropia proprietăților mecanice ale acestor materiale.*

Ecruisarea și textura de deformare apar numai la **deformarea plastică la rece**, adică aceea care se produce sub o anumită valoare a temperaturii numită temperatură de recristalizare primară  $T_{rp} = 0,4T_s$  ( $T_s$  fiind temperatura de solidificare - topire a materialului, în K).

Dacă deformarea plastică se produce la temperaturi  $T > T_{rp}$ , se numește **deformare plastică la cald**, și, în acest caz deplasarea dislocațiilor se face și prin „cățărare” în afara planelor de alunecare, ceea ce are ca efect formarea continuă de noi limite de grăunți cristalini care își păstrează forma echiaxială; deformarea plastică la cald necesită solicitări mai mici și se poate obține orice grad de deformare deoarece materialul nu se ecruisează.

Încălzirea unui material deformat plastic la rece (deci ecruisat) la temperaturi  $T > T_{rp}$  conduce la refacerea structurii cu grăunți echiaxiali și la dispariția efectelor ecruisării (materialul își recapătă proprietățile de plasticitate).

### 2.3.3. Încercarea la tracțiune a materialelor metalice

Pentru a evidenția particularitățile comportării materialelor metalice policristaline solicate mecanic se folosește (ca încercare de referință) încercarea la tracțiune. Condițiile și modul de realizare a încercării la tracțiune și

caracteristicile mecanice care se pot determina prin această încercare sunt reglementate prin standardul SR EN 10002 (care reprezintă versiunea în limba română a standardului european EN 10002).

Încercarea la tracțiune se execută pe **epruvete** confecționate din materialul metalic care se cercetează, având forma și dimensiunile prescrise în SR EN 10002. Epruvetele folosite în mod obișnuit au configurațiile: cu o porțiune centrală, cu secțiunea circulară (epruvete rotunde) sau dreptunghiulară (epruvete plate), calibrată (cu dimensiuni precise) și două capete de prindere (pe mașina cu care se realizează încercarea), cu diverse configurații (cilindrice, conice, cilindrice filetate, plate, plate cu orificii pentru bolțuri etc.). Pe porțiunea calibrată a epruvetelor se trasează (înainte de încercare) două repere la distanța  $L_0$ ; de regulă, distanța (lungimea) inițială între repere  $L_0$  se alege în funcție de aria secțiunii transversale inițiale a porțiunii calibrate  $S_0$ , utilizând relația:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (8)$$

iar epruvetele astfel dimensionate se numesc **epruvete proporționale** (de obicei, se ia  $k=5,65$ , ceea ce este echivalent, pentru epruvetele rotunde, cu  $L_0 = 5d_0$ ).

În timpul încercării la tracțiune, pe direcția axei longitudinale a unei epruvete realizate conform prescripțiilor anterior prezentate, se aplică o forță de tracțiune  $F$ , crescătoare ca intensitate, care produce deformarea progresivă și, în final, ruperea epruvetei. Mașina folosită pentru realizarea încercării la tracțiune este prevăzută cu dispozitivele necesare pentru a măsura și/sau înregistra (pe toată durata încercării) intensitatea forței aplicate  $F$  și deformațiile liniare (lungirile sau extensiile) produse epruvetei  $\Delta L = L - L_0$ ,  $L$  fiind distanța (lungimea) între reperele epruvetei la aplicarea forței de tracțiune cu intensitatea  $F$ . Prin măsurarea secvențială sau înregistrarea continuă a valorilor mărimilor  $F$  și  $\Delta L$ , se poate construi curba dependenței  $F = g(\Delta L)$ , numită **diagrama încercării la tracțiune (DIT)** sau **diagrama forță - alungire (extensie)**.

Reprezentând în coordonate rectangulare variația tensiunii (convenționale) obține **curba caracteristică convențională la tracțiune (CCCT)** sau **curba caracteristică tensiune-deformație specifică** a materialului cercetat.

Cu ajutorul CCCT (construită pe baza încercării la tracțiune) se pot evidenția particularitățile comportării oricărui material metalic solicitat mecanic și se pot defini o serie de **caracteristici mecanice** (folosite drept caracteristici de referință la proiectarea pieselor din materialul respectiv), acestea fiind:

- modulul de elasticitate longitudinală al materialului;
- limită de curgere aparentă;
- limită de curgere convențională;
- rezistență la tracțiune (sau rezistență la rupere);
- alungirea procentuală după rupere (sau alungirea la rupere);
- coeficientul de gătuire (numit și gătuire sau stricțiune și exprimat în %);

Din datele prezentate anterior reiese că, folosind rezultatele încercării la tracțiune se pot determina o serie de caracteristici mecanice importante ale materialelor metalice: *modulul de elasticitate longitudinală  $E$ ; limita de curgere (aparentă  $R_e$  sau convențională  $R_p$ ); rezistența la tracțiune  $R_m$ ; alungirea procentuală după rupere  $A$ ; coeficientul de gătuire  $Z$*  și se pot face aprecieri calitative și cantitative privind proprietățile de elasticitate și plasticitate ale acestora.

### 2.3.4. Ruperea materialelor

**Ruperea** este fenomenul de fragmentare a unui material (unei piese) în două sau mai multe părți sub acțiunea unei stări de tensiuni mecanice.

Ruperile materialelor (pieselor) metalice se pot clasifica folosind mai multe criterii: a) modul cristalografic de rupere; b) aspectul ruperii; c) mărirea deformațiilor plastice care preced ruperea.

Mărirea deformațiilor plastice care preced ruperea este criteriul care consideră fenomenul de rupere la scară microscopică; după acest criteriu ruperile se încadrează în două categorii: **ruperi fragile**, precedate de deformații plastice nesemnificative și care se propagă cu viteze foarte mari și **ruperi ductile**, caracterizate prin deformații plastice apreciabile produse înaintea și în timpul realizării fenomenelor de rupere.

Categoriile de clasificare a ruperilor materialelor (pieselor) metalice sunt net corelate; astfel, ruperile fragile se produc prin clivaj (smulgere), au propagare intercristalină (prin limitele cristalelor care alcătuiesc structura materialului) sau transcristalină (prin grăunții cristalini care compun structura materialului) și prezintă aspect cristalin - strălucitor, iar ruperile ductile se produc prin forfecare, au, de obicei, propagare transcristalină și prezintă aspect fibros.

Comportarea fragilă sau ductilă la rupere nu este întotdeauna o însușire intrinsecă a fiecărui material metalic (o însușire dependentă numai de compoziția chimică și de caracteristicile structurale ale materialului). Comportarea la rupere poate fi influențată esențial de factorii ce descriu condițiile solicitării mecanice care determină ruperea: **a) temperatura materialului în timpul solicitării; b) viteza de solicitare (viteza de aplicare a sarcinilor și/sau viteza de deformare a materialului); c) gradul de triaxialitate al stărilor de tensiuni generate în materialul supus solicitării, dependent de complexitatea solicitării și de prezența în material a concentratorilor de tensiuni.** Complexitatea unei solicitări mecanice este determinată de modul în care acționează sarcinile (forțele) care o produc și de tipul efectelor (simple sau combinate) de deformare realizate (întindere, compresiune, încovoiere, forfecare, torsiune etc.), iar **concentratorii de tensiuni** sunt discontinuități ale materialului (orificii, creștături, zgârieturi, incluziuni, fisuri etc.) care determină creșteri locale ale intensității tensiunilor generate de solicitările mecanice.

De obicei, se consideră ca factor principal temperatura materialului în timpul solicitării, iar pragul caracteristic corespunzător acestui factor este denumit **temperatură de tranziție ductil - fragil  $t_{tr}$** , (dacă temperatura materialului solicitat mecanic este  $t > t_{tr}$ , comportarea sa la rupere este ductilă, iar dacă temperatura materialului coboară la  $t < t_{tr}$  materialul prezintă o comportare fragilă la rupere). Influențele celorlalți doi factori se iau în considerare prin modificările pe care le produc valorii temperaturii de tranziție; astfel, mărirea vitezei de solicitare (solicitarea dinamică sau prin șocuri) și/sau creșterea gradului de triaxialitate al stărilor de tensiuni (datorită complexității solicitării mecanice sau prezenței concentratorilor de tensiuni) determină tendința oricărui material metalic spre o comportare fragilă la rupere și produce creșterea temperaturii de tranziție a materialului respectiv (extinderea domeniului de temperaturi în care materialul manifestă o comportare fragilă la rupere și, ca urmare, restrângerea domeniului de temperaturi în care comportarea la rupere a materialului este ductilă).

Ruperea fragilă este un fenomen greu de diagnosticat (prognostic), care se produce intempestiv, se propagă cu viteze foarte mari (instabil) și poate avea urmări catastrofale, în timp ce ruperea ductilă este un fenomen ușor de detectat, care se produce stabil, după epuizarea capacității de deformare plastică a materialului metalic supus solicitărilor mecanice. Ca urmare, la proiectarea pieselor metalice destinate aplicațiilor tehnice se pune condiția ca materialul metalic ales pentru confecționarea acestora să prezinte o comportare ductilă la rupere pe tot domeniul temperaturilor de exploatare (utilizare) a lor; astfel, dacă domeniul temperaturilor de exploatare a pieselor are limita inferioară  $t_{emin}$ , materialul metalic din care se realizează acestea trebuie să prezinte o temperatură de tranziție ductil-fragil  $t_r$ , care să asigure îndeplinirea condiției:  $t_{emin} > t_r$ .

Pentru a evidenția particularitățile comportării la rupere a materialelor metalice la diferite temperaturi se folosește (ca încercare de referință) **încercarea la încovoiere prin șoc**.

Încercarea la încovoiere prin șoc se execută pe **epruvete** confecționate din materialul metalic care se cercetează, având configurația și dimensiunile în conformitate cu prescripțiile SR EN 10045.

Rezultatele încercării la încovoiere prin șoc a unui material metalic se pot utiliza pentru determinarea unei temperaturi (convenționale) de tranziție ductil-fragil a materialului respectiv. În acest scop, din materialul metalic analizat se prelevează mai multe epruvete, se efectuează încercarea la încovoiere prin șoc a acestora la diferite temperaturi, iar rezultatele obținute se transpun în diagrame.

### 2.3.5. Fluajul materialelor

În mod obișnuit, procesul de deformare plastică a materialelor metalice începe când tensiunile create în acestea sub acțiunea solicitărilor mecanice la care sunt supuse depășesc limita lor de curgere și se continuă dacă intensitatea acestor tensiuni are o evoluție monoton crescătoare în timp. Dacă solicitările mecanice aplicate acționează timp îndelungat (zile, luni, ani), procesul de deformare plastică a materialelor metalice poate începe chiar dacă tensiunile create sub acțiunea acestora au intensități mai mici decât limita lor de curgere și se continuă chiar dacă solicitările și, ca urmare, tensiunile create de acestea, își mențin constantă intensitatea.

Fenomenul de deformare lentă și continuă în timp a unui material metalic sub acțiunea unor solicitări (tensiuni) mecanice constante se numește **fluaj**, iar rupele produse datorită acestui fenomen se numesc **ruperi prin fluaj**. S-a constatat experimental că unul din factorii principali care determină apariția și desfășurarea fenomenului de fluaj este temperatura, fenomenul manifestându-se cu intensitate mare dacă materialul metalic solicitat mecanic are temperatura  $T > 0,4T_s = T_{rp}$ ,  $T_s$  fiind temperatura de solidificare - topire, iar  $T_{rp}$  - temperatura de recristalizare primară ale materialului.

Pentru un material metalic aflat la o anumită temperatură  $T=ct.$ , în care o solicitare mecanică invariabilă generează tensiuni cu intensitatea  $a=ct.$ , comportarea la fluaj poate fi redată sintetic printr-o **curbă de fluaj**.



### 2.3.6. Oboseala materialelor

Comportarea unui material metalic supus acțiunii unei solicitări variabile (ce generează în material tensiuni mecanice cu intensități variabile în timp) diferă esențial de cea corespunzătoare acțiunii unor solicitări constante sau monoton crescătoare (ce generează în material tensiuni mecanice care nu-și modifică intensitatea în timp sau care cresc continuu în intensitate pe măsură ce trece timpul), ruperea sa putându-se produce chiar dacă intensitatea tensiunilor mecanice generate în timpul solicitării  $\sigma$  este mai mică decât rezistența la tracțiune a materialului  $R_m$ .

Fenomenul de degradare a materialelor metalice sub acțiunea solicitărilor variabile se numește **oboseală**, iar ruperile produse datorită acestuia se numesc **ruperi prin oboseală**.

În mod obișnuit, *solicitările variabile la care sunt supuse piesele din materiale metalice au caracter periodic (ciclic)* și, ca urmare, funcția  $\sigma = f(\tau)$ , ce exprimă dependența de timp  $\tau$  a intensității tensiunilor generate de solicitări  $\sigma$ , este o funcție periodică; în aceste condiții, *orice solicitare variabilă se poate caracteriza complet printr-un ciclu al solicitării*. Se pot defini următoarele mărimi caracteristice ale unei solicitări variabile:

- tensiunea maximă, minimă și medie;
- amplitudinea tensiunii (tensiunea variabilă) și coeficientul de asimetrie a amplitudinii;

Solicitările variabile ale căror cicluri se caracterizează prin același semn al tensiunilor se numesc **solicitări ondulate**; solicitarea ondulantă la care tensiunea minimă este nulă, se numește **solicitare pulsatoare**. Solicitățile variabile la care pe parcursul fiecărui ciclu se schimbă semnul tensiunilor se numesc **solicitări alternante**; solicitarea alternantă la care tensiunea minimă e egală în modul cu tensiunea maximă, se numește **solicitare alternant-simetrică**.

Graficul dependenței dintre tensiunea maximă a ciclurilor de solicitare și numărul ciclurilor de solicitare până la ruperea unui material metalic (unei piese metalice) se numește **curbă de durabilitate la oboseală sau curbă Wohler**.

Curbele de durabilitate la oboseală și/sau rezistența la oboseală corespunzătoare unui material metalic se determină experimental prin încercări mecanice speciale, cum ar fi încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă, reglementată prin STAS 5878.

*Procesul de degradare prin oboseală a unui material metalic (unei piese metalice) are trei stadii de desfășurare:* a) **inițierea unei fisuri**; b) **propagarea lentă** (într-un număr mare de cicluri) și continuă a fisurii, până când secțiunea transversală nefisurată (secțiunea portantă) a piesei devine insuficientă pentru preluarea solicitărilor; c) **ruperea bruscă** a secțiunii transversale nefisurate în stadiile anterioare. Existența acestor trei stadii a fost evidențiată prin cercetarea aspectului suprafețelor de rupere prin oboseală ale materialelor (pieselor) metalice, care prezintă întotdeauna trei zone caracteristice: a) **zona de inițiere a unei fisuri** (care se poate evidenția numai pe cale microscopică); b) **zona de propagare a fisurii**, cu aspect neted - lucios (vizibilă cu ochiul liber); c) **zona de rupere finală** (bruscă), cu aspect cristalin sau fibros (vizibilă cu ochiul liber).

### 2.3.7. Duritatea materialelor

**Duritatea** este proprietatea unui material metalic de a opune rezistență la pătrunderea în stratul său superficial a unui penetrator (corp mai dur). Pentru determinarea caracteristicilor prin care se exprimă cantitativ duritatea materialelor metalice se folosesc, de obicei, metodele prezentate în continuare.

**Metoda Brinell**, reglementată prin standardul SR EN 10003-1 (care reprezintă versiunea în limba română a standardului european EN 10003-1), este o metodă de determinare a durității materialelor metalice care utilizează ca **penetrator o sferă (bilă) confecționată din oțel (aliaj Fe-C) sau din carburi metalice**.

Pentru determinarea durității unui material metalic prin această metodă, se apasă penetratorul sferic cu diametrul  $D$ , un timp  $\tau_d = 10 \dots 25$ s, cu o forță  $F$ , pe un eșantion (probă, epruvetă, piesă) din materialul ce se analizează, iar după încetarea acțiunii forței, se îndepărtează penetratorul și se măsoară diametrul  $d$  al urmei lăsate de acesta pe material.

**Duritatea Brinell** (simbolizată HBS, în cazul utilizării unui penetrator din oțel și HBW, în cazul utilizării unui penetrator din carburi metalice) este o caracteristică mecanică definită (convențional) ca fiind raportul dintre forța aplicată pe penetrator la efectuarea determinării  $F$ , exprimată în kgf ( $1 \text{ kgf} = 9,80665 \text{ N}$ ) și aria suprafeței urmei lăsate de acesta pe materialul metalic analizat  $S_p$ , exprimată în  $\text{mm}^2$ :

$$HBS \text{ sau } HBW = \frac{F}{S_p} \quad (9)$$

deoarece suprafața urmei lăsate de penetrator pe materialul analizat are forma unei calote sferice, aria  $S_p$  este dată de relația (vezi Figura 2-6):

$$S_p = \pi D h = \pi D \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (10)$$

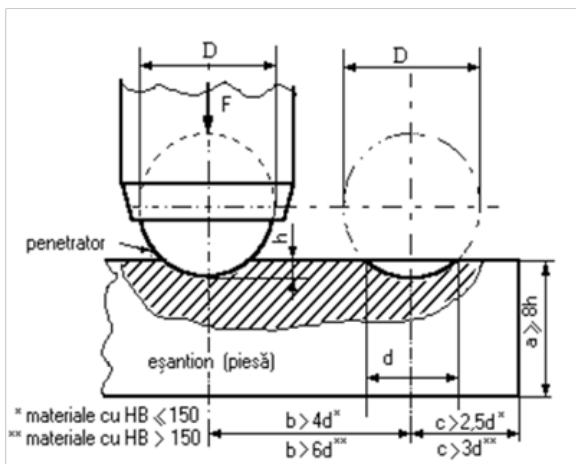


Figura 2-6 Schema determinării durității prin metoda Brinell

Condițiile normale (standard) de determinare a durtății Brinel corespund utilizării penetratorului sferic cu  $D=10$  mm și aplicării forței  $F= 3000\text{kgf}$  (29420 N) o durată  $\tau_d = 10\text{...}15$  s; se pot folosi însă (în funcție de configurația și dimensiunile eșantionului pe care se face determinarea și de particularitățile structurale ale materialului analizat) și alte cupluri (D,F). Valorile durtății Brinell determinate pe un material metalic cu diferite cupluri (D,F) vor fi egale (sau foarte apropiate) dacă toate cuplurile (D,F) utilizate se caracterizează prin *aceiași valoare a unui raport  $k_S$ , numit grad de solicitare*, definit prin relația:

$$k_S = \frac{F}{D^2} \quad (11)$$

în care  $F$  se introduce în kgf și  $D$  - în mm.

Duritatea Brinell a unui material metalic se indică precizând valoarea durtății, simbolul HBS sau HBW (funcție de materialul penetratorului sferic utilizat la determinarea durtății) și condițiile în care s-a determinat duritatea: diametrul penetratorului sferic  $D$  (în mm) / forța aplicată pe penetrator la determinarea durtății  $F$  (în kgf) / durata aplicării forței pe penetrator  $\tau_d$  (în secunde); de exemplu, dacă duritatea Brinell a unui material metalic s-a determinat cu un penetrator sferic confecționat din oțel, cu diametrul  $D=5$  mm, apăsat cu forța  $F=750$  kgf (7355 N), o durată  $\tau_d =15$  s, iar valoarea durtății a fost 220, se face indicația: „materialul metalic are duritatea 220 HBS 5/750/15”.

Prin cercetări experimentale s-a evidențiat faptul că pentru multe materiale metalice de importanță practică (oțeluri, fonte, aliaje pe bază de Cu etc.) *există o dependență (statistică) liniară între valorile durtății Brinell și valorile rezistenței la tracțiune  $R_m$* ; de exemplu, în cazul oțelurilor, rezistența la tracțiune  $R_m$ , exprimată în  $\text{N/mm}^2$ , se poate estima cu relația  $R_m = 3,5(\text{HBS sau HBW})$ .

**Metoda Vickers**, reglementată prin STAS 492/1 (aflat în concordanță cu standardele internaționale ISO 409/1 și ISO 6507/1), este o metodă de determinare a durtății materialelor metalice care utilizează ca **penetrator o piramidă pătrată dreaptă confecționată din diamant**, având unghiul diedru al fețelor opuse de  $136^\circ$  și unghiul dintre muchiile opuse de  $148^\circ$ .

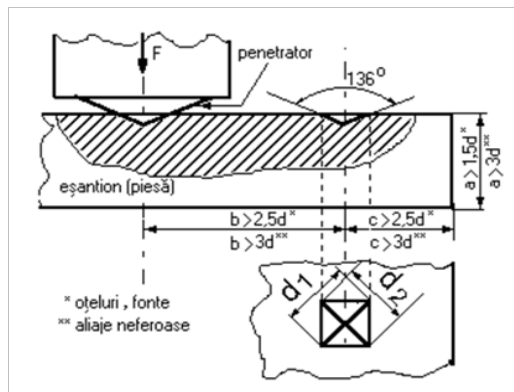


Figura 2-7 Schema determinării durtății prin metoda Vickers

Pentru determinarea durtății unui material metalic prin această metodă, se apasă penetratorul piramidal din diamant, un timp  $\tau_d$  ( $\tau_d = 10...35$  s), cu o forță  $F$ , pe un eșantion (probă, epruvetă, piesă) din materialul ce se analizează, iar după încetarea acțiunii forței, se îndepărtează penetratorul și se măsoară diagonala  $d = \frac{d_1+d_2}{2}$ , a urmei lăsate de acesta pe material (vezi Figura 2-7).

**Duritatea Vickers** (simbolizată HV) este o caracteristică mecanică definită (convențional) ca fiind raportul dintre forța aplicată pe penetrator la efectuarea determinării  $F$ , exprimată în kgf (1kgf = 9,80665 N) și aria suprafeței urmei lăsate de acesta pe materialul metalic analizat  $S_p$ , exprimată în mm<sup>2</sup>:

$$HV = \frac{F}{S_p} \quad (12)$$

deoarece suprafața urmei lăsate de penetrator pe materialul analizat are forma unei calote sferice, aria  $S_p$  este dată de relația (vezi Figura 2-7):

$$S_p = \frac{d^2}{2 \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}} \quad (13)$$

Condițiile normale (standard) de determinare a durtății Vickers corespund aplicării unei forțe  $F=30$  kgf (294 N), o durată  $\tau_d = 10...15$  s; se pot folosi însă (în funcție de configurația și dimensiunile eșantionului pe care se face determinarea și de particularitățile structurale ale materialului analizat) și alte intensități ale forței de apăsare  $F$ . Valorile durtății Vickers determinate pe un material metalic cu diferite forțe  $F$  sunt egale (sau foarte apropiate).

Duritatea Vickers a unui material metalic se indică precizând valoarea durtății, simbolul HV și condițiile în care s-a determinat duritatea (dacă acestea diferă de condițiile normale): forța aplicată pe penetrator la determinarea durtății  $F$  (în kgf) / durata aplicării forței pe penetrator  $\tau_d$  (în secunde); de exemplu, dacă la determinarea durtății Vickers a unui material metalic s-a aplicat pe penetrator forța  $F= 10$  kgf (98,07N), o durată  $\tau_d = 20$  s și valoarea durtății a fost 250, se face indicația: „materialul metalic are duritatea 250 HV 10/20”, dacă s-a aplicat pe penetrator forța  $F=10$  kgf (98,07N), o durată  $\tau_d = 10...15$  s și valoarea durtății a fost 250, se face indicația: „materialul metalic are duritatea 250 HV 10”, iar dacă s-au folosit condițiile standard ( $F=30$  kgf,  $\tau_d = 10...15$  s) și valoarea durtății a fost 250, se face indicația: „materialul metalic are duritatea 250 HV”.

**Metoda Rockwell**, reglementată prin STAS 493 (redactat în conformitate cu standardul internațional ISO 6508), este o metodă de determinare a durtății materialelor metalice care utilizează ca **penetrator** un con confecționat din diamant, având unghiul la vârf de  $120^\circ$ , o sferă (bilă) din oțel cu diametrul de 1,5875 mm (1/16 in) sau o sferă (bilă) din oțel cu diametrul de 3,175 mm (1/8 in).

Pentru determinarea durtății unui material metalic prin această metodă se parcurg următoarele etape: se apasă penetratorul cu o sarcină inițială (forță inițială)  $F_0 = 10$  kgf (98,07 N) pe un eșantion (probă, epruvetă, piesă) din materialul ce se analizează, după care se face reglarea (manuală sau automată) a dispozitivului de măsurare și înregistrare a durtății; se aplică pe penetrator o suprasarcină (forță suplimentară)  $F_1$ , apăsarea cu forța  $F=F_0+F_1$  menținându-se 2...8 s; se

îndepărtează suprasarcina  $F_1$  și se determină adâncimea de penetrare remanentă (sub sarcina inițială).

**Duritatea Rockwell** (simbolizată HR) este o caracteristică mecanică definită (convențional) prin relația:

$$HR = E - e \quad (14)$$

în care  $E$  este lungimea unei scale de referință, iar  $e$  - adâncimea de penetrare remanentă determinată pe materialul analizat, ambele mărimi ( $E$  și  $e$ ) fiind convertite în unități de duritate Rockwell, folosind convenția  $1 HR = 0,002 \text{ mm}$ ; în cazul folosirii penetratorului conic din diamant,  $E = 0,20 \text{ mm} = 100 HR$ , iar în cazul folosirii penetratoarelor sferice din oțel,  $E = 0,26 \text{ mm} = 130 HR$ .

Pentru ca metoda să poată fi utilizată la diverse materiale metalice, se folosesc tipurile de penetratoare prezentate anterior și diferite intensități ale suprasarcinii  $F_1$ , fiecare cuplu „tip penetrator - suprasarcină  $F_1$ ” definind o **scară de determinare a durității Rockwell**; sunt standardizate 9 scări, simbolizate prin literele A,B...H,K. cele mai utilizate scări sunt: **scara B**, penetrator bilă de oțel călit cu diametrul de 1,5875 mm, forța  $F_1 = 90 \text{ kgf}$  (882,6 N), destinată determinării durității aliajelor neferoase și oțelurilor moi; **scara C**, penetrator con de diamant și forța  $F_1 = 140 \text{ kgf}$  (1373 N), destinată determinării durității oțelurilor și fontelor.

Duritatea Rockwell a unui material metalic se indică precizând *valoarea durității, simbolul HR și simbolul scării utilizate*; de exemplu, dacă la determinarea durității Rockwell a unui material metalic s-a folosit scara C și s-a obținut valoarea 45, se dă indicația: „materialul are duritate 45 HRC”.

### 2.3.8. Reziliența

Reziliența  $\sigma_r$  caracterizează comportarea materialelor la acțiunea solicitărilor prin șoc și se definește prin raportul dintre lucrul mecanic necesar ruperii printr-o singură lovire a unei epruvete și aria secțiunii inițiale a porțiunii rupte. Reziliența depinde de forma și dimensiunile epruvetei, de tipul aparatului la care se face încercarea, de temperatură etc. Pentru materiale ceramice, utilizând pendulul Charpy, se obțin valori cuprinse între 1.700 și 4.000 Nm/m<sup>2</sup>.

## 2.4. Proprietăți termice

**Căldura specifică  $c$**  reprezintă căldura transmisă unității de masă a materialului pentru a-i ridica temperatura cu o unitate și se exprimă în J/kgK (Tabelul 2-2).

**Conductivitatea termică  $\lambda$**  se definește prin căldură transferată în unitatea de timp prin unitatea de arie (considerată perpendiculară pe direcția fluxului termic) sub un gradient de temperatură egal cu unitatea și se exprimă în W/m·K. Conductivitatea termică ia valori foarte mici în cazul materialelor izolante poroase

( $10^{-2}$  W/m·K), valori medii în cazul materialelor poroase impregnate sau a celor neporoase (0,1- 1 W/m·K) și valori foarte mari în cazul metalelor ( $10^2$  W/m·K).

**Tabelul 2-2 Proprietăți termice - exemple**

Materialul	Căldura specifică $c \cdot 10^{-3}$ [J/kg·K]	Conductivitate a termică [w/m·K]	Coefficient de dilație liniară [K <sup>-1</sup> ]
Aer la temperatura camerei	1,009	0,025	
Azot la temperatura camerei	-	0,019	
Hidrogen	14,35	0,18	
Apă la 20°C	4,18	0,595	69
Ulei de transformator	1,67	0,13...0,16	
Celuloză	1,54	0,23	
Hârtie		0,05...0,16	
Hârtie impregnată	1,25...2,5	0,15...0,20	
Stratificate pe bază de hârtie	1,26...1,68	0,21...0,30	15...60
Bumbac	1,6...1,68	0,063...0,07	
Bumbac impregnat	1,25...2,5	0,128...0,138	
Stratificat pe bază de țesături	1,26...1,68	0,34	30...50
Mică	0,86	0,36	
Cauciuc vulcanizat	2,14	0,13...0,23	
Ebonită	1,43	0,16...0,22	50...90
Cauciuc siliconic		0,30	
Policlorură de vinil	1,35...2,15	0,15...0,29	70...250
Polietilenă	2,3	0,3...0,42	140...180
Poliamide	1,68	0,2...0,25	80...150
Poliesteri	1,05	0,25...0,42	35
Masă fenolică de presare	1,32...1,45	0,23	
Idem cu rumeguș de lemn		0,35	10...30
Idem cu umplutură organică		0,45...0,70	15...30
Fire de azbest	0,84	0,15	
Sticlă	0,70...0,85	0,8...1,05	
Fibră de sticlă		0,58...1,02	
Cuarț	0,76	6...12	8...14,4
Porțelan tare	0,92	0,8...1,85	4,5
Steatită	1,05	1,95	8,5
Cupru	0,385	394	17,7
Aluminiu pur (99,6%)	0,895	209	23,9

**Coefficientul de dilatație termică liniară  $\alpha_t$** , reprezintă variația lungimii corpului provocată de o creștere a temperaturii  $t$  cu un grad, raportată la lungimea inițială  $l$  a corpului:

$$\alpha_t(l) = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} [K^{-1}] \quad (15)$$

la valori cuprinse între  $54 \cdot 10^{-5}$  și  $71 \cdot 10^{-4} K^{-1}$  pentru materiale conductoare și între  $14 \cdot 10^{-4}$  și  $0,2 K^{-1}$  pentru izolanți.

**Coefficientul de transmisie a căldurii  $\alpha$**  caracterizează transmisia căldurii între corpurile solide și mediile fluide (de răcire) și reprezintă cantitatea de căldură transmisă prin unitatea de arie și în unitatea de timp, în cazul unei diferențe de temperatură între corp și mediul de răcire egală cu 1K. Valorile sale depind de natura și viteza mediului de răcire, felul curgerii (laminară sau turbulentă, liberă sau forțată), starea suprafeței corpului solid, temperatura corpului solid și a mediului de

răcire etc. și ia valori între  $3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  (pentru aer staționar) și  $6.000 \text{ W/m}^2\text{K}$  (pentru lichide în mișcare).

**Temperatura de inflamabilitate  $T_i$**  reprezintă valoarea temperaturii la care un corp lichid produce o cantitate suficientă de vapori, astfel încât împreună cu aerul din atmosferă să formeze un amestec combustibil ce se aprinde în contact cu o flacără. Valoarea temperaturii la care vaporii de lichid se autoaprend (fără a fi utilizată o flacără) se numește *temperatură de aprindere  $T_a$* . Uleiul de transformator are  $T_i=125\dots135^\circ\text{C}$  și  $T_a=150^\circ\text{C}$ .

**Temperatura de înmuiere  $T_f$**  reprezintă valoarea temperaturii la care fluiditatea materialului este suficient de mare pentru ca deformarea sa să se producă sub acțiunea greutateii proprii. Temperatura de înmuiere caracterizează materialele amorfe, fără punct de topire bine determinat (ceramică, sticle, bitumuri, mase plastice etc.).

**Stabilitatea la căldură a formei** se caracterizează prin valoarea maximă a temperaturii la care poate fi supus un material solicitat mecanic, fără ca deformarea să depășească o limită admisibilă.

**Șocul termic** reprezintă trecerea bruscă de la o temperatură înaltă ( $1.000^\circ\text{C}$  în cazul ceramicelor) la temperatura mediului ambiant.

**Rezistența la șoc termic  $R_{st}$**  a unui material se apreciază prin numărul de cicluri (încălzire-răcire) la care acesta poate rezista fără a se deforma, fisura, crăpa sau sfărâma.

**Stabilitatea termică** caracterizează capacitatea materialelor de a rezista timp îndelungat la o anumită temperatură fără ca proprietățile lor (mecanice, electrice) să scadă sub valoarea limită (după care materialele nu-și mai pot îndeplini rolul în instalația din care fac parte). Din acest punct de vedere, materialele electroizolante se împart în 7 clase de izolație.

**Îmbătrânirea termică** reprezintă procesul de degradare și înrăutățire a caracteristicilor electrice și mecanice ale corpurilor sub acțiunea temperaturii. Acest proces se intensifică dacă temperatura crește datorită activizării reacțiilor chimice de descompunere a moleculelor corpurilor.





## Cap.3. Conducția electrică

### 3.1. Bazele fenomenului conducției electrice

Este cunoscut faptul că deplasarea ordonată a purtătorilor de sarcină electrică într-un material determină un curent electric de conducție a cărei densitate  $J$  la nivel macroscopic este proporțională cu intensitatea câmpului electric  $E$ , adică,  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ . Constanta de proporționalitate  $\sigma$  reprezintă **conducția electrică**. Conducivitatea de tip electronic - corespunzătoare deplasării electronilor - ia valori mai mari decât conducția de tip ionic - corespunzătoare deplasării ionilor în electroliți - și este caracteristică materialelor metalice în stare solidă sau lichidă.

Explicarea proceselor de conducției în corpurile solide se face cu ajutorul modelului prezentat de teoria benzilor (zonelor) de energie conform căreia electronii nu pot avea decât valori discrete ale energiei; aceste valori se grupează în zone permise, formate din subnivele pe care se pot găsi cel mult doi electroni (principiul excluziunii). Pentru fiecare material există o valoare limită a energiei electronilor, numit *nivelul limită Fermi*  $w_F$  care reprezintă valoarea maximă a energiei pe care o poate avea un electron în absența unui câmp electric exterior; dacă nivelul  $w_F$  trece prin interiorul unei benzi permise materialul respectiv va fi conductor, iar dacă trece prin interiorul unei benzi interzise materialul va fi izolator din punct de vedere electric. În acest din urmă caz banda permisă de sub nivelul  $w_F$  va fi **banda de valență**, iar cea de deasupra va fi **banda de conducție**.

Pentru scopuri practice se utilizează inversul conductivității, **rezistivitatea electrică**  $\rho = 1/\sigma$ , care este o mărime ce caracterizează rezistența pe care o întâmpină purtătorii de sarcină electrică (electronii în cazul materialelor metalice în stare solidă sau lichidă) în mișcarea lor dirijată; această rezistență se datorează interacțiunilor dintre electroni și ionii metalici ai materialului.

Clasificarea materialelor din punct de vedere al conducției electrice se face în funcție de valoarea rezistivității: - *materiale conductoare* cu rezistivitatea  $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-6} \Omega \cdot m$ , - *materiale semiconductoare* cu rezistivitatea  $\rho = 10^{-6} \dots 10^6 \Omega \cdot m$  și *materiale electroizolante* cu rezistivitatea  $\rho > 10^6 \Omega \cdot m$ .

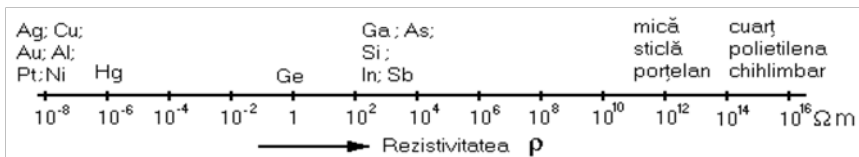


Figura 3-1 Ordonarea unor materiale după valoarea rezistivității

În Figura 3-1 se prezintă o ordonare după valoarea rezistivității a unor materiale sau tipuri de materiale mai cunoscute. Așa cum se observă din această ordonare, materiale conductoare sunt metalele și evident aliajele acestora.

Materialele conductoare utilizate cu precădere în electronică sunt metalele și materialele metalice. Așa cum a fost arătat anterior, metalele au ultimul strat electronic incomplet, astfel că există subnivele neocupate pe care se poate face tranziția electronilor sub acțiunea unei energii din exterior. Acești electroni formează „gazul electronic” ce se poate deplasa dirijat sub acțiunea câmpului electric exterior. În aceste conductoare purtătorii de sarcină electrică (electronii), în mișcarea lor dirijată sub acțiunea câmpului electric aplicat, întâmpină rezistență din partea rețelei cristaline datorită ciocnirilor cu ionii ce oscilează în jurul poziției de echilibru. Rezistivitatea electrică a unui material poate fi exprimată cu relația:

$$\rho = \frac{m}{e^2 n} \cdot \frac{1}{\tau_T} \quad (16)$$

în care,  $m$  este masa electronului,  $e$  - sarcina electrică elementară,  $n$  - numărul de electroni din unitatea de volum,  $\tau_T$  - constanta de relaxare (durata dintre două ciocniri succesive ale electronului cu ionii rețelei cristaline).

Din punct de vedere al teoriei benzilor, este clar că în cazul metalelor monovalente și trivalente în banda de conducție se vor găsi subnivele neocupate deoarece numărul electronilor este impar; în cazul metalelor bivalente se asigură conducția electrică deși numărul electronilor este par (deci se poate completa o bandă de energie) datorită suprapunerii parțiale a benzilor de energie permise și formării astfel a unei benzi parțial ocupată.

Valorile unor caracteristici ale metalelor utilizate mai frecvent sunt prezentate în Tabelul 3-1, în care ordonarea s-a făcut după valoarea rezistivității.

Datorită condițiilor de exploatare extrem de diverse ale componentelor conductoare (solicitări mecanice, coroziune, temperaturi ridicate etc.), în practică se utilizează nu numai metale în stare pură ci și aliaje ale acestora.

**Tabelul 3-1 Caracteristici ale unor metale**

Metalul	Simb. chimic	Temperatura de solidif.-topire °C	Densitatea kg/m <sup>3</sup>	Rezistivitatea electrică $\rho_{a,}$ la $t_a,$ nΩm	Coefficientul de temp. al rezistivit. $\alpha_\rho \cdot 10^3$ K <sup>-1</sup>	Coefficientul de dilatare termică liniară $\alpha_\rho$ μm/(m·K)
Argint	Ag	962	10500	14,6	428	19,0
Cupru	Cu	1083	8930	16,7	401	16,5
Aur	Au	1064	19280	23,5	317	14,2
Aluminiu	Al	660	2700	26,5	247	23,6
Beriliu	Be	1278	1850	40,0	210	11,6
Magneziu	Mg	649	1740	44,5	163	25,2
Zinc	Zn	420	7130	59,2	113	39,7
Nichel	Ni	1453	8910	68,5	83	13,3
Cadmium	Cd	321	8650	72,7	97	31,3
Platină	Pt	1772	21440	106	72	9,1
Staniu	Sn	232	7290	110	63	21,5
Plumb	Pb	327	11340	206	34	29,3
Stibiu	Sb	631	6690	370	26	11,0
Titan	Ti	1660	4510	420	19	8,4

## 3.2. Factori care influențează conductibilitatea electrică a materialelor metalice

### 3.2.1. Influența temperaturii

Deoarece rezistivitatea electrică depinde de interacțiunile dintre electroni și ionii metalici, datorită creșterii agitației termice odată cu creșterea temperaturii crește și rezistivitatea electrică. La temperaturi ce depășesc o anumită valoare caracteristică fiecărui material (numită **temperatura Debye  $T_D$** ), rezistivitatea electrică a unui conductor este proporțională cu temperatura acestuia:

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] \quad (17)$$

unde  $\rho_T$  este rezistivitatea electrică la temperatura  $T$ ,  $\rho_0$  - rezistivitatea electrică la temperatura de referință  $T_0$  (de obicei 293 K), iar  $\alpha_\rho$  - coeficientul de temperatură al rezistivității electrice (vezi Tabelul 3-1). Temperatura Debye a câtorva metale este dată în Tabelul 3-2.

**Tabelul 3-2 Temperaturile Debye ale unor metale**

Metalul	Ag	Cu	Au	Al	Pt	Pb	Fe
$T_D, K$	215	315	180	398	225	88	420

Conductibilitatea electrică este corelată cu conductibilitatea termică deoarece electronii servesc și pentru transmiterea căldurii în material. Între conductivitatea termică  $\lambda$  în W/mK și rezistivitatea electrică  $\rho$  în  $\Omega m$ , există relația experimentală:

$$\lambda \cdot \rho = 2,23 \cdot 10^{-8} T \quad (18)$$

La scăderea temperaturii agitația termică scade, astfel că sub o anumită valoare  $T_{sc}$  interacțiunea electronilor cu rețeaua cristalină se reduce atât de mult încât rezistivitatea electrică este practic nulă (vezi ), corpul atingând starea de **supraconductibilitate**. Fenomenul este foarte complex și este în prezent explicat de teoria perechilor de electroni cu momente cinetice și momente magnetice de spin egale și de semn contrar, ce se pot deplasa liber în material, fără să interacționeze cu rețeaua cristalină ( teoria **BCS** - **Bardeen**, **Cooper**, **Schrieffer** - fizicieni care au primit premiul Nobel pentru această teorie).

Temperatura  $T_{sc}$  numită și *temperatură de tranziție* sau de *supraconductibilitate* este foarte scăzută în cazul metalelor pure așa cum se constată din Tabelul 3-3. Deși descoperit în anul 1911 (după lichefierea heliului), aplicațiile practice extinse ale fenomenului supraconductibilității sunt de dată relativ recentă, după descoperirea în 1986 a unor compuși ai metalelor de tranziție de tipul oxizilor la care starea de supraconductibilitate se atinge la temperaturi mai ridicate, ce pot fi atinse în condiții economice prin răcirea cu azot a cărui temperatură de lichefiere este 77 K.

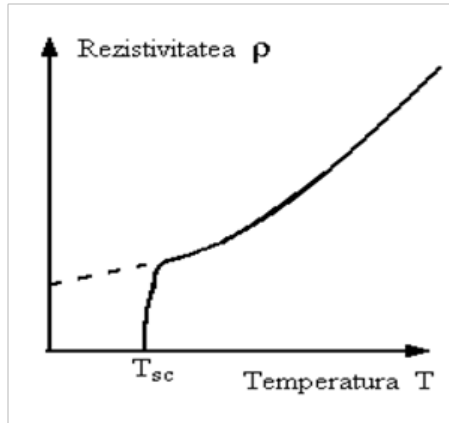


Figura 3-2 Dependența rezistivității de temperatură

Tabelul 3-3 Temperaturi de tranziție

Material	Temperatura $T_{sc}$ , K
Mercur	4,2
Plumb	7,2
Niobiu	9,5
$Nb_3Sn$	18,2
$Nb_3Ge$	22
La-Sr-Cu-O	40...50
Y-Ba-Cu-O	93
Bi-Sr-Ca-Cu-O	110

Atingerea stării de supraconductibilitate este influențată și de prezența câmpului magnetic prin reducerea valorii temperaturii de tranziție atunci când intensitatea câmpului crește; dacă intensitatea câmpului atinge o anumită valoare critică  $H_{cr}$  dependentă de temperatură, starea de supraconductibilitate dispare (Figura 3-3 a.). trecerea poate fi bruscă - cazul *supraconductorilor de speța I* - sau poate avea loc într-un domeniu al intensității câmpului magnetic  $H_{c1}...H_{c2}$  - cazul *supraconductorilor de speța a II-a* (Figura 3-3 b.).

Aplicațiile mai importante ale materialelor supraconductoare se datorează posibilității creșterii densității de curent la valori ridicate; aceste aplicații sunt: cabluri pentru transportul energiei electrice la distanțe mari, electromagneți cu câmpuri magnetice intense, mijloace de transport pe pernă magnetică, traductoare, microprocesoare de mare viteză etc. Fragilitatea ridicată a materialelor supraconductoare constituie principalul neajuns care îngreunează extinderea utilizării lor.

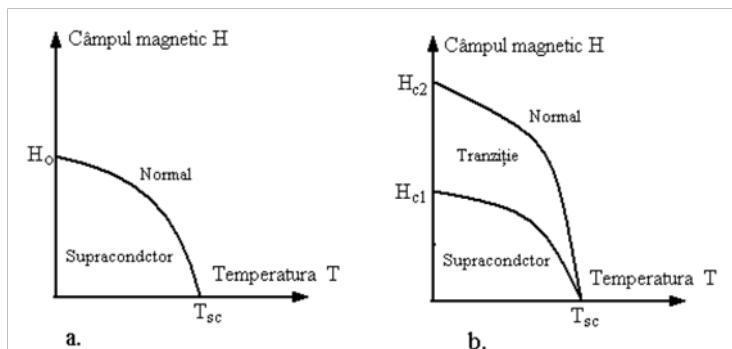


Figura 3-3 Influența câmpului magnetic asupra temperaturii de supraconductibilitate  $T_{sc}$ : a - supraconductori de speța I; b - supraconductori de speța a II-a

### 3.2.2. Influența impurităților

Materialele conductoare utilizate în tehnică au întotdeauna impurități și defecte de structură cristalină. Existența acestor impurități și defecte de structură generează o întârziere suplimentară a electronilor prin reducerea duratei de relaxare (durata dintre două ciocniri succesive ale electronilor în mișcarea lor dirijată); cu cât distorsiunile rețelei cristaline vor fi mai puternice cu atât ciocnirile vor fi mai numeroase, și deci rezistivitatea electrică va crește. Rezultă că cea mai bună conductivitate o au metalele lipsite de impurități și cu structură cât mai apropiată de echilibru (grăunți cristalini de dimensiuni mari).

Componentele unui aliaj (elementele de aliere) pot fi considerate ca fiind impurități în metalul de bază, astfel că orice aliaj are rezistivitatea electrică mai mare decât a metalului de bază. Rezistivitatea electrică a aliajelor depinde de tipul fazelor care se formează și de concentrația elementelor de aliere:

- la soluțiile solide de substituție rezistivitatea variază neliniar cu concentrația și este maximă pentru conținuturi aproximativ egale ale componentelor, așa cum se observă în Figura 3-4 a în care această variație este reprezentată împreună cu diagrama de echilibru a unui sistem binar;
- la amestecurile eutectice sau eutectoide, rezistivitatea electrică variază liniar cu concentrația, așa cum se observă din Figura 3-4 b pentru aliajele din domeniul de existență al eutecticului a + P; în domeniile monofazice a și P rezistivitatea variază neliniar cu concentrația;
- compușii definiți, au rezistivitatea electrică mai mare și diferită de a componentelor, așa cum rezultă din Figura 3-4 c pentru compusul definit  $A_nB_m$ ; pentru celelalte aliaje din sistemul respectiv se observă variația liniară cu concentrația a rezistivității electrice a amestecurilor eutectice.

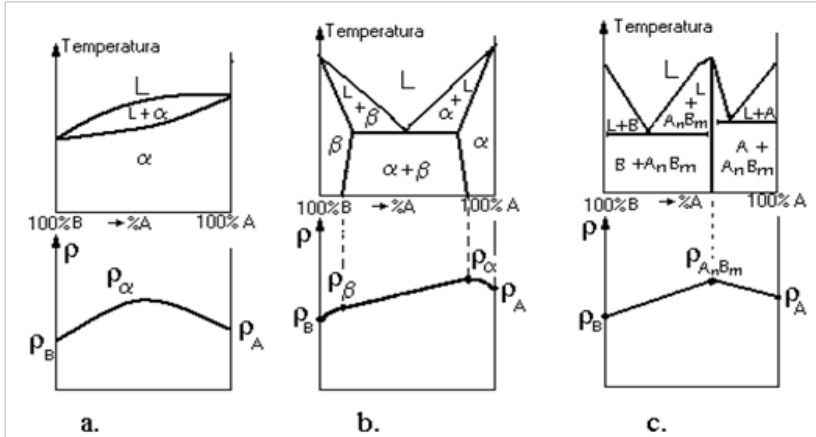


Figura 3-4 Dependența rezistivității electrice de tipul fazelor din aliajele binare: a - soluții solide de substituție; b - soluții solide și amestecuri eutectice; c - compus definit și amestecuri eutectice

Cunoscându-se variația rezistivității electrice în funcție de tipul structurii, se pot stabili compozițiile chimice ale aliajelor utilizate pentru realizarea elementelor unor componente electrice sau electronice.

### 3.2.3. Influența solicitărilor mecanice

Solicitările mecanice produc deformarea corpurilor ce se realizează prin deplasări ale atomilor din pozițiile de echilibru. Aceste deplasări influențează rezistivitatea electrică a materialului prin modificarea constantei de relaxare a purtătorilor de sarcină electrică. Dacă solicitările generează tensiuni mecanice care produc numai deformații elastice, variația rezistivității electrice este proporțională cu tensiunea mecanică iar modificările sunt reversibile; Rezistivitatea electrică  $\rho_\sigma$  a materialului deformat elastic este:

$$\rho_\sigma = \rho_0(1 \pm \varphi \cdot \sigma) \tag{19}$$

unde  $\rho_0$  este rezistivitatea electrică a materialului în absența solicitărilor mecanice,  $\varphi$  - **coeficientul mecanic al rezistivității**,  $\sigma$  - tensiunea mecanică normală care a produs deformarea; dacă tensiunile sunt de întindere rezistivitatea crește, iar dacă tensiunile sunt de compresiune (semnul minus în relația anterioară) rezistivitatea electrică scade.

Această proprietate a materialelor metalice este utilizată pentru realizarea traductorilor tensorezitivii utilizați la măsurarea tensiunilor mecanice și în construcția aparatelor și dispozitivelor ce se bazează pe deformarea elastică a unui element.

Deformarea plastică la rece (vezi capitolul anterior) provoacă creșterea ireversibilă a rezistivității electrice datorită ecruisării materialului deoarece prin ecruisare crește numărul de imperfecțiuni ale structurii cristaline, crește gradul de

dezordine din rețea și deci se reduce constanta de relaxare (au loc mai multe ciocniri ale electronilor).

Influența ecruisării asupra rezistivității electrice prezintă importanță în cazul conductoarelor din cupru la care se cere a anumită rezistență mecanică, deoarece singura metodă de creștere a rezistenței mecanice la metalele pure este ecruisarea prin deformare plastică la rece.

Prin încălzirea unui material ecruisat deasupra temperaturii de recristalizare primară  $T_{rp}$  (aplicarea unui tratament termic de recoacere sau încălzire accidentală), ecruisarea dispare și structura revine la starea de echilibru, materialul căpătând valoarea inițială a rezistivității electrice.

Eliminarea stării de ecruisare reduce și rezistența mecanică a conductoarelor durificate special prin această metodă, ceea ce implică înlocuirea lor în cazul în care au suferit încălziri accidentale (de exemplu, în cazul unor scurtcircuite).

### 3.3. Supraconductibilitatea

La temperaturi foarte joase, în general mai mici decât 20 [K], și în câmpuri magnetice slabe, a fost pusă în evidență experimental, pentru anumite metale, starea de supraconductibilitate, caracterizată mai ales prin proprietatea că, la stabilirea ei, rezistivitatea electrică a metalului se anulează (sau devine aproape nulă). Într-o probă supraconductoare în formă de inel, curentul electric indus pe cale electromagnetică (de exemplu) se menține neschimbat timp îndelungat (calcululele indică cel puțin 100.000 ani, în condiții adecvate) după suprimarea câmpului electric exterior indus în corp: proba e parcursă de un **curent electric persistent**.

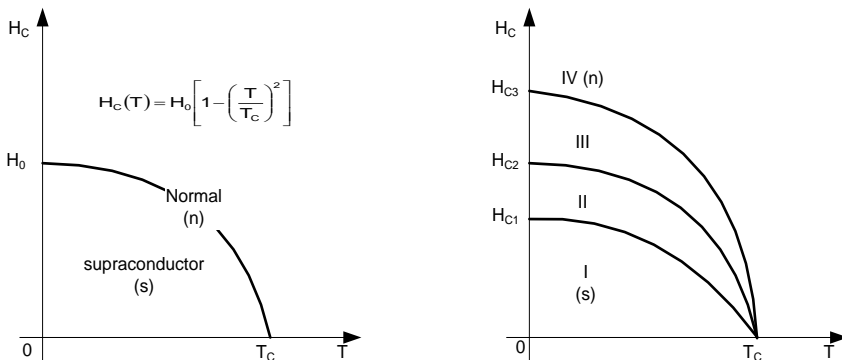
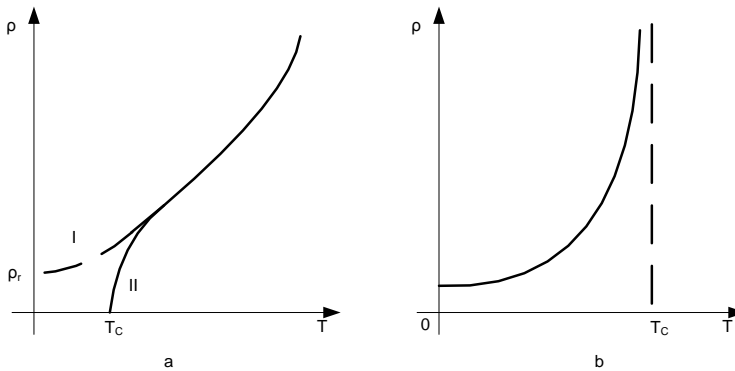


Figura 3-5 Dependența câmpului magnetic critic de temperatură

Dacă intensitatea câmpului magnetic, stabilit din exterior,  $H_e$ , depășește o anumită valoare-critică,  $H_c$ , dependentă de temperatură, starea de supraconductibilitate se pierde. În Figura 3-5, a, curba  $H_c(T)$  împarte cadranul  $H_c > 0$ ,  $T > 0$  în două regiuni: **n**, în care conductorul e ne-supraconductor ("normal") și

s în care este supraconductor. Temperatura maximă sub care corpul este supraconductor se obține pentru  $H_c=0$  și se numește **temperatura de tranziție,  $T_c$** . În Tabelul 3-4 sunt indicate valorile temperaturii de tranziție (pentru  $H_c=0$ ) pentru câteva materiale. Se constată că supraconductibilitatea se obține mai repede (la temperaturi  $T_c$  mai mari) pentru metalele care în stare normală sunt slab conductoare (mercur, plumb etc.).

În apropierea temperaturii  $T_c$ , variația rezistivității cu temperatura este mai rapidă Figura 3-6.a . Porțiunea I, punctată, reprezintă variația mărimii pentru starea „normală”, de nesupraconductibilitate, corespunzător relației:  $\rho = C \cdot T^5 + \rho_r$ , în care primul termen este de acord cu relațiile anterioare, iar  $\rho_r$  este independentă (explicit) de temperatură și este determinată de impurități și de alte defecte ale rețelei cristaline. Ramura II a curbei din Figura 3-6.a prezintă o cădere extrem de abruptă, pe un interval de temperatură de 0,01...0,001K.



**Figura 3-6** Dependența de temperatură a rezistivității electrice și a adâncimii de pătrundere

Supraconductorul prezintă proprietatea, numită *Meissner-Ochsenfeld*, că liniile câmpului magnetic sunt „expulzate” din interiorul; mai precis, inducția magnetică  $\vec{B}_i$ , ca și densitatea curentului electric  $\vec{J}$  și intensitatea câmpului electric  $\vec{E}$  sunt nenule numai într-un strat subțire de lățime  $\delta$  - numită *adâncime de pătrundere* - adiacentă suprafeței metalului, care are valoare  $\delta \approx 10^{-7} \div 10^{-8}m$ . Mărimea  $\delta$  are expresia  $\delta = \sqrt{\Lambda/\mu}$  în care  $\Lambda$  este o mărime de material, numită *constanta lui London*, care crește cu temperatura, tinzând către infinit când  $T$  tinde spre  $T_c$  (Figura 3-6.b). La frecvențe înalte, din infraroșu metalul devine nesupraconductor chiar la  $T < T_c$ .

**Tabelul 3-4** Valori ale temperaturii de tranziție  $T_c$  de supraconductibilitate

Material	Tempe- ratura	Material	Tempe- ratura	Material	Tempe- ratura
Zn	0,79	Ga	1,07	Sn alb	3,73
Cd	0,54	In	3,37	Pb	7,22
Hg	4,15	Tl	2,38	Ti	0,53
V	5,1	Nb	9,22	Ta	4,38
Al	1,14	La	4,71	Zr	0,7
Hf	0,35	Th	1,32	Ag+Pb	7,2
Ag+Sn	3,6	Au+Pb	7	Nb <sub>3</sub> Sn	18



Într-una din teoriile clasice, aceste proprietăți sunt explicate pe baza *ecuațiilor lui Maxwell-London*.

Se consideră, în primul rând că densitatea de volum  $\rho_V$  a sarcinii electrice și densitatea curentului de conducție  $\vec{J}$  au formele  $\rho_V = \rho_{Vn} + \rho_{Vs}$ ,  $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_s$  în care  $\rho_{Vn}$  și  $\vec{J}_n$  sunt componentele „normale”, iar  $\rho_{Vs}$  și  $\vec{J}_s$  cele de „supraconductibilitate” din metal; ele se compun în proporții variabile cu temperatura, astfel încât atunci când  $T \rightarrow 0K$  să rezulte  $\rho_V \rightarrow \rho_{Vs}$  și  $\rho_{Vn} \rightarrow 0$ ,  $\vec{J} \rightarrow \vec{J}_s$  și  $\vec{J}_n \rightarrow 0$ , iar la  $T \rightarrow T_c$  să rezulte  $\rho_V \rightarrow \rho_{Vn}$  și  $\rho_{Vs} \rightarrow 0$ ,  $\vec{J} \rightarrow \vec{J}_n$  și  $\vec{J}_s \rightarrow 0$ , apoi se mențin relațiile lui Maxwell:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{20}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho_V$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

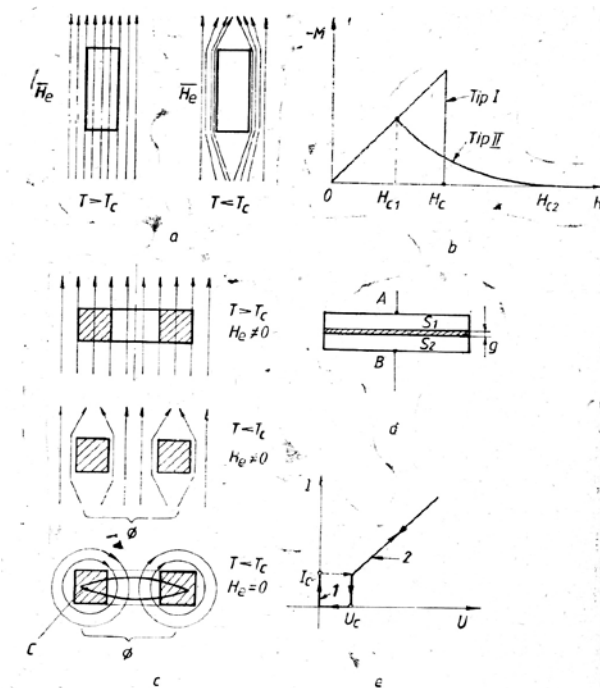


Figura 3-7 Efecte ale supraconducției electrice

Acestora li se adaugă, ca variabile prin ipoteză, ecuațiile:

$$\begin{aligned} \bar{J}_n &= \sigma \bar{E} \\ \operatorname{div} \bar{J}_n &= -\partial \rho_{Vn} / \partial t \\ \operatorname{div} \bar{J}_s &= -\partial \rho_{Vs} / \partial t \end{aligned} \quad (21)$$

ultimele fiind compatibile cu ecuația de continuitate  $\operatorname{div} \bar{J} = -\partial \rho_V / \partial t$ . Admitând că în starea supraconductoare  $T \rightarrow 0K$  este valabilă ecuația  $\partial \bar{v}_E / \partial t = -(q_0/m_0) \bar{E}$  și că  $\bar{J}_s = -q_0 N_0 \bar{v}_E$ , rezultă  $\bar{E} = (m_0/N_0 q_0^2)(\partial \bar{J}_s / \partial t)$ , în care  $N_0$  este concentrația numerică a electronilor supraconductori.

Dacă notăm  $\Lambda = m_0/N_0 q_0^2$ , unde  $\Lambda$  este constanta lui London menționată anterior (cu valorile tipice  $N_0 = 10^{28} m^{-3}$ ,  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$ ,  $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ ), se obține  $\Lambda \approx 10^{-21} kg C^{-2} m^3$ , rezultă ecuația:

$$\bar{E} = \frac{\partial(\Lambda \bar{J}_s)}{\partial t} \quad (22)$$

din această ecuație și  $\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$ , rezultă:

$$\operatorname{rot}(\Lambda \bar{J}_s) = -\bar{B} \quad (23)$$

din această ecuație și din  $\bar{B} = \operatorname{rot} \bar{A}$ , în care  $\bar{A}$  este potențialul magnetic vector, se obține  $\bar{J}_s = -\bar{A}/\Lambda$  (cu grad  $V=0$ ,  $V$  fiind potențialul electrodinamic scalar). Ecuațiile *Maxwell-London* explică principalele proprietăți ale supraconductorilor.

În **regim staționar**, când  $\bar{J}_s = \text{const.}$  în timp, iar  $\bar{J}_n = 0$  (supraconducție), deci  $\bar{E} = 0$ , din (22) și din integrarea ecuațiilor Maxwell-London, rezultă că  $\bar{J}_s = \bar{J}_{s0} \exp(-x/\delta)$  și  $\bar{B}_s = \bar{B}_{s0} \exp(-x/\delta)$  în care  $\delta = \sqrt{\Lambda/\mu}$ , iar  $x$  este contat după normala interioară locală la suprafața conductorului (cu  $x = 0$  pe suprafață); rezultă deci că în conductor curentul electric supraconductor și fluxul magnetic străbat numai o peliculă subțire, de grosime practic egală cu  $\delta$ , la suprafața conductorului ( $\delta = \sqrt{10^{-21}/4\pi 10^{-7}} \approx 10^{-8} m$ ). Dacă pentru  $T > T_c$  (conductor normal) se stabilește un câmp magnetic în conductor și apoi acesta se răcește treptat, la  $T < T_c$  (în stare supraconductoare) câmpul magnetic este expulzat din metal (efectul Meissner). În Figura 3-6.b este reprezentată variația adâncimii de pătrundere cu temperatura, în regim staționar.

În **regim armonic permanent**, de frecvență  $f$ , rezultă din integrarea ecuațiilor Maxwell-London că  $J_n/J_s = \sigma 2\pi f \Lambda$ , din care rezultă proprietatea, menționată anterior, că la frecvențe înalte ( $f \geq 10^{12} \div 10^{14} Hz$ , deci începând din infraroșu) corpul nu mai este supraconductor ( $\sigma 2\pi f \Lambda \cong 2\pi$ , deci  $J_n > J_s$ ).

Baza teoriei cuantice a supraconductibilității a fost pusă, în anul 1957, de către J. Bardeen, L.N. Cooper și J.R. Schrieffer. În teoria B.C.S. se arată că, în starea supraconductoare, repartiția electronilor din cazul conductorilor normali (nesupraconductori) (pentru  $T=0$ ) se modifică în sensul că în vecinătatea nivelului Fermi  $w_F$  se formează o bandă interzisă  $\delta w_i \approx 4kT_c \ll w_F$ ). Prin urmare, banda de conducție a metalului normal, indicată în Figura 3-8.a, se modifică prin apariția benzii  $\delta w_i$  ca în Figura 3-8.b. La  $T \neq 0$ , în regiunea  $n$  din Figura 3-8.b, se găsesc

electroni „normali”, nesupraconductori - aceia care formează densitatea de sarcină  $\rho_{Vn}$  și de curent  $J_n$  din ecuațiile Maxwell-London, iar în regiunea  $S$  se găsesc electronii supraconductori (corespunzători la  $\rho_{Vs}$  și  $J_s$ ). Electronii supraconductori se caracterizează prin proprietatea că sunt grupați în perechi de electroni (perechi Cooper) care au vectorii de undă egali și de semn contrar ( $\vec{K}_j, -\vec{K}_j$ ) și spinii opuși; electronii aceleiași perechi pot fi distanțați, în spațiu, astfel încât dimensiunea medie a unei perechi să fie mai mare decât distanța dintre perechi. Suma spinilor unei perechi fiind nulă, rezultă că perechea de electroni se comportă ca un boson. Însă principiul de excluziune al lui Pauli nu se aplică bosonilor și rezultă atunci proprietatea fundamentală că se pot găsi în aceeași stare oricât de multe perechi - deci oricât de mulți electroni supra-conductori. Ei se găsesc, evident, sub banda interzisă  $\delta w_i$ , din Figura 3-8.b - situați astfel încât energia sistemului să fie minimă. Probabilitatea ca perechile să se găsească în starea de minim al energiei este foarte mare, și de aceea, împrăștierea perechilor (electronilor supraconductori) în rețeaua cristalină sunt extrem de puțin probabile, deoarece ele ar conduce la modificarea stării menționate; electronii supraconductori circulă (în sens clasic), deci, prin cristal fără ciocniri (practic) și metalul nu prezintă rezistență electrică. Starea electronilor supraconductori, se numește, adesea, stare BCS.

Formarea perechilor de electroni se poate intui în felul următor: un electron oarecare, normal (nesupraconductor), suferă o ciocnire și cedează rețelei energie - deci emite un foton; un alt electron absoarbe, practic în același moment, fotonul, producându-se, deci, un schimb rapid de foton între cei doi electroni. Se arată că acest schimb conduce la micșorarea energiei totale a sistemului electron-rețea-electron, dacă frecvența fotonului  $f_f = w_f/2\pi h$  ( $w_f$  este energia fotonului) este mult mai înaltă decât frecvența ionilor din noduri. Dar micșorarea energiei corespunde unei interacțiuni atractive: se produce, deci, o „atrație” între cei doi electroni (mai precis, o micșorare a repulsiei electrostatice dintre ei) care, în acest fel, formează o pereche-boson. Această legătură, care menține entitatea perechii este foarte slabă, și, de aceea, poate fi distrusă ușor de agitația termică: ea dispare pentru  $T \geq T_c$ . La  $T = 0$ , toți electronii de conducție sunt supraconductori, se găsesc în regiunea  $s$  din Figura 3-8.b (nici unul nu se găsește în  $n$ ); la  $0 \leq T \leq T_c$ , agitația termică distruge o parte dintre perechi și le transformă în electroni normali care, escaladând banda  $\delta w$ , se situează în regiunea  $n$  (și suferă împrăștieri pe defectele rețelei, inclusiv pe vibrațiile termice); la  $T > T_c$  practic toate perechile sunt distruse, electronii sunt normali și metalul încetează a mai fi supraconductor.

În obținerea stării BCS, rolul fundamental îl au, deci, interacțiunile electronilor cu fotonii (cu ionii rețelei, datorită agitației termice). Această împrejurare explică faptul că metalele care în stare normală au conductivitatea electrică mai slabă, devin supraconductoare mai repede ( $T_c$  este mai mare). Schimbul electron-foton-electron poate fi intuit și în felul următor (prezentare, evident, echivalentă cu aceea de mai sus): electronul care „ciocnește” rețeaua, îi provoacă o deformare, ionul „ciocnit” al rețelei se apropie de unul vecin și - ca urmare - banda interzisă  $w_i$  - se îngustează, iar banda de conducție se lărgeste, local, nivelul e inferior coborând puțin și formând, deci, o „vale” - un nivel inferior - care captează un alt electron.

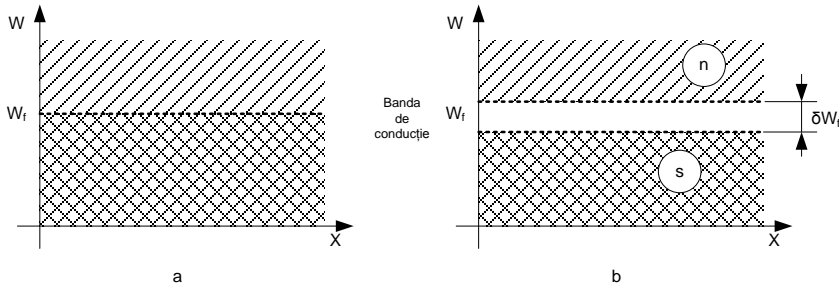


Figura 3-8 Repartiția electronilor din banda de conducție: a) în conductorul „normal”; b) în supraconductor

**Supraconductori de speța I și de speța a-II-a.** Se numesc **supraconductori de prima speță (tipul I)** acei supraconductori în care efectul Meissner încetează brusc când intensitatea câmpului magnetic exterior  $H_e$  atinge valoarea critică  $H_c$  (vezi Figura 3-7.a). Variația câmpului critic  $H_c$  cu temperatura este aproximativ parabolică:

$$H_c(T) = H_0 \left(1 - T^2/T_c^2\right) \quad (24)$$

$H_0$  reprezentând valoarea câmpului critic (extrapolat) la (vezi Figura 3-5.a). În aceste corpuri, rezistivitatea crește brusc la valoarea corespunzătoare stării normale  $\rho_n$ , când  $H_e$  depășește valoarea  $H_c$ .

În cazul **supraconductoarelor de speța a-II-a (tipul II)** efectul Meissner dispare progresiv, începând de la o valoare a intensității câmpului magnetic  $H_e$ , numit **câmp magnetic critic inferior  $H_{c1}$** , iar dispariția totală a efectului Meissner (respectiv, tranziția corpului din starea  $s$  în starea  $n$ ) se produce pentru o valoare a lui  $H$  numită **câmp critic superior  $H_{c2}$**  (vezi Figura 3-7.b). Pentru supraconductorii de tipul al II-lea, în diagrama câmp magnetic-temperatură se pot distinge patru zone (vezi Figura 3-5.b).

- zona I, în care rezistivitatea electrică  $\rho$  este întotdeauna nulă;
- zona a II-a (zona „tranzițiilor rezistive”), în care  $\rho$  poate lua valoarea 0,  $\rho_n$  sau o valoare intermediară (în funcție de gradul de impurificare, de densitatea de curent, de direcția câmpului magnetic etc.);
- zona a III-a, corespunzătoare supraconducției „de suprafață”, în care doar un strat foarte subțire - de la suprafața materialului - este supraconductor (și numai dacă câmpul magnetic are o componentă paralelă la suprafața corpului);
- zona a IV-a, corespunzătoare stării normale a corpului ( $\rho = \rho_n$ ).  
Ca valori informative ale câmpurilor critice se pot considera  $H_{c1} = 10kA/m$ ,  $H_{c2} = 10MA/m$  și  $H_{c3} = 1,69H_{c2}$ .

Supraconductoarele de speța a-II-a sunt constituite, de obicei, din aliaje (Nb -Zr, Nb-Ti), compuși supraconductori ( $Nb_3Sn$ ,  $V_3Ga$ ) și metale de tranziție (Nb) cu  $\rho_n$  mare. Pentru valori ale intensității câmpului magnetic cuprinse între  $H_{c1}$  și  $H_{c2}$ , aceste materiale prezintă zone în stare normală (în care  $B \neq 0$ ), de formă filamentară (cu diametrul de mărimea, lui  $\delta$ ), înconjurate de linii de curenți Foucault

și numite **fluxoizi sau vortexuri**, separate de zone în stare supraconductoare (în care  $B = 0$  și prin care se închid liniile de curenți turbionari). Se spune că supraconductorul se află într-o **stare intermediară** sau **de vârtėjuri**.

**Captarea și cuantificarea fluxului magnetic.** Se consideră un inel realizat dintr-un material supraconductor de prima speță, având secțiunea pătratică cu latura  $a$  mai mare decât adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic  $S$ , aflat - la temperatura  $T > T_c$  - într-un câmp magnetic exterior  $H_e > H_c$  (vezi Figura 3-7.c). Liniile de câmp magnetic trec atât prin inel, cât și prin spațiul - interior și exterior - care îl înconjoară.

Dacă inelul se răcește la  $T < T_c$ , atunci datorită efectului Meissner, liniile de câmp sunt expulzate din corpul supraconductor ( $H_i = 0$ ), acestea trecând fie prin zona interioară inelului (fluxul  $\Phi$ ), fie prin exterior. Suprimând câmpul magnetic exterior ( $H_e = 0$ ), se constată că liniile de câmp din interiorul inelului sunt „capturate” de inel, respectiv fluxul  $\Phi$  rămâne constant.

Pentru a demonstra menținerea fluxului  $\Phi$ , se consideră o curbă  $C$  (oarecare) închisă - prin materialul supraconductor - ; din legea inducției electromagnetice rezultă  $u_{ec} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -d\Phi/dt$ . Cum, în starea supraconductoare  $\vec{E} = \partial(\Lambda \vec{J}_s)/\partial t = 0$ , în regimul permanent final rezultă  $d\Phi/dt = 0$ , respectiv  $\Phi = ct$ .

Prin urmare, la suprimarea câmpului magnetic exterior, în inelul supraconductor apare un supracurent care menține constant fluxul magnetic  $\Phi$ , adică fluxul  $\Phi$  este capturat de inel. Dar valorile fluxului magnetic captat sunt cuantificate: ținând seama de cuplarea electronilor în perechi și utilizând undele  $\psi$  asociate electronilor, se poate demonstra că fluxul captat este întotdeauna un multiplu întreg al cuantei de flux  $\Phi_C$ , respectiv  $\Phi = n \cdot \Phi_0, n \in N$ . Cuanta de flux - numită **fluxon** - are valoarea  $\Phi_0 = h/q = h/2q_0 = 2 \cdot 10^{-15}$  Wb ( $|q| = 2q_0$  - reprezentând sarcina electronului).

Joncțiunea Josephson reprezintă un ansamblu de două supraconductoare  $S_1$  și  $S_2$  (Figura 3-7.d) separate (unul de celălalt) printr-un strat izolator de grosime  $g$  inferioară distanței dintre doi electroni cuplați ( $g = 1 \dots 3nm$ ). O joncțiune cu straturi subțiri se obține astfel: a) pe un strat de sticlă se depune, prin vaporizare, un strat de cositor (sau de plumb); b) se oxidează suprafața obținută (pe o adâncime de 10 Å), formându-se un strat izolator și c) se depune (tot prin evaporare) un al doilea strat de staniu (sau de plumb).

Rezistența electrică a unei asemenea joncțiuni, măsurate la temperatura camerei, este de circa 0,1 Ω. Pentru valori ale temperaturii superioare temperaturii critice  $T_c$  prin joncțiune trece un curent foarte slab (corespunzător efectului tunel), iar caracteristica  $I = f(U)$  este, aproximativ liniară (joncțiunea se comportă ca un rezistor).

Dacă temperatura scade sub valoarea  $T_c$  comportarea joncțiunii se schimbă fundamental. Astfel, prin joncțiune poate trece un curent continuu (corespunzător tunelării perechilor Cooper) de intensitate  $I$  inferioară unei valori critice  $I_c$  fără ca să apară o diferență de potențial  $U_{AB}$  între fețele  $A$  și  $B$  ale joncțiunii. Apariția și menținerea unui asemenea supracurent constituie **efectul Josephson de curent continuu**. Curentul critic  $I_c$  reprezintă, de fapt, valoarea maximă a intensității supracurentului  $I$  pe care poate să-l susțină joncțiunea; între cele două mărimi există relația  $I = I_c \cdot \sin \varphi$ , unde  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  reprezintă diferența dintre fazele undelor  $\psi_1$  și  $\psi_2$  asociate electronilor în  $S_1$  și, respectiv  $S_2$ .

Se consideră că se aplică joncțiunii o tensiune  $U_{AB} = U$ ; în acest caz, prin joncțiune trece un curent oscilant, respectiv apare **efectul Josephson de curent alternativ**. Diferența de fază  $\varphi$  variază în timp, adică  $d\varphi/dt = \omega = 2\Delta W_F/h'$ , unde  $\Delta W_F$  reprezintă diferența dintre nivelurile Fermi  $W_{F1}$  și  $W_{F2}$  ale celor două supraconductoare (potențialele chimice) și  $h' = h/2\pi$  - constanta lui Planck. Dar cum  $S_1$  și  $S_2$  sunt realizate din același material, diferența  $\Delta W_F$  se datorează doar acțiunii câmpului electric, respectiv  $\Delta W_F = q_0 U$ . Se obțin relațiile:

$$\varphi = \frac{2q_0}{h'} \int U_{AB} dt = \omega_0 t \quad (25)$$

$$I = I_c \cdot \sin \omega_0 t$$

unde  $f_0 = \omega_0/2\pi = 2q_0 U_{AB}/h'$  reprezintă frecvența Josephson (pentru  $U_{AB} = 1\mu V$ ,  $f_0 = 483,6\text{MHz}$ ).

Dacă se ridică, experimental, caracteristica curent-tensiune folosind o sursă de curent continuu a cărei impedanță este cu mult superioară impedanței joncțiunii, (se variază și se citește  $U_{AB}$  pe fețele joncțiunii) se constată că, în momentul în care curentul atinge valoarea  $I_c$  apare un salt al tensiunii  $U_{AB}$  de la valoarea 0 la valoarea  $U_c$  (linia întreruptă în Figura 3-7.e), corespunzătoare curbei de tunelare uniparticulă (pentru electroni necuplați). Dacă se reduce apoi intensitatea curentului, tensiunea poate urma caracteristica uniparticulă 2 sau poate sări direct la valoarea zero. Valoarea  $U_c$  reprezintă raportul dintre suma benzilor interzise ( $\delta W_1 + \delta W_2$ ) ale celor două supraconductoare (Figura 3-8) și sarcina electronului.

Pentru explicarea efectului de curent alternativ, se consideră că se aplică joncțiunii o diferență de potențial  $U$ , astfel încât  $\Delta W_F = q_0 U < \delta W_1 + \delta W_2$  corespunzătoare lui  $S_1$  și  $S_2$ , astfel încât tunelarea electronilor necuplați (uniparticulă) să fie neglijabilă. O tunelare unidirecțională  $S_1 \rightarrow S_2$  a perechilor nu este posibilă căci ar apărea un supracurent continuu iar, pentru aceasta, trebuie ca  $\Delta W_F = 0$  (de unde,  $\varphi = ct$ ). Prin urmare, este posibil ca cooperonii să tuneleze joncțiunea în ambele sensuri: de la  $S_1$  la  $S_2$  și de la  $S_2$  la  $S_1$ . Presupunând  $W_{F1} < W_{F2}$ , prin trecerea  $S_1 \rightarrow S_2$ , perechile emit fotoni de energie  $h\nu = 2\Delta W_F = 2(W_{F1} - W_{F2})$ . Acești fotoni ar putea fi absorbiți de alte perechi care să treacă din  $S_2$  în  $S_1$ . Dar absorbția fotonilor se face după un interval de timp  $\tau$ , deci perechile care le-au absorbit trec din  $S_2$  în  $S_1$  după o durată  $\tau$ . Se poate deci, considera că purtătorii de sarcină trec după un interval de timp  $\tau$  de la dreapta la stânga și apoi, după o durată  $\tau$  de la stânga la dreapta, ș.a.m.d., apărând un curent alternativ.

Așadar, pentru  $q_0 U < \delta W_1 + \delta W_2$ , apare un supracurent alternativ, a cărui valoare medie este nulă.

Pentru evidențierea efectului Josephson de curent alternativ se stimulează trecerea perechilor din  $S_1$  în  $S_2$  (față de trecerea în sens contrar), utilizându-se un câmp de radiații de frecvență  $\nu$  și energie  $h\nu = 2q_0 U$ . În acest caz, în caracteristica  $I(U)$  apar trepte de curent la valori ale tensiunii  $U_n = nh\nu/2q_0$ , unde  $n \in \mathbb{N}$ , reprezintă numărul de fotoni emiși sau absorbiți.

Din  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\Delta W_F/h = 2q_0 U/h$ , rezultă  $U = hf_0/2q_0 = \Phi f_0$ , adică între tensiunea, frecvența Josephson și cuanta de flux  $\Phi_0$  există o legătură directă. Pe de altă parte, intensitatea curentului critic este direct influențată de mărimea

inducției magnetice  $B_0$  în care se află joncțiunea, ceea ce permite realizarea unor magnetometre de mare sensibilitate.

În concluzie, trebuie reținut că efectul Josephson de curent continuu se produce în cadrul joncțiunilor pentru care  $\Delta W_F = 0$  (deci, prin tunelarea  $S_1$  în  $S_2$ , nu se emit fotoni), iar efectul Josephson de curent alternativ se datorează întârzierii schimbului de fotoni dintre perechile aflate de o parte și de alta a joncțiunii, când  $\Delta W_F \neq 0$ .

### **Materiale supraconductoare cu temperaturi critice înalte. MSTR.**

Teoria BSC, aplicată îndeosebi materialelor pure, aliajelor metalice și compuşilor intermetalici, estimează o valoare maximă a temperaturii critice de circa 35K (experimental, s-a obținut  $T_c = 23,4K$  pentru  $Nb_3AlGe$ ). Cercetările efectuate pe ceramici pe bază de oxizi de cupru au permis, începând cu anul 1986, evidențierea stării supraconductoare a acestora la temperaturi mult mai înalte; mai întâi 35 K, de către Alex Muller și Georg Bednorz (pe  $Ba_xLa_{2-x}CuO_4$ , cu  $x = 0,15 \dots 0,2$ ) și apoi 95 și 98K de către Ching-Wu și Man Kwen Wu (pe Y-Ba-Cu-O). Rezultatele obținute de Chu și Wu au fost reconfirmate rapid, astfel încât, la ora actuală se fabrică, în mod uzual, materiale supraconductoare cu temperatura critică superioară temperaturii de lichefiere a azotului (77K), respectiv peste 90K (93K - pentru  $YBa_2Cu_3O_7$ , 110K pentru  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_2O_{10}$ , 125K - pentru  $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_2O_{10}$  etc.).

Materialele supraconductoare ceramice prezintă câteva particularități importante:

- 1) MSTR sunt materiale anizotrope cu o structură policristalină de tipul lamelar, stratificată, similară cu cea a perovskitelor ( $CaTiO_3$ ). Între cele două plane de atomi de ytriu se află trei plane de Cu-O, separate, la rândul lor, prin două plane de Ba-O. Atomii de oxigen din planele Cu-O învecinate cu planele de Y formează (câte patru) bazele unor tetraedre cu vârfurile în atomii de oxigen din planele Ba-O. În planul Cu-O, aflat între cele două plane Ba-O, apar lanțuri Cu-O, care prezintă un rol foarte important în procesul de supraconducție, îndeosebi prin vacanțele de oxigen existente. Experimental se constată că o concentrație prea mare sau prea mică a acestor vacanțe reduce drastic valoarea temperaturii critice. Datorită acestei anizotropii, valorile rezistivității electrice, ale câmpurilor și ale curenților critici (curenți care, trecând prin corpuri, generează câmpuri magnetice egale cu câmpurile critice) iau valori diferite, în funcție de direcția cristalografică luată în considerare și de poziția corpului în câmpul magnetic exterior;
- 2) Valoarea temperaturii critice este puternic influențată de durata de menținere a supraconductorului în atmosferă de oxigen (de exemplu, materialul  $YBa_2Cu_3O_7$  este supraconductor decât pentru  $\delta < 0,4$ );
- 3) Există MSTR care prezintă mai multe faze supraconductoare. De exemplu,  $BiSrCaCuO$  are trei faze supraconductoare: la 60K, 85K și 110K;
- 4) Banda interzisă  $\delta W$  (Figura 3-8) este de aproape două ori mai lată decât în cazul supraconductorilor „clasici”;
- 5) Definind valoarea câmpului critic superior  $B_{c2}$  ca valoarea maximă a inducției magnetice la care rezistivitatea nu mai este, practic, măsurabilă, s-au obținut - pentru  $YBa_2Cu_3O_7$  -, la 77K,  $B_{c2} = 15T$  (cu o densitate a curentului de măsură  $J = 5.000 A/cm^2$ ). Prin urmare, MSTR pot fi utilizate în câmpuri magnetice intense;

- 6) MSTR sunt constituite din granule supraconductoare (de circa  $5 \mu\text{m}$ ), separate de zone (joncțiuni) intergranulare (de circa  $2 \text{ nm}$ ). Aceste zone perturbă considerabil (local) starea supraconductoare, îndeosebi în ceea ce privește transferurile de electroni între granule. Iată de ce există două valori net distincte ale densităților de curent critic :  $J_{ci}$  - corespunzătoare interiorului granulelor și  $J_{ce}$  - corespunzătoare trecerii de la o granulă la alta. Dacă valorile lui  $J_{ci}$  pot depăși, la  $77\text{K}$ ,  $10^9 \text{ A/m}^2$ , apoi, pentru  $J_{ce}$  s-au obținut doar  $10^7 \text{ A/m}^2$  în câmp slab (produs de curentul de măsură) și cel mult  $10^5 \text{ A/m}^2$  pentru  $B > 1\text{T}$ . Dacă se realizează MSTR cu o textură specială, respectiv cu un raport  $k$  între lungimea și grosimea granulelor cât mai mare ( $k = 10 \dots 100$ ) se poate obține o densitate a curentului critic prin material de  $2 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ . Spre deosebire de supraconductorii clasici (de tip BCS), în MSTR nu au fost încă elucidate mecanismele de supraconducție. Trebuie însă marcat că măsurătorile de determinare a frecvenței Josephson au demonstrat existența cooperonilor și în MSTR. Referitor însă la natura și mecanismul interacțiunii atractive dintre electroni s-au emis mai multe ipoteze. Unii cercetători afirmă că interacțiunea între electroni este pur electronică, respectiv că rețeaua nu intervine. Cum energia de interacțiune ar fi de circa 100 ori mai mare decât în cazul cuplării prin intermediul rețelei, s-ar putea astfel explica valorile mari ale temperaturi critice. O altă explicație a cuplării electronilor se bazează pe frecvențele foarte înalte de vibrație ale rețelei cristaline corespunzătoare ionilor de oxigen, vibrații care ar permite apariția rapidă a sarcinilor ionice pozitive și, în consecință interacțiuni eficiente între electroni. O a treia ipoteză ia în considerare existența unor vibrații de frecvențe foarte joase, care ar corespunde oscilațiilor lente ale ionilor pozitivi; prin aceasta s-ar acționa un timp mai îndelungat asupra electronilor, respectiv interacțiunea electron-ion-electron s-ar intensifica. Există și alte ipoteze, dar nici una dintre ele nu explică complet supraconducția în MSTR (probabil că vacanțele de oxigen au un rol analog celui al electronilor); în orice caz nu se pune problema infirmării teoriei BCS, teorie unanim acceptată pentru supraconductorii clasici.

### 3.3.1. Aplicații ale materialelor supraconductoare

Utilizarea materialelor supraconductoare în electrotehnică va permite - prin creșterea densității de curent - pe de o parte, reducerea volumului conductoarelor și, pe de altă parte, reducerea volumului materialelor izolante și eliminarea circuitelor magnetice, miniaturizarea aparatelor electronice etc. Chiar dacă în acest moment, realizările industriale sunt încă modeste, cercetările continuă pentru anii în care se vor utiliza MSTR.

Conductoarele supraconductoare se realizează din mănunchiuri de filamente de NbTi sau Nb<sub>3</sub>Sn, având diametre reduse ( $0,12 \dots 0,6 \mu\text{m}$ ), înglobate în matrici din cupru sau aliaje CuNi (numărul de filamente poate varia între sute și sute de mii). Se mai utilizează și benzi sau straturi subțiri (îndeosebi pentru fabricarea joncțiunilor). Dintre aplicațiile mai importante ale materialelor



supraconductoare se remarcă : cabluri pentru transportul energiei electrice la mari distanțe, electromagneți cu câmpuri magnetice foarte intense (pentru acceleratoare și detectoare de particule, în medicină, în fuziunea termonucleară controlată, transport feroviar pe perne magnetice etc.), alternatoare, transformatoare și motoare electrice de dimensiuni și greutate reduse, bobine de reactanță, diode supraconductoare, calculatoare ultrarapide, detectoare de câmpuri magnetice foarte slabe ( $10^{-15}T$ ), voltmetre ( $10^{-15}V$ ) și galvanometre ultrasensibile, inele supraconductoare pentru stocarea energiei electrice, miniaturizarea circuitelor electronice etc.

### 3.4. Conducția electrică a semiconducătorilor

#### 3.4.1. Conducția intrinsecă și conducția extrinsecă

Materialele semiconductoare se plasează din punct de vedere al conducției electrice între materialele conductoare și materialele electroizolante având rezistivitatea  $\rho = 10^{-6} \dots 10^6 \Omega m$ .

Conform teoriei benzilor, în cazul semiconducătorilor nivelul Fermi  $w_F$  corespunde unei benzi interzise; după lățimea acestei benzi semiconducătorii pot fi:

- **semiconducători intrinseci** la care lățimea benzii interzise este suficient de mică (Figura 3-9) pentru a putea fi escaladată relativ ușor prin activarea unor electroni din banda de valență care ajung în banda de conducție, rămânând astfel niveluri incomplete, adică goluri cărora li se atribuie rolul de purtători fictivi de sarcină electrică pozitivă;
- **semiconducători extrinseci** care au banda interzisă prin care trece nivelul  $w_F$  relativ largă, astfel încât conducția electrică este posibilă numai prin crearea unor niveluri permise adiționale ce rezultă prin doparea cu atomi străini de tip acceptor sau donor; în tehnică se utilizează în prezent numai semiconducători extrinseci.

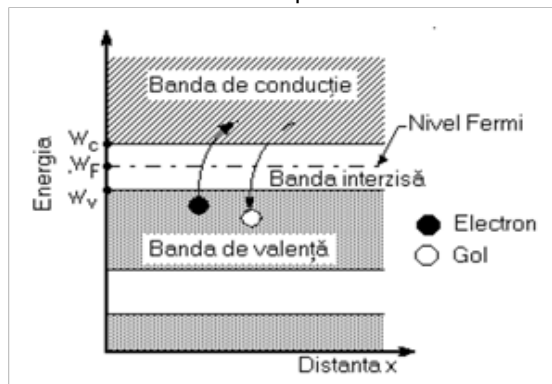


Figura 3-9 Conducția în semiconducătorii intrinseci

Elementele trivalente utilizate ca impurități formează niveluri acceptoare imediat deasupra benzii de valență (Figura 3-10.a) astfel că tranzițiile se efectuează și la temperatura ambiantă; deoarece conducția se realizează prin golurile din banda de valență, semiconductorii dopați cu elemente acceptoare sunt numiți *semiconductori de tip „p”*; impurificarea germaniului și siliciului pentru obținerea semiconductorilor de tip *p* se face cu *bor, aluminiu, galiu, indiu*.

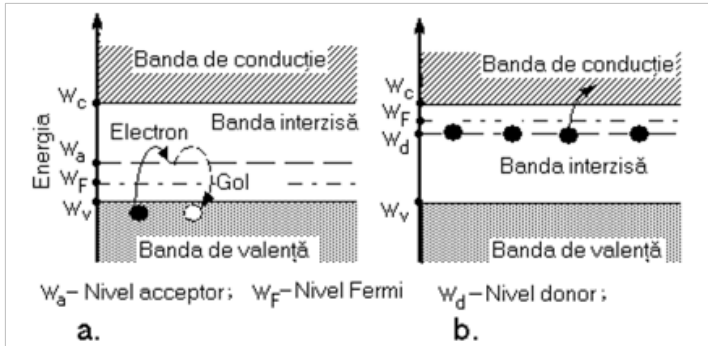


Figura 3-10 Conducția în semiconductorii extrinseci a) dopare cu elemente acceptoare b) dopare cu elemente donoare

Elementele pentavalente formează niveluri donoare apropiate de banda de conducție (Figura 3-10.b) pentru ca tranziția să se efectueze și la temperatura ambiantă; conducția electrică se realizează în acest caz prin intermediul electronilor ajunși în banda de conducție, iar semiconductorii respectivi sunt numiți *semiconductori de tip „n”*; impurificarea germaniului și siliciului pentru obținerea semiconductorilor de tip *n* se face cu *fosfor, arseniu sau stibiu*.

Prin doparea unei zone dintr-un cristal semiconductor cu impurități acceptoare și o altă zonă separată de prima printr-o suprafață plană cu impurități donoare, se obține *joncțiunea „p-n”* care stă la baza construcției dispozitivelor electronice.

### 3.4.2. Factori care influențează proprietățile semiconductorilor

**Influența impurităților.** Creșterea gradului de impurificare prin dopare sau accidental (impurități necontrolate) determină creșterea conductivității semiconductorilor. Impurificarea necontrolată afectează negativ caracteristicile funcționale ale semiconductorului respectiv și de aceea trebuie evitată în procesul de fabricare.

**Influența temperaturii.** Odată cu creșterea agitației termice a particulelor, crește numărul electronilor din banda de conducție și al golurilor din banda de valență, și deci crește conductivitatea totală a semiconductorului; spre deosebire de metale, în domeniul temperaturilor uzuale rezistivitatea semiconductorilor scade pe măsură ce temperatura crește (Figura 3-11).

**Influența câmpului electric.** Probabilitatea de tranziție a electronilor de pe nivelurile doare (sau din banda de valență) crește odată cu creșterea intensității câmpului electric, ceea ce conduce la creșterea conductivității electrice. În cazul câmpurilor electrice foarte intense, poate avea loc trecerea în avalanșă a electronilor în banda de conducție, adică străpungerea semiconductorului care devine inutilizabil datorită efectului distructiv al străpungerii. Anumiți semiconductori prezintă fenomenul de luminiscentă sub acțiunea câmpului electric datorită unor tranziții cu efect radiativ în domeniul spectrului vizibil.

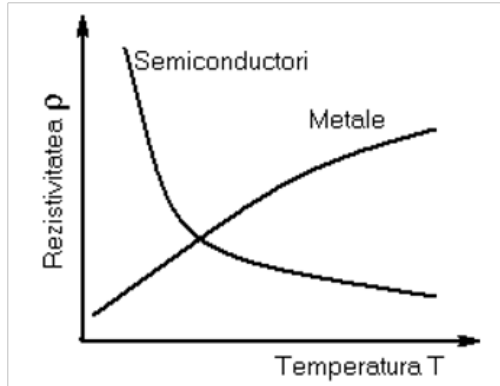


Figura 3-11 Influența temperaturii asupra conducerii semiconductoarelor și metalelor

**Influența câmpului magnetic.** Acțiunea câmpurilor magnetice exterioare se manifestă prin efectul Hall și efectul magnetostrictiv.

*Efectul Hall* constă în apariția unei tensiuni electrice  $U_H$  între fețele laterale ale unei plăci semiconductoare de grosime  $d$  parcursă de curentul  $I$  și situată într-un câmp magnetic de inducție  $B$ , perpendicular pe placă (Figura 3-12).

Tensiunea  $U_H$  are valoarea:

$$U_H = \frac{R_H B I}{d} \quad (26)$$

unde  $R_H$  este **constanta Hall** a semiconductorului respectiv; generatoarele Hall construite pe baza acestui efect au aplicații în măsurarea câmpului magnetic, a intensității curentului electric etc.

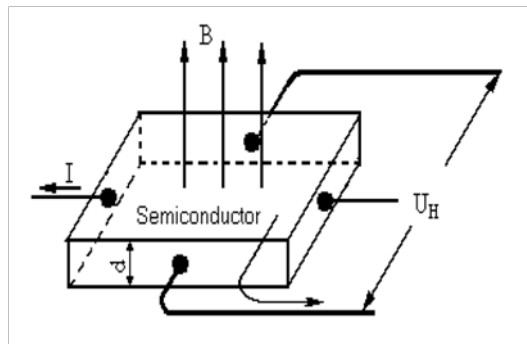


Figura 3-12 Efectul Hall în semiconductori

*Efectul magnetostrictiv* în general constă în modificarea dimensiunilor unui corp sub acțiunea unui câmp magnetic; efectul magnetostrictiv la semiconductoare este mai redus decât în cazul unor metale.

**Influența radiațiilor.** Lumina sau a alte radiații acționează asupra semiconducătorilor prin creșterea energiei purtătorilor de sarcină, ceea ce poate avea următoarele efecte:

- *efect fotoelectric* manifestat prin smulgerea unor electroni din suprafața materialului (fotocatozi);
- *efect fotoconductiv* manifestat prin creșterea conductivității electrice;
- *efect fotovoltaic* manifestat prin apariția unei tensiuni electromotoare la joncțiunea p-n dintre două semiconductoare;
- *luminiscentă* ce se manifestă îndeosebi la acțiunea radiațiilor cu energii mai mari (ultraviolete sau Roentgen).

**Influența solicitărilor mecanice.** Solicitățile mecanice produc modificarea distanțelor interatomice în rețeaua cristalină, ceea ce are ca efect modificarea rezistivității corpurilor.

În cazul unor cristale semiconductoare prin deformarea rețelei cristaline corpul se polarizează electric și produce o tensiune electromotoare, efect numit *piezoelectricitate*. Pentru exemplificare în Figura 3-13 se prezintă cazul unei rețele cristaline în care în absența solicitărilor mecanice ionii formează triplete ABC simetrice, cu moment electric nul; prin solicitarea cu forțe  $F$ , rețeaua se deformează, se modifică unghiurile legăturilor și suma momentelor electrice nu mai este nulă, adică se produce polarizarea electrică. Efectul piezoelectric este utilizat la construirea traductoarelor mecano-electrice și a generatoarelor de ultrasunete.

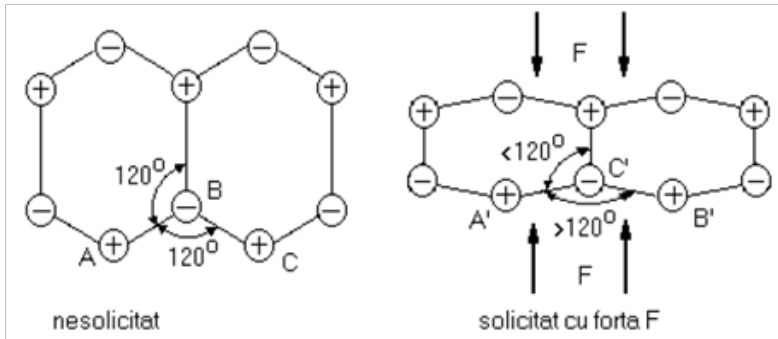


Figura 3-13 Fenomenul piezoelectric în cristale

## 3.5. Proprietățile electroizolante ale materialelor

### 3.5.1. Rigiditate dielectrică, polarizare, permitivitate

În cazul materialelor electroizolante (materialele la care rezistivitatea  $\rho > 10^6 \Omega\text{m}$ ) banda de valență este separată de banda de conducție printr-o zonă de energii interzise a cărei lățime este suficient de mare pentru a împiedica tranziția electronilor sub acțiunea câmpurilor electrice uzuale. Dacă intensitatea câmpului electric depășește o anumită valoare electronii sunt puternic accelerați, și pot ioniza atomii prin ciocniri succesive, formându-se astfel o avalanșă de electroni care depășesc zona interzisă; în acest moment are loc străpungerea electrică marcată de creșterea bruscă a conductivității, așa cum se observă în Figura 3-14.

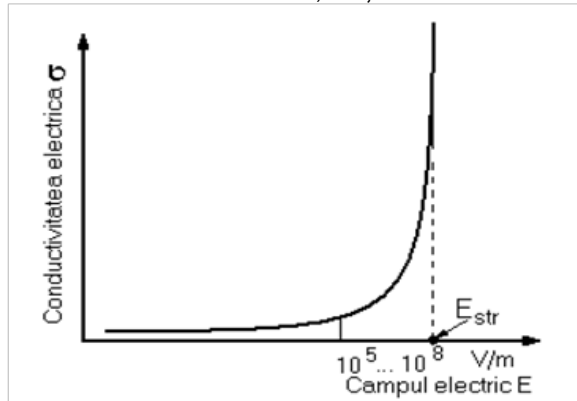


Figura 3-14 Rigiditatea dielectrică

Valoarea intensității câmpului electric  $E_{str}$  pentru care are loc străpungerea electrică se numește **rigiditate dielectrică**; mărimea ei depinde de tipul materialului, puritatea și grosimea acestuia, temperatură, frecvența câmpului electric etc.

În izolatoarii *gazoși* străpungerea se datorează ionizărilor prin ciocnire și datorită drumului liber mare al purtătorilor de sarcină se produc accelerații mari ale acestora și în consecință rigiditatea dielectrică a gazelor la presiune normală este redusă ( $E_{str} \sim 3 \cdot 10^6 \text{V/m}$ ). Creșterea sau scăderea presiunii conduce la creșterea rigidității (la scăderea presiunii se reduce numărul de ciocniri, la creșterea presiunii se reduce drumul liber).

În cazul izolatoarilor *lichizi*, de puritate înaintată drumul liber este mai redus decât în cazul gazelor, iar rigiditatea este mai mare ( $E_{str} \sim 10^8 \text{V/m}$ ).

Izolatoarii *solizi* au rigiditatea dielectrică mare ( $E_{str} \sim 10^8 \dots 10^9 \text{V/m}$ ) datorită drumului liber mult mai redus care nu permite accelerarea electronilor decât la valori ridicate ale intensității câmpului electric. Străpungerea electrică prin accelerarea electronilor în acest caz este de scurtă durată și distructivă producându-se fărâmițarea materialului pe direcția de străpungere.

Străpungerea izolatoarilor solizi poate avea la bază și un mecanism termic; prin creșterea temperaturii crește agitația termică, electronii pot ajunge mai ușor în

banda de conducție ceea ce conduce la creșterea curentului de conducție, care prin efect Joule face să crească și mai mult temperatura; se ajunge astfel la o creștere în avalanșă a temperaturii, care continuă până la străpungerea electrică și distrugerea materialului.

O caracteristică importantă a materialelor electroizolante este aceea de a se **polariza electric**; un material este polarizat electric, dacă fără a avea densitate de sarcină electrică produce câmp electric și este supus unor acțiuni ponderomotoare când este introdus în câmp electric exterior; *materialele care se polarizează se numesc dielectrici*; la nivel microstructural moleculele unor dielectrici pot avea o polarizare spontană, adică fiecare moleculă este un dipol microscopic (dielectrici polari); datorită orientării aleatoare a moleculelor, la nivel macroscopic în absența unui câmp electric exterior nu se înregistrează o dispunere preferențială a sarcinilor electrice nici în cazul dielectricilor polari. Toate materialele dielectrice sunt electroizolante, dar nu toate materialele electroizolante sunt și dielectrici.

Sub acțiunea unui câmp electric exterior materialele dielectrice se polarizează prin unul din următoarele mecanisme: *polarizare electronică* realizată prin deformarea învelișului electronic sub acțiunea câmpului electric exterior (Figura 3-15.a); *polarizare ionică* realizată prin modificarea distanțelor dintre ionii de sarcini diferite (Figura 3-15.b); *polarizarea de orientare* care se produce în cazul moleculelor polare prin orientarea acestor dipoli microscopici în câmpul electric exterior (Figura 3-15.c).

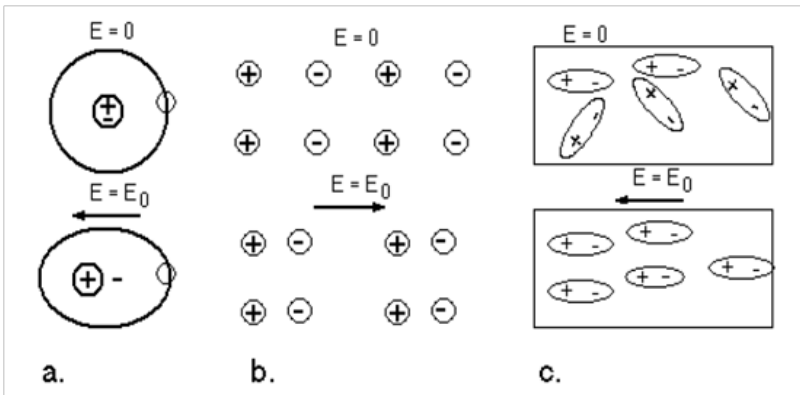


Figura 3-15 Polarizarea electrică a) electronică; b) ionică; c) de orientare

Între *inducția electrică*  $\bar{D}$  și *câmpul electric*  $\bar{E}$  dintr-un material care nu rămâne cu polarizație permanentă există relația  $\bar{D} = \varepsilon \bar{E}$ , unde factorul de proporționalitate  $\varepsilon$  este *permittivitatea electrică absolută* a materialului. Pentru caracterizarea materialelor electroizolante se folosește *permittivitatea relativă*  $\varepsilon_r$  numită și *constantă dielectrică* a materialului și definită prin raportul  $\varepsilon/\varepsilon_0$ , unde  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  C/Nm este permittivitatea vidului. Permittivitatea relativă variază de la  $\varepsilon_r \approx 1$  în cazul dielectricilor gazoși la  $\varepsilon_r = 3 \dots 15$  în cazul dielectricilor polari solizi, sau chiar  $\varepsilon_r = 100 \dots 1000$  în cazul materialelor feroelectrice (dielectrici la care inducția electrică  $\bar{D}$  variază neliniar cu intensitatea câmpului electric  $\bar{E}$ , rezultând o buclă de histerzis electric asemănătoare histerzisului magnetic).

### 3.5.2. Pierderi în dielectrici

Prin introducerea unui material electroizolant într-un câmp electric o parte din energia câmpului se disipă în substanță, în marea majoritate a cazurilor transformându-se în căldură. Energia disipată în unitatea de timp în material sub influența și pe seama câmpului electric constituie pierderi în dielectric; după cauzele care le produc, aceste pierderi sunt:

- *pierderi prin polarizare* ce apar la materialele care au polarizare de orientare și reprezintă energia consumată pentru orientarea dipolilor microscopici;
- *pierderi prin conducție electrică* ce rezultă din transformarea energiei electrice în căldură prin efect Joule; conducția se poate realiza pe suprafața materialului și este caracterizată de rezistivitatea de suprafață  $\rho_s$ , sau prin material și este caracterizată de rezistivitatea de volum  $\rho_v$ ; în practică se determină rezistivitatea globală  $\rho$  care caracterizează materialul în ansamblu;
- *pierderi prin ionizare* ce apar la gaze sub acțiunea câmpurilor electrice intense;

Mărimea pierderilor depinde atât de caracteristicile materialului cât și de factori externi dintre care cei mai importanți sunt: temperatura, umiditatea, intensitatea și frecvența câmpului electric etc.

Caracterizarea materialelor din punct de vedere al pierderilor se face cu ajutorul **tangentei unghiului de pierderi  $tg\delta$**  numită și **factorul de pierderi**; în mod simplificat, pentru definirea factorului de pierderi se consideră schema din Figura 3-16 în care condensatorul real cu dielectricul între armături este asimilat unui circuit cu un condensator ideal (fără pierderi) cu o capacitate echivalentă  $C_{ech}$  și cu o rezistență de pierderi  $R_{ech}$  în paralel; **unghiul de pierderi  $\delta$**  este unghiul dintre curentul total  $I$  și curentul  $I_C$  prin condensator; rezultă:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (27)$$

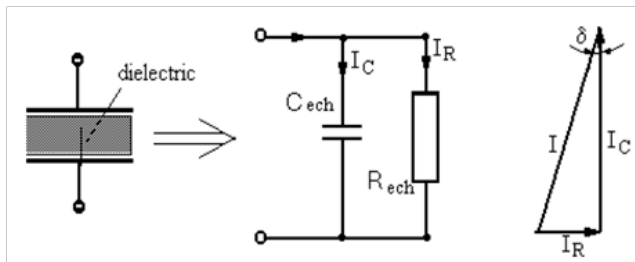


Figura 3-16 Determinarea factorului de pierderi

Rezultă că un material va avea proprietăți electroizolante cu atât mai bune cu cât factorul de pierderi  $tg\delta$  este mai mic. Factorul de pierderi este o caracteristică ce se determină experimental prin măsurarea unghiului de defazaj  $\delta$ .

### 3.5.3. Factori care influențează proprietățile electroizolante

#### Influența factorilor de material

Proprietățile electroizolante sunt influențate de tipul materialului (compoziția chimică), de structură și de puritatea materialului.

*Structura amorfă* conferă materialelor rezistivitate electrică foarte mare, dependentă de compoziția chimică (intensitatea și tipul legăturilor moleculare) și de gradul de puritate al materialului.

*Dielectricii cristalini sunt materiale cu structură ionică* a căror rezistivitate depinde de *razele ionilor* și de *numărul de coordinație al rețelei cristaline*: structurile cu ioni monovalenți și rază mică au rezistivitatea electrică mai redusă deoarece ionii respectivi pot depăși mai ușor barierele energetice trecând în benzile de conducție; cu cât numărul de coordinație este mai mare, cu atât mobilitatea ionilor se reduce și deci rezistivitatea crește. Rezultă că materialele cristaline ionice cu ioni de dimensiuni mari și rețea cristalină compactă vor avea proprietăți electroizolante bune (rezistivitate mare).

Compactitatea (atât a structurilor amorse cât și a celor cristaline) asigură și rigiditate dielectrică mare. Rigiditatea dielectrică este însă mult mai puternic influențată de factorii de mediu, existând diferențe foarte mari între rigiditatea intrinsecă materialului și cea practică, determinată în anumite condiții de mediu.

*Impuritățile* din material reduc rezistivitatea electrică și rigiditatea dielectrică, mai ales dacă sunt ioni metalici sau particule de materiale metalice; prezența acestor particule cu conductivitate electrică mare în materialul dielectric supus unei diferențe de potențial conduce pe de o parte la creșterea numărului de electroni liberi iar pe de altă parte la reducerea distanței dintre punctele cu potențiale diferite, favorizând străpungerea electrică.

#### Influența temperaturii

Temperatura influențează rezistivitatea de volum  $\rho_V$ , rigiditatea dielectrică  $E_{str}$ , permitivitatea relativă  $\epsilon_r$  și factorul de pierderi  $tg\delta$ .

Acțiunea de scurtă durată a temperaturii se manifestă prin creșterea mobilității particulelor constitutive, ceea ce duce la creșterea numărului de purtători de sarcină și deci la reducerea rezistivității electrice (și implicit la creșterea factorului de pierderi  $tg\delta$ ), și a rigidității dielectrice.

Pentru anumite valori ale temperaturii pierderile prin histerezis dielectric sunt maxime, și valoarea temperaturii maximului depinde și de frecvența câmpului electric.

Influența temperaturii asupra permitivității este complexă și depinde de tipul polarizației pe care o are materialul electroizolant solid, fiind puțin influențată de creșterea numărului de purtători de sarcină. În cazul materialelor care au doar polarizare ionică permitivitatea crește cu temperatura deoarece sunt favorizate deplasările ionilor în câmpul electric. În cazul materialelor cu polarizare de orientare are loc mai întâi o creștere a permitivității datorită favorizării mișcării moleculelor, iar dacă temperatura crește mai mult, agitația termică devine atât de mare încât împiedică menținerea orientării moleculelor, ceea ce conduce la reducerea permitivității.

În materialelor electroizolante organice sub *acțiunea căldurii în timp* (chiar la creșteri reduse de temperatură) se desfășoară procese fizico chimice ireversibile



care determină modificări ale structurii și chiar a compoziției chimice. Reacțiile chimice de degradare inițiate de acțiunea termică se desfășoară cu viteze care depind de tipul materialului și de prezența în mediu a unor substanțe active și a radiațiilor ionizante; procesul este cunoscut sub numele de „îmbătrânire” a materialelor și se manifestă prin înrăutățirea caracteristicilor electroizolante și a caracteristicilor mecanice (materialele devin fragile și scade rezistența mecanică).

Cunoașterea comportării materialelor la temperaturi joase a devenit importantă odată cu extinderea utilizării materialelor supraconductoare. Temperaturile scăzute acționează asupra caracteristicilor mecanice ale majorității materialelor electroizolante în special în sensul creșterii rezistenței la rupere dar reducerii tenacității (materialele polimerice pot deveni casante ca sticla).

### Influența umidității

Umiditatea înrăutățește drastic caracteristicile de izolație electrică ale materialelor și într-o oarecare măsură și caracteristicile mecanice. Cantitatea de umiditate absorbită depinde de tipul materialului (compoziție chimică și structură), de afinitatea acestuia față de apă (*hidrofil sau hidrofob*) și de durata expunerii la mediul umed, așa cum rezultă din Figura 3-17.

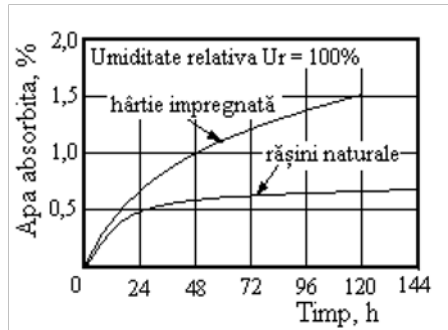


Figura 3-17 Absorbția de apă la două materiale electroizolante

Rigiditatea dielectrică și rezistivitatea scad în prezența umidității (Figura 3-18) datorită creșterii numărului de purtători de sarcină electrică prin disocierea apei și a impurităților solubile sub acțiunea câmpului electric.

Umiditatea contribuie la înrăutățirea caracteristicilor mecanice ale materialelor, în special prin reducerea rezistenței la rupere  $R_m$  și a alungirii procentuale după rupere  $A$ .

Reducerea influenței umidității se realizează prin reducerea conținutului de vapori de apă în atmosfera de lucru (de exemplu, prin plasarea în spațiul de lucru a unor substanțe higroscopice cum este *silicagelul*) și prin impregnarea sau acoperirea materialelor electroizolante cu substanțe hidrofobe.

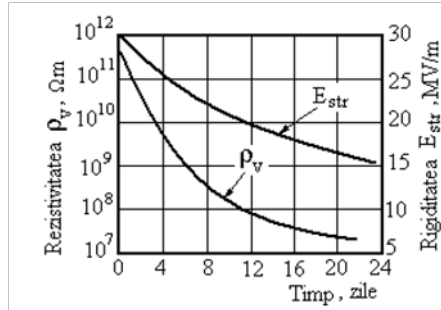


Figura 3-18 Influența umidității asupra rezistivității și rigidității dielectrice a hârtiei utilizată în atmosferă umedă

### Influența radiațiilor

Radiațiile luminoase și radiațiile ionizante influențează comportarea materialelor electroizolante organice în special prin accelerarea procesului de îmbătrânire. Acțiunea radiațiilor devine importantă atunci când energia lor este comparabilă cu energia legăturilor chimice ale materialului.

### Influența microorganismelor

Microorganismele contribuie la degradarea materialelor izolante prin acțiunea acizilor organici pe care îi produc și prin creșterea porozității datorită canalelor pe care le sapă în interiorul materialelor. Bacteriile se pot dezvolta la temperaturi cuprinse între  $-3^{\circ}C$  și  $100^{\circ}C$  și acționează prin intermediul acizilor organici. Mușcăiurile (ciupercile în general) se dezvoltă în medii umede la temperaturi de  $15...37^{\circ}C$  pe substraturi organice, intensitatea atacului depinzând atât de temperatură și umiditate cât și de compoziția materialului.

## Cap.4. Materiale conductoare. Metale

### 4.1. Caracteristici generale

Din grupa materialelor conductoare fac parte corpurile a căror conductivitate electrică este de ordinul a  $10^{-8} \dots 10^{-7}$  S/m și care - conform teoriei benzilor de energie - prezintă benzi de valență care au doar jumătate din nivelurile energetice ocupate cu electroni (cazul metalelor monovalente) sau suprapuneri ale benzilor de valență peste benzile de conducție (cazul metalelor bivalente).

Procesul de conducție este legat de existența unei mișcări dirijate a electronilor sau ionilor din interiorul corpurilor. Conductivitatea de tip electronic - corespunzătoare deplasării electronilor - ia valori mai mari decât cea ionică - corespunzătoare deplasării ionilor din electroliți - și este caracteristică îndeosebi metalelor (în stare solidă sau lichidă), grafitului etc. În cele ce urmează, vor fi considerate numai materialele cu conducție electronică (îndeosebi metalele) care prezintă aplicații importante în industria electrotehnică.

Cum solicitările metalelor sunt foarte complexe - atât ca intensitate, cât și ca natură (termice, mecanice, chimice, electrice, magnetice etc.) - și cum metalele pure nu pot suporta acțiunile combinate ale acestora decât în anumite condiții, în practică se utilizează, de cele mai multe ori, aliaje ale căror proprietăți pot să difere considerabil de cele ale metalelor componente.

Metalele prezintă, în general, o structură cristalină. Unele aliaje au însă structuri eterogene - constituite din două sau mai multe tipuri de cristalite - care înrăutățesc proprietățile materialelor, îndeosebi cele mecanice (de deformare plastică). În unele cazuri se realizează și orientări ale cristalelor - texturări; acestea determină însă anizotropii ale materialelor și fac ca proprietățile acestora să depindă și de direcția solicitărilor.

Caracteristicile materialelor conductoare sunt, de asemenea, influențate de tehnologia de elaborare, de structura, natura și conținutul impurităților, de solicitările mecanice, termice etc.

### 4.2. Dependență proprietăților materialelor conductoare de diferiți factori

Un conductor monocristalin cu rețea cristalină ideală (fără deformații datorită impurităților, vibrațiilor termice, tensiunilor mecanice etc.) se caracterizează printr-un maxim al conductivității electrice. Practic însă toate

corpurile prezintă abateri de la rețeaua cristalină ideală, fenomen care determină variații importante ale proprietăților lor electrice, termice și mecanice.

#### 4.2.1. Influența temperaturii

Rețelele cristaline ale metalelor se comportă, pentru undele  $\psi$  asociate electronilor în mișcare, ca niște rețele de difracție, adică determină fenomene de difuzie care conduc la micșorarea intensității fasciculului incident când  $\lambda < a$  ( $\lambda$  fiind lungimea de unda a undelor  $\psi$ , iar  $a$  constanta rețelei). La temperaturi joase, agitația termică este foarte redusă, rețeaua fiind practic ideală (dacă nu conține alte defecte). Cum  $a \approx 10^{-10} \text{ m}$ , iar  $\lambda > 10^{-10} \text{ m}$ , în aceste condiții, rețeaua este perfect transparentă pentru fasciculul de electroni, corpul aflându-se în starea *supraconductoare*.

Dacă temperatura crește, agitația termică devine importantă, se produce o împrăștiere a electronilor pe fononii rețelei cristaline și deci, o reducere a conductivității cristalului. Datorită proporționalității dintre agitația termică și temperatură, dintre împrăștierea electronilor și agitația termică precum și dintre rezistivitatea corpului și gradul de împrăștiere, rezultă că rezistivitatea electrică a unui conductor este proporțională cu temperatura acestuia. Așadar, pentru valori ale temperaturii superioare temperaturii Debye (Tabelul 4-1) rezistivitatea unui metal se poate determina cu relația:

$$\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha_\rho(T)(T - T_0)] \quad (28)$$

unde  $\rho(T)$  și  $\rho(T_0)$  reprezintă valorile rezistivității la temperatura  $T$ , respectiv  $T_0$ ,  $\alpha_\rho(T)$  - coeficientul de temperatură al rezistivității (Tabelul 4-1), iar  $T_0$  temperatura de referință (de obicei 293 K).

**Tabelul 4-1 Valori ale temperaturii Debye pentru metale**

Metalul	Pb	Au	Ag	Cu	Al	Fe
$T_D[K]$	88	180	215	315	389	420

Valorile caracteristicilor mecanice sunt, de asemenea, strâns legate de temperatură. Astfel, metalele cu temperatură de topire mai ridicată au modulul de elasticitate mai mare, acesta prezentând însă variații mai importante cu temperatura.

#### 4.2.2. Influența stării de agregare

Prin topirea unui metal se distruge rețeaua sa cristalină. Mișcarea electronilor este, astfel puternic frânată, conductivitatea scăzând pe măsură ce masa metalului topit crește. Din acest motiv, diagramele de variație a rezistivității cu temperatura prezintă creșteri bruște pentru valori ale acesteia egale cu tempe-

raturile de topire ale metalelor. În unele cazuri însă (Ga, Bi etc.), rezistivitatea scade odată cu schimbarea stării de agregare (Tabelul 4-2).

**Tabelul 4-2 Variația rezistivității metalelor cu schimbarea stării de agregare**

Metalul	Hg	Au	Sn	Zn	Cu	Ag	Al	Ca	Bi
$\frac{\rho_{lichid}}{\rho_{solid}}$	3,2	2,28	2,1	2,09	2,07	1,9	1,64	0,58	0,43

**Tabelul 4-3 Proprietățile electrice și termice ale unor metalelor**

Metalul	Rezistivitatea [ $\mu\Omega m$ ]	$\alpha_p(20) \cdot 10^2$ [ $K^{-1}$ ]	Temperatura de topire [ $^{\circ}C$ ]	Căldura specifică [ $J/kgK$ ]	Conductivitatea termică [ $W/m \cdot K$ ]	Coeficientul de dilatație liniară $\alpha_t(L) \cdot 10$ [ $K^{-1}$ ]
Cupru	0,0168...0,01724	3,93	1.083	384,3 (25 $^{\circ}C$ )	393 (20 $^{\circ}C$ )	16,42...16,5
Aluminiu	0,029...0,0262	4,1...4,3	658	945,7 (0...100 $^{\circ}C$ )	222 (20 $^{\circ}C$ )	23,8
Argint	0,0162	3,6	960,6	240,7 (20...100 $^{\circ}C$ )	423 (20 $^{\circ}C$ )	19,5
Aur	0,023	3,8	1.063	129,8 (20...100 $^{\circ}C$ )	293	14,3
Fier	0,087...0,105	5,5	1.530	464,8 (10...100 $^{\circ}C$ )	73 (20 $^{\circ}C$ )	12,5
Mercur	0,958	9	-38,87	139 (0...20 $^{\circ}C$ )	8,8 (20 $^{\circ}C$ )	60,6
Molibden	0,048...0,056	4,8	2.630	270 (0...100 $^{\circ}C$ )	80...159	4...5,8
Nichel	0,0869	6	1.452	454,6 (0...100 $^{\circ}C$ )	90 (18 $^{\circ}C$ )	13
Platină	0,108	3,02	1.773	1.344 (0...100 $^{\circ}C$ )	70 (20 $^{\circ}C$ )	8,9
Wolfram	0,055...0,083	3,1...4,8	3.380	149,9 (0...100 $^{\circ}C$ )	100...159	4,4

### 4.2.3. Influența naturii și conținutului de impurități

Impuritățile din rețeaua cristalină a metalului (practic inevitabile) produc o împrăștiere suplimentară a mișcării electronilor contribuind astfel la micșorarea - cu  $\tau_i$  - a duratei de relaxare a acestora. Cum  $\tau_i$  este caracteristică fiecărei specii de impurități și presupunând că natura și conținutul impurităților nu depind de temperatură, se obține, pentru rezistivitatea electrică, expresia:

$$\rho = \frac{m_0^*}{N_0 q_0^2} \left[ \frac{1}{\tau_T} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right] = \rho_T + \rho_Y \quad (29)$$

numită relația lui Matthiessen, unde  $m_0^*$  reprezintă masa efectivă a electronului,  $q_0$  - sarcina electronului,  $N_0$  - concentrația volumică a electronilor,  $\tau_T$  - durata de relaxare corespunzătoare împrăștierii mișcării electronilor pe fononi, iar  $n$  numărul speciilor de impurități sau - mai general - de defecte punctiforme (relația cuprinzând și contribuția vacanțelor, golurilor etc.) din metal. Termenul  $\rho_T$

reprezentând contribuția vibrațiilor termice ale rețelei, rezultă, că la  $T = 0K$ , rezistivitatea corpului este nenulă: ea are valoarea  $\rho = \rho_{\gamma}$  numită **rezistivitate reziduală** și depinde doar de natura și conținutul de impurități. Așadar, prin impurificarea metalelor conductivitatea lor scade, oricare ar fi valoarea conductivității materialelor impuritate.

O categorie deosebită de impurități o constituie cele introduse în mod voit în rețelele cristaline ale metalelor cu scopul de a obține **aliaje** (materiale cu rezistivitate sau proprietăți mecanice superioare). În procesul de aliere se produc deplasări ale atomilor din pozițiile lor de echilibru (fiind înlocuiți cu atomi de altă specie), precum și treceri ale electronilor de conducție în benzile incomplete ale metalelor impurități. Aceste fenomene - deformarea rețelei cristaline și legarea electronilor liberi de atomii impuritate - provoacă o reducere a conductivității electrice și o îmbunătățire a proprietăților mecanice.

În cazul aliajelor binare, metalele componente pot forma (în procesul de aliere) soluții solide, compuși intermetalici, amestecuri mecanice etc.

**Soluțiile solide** se obțin numai atunci când metalele impuritate **B** (sau adaos) sunt solubile în metalul de bază **A** (aliajul obținut prezentând un singur tip de cristale) și pot fi: **a) cu rețea de substituție** sau **b) cu rețea interstițială**. În cazul rețelelor de substituție, metalele componente au același sistem de cristalizare și volume atomice apropiate (diferența dintre diametrele atomilor nu depășește 15%); metalele se aliază în orice proporții, în nodurile rețelei aflându-se atomii ai ambelor elemente. Dintre aliajele de acest tip, se remarcă aliajele Cu-Ni, Au-Ag, W-Mo etc.

Dacă diferența dintre diametrele atomice ale metalelor de aliere depășește 15%, se obțin soluții solide cu rețea interstițială. În acest caz, metalele nu se aliază în orice proporții ei numai până la ocuparea interstițiilor rețelei cristaline a lui **A** de către ionii lui **B** (solubilitatea este limitată). Asemenea tip de soluții formează metalele cu hidrogenul, carbonul, azotul, borul, oxigenul etc.

Rezistivitatea soluțiilor solide variază cu conținutul elementului adaos, prezentând un maxim când cele două metale se află în aceeași proporție.

Dacă metalele componente se aliază doar într-o proporție bine determinată, se obțin substanțe chimice cu proprietăți distincte, numite **compuși intermetalici**. Aceștia au conductivitatea electrică apropiată de cea a metalelor dar, din punct de vedere mecanic, prezintă caracteristicile cristalelor ionice: plasticitate foarte scăzută, duritate mare, punct de topire ridicat etc. Unii compuși intermetalici (InSb, AlSb etc.) sunt semiconductori.

**Amestecurile\*** (mecanice se obțin din metale insolubile unul în altul (Pb în Fe, W în Cu, Pb în Ag etc.) în stare solidă și prezintă o structură de natură eutectică: cristalele mari ale uneia dintre componente, înecate într-un amestec de cristale foarte fine aparținând ambelor componente (numit eutectic). Cele două metale se amestecă mecanic, componentele păstrându-și caracteristicile proprii. Drept urmare, rezistivitatea electrică a acestor aliaje are o variație liniară cu conținutul componentelor, variațiile respective utilizându-se, de foarte multe ori, la determinarea structurii fizico-chimice a aliajelor.

#### 4.2.4. Influența solicitărilor mecanice

Proprietățile conductorilor se modifică numai sub acțiunea solicitărilor mecanice care provoacă deformări ale rețelelor cristaline. Astfel, în cazul **deformărilor elastice**, variația amplitudinii de oscilație a ionilor din rețeaua cristalină determină o creștere a rezistivității corpului în cazul solicitărilor de întindere și o reducere a acesteia - în cazul solicitărilor de comprimare. În general, rezistivitatea unui material supus unei solicitări mecanice specifice  $\sigma$  este  $\rho = \rho_0(1 \pm a\sigma)$ ,  $\rho_0$  fiind rezistivitatea materialului nesolicitat mecanic, iar  $a$  - coeficientul mecanic de variație a rezistivității.

**Deformările plastice** (prin laminare, forjare, trefilare etc.) modifică structura granulară a corpurilor. Astfel, grăunții cristalini ai căror direcții de alunecare fac unghiuri mai mari cu direcția de deformare se sparg, îngreunând desfășurarea, în continuare, a procesului de deformare. Ca urmare, corpul își mărește rezistența mecanică la deformare, se durifică; se spune că materialul **se ecruisează**, că are o structură tare, fibroasă. **Gradul de ecruisaj**  $G_e$  se definește prin relația  $G_e = (S - S')/S$ , în care  $S$  și  $S'$  reprezintă aria secțiunii inițiale, respectiv finale, a corpului metalic supus deformării plastice ( $\sigma_r$ , crește de 1,5...2 ori pentru  $G_e = 80\%$ ). Pe de altă parte, deformarea sau distrugerea cristalelor constituind o sursă importantă de defecte de rețea, atrage și o reducere (cu 3 ... 6%) a conductivității electrice a corpului.

#### 4.2.5. Influența tratamentului termic

Prin creșterea temperaturii corpurilor se produce o rearanjare a atomilor în rețea, adică se desfășoară un proces de refacere a cristalelor, de recristalizare. *Temperatura de recristalizare*, depinde de natura metalului (220 °C pentru Cu) de gradul de deformare plastică (fiind cu atât mai mare, cu cât gradul de deformare este mai redus) etc. Ca urmare a recristalizării, rezistența mecanică scade, iar alungirea la rupere și conductivitatea electrică cresc. În decursul proceselor tehnologice de prelucrare a metalelor (de exemplu în cazul trefilării) se efectuează *tratamente termice de recoacere* (pentru refacerea caracteristicilor materialelor ecruisate) la temperaturi superioare temperaturii de recristalizare (la 400...700°C pentru cupru). Se produc astfel creșteri importante ale grăunților cristalini, rezistența mecanică a corpurilor reducându-se considerabil. Situații similare pot apărea și în cazul unor scurtcircuite ale instalațiilor electrice, când, local, temperatura conductoarelor depășește temperatura de recristalizare a metalelor din care sunt confecționate.

#### 4.2.6. Coroziunea metalelor

Coroziunea reprezintă acțiunea chimică sau electrochimică exercitată la suprafața corpurilor de către aer, umezeală sau unele substanțe chimice. **Coroziunea chimică** apare în gaze uscate sau în lichide neconductoare. În atmosferă obișnuită agentul corodant cel mai important este oxigenul care formează la suprafața metalelor pelicule de oxizi. Dacă peliculele formate sunt

poroase, oxigenul pătrunde prin ele și atacă, în continuare, metalul până la distrugerea completă a acestuia (cum e cazul wolframului la temperaturi ridicate). Dacă însă pelicula este compactă, fără fisuri și cu coeficient de dilatație liniară apropiat de cel al metalului corodat, aceasta împiedică pătrunderea oxigenului în metal și deci desfășurarea procesului de coroziune. Asemenea tipuri de pelicule formează Cd, Al, Pb, Sn, Cu etc. (la temperatura camerei), Cr, Ni (la temperaturi ridicate) etc.

Apa cu care metalele vin în contact conține, de obicei, impurități (acizi, săruri etc.) și constituie un electrolit a cărui concentrație poate diferi de la un punct al suprafeței corpului la altul. Se pot forma astfel **pile electrice macroscopice** (dacă în contact cu electrolitul se află două metale) sau **microscopice** (dacă concentrația electrolitului este neuniformă sau dacă suprafața metalului conține impurități). În primul caz se distruge metalul cu **potențial de electrod standard** mai scăzut (Tabelul 4-4), iar în cel de-al doilea caz se distruge metalul în cauză. De exemplu, în cazul contactului Cu-Al se distruge, prin coroziune electrochimică, piesa de aluminiu.

**Tabelul 4-4 Valori ale potențialul standard de electrod**

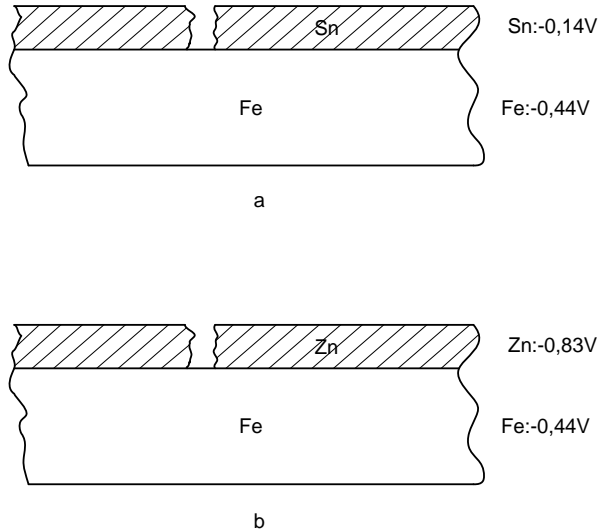
Elementul (ion)	Potențial [V]	Elementul (ion)	Potențial [V]	Elementul (ion)	Potențial [V]
Li <sup>+</sup>	-3,05	Cs <sup>+</sup>	-2,92	K <sup>+</sup>	-2,92
Ba <sup>2+</sup>	-2,90	Ca <sup>2+</sup>	-2,87	Na <sup>+</sup>	-2,71
Mg <sup>2+</sup>	-2,34	Be <sup>2+</sup>	-1,85	Al <sup>3+</sup>	-1,67
Mn <sup>2+</sup>	-1,18	Zn <sup>2+</sup>	-0,83	Cr <sup>3+</sup>	-0,74
Fe <sup>2+</sup>	-0,44	Cd <sup>2+</sup>	-0,402	Co <sup>2+</sup>	-0,277
Ni <sup>2+</sup>	-0,25	Sn <sup>2+</sup>	-0,136	Pb <sup>2+</sup>	-0,126
H <sup>+</sup>	0,00	Cu <sup>2+</sup>	+0,345	Hg <sup>2+</sup>	+0,779
Ag <sup>+</sup>	+0,80	Br <sup>-</sup>	+1,065	Cl <sup>-</sup>	+1,358
Au <sup>3+</sup>	+1,50	Co <sup>3+</sup>	+1,84	F <sup>-</sup>	+2,65

**Potențialul de electrod normal** reprezintă diferența de potențial care apare între un metal și o soluție apoasă a unei sări a acestuia care cuprinde un echivalent gram de ioni activi la litru. Valoarea potențialului de electrod normal depinde de natura metalului și a electrolitului, de conținutul de impurități din metal, de starea suprafețelor etc.

Dacă se măsoară valoarea potențialului normal față de potențialul de electrod normal al hidrogenului se obține **potențialul standard de electrod**. Potențialul standard al aliajelor depinde de compoziția și natura metalelor componente. Astfel, amestecurile eutectice au potențialele de electrod negative și apropiate de cel al litiului. În cazul soluțiilor solide, potențialul de electrod variază în salturi cu compoziția aliajului. De exemplu, alamele cu mai puțin de 39% Zn au potențialul standard apropiat de cel al cuprului, în timp ce alamele cu un conținut superior de Zn au potențialul de electrod apropiat de cel al zincului.

Deoarece numai un număr relativ redus de elemente sunt necorodabile (Au, Pt, Ag etc.) în aplicațiile tehnice se iau măsuri speciale de protecție a metalelor împotriva coroziunii. În acest sens fie se reduce agresivitatea mediului ambiant (prin utilizarea unor soluții alcaline, a inhibitorilor etc.), fie se mărește rezistența corpurilor la coroziune.





**Figura 4-1 Acoperiri metalice cu caracter a) catodic; b) anodic**

Mărirea rezistenței metalelor la coroziune, se realizează prin acoperirea acestora cu materiale necorodabile. *Acoperirile nemetalice* se realizează cu materiale anorganice (oxizi, silicați), lacuri nehidroscopecice (bitumuri etc.), pelicule de email sticlos (care conțin amestecuri de silicați, borați etc.). *Acoperirile metalice* se realizează cu Sn, Zn, Cu, Cr pentru materiale feroase și cu Ni, Ag, Au etc. pentru materiale neferoase și pot avea caracter *catodic* (când, la apariția coroziunii, se distruge elementul de protejat) sau *anodic* (când este atacat stratul protector) (Figura 4-1). Executarea acoperirilor metalice se face prin cufundarea pieselor de protejat în băi care conțin metalul de acoperire în stare topită (Zn, Al, Cd, Pb etc.), prin galvanizare (Al, Ag, Au, Cd, Cr, Ni, Pb, W etc.), prin difuzia metalului de protecție la temperaturi ridicate (B, Cr, Zn etc.), prin pulverizarea metalului de protecție (Al, Zn, Cu, Pb etc.), prin placare (prin laminare, sudare, presare) etc.

Dacă corpurile se utilizează la temperaturi înalte, se fac acoperiri cu  $Al_2O_3$ ,  $ZnO_2$ ,  $SiO_2$ , compuși metalo-ceramici etc. De asemenea, se efectuează acoperiri pe bază de ciment, prin nitrurări sau fosfatări, electrostatice și prin electroforeză etc.

## 4.3. Materiale de mare conductivitate electrică

### 4.3.1. Cuprul și aliajele sale

Fiind materiale cu conductivitate electrică și rezistență mecanică mare, rezistente la coroziune, maleabile și ductile, sudabile etc., cuprul și aliajele acestuia prezintă numeroase utilizări în industria electrotehnică.

## Cuprul

Cuprul electrotehnic (CuE) se obține prin rafinare electrolică și are puritatea de peste 99,9%. Impuritățile îi pot modifica considerabil proprietățile. Astfel, *oxigenul* reacționează - în timpul procesului de prelucrare a cuprului - cu gazele din mediul ambiant ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  etc.), dând naștere unor produse insolubile în cupru (apă,  $CO_2$  etc.), care, ieșind din metal, provoacă fisuri în structura acestuia (fenomenul numindu-se boala hidrogenului). Oxigenul afectează, de asemenea, conductivitatea cuprului: aceasta scade cu aproape 4% pentru un conținut de oxigen de 0,15%. Cea mai dăunătoare impuritate o constituie însă bismutul, insolubil în cupru, bismutul formează pelicule foarte fragile și ușor fuzibile în jurul grăunților cristalini ai acestuia, mărindu-i fragilitatea. Alte impurități, cum sunt fosforul, fierul, siliciul, cromul etc. determină o reducere considerabilă a conductivității, în timp ce argintul, aurul, cadmiul, nichelul etc. au o influență mult mai mică.

Proprietățile cuprului depind de structura sa (Tabelul 4-5), precum și de solicitările mecanice și termice din exploatare. Astfel, rezistivitatea se determină cu relația  $\rho(t) = 0,01724 + 0,0000681(T - 293)\mu\Omega m$ , adică un conductor din cupru își mărește rezistivitatea cu  $0,0000681\mu\Omega m$  dacă temperatura sa crește cu un grad. Având potențialul de electrod standard pozitiv (+0,345V), cuprul este protejat de metalele uzuale cu care vine în contact (Al, Fe, Zn etc.), acestea având potențial de electrod standard negativ. Este atacat de oxigen, de oxizii de azot, de acidul azotic și acidul sulfuric, de clor, amoniac, de sulful din cauciucul vulcanizat etc.

**Tabelul 4-5 Caracteristicile principale ale cuprului electrolitic**

Caracteristica	Unitatea de măsură	Cupru recopt (moale)	Cupru tras la rece (tare)
Densitatea	kg/dm <sup>3</sup>	până la 8,95	
Rezistență la rupere (la întindere)	MN/m <sup>2</sup>	200...250	400...490
Alungirea relativă	%	50...30	4...2
Duritatea Brinell	MN/m <sup>2</sup>	400...500	800...1200
Modulul de elasticitate	GN/m <sup>2</sup>	122	126
Rezistivitatea electrică, la 20°C	$\mu\Omega m$	0,017241	0,0177
Coeficient de temperatură al rezistivității, la 20°C	K <sup>-1</sup>	3,39·10 <sup>-3</sup>	
Temperatura de topire	°C	1083	
Temperatura de recoacere	°C	400...700	
Temperatura de recristalizare	°C	220...300	
Coeficientul de dilatație liniară (de la 25 la 300°C)	K <sup>-1</sup>	1,77·10 <sup>-6</sup>	
Conductivitatea termică, la 20°C	W/mK	3,9398	
Căldură specifică	J/kgK	385	

Cuprul se utilizează la fabricarea conductoarelor de bobinaj, a liniilor de transport și distribuție a energiei electrice, a colectoarelor mașinilor electrice, a conductoarelor și cablurilor pentru înaltă frecvență, a pieselor pentru tuburi cu vid, aliajelor de mare rezistivitate, magnetice etc.

**Metode de obținerea cuprului.** Minereurile (sulfuroase) de metale neferoase conțin de obicei 2-4%, rareori peste 7%, cupru. De aceea, înainte de a proceda la obținerea propriu-zisă a metalului, este necesară o concentrare a acestuia. Aceasta constă într-o prăjire parțială, cu aer insuficient. Cuprul are o afinitate mult mai mare pentru sulf decât fierul, în schimb, se oxidează mai greu

decât acesta. De aceea, în timpul prăjirii parțiale, pirita ( $\text{FeS}_2$ ) se transformă în parte în  $\text{FeS}$ , în parte se oxidează până la  $\text{FeO}$  și  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , care se combină cu nisipul de cuarț adăugat anume, dând silicat de fier, ușor fuzibil, care trece în zgură. În partea de jos a cuptorului se adună astfel o mată cuproasă, topită, compusă în cea mai mare parte din  $\text{Cu}_2\text{S}$  și  $\text{FeS}$ , cu un conținut de 30-45%  $\text{Cu}$ .

Mata cuproasă este apoi prelucrată într-un convertizor căptușit cu cărămizi de silice sau mai bine din magnezită. Aerul se introduce prin deschideri laterale. În convertizor, sulfura feroasă se oxidează în oxid de fier, care se combină cu nisipul adăugat, dând silicați ce se adună în partea superioară, în stare topită. O parte din sulfura cuproasă trece în oxid cupros, care reacționează cu restul de sulfură.

Metalul topit se adună în partea inferioară a convertizorului. Stratul de mata, dintre stratul de metal și cel de zgură, se micșorează în timpul procesului și dispare la sfârșit. Gazele degajate din convertizor, cu 10-14%  $\text{SO}_2$ , se folosesc pentru fabricarea acidului sulfuric. Cuprul brut obținut (94-97%) mai conține: fier, plumb, zinc, stibiu, aur și argint, precum și cantități mici de sulf și arsen, ce nu s-au volatilizat în convertizor. Îndepărtarea acestora se face fie printr-o nouă topire în cuptoare cu flacăra, obținându-se un cupru rafinat de 99,5-99,8%, fie prin electroliză, care duce la un cupru electrolitic, de peste 99,9%.

*Meturgia pe cale umedă a cuprului.* Pentru minereurile care, nici prin operații de flotație, nu pot fi aduse la o concentrație suficientă pentru formarea mamei cuproase, se aplică o prelucrare pe cale umedă. În acest scop se extrage minereul cu un lichid care transformă cuprul într-o combinație solubilă, iar apoi cuprul este precipitat din soluție ca metal sau sub forma de componentă principală în minereu: apă, soluție de amoniac, de cianură sau mai frecvent, acid sulfuric diluat, eventual cu un mic adaos de sulfat feric pentru realizarea unei acțiuni oxidante.

Precipitarea cuprului metallic din aceste soluții acide se face de obicei prin dezlocuire cu șpan de fier (cimentare) sau pe cale electrolitică.

**Aliajele cuprului.** Introducerea unui conținut foarte redus de  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Be}$  etc. conferă cuprului proprietăți termice și mecanice superioare. Astfel, un adaos mic de argint (0,03...0,1%) imprimă aliajului stabilitate termică după ecruisare, cadmiul (0,06...0,1%) îi mărește rezistența la solicitările dinamice, zincul (2%) și cromul (0,5...0,9%) îi măresc rezistența la rupere prin tracțiune, beriliu (0,5...2%) îi mărește duritatea etc. În schimb adaosurile - care apar ca „impurități” în rețeaua cristalină a cuprului - măresc rezistivitatea electrică a materialului.

**Alamele** sunt aliaje ale cuprului cu zincul. Se reprezintă prin simbolul  $\text{CuZnXY}$ , numărul  $X$  reprezentând conținutul în cupru (peste 50%) în procente și  $Y$  conținutul de zinc (de exemplu,  $\text{CuZn 85-15}$  reprezintă o alamă cu 85%  $\text{Cu}$  și 15%  $\text{Zn}$ ). Proprietățile lor depind atât de compoziția chimică, cât și de tratamentele mecanice și termice la care au fost supuse în procesul de fabricație. Sunt rezistente la coroziune, se pot lamina și ștanța ușor, dar au conductivitatea electrică mai scăzută decât cea a cuprului. Adăugându-se și alte elemente, se conferă alamelor rezistență mărită la coroziune și oxidare ( $\text{Si}$ ), proprietăți mecanice superioare ( $\text{Al}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ ) - eventual la temperaturi înalte ( $\text{Ni}$ ) -, prelucrabilitate ușoară ( $\text{Pb}$ ) etc.

Tabelul 4-6 Caracteristici ale unor alame utilizate în electrotehnică

Caracteristica	Unitatea de măsură	CuZn 90-80 Tombac roșu	CuZn 90-80 Tombac Galben	CuZn 63-37	CuZn 58-30-2
Densitatea	kg/dm <sup>3</sup>	8,8...8,67	8,53	8,47	8,44
Temperatura de recoacere	°C	425...700	425...700	425...700	425...600
Rezistența la rupere					
- moale	MN/m <sup>2</sup>	250...300	250	290...350	370...450
- tare		350...700	500...680	400...700	510...630
Alungire la rupere					
- moale	%	48...35	35	40...60	25
- tare		25...3	10...5	5...2	2
Conductivitatea termică	W/mK	188...138	121	117	117
Coeficientul de dilatație liniară $\alpha_t(l) \cdot 10^7$ (25...300 °C)	K <sup>-1</sup>	182...191	199	203	-
Rezistivitatea la 20 °C	$\mu\Omega\text{m}$	0,039...0,054	0,062	0,064	0,064
Utilizări. Observații		Table, fire subțiri; se prelucrează la rece	Table, fire, tuburi, arcuri	Se prelucrează ușor la rece	Se prelucrează prin așchiere

Sub denumirea de *bronzuri* sunt cunoscute aliajele cuprului cu staniul, precum și cele cu Al, Si, Cd, Be, P, Cr, Ti, Ag etc. Acestea au duritate mare (dependentă de gradul de deformare plastică), sunt rezistente la coroziune, iar unele din ele (cu Cd) au rezistivitatea apropiată de cea a cuprului. Se utilizează la fabricarea conductoarelor aeriene, a firelor de trolebus, a contactelor arcuite, a lamelor de colector etc.

Tabelul 4-7 Caracteristici ale unor bronzuri utilizate în electrotehnică

Caracteristica	Unitate a de măsură	Bronz cu 1,25% Sn	Bronz cu 6% Sn	Bronz de turnare 14% Sn	Bronz cu 2% Be	Bronz cu 2% Be și 0,25% Co	Bronz cu 0,9% Cd
Densitatea	kg/dm <sup>3</sup>	8,89	8,80	8,83	8,20	8,23	-
Rezistența la rupere							
- recopt	MN/m <sup>2</sup>	280-320	380-500	>200	495	-	310
- tare		390-450	600-900	-	>900	490	730
Alungire la rupere							
- recopt	%	48	70-50	>3	42	-	50
- tare		16-8	6-1,5	-	1	50	4
Duritatea Brinell							
- moale	GN/ m <sup>2</sup>	-	0,75-0,9	0,85	0,82	-	-
- tare			1,7-2,1		3,65	3,8-4	-
Conductivitatea termică	W/mK	205	50	-	84	105	-
Coeficientul de dilatație liniară $\alpha_t(l) \cdot 10^7$ (25...300 °C)	K <sup>-1</sup>	178	-	-	175-180	166	-
Rezistivitatea la 20 °C	$\mu\Omega\text{m}$	0,036	0,15-0,17	-	0,075	0,068-0,098	0,0181-0,0207

### 4.3.2. Alumiul și aliajele sale

**Alumiul.** Alumiul este, după cupru, materialul cel mai utilizat în electrotehnică. Este mai ușor și mai ieftin decât cuprul, dar inferior acestuia în ceea ce privește conductivitatea electrică, rezistența mecanică și rezistența la coroziune electrochimică (v. Tabelul 4-3).

Cristalizează, ca și cuprul, în sistem cubic cu fețe centrate. Conductivitatea sa scade cu creșterea conținutului de impurități, îndeosebi în cazul vanadiului și titanului, de aceea, alumiul pentru conductoare conține cel mult 0,5% adaosuri (în general fier și siliciu). Proprietățile mecanice ale alumiului sunt destul de reduse și variază sub acțiunea solicitărilor mecanice și termice. Temperatura de recristalizare este de 150°C, dar o recristalizare completă se realizează numai la 250-400°C (în funcție de gradul de deformare și durata tratamentului). Solicitat la 70-80°C timp îndelungat, rezistența mecanică a alumiului scade mult mai puțin decât cea a cuprului. Prezintă însă rezistență redusă la acțiunea vibrațiilor și este atacat de oxigen (formând o peliculă protectoare de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), clor, săruri ale halogenilor, acizi organici, apă de mare etc. Având potențialul de electrod negativ și mare (-1,66V) alumiul se distruge în contact cu metalele tehnice obișnuite.

**Tabelul 4-8 Caracteristicile alumiului (gradul de puritate 99,6%)**

Caracteristica	Unitatea de măsură	Alumiul recopt (moale)	Alumiul tras la rece (tare)	Alumiul turnat	Aldrey
Densitatea	kg/dm <sup>3</sup>	2,7	2,7	2,56	2,7
Rezistența la rupere, la întindere	MN/m <sup>2</sup>	70...110	150...250	90...120	310...320
Alungire relativă la rupere	%	30...45	2...8	13...25	-
Duritatea Brinell	MN/m <sup>2</sup>	150...250	350...700	240...320	-
Modulul de elasticitate	GN/m <sup>2</sup>	58...66	72	-	65
Căldura specifică (0-100°C)	J/kgK	895	944	-	-
Conductivitatea termică	W/mK	217 (la 20°C); 199 (la 200°C)			-
Coeficientul de dilatație liniară (0-100°C)	K <sup>-1</sup>		23,9·10 <sup>-6</sup>		32·10 <sup>-6</sup>
Temperatura de recoacere	°C		200...450		-
Temperatura de recristalizare	°C		150		180
Rezistivitatea la 20°C	μΩm		0,028		0,0322
Coeficientul de temperatură al rezistivității la 20°C	K <sup>-1</sup>		4,0·10 <sup>-3</sup>		3,6·10 <sup>-3</sup>

Alumiul se utilizează la fabricarea electrozilor condensatoarelor cu hârtie și a celor electrolitice (folii), a mantalelor și ecranelor cablurilor electrice, a înfășurărilor mașinilor și transformatoarelor electrice, a liniilor de transport și distribuție a energiei electrice, a cablurilor subterane etc., precum și a unui număr foarte mare de produse care, prin caracteristicile lor neelectrice (greutate mică, rezistență mecanică mare etc.) au înlocuit materialele uzuale în construcții, transporturi, aparatură electrocasnică etc.

Utilizarea alumiului în transportul energiei electrice presupune realizarea unor conductoare de secțiune mai mare, dar de greutate mai redusă. În cazul liniilor aeriene de înaltă tensiune, creșterea secțiunii contribuie la reducerea pierderilor prin efect Corona, iar reducerea greutății conductorului permite mărirea distanței dintre stâlpii de înaltă tensiune și deci a costului liniei. Cum însă alumiul are

rezistență mecanică redusă, liniile aeriene se construiesc din Aldrey sau din conductoare bimetalice (miezuri de oțel peste care se suprapun sârme din aluminiu). În cazul cablurilor de energie, creșterea secțiunii conductoarelor atrage însă o mărire a cantității de materiale izolante și de manșoane de legătură utilizate, deci o scumpire a instalației.

**Metode de obținere a aluminiului.** Principalul minereu din care se extrage aluminiul este bauxita, conține aproximativ 60% aluminiu. În natură se găsește numai sub formă de combinații într-un număr foarte mare de minerale ce conțin oxizi, silicați. Câteva dintre mineralele ce conțin aluminiu sunt: bauxita  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , corindonul  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , hidrargilitul  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , ortoclazul  $\text{K}(\text{AlSiO}_8)$ , albitul  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , anortitul  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ , alaunitul  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$ , nelelinul  $\text{Na}(\text{AlSiO}_4)$ , criolitul  $\text{Na}_3(\text{AlF}_6)$ .

Industrial aluminiul se obține aproape în întregime prin descompunerea electrolică a aluminei pure dizolvate într-o topitură de criolit cu adaus de fluorură de calciu. Prin electroliză se obține “aluminiul tehnic primar” numit și “aluminiu tehnic pur” care conține de la 0,2% la 1% impurități metalice (Fe, Si, Ca, Ti, Na) și nemetalice (alumina, electrolit, carbura de aluminiu, gaze).

“Aluminiul de înaltă puritate” se obține din aluminiul tehnic filtrat, spălat cu gaz sau degresat, prin rafinarea electrolică cu anod solubil în săruri topite cunoscute sub numele de rafinare în trei straturi. Acest aluminiu conține de la 0,05% la 0,1% impurități.

“Aluminiul extra pur” se obține prin topirea zonală, distilarea halogenurilor inferioare sau electroliza compușilor organici ai aluminiului de înaltă puritate, gradul de puritate putând ajunge până la 99,999995%.

Aluminiul obținut prin electroliza aluminei nu depășește puritatea de 99,5...99,85%. Al; el conține o serie de impurități metalice și nemetalice pentru eliminarea acestor impurități se practică rafinarea clorurantă și cea electrolică.

Rafinarea clorurantă. Se urmărește îndepărtarea Mg, Na, K și a incluziunilor nemetalice. Prin creuzetul cu metal topit se barbotează un curent de clor care îndeplinește funcții multiple: separă metalele respective sub formă de cloruri; degazeifică metalul dacă acesta e solubil; antrenează suspensiile de alumina cu ajutorul clorurii de aluminiu, care rezultă în stare gazoasă. Spre sfârșitul operației se introduce azot pentru a se răci baia și se elimină urmele de clor, care ar putea rămâne în topitură.

Rafinarea electrolică. Rafinarea se realizează în topitură de fluoruri și este cunoscută sub denumirea de rafinare între straturi. Procesul se desfășoară la 850...920°C, temperatură necesară ca toate cele trei straturi să fie în întregime topite. Pe baza celei de electroliză se introduce topitură de aluminiu care urmează să fie rafinată prin adaus de cupru (25...35%), acest strat având o grosime de 60...70mm. Acest electrolit conține 60%  $\text{BaCl}_2$ , 23%  $\text{AlF}_3$  și 17%  $\text{NaF}$ . Cel de-al treilea strat este format din aluminiu rafinat în stare lichidă, care se colectează la suprafața băii. Stratul metalic inferior formează anodul, catodul fiind constituit de stratul superior al aluminiului rafinat. Curentul este adus prin bare metalice încastrate în zidăria vetrei. Se lucrează cu curent continuu, de mare intensitate (pana la 45000A), cu o tensiune de 6...7V și densitate de curent de  $0,5\text{A}/\text{cm}^3$ .

**Aliajele aluminiului.** Prin adăugarea unor mici cantități de Si, Cu, Mg, Mn, Zn, Ni, Be etc. se obțin aliaje ale aluminiului cu proprietăți mecanice superioare și conductivitate apropiată de cea a aluminiului pur. Astfel, Aldrey-ul (98,45 Al; 0,6 Si;

0,7 Mg; 0,2 Fe) are rezistivitatea mai mică de 32 nΩm, rezistența la tracțiune mai mare de 320 MN/m<sup>2</sup> și temperatura de cristalizare cuprinsă între 180 și 200°C. Silumiul (11...13,5% Si), în stare topită, are fluiditate mare și se utilizează la fabricarea - prin turnare - a pieselor de grosimi reduse sau cu forme complicate. Tot ca aliaje de turnare se utilizează și aliajele *Al-Mn* (pentru coliviile motoarelor asincrone), *Al-Cu*, *Al-Cu-Ni*, *Al-Si*, *Al-Mn-Mg* etc.

*Aliaje de aluminiu obținute prin metalurgia pulberilor.* Dintre aliajele pe bază de aluminiu obținute prin metalurgia pulberilor, cele mai utilizate sunt aliajele *Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* cunoscute sub denumirea de aliaje de tip SAP. Aliajele SAP sunt alcătuite dintr-o matrice de aluminiu în care sunt dispersate particule de *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Proporția de *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* variază de la 6-9%(SAP1), până la 18-20%(SAP4). O dată cu creșterea conținutului în *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* crește rezistența la rupere de la 300-320 MN/m<sup>2</sup>, la 440-460 MN/m<sup>2</sup> și scade alungirea de la 5-8 la 1,5-2%. Aliajele de tip SAP în comparație cu celelalte aliaje de aluminiu au o înaltă rezistență la coroziune și refractaritate ridicată, sunt utilizate în industria chimică și aeronautică.

Tot prin metalurgia pulberilor se pot obține piese din aliaje a căror elaborare sau deformare este foarte dificilă. În această categorie sunt cuprinse aliajele de tip SAS, aliaje ale aluminiului cu: Fe, Si, Ni, Mg, Cr, Mo, W, Ti, Zr, Be, Sn, Pb. De exemplu aliajul SAS1 cu 25-30% și și 5-7% Ni are coeficient de dilatare mic și conductibilitate termică scăzută. Aliajele *Al-Zn-Mg-Cu-Fe-Ni-Cr* cu 7,5%Zn, 2,5%Mg, 1,1%Cu, 1,1-2,2%Fe, 1-2,3%Ni și 0,2%Cr au rezistență mecanică ridicată, sunt refractare, au rezistență la coroziune ridicată și proprietăți antifricțiune. Prin metalurgia pulberilor se pot obține și aliaje ale Al cu *SiO<sub>2</sub>*, *SiC*, *B<sub>4</sub>C*, *AlPO<sub>4</sub>*. De exemplu, aliajele aluminiului cu bor sau carbura de bor sunt utilizate pentru obținerea unor bare modelatoare de la reactoarele nucleare.

*Materiale compozite pe bază de aluminiu.* Aluminiul și aliajele sale sunt utilizate și pentru obținerea unor materiale compozite. Aceste materiale se pot obține prin mai multe metode: solidificarea unidirecțională a aliajelor eutectice bifazice cum ar fi *Al-NiAl<sub>3</sub>*, *CuAl<sub>2</sub>-Al*, *Al-Co*, *Al-Be*, includerea unor fibre de bor, *B<sub>4</sub>C*, Be, grafit, Nb, *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, oțel, *SiO<sub>2</sub>*, *SiC* într-o matrice de aluminiu sau aliaje pe baza de aluminiu; la laminarea multistrat a aluminiului cu cadmiu și staniu.

**Alte materiale conductoare.** Utilizarea *fierului* ca material conductor se datorează îndeosebi costului scăzut și rezistenței mecanice mari pe care acesta le are. Prezintă, de asemenea, rezistivitate electrică mare (0,1 μΩm), rezistență slabă la coroziune chimică și efect pelicular pronunțat. Deoarece efectul de refluxare a curentului este cu atât mai pronunțat cu cât conductorul are diametrul mai mare și rezistivitatea mai redusă, în curent alternativ se utilizează conductoare de oțel cu rezistivitate mare (v. Tabelul 4-9) și diametre care nu depășesc 2,5mm. Aceste oțeluri conțin lângă carbon (0,1...0,15%) și siliciu (0,08%), mangan (0,046%), sulf (0,05%), fosfor (0,05%) etc. În curent continuu se folosește fierul armco cu cel mult 0,2% impurități (carbon sub 0,003%, în rest Si, Mn, S, P).

Fierul se utilizează - în locul cuprului sau aluminiului - la realizarea liniilor de distribuție a energiei electrice (acolo unde costul energiei este redus sau în regiunile rurale cu consum redus), de telecomunicații, la fabricarea conductoarelor solicitate mecanic (trolee pentru macarale, conductoare bimetalice) etc.

Argintul este un metal alb, strălucitor, și, după cum îi spune și numele, argintiu. În tăietură proaspătă, are o culoare ușor gălbuie. Este moale, maleabil și ductil, fiind metalul cu cea mai mare conductibilitate electrică și termică. Nu se

oxidează decât la temperaturi ridicate, stratul de oxid format fiind bun conductor electric. Se utilizează pentru confecționarea contactelor, a armăturilor pentru condensatoare, a siguranțelor fuzibile etc.

**Tabelul 4-9 Caracteristicile principale ale fierului conductor**

Caracteristica	Unitatea de măsură	Fier armco (c.c.)	Oțel (c.a.)
Densitatea	kg/dm <sup>3</sup>	7,8	7,8
Rezistivitatea la 20 °C	nΩm	105...108	130
Coefficientul de temperatură al rezistivității la 20 °C	K <sup>-1</sup>	0,0057	0,0057
Rezistența la rupere	MN/m <sup>2</sup>	moale: 200...300 tare: 400...500	700...750
Alungire relativă	%	moale: 60...40 tare: 6...1,5	5...8

Platina - rezistentă la coroziune și arc electric - se utilizează la fabricarea contactelor, a termocuplelor etc.

Wolframul - grăunțos și fragil, cu temperatură de topire ridicată și rezistență mare la arc electric - se utilizează la fabricarea lămpilor cu incandescență (în medii fără oxigen), a contactelor de rupere etc.

Se utilizează, de asemenea, zincul (electrozi de sudură, acoperiri metalice), plumbul (mantale pentru cabluri etc.), staniul (aliaje pentru lipit etc.), molibdenul, nichelul, cadmiul, cromul etc.

## 4.4. Materiale conductoare cu mare rezistivitate electrică

### 4.4.1. Materiale pentru rezistoare de precizie și etalon

**Tabelul 4-10 Caracteristici ale aliajelor tip manganină**

Compoziția					Rezistivitatea electrică la 20 °C [μΩm]	Coefficienul de temperatură al rezistivității, α <sub>p</sub> (t)·10 <sup>6</sup> [K <sup>-1</sup> ]	Tensiunea termoelectromotoare față de Cu [μV/K]
Cu	Mn	Ni	Fe	Al			
86	12	2	-	-	0,43	5...6	-0,6
84	13	-	-	3	0,50	-	-0,2
82,5	12	-	1,5	4	0,45	-	-0,3
85	9,5	-	-	5,5	0,45	-	-0,3
33	67	-	-	-	1,88	0	-1
16,5	67	16,5	-	-	2,03	120	-0,5
10	60	30	-	-	2,05	-100	0
5	67	28	-	-	2,20	-30	0,12

Acestea au coeficientul de temperatură al rezistivității și tensiunea termoelectromotoare față de cupru reduse, sunt maleabile și ductile etc. Cele mai



utilizate sunt manganinele (aliaje din cupru, mangan, nichel sau aluminiu și, eventual, fier), aliajele de tip manganină (Tabelul 4-10) și aliajele pe bază de metale prețioase (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**), materiale cu rezistivitate electrică ridicată și invariabilă în timp.

**Tabelul 4-11 Caracteristici ale unor aliaje din metale prețioase**

Caracteristici	Unitatea de măsură	Aliaj Au-Cu (98 au; 2 Cu)	Aliaj Ag-Mn-Sn (82 Ag ; 10 Mn ; 8 Sn )
Rezistivitatea electrică la 20°C	$\mu\Omega\text{m}$	0,33	0,50
Coeficientul de temperatura al rezistivității	K-1	10-6	0
Tensiunea termo-electromotoare față de cupru	$\mu\text{V/K}$	7...8	0,5

#### 4.4.2. Materiale pentru reostate

Ele trebuie să suporte încălziri până la 250 °C fără să-și modifice proprietățile sau să devină - prin răcire - casante, să aibă coeficientul de temperatură al rezistivității mic, cost redus etc. Materialele care îndeplinesc aceste condiții sunt *constantanul* (Cu-60%; Ni-40%) - utilizat la fabricarea termocuplelor și a reostatelor cu cursor, *nichelina* - utilizată la construcția reostatelor de pornire și reglaj *neusilberul* (mai ieftin, deoarece conține Zn) - utilizat până la 2.000°C, *fonta* ( $\rho=1,4...1,5 \mu\Omega\text{m}$ ) - utilizată la confecționarea reostatelor de sarcină etc. (Tabelul 4-12).

**Tabelul 4-12 Caracteristici ale unor aliaje pentru reostate**

Aliajul	Compoziția [%]	Rezistivitatea la 20°C	Coeficientul de temperatură al rezistivității	Tensiunea termo-electromotoare față de Cu	Coeficientul de dilatație liniară $\alpha$ , ( $10^{-6}$ )	Rezistența la rupere prin tracțiune	Alungirea la rupere	Densitatea
		[ $\mu\Omega\text{m}$ ]	[ $\text{K}^{-1}$ ]	[ $\mu\text{V/K}$ ]	[ $\text{K}^{-1}$ ]	[ $\text{MN/m}^2$ ]	[%]	[ $\text{Kg/dm}^3$ ]
Constantan	60 Cu 40 Ni	0,50	$10^{-6}$	42	14	400-750	50-3	8,9
Nichelina	54 Cu 26 Ni 20 Zn	0,43	$23 \cdot 10^{-5}$	-25	16	680-850	30-2	8,7
Nichelina fara Zn și Fe	67 Cu 30 Ni 3 Mn	0,40	$11 \cdot 10^{-5}$	-	16	44	33-15	8,9
Nichelina-neusilber	58 Cu 22 Ni 20 Zn	0,36	$31 \cdot 10^{-5}$	-	16,8	510-830	34-1	8,7
Neusilber	60 Cu 17 Ni 23 Zn	0,30	$35 \cdot 10^{-5}$	15	18	40	35	8,6

### 4.4.3. Materiale utilizate în electrotermie

Acestea prezintă rezistență mare la oxidare și la temperaturi înalte, au rezistivitatea mare, coeficientul de temperatură la rezistivității redus, caracteristici tehnologice bune și cost redus. Din această grupă fac parte metale pure, aliaje pe bază de nichel, fier etc.

*Wolframul* este un material dur, casant, greu prelucrabil și se oxidează la 500°C dacă nu se află în atmosferă protectoare (vid, gaze inerte). Se utilizează la fabricarea lămpilor cu incandescență a tuburilor electronice, a rezistoarelor de încălzire a cuptoarelor electrice pentru topire și tratamente termice etc.

*Molibdenul* are caracteristici asemănătoare cu cele ale wolframului (Tabelul 4-13), este rezistent la acizi și se oxidează la  $T > 600^\circ\text{C}$ . Se utilizează la fabricarea lămpilor cu incandescență, a tuburilor electronice, a electrozilor de sudură etc.

*Tantalul* are rezistență la coroziune foarte ridicată și se utilizează în construcția cuptoarelor pentru temperaturi ridicate, a tuburilor electronice etc.

*Niobiul* are rezistivitate mare (14,2  $\mu\Omega\text{m}$ ) și se utilizează în construcția cuptoarelor, a filamentelor, a tuburilor electronice etc.

**Tabelul 4-13 Caracteristici ale unor metale tehnic pure, utilizate în electrotermie**

Metalul	Densitatea	Temperatura de topire	Temperatura maximă de serviciu	Rezistivitatea la 20 °C	Rezistența la rupere prin tracțiune
	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[°C]	[°C]	[ $\mu\Omega\text{m}$ ]	[MN/ m <sup>2</sup> ]
Wolfram	19,3	3.410	2.500	5,51	3.400...4.900
Molibden	10,2	2.620	2.000	5,70	1.970...2.450
Tantal	16,5	2.000	2.000	12,4	392...835
Niobiu	8,56	2.470	1.800	14,2	590

**Tabelul 4-14 Caracteristici ale unor aliaje pe bază de nichel utilizate în electrotermie**

Caracteristici	Cromel C	Cromel A	Heraeus D	Heraeus A	
Compoziție	Ni	60-63	79-80	60-62	50-52
	Cr	12-15	18-21	23-25	30-32
	Fe	22-26	1,5	9-10	11-15
	Mn	0,5-2	0,5-2	2-3	2-3
Rezistivitatea la 20 °C [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	1,09	1,05	1,10	1,08	
Coeficientul de temperatură al rezistivității $\alpha_p(t) \cdot 10^6$ [K <sup>-1</sup> ]					
între 20...400°C					
între 20...1000°C	0,20	0,9	0,3	0,50	
	0,15	0,4	0,8	0,23	
Coeficientul de dilatație liniară $\alpha_l(t) \cdot 10^6$ [K <sup>-1</sup> ]	13	14,5	14,8	15	
Temperatura maximă de funcționare [°C]	1000	1150	1100	1250	
Rezistența la rupere prin tracțiune [MN/m <sup>2</sup> ]	680	750	800	1000	

*Aliajele pe bază de nichel* - numite *nicromi* - sunt soluții solide ale nichelului cu cromul (acesta contribuind la creșterea rezistivității și rezistenței la căldura, la micșorarea coeficientului de temperatură al rezistivității etc. (Tabelul 4-14)). Pentru

îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și ieftinirea nicromilor, se înlocuiește o parte din crom cu fier, obținându-se *feronicromi*. Se utilizează la fabricarea elementelor de încălzire, a aparatelor electrocasnice etc.

*Aliajele pe bază de fier* sunt mai ieftine decât cele pe bază de nichel. Adăugarea unor cantități de Cr, Ni, Al și si le mărește rezistivitatea, iar adaosurile de Cu, Mn sau Co le micșorează coeficientul de temperatură, al rezistivității. În general, aceste aliaje au variații mari ale rezistivității cu temperatura, iar la temperaturi ridicate prezintă o tendință de creștere a grăunților cristalini (deci, de reducere a caracteristicilor mecanice). Cele cu conținut redus de crom (*feronichel*: 0,5% Cr, *fecralul*: 15% Cr) au temperaturi de utilizare mai reduse (800°C), dar se pot prelucra cu ușurință (Tabelul 4-15). Din nicromi se realizează sârme subțiri (1,5 mm) care rezistă până la 1.200°C, din *cromal* - sârme mai groase pentru cuptoare industriale, iar pentru temperaturi mai mari de 1.500°C se utilizează aliaje de turnare de tip *Kornilov*.

**Tabelul 4-15 Caracteristici ale aliajelor pe bază de fier utilizate în electrotermie**

Caracteristici	Feronichel	Fecral	Kanthal	Cromal	Aliaj Kornilov	
Compoziția	Fe	65-75	80	74	65,5	19-27
	Cr	0,5-5	15	21	30	65-67
	Al	-	5	5	4,5	7-12
	Ni	25-35	-	-	-	-
Rezistivitatea la 20 °C [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	0,91	1,2-1,4	1,3-1,4	0,35	2-2,2	
Coeficientul de temperatura al rezistivității $\alpha_p \cdot 10^6$ [ $\text{K}^{-1}$ ]	100	180	80	4	-	
Temperatura maximă de funcționare [ $^{\circ}\text{C}$ ]	600	875	1.250	1.300	1.500	
Rezistența la rupere prin tracțiune [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ]	-	700	850	800	-	

Pentru încălzirea cuptoarelor electrice (în metalurgie, chimie etc.) se utilizează și *silitele*. Acestea sunt produse din carbură de siliciu (SiC) care suportă sarcini mai ridicate decât aliajele amintite, dar a căror rezistivitate variază sensibil cu temperatura. De asemenea, prezintă fenomenul de îmbătrânire, rezistivitatea lor crescând în decursul exploatării.

## 4.5. Materiale conductoare pentru contacte electrice

Alegerea materialelor pentru confecționarea contactelor electrice prezintă dificultăți enorme, dacă se iau în considerare toți factorii care intervin în procesul de funcționare a acestora: natura circuitului, frecvența curentului, tipul și frecvența acționărilor, viteza de acționare, mediul ambiant, existența solicitărilor mecanice și termice, siguranța în funcționare etc. În orice caz, materialele utilizate trebuie să prezinte conductivitate electrică și termică ridicată, rezistență mare la coroziune, eroziune și sudare, uzură mecanică redusă, greutate mică, durată de viață mare etc.

Rezistența de contact ( $R=kp^{-n}$ ) depinde de presiunea în contact  $p$ , precum și de conductivitatea electrică și rezistența la compresiune a materialelor care formează contactul. Cum materialele moi se deformează mai ușor, piesele de contact din metale dure se acoperă cu staniu, cadmiu etc. Contactele trebuie să aibă, de asemenea, coeficienți de dilatație termică apropiați pentru a evita - în cazul curenților intensi - apariția unor eforturi mecanice suplimentare care le-ar putea deteriora.

*Coroziunea* contactelor se manifestă îndeosebi prin oxidarea contactelor (cu formarea unor pelicule de oxid de rezistivitate mare) sau prin reacții chimice ale acestora cu impuritățile din mediul ambiant (activizate de temperaturile ridicate pe care le produce arcul electric). *Eroziunea* sau uzura electrică se manifestă îndeosebi în curent continuu și constă într-un transport de material topit dinspre o piesă de contact spre cealaltă. *Uzura mecanică* - ca urmare a frecărilor dintre piesele de contact - provoacă o creștere a rezistenței de contact. *Sudarea* apare îndeosebi la contactele de c.c. (formate din metale nobile pure) : ele rămân lipite dacă curentul electric depășește o valoare limită. Cum aceste fenomene nu sunt întotdeauna prezente în totalitate în timpul funcționării contactelor, în alegerea materialelor se ține seama de condițiile reale în care funcționează contactul.

#### 4.5.1. Materiale pentru contacte fixe

Pentru realizarea *contactelor de strângere* se utilizează îndeosebi cuprul și argintul. Argintul se acoperă cu un strat de oxid foarte subțire, neizolant, protector împotriva coroziunii. Oxidul de cupru este însă izolant, iar grosimea sa crește în timp. Din acest motiv, contactele din cupru se acoperă cu argint sau staniu. În afară de cupru și argint se mai utilizează aluminiul, zincul, fierul, aurul, oțelul (în atmosfere uscate), platina, indiul, molibdenul etc. Pentru a le proteja împotriva coroziunii, contactele de strângere se acoperă cu lacuri, emailuri, vaseline etc. sau se înglobează în compoundinguri (de obicei epoxidice). *Contactele masive* se realizează din cupru sau aluminiu prin lipire sau sudare; rezistența de contact depinde de natura aliajului de lipit și de tehnologia de lipire sau sudare și nu de presiunea de contact, ca în cazul contactelor de strângere.

#### 4.5.2. Materiale pentru contacte de rupere

Pentru această categorie de contacte se utilizează, materiale cu proprietăți speciale, elementele contactelor fiind supuse unor solicitări de eroziune, coroziune și uzură mecanică.

*Contactele electrice de mică putere* (din relee, aparate de laborator etc.) se realizează din aliaje ale metalelor nobile (Au-Ag, Pd-Ag, Pt-Ir etc.), aliaje ale metalelor nobile cu alte metale (Cu-Au, Ni-Pt etc.), aliaje de tip eutectic (Ag-Cu) precum și aliaje pe bază de W, Mo etc. (v. Tabelul 4-16 și Tabelul 4-17). Metalele nobile pure, deși au rezistivitatea redusă și rezistență la coroziune ridicată, nu se pot utiliza ca atare, deoarece prezintă pericolul de lipire sau sudare a contactelor, au rezistență mai redusă la eroziune și uzură mecanică mare etc.

**Tabelul 4-16 Caracteristici ale unor metale pentru contacte**

Caracteristici	Ag	Au	Cu	Pd	Pt	Ir	Mo	W
Densitatea [Kg/dm <sup>3</sup> ]	10,5	19,32	8,92	12,02	21,45	22,50	10,22	19,3
Duritatea Vickers [MN/ m <sup>2</sup> ]								
- moale	294	196	353	432	392	2090	1470	2450
- tare	1030	658	1130	1180	981	4445	2940	4000
Rezistivitatea [nΩm]	16	22	17	110	98	53	57	55
Coeficientul de temperatura al rezistivității $\alpha_p \cdot 10^6$ [K <sup>-1</sup> ]	4,10	3,91	4,0	3,7	3,92	3,9	4,73	4,82
Tensiunea termoelectromotoare față de Cu [μV/K]	0,4	0,6	0	13,5	7,8	0,3	-7,3	-4,6
Tensiunea termoelectromotoare față de platină [μV/K]	7,4	7,2	7,8	-5,7	0	6,5	14,5	11,2
Temperatura de topire [°C]	961	1.063	1.083	1.552	1.770	2.454	2.610	3.410

Pentru realizarea *contactelor electrice de medie putere* (120-500V) se utilizează Cu, Ag, Pd, W etc., precum și unele combinații ale acestora (bronzuri, alame, Cu-Ag, Ag-Cd etc.) obținute prin procedee clasice de aliere sau prin sinterizare. Se utilizează, de asemenea, *bimetalele* - Cu sau Al cu Ag, Pd, Pt etc. laminate împreună - și *termobimetalele*.

**Tabelul 4-17 Caracteristici ale unor aliaje pentru contacte electrice**

Aliajul	Rezistivitatea	Duritatea	Rezistența la	Modulul de
	la 20°C	Vickers	tractiune	elasticitate
	[μΩm]	[GN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[GN/m <sup>2</sup> ]
Ag - Cu ; 97/3	0,02	0,44-1,38	236-491	80,5
Ag - Pd ; 96/4	0,037	0,3-1,04	196-423	80,5
Ag - Cd ; 85/15	0,05	0,57-1,53	305-550	65,5
Au - Ag ; 80/20	0,10	0,34-1,03	177-400	87,3
Au - Ag - Cu ; 70/20/10	0,14	1,18-2,33	460-930	100
Pt - Ag ; 70/30	0,30	0,9-1,47	422-765	181
Pt - Ir ; 80/20	0,31	1,85-2,94	943-1375	226
Pd - Cu ; 85/15	0,36	0,88-2,06	373-880	172
Pd - W ; 90/10	0,38	1,81-2,55	500-981	117
Pd - Ag ; 60/40	0,42	1-2,75	422-880	143

În cazul *contactelor electrice de mare putere* (de rupere) de joasă tensiune (120-500V) și curenți intensi (100-3.000A) sau a celor de înaltă tensiune (6-1.000kV) se utilizează îndeosebi materiale sinterizate. Acestea se obțin din pulberi de materiale (care nu se aliază) supuse la presiuni mari și temperaturi ridicate (65-70% din temperatura de topire a metalului cel mai greu fuzibil) și se aplică, sub formă de plăcuțe, pe piesele de contact. Cele mai utilizate sunt combinațiile Cu-W, Cu-Ni, Cu-Or, Ag-Cd, Ag-CdO etc. (v. Tabelul 4-18).

*Combinațiile Ag-Cd și Ag-CdO* au conductivitate termică și electrică ridicată și rezistență de contact redusă chiar la presiuni mici. La temperatura arcului electric (900°C), oxidul de cadmiu se descompune, gazele rezultate - oxigen și vapori de cadmiu - împiedicând dezvoltarea arcului electric. *Combinațiile Cu-W* prezintă rezistivitate redusă, duritate și temperatură de topire ridicate și se utilizează pentru contacte cu presiuni mari de contact și care funcționează în ulei.

**Tabelul 4-18 Caracteristici ale unor compuși sinterizați**

Materialul	Rezistivitatea electrică la 20°C [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	Duritatea Vickers [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ]	
		Moale	Tare
Ag – Ni ; 90/10	0,02	253	1060
Ag – CdO ; 85/15	0,025	638	1080
Ag – grafit ; 10%C	0,03	294	3096
Ag – Cu – W; 6/34/60	0,03	1470	2060
W – Ag ; 30/70	0,023	590	1080
W – Cu ; 60/40	0,04	1570	1865
W – Ag ; 80/20	0,045	1765	2160

### 4.5.3. Materiale pentru contacte alunecătoare

Contactele alunecătoare (glisante) apar între periile și colectoarele sau inelele mașinilor electrice, între troleu și firul de troleu în tracțiunea electrică, la anumite tipuri de întrerupătoare etc., piesele de contact fiind solicitate atât mecanic cât și la coroziune și arc electric.

*Lamelele de colector* se realizează din argint, cupru electrolitic tare, bronzuri cu cadmiu și beriliu etc., *inelele de contact* din bronzuri, alame, oțel etc., iar *firele de troleu* din bronzuri cu cadmiu și beriliu.

Periile mașinilor electrice se realizează din cărbune grafitat sau din amestecuri de grafit cu cupru sau bronz. În funcție de structura lor fizico-chimică, periile se împart în trei grupe (Tabelul 4-19): *tari* (din pulbere de cocs sau cărbune de retortă), *moi* (din grafit natural sau electrografit) și *metalografice* (din grafit cu pulbere de bronz sau cupru).

**Tabelul 4-19 Caracteristici generale ale periilor pentru mașini electrice**

Caracteristici	Perii moi	Perii tari	Perii metalgrafit
Presiunea de contact pe colector [ $\text{MN}/\text{m}$ ]	15	20	30
Rezistivitate electrică	10-40	60	0,05-80
Densitatea de curent	10	6-11	15-20
Viteza periferică	40-60	10-15	20-30

*Grafitul* cristalizează în sistemul hexagonal, distanțele între două plane reticulare fiind de 3,40Å, iar între doi atomi conținuți în același plan reticular de 1,42Å. Din acest motiv forțele de legătură dintre atomii care aparțin la două plane diferite sunt mult mai reduse decât cele dintre atomii care aparțin aceluiași plan. Ca urmare, în timpul funcționării contactelor, se desprind din perie porțiuni mici sub formă de solzi care se deplasează paralel cu planele cristalului și care umplu microgolurile suprafețelor de contact, dând naștere unor suprafețe de alunecare netede. Aceste suprafețe se caracterizează prin rezistență electrică de contact mică și constantă și uzură mecanică redusă. Grafitul nu se oxidează, are temperatura de topire ridicată (3.000°C), tensiune minimă de apariție a arcului electric superioară celei a metalelor și eroziune redusă.

## 4.6. Materiale cu utilizări speciale

### 4.6.1. Materiale pentru termobimetale

Termobimetalele se realizează din benzi subțiri de metale sau aliaje cu coeficienți de dilatație liniară diferiți, sudate pe întreaga lungime a lor (Figura 4-2). Drept urmare, sub acțiunea căldurii, ele prezintă deformații dinspre materialul cu coeficient de dilatație liniară mai mare (1) spre cel cu coeficient de dilatație mai redus (2). Sensibilitatea termobimetalelor - creșterea săgeții  $f$  când temperatura crește cu 1K - este cu atât mai mare, cu cât diferența  $\alpha_1 - \alpha_2$  și lungimea termobimetalului  $l$  este mai mare și grosimea  $h$  este mai redusă. Ca materiale cu coeficient de dilatație mic se utilizează aliajele Ni-Fe, cum este *invarul* (63,1% Fe ; 36,1% Ni; 0,4% Mn ; 0,4% Cu) care are  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Cealaltă componentă se realizează din fier, nichel, cupru, constantan, alamă etc., pentru care  $\alpha$  ia valori între  $10^{-5}$  și  $2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ . Se utilizează în construcția termometrelor pentru lichide și gaze, a termocompensatoarelor, pentru protecția instalațiilor electrice împotriva suprasarcinilor etc.

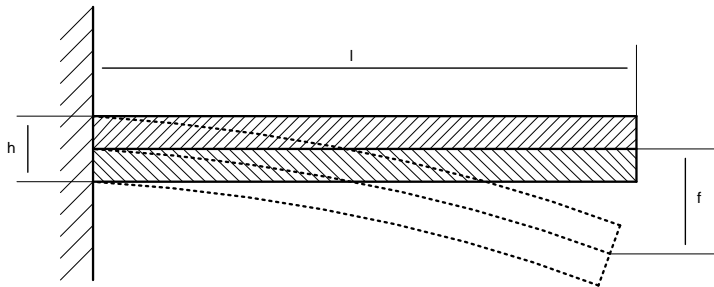


Figura 4-2 Deformarea bimetalului sub acțiunea căldurii

### 4.6.2. Materiale pentru termocuple

Fenomenul termoelectric (Seebeck, 1821) constă în apariția unui curent electric într-un circuit închis format din două metale diferite, ale căror joncțiuni se află la temperaturi diferite. Astfel, considerând două metale  $A$  și  $B$ , cu concentrațiile de electroni  $N_A$  și  $N_B$ , ce formează un circuit închis (Figura 4-3), iar cele două joncțiuni 1 și 2 se află la temperaturile  $T_1$  și  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ), atunci între zonele 1 și 2 apare o diferență de potențial electric  $U_T$ ,

$$U_T = \frac{k}{q_0} \ln \frac{N_A}{N_B} (T_1 - T_2) = k_Z (T_1 - T_2) \quad (30)$$

numită *tensiune termoelectromotoare (t.t.e.m.)*,  $k$  fiind constanta lui Boltzmann, iar  $q_0$  - sarcina electronului. Prin urmare, dacă se cunoaște temperatura  $T_2$  și tensiunea termoelectromotoare  $U_T$  și se determină - printr-o

etalonare - constanta  $k_T$  se poate determina temperatura  $T_1$  corespunzătoare, de obicei, zonei calde.

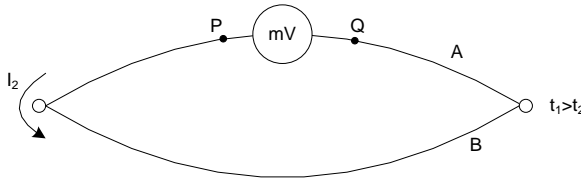


Figura 4-3 Schema simplificată a unui termocuplu

Din legile efectului termoelectric rezultă că, dacă între două puncte  $P$  și  $Q$  ale unui circuit temperatura este uniformă, atunci suma  $t.t.e.m.$  corespunzătoare întregului circuit este independentă de porțiunea  $PQ$  - fiind identică, valoric, cu tensiunea obținută în cazul în care  $P$  și  $Q$  ar fi puse în contact. De aici rezultă că între punctele  $P$  și  $Q$  se poate conecta un aparat de măsură, fără ca  $t.t.e.m.$  să fie afectată.

Tabelul 4-20 Tensiuni termoelectromotoare față de platină - la o diferență de temperatură de  $100^\circ\text{C}$  pentru diferite materiale

Materialul	t.t.e.m.[mV]
Constantan	- 3,47
Nichel	- 1,98
Paladiu	- 0,28
Platină	0,00
Platină 90% + Rhodiu 10%	+0,65
Cupru	+0,67
Argint	+0,79
Aur	+0,80
Manganină	+ 0.82
Wolfram	+0,90
Fier	+ 1.89
Nichel-Crom	+2,20

Pentru construcția termocuplelor se folosesc astfel de materiale, încât  $t.t.e.m.$  să aibă valori mari (Tabelul 4-20), iar caracteristicile  $U_T = f(T_1)$  să fie liniare (fig. 7.24). Dintre metale se utilizează  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Pt}$ , iar dintre aliaje constantanul, copelul (56  $\text{Cu}$ , 44  $\text{Ni}$ ), alumelul (95  $\text{Ni}$ ; 2  $\text{Al}$ ; 2  $\text{Mn}$ ; 1 și), cromelul (90  $\text{Ni}$ , 10  $\text{Cr}$ ), aliaje  $\text{Pt-Rh}$  (90  $\text{Pt}$ , 10  $\text{Rh}$ ) etc. Temperaturile de utilizare a termocuplelor depind de natura componentelor: copel-cupru între  $-250$  și  $+600^\circ\text{C}$ , copel-fier între  $-200$  și  $+1000^\circ\text{C}$ , cromel-alumel între  $0$  și  $1\ 100^\circ\text{C}$ ,  $\text{Pt-Pt+Rh}$  până la  $1\ 600^\circ\text{C}$  etc.

#### 4.6.3. Aliaje de lipit

Având temperaturi de topire mai scăzute, aliajele de lipit se topesc înaintea metalelor pe care le lipesc și, difuzând în ele, formează un strat intermediar care - după răcire - prezintă conductivitate electrică și rezistență mecanică satisfăcătoare.

Se împart în două grupe:

*moi* - cu temperatură de topire  $T_t < 400^\circ\text{C}$  și rezistența la tracțiune  $\sigma_r = 50-70\ \text{MN/m}^2$



tari - cu  $T_t > 500^\circ\text{C}$  și  $\sigma_r \approx 500 \text{ MM/ m}^2$ .

Conductoarele din cupru și alame se lipesc cu aliaje staniu-plumb (Tabelul 4-21); pentru capetele de bobine ale mașinilor electrice se utilizează însă aliaje tari pe bază de Zn-Cu sau Cu-Ag cu adaosuri de Cd. Pentru lipirea conductoarelor din aluminiu se utilizează, printre altele, aliajele Sn-Cd-Zn (40% Sn, 20% Cd, 25% Zn, 15% Al) pentru lipiri moi și Al-Si (86% Al, 10% Si, 4% Cu) pentru lipiri tari.

**Tabelul 4-21 Aliaje de lipit pe baza de staniu**

Simbol		Lp 37	Lp 40	Lp 50	Lp 60
Compoziție [%]	Sn	37±1	40±1	50 ±1	60 ±1
	Pb	Rest	Rest	Rest	Rest
	Sb	0,25	0,25	0,25	0,12
	Cu	0,10	0,10	0,10	0,10
Adaosuri [%]	Fe	0,02	0,02	0,02	0,02
	Zn	0,002	0,002	0,002	0,002
	Al	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura [°C]	Solid	183	183	184	184
	Lichid	248	233	216	190
Utilizări		Lipiri cabluri, conducte telefonice	Lipiri tablă de alamă, conductoare electrice	Lipiri la conductoare electrice, sarmă galvanizată	Lipiri fine pentru radiofonie, metale ușor fuzibile



## Cap.5. Materiale electroizolante

### 5.1. Caracteristici generale

Din clasa materialelor electroizolante fac parte materialele a căror rezistivitate depășește  $10^6 \Omega\text{m}$  și care prezintă, între banda de valență și banda de conducție, o bandă interzisă de lărgime  $W_i > 3 \text{ eV}$ . O caracteristică importantă a materialelor electroizolante fiind aceea de a se polariza electric, ele sunt și *dielectrice*.

Utilizarea cea mai importantă a materialelor izolante fiind în construcția schemelor de izolație ale instalațiilor electrice și comportarea lor la acțiunea diferitelor solicitări este elementul hotărâtor pentru mărirea de viață a instalațiilor din care fac parte, ele trebuie să posede o serie de caracteristici, de multe ori antagoniste: proprietăți dielectrice, mecanice și termice foarte bune, rezistență mare la agenții chimici, îmbătrânire lentă și durată de viață mare, prelucrabilitate ușoară și cost redus. Aceste caracteristici depind de natura chimică și structura fizică a corpurilor și se modifică mai mult sau mai puțin sub acțiunile simple sau combinate ale diferiților factori externi. Fabricarea unor materiale care să îndeplinească toate condițiile enumerate anterior, adică realizarea unor izolanți universali este practic imposibilă.

De obicei, materialele simple utilizate prezintă valori importante doar pentru o clasă de proprietăți: fie termice, fie mecanice, fie dielectrice etc. În ultimii ani s-au realizat însă materiale compozite (și scheme de izolație) caracterizate prin valori foarte bune ale mai multor clase de proprietăți.

### 5.2. Polarizația temporară a materialelor izolatoare

Prin introducerea unui material dielectric într-un câmp electric se constată că acestea se influențează reciproc:

- Câmpul electric modifică proprietățile electrice ale materialului.
- Materialul dielectric modifică geometria liniilor de câmp ale câmpului electric.

#### **Influența câmpului electric asupra materialelor dielectrice.**

Un fenomen caracteristic materialelor dielectrice constă în apariția, în structura lor, a **dipolurilor electrice**. Dipolul electric este prezentat în Figura 5-1 și este compus dintr-o pereche de sarcini electrice de valoare  $Q$  inseparabile, de valori egale, dar de semn opus, aflate la o anumită distanță  $\vec{d}$ . Dipolii electrice pot fi

de două tipuri: dipoli electrici induși, respectiv dipoli electrici permanenți. Oricare dipol electric este caracterizat printr-un moment electric elementar  $\vec{p}$ , care se mai numește și **momentul dipolului**. Momentul dipolului este un vector orientat de la sarcina negativă către cea pozitivă, iar relația de definiției a acestuia este următoarea:

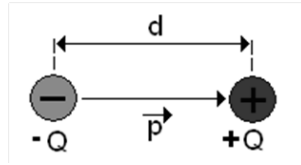


Figura 5-1 Dipolul electric

$$\vec{p} = Q \cdot \vec{p} \tag{31}$$

unde  $Q$  reprezintă sarcina electrică a dipolului electric.

Efectul câmpului electric asupra proprietăților electrice ale materialului dielectric este remarcat prin faptul că, indiferent de tipul dipolului, atunci când se aplică un câmp electric de intensitate  $E$  asupra materialului dielectric respectiv, dipolii electrici din structura acestuia se vor alinia după direcția câmpului respectiv, așa cum este prezentat și în Figura 5-2.

Când dipolii sunt aliniați, se spune că **materialul este polarizat**.

Pentru materialul dielectric, starea de polarizare electrică se exprimă cantitativ printr-o mărime notată  $\vec{P}$ , numită **polarizație electrică**, care reprezintă densitatea volumetrică a momentelor electrice elementare  $\vec{p}$ :

$$\vec{P} = N_{dipoli} \cdot \vec{p} \tag{32}$$

unde  $N_{dipoli}$  reprezintă densitatea volumetrică a dipolilor formați în structura materialului, iar  $\vec{p}$  reprezintă momentul electric elementar.

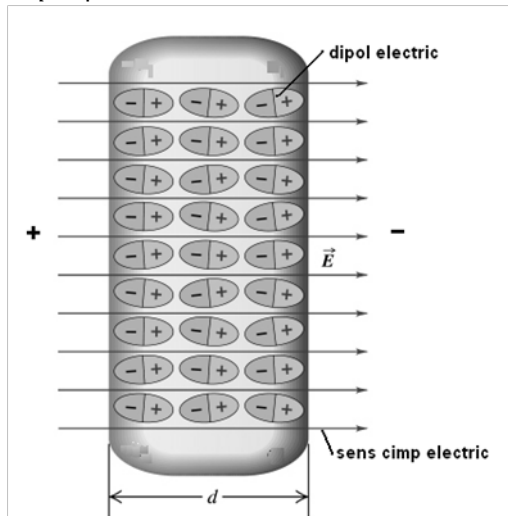


Figura 5-2 Material dielectric polarizat

Dielectricii sunt materialele care se polarizează electric prin efecte ale câmpurilor electrice stabilite din exterior, prin efecte mecanice (piezoelectricitatea) sau termice (piroelectricitatea). Ei se numesc *polari* sau *nepolari*, după cum moleculele (atomii, ionii) lor sunt polare - adică au moment electric spontan (permanent), respectiv nepolare.

Câmpul electric  $E_0$  care exercită acțiuni directe asupra unui atom, ion sau moleculă se numește *câmp electric activ* (sau interior) și nu coincide cu câmpul macroscopic  $E$ . Într-adevăr, câmpul  $\vec{E}$  reprezintă media macroscopică a câmpului microscopic  $\vec{e}$  efectuată într-un volum infinit mic fizic, iar  $\vec{E}_0$  aceeași medie dar efectuată în lipsa particulei asupra căreia se consideră acțiunea câmpului. Pentru corpurile amorse, sau a căror structură cristalină prezintă simetrie sferică, se obține expresia:

$$\vec{E}_0 = \vec{E} + \left(1/3\varepsilon_0\right)\vec{P} \quad (33)$$

în care  $\vec{P}$  este vectorul polarizație electrică, iar  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} [F/m]$  este permitivitatea vidului. Mai general, pentru materialele care nu prezintă o simetrie structurală sferică, expresia mărimii  $E_0$  are forma:

$$\vec{E}_0 = \vec{E} + \left(\frac{\gamma}{\varepsilon_0}\right)\vec{P} \quad (34)$$

în care coeficientul  $\gamma$  trebuie determinat pentru fiecare caz în parte. În cazul gazelor, ale căror molecule sunt foarte depărtate, se poate considera  $\gamma \approx 0$  și  $E_0 \approx E$ .

Polarizația electrică poate fi *temporară* sau *permanentă*, după cum depinde sau nu depinde de câmpul electric. Legea polarizației electrice temporare dă legătura dintre polarizația temporară  $P_t$  și  $E$ :

$$\vec{P}_t = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot \vec{E} \quad (35)$$

în care  $\chi_e$ , numită *susceptivitate electrică*, este o mărime de material adimensională, scalară în cazul corpurilor izotrope și tensor de ordinul II pentru cele anizotrope. Combinând (35) cu legea legăturii în câmpul electric  $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_t + \vec{P}_p$ , în care  $\vec{D}$  este inducția electrică iar  $\vec{P}_p$  - polarizația permanentă, rezultă:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_p; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r; \quad \varepsilon_r = 1 + \chi_e \quad (36)$$

în care  $\varepsilon$  este *permitivitatea* (absolută) a materialului, iar  $\varepsilon_r$  este *permitivitatea relativă*.

Materialele polare au permitivitatea relativă mai mare decât cele nepolare, lichidele polare au  $\varepsilon_r$  mai mare decât solidele polare, iar pentru gaze  $\varepsilon_r \approx 1$ ,  $\chi_e \approx 0$  (tabelul 3.1).

Se deosebesc următoarele clase fundamentale de polarizație electrică: *electronică*, *ionică*, *de orientare* și *de neomogenitate*. Polarizațiile electronică și ionică se mai numesc și polarizații electrice *de deformare*. Polarizația electrică de neomogenitate, existentă numai în materialele neomogene, nu este distinctă de primele trei, din punctul de vedere al mecanismului microscopic de producere; ea

este consecința apariției unei sarcini electrice adevărate pe suprafețele care separă părțile omogene ale unui izolant neomogen.

**Tabelul 5-1 Permitivitatea relativă a claselor de materiale izolante**

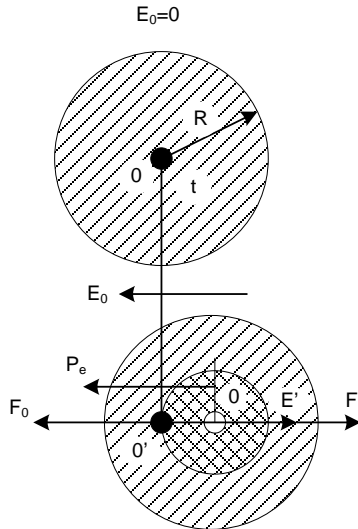
Clase de materiale	$\epsilon_r$
Materiale gazoase	$\approx 1$
Materiale nepolare	$1 \div 3$
Materiale polare solide	$3 \div 5$
Materiale polare lichide	zeci
Materiale feroelectrice	sute $\div$ mii

Metalele nu prezintă, practic, stări de polarizație electrică.

### 5.2.1. Polarizația electronică

Se datorează deformării învelișului electronic al atomilor (ionilor) sub acțiunea forței pe care o exercită asupra lor câmpurile electrice exterioare (active).

Corpurile care prezintă numai polarizație electronică, deci neasociată cu alte tipuri de polarizație, sunt cele constituite dintr-un singur tip de atomi, cum sunt cristalele atomice, gazele și lichidele monoatomice.



**Figura 5-3 Referitoare la polarizația electronică**

Se asimilează învelișul electronic al unui atom cu o sferă de rază  $R$  egală cu a atomului, în care sarcina  $-zq_0$  este uniform repartizată, dacă  $z$  este numărul de electroni ai atomului, iar  $-q_0$  este sarcina unui electron. În absența câmpurilor electrice exterioare, centrul sarcinilor negative, adică centrul sferei de rază  $R$ ,

coincide cu nucleul, care are sarcina  $+zq_0$  - și atomul este, deci, neutru (Figura 5-3), iar corpul nu are polarizație electronică.

Dacă se stabilește în corp un câmp electric exterior, câmpul activ  $E_0$  exercită forțe care deplasează învelișul electronic în raport cu nucleul, ca în Figura 5-3, *b* și conduc la formarea unui dipol, de lungime, cu momentul electric  $\vec{p}_e = zq_0\vec{l}$ . Suma momentelor  $\vec{p}_e$ , din unitatea de volum este egală cu polarizația de tip electronic  $P_e$  (relația 32):

$$\vec{P}_e = N_e \vec{p}_e \quad (37)$$

în care  $N_e$  este numărul de atomi (ioni) din unitatea de volum.

Pentru a se stabili dependența dintre mărimile  $P_t$  și  $E_0$ , se observă că, la echilibru, forța rezultantă  $\vec{F} = \vec{F}_0 + \vec{F}'$  care se exercită asupra nucleului (sau învelișului electronic) este nulă  $F_0 = zq_0E_0$  este forța exercitată de câmpul  $E_0$  asupra nucleului, iar  $F' = zq_0E'$  este forța pe care o exercită asupra nucleului câmpul electric  $E'$  stabilit în punctul 0 de învelișul electronic. Câmpul  $E'$  se calculează, simplu, considerându-se produs de o sarcină punctuală situată în punctul  $O'$  și egală cu sarcina negativă a sferei de rază/dublu hașurată în Figura 5-3, *b*, deci:

$$\vec{E}' = -\frac{zq_0l^3/R^3}{4\pi\epsilon_0l^2} \frac{\vec{l}}{l} = -\frac{zq_0\vec{l}}{4\pi\epsilon_0R^3} = -\frac{\vec{p}_3}{4\pi\epsilon_0R^3} \quad (38)$$

Din condiția de echilibru  $\vec{F}_0 + \vec{F}' = zq_0\vec{E}_0 + zq_0\vec{E}' = 0$ , rezultă  $E' = -E_0$ , deci, introducând în ultima egalitate pe  $E'$ , rezultă:

$$\vec{p} = 4\pi\epsilon_0R^3\vec{E}_0 = \alpha_e\vec{E}_0, \alpha_e = 4\pi\epsilon_0R^3 \quad (39)$$

Mărimea  $\alpha_e$  se numește **polarizabilitate de tip electronic**. Rezultă, deci, cu relația (38)

$$\vec{P}_e = N_e\alpha_e\vec{E}_0 \quad (40)$$

Calculul cuantic, efectuat pentru atomul de hidrogen, conduce la valoarea  $\alpha_e = 187\pi\epsilon_0R^3$  a polarizabilității, care nu diferă esențial de cea clasică.

În gaze  $\vec{E} \approx \vec{E}_0$  - așa cum s-a arătat mai sus - de unde rezultă  $\vec{P} = N_e\alpha_e\vec{E}$  astfel se obține, ținându-se seamă de relația (35), în care  $P_t = P_e$  - și de relația (36), expresiile:

$$\chi_e = \frac{N_e\alpha_e}{\epsilon_0}, \epsilon_r = 1 + \frac{N_e\alpha_e}{\epsilon_0} \quad (41)$$

Pentru gazul format din hidrogen atomic la presiune și temperatură normale, cu  $R = R_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$  [m] (raza primei orbite Bohr) și  $N_e \approx 5 \cdot 10^{25}$  [m<sup>-3</sup>] se obțin valorile:  $\alpha_e \approx 1,7 \cdot 10^{-41}$  [Fm<sup>2</sup>],  $\chi_e \approx 9,4 \cdot 10^{-5}$ ,  $\epsilon_r \approx 1,000094$ , valorile apropiate de cele experimentale.

În corpurile lichide sau solide, din relațiile anterioare rezultă:

$$\chi_e = \varepsilon_r - 1 = \frac{N_e \alpha_e / \varepsilon_0}{1 - \gamma N_e \alpha_e / \varepsilon_0} \quad (42)$$

Pentru un material solid nepolar (și nemetalic), considerând valorile tipice  $N_e \approx 5 \cdot 10^{28} \text{ [m}^{-3}\text{]}$ ,  $\alpha_e \approx 10^{-40} \text{ [F}\cdot\text{m}^2\text{]}$ ,  $\gamma = 1/3$ , se obțin:  $\chi_e \approx 0,75$ ,  $\varepsilon_r \approx 1,75$ , valori apropiate de cele reale.

Practic,  $\alpha_e$  nu depinde de temperatură la temperaturile uzuale deoarece la aceste temperaturi învelișul electronic nu suferă, practic, deformări. De asemenea, mărimile  $\gamma$  și  $N_e$  variază puțin cu temperatura (valori uzuale) la solide și lichide, astfel că  $\varepsilon_r$  și  $\chi_e$  sunt practic independente de temperatură, în cazul gazelor, pentru care dilatările sunt sensibile și deci  $N_e$  scade mai accentuat cu  $T$ , rezultă că  $\varepsilon_r$  și  $\chi_e$  scad sesizabil cu  $T$ .

Se observă, de asemenea, că polarizația de tip electronic se realizează în toate corpurile izolate, chiar dacă ele prezintă și alte clase de polarizație electrică, deoarece ea este consecutivă acțiunii câmpului electric asupra învelișului electronic al oricărui atom (ion). În cazul atomilor metalelor solide, sau al ionilor care nu mai au nici un electron de valență, polarizația electronică este neglijabilă; într-adevăr, electronii acestora sunt puternic legați de nuclee – fiind situați pe straturi electronice inferioare (electronii de valență ai metalelor nu aparțin fiecărui atom, ci formează gazul electronic).

## 5.2.2. Polarizația ionică

Este polarizație electrică de deformație, ca și cea electronică.

Corpurile care prezintă polarizație ionică (asociată cu polarizația electronică) sunt: în primul rând, cele formate din cristale ionice, din combinații dintre elementele grupelor II și VI sau III și V sau chiar dintre unele elemente ale grupei a IV-a, ca SiC. Fac parte, de asemenea, corpurile care au molecule formate din dipoli. Se consideră, de exemplu, ca în figura 3.2, trei ioni vecini ai unor molecule ionice. Dacă  $E_0 = 0$ , momentele electrice  $\vec{p}'_{i0}$  și  $\vec{p}''_{i0}$  ale perechilor de ioni vecini se anulează, în medie, și corpul este nepolarizat electric.

Dacă se stabilește un câmp electric exterior, acesta exercită forțe care deplasează, din pozițiile inițiale, ionii pozitivi în sensul lui  $E_0$  și ionii negativi în sensul opus (Figura 5-4, b) și, ca urmare, rezultanta momentelor  $p'_i$  și  $p''_i$ , adică  $\vec{p}_i = \vec{p}'_i + \vec{p}''_i$ , este nenulă, iar corpul este polarizat electric. Se poate arăta că și în cazul polarizației ionice rezultă o dependență de forma relației (39). În adevăr, să notăm cu  $\delta$  deplasările medii ale ionilor, din pozițiile de echilibru, determinate de  $E_0$  (Figura 5-4, b); variația  $\Delta W_0$  a energiei în urma deplasărilor trebuie compensată de energia  $\Delta W_E$  preluată de la câmpul electric, deci  $\Delta W_0 = \Delta W_E$ . Dar, dacă înainte de efectuarea deplasărilor ( $E_0 = 0$ ) energia celor două perechi de ioni (dipoli) are

expresia  $\left[ -\frac{2q_m^2}{4\pi\varepsilon_0 a} \right]$  în care  $q_m$  este sarcina ionului (pozitiv), iar  $a$  este distanța

neperturbată dintre ioni, după producerea deformării energia are expresia



$$\left[ -\frac{q_m^2}{4\pi\epsilon_0(a+2\delta)} - \frac{q_m^2}{4\pi\epsilon_0(a-2\delta)} \right] \quad (43)$$

deci,

$$\Delta W_0 = \left( -\frac{q_m^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left[ \frac{1}{(a+2\delta)} - \frac{1}{(a-2\delta)} + \frac{2}{a} \right] \quad (44)$$

$$\Delta W_0 = -\frac{q_m^2\delta^2}{\pi\epsilon_0 a^3}$$

De altă parte, energia cedată de câmpul electric este egală cu energia potențială a dipolilor  $p_i'$  și  $p_i''$  în câmpul  $\vec{E}_0$ :  $\Delta W_E = -(\vec{p}_i' + \vec{p}_i'')\vec{E}_0 = -\vec{p}_i'E_0 = -p_i'E_0$ .

Din egalitatea  $\Delta W_0 = \Delta W_E$  rezultă egalitatea  $p_iE_0 = \frac{q_m^2\delta^2}{\pi\epsilon_0 a^3}$  care,

observând că  $p_i = p_i' - p_i'' = q_m(a+2\delta) - q_m(a-2\delta) = 4q_m\delta$ , se mai scrie sub forma  $p_iE_0 = \frac{p_i^2}{8\pi\epsilon_0 a^3}$  sau sub forma:

$$\vec{p}_i = 8\pi\epsilon_0 a^3 \vec{E}_0, \alpha_i = 8\pi\epsilon_0 a^3 \quad (45)$$

În care  $\alpha_i$ , este polarizarea de tip ionic.

Polarizația electrică de tipul ionic are deci expresia:

$$\vec{P}_i = N_i \vec{p}_i = N_i \alpha_i \vec{E}_0 \quad (46)$$

În care  $N_i$  este numărul moleculelor ionice din unitatea de volum. Astfel se obține:

$$\chi_e = \epsilon_r - 1 = \frac{N_i \alpha_i / \epsilon_0}{1 - \gamma N_i \alpha_i / \epsilon_0} \quad (47)$$

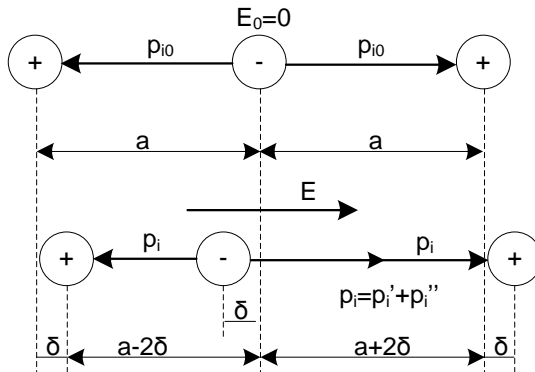


Figura 5-4 Referitoare la polarizația ionică

În cazul gazelor,  $y \approx 0$  și,  $\chi_e = \epsilon_r - 1 \approx N_i \alpha_i / \epsilon_0$ . Variația cu temperatura a mărimilor  $\gamma$  și  $N_i$ , este foarte mică - la temperaturile uzuale; în schimb, polarizabilitatea  $\alpha_i$ , poate crește neneglijabil cu temperatura, ca urmare a faptului că agitația termică mai intensă favorizează deplasările ionilor sub acțiunea câmpului  $E_0$  prin slăbirea legăturilor chimice și, deci, măresc respectiv micșorează momentele  $\vec{p}'_i$  și  $\vec{p}''_i$ . Rezultă că  $\epsilon_r$ , și  $\chi_e$  cresc cu temperatura (dar nu prea mult, la temperaturile uzuale).

Corpurile polarizate ionic prezintă și polarizație electronică așa cum s-a subliniat în paragraful precedent. Totuși, polarizația ionică este adesea predominantă. De exemplu,  $\epsilon_{ri}/\epsilon_{re} = 3,83$  pentru LiF; 2,27 pentru KF; 1,27 pentru NaI; 1,05 pentru KBr (dar 0,9 pentru RbI).

### 5.2.3. Polarizația de orientare

Se realizează în corpurile care au molecule polare (cu moment electric permanent  $\vec{p}_p$ ), prin rotirea acestora în câmpul electric exterior.

#### Polarizația de orientare a gazelor și lichidelor

În gaze (mai ales) și în lichide, moleculele polare se pot roti relativ ușor (cu excepția lichidelor foarte vâscoase). În lipsa câmpurilor electrice exterioare, moleculele sunt orientate haotic, datorită agitației termice și, deci, suma, din unitatea de volum, a momentelor lor electrice permanente  $\vec{p}_p$  este nulă, adică materialul este nepolarizat electric (v. Figura 5-5, a). Câmpurile electrice exterioare orientează moleculele astfel încât  $E_0$  și  $\vec{p}_p$  să fie omoparalele - pentru a se minimiza energia electrică; acestei acțiuni de ordonare i se opune agitația termică și, ca urmare momentele  $\vec{p}_p$  nu au, toate, orientarea câmpului  $E_0$ , dar, în majoritate,  $E_0$  și  $\vec{p}_p$  formează unghiuri ascuțite și, deci, corpul este polarizat electric. Când temperatura gazului sau lichidului crește, mișcarea de agitație termică se intensifică și acțiunea mărită de dezordonare determină scăderea polarizației electrice cu temperatura.

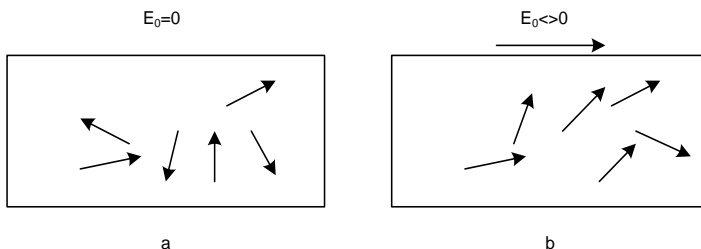


Figura 5-5 Orientarea moleculelor polare în câmp electric

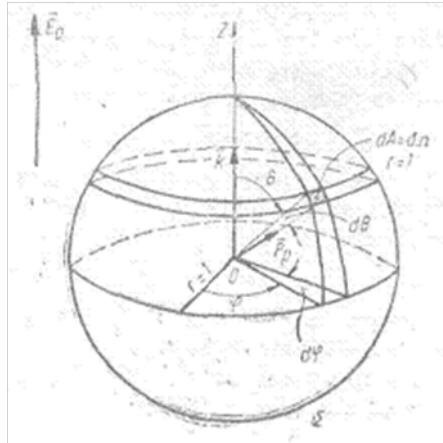


Figura 5-6 Referitor la polarizația de orientare

Calculul polarizației de orientare se poate prezenta clasic, pentru gaze și lichide, în felul următor (menționăm că rezultatele clasice sunt, în acest caz, bine verificate de experiență): considerăm o sferă  $\Sigma$  cu raza  $r = 1$ , în centrul căreia se găsește o moleculă polară (Figura 5-6); fie  $d_2$  probabilitatea ca  $\vec{p}_p$  să fie conținut în unghiul solid  $d\Omega = dA$ , deci ca  $\vec{p}_p$  să formeze cu  $E_0$  un unghi cuprins între  $\theta$  și  $\theta + d\theta$ ; energia moleculei are expresia  $w_p = -\vec{p}_p \cdot \vec{E}_0 = -p_p \cdot E_0 \cdot \cos\theta$ , deci  $dq = C \cdot e^{-w_p/kT} \cdot dA = C \cdot e^{b \cos\theta} \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$ , cu  $b = p_p E_0 / kT$ . Constanta  $C$  se determină din condițiile de normare

$$1 = \int_{\Sigma} dq = C \cdot \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} e^{b \cos\theta} \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = 2\pi C \int_1^{-1} e^{b \cos\theta} d \cos\theta$$

și rezultă

$$dq = \frac{e^{b \cos\theta} \cdot d \cos\theta \cdot d\varphi}{2\pi \int_1^{-1} e^{b \cos\theta} d \cos\theta}$$

Momentul electric mediu  $\vec{p}_p$  are expresia  $\vec{p}_p = \int_{\Sigma} \vec{p}_p \cdot dq$

Polarizația de orientare crește cu  $E_0$  și tinde asimptotic spre valoarea de saturație  $P_{0 \text{ sat}} = N_0 \cdot p_p$  când toate momentele sunt orientate în sensul câmpului electric.

La temperaturi uzuale și în câmpuri electrice obișnuite, polarizația electrică, susceptivitatea și permitivitatea relativă scad hiperbolic cu temperatura.

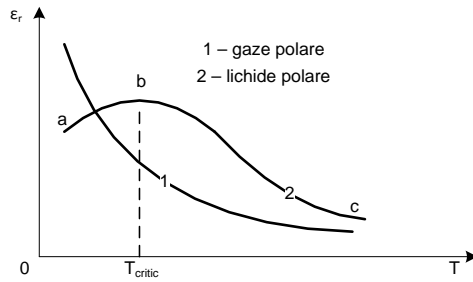


Figura 5-7 Variația cu temperatura a permitivității relative pentru gaze și lichide polare

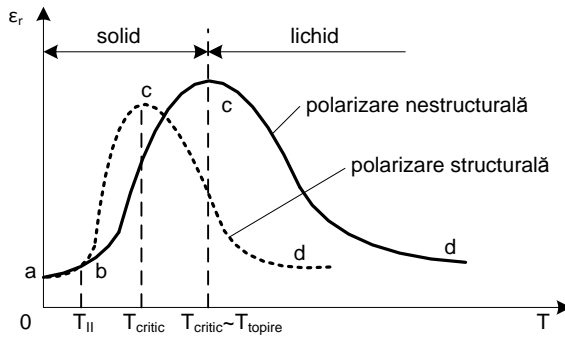


Figura 5-8 Variația cu temperatura a polarizației de orientare a solidelor

Variația cu temperatura a permitivității relative a gazelor este reprezentată, în Figura 5-7 cu  $\gamma \approx 0$ , iar a lichidelor în Figura 5-8. Pentru lichide, la temperaturi joase ( $T < T_{critic}$ ) lichidul este vâscos (agitație termică slabă) și moleculele sunt orientate cu dificultate de câmp; pe măsură ce  $T$  crește, agitația termică slăbește legăturile chimice dintre molecule, câmpul le orientează mai ușor și  $\epsilon$  crește (porțiunea  $ab$  din Figura 5-8). Pentru  $T > T_{critic}$  agitația termică intensă determină, ca și la gaze, scăderea permitivității (porțiunea  $bc$ ); expresia

$$\chi_e = \epsilon_r - 1 \approx \frac{N_0 \alpha_0 / \epsilon_0}{1 - \gamma N_0 \alpha_0 / \epsilon_0} = \frac{N_0 C_0 / \epsilon_0 T}{1 - \gamma N_0 C_0 / \epsilon_0 T} \tag{48}$$

este valabilă numai pentru  $T > T_{critic}$ .

## Polarizația de orientare a solidelor

La temperaturi joase, moleculele polare ale solidelor sunt „înghețate” și nu pot fi orientate de câmpul electric, iar polarizația este practic nulă,  $\epsilon_r \approx 1$  (porțiunea *ab* din Figura 5-8). La creșterea temperaturii, coeziunea moleculelor scade și - peste o valoare data  $T_{II}$  (temperatura de transformare de fază de ordinul doi) - ele încep să fie orientate de câmp și  $\epsilon_r$  crește (porțiunea *bc*); apoi, pentru  $T > T_{critic}$  se observă, ca și la gaze, scăderea lui  $\epsilon_r$  cu  $T$ , datorită agitației termice intense (porțiunea *cd*). În cazul în care  $E_0$  orientează întreaga moleculă (macromoleculă) se spune că polarizația este *nestructurală* (curba nepunctată din Figura 5-8), iar dacă numai anumite părți - cele polare - ale macromoleculei sunt rotite, polarizația se numește *structurală* (curba punctată). Este evident că  $T_{critic}$  este mai mică la polarizația structurală decât la cea nestructurală, deoarece este mai ușoară rotirea părților macromoleculei decât rotirea ei, în întregime. La multe solide,  $T_{critic} \approx T_{topire}$  în cazul polarizației nestructurale.

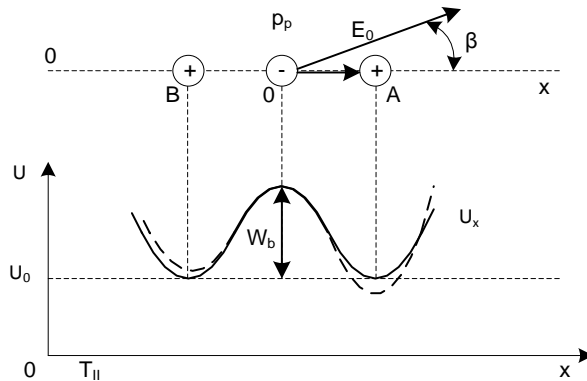


Figura 5-9 Modelul lui Frohlich pentru calculul polarizației de orientare a solidelor

Datorită anizotropiei cristaline, în starea solidă moleculele nu pot ocupa decât anumite direcții cristalografice (în care energia liberă a corpului este minimă) și, deci, nu pot avea, în general,  $p_p$  omoparalel cu  $E_0$  - în opoziție cu gazele (dacă nu ar exista agitația termică). Pentru a ține seamă de această particularitate, efectuăm calculul polarizației folosind modelul lui Frohlich. El este valabil numai pentru  $T > T_{critic}$  și când corpul este încă solid (prezintă anizotropie cristalină) - cum este cazul porțiunii *cd* din curba punctată (Figura 5-8), dar pentru  $T < T_{topire}$ .

În modelul lui Frohlich molecula polară este asimilată cu un dipol electric, având momentul electric  $p_p$  al moleculei reale - și a cărei rotație consistă în trecerea bruscă a ionului pozitiv dintr-un punct *A* în unul *B* (sau invers) (Figura 5-9), ionul negativ rămânând într-un punct fix *O*. Rotirii moleculei îi corespunde deci escaladarea de către ionul pozitiv a barierei  $w_b$  din curba repartiției  $U(x)$  a energiei potențiale a moleculei. Datorită anizotropiei cristalului, molecula poate avea numai direcția *Ox*, adică poate ocupa numai pozițiile *OA* și *OB*.

Stabilirea unui câmp electric exterior  $E_0$  care formează un unghi oarecare  $\beta$  cu axa *Ox*, conduce la scăderea energiei moleculei în poziția *OA*, respectiv la mărirea ei în poziția *OB*, cu  $|\vec{p}_p \vec{E}_0| = p_p E_0 \cos \beta$ , în raport cu valorile ei din cazul

absentei câmpului (curba  $U(x)$  punctată). În acest caz, folosind statistica lui Boltzmann, numărul de molecule din unitatea de volum orientate după OA, respectiv după OB au expresiile:

$$\begin{aligned} N_A &= C \cdot e^{-\left[\frac{U_0 - p_p E_0 \cos \beta}{kT}\right]} = N'_0 e^{b'} \\ N_B &= C \cdot e^{-\left[\frac{U_0 + p_p E_0 \cos \beta}{kT}\right]} = N'_0 e^{-b'} \end{aligned} \quad (49)$$

în care  $b' = E_0 \cdot \left[ \frac{p_p \cos \beta}{kT} \right]$ ,  $N'_0 = C \cdot e^{-\left[ \frac{U_0}{kT} \right]}$ ,

din care rezultă că  $N_A > N_B$ , deci există un exces de momente electrice orientate în sensul Ox pozitiv, astfel că materialul se polarizează.

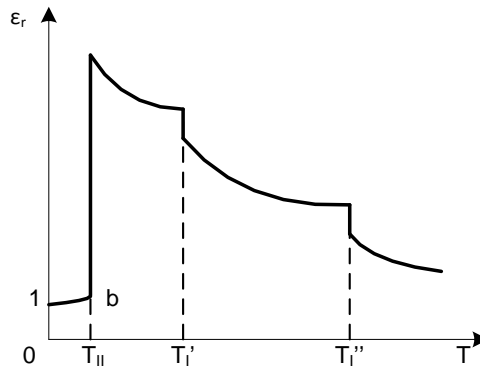


Figura 5-10 Variația cu temperatura a permitivității relative a unor solide

Componenta după direcția câmpului  $E_0$  a momentului electric mediu al moleculelor cuprinse în unitatea de volum rezulta din expresia:

$$\tilde{p}_{pE_0} = \frac{(N_A - N_B)p_p \cos \beta}{N_A + N_B} = p_p \cos \beta \frac{e^{b'} - e^{-b'}}{e^{b'} + e^{-b'}} = p_p \cos \beta \cdot thb' \quad (50)$$

iar polarizația electrică de orientare are expresia:

$$P_0 = N_0 \tilde{p}_p \cos \beta \cdot thb' = N_0 p_p \cos \beta \cdot th \left( \frac{p_p E_0 \cos \beta}{kT} \right) \quad (51)$$

în care  $N_0$  este numărul de molecule polare din unitatea de volum.

În Figura 5-10 este reprezentată forma curbei  $\epsilon_r = f(T)$  a hidrogenului sulfurat,  $H_2S$ . Sub temperatura  $T_{II}$  de transformare de faza de ordinul II, moleculele nu se pot roti (sunt „înghețate”) și  $\epsilon_r \approx 1$ ; pentru temperaturile  $T'_I$  și  $T''_I$  se produc transformări de faza de ordinul I ale corpului - adică schimbări ale structurii rețelei cristaline, respectiv ale stării de agregare (topire, vaporizare) - în care densitatea corpului, respectiv  $N_0$  variază brusc.

### 5.2.4. Polarizația de neomogenitate

Este o polarizație electrică echivalentă, definită în corpurile neomogene ale căror suprafețe de separare a părților lor omogene se încarcă electric la stabilirea unui câmp electric exterior în ele.

Considerăm un dielectric neomogen și cu conductivitate nenulă, situat între doi electrozi metalici (un condensator electric). Spre suprafața  $S_{kl}$ , care separă două părți omogene  $k$  și  $l$  (Figura 5-11) ale dielectricului, vin, respectiv, pleacă, la stabilirea unui câmp electric în material, purtători de sarcină; dacă mobilitățile acestora sunt diferite în domeniile  $k$  și  $l$ , pe suprafața  $S_{kl}$  se concentrează purtători (vin mai mulți dinspre mediul cu mobilitate mai mare decât pleacă spre celălalt), care determină pe suprafața  $S_{kl}$  o sarcină  $q_{skl}$ , repartizată cu densitatea de suprafață  $\rho_{skl}$ . Folosind legea fluxului electric

$$\operatorname{divs}\bar{D} = \bar{n}_{kl}(\varepsilon_l \bar{E}_l - \varepsilon_k \bar{E}_k) = \varepsilon_l \bar{E}_{nl} - \varepsilon_k \bar{E}_{nk} = q_{skl}$$

legea conservării sarcini electrice (în regimul staționar - pe care îl considerăm),  $\operatorname{divs}\bar{J} = J_{nl} - J_{nk} = 0$  deci  $J_{nl} = J_{nk}$  și legea conducției electrice  $\bar{J} = \sigma \bar{E}$  ( $E_n$  este componenta normală la suprafața  $S_H$  a intensității câmpului electric,  $J_n$  - componenta normală a densității curentului de conducție,  $\sigma$  - conductivitatea electrică), rezultă:

$$q_{skl} = \varepsilon_l \cdot E_{nl} - \varepsilon_k \cdot E_{nk} = J_{nl} \left( \frac{\varepsilon_l}{\sigma_l} - \frac{\varepsilon_k}{\sigma_k} \right)$$

din care rezultă că  $q_{skl} \neq 0$  dacă ultima paranteză este nenulă. Deci pe  $S_{kl}$  se concentrează sarcină electrică, dacă este satisfăcută inegalitatea  $\frac{\varepsilon_l}{\sigma_l} \neq \frac{\varepsilon_k}{\sigma_k}$ , respectiv  $\tau_k \neq \tau_l$ , în care  $\tau_k = \frac{\varepsilon_k}{\sigma_k}$ , respectiv  $\tau_l = \frac{\varepsilon_l}{\sigma_l}$  sunt duratele de relaxare ale purtătorilor de sarcină din dielectricii  $k$  și  $l$ , durate care măsoară variația locală a sarcinii electrice în regimul liber, nestaționar; la suprimarea câmpului electric exterior, densitățile de sarcină se anulează practic după o durată egală cu  $(3 \div 5)\tau$  prin difuziunea, în dielectric, a purtătorilor de sarcină; mobilitatea purtătorilor scade când  $\tau$  crește (sarcina locală variind mai lent), deci, dacă în cele două medii duratele de relaxare sunt diferite, mobilitățile purtătorilor sunt, de asemenea, inegale și pe suprafața de contact se concentrează purtători de sarcină.

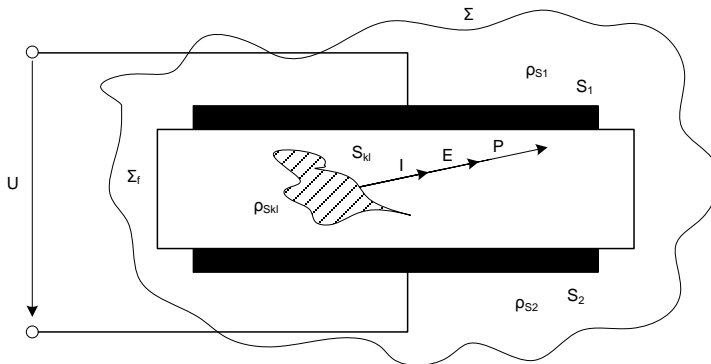


Figura 5-11 Referitoare la polarizația de neomogenitate

Purtătorii de sarcină de pe suprafețele de tipul  $S_{kl}$ , din dielectric produc un câmp electric  $E_s$  suplimentar în raport cu acela produs de electrozi. Câmpul  $E_s$  produce în dielectric o polarizație suplimentară  $P_T$  - în plus față de polarizația corespunzătoare câmpului produs de electrozi. Polarizația  $P$ , se numește *polarizație electrică de neomogenitate* (sau de *relaxare, de interstraturi, interfacială*). Ca mecanism microscopic de formare, ea nu diferă de polarizațiile electronică, ionică sau de orientare, ci le aparține (în funcție de natura dielectricilor care compun dielectricul neomogen).

Dacă se aplică legea fluxului electric unei suprafețe închise  $S$  care să conțină, în întregime, condensatorul din Figura 5-11, și care să fie suficient de extinsă pentru a nu intersecta liniile de câmp electric ale lui, se obține, deoarece  $\int_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = 0$ , egalitatea  $q_1 + q_2 + q_{kl} = 0$ , în care  $q_1$  și  $q_2$  sunt sarcinile armăturilor, iar  $q_{kl}$  este sarcina electrică adevărată de pe toate suprafețele de separație din dielectric; rezultă deci  $|q_1| \approx |q_2|$ , dacă  $q_{kl} \neq 0$ , deci dacă  $\tau_k \neq \tau_l$ , și - ca urmare - că este imposibilă definirea unei capacități electrice independentă de sarcinile electrice și de potențialele electrice ale armăturilor. În practică,  $|q_1|, |q_2| \gg |q_{kl}|$ , deoarece  $\tau_{izol} > \tau_{cond} \gg \tau_k/\tau_l$ , deci  $|q_1| \approx |q_2|$ , și, deci, operarea cu valoarea capacității electrice, calculată obișnuit, nu este afectată de erori importante. Polarizației  $\vec{P}_T$  îi corespund însă pierderi în dielectrice care, la frecvențele industriale, pot fi importante.

### 5.3. Polarizația permanentă a materialelor izolatoare

Aceste fenomene sunt caracteristice materialelor care, chiar de la fabricare prezintă în volumul lor domenii macroscopice în care starea de polarizare este deja instalată.

#### 5.3.1. Fenomenul piroelectric

Acest fenomen constă în instalarea spontană a stării de polarizare permanentă sub acțiunea temperaturii. Deoarece materialele la care acest fenomen este prezent se comportă în câmp electric ca și fierul în câmp magnetic, aceste materiale se mai numesc și materiale feroelectrice. În rețeaua cristalină a materialelor feroelectrice există succesiuni de câte 3 ioni de polaritate alternantă (-+-) care formează unități polarizabile compuse din 2 dipoli, similare cu situația prezentată în Figura 5-4. Aceste unități polarizabile sunt caracterizate de câte un moment electric, rezultat prin sumarea momentelor electrice elementare ale dipolilor unității respective, care sunt reprezentați de doi vectori de semn opus. La temperaturi mari, ionii unității polarizabile sunt aflați la distanțe egale astfel încât, deoarece vectorii celor doi dipoli din unitatea respectivă sunt egali în modul, dar de semn opus, momentul electric al unității polarizabile este nul. La temperaturi mai scăzute, ionii unităților polarizabile din materialele feroelectrice sunt plasați la distanțe inegale (se spune că ionii sunt "delocalizați"), astfel încât, deoarece vectorii celor doi dipoli din unitatea respectivă sunt inegali, momentul electric al



unității polarizabile este nenul. Delocalizarea ionilor din unitățile polarizabile este permanentă, iar orientarea momentelor electrice ale unităților polarizabile este aceeași în diferite volume macroscopice (domenii) ale materialului, astfel încât, fiecare domeniu este caracterizat de către un vector de polarizație nenul  $\vec{P}_k$ , orientat independent față de cei specifici celorlalte domenii polarizate, așa cum este prezentat și în Figura 5-12 (stânga).

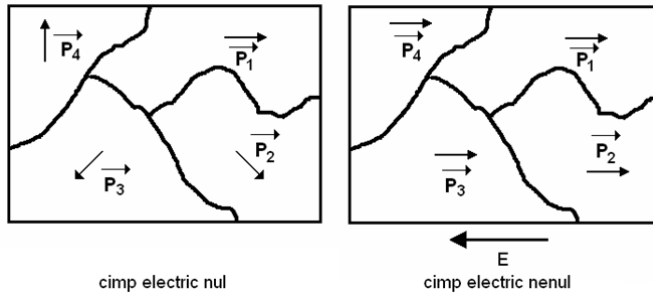


Figura 5-12 Fenomenul piroelectric

Datorită orientării haotice a acestor vectori, vectorul polarizație rezultat pentru întregul material este nul.

$$\vec{P} = \sum_k \vec{P}_k = 0 \quad (52)$$

Prin introducerea materialului feroelectric într-un câmp electric, vectorii polarizație  $\vec{P}_k$  ai domeniilor se vor orienta pe direcția câmpului electric aplicat, iar vectorul polarizație rezultat va fi în acest caz nenul - Figura 5-12 (dreapta).

$$\vec{P} = \sum_k \vec{P}_k \neq 0 \quad (53)$$

Fenomenul de polarizare piroelectrică permanent este lent, duce la încălzirea materialului și rămâne și după eliminarea câmpului electric.

### 5.3.2. Fenomenul piezoelectric

Acest fenomen caracterizează proprietatea materialelor dielectrice de a-și modifica starea de polarizare sub acțiunea unei forțe mecanice – fenomen care se numește efect piezoelectric direct, respectiv de a se deforma sub acțiunea unui câmp electric exterior – fenomen care se numește efect piezoelectric invers.

**Fenomenul piezoelectric direct** este specific materialelor dielectrice care în structura lor nu au centru de simetrie – Figura 5-13. Pentru acest tip de materiale, în absența unei forțe externe, centrul sarcinii pozitive coincide cu centrul sarcinii negative și în consecință, momentul electric elementar al dipolului astfel format este zero (distanța  $d$  dintre sarcina pozitivă și cea negativă, care formează dipolul, fiind 0). Prin aplicarea unei forțe externe, centrul sarcinii electrice pozitive devine diferit de centrul sarcinii electrice negative și astfel, deoarece distanța  $d$  dintre sarcina pozitivă și cea negativă, care formează dipolul, nu mai este nulă, momentul electric elementar al acestuia devine nenul și deoarece vectorii

momentelor electrice elementare sunt proiectați după direcția forței externe aplicate, în material se instalează starea de polarizare.

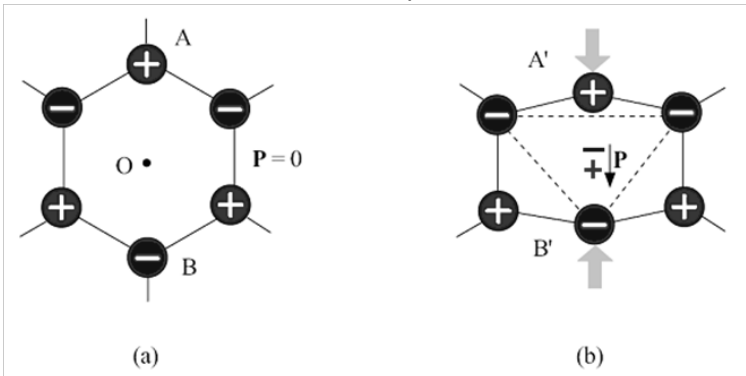


Figura 5-13 Structură moleculară fără centru de simetrie

Efectul piezoelectric direct este prezentat în Figura 5-14, în care, în stânga se consideră un material dielectric izolat, asupra căruia nu se aplică nici un câmp electric sau forță mecanică. În acest caz, în materialul dielectric nu există fenomene de polarizare. Prin aplicarea unei forțe mecanice asupra materialului, acesta se polarizează (vectorul polarizație devine nenul) și în consecință, se remarcă apariția sarcinilor electrice la suprafața materialului respectiv.

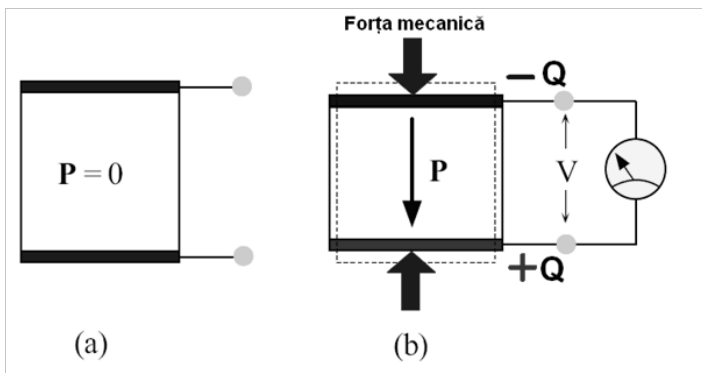


Figura 5-14 Fenomenul piezoelectric direct

Relația dintre vectorul polarizație  $P_i$ , indus pe direcția  $i$ , prin aplicarea unei forțe mecanice  $F_j$ , aplicate pe direcția  $j$ , este următoarea:

$$P_i = d_{ij} \cdot F_j \quad (54)$$

unde  $d_{ij}$  este coeficientul piezoelectric, specific materialului dielectric.

Materialele dielectrice la care este prezent efectul piezoelectric direct sunt utilizate pentru realizarea unor dispozitive, numite traductoarelor piezoelectrice, care realizează conversia dintr-o mărime mecanică în una electrică. De exemplu, pe baza acestor materiale dielectrice se pot realiza dispozitive care detectează

vibrațiile mecanice și le transformă în mărimi electrice, astfel de dispozitive fiind utile, de exemplu, în realizarea microfoanelor.

**Efectul piezoelectric invers** este prezentat în Figura 5-15. Prin aplicarea unui câmp electric asupra unui material dielectric, acesta poate să comprime materialul (a) sau să-l extindă (b).

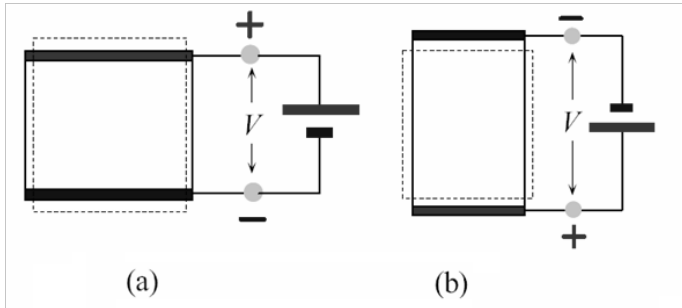


Figura 5-15 Fenomenul piezoelectric invers

Relația dintre forța mecanică  $F_i$  de deformare a materialului dielectric, indusă pe direcția  $i$ , prin aplicarea unui câmp electric  $E_j$ , aplicat pe direcția  $j$ , este următoarea:

$$F_i = d_{ij} \cdot E_j \quad (55)$$

unde  $d_{ij}$  este coeficientul piezoelectric, specific materialului dielectric.

Materialele dielectrice la care este prezent efectul piezoelectric invers sunt utilizate pentru realizarea unor dispozitive care realizează conversia dintr-o mărime electrică în una neelectrică. De exemplu, dacă asupra unui cristal de quartz, prevăzut cu electrozi, se aplică o tensiune sinusoidală, acesta va genera vibrații mecanice.

### 5.3.3. Efectul de electret

Materialele dielectrice care își păstrează starea de polarizare o lungă perioadă de timp după ce influența externă a dispărut (câmpul electric aplicat într-o anumită stare a materialului) se numesc electreți.

În cazul în care o substanță a cărei molecule posedă momente de dipol permanente este topit și plasat într-un câmp staționar electric puternic, moleculele devin parțial aliniată în direcția câmpului. Dacă aceasta este răcită până când se solidifică și apoi câmpul electric este oprit, moleculele nu se pot roti cu ușurință în substanța solidificată și își păstrează orientarea, pentru o lungă perioadă de timp. Un electret astfel realizat poate rămâne într-o stare de polarizare pentru un timp destul de lung, variind de la câteva zile la câțiva ani.

Polarizarea permanentă a unui dielectric mai poate fi cauzată de alinierea întâmplătoare a unor „vasi-dipoli” - de exemplu, existența într-un cristal a unor sarcini electrice de semn opus sau a unui atom de impuritate și un gol de electroni,

sau prin migrarea sarcinilor spre suprafețele materialului, sau prin injectarea de sarcină electrică în material în timpul polarizării acestuia (aceasta putându-se realiza în mod artificial prin bombardarea dielectricului într-un fascicol de electroni). Polarizarea unui electret scade cu timpul, acest fapt fiind asociat cu procesele de relaxare și cu mișcarea purtătorilor de sarcină din interiorul electretului.

Teoretic, toți dielectricii organici sau anorganici pot fi utilizați ca electreți. Electreții stabili pot fi obținuți din următoarele substanțe: ceruri și rășini, cum sunt ceara carnauba, ceara de albine sau parafina; polimeri ca polimetilmetacrilat, clorură de polivinil, policarbonat, sau etilenă-politetrafluorură; dielectrici anorganici policristalini, cum sunt titații metalelor alcalino-pământene, steatitul, porțelan, ceramici dielectrice altele decât cele din porțelan; dielectrici anorganici monocristalini, cum sunt corindonul sau halogenuri ale metalelor alcaline; sticle și sticle vitrificate.

Un electret stabil poate fi obținut prin una dintre următoarele metode: încălzirea dielectricului până la temperatura de topire sau foarte aproape de această temperatură, urmată de o răcire în câmp electric puternic; iluminarea puternică a dielectricului în prezența unui câmp electric puternic; iradierea radioactivă a dielectricului; plasarea unui dielectric în câmpuri electrice și magnetice puternice; deformarea mecanică a unui polimer; frecarea dielectricului; plasarea dielectricului în zone cu descărcări corona. Electreții obținuți prin iluminare în câmp electric puternic se mai numesc fotoelectreți. Pentru realizarea lor, toți electreții au nevoie de un câmp electric cu valoarea de  $8-10 \text{ C/cm}^2$ .

Electreții sunt utilizați ca surse de câmp electric staționar în dispozitive ca microfoanele cu electret sau căști audio cu electret și generatoare de semnal. De asemenea sunt folosiți la producerea câmpului electric pentru electrometre și pentru voltmetrele electrostatice. Pot fi folosiți ca elemente sensibile în instrumentele de control dozimetric, ca dispozitive de stocare electrostatice colectând energie din fasciculele electromagnetice cu particule încărcate electric; precum și în barometre, higrometre și filtre (senzori) de gaze. Fotoelectreții sunt utilizați în electrofotografiere.

## **5.4. Dependența proprietăților dielectrice ale materialelor electroizolante de diverși factori**

În cursul exploatării, materialele electroizolante suferă modificări structurale care conduc la degradarea numită și îmbătrânirea lor, adică la înrăutățirea proprietăților mecanice, electrice, etc. Timpul după care materialul inițial nedegradat, devine inutilizabil prin pierderea proprietăților necesare în exploatare se numește timpul de viață sau durata de viață a materialului. Se consideră că materialul „și-a pierdut” o anumită proprietate, atunci când mărimea aleasă pentru a defini acea proprietate, atinge o valoare limită. De exemplu, dacă rigiditatea dielectrică scade la jumătate din valoarea sa inițială, se consideră că materialul și-a pierdut calitatea de a nu fi străpuns electric în condițiile utilizării normale.

Principali factori care determină îmbătrânirea izolatoarelor sunt: căldura, câmpul electric, radiațiile ionizante, solicitările mecanice, microorganismele etc. În mod obișnuit în exploatare, acești factori stresanți, solicită materialul simultan câte doi sau mai mulți, ceea ce accentuează procesul de degradare. În cursul exercitării simultane a factorilor de îmbătrânire, este pus în evidență efectul de sinergism care constă în neaditivitatea efectelor factorilor stresanți: astfel, se constată că efectul rezultat al acțiunii simultane este mai intens, deci degradarea este mai rapidă, decât cel obținut prin simpla însumare a efectelor aferente fiecărui factor stresant.

În prezent nu există o teorie suficientă de cuprinzătoare și de bine fundamentată referitoare la îmbătrânirea izolatoarelor. Se prezintă totuși, în continuare, rezultate obținute în încercările efectuate în scopul elaborării unei teorii acceptabile, privitoare la acest proces fizic și chimic important.

În vederea determinării duratei de viață, se efectuează, în laboratoare, încercări de îmbătrânire accelerată a materialelor prin mărirea intensității solicitărilor la care sunt supuse. De exemplu, accelerarea îmbătrânirii termice se realizează prin mărirea temperaturii, a cantității de oxigen absorbit etc. Încercările trebuie conduse astfel încât procesele fizice și chimice care au loc în decursul solicitării accelerate să fie practic aceleași cu cele care se produc pe durata utilizării normale a materialului (temperatura trebuie să se încadreze între anumite limite determinate, în principal, de structura materialului etc.).

Solicitările în laborator pot fi: a) singulare sau simple, când materialul este supus unui singur factor stresant ; b) secvențiale, când materialul este solicitat de mai mulți factori aplicați pe rând, cu sau fără pauze, fiecare factor aplicați pe rând, cu sau fără pauze, fiecare factor acționând singular pe o anumită durată precisă și într-o anumită ordine; c) simultane, când factori stresanți sunt aplicați simultan. Solicitățile secvențiale și cele simultane sunt solicitări combinate; ele prezintă avantajul scurtării experimentelor și sunt, adesea, mai apropiate de tipul solicitărilor din exploatare. Solicitățile simultane prezintă efectul de sinergism.

### 5.4.1. Rezistivitatea

Rezistivitatea materialelor electroizolante este influențată de o serie de factori: structura corpurilor, prezența impurităților, temperatura, umiditatea, câmpul electric aplicat etc.

#### Influența impurităților

După cum s-a văzut anterior, conductivitatea unui izolan are expresia:

$$\sigma_{iz} = \sum_{k=1}^n d_{ij} \cdot e^{-b_k/T} \quad (56)$$

constantele de material  $\sigma_{0k}$  și  $b_k$  caracterizând ponderea diferitelor tipuri de purtători de sarcină (electroni, ioni proprii sau de impurități etc.) asupra conductivității totale a corpului. Astfel, cu creșterea conținutului impurității de specie  $k$ , crește și valoarea lui  $\sigma_{0k}$ , deci și conductivitatea totală  $\sigma_{iz}$ . Mărirea conductivității electrice depinde, de asemenea, de tipul ionilor impurității, mai exact, de dimensiunile și masele lor atomice: ionii cu razele și masele atomice mai mici determinând o creștere mai pronunțată a conductivității. Așa se explică de ce

rezistivitatea sticlei cu  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $2 \cdot 10^6 \Omega\text{m}$ , la  $200^\circ\text{C}$ ) este mai mică decât cea a sticlei cu  $\text{K}_2\text{O}$  ( $8 \cdot 10^9 \Omega\text{m}$ , la  $200^\circ\text{C}$ ) sau cea a sticlei cu  $\text{PbO}$  ( $2 \cdot 10^{10} \Omega\text{m}$ , la  $200^\circ\text{C}$ ).

Introducerea impurităților modifică și modul de variație a rezistivității cu temperatura. Astfel, pentru cuarțul topit  $b \approx 20.000\text{K}$ , deci rezistivitatea acestuia scade mai repede cu temperatura decât cea a sticlelor alcaline pentru care  $b \approx 10.000\text{K}$ .

### Influența structurii corpurilor

În dielectricii cu structură ionică, conducția se realizează îndeosebi prin plasarea ionilor care se separă în rețea datorită agitației termice și este mai intensă în cazul cristalelor cu ioni monovalenți (cristalul de  $\text{NaCl}$  are conductivitatea mai mare decât cristalele de  $\text{MgO}$  sau  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Contribuția la procesul de conducție a unei anumite specii de ioni - caracterizată prin mărimea *indicii de transport*  $i_t$  - depinde de dimensiunile *razelor ionice*  $r_i$  (ionii cu rază mai mică escaladând, în deplasarea lor, bariere de energie potențială mai reduse) precum și de *numărul de coordinație* (numărul atomilor imediat vecini), respectiv de modul de legare a ionilor în rețea (creșterea numărului de coordinație a unui ion determină o creștere a razei ionice și deci o reducere a mobilității acestuia). Așa se poate explica de ce cristalul de  $\text{NaCl}$  (în care  $\text{Na}^+$  are  $i_t = 1$  și  $r_i = 0,98\text{Å}$ , iar  $\text{Cl}^-$  are  $i_t = 0$  și  $r_i = 1,8\text{Å}$ ) prezintă o valoare mai mare a conductivității electrice decât cristalul de  $\text{KCl}$  (unde  $\text{K}^+$  are  $i_t = 0,96$  și  $r_i = 1,33\text{Å}$ ). Rezistivitatea acestor cristale variază mai puțin cu temperatura ( $b \approx 10.000\text{K}$ ), dar poate să difere de la o axă a cristalului la alta și este determinată de compoziția lor chimică, de conținutul de impurități, de gradul de polimerizare (la rășini fenolformaldehide), de gradul de vulcanizare (la cauciucuri etc.)

### Influența temperaturii

Cu creșterea temperaturii se intensifică mișcarea de agitație termică a ionilor din rețeaua cristalină și un număr mai mare dintre ei au o energie suficientă pentru a ieși din groapa de potențial în care se află. În acest mod crește concentrația purtătorilor de sarcină electrică și scade rezistivitatea corpului.

### Influența umidității

Pătrunderea umidității determină apariția unor noi specii de purtători de sarcină: ionii rezultați prin disocierea impurităților conținute în apă sau a impurităților solubile conținute în materiale, ionii de hidrogen și oxigen rezultați din disocierea apei, grupe de molecule de apă încărcate cu sarcină electrică (a căror deplasare sub acțiunea câmpului electric este, în esență, o electroforeză lentă a fazei solide) etc. Creșterea numărului de purtători de sarcină intensifică procesul de conducție electrică, diminuând rezistivitatea de volum a corpurilor (îndeosebi a celor cu structură poroasă), chiar cu câteva ordine de mărime.

Variații mult mai importante cu umiditatea prezintă rezistivitatea de suprafață  $\sigma_s$ , existența conducției superficiale fiind condiționată de prezența umidității. Astfel,  $\sigma_s$  variază foarte puțin în cazul dielectricilor insolubili în apă nepolari (parafină, chihlimbar etc), mai mult în cazul celor polari (policlorură de vinil etc.) și foarte mult în cazul dielectricilor solubili (parțial) în apă (sticlele tehnice) și a celor poroși (celuloză, fenoplaste, stratificate etc.).

### Influența câmpului electric

Modificarea rezistivității sub acțiunea câmpului electric se datorează formării de sarcini spațiale în dielectrici, favorizării proceselor de emisie a electronilor și de pătrunderea a umidității, reducerea barierei de potențial corespunzător contactului metal izolant etc. Aceste fenomene devin foarte importante în cazul câmpurilor electrice intense ( $E > 10^5 \dots 10^6 \text{V/m}$ ) când devine preponderentă conducția electronică.

### 5.4.2. Rigiditatea dielectrică

După cum s-a văzut în anterior, rigiditatea dielectrică reprezintă valoarea maximă a intensității câmpului electric în care se poate afla materialul de încercat, fără ca în el să apară o perforare care să-l facă inapt pentru o folosire ulterioară. Rigiditatea dielectrică determinată experimental depinde de numeroși factori, caracteristici fiecărei experiențe și se numește *rigiditate dielectrică practică*. Din acest motiv ea nu reprezintă o caracteristică fizică a materialului, dar poate da informații (comparative) privind comportarea diferitelor materiale în câmpuri electrice intense. Eliminând complet influența factorilor externi, străpungerea se produce pentru valori mult mai mari ale intensității câmpului electric (Tabelul 5-2), obținându-se astfel o rigiditate dielectrică intrinsecă.

**Tabelul 5-2 Rigiditatea intrinsecă a unor materiale electroizolante solide**

Materialul electroizolant	Rigiditatea dielectrică [MV/m]	
	Intrinsecă	Practică
Poliетенă	600	78
Polistiren	600	25
Polimetacrilat de metil	400	34
Rășini epoxidice	400	18

### Cazul dielectricilor gazoși

Străpungerea gazelor se datorează unor avalanșe de purtători de sarcină (electroni, ioni) care se deplasează de la un electrod spre celălalt. Inițierea avalanșei este determinată de un număr redus de electroni, existenți în gaze sau emiși de catod care, accelerați în câmpul electric  $E$  pe o distanță  $x$  acumulează o energie  $W = qEx$  suficient de mare pentru a ioniza o moleculă a gazului ( $W \geq W_i$ ,  $W_i$  fiind energia de ionizare a gazului) și a genera încă un electron. Cei doi electroni vor putea ioniza alte două molecule numai după ce au acumulat energia  $W_i$ , adică au parcurs distanța  $x$ . Prin urmare, pentru un gaz dat, inițierea avalanșei se va face cu atât mai aproape de catod, iar dezvoltarea ei - până la atingerea unui diametru maxim - se va face pe o distanță cu atât mai mică, cu cât câmpul electric în care se află gazul este mai intens.

### **Influența distanței dintre electrozi**

Dacă distanța dintre electrozi scade, inițierea avalanșei trebuie să se producă mai aproape de catod, iar dezvoltarea ei trebuie să aibă loc pe o distanță mai redusă. În aceste condiții, numărul de ciocniri neionizante ale electronilor trebuie să fie mai redus, adică aceștia trebuie să acumuleze energia  $W_i$  pe o distanță mai mică. Cum aceasta se poate realiza numai dacă intensitatea câmpului electric crește, rezultă că rigiditatea dielectrică a gazelor crește când distanța dintre electrozi scade.

### **Influența presiunii**

Dacă presiunea crește, moleculele gazului se apropie mai mult unele de altele, numărul de ciocniri (pe aceeași distanță) crește și electronii nu reușesc să acumuleze energia  $W_i$  decât pe distanțe mari, ceea ce face imposibilă dezvoltarea avalanșei. Așadar, rigiditatea dielectrică a gazului crește când presiunea depășește valoarea  $p_c$ . Dacă presiunea scade foarte mult, se reduce concentrația de molecule și scade probabilitatea de ciocnire și deci și de ionizare a gazului. În aceste condiții, trebuie ca toate ciocnirile electronilor să fie ionizante, lucru care se poate realiza numai dacă intensitatea câmpului electric crește. De aceea, estimarea corectă a tensiunii de străpungere a aerului  $U_{str}$  se face cu relația  $U_{str}=2,89 \cdot 10^3 \cdot p U_0 / T$ , unde  $p$  și  $T$  reprezintă presiunea ( $N/m^2$ ), respectiv temperatura aerului ( $K$ ) în timpul încercării, iar  $U_0$  tensiunea de străpungere ( $V$ ) determinată în condițiile normale ( $p_0 = 10^5 N/m^2$ ,  $T_0 = 293K$ ). Pe baza acestor fenomene, se construiesc întrerupătoarele da înaltă tensiune cu aer comprimat, respectiv cu vid.

### **Influența temperaturii**

Dacă temperatura crește, se intensifică mișcarea de agitație termică a ionilor gazului și scade probabilitatea de recombinare (se reduce intervalul de timp în care un ion pozitiv se află în vecinătatea unui ion negativ), adică procesul de dezvoltare a avalanșelor este mai puțin perturbat, ele putându-se dezvolta și în cazul unor câmpuri electrice de intensitate mai mică.

### **Influența frecvenței și duratei de aplicare a tensiunii**

Dacă durata de aplicare a tensiunii scade, intensitatea câmpului electric trebuie să crească, pentru ca electronii să poată acumula (într-un timp mai scurt) energia  $W_i$ . Prin urmare, în cazul aplicării unor impulsuri de tensiune, străpungerea se va produce la tensiuni mult mai ridicate decât în cazul aplicării unei tensiuni continue.



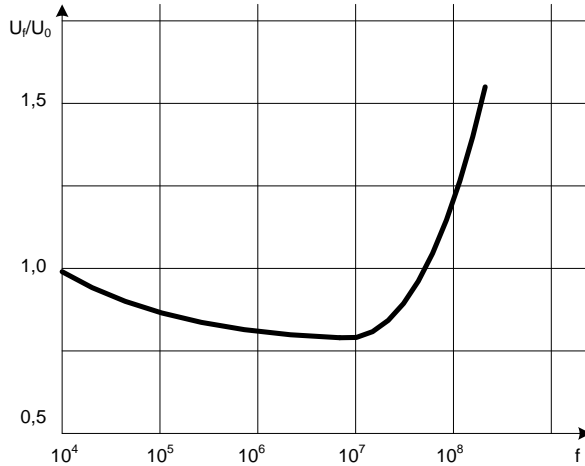


Figura 5-16 Variația raportului dintre tensiunea de străpungere a aerului funcție de frecvență

Variația tensiunii de străpungere  $U_f$  a aerului în câmp omogen, în funcție de frecvența tensiunii aplicate este reprezentată în Figura 5-16. Se observă că, dacă frecvența crește până la  $f_m=5\text{MHz}$ , tensiunea de străpungere  $U_f$  scade. Aceasta se datorează sarcinii electrice spațiale care provoacă o distorsionare a liniilor de câmp electric. Dacă însă frecvența crește peste  $f_m$  valorile semiperioadelor în care electronii sunt accelerați într-o anumită direcție scad și pentru ca ei să acumuleze energia  $W_i$ , trebuie să se afle într-un câmp electric mai intens, adică rigiditatea dielectrică a gazului crește.

### Influența umidității

Rigiditatea dielectrică determinată în câmpuri uniforme sau slab neuniforme nu este, practic, influențată de umiditatea gazului. În schimb, în cazul câmpurilor puternic neuniforme, se constată că tensiunea de străpungere se mărește considerabil când umiditatea relativă a gazului crește. Aceasta se datorează vaporilor de apă care, fiind puternic electronegativi, captează cu ușurință electronii din gaz și formează ioni negativi. Cum ionii astfel formați se deplasează mai greu decât electronii, se reduce și viteza de desfășurare a procesului de străpungere.

Legate de procesul de străpungere a gazelor, îndeosebi în câmpuri neuniforme, se manifestă și fenomenele Corona și de conturare. *Efectul Corona* constă într-o descărcare incompletă, concentrată într-o zonă îngustă din jurul electrozilor (care apar înconjurați de o coroană luminoasă). Fenomenul de *conturare* constă în apariția unor descărcări pe suprafața izolanților solizi supuși încercărilor la tensiune înaltă în aer. Cum în aceste cazuri nu se poate determina rigiditatea dielectrică, pentru eliminarea conturnărilor, izolanții se introduc în medii cu rigiditate dielectrică mai mare decât cea a aerului (uleiuri etc.).

## **Cazul dielectricilor lichizi**

Procesul de străpungere a izolațiilor lichizi fiind mai complex, s-au emis mai multe teorii (teoria ionizării, a străpungerii pur electrice, a străpungerii termice) pe baza cărora se pot explica și influențele unor factori externi asupra rigidității dielectrice.

### **Influența impurităților**

*Impuritățile solubile* (polare sau nepolare) disociază sub acțiunea câmpului electric dând naștere unor noi purtători de sarcină electrică. Se intensifică astfel conducția electrică și scade rigiditatea dielectrică a lichidului. *Impuritățile insolubile* (în general, polare) formează emulsii sau suspensii care se aglomerează în zonele de câmp electric intens. Se formează astfel punți de legătură între electrozi, prin care se pot dezvolta descărcări disruptive și la câmpuri mai puțin intense. Exemplul cel mai elocvent, privind scăderea rigidității dielectrice cu conținutul de apă îl constituie uleiul de transformator. Se observă însă că dacă conținutul de apă depășește o anumită valoare (0,02%)  $E_{str}$  variază foarte puțin, deoarece apa formează picături mari care se depun pe partea inferioară a vaselor. Așadar, lichidele care conțin apă sau impurități cu higroscopicitate mare vor prezenta o rigiditate dielectrică mai redusă decât în stare pură.

### **Influența temperaturii**

În cazul lichidelor pure, rigiditatea dielectrică, se modifică doar pentru acele valori ale temperaturii pentru care lichidul începe să se vaporizeze. Dacă lichidele conțin apă, rigiditatea dielectrică crește cu temperatura, deoarece apa reacționează cu moleculele acestora sau se evaporă. Pentru temperaturi mai mari, lichidele încep să se vaporizeze și rigiditatea lor dielectrică scade.

### **Influența presiunii**

Creșterea presiunii determină o reducere a volumului bulelor de gaz existente în lichid (în care se dezvoltă descărcări electrice parțiale), ceea ce duce la creșterea rigidității dielectrice.

### **Influența naturii electrozilor**

Datorită lucrului mecanic de extracție a electronilor specific fiecărui metal sau aliaj, se obțin valori diferite ale rigidității dielectrice, dacă încercările se fac cu electrozi din metale diferite. Rigiditatea dielectrică este influențată, de asemenea, de starea de prelucrare și puritatea suprafețelor electrozilor. Astfel, pentru ulei de transformator se obține  $E_{str}=24$  MV/m dacă electrozii sunt curățați cu benzină, 33,5 MV/m dacă sunt suflați cu aer cald 1-2 min și 35,5 MV/m dacă sunt curățați cu benzen și uscați la cuptor 1/2 oră la 110°C.

### **Influența distanței dintre electrozi**

Rigiditatea dielectrică a lichidelor pure scade când distanța dintre electrozi crește, fenomen ce admite aceeași explicație ca și în cazul gazelor. Astfel, în cazul uleiului de transformator  $E_{str}$  scade de la 27 la 22 MV/m, dacă distanța dintre electrozi crește de la 1 la 1,4 mm.

### **Influența frecvenței**

Tensiunea de străpungere crește cu frecvența și prezintă un maxim pentru o valoare a acesteia de cea 200 Hz. Pentru valori mai mari ale frecvenței, pierderile de energie în lichid devin importante, se produc străpungeri termice și tensiunea de străpungere scade. Tensiunea de străpungere este cu atât mai ridicată cu cât forma curbei de tensiune este mai ascuțită. Astfel, tensiunea de străpungere a uleiului de transformator este de două ori mai mică dacă încercarea se face cu tensiune sinusoidală, decât în cazul unei curbe ascuțite a tensiunii.

### **Cazul dielectricilor solizi**

Pentru dielectricii solizi se definește o *rigiditate dielectrică longitudinală* (între doi electrozi situați pe aceeași suprafață a probei) care caracterizează mai ales suprafața materialului și depinde de caracteristicile mediului ambiant și o *rigiditate dielectrică transversală* (liniile câmpului electric sunt perpendiculare pe suprafața principală a probei de încercat) numită, în cele ce urmează, rigiditate dielectrică.

### **Influența structurii fizice și compoziției chimice**

Valorile diferite ale rigidității dielectrice sunt influențate mai puțin de compoziția chimică, a izolanților și se datorează, îndeosebi, structurilor fizice diferite ale acestora. Astfel, corpurile cu structura compactă (mică, sticlă) au rigiditatea dielectrică mult mai mare decât cele cu structură poroasă (hârtie, azbest) unde procesul de străpungere se dezvoltă atât în materialul propriu-zis cât și în aerul conținut în porii materialului și a cărui rigiditate dielectrică este mult mai redusă (3,2 MV/m).

### **Influența geometriei și naturii electrozilor**

Dacă electrozii prezintă muchii ascuțite, în aceste zone, câmpul electric este foarte intens și favorizează apariția și dezvoltarea procesului de străpungere la o valoare mai mică a tensiunii aplicate. Se obține astfel o rigiditate dielectrică mai mică decât în cazul unor electrozi cu muchiile rotunjite. Din acest motiv, electrozii utilizați în încercările industriale sunt sferici sau cilindrici, cu muchia de la bază rotunjită și cu razele de curbura cunoscute.

Mărirea ariei suprafeței epruvetelor de încercat și deci a electrozilor determină de asemenea, o reducere a rigidității dielectrice, întrucât crește numărul de defecte din materialul de încercat și deci probabilitatea de inițiere a unui proces de străpungere a materialului.

Rigiditatea dielectrică depinde și de natura electrozilor, deoarece valorile lucrului mecanic de extracție a electronilor diferă de la un metal la altul.

### **Influența geometriei epruvetelor**

Tensiunea de străpungere este legată de grosimea materialului încercat prin relația  $U_{str} = k \cdot d \cdot \exp(n)$ , în care  $k$  depinde de natura și structura materialului, iar  $n$  de natura mediului ambiant, de caracteristicile unde de tensiune și de durata încercării (în general,  $n=0,7$ ). Această relație este adevărată, îndeosebi în cazul mostrelor de grosimi mari (peste 1mm), când are loc o străpungere de natură termică. Suprafața epruvetei care vine în contact cu electrodul nu constituie un parametru propriu-zis, dar ea trebuie să aibă valori suficient de mari pentru a nu se produce conturnări.

### **Influența mediului ambiant**

Mediile lichide sau gazoase, în care se efectuează încercările de străpungere a materialelor au o influență destul de mare asupra valorilor rigidității dielectrice. Astfel, aceasta prezintă valori mai înalte în cazul utilizării unor medii de rezistivitate electrică mai scăzută (ulei impur) sau în care se dezvoltă cu mai multă ușurință descărcările parțiale (aerul). Din acest motiv, se recomandă ca încercările pentru determinarea rigidității dielectrice să se efectueze în medii identice cu cele în care va funcționa materialul de încercat.

### **Influența temperaturii**

Pentru valori ale temperaturii inferioare temperaturii critice  $T_c$ , rigiditatea dielectrică rămâne constantă în cazul dielectricilor nepolari și prezintă variații sensibile în cazul dielectricilor polari. Pentru  $T > T_c$  se produc străpungeri termice ale dielectricilor și rigiditatea dielectrică scade când temperatura crește.

### **Influența formei și duratei de aplicare a tensiunii**

Tensiunea de străpungere crește o dată cu trecerea de la tensiunea sinusoidală de frecvență industrială (50 Hz) la tensiunea continuă și apoi la unda de șoc. De asemenea, tensiunea de străpungere scade când durata încercărilor crește. Aceasta se explică prin efectul energetic cumulativ al histerezisului dielectric, descărcărilor electrice și curentului electric de conducție care conduc la mărirea temperaturii, îndeosebi în cazul epruvetelor pasibile de străpungeri termice.

### **Influența frecvenței**

Creșterea frecvenței tensiunii aplicate determină o mărire a pierderilor în dielectrici ( $P = wCU^2tg \delta$ ) și deci, a temperaturii corpurilor, ceea ce conduce la valori mai reduse ale rigidității dielectrice.

### **Influența altor factori**

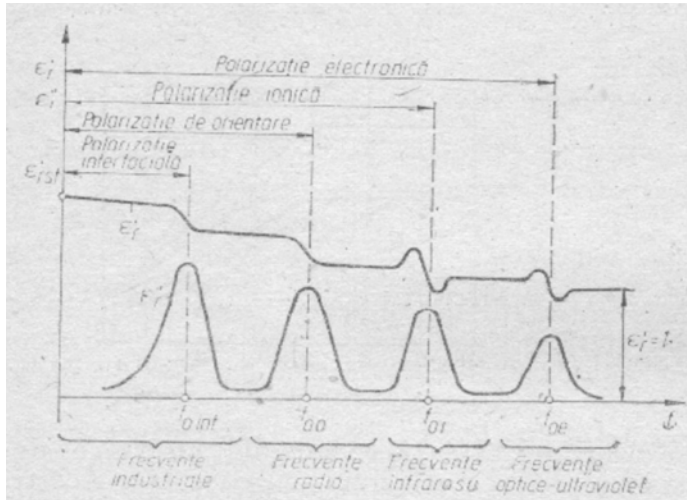
Pe lângă factorii amintiți anterior, rigiditatea dielectrică depinde și de gradul de umezire a epruvetelor (îndeosebi în cazul dielectricilor cu porozitate ridicată), de solicitările mecanice, de conținutul de impurități conductoare și incluziuni gazoase etc. Acești factori determină fie o intensificare a procesului de conducție, fie o mărire locală a intensității câmpului electric, fie o modificare a structurii fizico-chimice a izolanților, fenomene care provoacă o reducere a rigidității dielectrice.

## **5.4.3. Permitivitatea electrică**

Permitivitatea electrică caracterizează intensitatea fenomenelor de polarizare electrică și depinde de parametrii tensiunii aplicate, de temperatură, de solicitările mecanice ale corpului, de starea de umiditate etc.

### **Influența intensității și frecvenței câmpului electric**

Mărind intensitatea câmpului electric se obțin valori mai mari ale polarizațiilor (electronică, ionică, de orientare) și deci și ale componentelor permitivității.



**Figura 5-17** Variația componentelor permitivității relative complexe cu frecvența câmpului electric

Variații mai importante ale permitivității au loc pentru materiale feroelectrice sau neomogene unde, cu creșterea tensiunii electrice, se produc fenomene noi, care modifică structura fizico-chimică a corpului.

Pentru un material care ar prezenta toate cele patru mecanisme de polarizare (electronică, ionică, de orientare și de neomogenitate) dependența permitivității relative de frecvența câmpului electric este prezentată în Figura 5-17. De aici reiese că, în cazul frecvențelor uzuale ( $0 \dots 10^{10}$  Hz), materialele nepolare nu prezintă variații semnificative ale permitivității electrice, spre deosebire de materialele polare la care, pentru frecvențe apropiate de  $f_{00}$  ( $10^4 \dots 10^6$  Hz),  $\epsilon_r$  prezintă variații importante.

### Influența temperaturii

Polarizația electronică este puțin influențată de temperatură (prin modificarea concentrației particulelor), variații mai importante ale permitivității obținându-se doar când corpurile își schimbă stările de agregare, respectiv pentru  $T_t$  și  $T_p$ . În cazul corpurilor care prezintă doar polarizație ionică permitivitatea crește cu temperatura deoarece, prin intensificarea agitației termice, sunt favorizate deplasările ionilor în câmpul electric. Materialele polare prezintă mai întâi o creștere a permitivității (datorită „dezghețării” moleculelor), urmată de o scădere relativ importantă, ca urmare a intensificării mișcării de agitație termică a dipolilor moleculari (care nu mai pot fi orientați în direcția câmpului electric).

### Influența presiunii

În cazul gazelor, permitivitatea este puternic influențată de presiune:  $\epsilon_r = 1 + kp$ , unde  $k$  este o constantă de material cu valori dependente de temperatură. O relație similară se poate stabili și în cazul lichidelor, dar numai pentru anumite valori ale temperaturii. În cazul solidelor, presiunea prezintă interes doar pentru acele materiale care, în decursul proceselor tehnologice, la variații ale presiunii, apar modificări ale structurii și, deci, a densității lor. Astfel, permitivitatea

relativă a polietilenei, la 300 K este  $\varepsilon_r = 2,276 + 2,01(d - 0,920)$ ,  $d$  reprezentând densitatea corpului măsurată în  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

### Influența umidității

Materialele izolante sunt caracterizate prin valori ale permitivității electrice, inferioare relei a apei ( $\varepsilon_r = 81$ ). Prin urmare, umezirea materialelor - îndeosebi a celor poroase - determină întotdeauna o creștere a permitivității electrice. Cum însă variația lui  $\varepsilon_r$  atinge o variație similară a capacității condensatorului din care face parte, hârtia de condensator se impregnează (cu parafină), iar condensatoarele cu aer nu se utilizează în atmosfere umede.

### 5.4.4. Factorul de pierderi

Pierderile de energie dintr-un dielectric sunt proporționale cu factorul de pierderi  $\text{tg } \delta$  ( $P = \omega C U^2 \text{tg } \delta$ ), orice variație a acestuia atrăgând și o variație, în același sens, a energiei disipate în materialul respectiv.

### Influența câmpului electric

Variația factorului de pierderi cu intensitatea câmpului electric (sau cu tensiunea aplicată  $U$ ) reprezintă, în cazul sistemelor de izolație ale instalațiilor de înaltă tensiune, un criteriu de bază în aprecierea calității izolanților. Aceste variații sunt foarte semnificative în cazul dielectricilor poroși la care curbele  $\text{tg } \delta = f(U)$ , numite *curbe de ionizare*, au o alură de tipul celei din Figura 5-18.

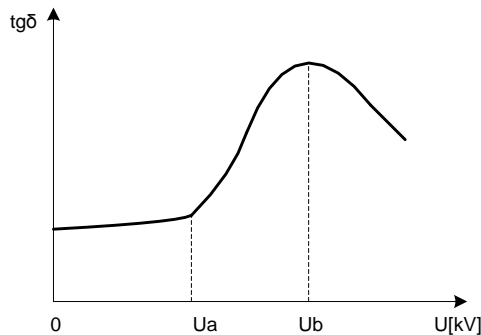


Figura 5-18 Curba de ionizare tipică pentru materiale poroase

Pentru valori ale tensiunii  $U < U_a$ , pierderile dielectrice cresc destul de puțin datorită mării ariei ciclului de histererezis (în cazul materialelor neliniare) și a curentului de conducție. Dacă tensiunea depășește valoarea  $U_a$  (la care se produce ionizarea gazului din vacuolele dielectricului), se produc descărcări electrice parțiale care determină o creștere rapidă a factorului de pierderi. Pentru  $U > U_s$  (când întreaga cantitate de gaz este ionizată) nivelul descărcărilor parțiale scade (ca urmare a creșterii presiunii gazului din cavitați), ceea ce conduce la o micșorare a factorului de pierderi.

Curbele  $tg \delta = f(U)$  obținute experimental pentru diferite sisteme de izolație, sau chiar pentru materiale poroase, nu prezintă întotdeauna și porțiuni descrescătoare. Aceasta se datorează fie porozității mai reduse a materialului, fie valorilor mici ale tensiunii la care s-au efectuat încercările și care - pentru securitatea izolațiilor - nu au depășit valoarea  $U_s$ .

### Influența frecvenței

Forma curbelor de variație a factorului de pierderi cu frecvența diferă de cea teoretică, ea depinzând de natura și, mai ales, de structura corpurilor. Indiferent însă de tipul dielectricului, pentru valori ale frecvenței care depășește  $10^{10}$  Hz,  $tg \delta$  ia valori foarte mici - dipolii electrici nemaiputând urmări variațiile rapide ale câmpului electric.

### Influența temperaturii

După cum s-a văzut înainte, pentru anumite valori ale temperaturii, numite temperaturi critice, pierderile prin histerezis dielectric prezintă maxime - în funcție de structura fizico-chimică a materialelor -, pierderile prin conducție fiind încă reduse. Dacă temperatura depășește valoarea  $T_\sigma$  (după care conductivitatea  $\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-A/T)$  ia valori foarte mari), pierderile prin conducție cresc foarte mult, iar factorul de pierderi  $tg \delta$  depășește valorile corespunzătoare temperaturilor critice. Trebuie remarcat că, dacă frecvența crește, valorile maxime ale factorului de pierderi se obțin pentru temperaturi mai înalte, iar în cazul materialelor neomogene se obțin mai multe maxime.

### Influența umidității

Apa din izolații intensifică procesul de conducție electrică, producând astfel o creștere a pierderilor prin conducție electrică. Rotirea moleculelor polare de apă sub acțiunea câmpului electric necesită, de asemenea, un consum de energie. Așadar, creșterea umidității dielectricilor determină o creștere accentuată a factorului de pierderi.

## 5.4.5. Pierderi în materiale dielectrice

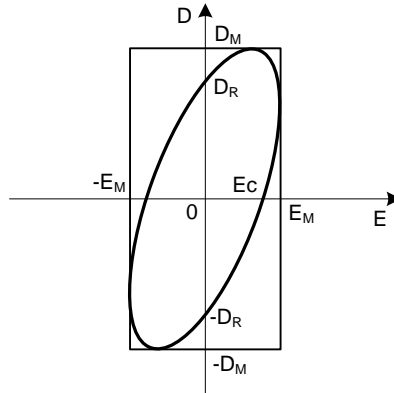
Dacă în interiorul unui dielectric se stabilește un câmp electric staționar sau variabil, se produc dezvoltări de căldură - deci pierderi - prin efect Joule-Lenz, deoarece conductivitatea materialului este nenulă. În câmpurile electrice variabile, se mai produc pierderi și datorită faptului că polarizația electrică nu variază în fază cu intensitatea câmpului electric, așa cum s-a arătat - numite *pierderi prin histerezis dielectric* sau *prin polarizație electrică*. Aceste pierderi, datorite deci post-efectului electric, au loc și în dielectricii liniari; în dielectricii neliniari cum sunt materialele feroelectrice - care prezintă un histerezis dielectric propriu-zis - pierderile corespund ariei ciclului lor de histerezis (ca la materialele feromagnetice).

### Pierderile prin histerezis dielectric

Pierderile pot fi studiate în cazul unui dielectric liniar situat în câmp electric armonic de forma  $E(t) = E_M \sin \omega t$ . Datorită post-efectului electric, polarizația, deci

și inducția electrică, este defazată în urmă cu un unghi  $\delta_h$ , numit *unghi de pierderi prin histerezis*, adică  $D(t) = D_M \sin(\omega t - \delta_h)$ .

Expresiile  $E(t)$  și  $D(t)$  de mai sus reprezintă ecuațiile parametriche ale elipsei reprezentate în Figura 5-19, aria ei  $A_h$  fiind proporțională cu pierderile prin histerezis.



**Figura 5-19 Referitoare la pierderile prin histerezis**

Reprezentând pe  $E(t)$  și  $D(t)$  în complex,

$$\underline{E} = \frac{E_M}{\sqrt{2}} = E_{ef}, \underline{D} = \left( \frac{D_M}{\sqrt{2}} \right) e^{-j\delta_h} = D_{ef} \cdot e^{-j\delta_h}$$

se poate defini permitivitatea relativă complexă:

$$\underline{\varepsilon}_r = \frac{\underline{D}}{\varepsilon_0 \underline{E}} = \left( \frac{D_M}{\varepsilon_0 E_M} \right) e^{-j\delta_h} = (1/\varepsilon_0) \varepsilon_{(M)} (\cos \delta_h - j \sin \delta_h)$$

unde  $\varepsilon_{(M)} = D_M / E_M$

Rezultă:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_r &= (1/\varepsilon_0) \varepsilon_{(M)} \cos \delta_h \\ \varepsilon''_r &= (1/\varepsilon_0) \varepsilon_{(M)} \sin \delta_h \\ \operatorname{tg} \delta_h &= \varepsilon''_r / \varepsilon'_r \end{aligned}$$

La variație infinitesimală a câmpului electric, energia electrică din unitatea de volum variază cu  $d\omega_e = E \cdot dD$ , viteza de variație în unitatea de timp fiind  $p(t) = \frac{d\omega_e}{dt} = E \cdot \frac{dD}{dt} = E \cdot J_D$ , în care  $J_D = \frac{dD}{dt}$  este densitatea curentului de deplasare. În complex, se definește puterea aparentă, pentru unitatea de volum,  $\underline{s}_h = E \cdot \underline{J}_D^* = p_h + jq_h$ , în care  $p_h$  reprezintă pierderile din unitatea de timp și volum (dezvoltare de căldură), iar  $q_h$  este viteza maximă de variație a energiei câmpului electric din unitatea de volum al dielectricului. Se obține deci, cu  $J_D = j\omega D$ ,



$\underline{s}_h = \underline{E}(j\omega D)^* = \underline{E}[j\omega\varepsilon_0(\varepsilon'_r - \varepsilon''_r)E]^*$ , de unde rezultă:

$$p_h = \omega\varepsilon_0\varepsilon''_r E_{ef}^2$$

$$q_h = -\omega\varepsilon_0\varepsilon'_r E_{ef}^2$$

Din expresia mărimii  $p_h$  rezultă că  $\varepsilon''_r$  este, așa cum s-a menționat mai sus, un coeficient de pierderi.

### Pierderile prin conducție electrică

Pierderile prin conducție electrică din unitatea de volum și de timp rezultă din legea transformării energiei și din legea conducției electrice (pentru medii fără câmpuri electrice imprimare) care, în complex, conduc la relațiile  $\underline{s}_c = p_c + jq_c$ , în care  $p_c$  reprezintă pierderile în dielectric în unitatea de volum și timp, iar  $q_c$  este analogă mărimii  $q_h$  aferentă însă conducției electrice - rezultă  $p_c = \sigma E_{ef}^2$ ,  $q_c = 0$ . Conducției electrice îi corespund, așa cum era de așteptat, numai dezvoltări de căldură (prin efect Joule) în dielectric:

$$p_c = \sigma E_{ef}^2$$

### Pierderile totale

Acestea se obțin însumând relațiile de dinainte, obținându-se:

$$p = (\omega\varepsilon_0\varepsilon''_r + \sigma)E_{ef}^2$$

$$q = -\omega\varepsilon_0\varepsilon'_r E_{ef}^2$$

$$p = \omega\varepsilon_0\varepsilon'_r E_{ef}^2 \operatorname{tg} \delta$$

Considerând dielectricul unui condensator plan, cu aria armăturilor  $A$ , cu grosimea dielectricului  $g$ , conectat sub tensiunea sinusoidală de valoare efectivă  $U = E_{ef} g$  se obțin pentru puterile activă  $P$  și reactivă  $Q$ , absorbite de condensator, expresiile:

$$P = pAg = \omega(\varepsilon_0\varepsilon'_r A/g)U^2 \operatorname{tg} \delta \text{ și } Q = -\omega(\varepsilon_0\varepsilon'_r A/g)U^2$$

Dacă se compară ultima egalitate cu expresia cunoscută  $Q = -\omega CU^2$ , în care  $C$  este capacitatea condensatorului, se obține identitatea  $C = \varepsilon_0\varepsilon'_r A/g$  care conduce la rezultatul că  $\varepsilon_r$  este permitivitatea relativă (scalară) a dielectricului.

Pentru condensatorul considerat se obțin:

$$P = \omega CU^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$Q = -\omega CU^2$$

$$\operatorname{tg} \delta = 1/\operatorname{tg} \varphi$$

$\varphi$  fiind defazajul dintre tensiunea și curentul condensatorului, unghiurile  $\delta$  și  $\varphi$  sunt complementare.

Pentru materialele polare (cu polarizație de orientare) și neomogene (cu polarizație de neomogenitate) se aplică expresia:

$$p = \left[ \frac{\omega^3 \varepsilon_0 (\varepsilon_{rst} - 1)}{(1 + \omega^2 \tau^2)} + \sigma_p \right] E_{ef}^2 = \left[ \frac{\omega^2 \varepsilon_0 (\varepsilon_{rst} - 1)}{(1 + \omega^2 / \omega_0^2)} + \sigma_p \right] E_{ef}^2$$

În materialele polare și în cele neomogene, pierderile pot avea valori importante la frecvențe industriale și, mai ales, radio. Folosirea lor la frecvențe radio este, din această cauză, evitată.

## 5.5. Clasificarea materialelor electroizolante

Ținând seama de numărul foarte mare, precum și de dezvoltarea rapidă a producției de materiale electroizolante, cu proprietăți și utilizări tot mai diverse, realizarea unei clasificări complete care să cuprindă toate elementele caracteristice comportării acestora în exploatare este extrem de dificilă. Din acest motiv au apărut mai multe tipuri de clasificări, fiecare prezentând avantaje și dezavantaje.

### 5.5.1. Clasificarea după stabilitatea termică

În funcție de stabilitatea termică, materialele electroizolante se clasifică în șapte clase de izolație (prezentate în Tabelul 5-3), începând cu cauciucurile și produsele pe bază de celuloză și încheind cu materialele anorganice. Această clasificare, care ține seama doar de comportarea materialelor la acțiunea temperaturii, prezintă serioase rezerve, deoarece materialele electroizolante nu se utilizează numai ca izolanți termici. Ele fac parte din sistemele de izolație ale mașinilor, transformatoarelor, cablurilor etc., unde contribuția solicitărilor electrice, mecanice, ale mediului ambiant etc. asupra îmbătrânirii acestora poate fi, de foarte multe ori, mult mai importantă decât cea a temperaturii. De aceea, se propune ca materialele propriu-zise să fie caracterizate prin indici de performanță legați de comportarea lor la acțiunea temperaturii, câmpului electric, radiațiilor, solicitărilor mecanice, de starea lor finală etc., obținându-se astfel o cantitate mai mare de informație pentru utilizarea lor finală.

**Tabelul 5-3 Clasificarea materialelor electroizolante după stabilitatea termică**

Clasa de izolație	Materiale electroizolante	Lianți, materiale de impregnare și de acoperire utilizate
Y 90°C	Materiale textile (din bumbac, mătase naturală, fibre de celuloză regenerată, de acetat de celuloză și poliamidice), hârtii și cartoane electroizolante, fibra Vulcan, lemn etc. Polietilenă, polistiren, poliacrilați, policlorură de vinil, cauciuc natural vulcanizat etc.	Nu se utilizează.
A 105°C	Materiale plastice de formare cu umplutură organică Materiale textile, țesături și tuburi (din bumbac, mătase naturală, celuloză, poliamide), lemn hârtii și cartoane, fibra Vulcan etc. Película izolantă a conductoarelor izolate cu emailuri poliamidice, rășini poliamidice. Folii de triacetat de celuloză, poliamidice și materiale combinate de tipul carton-folie. Cauciucurile butadien-acrilonitrilic	Rășini anilino- și ureo-formaldehidice Lacuri uleioase, rășinoase, oleo-rășinoase și oleo-bituminoase, lichide electroizolante, rășini fenolformaldehidice

E 120°C	Azbciment impregnat cu substanțe organice Pelicula izolantă a conductoarelor izolate cu lacuri polivinil acetice, polinretanice sau epoxidice. Rășini epoxidice, poliesterice și poluretanic. Folii și fire de polietilentereftalat. Compounduri termorigide pe bază de esteri acrilici cu umplutură anorganică	Bitum, asfalt
	Țesături din polietilentereftalat Materiale pe bază de mică li hârtie de mică fără suport sau cu suport din hârtie sau țesături organice	Lacuri pe bază de rășini alchidice și ulei Rășini naturale, sintetice modificate, poliesterice, epoxidice, alchidice, lacuri pe bază de uleiuri sicative
B 130°C	Materiale pe bază de fire și țesături de sticlă și azbest impregnate. Mase plastice de formare cu umplutură anorganică și materiale stratificate pe bază de sticlă și azbest Pelicula izolantă a conductoarelor emailate cu lacuri polietilentereftalice. Compounduri pe bază de rășini sintetice termoreactive	Lacuri oleo-bituminoase, epoxidice, poliuretanic, pe bază de rășini alchidice modificate cu ulei Rășini fenol- și melamino-formaldehidice, epoxidice, poliesterice, fenolfurfurolice
	Materiale pe bază de mică sau hârtie de mică, stratificate fără suport sau cu suport anorganic. Izolații din fibre de sticlă sau azbest, țesături și tuburi flexibile din sticlă impregnată, stratificate pe bază de fibre de sticlă și azbest	Rășini alchidice, epoxidice, poliesterice, având o stabilitate termică necesară clasei de izolație. Rășini siliconice modificate
H 180°C	Materiale pe bază de mică fără suport sau cu suport anorganic. Fire și țesături de azbest și sticlă impregnate. Mase plastice de formare cu umplutură anorganică. Elastomeri siliconici fără suport sau cu suport anorganic	Rășini și lacuri siliconice
C >180°C	Materiale anorganice: mică, sticlă și produse din fibră de sticlă, ceramici, cuarț, ardezie, micalex Materiale pe bază de mică, fără suport sau cu suport din fibră de sticlă. Politetrafluoretilenă	Compuși anorganici și rășini siliconice cu stabilitate termică peste 225

### Clasificarea după compoziția chimică

După compoziția chimică se adoptă o clasificare a materialelor electroizolante în materiale **organice**, **de trecere** (cu proprietăți situate între cele ale materialelor organice și cele anorganice) și **anorganice**. Această clasificare are

mai mult un caracter didactic (rareori izolațiile utilizate au un singur component) și se va utiliza în continuare pentru a scoate în evidență - îndeosebi în cadrul materialelor solide - anumite proprietăți specifice unor grupe de materiale.

### Alte clasificări

Pe lângă cele amintite anterior, se mai fac clasificări în funcție de componenta principală a materialului finit (mica, rășina sintetică, lacul etc.), de domeniul de utilizare (izolație de creștătură, între straturi, materiale de impregnare, de acoperire etc.), după anumite considerente practice - definită prin „Enciclopedia materialelor electroizolante” după comportarea la solicitări termice (în termoplastice și termorigide) etc.

## 5.6. Materiale electroizolante gazoase

În funcție de natura și caracteristicile lor (unele prezentate în Tabelul 5-4), gazele se utilizează ca izolanți electrici, ca medii de răcire, ca medii de protecție împotriva coroziunii etc.

**Tabelul 5-4 Caracteristicile generale ale gazelor**

Gazul	Raza moleculei $R \cdot 10^{10} [m]$	Indicele de refracție $n_p$	Permitivitatea relativă $\epsilon_r$ , la 293 K și 1 atm
Heliu	1,12	1,000035	1,000072
Hidrogen	1,35	1,00014	1,00027
Oxigen	1,82	1,00027	1,00055
Argon	1,83	1,000275	1,00056
Azot	1,91	1,00030	1,00060
Bioxid de carbon	2,30	1,00050	1,00098
Etilenă	2,78	1,00065	1,00138

### 5.6.1. Aerul

Ca izolant sau impuritate, aerul se află în toate schemele de izolație ale instalațiilor electrice. Proprietățile sale dielectrice sunt satisfăcătoare pentru câmpuri electrice mai puțin intense (Tabelul 5-5). Rigiditatea dielectrică a aerului depinde de umiditatea, temperatura și presiunea la care se află și ia valori foarte mari în cazul presiunilor înalte sau foarte reduse. Această caracteristică determină utilizarea aerului în construcția condensatoarelor, a întrerupătoarelor (cu vid sau cu aer comprimat) etc.

Tabelul 5-5 Caracteristicile principale ale aerului

Caracteristica	Unitatea de măsură	Valoarea
Densitatea, la 20°C și 1 atm	kg/m <sup>3</sup>	1
Densitatea, la presiunea $p$ (Pa) și temperatura $T$ (K)	kg/m <sup>3</sup>	$2,89 \cdot 10^{-3} p/T$
Permitivitatea relativă, la 20°C și 1 atm		1,000594
Rezistivitatea, la 20°C	$\Omega\text{m}$	$5 \cdot 10^{-13}$
Rigiditatea dielectrică, la 20°C și 1 atm	MV/m	3,2
Căldura specifică la presiune constantă și 0°C		1009
100°C	J/kg·K	1011
200°C		1030
Conductivitatea termică la 0°C		0,024
100°C	W/m·K	0,031
200°C		0,037

### 5.6.2. Hidrogenul

Datorită valorilor mari ale conductivității termice, căldurii specifice și coeficientului de transmisie a căldurii, precum și densității sale reduse, hidrogenul este utilizat îndeosebi ca mediu de răcire în construcția mașinilor electrice de puteri mari. Deoarece, în contact cu aerul, prezintă pericol de explozie, se iau măsuri speciale pentru ca aerul să nu pătrundă în interiorul mașinii (prin mărirea presiunii hidrogenului față de presiunea mediului ambiant etc.). Faptul că oxigenul nu pătrunde în interiorul mașinii electrice determină și o mărire a duratei de viață a sistemului de izolație.

### 5.6.3. Gaze electronegative

Combi-nații clorurate și fluorurate, organice sau anorganice, gazele, electronegative prezintă o mare afinitate pentru electroni și rigiditate dielectrică superioară celei a aerului. Cum reacționează foarte ușor cu electronii liberi - dând naștere unor ioni negativi cu masă mare și deci, cu factor de recombinare redus - gazele electronegative se utilizează mai ales în construcția întreruptoarelor ca mediu de stingere a arcului electric.

#### Hexafluorura de sulf (SF<sub>6</sub>)

Este un gaz inert, neinflamabil și stabil chimic până la 100°C. Este de cinci ori mai greu decât aerul, are conductivitate termică mai mare, vâscozitate mai redusă și căldură specifică apropiată de cea a aerului. Datorită sulfului pe care-l conține, SF<sub>6</sub> atacă materialele active din instalațiile electrice (Cu, Al, Fe).

Rigiditatea dielectrică a SF<sub>6</sub> este cuprinsă între 6,2 și 7,04 MV/m și variază mai puțin cu distanța dintre electrozi  $d$  decât în cazul aerului. Pentru valori ale lui  $d$  mai mari de 25 mm tensiunea de străpungere  $U_{str}$  este mai mare în curent continuu decât la frecvență industrială; în câmp uniform este proporțională cu

presiunea, iar în câmp neuniform scade dacă presiunea depășește 1 atm. Tensiunea de apariție a efectului Corona este mai mare decât în cazul aerului. Aceasta prezintă o mare importanță, întrucât sub acțiunea descărcărilor Corona - ca, de altfel și sub acțiunea arcului electric - SF<sub>6</sub> se descompune parțial, apărând produse toxice și corosive. Se utilizează ca izolanț și ca mediu de stingere a arcului electric în întreruptoare de înaltă tensiune, ca izolanț și mediu de răcire în transformatoare, în construcția unor instalații speciale (condensatoare și transformatoare speciale, acceleratoare de particule, microscopie electronice etc.).

### **Perfluorcarbonii**

Sunt compuși fluorurați ai metanului, etanului și propanului de tipul perfluorpropan (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>), perfluorbutan (C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>) sau octafluorciclobutan (c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>). Au stabilitatea termică mai mare decât SF<sub>6</sub> (200...250°C) și nu atacă materialele active (Cu, Al, Fe). Se utilizează, în aparatele de înaltă tensiune care funcționează la temperaturi ridicate.

### **Diclordifluormetanul (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)**

Este neinflamabil, netoxic și cu rigiditate dielectrică apropiată de cea a hexafluorurii de sulf. Atacă cauciucul și unele mase plastice. Are temperatura de fierbere scăzută (-28°C), motiv pentru care nu se folosește în instalațiile exterioare. Se utilizează în construcția frigiderelor cu compresie.

## **5.6.4. Alte gaze**

### **Azotul**

Se utilizează în condensatoare și transformatoare cu ulei (pentru evitarea oxidării și pătrunderii umidității în izolații), în cablurile cu izolații din hârtie impregnată cu ulei (la presiunile înalte de utilizare - 17 atm - având rigiditatea dielectrică de 50...60 MV/m, iar căldura specifică și conductivitatea termică apropiate de cele ale uleiului), la fabricarea lămpilor cu incandescență (în amestec cu argonul) etc.

### **Bioxidul de carbon**

Are solubilitate foarte mare în ulei mineral (de 10 ori mai mare decât cea a aerului). Se utilizează ca preimpregnant pentru transformatoare și cabluri cu ulei sub presiune, pentru umplerea cuvelor transformatoarelor în vederea transportării acestora etc.

În afara gazelor amintite mai sus, se mai utilizează amoniacul și clorura de metil - pentru frigiderice cu absorbție -, argonul, neonul, heliul - pentru lămpi cu incandescență sau cu descărcări în gaze - etc.

## 5.7. Materiale electroizolante lichide

Din această grupă fac parte uleiurile electroizolante naturale (uleiul mineral, de ricin) și sintetice (clorurate, fluorurate, siliconice), precum și diferite hidrocarburi utilizate ca solvenți pentru lacurile electroizolante.

### 5.7.1. Uleiul mineral

Uleiurile minerale se obțin prin distilarea țițeiului (după separarea produselor ușoare: benzen, white-spirit, petrol etc.), urmată de o rafinare prin tratare cu acid sulfuric. Din punct de vedere chimic, uleiul mineral este un amestec de hidrocarburi naftenice (>60%, acestea fiind foarte stabile și cu punct de congelare scăzut), aromatice (<30%, deoarece conțin un număr mare de atomi de carbon care se eliberează sub acțiunea arcului electric, reducând proprietățile uleiului) și parafinice (<30%, deoarece au punct de congelare ridicat și determină o creștere a viscozității uleiului), proprietățile sale depinzând atât de compoziția chimică, cât și de condițiile de exploatare.

#### Uleiul de transformator.

Se utilizează în transformatoare - ca electroizolant și mediu de răcire - și în întreruptoare de înaltă tensiune - ca electroizolant și mediu de stingere a arcului electric. Fiind nepolar, are permitivitatea relativă redusă (2,2.. 2,4) și puțin variabilă cu temperatura și frecvența. În schimb, factorul de pierderi crește sensibil cu temperatura datorită creșterii conductivității electrice. Creșterea temperaturii determină, de asemenea (prin mărirea vitezei de oxidare și a vitezei de solubilitate și emulsionare a apei) și o variație a rigidității dielectrice. La temperaturi ridicate, fierul și plumbul, reacționează chimic cu uleiul, iar cuprul și cadmiul constituie catalizatori ai descompunerii sale.

#### Uleiul de cablu și de condensator

O caracteristică fundamentală a uleiului de cablu o constituie vâscozitatea. Astfel, vâscozitatea sa cinematică este apropiată de cea a uleiului de transformator în cazul cablurilor cu ulei sub presiune și mult mai mare în cazul cablurilor cu gaz sau presiune sau a celor izolate cu hârtie impregnată. Uleiul utilizat pentru impregnarea hârtiei trebuie să fie foarte fluid la temperatura de impregnare (130°C) și să aibă o vâscozitate mare la temperatura de exploatare (40..50°C). Din acest motiv el se amestecă cu colofoniu (10%) - în cazul impregnării hârtiei - sau cu poliizobutilenă - în cazul cablurilor cu gaz sub presiune.

Uleiul de condensator are un grad înalt de rafinare, pierderi dielectrice reduse ( $tg \delta - 10^{-4} \dots 10^{-3}$ ), rezistivitate ridicată ( $\sigma_v > 10^{11} \Omega m$ ) și se utilizează în construcția condensatoarelor de capacități mari.

#### Îmbătrânirea uleiului mineral

Dintre factorii care favorizează îmbătrânirea uleiului mineral se remarcă în mod deosebit oxigenul, temperaturile ridicate, câmpul electric, arcul electric, lumina, unele metale etc. Astfel, oxigenul formează cu hidrocarburile componente ale uleiului acizi liberi sau legați care corodează metalele și înrăutățesc

caracteristicile izolației. Temperaturile ridicate favorizează reacțiile chimice de descompunere a uleiului. Arcul electric descompune uleiul în produse gazoase (hidrocarburi și hidrogen), lichide (apă) și solide (negru de fum). Sub acțiunea câmpului electric moleculele uleiului disociază, rezultând apoi produse insolubile în ulei. Metalele constituie catalizatori ai reacțiilor de descompunere a uleiului.

Produsele insolubile în ulei (gudroanele) nu modifică proprietățile esențiale ale acestuia; ele se depun însă pe suprafețele înfășurărilor și ale cuvelor, îngreunând procesul de răcire a transformatoarelor. Produsele de descompunere gazoase și lichide afectează profund caracteristicile dielectrice ale uleiului: rezistivitatea și rigiditatea dielectrică scad, iar permitivitatea și factorul de pierderi cresc cu peste un ordin de mărime. Printre criteriile care caracterizează îmbătrânirea uleiului mineral se află: indicele de aciditate, factorul de pierderi, rezistivitatea, rigiditatea dielectrică, temperaturile de inflamabilitate și congelare, viscozitatea etc., ale căror valori nu trebuie să depășească anumite limite.

### **Întreținerea uleiului mineral**

Întreținerea uleiurilor constă în protejarea lor împotriva umidității și oxidării, curățirea, uscarea și regenerarea celor cu grad de îmbătrânire ridicat. În acest sens, se utilizează mai multe metode. Astfel, pentru eliminarea contactului direct dintre ulei și oxigenul și umiditatea din atmosferă se utilizează perne de azot (îndeosebi pentru transformatoarele de puteri mari), iar pentru reducerea conținutului de apă și compuși insolubili se utilizează filtre încărcate cu silicagel, oxid de aluminiu, bauxită sau alți absorbantți.

Prin introducerea unor substanțe antioxidante se împiedică desfășurarea procesului de oxidare (adică se întârzie formarea primilor peroxizi sau, dacă aceștia există, ei sunt transformați în compuși nedăunători) și se reduce acțiunea catalitică a metalelor. Printre aditivii antioxidanți cei mai utilizați se remarcă paraoxidifenilamina, fenildimetilaminopirazilonă (amidopirină) etc.

Dacă, în procesul de exploatare, caracteristicile uleiului s-au redus sub limitele admisibile, acesta se supune unui proces de purificare și regenerare. Purificarea începe cu decantarea, în decursul căreia are loc depunerea apei și impurităților mecanice cu masă moleculară mare. Urmează apoi centrifugarea (pentru eliminarea impurităților cu greutate specifică superioară uleiului), filtrarea (pentru reținerea impurităților mici, apei, negrului de fum etc.) și uscarea prin pulverizarea în vid (pentru eliminarea vaporilor de apă). Prin regenerare se înlătură și acele produse - rezultate în procesul de îmbătrânire - care rămân în urma purificării (hidrocarburi nesaturate, acizi etc.). Pentru aceasta se utilizează metode similare celor de rafinare, adică tratarea cu hidroxid de potasiu, acid sulfuric și pământuri absorbante (argilă, diatomită, bauxită, silicagelul, oxizi și aluminosilicați etc).

### **5.7.2. Uleiuri sintetice**

Uleiurile sintetice tind să înlocuiască uleiurile minerale care, deși au proprietăți dielectrice foarte bune, prezintă deficiențe importante în exploatare : inflamabilitate și pericol de explozie, tendință de oxidare, îmbătrânire rapidă etc.



După natura chimică, uleiurile sintetice se grupează în uleiuri clorurate, fluorurate și siliconice.

### **Uleiurile clorurate**

Sunt derivați ai hidrocarburilor aromatice de tipul benzenului sau difenililor clorurați - cel mai utilizat fiind pentaclordifenilul ( $C_6H_3Cl_2-C_6H_2Cl_3$ ) - și poartă diferite denumiri comerciale : askareli, sovol, clophen etc. Sunt substanțe polare, neinflamabile, cu stabilitate chimică mare și care nu se oxidează. Se descompun sub acțiunea arcului electric, dezvoltând carbon și gaze neinflamabile, dar toxice și corosive (HCl). Atacă lacurile pe bază de uleiuri vegetale, dar sunt compatibile cu rășinile fenolice, poliuretanică, epoxidice, celulozice etc. Au viscozitatea superioară celei a uleiului mineral, dar absorbția de apă mai redusă.

Proprietățile uleiurilor clorurate depind, în mare măsură, de numărul de atomi de clor din molecule. Astfel, creșterea conținutului de clor determină nu numai o creștere a temperaturii de congelare până la  $+12^{\circ}C$  - și deci, a viscozității uleiului - ci și o variație importantă a caracteristicilor sale dielectrice, îndeosebi a permitivității și factorului de pierderi. Factorul de pierderi depinde, de asemenea, de conținutul substanțelor dizolvate în ulei și de temperatură. Se utilizează în construcția transformatoarelor (fiind neinflamabile și cu  $E_{str}$  mare), condensatoarelor cu hârtie (având  $\epsilon_r$  mare) etc.

### **Uleiurile fluorurate**

Sunt hidrocarburi fluorurate, perfluoramine, eteri ciclici și esteri fluorurați, derivați vinilici fluorurați etc.) au temperatura de fierbere mai scăzută decât a uleiurilor clorurate, caracteristici dielectrice superioare și absorbție de apă redusă. Nu ard și nu prezintă pericol de explozie. Nu produc gaze toxice și nu atacă izolații cu care vin în contact. Fiind foarte scumpe se utilizează doar în întreruptoare și transformatoare care funcționează în condiții speciale.

### **Uleiurile siliconice**

Sau dimetilsiloxani liniari au proprietăți dielectrice asemănătoare uleiului mineral, absorbție de apă redusă și temperatură de inflamabilitate ridicată ( $350 \dots 475^{\circ}C$ ). Permitivitatea lor crește cu viscozitatea și scade cu temperatura, iar  $tg\delta$  crește cu viscozitatea, temperatura și frecvența. Se utilizează în construcția transformatoarelor speciale, pentru ungerea mecanismelor din mase plastice, a matrițelor pentru turnarea maselor plastice etc.

## **5.8. Materiale electroizolante solide organice**

### **5.8.1. Materiale organice micromoleculare**

#### **Ceruri și substanțe ceroase**

Cerurile sunt materiale cristaline cu proprietăți dielectrice foarte bune și higroscopicitate mică, dar cu rezistență mecanică, temperatură de topire și

conductivitate termică redusă. De asemenea, au contracție la răcire mare și sunt solubile în uleiuri minerale și clorurate. **Cerurile naturale** (ceara de albine, de carnauba, montană) sunt puțin folosite în prezent, datorită proprietăților lor mecanice și termice reduse. Mai des se utilizează **substanțele ceroase**, atât cele nepolare (parafina, cerezina, ozocherita) - cu proprietăți dielectrice foarte bune - cât și cele polare (uleiul de ricin hidrogenat, parafina și naftalina clorurată) - cu caracteristici dielectrice mai slabe și dependente de temperatură. Se utilizează la fabricarea maselor de impregnare pentru conductoare, a maselor de umplere a manșoanelor cablurilor și a cutiilor terminale, la impregnarea condensatoarelor etc.

### Bitumuri și asfalturi

Bitumurile sunt amestecuri amorfe de hidrocarburi care conțin, în cantități reduse, oxigen și sulf. Cele sintetice se obțin prin distilarea produselor petroliere, iar cele naturale - asfalturile - provin din zăcăminte învecinate cu cele de țiței. Bitumurile au contracție mare la răcire, sunt fragile la temperatura camerei ei, insolubile în apă și alcooli și solubile în hidrocarburi aromatice, uleiuri și benzină. Temperatura de înmuiere variază între 50 și 150°C și crește cu conținutul de sulf. Se utilizează la fabricarea lacurilor de impregnare, a compundurilor, a unor produse pe bază de mică, ca mase de umplere etc.

## 5.8.2. Materiale organice macromoleculare

### Rășini naturale

Rășinile naturale sunt amestecuri complexe de acizi rășinoși și hidrocarburi cu proprietăți dielectrice foarte bune, dar caracteristici mecanice și termice reduse. **Șelacul** se prezintă sub formă de solzi, este solubil în alcooli și benzen și are temperatura de înmuiere foarte redusă (50... 60°C). Aceasta poate fi însă mărită printr-o tratare termică: 30 de ore la 100°C. Încălzit la 200 °C devine termorigid. Se utilizează ca bază pentru lacuri de lipire, emailare etc. **Colofoniul** se obține din rășini de conifere. Se dizolvă greu în ulei (la 300-350°C), dar este solubil în benzen, acetonă etc. Se utilizează la fabricarea masei galbene (cu ulei de cablu), la umplerea manșoanelor și cutiilor terminale ale cablurilor etc. **Chihlimbarul** prezintă valori foarte mari ale durității, rezistivității de volum și de suprafață. Se utilizează în construcția aparatelor de măsură de mare precizie (electrometre etc.).

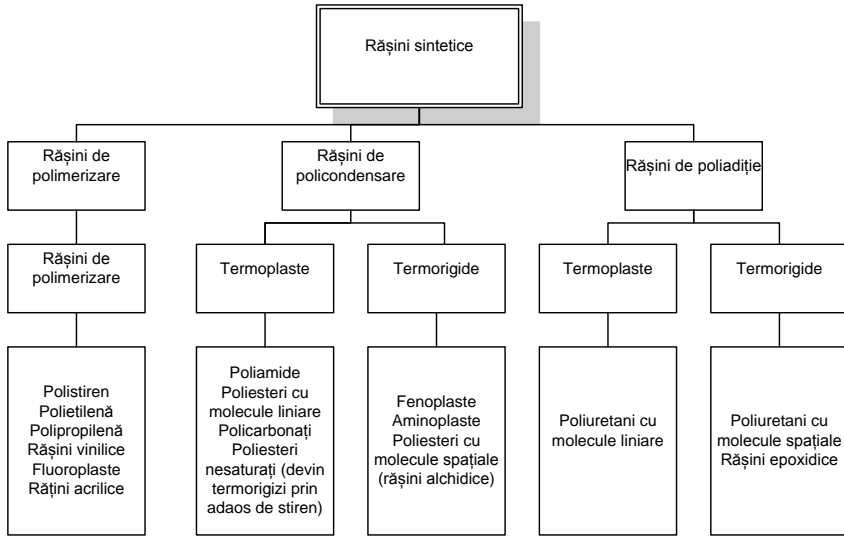


Figura 5-20 Clasificarea rășinilor sintetice

### Rășini sintetice. Caracteristici generale

Datorită proprietăților electrice și mecanice deosebite, precum și a prelucrabilității lor ușoare, rășinile sintetice prezintă cele mai diverse aplicații industriale. Aflându-se în număr foarte mare și cu caracteristici foarte diferite, ele se clasifică în mai multe moduri. Astfel, în funcție de tipul reacției chimice de obținere, rășinile sintetice se clasifică în rășini de polimerizare, de policondensare și de poliadiție, clasificare care are o importanță mai mult didactică. Ținându-se seama de proprietățile termomecanice - deosebit de importante pentru utilizarea materialelor electroizolante - rășinile sintetice se clasifică în rășini termoplastice și termorigide. În funcție de caracterul polar sau nepolar al moleculelor, rășinile sintetice se împart în rășini polare și nepolare. Această clasificare este importantă pentru evidențierea proprietăților dielectrice ale rășinilor. Astfel, rășinile nepolare sunt caracterizate prin valori mici (și care variază puțin cu temperatura și frecvența) ale permitivității și factorului de pierderi dielectrice. Dimpotrivă, în cazul rășinilor polare, permitivitatea și factorul de pierderi au valori mari și care se modifică foarte mult cu temperatura și frecvența.

### Rășini de polimerizare

Sunt substanțe cu macromolecule liniare, deci termoplastice și cu temperatură de înmuiere redusă (cu excepția fluoro-plastelor). Au absorbție de apă redusă și proprietăți dielectrice foarte bune. Se prelucrează ușor, cu sau fără plastifianți. Din această grupă fac parte: polietilena, poliesterul, policlorura de vinil și de viniliden, politetrafluoretilena, polimonoclortrifluoretilena, poliviniilalcolii, plivinilacetatii, rășinile acrilice etc.

**Polietilena (PE).** Se obține prin polimerizarea etilenei, la presiune înaltă (1.000...2.000 atm) - rezultând un material cu densitate mică - sau la presiune normală (1 atm) - rezultând un material cu densitate mare. Are molecule simetrice și liniare, deci este nepolară și termoplastă. Polietilena de mică densitate are

structură parțial cristalină și proprietăți mecanice mai reduse. Polietilena mare densitate are un grad înalt de cristalinitate (85%) care-i conferă duritate mai mare, temperatură de înmuiere mai ridicată și o comportare mai bună la temperaturi scăzute (-40°C). Polietilena are o bună stabilitate la acizi și baze, dar este atacată de solvenți organici. Este nehigroscopică, are proprietăți dielectrice foarte bune (independente de frecvență) și se prelucrează cu ușurință.

Utilizările polietilenei sunt dintre cele mai diverse. Astfel, foliile de polietilenă se folosesc la fabricarea condensatoarelor, la izolarea cablurilor submarine, telefonice și a celor care funcționează în medii corosive. Prin extrudare se izolează conducte și cabluri pentru înaltă frecvență, conductori de bobina j, cabluri de energie etc. Cu polietilenă expandată se izolează cablurile pentru frecvențe înalte, cu capacități foarte mici etc.

**Polistirenul (PS)** este un material nepolar cu proprietăți dielectrice foarte bune și independente de frecvență. Prezintă însă temperatură de înmuiere și reziliență scăzută și este inflamabil. Se utilizează sub formă de benzi, tuburi, fire, lacuri, piese turnate, expandat etc., îndeosebi în înaltă frecvență.

**Policlorura de vinil (PCV)** se obține prin polimerizarea clorurii de vinil, sub formă de PCV dur - fără plastifianți - sau PCV moale - cu plastifianți (esteri ai acidului ftalic, fosforic, citric etc.). Fiind material polar, are caracteristici dielectrice mai reduse decât polietilena sau polistirenul și dependente - ca și cele mecanice - de conținutul de plastifiant. Se comportă mai bine decât cauciucul natural atât la acțiunea ozonului cât și a uleiului mineral. Are însă stabilitate termică redusă (70 °C), iar proprietățile sale dielectrice variază foarte mult cu frecvența și temperatura. Se utilizează la izolarea conductoarelor și cablurilor de energie (între 1 și 20 kV), la fabricarea izolațiilor de creștătură combinată, a benzilor adezive, a unor piese izolatoare (plăci, carcase etc.) pentru aparate de măsură, tuburi pentru instalații electrice, pentru acoperirea pieselor de formă complicată (sub formă de plastisoli și organosoli - suspensii de PCV în plastifianți) etc.

**Politetrafluoretilena (PTFE)**. Se obține prin polimerizarea tetrafluoretilenei ( $F_2C-CF_2$ ) și are o structură asemănătoare cu cea a polietilenei. Este nepolară, are bune proprietăți dielectrice și nu arde. Datorită valorilor mari ale energiei de legătură dintre atomii de C și F, PTFE are stabilitate termică ridicată (250°C). La 327°C trece în stare amorfă, iar la 400°C se descompune (producând gaze toxice). Având coeficientul de dilatație liniară mare, la variații mai importante ale temperaturii, în PTFE, apar microgoluri (cavități) în care se pot dezvolta descărcări parțiale. Din acest motiv, PTFE nu se utilizează în câmpuri electrice intense. PTFE se utilizează pentru realizarea unor scheme de izolații care funcționează în clasa de izolație C, în medii umede sau în atmosfere puternic corosive, a unor cutii pentru acumulate, carcase pentru bobine, izolații pentru conductoare și cabluri de înaltă frecvență etc.

**Policlortrifluoretilena (PCTPR)**. Este termoplastică, ușor prelucrabilă, cu coeficient de dilatație liniară mai mic și caracteristici dielectrice mai reduse decât PTFE. Are aceleași utilizări ca și PTFE.

**Rășinile acrilice** (polietilacrilatul, polimetilmetacrilatul - PMMA etc.). Sunt polimeri ai acidului acrilic și metacrilic, cu proprietăți mecanice și termice asemănătoare polistirenului, dar cu caracteristici dielectrice mai reduse (fiind polare). Sunt rezistente la ozon, lumină și au stabilitate chimică bună. Se utilizează la fabricarea lacurilor, adezivilor, a carcaselor pentru aparate, a camerelor de stingere, sub formă de „sticle organice” etc.

## Rășini de policondensare

Din această grupă fac parte: fenoplastele, aminoplastele, poliamidele, poliimidele, policarbonații și poliesterii. Unele au molecule liniare și sunt termoplastice (poliamidele etc.), altele au molecule spațiale - deci sunt termorigide (fenoplastele etc.). Datorită eliminării apei în procesul de reacție, rășinile de policondensare au higroscopicitate mai mare și caracteristici dielectrice mai reduse decât rășinile de polimerizare și sunt dependente de temperatură și frecvență.

**Fenoplastele.** Au fost descoperite de Backeland (1907), de aceea se numesc și bachelite. Ele se obțin din fenol sau crezol și formaldehidă, în prezența „unui catalizator bazic (amoniac, hidroxid de sodiu etc.) sau acid (acid clorhidric, fosforic etc.).

În cazul condensării fenolilor cu formaldehidă în mediul alcalin, în procesul de reacție (condensare) se disting trei faze, produsele obținute - în fiecare fază - având proprietăți și utilizări diferite.

**Rezolii** corespund stadiului inițial (la circa 100°C); sunt solubili în apă, alcool eter și esență de terebentină și se utilizează ca lacuri de impregnare.

**Rezitolii** - corespunzători fazei intermediare (la 100°C) - sunt insolubili în solvenți obișnuiți, fuzibili și termoplastici; se utilizează ca mase de formare.

**Rezitele** constituie stadiul final al procesului de condensare (când apar rețele moleculare); sunt insolubile, infuzibile, dure, rezistente la acțiunea căldurii și acizilor și se utilizează pentru obținerea unor piese electroizolante prelucrabile cu scule așchietoare.

Sunt rășini polare, higroscopice, cu caracteristici dielectrice reduse și cu rezistență slabă la acțiunea arcului electric și a curenților de scurgere pe suprafață (se descompun, producând gaze inflamabile și apă, care micșorează rezistivitatea la suprafață). Nu întrețin arderea și pot fi utilizate la temperaturi ridicate (150... 200°C, în cazul umpluturilor anorganice). Au numeroase utilizări în industria electrotehnică (la temperaturi joase și frecvențe industriale) atât sub formă de lacuri (pentru stratificare, pentru impregnarea înfășurărilor) cât și sub forma unor mase de turnare sau presare (pentru fișe, prize, carcase pentru aparatele de măsură și telefonice, produse de formă complicată cu înglobări de piese metalice etc.).

**Aminoplastele.** Se obțin prin policondensarea aldehidei formice cu carbamidă (uree), melamină sau anilină și poartă numele de rășini carbamidice, melaminice, anilinice.

Rășinile carbamidice au proprietăți asemănătoare cu cele ale bachelitelor. Se comportă însă mai bine la acțiunea curenților de scurgere și a arcului electric: gazele rezultate având afinitate mare pentru electroni sting „arcul electric”. Rășinile melaminice prezintă higroscopicitate redusă și stabilitate termică superioară fenoplastelor. Rășinile anilinice au proprietăți dielectrice foarte bune - puțind fi utilizate la frecvențe înalte, dar se prelucrează foarte greu. Aminoplastele sunt termorigide și au utilizări asemănătoare fenoplastelor. Din ele se realizează camere de stingere pentru întreruptoare, adezivi, lacuri, lianți pentru stratificare etc.

**Poliamidele.** Se obțin din acizi dicarboxilici (adipic, sebacic) și diamine sau din  $\epsilon$ -caprolactamă. Au proprietăți mecanice foarte bune, se lipesc ușor și se aprind greu. Sunt puternic polare, au higroscopicitate mare și caracteristici dielectrice reduse. Se utilizează pentru confecționarea diferitelor piese cu rezistență mecanică mare (roți dințate, role, lagăre etc.), sub formă de folii (pentru cabluri,

condensatoare, izolații de creștătură etc.), de fire și țesături (pentru stratificare), hârtii, lacuri etc.

**Poliimidele.** Se obțin din acid piromelitic și diamină aromatică. Au molecule liniare, stabilitate termică ridicată (până la 250°C), proprietăți mecanice bune și se utilizează sub formă de folii și lacuri de emailare.

**Poliesterii.** În funcție de numărul de punți reactive ale monomerilor, poliesterii au molecule liniare sau spațiale. Tereftalatul de polietilenă (PET) are molecule liniare, este termoplastice și cu proprietăți dielectrice și termice foarte bune ( $E_{str}=100...200$  MV/m,  $\epsilon_r=3$ ,  $tg\delta=0,004...0,2$ ,  $\rho_v=10^{15}...10^{17}$   $\Omega$ m,  $T=130...150^\circ\text{C}$ ). Foliile de PET (denumite comercial: hostafan, mylar etc.) au absorbție de apă redusă rezistență bună la întindere și sfîșiere, la acțiunea microorganismelor, a uleiurilor și a acizilor etc., dar îmbătrănesc rapid sub acțiunea descărcărilor parțiale. Se utilizează ca diectrici pentru condensatoare, la izolarea conductoarelor, la fabricarea izolațiilor de creștătură, a produselor pe bază de mică etc. Poliesterii nesaturați se obțin din glicol, acizi nesaturați (maleic) sau saturați (ftalic) și un agent de reticulare (stiren), formând așa-numitele lacuri fără solvenți. Se utilizează ca lianți pentru stratificate, ca rășini de turnare și impregnare, pentru înglobări de micromotoare și transformatoare etc.

### Rășini de poliadiție

**Rășinile epoxidice** sînt polimeri termorigizi care conțin mai multe grupări epoxi de mare reactivitate. Cele mai utilizate se obțin prin reacția dintre bisfenol A și epiclorhidrină, urmată de o reticulare (durificare) și un agent de întărire (amină, amidăr anhidridă, acid organic etc.). În procesul de durificare, gruparea epoxi se distruge, permițând agentului de întărire să se fixeze și să formeze un polimer cu masă moleculară ridicată: rășina epoxi propriu-zisă.

Deoarece în procesul de reacție nu se elimină produse secundare, rășinile epoxi nu conțin microgoluri sau bule de gaz în care să se dezvolte descărcări parțiale. Au contracție mică la răcire (0,5...2%), se prelucrează ușor și nu prezintă tensiuni interne. Datorită grupărilor polare conținute în molecule (eter și hidroxil-alifatic), rășinile epoxidice aderă foarte bine la suprafețele metalelor, ceramicelor, maselor plastice etc. Sunt neinflamabile, rezistente la acțiunea curenților de scurgere, a agenților chimici și au stabilitate termică bună. Au, în general, proprietăți mecanice și dielectrice foarte bune, dar dependente de temperatură. Se utilizează ca *rășini de turnare* (pentru cutii terminale, încapsulări de aparate, camere de stingere, izolatoare de înaltă tensiune etc.), *rășini de presare* (pentru izolații de creștătură, piese fără eforturi interne etc.), *rășini de impregnare* (pentru stratificate, sisteme de izolație la micromotoare și mașini mari etc.), *rășini de lipire*, la emailarea conductoarelor etc.

**Poliuretanii.** Se obțin din izocianați și alcoolii polihidroxilici și pot avea molecule liniare sau spațiale. Cei cu molecule liniare au proprietăți asemănătoare cu poliamidele (perlon U), dar absorbția de apă mai redusă. Cei cu molecule spațiale au proprietăți asemănătoare fenoplastelor, cu excepția higroscopicității (care este mai mică), a rezistivității și rezistenței la curenții de scurgere pe suprafață (care sunt mai mari). Se utilizează la izolarea cablurilor (sub formă de folii), la fabricarea lacurilor de emailare, a elastomerilor, adezivilor, poroplastelor (izolanți termici și împotriva oscilațiilor) etc.

### 5.8.3. Celuloza și derivații săi

#### Celuloza

Este o substanță macromoleculară naturală cu molecula liniară, un hidrat de carbon polimer  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Lanțurile moleculare se grupează în micle (tuburi subțiri) care se aranjează în același mod, formând fibrile și apoi fibre celulozice. Această structură explică porozitatea (40...50%) și absorbția de apă foarte mare a produselor pe bază de celuloză. Proprietățile dielectrice (în general mai reduse decât la materialele cu structură compactă) variază foarte mult cu densitatea, conținutul de umiditate, temperatura și frecvența câmpului electric. Având moleculele polare, permitivitatea și pierderile dielectrice au valori mari:  $\epsilon_r=6,7...7$  și  $tg\delta= 0,005 \dots 0,01$ .

Modificarea, cu timpul, a proprietăților celulozei se datorează îndeosebi transformărilor chimice care au loc în structura sa sub acțiunea oxigenului și căldurii. Astfel, sub acțiunea oxigenului, macromoleculele celulozei depolimerizează, lungimea lor scade și proprietățile mecanice se înrăutățesc. De asemenea, oxigenul favorizează reacțiile chimice ale celulozei cu apa, în urma cărora crește numărul de grupări polare și se reduc proprietățile dielectrice. Acțiunea căldurii - mai puternică în cazul celulozelor cu un grad de polimerizare mai redus sau cu conținut de impurități mare - are ca efecte principale: creșterea acidității și a conținutului de cupru, scăderea vâscozității etc.

Pentru reducerea higroscopicității și îmbunătățirea caracteristicilor dielectrice și a stabilității chimice și termice, celuloza se impregnează cu lichide și mase electroizolante, proprietățile sale depinzând, în aceste cazuri, de caracteristicile materialului impregnant. Astfel, în cazul hârtiei impregnate cu ulei mineral, creșterea acidității uleiului, a temperaturii sau a umidității reduce considerabil proprietățile mecanice ale materialului. Permitivitatea relativă ia valori între 2,2 și 6,35 (în funcție și de densitatea hârtiei), iar factorul de pierderi crește cu densitatea hârtiei și cu temperatura. Impregnând hârtia cu uleiuri clorurate (polare), crește rigiditatea dielectrică și permitivitatea, iar factorul de pierderi și rezistivitatea de volum prezintă variații mai pronunțate cu frecvența și temperatura decât în cazul uleiului mineral. Hârtiile impregnate cu askareli nu se utilizează în curent continuu, deoarece, ca urmare a proceselor de degradare chimică și electrolizei care se desfășoară, pierderile dielectrice și permitivitatea cresc considerabil.

#### Derivați ai celulozei

Prin modificarea chimică a moleculelor de celuloză se obțin esteri (acetați, nitrați etc.) sau eteri (etil și benzilceluloză) ai celulozei. Produsele obținute prezintă higroscopicitate mai redusă și proprietăți dielectrice și termice superioare. *Acetații de celuloză* se obțin prin înlocuirea grupărilor -OH din molecula celulozei cu grupări acetyl ( $-CH_3CO$ ). Cel mai utilizat este *triacetatul de celuloză*, material rezistent la acțiunea ozonului, a descărcărilor parțiale, a uleiurilor și benzinei și cu bună stabilitate termică. Se utilizează la izolarea cablurilor, ca dielectric pentru condensatoare, la fabricarea lacurilor și maselor de turnare etc.

### Produse pe bază de celuloză

Celuloza este foarte mult utilizată în electrotehnică, îndeosebi sub formă de hârtii, cartoane, fire și țesături. Este ieftină, ușor prelucrabilă, dar higroscopică și cu proprietăți variabile în timp.

**Hârtia acetilată**, are proprietățile dielectrice superioare celei obișnuite, dar proprietăți mecanice (elasticitatea, rezistența la îndoire și sfâșiere etc.) mai scăzute.

**Hârtia de cablu** are densitatea mică, rezistență la tracțiune și sfâșiere mare, factor de pierderi redus și rigiditate dielectrică mare. Se utilizează la izolarea cablurilor de energie, a conductoarelor bobinajelor etc.

**Hârtia Kraft** are proprietăți mecanice, dielectrice și termice foarte bune.

**Hârtia de condensator** este mai omogenă, subțire, densă, cu rigiditate dielectrică, permitivitate și rezistivitate electrică mari și pierderi dielectrice reduse. Se utilizează (impregnată) ca dielectric pentru condensatoare.

**Hârtia japoneză** cu fire lungi și rezistență mecanică mare, se utilizează ca suport pentru produsele pe bază de mică.

**Cartonul electrotehnic** (preșpanul) este alcătuit din straturi de hârtie foarte fină, presate în stare umedă. Are proprietăți mecanice bune, este rezistent la acțiunea uleiului și se utilizează ca izolație de creștătură, la izolarea transformatoarelor etc.

**Firele și țesăturile** se obțin din bumbac, mătase naturală sau artificială și se utilizează la izolarea conductoarelor, a bobinelor pentru mașini și aparate electrice, a stratificatelor, a tecilor izolante (tuburi linoxinice) etc.

### 5.8.4. Cauciucuri și elastomeri

Cauciucurile sunt materiale cu elasticitate mare care, sub acțiunea unor forțe mecanice (exterioare) se deformează, dar își recapătă dimensiunile inițiale odată cu anularea acestor solicitări. În stare tensionată ele prezintă tendința de cristalizare. Elastomerii sunt polimeri cu forțe inter-moleculare slabe: se deformează cu ușurință, dar revenirea la starea inițială se face foarte încet, în stare tensionată aceștia nu prezintă tendința de cristalizare.

#### Cauciucul natural

Este un polimer natural al izoprenului, cu grad de polimerizare cuprins între 2.000 și 4.000. Are proprietăți dielectrice foarte bune, dar caracteristici termice și mecanice reduse. Prin *vulcanizare*, adică prin legarea macromoleculilor între ele cu punți de sulf, și prin adăugare de negru de fum se reduce tendința de cristalizare și elasticitatea cauciucului, dar se îmbunătățesc caracteristicile mecanice și termice. Conținutul de sulf poate varia între 4% (pentru cauciuc moale) și 45% (pentru ebonită). Cauciucul natural este atacat de oxigen și ozon; pentru diminuarea acțiunii acestora se introduc antioxidant (fenoli, amine și fosfați aromatici), respectiv materiale parafinoase sau bituminoase. Introducerea sulfului, negrului de fum, antioxidantilor etc. produce însă o înrăutățire a caracteristicilor dielectrice: permitivitatea și pierderile dielectrice cresc, iar rigiditatea dielectrică și rezistivitatea de volum scad. Se utilizează la izolarea conductelor electrice flexibile,



a cablurilor pentru instalații de interior, a benzilor adezive etc., la tensiuni joase și în medii care nu conțin ulei mineral, solvenți oxigenați sau halogenați etc.

### Cauciucuri sintetice

Au caracteristici dielectrice mai slabe decât ale cauciucului natural, dar au proprietăți termice și mecanice superioare și o rezistență mai bună la acțiunea solvenților, uleiurilor etc.

**Cauciucurile pe bază de butadienă** se utilizează la confecționarea mantalelor pentru cabluri care lucrează în medii umede, toxice etc. perbunanul care este semiconductor, se utilizează la fabricarea curelelor de transmisie care nu trebuie să înmagazineze sarcini electrice.

**Cauciucurile din poliacrilați** sunt rezistente la acțiunea ozonului, oxigenului și uleiurilor.

**Cauciucurile siliconice** (polisiloxani) sunt rezistente la acțiunea ozonului, solvenților, a curenților de scurgere pe suprafață, au conductivitatea termică ridicată și nu-și modifică prea mult proprietățile cu temperatura. Se utilizează (între  $-50$  și  $150^{\circ}\text{C}$ ) la izolarea conductoarelor, a cablurilor care funcționează în condiții grele etc.

### Elastomeri

Elastomerii se obțin din rășini de polimerizare sau poliadiție. *Polietilena clorosulfonată* (Hypanol) este stabilă la acțiunea oxigenului și ozonului, are proprietăți mecanice bune și se utilizează (între  $-50$  și  $150^{\circ}\text{C}$ ), la izolarea conductoarelor, cablurilor etc. *Cauciucul butilic* este nepolar cu stabilitate termică foarte bună. *Elastomerii fluorurați* se utilizează la temperaturi cuprinse între  $-50$  și  $200^{\circ}\text{C}$  și sunt rezistenți la acțiunea solvenților, ozonului și oxigenului, dar au proprietăți mecanice slabe.

## 5.8.5. Siliconii

Materialele siliconice sunt compuși organici ai siliciului și se obțin prin completarea valențelor libere ale lanțului siloxanic cu radicali organici (metil, etil, fenil etc.). Prin urmare, proprietățile lor îmbină caracteristicile electrice foarte bune ale materialelor organice cu stabilitatea chimică și termică mare care caracterizează materialele anorganice. Pot funcționa la temperaturi ridicate ( $200^{\circ}\text{C}$ ), sunt neinflamabile, nehigroscopice, nu dezvoltă gaze toxice și aderă la suprafețele metalice. În funcție de structura lor moleculară, siliconii se prezintă sub formă de uleiuri sau unsori (molecule scurte), cauciucuri (molecule liniare cu punți de legătură rare) și rășini (molecule spațiale sau rețele moleculare). Se utilizează la fabricarea lacurilor de acoperire (pentru țesături de azbest sau sticlă, produse pe bază de mică etc.) a lacurilor de lipire (pentru stratificate etc.), a lacurilor de impregnare (pentru condensatoare, stratificate etc.), a lianților pentru mase plastice. Siliconii se mai utilizează și ca adaos în compozițiile de presare (pentru evitarea lipirii pieselor de matrițe), ca aditiv pentru cauciucurile sintetice, la fabricarea compoundingurilor, etc.

## 5.9. Materiale electroizolante solide anorganice

Materialele anorganice joacă un rol determinant în realizarea sistemelor de izolație pentru clasele F, H și C. Într-adevăr, ele pot fi utilizate la temperaturi de peste 200°C (fără a-și schimba caracteristicile), nu se oxidează și nu se carbonizează sub acțiunea arcului electric (nu lasă, deci urme conductoare). Sunt rezistente la acțiunea radiațiilor și microorganismelor, iar unele dintre ele au și higroscopicitate redusă. Au proprietăți mecanice inferioare materialelor organice, dar sunt mai rezistente la descărcări parțiale. Rezistivitatea de volum variază între  $10^8$  și  $10^{15}$   $\Omega\text{m}$  permitivitatea relativă între 3,5 și 20, factorul de pierderi între  $10^{-4}$  și  $10^{-2}$ , iar rigiditatea dielectrică între 3 și 200 MV/m. Având caracteristic mecanice reduse (reziliența, rezistența la tracțiune etc.), materialele anorganice se utilizează, de obicei, împreună cu materialele organice.

### 5.9.1. Mica și produsele pe bază de mică

Mica este un material cristalin care face parte din grupa silicaților de aluminiu, în principal sub formă de *muscovit* și *flogopit*. Cristalizează sub formă de straturi care se desfac ușor unele de altele, adică *clivează*. Proprietățile dielectrice ale micii - foarte bune în cazul direcțiilor perpendiculare pe straturi - scad în lungul planurilor de clivaj. Ele se modifică, de asemenea, cu temperatura și frecvența. Rigiditatea dielectrică depinde îndeosebi de grosimea straturilor și de conținutul de defecte ale materialului, ajungând până la 700MV/; uzual 25MV/m. Este inertă chimic și are o mare rezistență la acțiunea descărcărilor parțiale. Are stabilitate termică foarte ridicată. *Mica sintetică* are proprietăți dielectrice superioare flogopitului, coeficient de dilatație liniară apropiat de cel al metalelor și este stabilă până la 900°C.

**Mica naturală** se utilizează ca dielectric pentru condensatoare, la realizarea sistemelor de izolație ale mașinilor și aparatelor electrice, a rezistoarelor neinductive etc., precum și la fabricarea unor materiale cu proprietăți termice superioare.

**Hârtia de mică** este izotropă, mai omogenă decât mica naturală, dar cu proprietăți dielectrice inferioare.

**Micalexul** este rezistent la umiditate și arc electric și are proprietăți mecanice și dielectrice foarte bune. Se utilizează la confecționarea de piese izolante fasonate, izolatori etc.

**Micanitele** se obțin din straturi de hârtie de mică sau foițe de mică lipite cu șelac sau lacuri sintetice.

**Micafoliile** foițe sau hârtie de mică lipite cu lianți pe bază de șelac, poliesteri sau siliconi pe un suport de hârtie sau țesătură din fibră de sticlă.

Produsele pe bază de mică se utilizează la fabricarea sistemelor de izolație ale mașinilor și aparatelor electrice (îndeosebi ale celor cu regimuri grele de exploatare), ale mașinilor electrice de puteri mari și tensiuni înalte etc. (izolațiile pe bază de mică fiind rezistente la acțiunea descărcărilor parțiale și având durată de viață mare). Produsele pe bază de mică se utilizează, de asemenea, la izolarea lamelor de colector și a bobinelor electromagneților, la fabricarea conurilor izolante

pentru colectoare, a unor piese fasonate, a garniturilor la aparate electrocasnice etc.

## 5.9.2. Sticlele

Sticlele anorganice sunt amestecuri solide de silicați de calciu, de sodiu și de alte metale (bariu, aluminiu, magneziu, plumb, sodiu, potasiu, bor etc.) și se obțin prin topirea la un loc a silicei și a carbonatului de calciu cu compuși ai metalelor respective enumerate.

Sticla de cuarț (obținută prin topirea, cuarțului) are structura cristalină, formată din tetraedri cu atomi de oxigen în vârfuri și câte un atom de siliciu în interior. Legătura dintre tetraedri se face prin atomi de oxigen sau - în cazul altor tipuri de sticle - și prin atomi ai metalelor care intră în compoziția lor. Structura cristalelor fiind foarte densă, sticla de cuarț are proprietăți fizico-chimice și electrice superioare altor tipuri de sticle (coeficient de dilatație liniară redus, conductivitate termică, rezistivitate și rigiditate dielectrică mărite etc.).

**Tabloul 5-6 Compoziția și utilizarea sticlelor anorganice**

Substanțe	Formula chimică	Conținut [%]	Utilizări
Dioxid de siliciu	SiO <sub>2</sub>	72,0	Izolatori de înaltă tensiune
Oxid de calciu	CaO	10,3	
Oxid de aluminiu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	
Oxid de magneziu	MgO	2,8	
Oxid de sodiu	Na <sub>2</sub> O	13,5	
Trioxid de sulf	SO <sub>3</sub>	0,4	
Dioxid de siliciu	SiO <sub>2</sub>	55,0	Lămpi cu vapori de mercur
Oxid de aluminiu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,0	
Oxid de fier	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,05	
Oxid de calciu	CaO	foarte redus	
Oxid de bor	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	foarte redus	
Oxid de bariu	BaO	foarte redus	
Oxid de bariu	BaO	32,0	Lămpi cu vapori de sodiu
Oxid de bor	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,0	
Oxid de aluminiu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,0	
Oxid de sodiu	Na <sub>2</sub> O	foarte redus	
Oxid de potasiu	K <sub>2</sub> O	foarte redus	
Dioxid de siliciu	SiO <sub>2</sub>	>70,0	Redresoare cu vapori de mercur, tuburi catodice etc.
Oxid de bor și alte componente	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	
Dioxid de siliciu	SiO <sub>2</sub>	54,5	Fibre de sticlă, țesături, etc.
Oxid de aluminiu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,5	
Oxid de calciu	CaO	22,0	
Oxid de bor	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,5	
Oxid de sodiu	Na <sub>2</sub> O	0,5	

Introducând în sticlă silicat (pe bază de SiO<sub>2</sub>) oxizi ai metalelor alcaline, apar legături noi între tetraedrii de bază ai cristalitelor care conduc la înrăutățirea proprietăților materialului (reducerea temperaturii de înmuiere, creșterea solubilității

în apă și scăderea rezistivității superficiale). Adăugându-se însă oxizi ai metalelor alcalino-pământoase (Ga, Ba etc.) se obțin materiale proprietăți dielectrice superioare.

Conductivitatea termică scăzută a sticlelor determină o repartitie neuniformă a temperaturii în material. Se produc astfel dilatări neuniforme care provoacă tensiuni mecanice și deformări reziduale în masa materialelor. Proprietățile termice se îmbunătățesc simțitor prin introducerea în compoziția sticlelor a oxizilor metalici. Proprietățile mecanice depind de compoziția chimică și îndeosebi de tratamentele termice, sticlele călite având rezistență mecanică foarte mare.

Sticlele sunt materiale nehigroscopice, casante, dure, rezistente la acțiunea acizilor (cu excepția acidului fluorhidric) și cu bune proprietăți dielectrice. Permitivitatea relativă depinde de natura și conținutul oxizilor metalici adăugați luând valori mai mari în cazul oxizilor metalelor grele (Pb, Ti etc.) - și variază cu frecvența și temperatura. Pierderile dielectrice se datorează îndeosebi conducerii și polarizației ionice, mărimea lor depinzând de aceeași parametri ca și permitivitatea. Rezistivitatea electrică scade dacă conținutul de oxizi metalici, temperatura sau umiditatea cresc. Având structură compactă, sticlele sunt caracterizate prin valori mari ale rigidității dielectrice. Creșterea temperaturii (peste 100°C) determină însă o intensificare a conducerii ionice și deci o reducere a rigidității dielectrice.

Utilizându-se o varietate foarte mare de oxizi metalici, rezultă sticle cu proprietăți speciale, folosite în cele mai diverse domenii de activitate (v. Tabelul 5-6). Astfel, sticlele cu conținut redus de oxizi alcalini au rezistivitate de suprafață mare și se utilizează în construcția izolatoarelor de înaltă tensiune, sau pentru telecomunicații. Din sticle silicat cu oxizi de Al, Ca, B și Na se obțin fibre și hârtie de sticlă. Fibrele - ale căror diametre sunt cuprinse între 5 și 7  $\mu\text{m}$  (pentru a avea o rezistență mecanică superioară) - se utilizează la izolarea conductoarelor, la fabricarea țesăturilor de sticlă etc. Sub forma unor benzi sau fibre, sticla se utilizează și ca dielectric pentru condensatoare. De asemenea, se utilizează la fabricarea lămpilor pentru iluminat, a tuburilor pentru descărcări în gaze etc.

### 5.9.3. Ceramica electrotehnică

Din grupa materialelor ceramice fac parte acele materiale care în decursul proceselor tehnologice, sânt supuse unor arderi la temperaturi ridicate. Se obțin din argilă sau steatit, la care se adaugă fondanți (feldspat, marmură etc.) și degresanți ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  etc.). După formare (prin presare), piesele ceramice se usucă, se prelucrează, se ard la 900°C, se glazurează și apoi se ard la 1.400-1.500°C. În timpul arderii se produc o serie de transformări în structura materialului. Astfel, la 450-600°C, caolinitul ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) pierde apa de cristalizare, transformându-se în metacaolinit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) care, la 830°C, se descompune - separându-se astfel cuarțul ( $\text{SiO}_2$ ) și oxidul de aluminiu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). La 1.100 C se formează cristalele de mulit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) de forma unor ace dure și cu rezistență mecanică mare, iar la temperaturi mai mari se topește feldspatul ( $3 \text{MgO} \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), formând faza sticloasă (amorfă) în care sunt dispuse cristalele de mulit și cuarț.

Structura ceramicelor fiind neomogenă, proprietățile acestora sunt puternic influențate de raportul dintre conținutul fazei cristaline și a celei sticloase. Astfel,

creșterea conținutului de feldspat, deci a fazei amorse, determină o reducere a rezistenței mecanice și a rezistivității electrice și o mărire a rigidității dielectrice. Mărirea conținutului de argilă (caolin), deci a fazei cristaline, determină o creștere a rezistenței mecanice și a temperaturii de utilizare. Cu creșterea conținutului de cuarț se îmbunătățesc îndeosebi proprietățile mecanice.

Ceramicile rezistă foarte bine la acțiunea arcului electric (nu se descompun și nu lasă urme conductoare) și nu prezintă fenomenul de îmbătrânire. Au rezistență la tracțiune și reziliență reduse. Se contractă foarte mult la răcire, motiv pentru care în ele nu se pot îngloba direct piese metalice. Coeficientul de dilatație volumică ia valori în funcție de compoziția ceramicii, fiind de două ori mai mare la ceramicile cu oxid de aluminiu decât la cele cu oxid de calciu.

Proprietățile dielectrice ale ceramicelor depind, în mare măsură, de natura și conținutul de oxizi, de parametrii procesului de ardere precum și de temperatura la care funcționează materialele. De asemenea, se constată variații importante ale permitivității și factorului de pierderi dielectrice la creșterea frecvenței, îndeosebi pentru unii compuși ai titanului.

Pătrunderea umidității înrăutățește proprietățile electrice și mecanice ale ceramicelor. Din acest motiv, ele se acoperă cu *glazuri* - materiale ne higroscopice care conțin în plus, față de ceramica de bază, borați, nitrați și carbonați alcalini, oxizi metalici etc. Având coeficientul de dilatații liniară mai redus decât piesele ceramice pe care le acoperă, în interiorul glazurilor se dezvoltă eforturi de compresiune care echilibrează eforturile de întindere la care piesele ceramice sunt supuse în exploatare.

În funcție de domeniul de utilizare, se realizează trei categorii de materiale ceramice: pentru instalații (pe bază de caolin și steatită), pentru condensatoare (pe bază de steatită și compuși ai titanului) și pentru temperaturi înalte (ceramică poroasă).

Ceramica pe bază de *steatit normal* sau *caolin* se utilizează îndeosebi la fabricarea izolatoarelor de înaltă sau joasă tensiune. Ceramica *cordierit* ( $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ ) are proprietăți dielectrice slabe și se utilizează în instalațiile de încălzire. Ceramica pe bază de *celsian* ( $\text{BeO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ) și *ultraportelanul* (pe bază de argilă, oxid de aluminiu și de bariu), se utilizează la fabricarea bobinelor și condensatoarelor pentru înaltă frecvență. Ceramicile pe bază de compuși ai titanului conțin bioxid de titan ( $\text{TiO}_2$ ) cristalizat (pulbere de rutil), titații de bariu, plumb, stronțiu etc. și sunt, în general, materiale feroelectrice. Proprietățile lor dielectrice depind de structura ceramicii, materialele mai dense având rigiditate dielectrică ridicată și permitivitate electrică mai redusă. Permitivitatea scade dacă materialul este tensionat mecanic sau dacă frecvența depășește 10 GHz. Se utilizează la fabricarea condensatoarelor, amplificatoarelor dielectrice, dispozitivelor de memorare etc. Ceramicile poroase (obținute din talc, caolin și șamotă) au porozitatea cuprinsă între 10 și 30%. rezistivitate electrică mare la temperaturi ridicate și se utilizează în medii cu conținut redus umiditate. În afara materialelor ceramice amintite, în industria electrotehnică se mai utilizează piroceramii, cermeții, fibre și folii ceramice etc.

## 5.9.4. Alte materiale anorganice

### Azbestul

Cel mai utilizat material de azbest este crisolitul ( $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Are fibre de lungimi variabile (până la zeci de mm), dar flexibile și la temperaturi mai ridicate. La  $350\text{-}400^\circ\text{C}$  își pierde apa de cristalizare, la  $800^\circ\text{C}$  devine pulverulent, iar la  $1.521^\circ\text{C}$  se topește. Rezistența la tracțiune a azbestului este cuprinsă între  $30$  și  $40\text{ MN/m}^2$ , dar scade considerabil cu conținutul de impurități. Este foarte higroscopic, rezistivitatea sa ( $10^3\text{...}10^{11}\ \Omega\text{m}$ ) variind foarte mult cu conținutul de umiditate și cu temperatura. Având rigiditatea dielectrică redusă (cca.  $3,5\text{ MV/m}$ ) și pierderi dielectrice mari, azbestul neimpregnat se utilizează doar la tensiuni joase și frecvențe industriale. Se obțin fire (pentru izolarea conductoarelor), țesături (pentru stratificate), benzi și hârtii (pentru izolarea înfășurărilor mașinilor electrice, ca izolație de creștătură etc.). *Azbecimentul*, obținut din fire scurte de azbest și ciment, are rezistență mare la acțiunea arcului electric și a curenților de scurgere pe suprafață și se utilizează pentru confecționarea camerelor de stingere, a plăcilor separatoare, a tablourilor de distribuție etc.

### Roci electroizolante

Din grupa rocilor electroizolante fac parte marmura, ardezia și talcul. Au o structură poroasă, sunt higroscopice, casante și cu proprietăți dielectrice reduse. Prezintă rezistență redusă la acțiunea acizilor și la șocuri termice. Au temperatură de utilizare relativ redusă (marmura:  $110^\circ\text{C}$ ). Se utilizează doar la tensiuni și frecvențe joase: pentru confecționarea unor tablouri de distribuție, plăci de borne, suporturi pentru întreruptoare sau reostate, la izolarea cablurilor (talcul) etc.

### Oxizi metalici

Materialele electroizolante obținute prin sinterizarea oxizilor de aluminiu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sau de magneziu ( $\text{MgO}$ ) au structura cristalină, proprietăți mecanice și electrice foarte bune, conductivitate termică ridicată și rezistă la temperaturi înalte ( $2.000\text{-}3.000^\circ\text{C}$ ). Se prelucrează însă greu și sunt foarte scumpe. Se utilizează ca dielectrics pentru condensatoare, la izolarea conductoarelor electrice, la fabricarea bujiilor, a cuptoarelor electrice pentru temperaturi ridicate etc.

### Materiale refractare

Rezistă la temperaturi foarte înalte fără a se oxida sau a-și modifica proprietățile electrice și mecanice. Din această grupă fac parte oxizii metalici polivalenți ca buri, nitruri, boruri, sulfuri etc. Se utilizează la fabricarea micii sintetice, a circuitelor integrate monolitice NMOS (nitrura de Si), a varistoarelor (carbura de Si), a cermeților (carbura de W, Ti, Cr), pentru reactorii nucleari (carbura de B) etc.

## 5.9.5. Lacuri electroizolante

Lacurile sunt soluții coloidale ale rășinilor sau uleiurilor în solvenți organici. După uscarea ele formează, pe suprafața materialelor pe care se aplică, pelicule electroizolante. Întărirea are loc ca urmare a evaporării solvenților sau a unor

procesele fizico-chimice (evaporarea solvenților fiind urmată de reacții de oxidare, de policondensare sau poliadiție). Un lac este constituit dintr-o substanță peliculogenă, un solvent volatil (benzină, white-spirit, hidrocarburi aromatice, alcooli mono- și dihidroxilici, eteri, esteri etc.) și materiale de adaos (sicativi, plastifianți, coloranți etc.). În procesul de dizolvare a substanței peliculogene, moleculele solvenților pătrund printre macromoleculele rășinii și le solvatează, adică se leagă de valențele libere ale acestora. Îndepărtându-se unele de altele forțele de legătură slăbesc și macromoleculele se pot deplasa în solvent. Se realizează astfel, dizolvarea rășinii.

Lacurile electroizolante se clasifică în funcție de domeniul de utilizare, de compoziția chimică, de stabilitatea termică, de mediul de uscare etc. După compoziția chimică, lacurile electroizolante se împart în lacuri uleioase (pe bază de uleiuri sicative), lacuri oleobituminoase (pe bază de uleiuri sicative modificate cu bitumuri) și lacuri rășinoase (pe bază de rășini naturale sau sintetice ca atare sau modificate). După modul de utilizare, se grupează în lacuri de impregnare, de acoperire, de lipire și de emailare.

### **Lacuri de impregnare**

Utilizate la impregnarea înfășurărilor mașinilor electrice, lacurile le asigură acestora o rezistență mecanică superioară împotriva vibrațiilor și a forțelor electrodinamice, o transmisie mai bună a căldurii disipate în înfășurări (conductivitatea termică este mai mare decât a aerului), le protejează împotriva umidității și a altor agenți chimici și le îmbunătățesc proprietățile dielectrice (rezistența de izolație și tensiunea de străpungere față de miezul feromagnetic cresc). Pentru aceasta se utilizează lacuri cu baza constituită din molecule mici și eventual fără solvenți, pentru ca întărirea să se producă la temperaturi joase (120-130°C), la care izolația conductoarelor nu se deteriorează. Pentru impregnarea hârtiilor și țesăturilor se utilizează, în general, lacuri uleioase sau oleobituminoase.

### **Lacuri de acoperire**

Protejează materialele electroizolante împotriva agenților externi (umiditate, agenți chimici etc.), formând pelicule cu permeabilitate scăzută la umiditate și vapori, de apă și cu bune proprietăți mecanice. Sunt lacuri cu uscare în aer: gliptalice, epoxidice, poliuretanică, pe bază de celuloză, polistiren etc.

### **Lacuri de lipire**

În această grupă intră lacurile utilizate la fabricarea produselor pe bază de mică (cu șerllac, rășini epoxidice, siliconice etc.), pentru lipirea izolanților solizi între ei sau pe metale (epoxidice) și cele utilizate la fabricarea stratificatelor (considerate și ca lacuri de impregnare).

### **Lacuri de emailare**

Peliculele formate de lacurile de emailare trebuie să adere bine la suprafețele conductoarelor, să fie nehigroscopice, elastice, (pentru evitarea fisurilor) și cu bune proprietăți dielectrice. Se utilizează lacuri uleioase (în telecomunicații), polivinilacetice (pentru 50% din conductoarele emailate), poliamidice, epoxidice, poliuretanică, tereftalice, siliconice etc.

## 5.10. Compounduri

Compoundurile sunt amestecuri de rășini, uleiuri, ceruri sau bitumuri care se înmoaie și se topesc cu ușurință. Aceste mase izolante (de impregnare, de umplere sau de acoperire) ocupă spațiile goale din sistemele de izolație care astfel devin mai compacte, mai rezistente la umiditate, cu conductivitate termică și proprietăți electrice mai bune etc. Cele mai utilizate sunt compoundurile ceroase (pe bază de ulei-hidrogenat, masa galbenă etc.) și bituminoase. **Masa galbenă** (colofoniu + ulei mineral) prezintă o importanță deosebită pentru impregnarea hârtiei pentru cabluri de tensiuni medii; colofoniul absoarbe hidrogenul (produs prin descărcări parțiale) din izolația cablului, împiedicând apariția unor presiuni mari, care ar mări volumul cavităților și ar intensifica procesul de degradare a izolației. **Compoundurile bituminoase** sunt nehigroscopice, au proprietăți electrice foarte bune și cost redus. Se utilizează amestecuri de bitum cu petrol sau asfalturi, bitum cu colofoniu și ulei mineral etc. În domeniul frecvențelor înalte se utilizează amestecuri de polietilenă, cerezină, parafină, poliizobutilenă etc.

## 5.11. Produse pe bază de rășini sintetice

### 5.11.1. Mase plastice presate

Pentru obținerea pieselor electroizolante cu proprietăți termomecanice bune și cost redus nu se utilizează rășini pure, ci amestecuri de presare constituite din rășini (lianți) și materiale de umplutură (organice sau anorganice), la care se adaugă plastifianți, coloranți etc. Proprietățile maselor plastice presate depind de natura și conținutul rășinii, al materialului de umplutură, al plastifianților etc..

**Materialele de umplutură organice** (țesături, rumeguș de lemn etc.) reduc greutatea și costul produselor, le măresc rezistența mecanică etc., iar cele **anorganice** le măresc stabilitatea termică și chimică. Plastifianții (esteri uleioși) - necesari pentru buna desfășurare a procesului tehnologic - sunt materiale polare, motiv pentru care masele plastice presate au proprietăți dielectrice mai reduse decât rășina de bază. Se realizează: mase plastice pe bază de rășini termoplastice, pe bază de rășini termoreactive (izotrope), armate cu fire de sticlă (cu caracteristici mecanice superioare) etc.

### 5.11.2. Mase plastice stratificate

Acestea se obțin din straturi suprapuse de hârtie, țesături sau furnir de lemn, impregnate cu rășini termorigide și se utilizează la confecționarea tablourilor de distribuție, a suporturilor pentru circuite imprimate, a pieselor izolante pentru transformatoare și întrerupătoare etc. Cele pe bază de țesături de bumbac (textolit) au proprietăți mecanice mai bune și se utilizează în construcția pieselor izolante cu solicitări mecanice intense (roți dințate, tije portperii, pene pentru mașini electrice



etc.). Stratificatele din țesături de sticlă (sticlotextolit) au proprietăți electrice, termice și mecanice foarte bune și se utilizează în schemele de izolație ale mașinilor de puteri mari, pentru camerele de stingere a arcului electric etc. Cele pe bază de azbest prezintă stabilitate chimică și termică ridicată, dar proprietăți dielectrice reduse și se utilizează pentru confecționarea unor piese izolante care funcționează la temperaturi ridicate sau în medii toxice.

### 5.11.3. Folii electroizolante

Sunt materiale omogene, cu suprafață netedă și grosimi care variază între unități și mii de  $\mu\text{m}$ . Se obțin din derivați ai celulozei (triacetat, etilceluloză etc.), rășini de polimerizare (polietilenă, polistiren, polipropilenă, PVC, PTFE etc.) sau rășini de poli-condensare termoplastice (poliamide, poliesteri, poliimide, policarbonați), proprietățile lor depinzând atât de natura chimică a materialelor de bază, cât și de caracteristicile proceselor tehnologice. Sunt materiale flexibile, cu absorbție de apă redusă (PTFE etc.), rigiditate dielectrică mare (tereftalatul de polietilenă, poliimidele etc.), cu pierderi dielectrice reduse (polietilena, polipropilenă etc.) sau cu rezistivitate electrică înaltă (polietilena etc.). Se utilizează la izolarea conductoarelor, a cablurilor, a capetelor de bobine; la fabricarea benzilor adezive, a circuitelor imprimate, a izolațiilor de creștătură combinate (preșpan-hostafan-preșpan, hostafan-mică-hostafan etc.), a izolațiilor între straturi etc.

### 5.11.4. Fire și țesături

Firele se obțin din substanțe organice cu molecule liniare (celuloză, rășini sintetice etc.), sau anorganice (sticlă, azbest etc.). Firele sintetice (organice) se caracterizează prin valori foarte mari ale rezistenței la rupere prin tracțiune; aceasta se datorează orientării macromoleculilor în direcția firelor. Firele de sticlă se obțin din boro-silicați, sunt rezistente la agenți chimici și radiații, neinflamabile, cu absorbție redusă de apă și stabilitate termică ridicată. Se utilizează - în general, impregnate - la izolarea conductoarelor, la fabricarea țesăturilor etc.

#### Țesăturile

Se obțin din fire de diferite lungimi și compoziții chimice: bumbac, mătase, poliamide, sticlă, azbest etc. Proprietățile lor dielectrice depind de natura firelor, iar cele mecanice de caracteristicile fizico-chimice ale firelor, de parametrii proceselor tehnologice etc. Se impregnează sau se lăcuiesc, obținându-se țesături galbene (impregnate cu ulei sicativ și rășini sintetice) sau negre (impregnate cu ulei sicativ și bitum), cu proprietăți care depind și de caracteristicile lacurilor de impregnare. Se utilizează la fabricarea stratificatelelor, a benzilor adezive, a izolațiilor compuse etc.

### 5.11.5. Materiale expandate (poroplaste)

Sunt materiale cu structură poroasă, obținute (cu ajutorul unor substanțe care dezvoltă gaze) din polietilenă, polistiren, PVC, poliuretani etc. Pot fi rigide, elastice sau plastice, cu pori deschiși sau închiși (cu dimensiuni între 0,1 și 0,25 mm) și conductivitate termică variind între 0,03 și 0,04 W/mK. Se utilizează ca izolanți electrici, termici, acustici, pentru amortizarea oscilațiilor mecanice etc.

## 5.12. Materiale compozite

Materialele compozite se obțin prin îmbinarea intimă a două corpuri nemiscibile cu structuri diferite; calitățile lor individuale se combină și se completează, rezultând, astfel, materiale cu performanțe superioare (îndeosebi în ceea ce privește proprietățile mecanice și densitatea).

Fiind utilizate - în primul rând - la confecționarea structurilor diferitelor produse și echipamente, materialele compozite au drept element de bază *ranfortul* (în general fibre), a cărei funcție principală este de a prelua eforturile mecanice aplicate materialului. Din acest motiv, ranfortul este constituit dintr-un solid cu proprietăți mecanice foarte bune (rezistență la rupere și la oboseală foarte mare) și densitate mică. Principalele ranforturi utilizate sunt fibrele de sticlă, cărbune, bor și poliamide aromatice (Tabelul 5-7).

**Tabelul 5-7 Caracteristici ale unor ranforturi fibroase pentru materiale compozite**

Ranfort	Diametru [μm]	Densitatea [kg/dm <sup>3</sup> ]	Rezistența la rupere prin tracțiune [GN/m <sup>2</sup> ]	Modulul lui Young [GN/m <sup>2</sup> ]
Fibre de sticlă	3-20	2,5-2,6	2,5-3,5	73-74
Fibre de carbon	7-10	1,8-2	2,4-7	230-700
Fibre de poliamide aromatice	13	1,4	3	135
Fibre de carbură de siliciu	15	2,6	2,5	200
Fibre de alumină	9	3,2	2,6	250

Fibrele pentru ranforturi - fiind fragile și cu rezistență redusă la abraziune și coroziune chimică - sunt „înfășurate” într-o matrice. Rolul acestei matrici este de a lega ranforturile între ele, de a uniformiza repartiția sarcinii aplicate și de a proteja ranfortul, față de mediul ambiant. Matricile utilizate pot fi organice (polimeri), metalice sau ceramice.

Compozitele cele mai utilizate în industria electrotehnică și în industriile clasice sunt, în general, obținute din fibre de sticlă și matrice organică (rășini poliesterice, epoxidice sau fenolice). Pentru aplicații speciale (aeronautică, sport etc.) se utilizează fibre de carbon, bor și poliamide aromatice.

Proprietățile compozitelor depind atât de structura lor fizică, cât și de structura fizico-chimică a constituenților ; toate sunt însă anizotrope, cu rezistență mare la oboseală și la rupere prin tracțiune în direcția fibrelor, cu rezistivitate electrică mare, rezistente la oxidare și coroziune etc. Astfel, compozitul fibră de

sticlă-rășină epoxi are rezistivitatea transversală de  $10^{12} \Omega\text{m}$ , rigiditatea dielectrică 18 MV/m, reziliența 50 J/m, rezistență la flexiune (și la tracțiune) peste  $1 \text{ GN/m}^2$ , densitatea de ordinul a  $1,6 \text{ kg/m}^3$  și conductivitatea termică de  $0,2 \text{ W/mK}$ . Temperatura de utilizare este limitată de cea a rășinii utilizate și are valori în intervalul 100... 130°C (în anumite cazuri se poate ajunge la 200°C).

Compozitele se pot utiliza în medii agresive (de exemplu, în  $\text{SF}_6$ ) fără a se degrada, au absorbție de apă foarte redusă și durată de viață mare.

Utilizările materialelor compozite devin tot mai numeroase, compozitele regăsindu-se în majoritatea produselor performante din aeronautică (structuri, frâne), comunicații (antene), cercetare spațială (sateliți, bucle termice), construcții (rezervoare, tuburi), transporturi (containere, cabine), biomedicină (proteze, valve cardiace), sport (rachete, schiuri, bărci), automobile (caroserii, suspensii), armament (structuri a-magnetice, blindaje) etc. În industria electrotehnică, materialele compozite fibroase se utilizează în construcția mașinilor electrice de puteri mari (inele de calare a bobinelor statorice), transformatoarelor (benzi de fretare pentru miezuri, inele de calare a bobinelor, tije, manșoane etc.), izolatoarelor pentru liniile de medie, înaltă și foarte înaltă tensiune, a întreruptoarelor, a plăcilor de borne etc.



## Cap.6. Materiale magnetice

### 6.1. Proprietăți magnetice generale

Starea de magnetizație a unui material este de natură atomică. Mișcările pe orbite ale electronilor și spinul lor dau naștere momentelor magnetice orbitale și de spin care se cuplează astfel încât un strat electronic complet să aibă moment magnetic total nul.

Reacția unui material la aplicarea unui câmp magnetic exterior  $\overline{H}$  este caracterizată prin *inducția magnetică*  $\overline{B}$  care reprezintă intensitatea câmpului magnetic în interiorul materialului pentru că momentele magnetice ale atomilor tind să se alinieze cu câmpul exterior.

Între inducția magnetică  $\overline{B}$  și intensitatea câmpului magnetic  $\overline{H}$  există relația:

$$\overline{B} = \mu_0 \mu_r \overline{H} \quad (57)$$

unde  $\mu_0$  este permeabilitatea magnetică a vidului, iar  $\mu_r$  este permeabilitatea relativă a materialului.

Magnetizația  $\overline{M}$  a corpului este diferența dintre intensitatea câmpului magnetic în vid și intensitatea câmpului în materialul considerat, adică:

$$\overline{M} = \frac{\overline{B}}{\mu_0} - \overline{H} = \overline{H}(\mu_r - 1) = \chi_m \overline{H} \quad (58)$$

deci:

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (59)$$

Mărimea  $\chi_m$  este *susceptivitatea magnetică* a materialului și în funcție de valoarea sa materialele se împart în:

- materiale **diamagnetice** cu  $\chi_m \approx -10^{-5}$  (deci  $\mu_r = 1 + \chi_m \leq 1$ ), adică magnetizația este slabă și de sens contrar câmpului exterior și sunt independente de temperatură, materialele cu comportare diamagnetică fiind: hidrogenul, carbonul, argintul, aurul, cuprul, plumbul, zincul, germaniul, seleniul, siliciul, etc.;
- materiale **paramagnetice** cu  $\chi_m \approx 10^{-4} \dots 10^{-3}$  (deci  $\mu_r = 1 + \chi_m \geq 1$ ), adică magnetizația este slabă și de același sens cu

câmpul exterior; au în absența câmpului magnetic un moment magnetic propriu, iar momentele magnetice, orientate haotic datorită agitației termice, tind să se orienteze în direcția câmpului aplicat, astfel, materialele cu comportare paramagnetică sunt: oxigenul, aluminiul, platina, cromul, manganul, potasiul, etc.

- materialele **feromagnetice** cu  $\chi_m = 10^2 \dots 10^5$ , adică materialele se magnetizează puternic.
- materialele **antiferomagnetice** au în structura lor două subrețele magnetice cu momente magnetice egale și orientate antiparalele. Materialele antiferomagnetice (cele mai cunoscute fiind MnO, FeO) nu au importanță practică deosebită.
- materialele **ferimagnetice** au de asemenea două (sau mai multe) subrețele magnetice cu momente opuse dar acestea sunt recompensate. Dependența  $B = B(H)$  are forma unei curbe de histererezis ca la materialele feromagnetice. Materialele ferimagnetice au rezistivități ridicate care determină pierderi reduse prin curenți turbionari, ceea ce le avantajează față de materialele feromagnetice (bune conductoare electrice). Materialele metalo-ceramice cu proprietăți ferimagnetice se numesc ferite. După metalul caracteristic din structura lor acestea poartă denumirea de ferite de cobalt, de nichel, etc.

**Diamagnetismul** este o proprietate generală a materiei, datorată deformării orbitalilor sub acțiunea câmpului magnetic exterior. Din punct de vedere tehnologic materialele diamagnetice nu prezintă interes, cu excepția supraconductoarelor care se utilizează ca ecrane magnetice.

**Paramagnetismul** este fenomenul prin care, în absența unui câmp magnetic exterior, momentele magnetice ale atomilor dintr-un material se află în stare de dezordine termică (v. Figura 6-1,a), dar ele dobândesc un anumit grad de aliniere în direcția unui câmp magnetic  $H$  aplicat din exterior (v. Figura 6-1,b); deoarece numai o parte neînsemnată a momentelor magnetice reușesc să se orienteze, magnetizația materialelor paramagnetice este foarte redusă și variază liniar cu intensitatea câmpului magnetic (v. Figura 6-1,c)

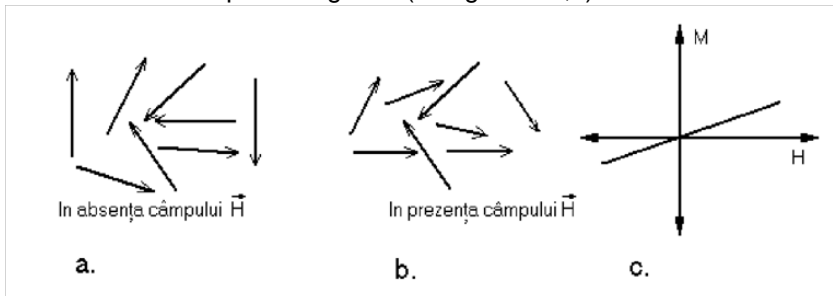


Figura 6-1 Paramagnetismul materialelor

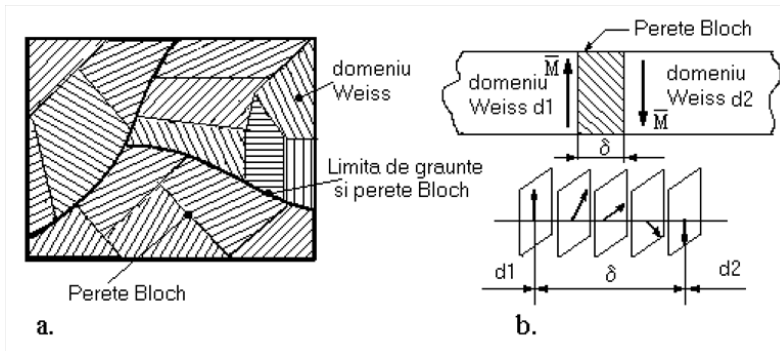


Figura 6-2 Feromagnetismul materialelor

**Feromagnetismul** este fenomenul prin care momentele magnetice ale atomilor din anumite domenii ale unui material sunt practic aliniate în aceeași direcție și sens. Zona în care există aceeași orientare a momentelor magnetice (posedă o magnetizație spontană) se numește *domeniu magnetic* sau *domeniu Weiss* (v. Figura 6-2,a). La trecerea de la un domeniu cu o orientare la domeniul vecin cu altă orientare se formează un strat subțire numit *perete Bloch* în care momentele magnetice ale atomilor suferă rotații treptate succesive (v. Figura 6-2,b) Un monocristal (sau într-un material policristalin fiecare grăunte cristalin) poate conține mai multe domenii Weiss separate de pereți Bloch (v. Figura 6-2,a) ; în mod evident, limitele dintre grăunți sunt pereți Bloch datorită deranjamentului din rețea existent în aceste zone.

În absența unui câmp magnetic exterior suma vectorială a orientării magnetice a domeniilor poate fi nulă iar materialul nu apare afectat de nici o magnetizație spontană. Când se aplică un câmp magnetic exterior acestui material, domeniile magnetice a căror orientare este apropiată de cea a câmpului vor crește prin deplasarea pereților Bloch.

Principala caracteristică a materialelor feromagnetice o constituie variația neliniară a inducției magnetice cu intensitatea câmpului magnetic. Variația neunivocă a inducției magnetice într-un material feromagnetic asociată variației ciclice a intensității câmpului magnetic se numește **ciclu (buclă) histerezis** (v. Figura 6-3) și are următorii parametri caracteristici:

- *inducția de saturație*  $B_s$  este valoarea limită pe care o poate atinge inducția magnetică, oricât de mare ar fi intensitatea câmpului magnetic;
- *inducția remanentă*  $B_r$  este valoarea inducției magnetice care se manifestă în material atunci când intensitatea câmpului se reduce la zero;
- *câmpul coercitiv*  $H_c$  este valoarea câmpului magnetic de sens opus care anulează inducția remanentă a materialului.

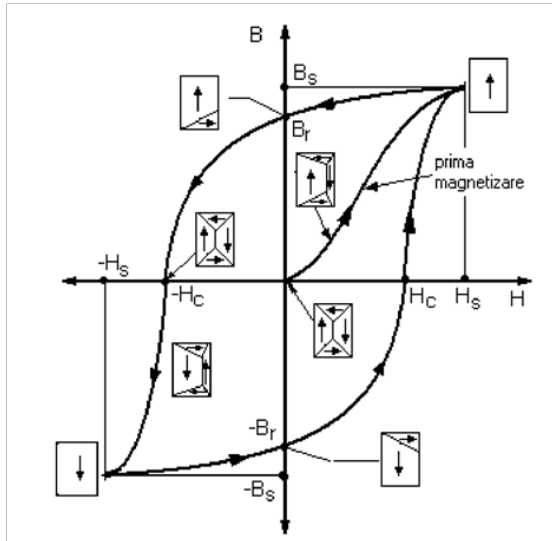


Figura 6-3 Ciclul histerezis al materialelor feromagnetice

Materialele la care se menține starea de magnetizare după anularea câmpului exterior (suprafața ciclului histerezis mare) sunt **materiale magnetic dure**, iar cele la care magnetizația dispăre (suprafața ciclului histerezis mică) sunt **materiale magnetic moi**.

Suprafața buclei histerezis reprezintă energia consumată pe unitatea de volum de material, pentru reorientarea momentelor magnetice a domeniilor și pentru deplasarea pereților Bloch, în timpul unui ciclu complet de variație a câmpului magnetic exterior. Această energie este disipată sub formă de căldură.

Proprietăți feromagnetice au metale cum ar fi fierul, cobaltul, nichelul și multe aliaje, unele obținute din elemente nemagnetice.

**Ferimagnetism.** Există materiale în care orientarea momentelor magnetice pe domenii este antiparalelă - adică aceeași direcție dar sensuri diferite (**antiferomagnetism**); dacă valorile momentelor magnetice cu un sens sunt diferite de cele cu sens contrar (**antiferomagnetism necompensat**), există o magnetizație spontană a domeniului; fenomenul prin care, în absența unui câmp magnetic exterior, momentele magnetice ale atomilor sau ionilor vecini sunt astfel dispuse datorită interacțiunii dintre ele, încât ele se compensează parțial, rămânând un moment magnetic rezultat se numește *ferimagnetism*.

Materialele feromagnetice sunt oxizi cu formula generală similară magnetitei ( $\text{FeOFe}_2\text{O}_3$ ), cunoscuți sub numele generic de *ferite*.

Sub acțiunea unui câmp magnetic exterior feritele au proprietăți asemănătoare materialelor feromagnetice. Fiind compuși ionici au rezistivitatea electrică foarte mare, ceea ce împiedică apariția curenților turbionari (curenți Foucault) și încălzirea prin efect Joule a materialului magnetic.



### 6.1.1. Pierderi în materiale magnetice

Pierderile principale — din punctul de vedere al aplicațiilor tehnice — există, în principal, în corpurile fero- și feromagnetice, și se datorează histerezisului magnetic și curenților turbionari (Foucault) care se induc în ele, în câmpuri magnetice variabile în timp.

#### Pierderile prin histerezis magnetic

Aceste pierderi sunt proporționale cu aria ciclului histerezis. La parcurgerea unui ciclu de histerezis se dezvoltă, în unitatea de volum, energia  $W = \oint HdB = A_h$ , unde  $A_h$  este aria ciclului histerezis și se măsoară în unități BxH. Astfel, în unitatea de timp se dezvoltă puterea  $P_h = f \oint HdB = fA_h$ , unde  $f$  este frecvența câmpului magnetic variabil.

Aria  $A_h$  are următoarea expresie,  $A_h = \eta B_{max}^n$ , dedusă pe cale experimentală de Steinmetz, în care  $\eta$  se numește *coeficientul lui Steinmetz*, iar  $n$  se numește *exponentul lui Steinmetz*, iar acestea depind de natura materialului. Se consideră,  $\eta \approx 2$ , iar pentru tolele feromagnetice uzuale,  $1,6 < n < 2$ . Astel se poate scrie  $p_h = \eta f B_{max}^n$ , iar dacă  $V$  este volumul materialului, pierderile prin histerezis în corp, au expresia  $P_h = V \eta f B_{max}^n$ .

Pentru micșorarea pierderilor prin histerezis, în tehnică se utilizează materiale magnetice moi care au ciclul de histerezis îngust ( $H_C$  mic) și deci  $A_h$  mică.

#### Pierderile prin curenți turbionari

Sunt produse de curenții electrici induși în corpurile feromagnetice, conform legii inducției electromagnetice, de câmpurile magnetice variabile. Într-o toală feromagnetică de grosime  $\Delta$  și de rezistivitate  $\rho$ , se dezvoltă în unitatea de timp și volum energia  $p_f = \pi^2 \Delta f B_{max}^2 / 6\rho$ , astfel că în volumul  $V$  al materialului se dezvoltă căldura  $P_f = \frac{\pi^2}{6\rho} \Delta^2 f^2 B_{max}^2 V$ .

Pentru a micșora pierderile prin curenți turbionari, se folosesc tole feromagnetice subțiri ( $\Delta=0,5$  mm; 0,35 mm, uneori chiar mai puțin); de asemenea, prin alierea fierului cu siliciul, se obține mărirea rezistivității, astfel obținându-se micșorarea pierderilor. Datorită faptului că siliciul mărește duritatea tablei și o face casantă, nu pot fi depășite anumite procente de siliciu. În tehnică uzuale sunt tablele cu 2% Si pentru mașinile electrice rotative și cu 4% Si pentru miezurile transformatoarelor electrice.

Pierderile totale se obțin adunând cele două feluri de pierderi, acestea crescând cu pătratul frecvenței câmpului magnetic.

## 6.2. Caracteristici generale ale materialelor magnetice

În grupa materialelor magnetice se includ îndeosebi materialele fero- și feromagnetice, caracterizate prin valori mari ale câmpului coercitiv și energiei

magnetice înmagazinate sau ale permeabilității și inducției magnetice de saturație, în stare magnetizată acestea exercită acțiuni pondero-motoare asupra corpurilor feromagnetice, dependența dintre inducția și intensitatea câmpului magnetic este neliniară, iar la variații ciclice ale inducției magnetice în ele se produc pierderi de energie.

**Materialele magnetic moi** se caracterizează prin ciclul de histerezis îngust, câmp coercitiv  $H_c$  mic și inducție de saturație  $B_s$  și permeabilitate magnetică mari. Utilizările lor sunt legate de caracteristicile ciclului de histerezis. Astfel, materialele cu ciclul de histerezis înclinat și  $k = B_r/B_s < 0,5$  (Figura 6-4,a), deci cu permeabilitatea magnetică mică și constantă (în raport cu  $H$ ), se utilizează la confecționarea miezurilor bobinelor de inductivitate constantă. Materialele cu ciclul de histerezis mai înclinat și  $k=0,5\dots 0,8$  (Figura 6-4,b), adică cu permeabilitate magnetică mare și dependență de  $H$ , se utilizează la fabricarea miezurilor transformatoarelor, electromagneților etc. Materialele cu ciclul dreptunghiular (pentru care  $k>0,8$ ) se utilizează la fabricarea miezurilor pentru memorii magnetice, circuite de comutație etc.

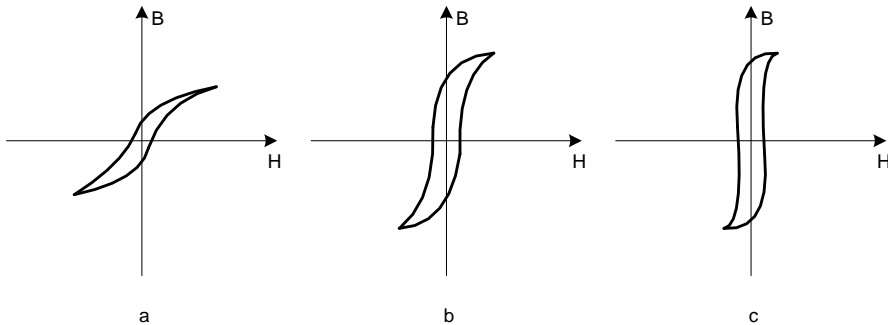


Figura 6-4 Ciclul histerezis ale materialelor magnetic moi

**Materialele magnetic dure** au ciclul de histerezis lat, inducție remanentă  $B_r$ , și câmp coercitiv mare. Utilizările lor sunt, de asemenea, legate de mărimea lui  $k$ : cele pentru care  $k<0,4$  (Figura 6-5,a) se utilizează pentru înregistrarea magnetică a informației, iar cele cu  $k>0,4$  (Figura 6-5, b și c) la fabricarea magneților permanenți.

Trebuie remarcat că denumirea de material magnetic dur sau moale se referă îndeosebi la caracteristicile magnetice și nu la duritatea fizică a corpurilor, unele aliaje utilizate la fabricarea magneților permanenți având o duritate mai mică decât o serie de fonte și oțeluri utilizate ca materiale magnetic moi.

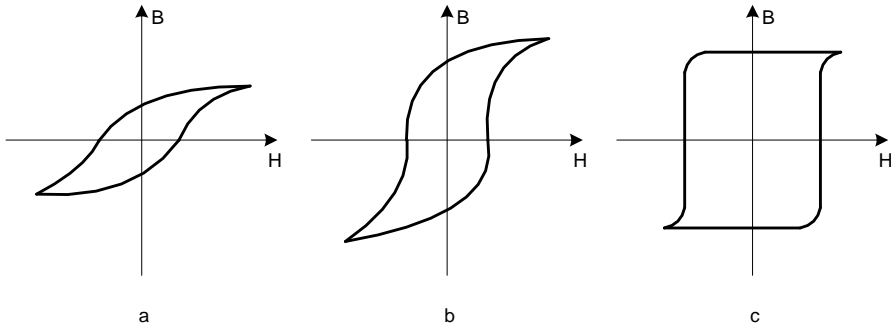


Figura 6-5 Ciclul histerezis ale materialelor magnetic dure

## 6.3. Dependența proprietăților magnetice de diverși factori

### 6.3.1. Influența temperaturii

Creșterea temperaturii intensifică mișcarea de agitație termică a particulelor și - îngreunând orientarea momentelor magnetice rezultante ale domeniilor Weiss - provoacă o reducere a magnetizației corpului. Pentru valori ale temperaturii superioare temperaturii Curie materialele își pierd proprietățile feromagnetice și trec în starea paramagnetică (fig. 10.3). Drept urmare, în cazul materialelor magnetic moi apare o reducere a permeabilității magnetice și a inducției magnetice de saturație. În cazul materialelor magnetic dure, creșterea temperaturii determină o reducere a energiei magnetice înmagazinate și a inducției remanente  $B_r$ .

Scăderea inducției remanente este legată de reducerea - la creșterea temperaturii - atât a magnetizației domeniilor Weiss, cât și a anizotropiei de magnetizare. În primul caz este vorba de un proces reversibil, scăderea inducției anulându-se când corpul își recapătă temperatura inițială. În cel de-al doilea caz, apare un câmp demagnetizant care provoacă o rotație ireversibilă a vectorului magnetizație și deci o reducere ireversibilă a inducției remanente (ce poate fi compensată doar printr-un proces de remagnetizare). Micșorarea inducției remanente depinde de natura materialului, la aliajele Alni și Alnico fiind de zece ori mai mică decât la ferite.

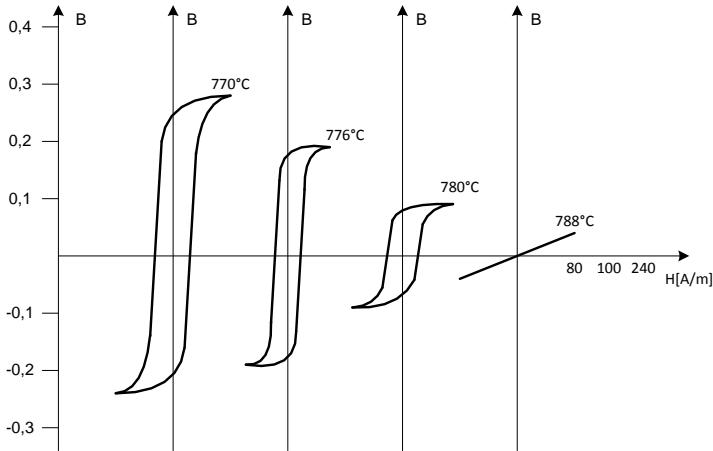


Figura 6-6 Cicluri histerezis ale fierului pentru temperaturi vecine punctului Curie (770°C)

### 6.3.2. Influența impurităților

Impuritățile deformează rețeaua cristalină a corpurilor producând tensiuni mecanice interne. Aceste eforturi (locale) împreună cu acțiunea de „fixare” a pereților Bloch de către impurități (nemagnetice) îngreunează - în cazul magnetizării - deplasarea pereților Bloch și, deci, magnetizarea materialului și împiedică - în cazul corpurilor magnetizate - revenirea pereților Bloch în poziția inițială, contribuind astfel la mărirea inducției remanente și a câmpului coercitiv. Impuritățile care formează cu materialele feromagnetice soluții suprasaturate (instabile) ies, cu timpul, din soluții. Se modifică astfel tensiunile interne și se distrug, local, rețelele cristaline, ceea ce determină variații ale proprietăților magnetice ale corpurilor.

Permeabilitatea magnetică este mai redusă în cazul materialelor cu structură din cristalite mici. Într-adevăr, în straturile superficiale ale cristalitelor (datorită tensiunilor mecanice) magnetizarea este mai redusă decât în interiorul lor, iar în cazul cristalitelor mici ponderea straturilor superficiale în unitatea de volum a corpului crește.

În funcție de natura, procesul tehnologic și destinația materialelor magnetice, impuritățile existente pot fi considerate ca *favorabile* sau *dăunătoare*. Astfel, în cazul materialelor magnetice moi, sulful, fosforul, manganul, azotul, hidrogenul, oxigenul, carbonul etc. determină o reducere a proprietăților magnetice caracteristice ale acestora, constituind impurități dăunătoare (carbonul mărește câmpul coercitiv și reduce permeabilitatea și inducția magnetică de saturație, sulful și fosforul măresc câmpul coercitiv etc.). Spre deosebire de acestea, Ni, Co, Si, Al, Cr, Mo etc. constituie impurități (sau adaosuri) favorabile. Astfel, nichelul mărește permeabilitatea magnetică și scade câmpul coercitiv, cobaltul crește inducția la saturație, siliciul mărește rezistivitatea aliajului, reducând pierderile prin curenți turbionari (dar scade plasticitatea și inducția la saturație) etc.

În cazul materialelor magnetice dure, o serie de elemente considerate ca dăunătoare pentru o grupă de aliaje sunt favorabile pentru altele. De exemplu, Mn, S, Si, Se etc. sunt dăunătoare aliajelor Alni și Alnico, dar favorabile aliajelor cu structură columnară. Întotdeauna însă carbonul este considerat ca element nefavorabil, aliajele cu un conținut mare de carbon având inducție remanentă, câmp coercitiv și indice de calitate redus.

### 6.3.3. Influența solicitărilor mecanice

Sub acțiunea forțelor mecanice are loc rearanjarea momentelor magnetice ale corpului (deci modificarea echilibrului energetic al rețelei cristaline) și apariția unor tensiuni mecanice locale care frânează deplasarea pereților Bloch. Se produc deci variații ale proprietăților magnetice (permeabilitatea și inducția magnetică scad etc.), importanța lor depinzând atât de natura și structura materialului, cât și de mărimea și direcția forței perturbatoare față de direcțiile de cristalizare ale corpului.

Corpurile a căror permeabilitate magnetică variază - într-un sens sau altul - sub acțiunea unor solicitări mecanice își modifică și dimensiunile dacă sunt introduse într-un câmp magnetic. Acest fenomen - numit *magnetostricțiune* - este utilizat pentru producerea ultrasunetelor.

Efectele solicitărilor dinamice, ale șocurilor și vibrațiilor asupra proprietăților materialelor magnetice - mai ales asupra celor dure - sunt mai puțin cunoscute. Cu excepția însă a unui număr redus de aliaje (Alni, Alnico), proprietățile magnetice ale materialelor se reduc în urma acestor solicitări.

### 6.3.4. Influenții tratamentelor termice

În urma operațiilor tehnologice de stanțare, tăiere, îndoire, găurire etc., rețeaua cristalină a corpului suferă deformații importante. Apar astfel, tensiuni mecanice interne care înrăutățesc caracteristicile magnetice, efectul fiind cu atât mai important, cu cât materialul are proprietăți mai bune și dimensiuni mai reduse.

Pentru înlăturarea acestor efecte negative, materialele magnetice se supun unor tratamente termice ale căror caracteristici (temperatură, mediu ambiant etc.) depind atât de tipul, dimensiunile și structura materialului, cât și de specificul circuitului magnetic în care acesta urmează să fie utilizat. Astfel, în cazul fierului, pentru piese solicitate la  $B > 1,2 \text{ Wb/m}^2$  se indică temperatura de  $760^\circ\text{C}$ , la piese normale  $T = 800 \pm 10^\circ\text{C}$ , iar la piese de secțiuni mari  $T > 910^\circ\text{C}$ . În urma acestor tratamente se elimină tensiunile interne din corp, se reface structura cristalină și scade câmpul coercitiv, rezistivitatea electrică și pierderile prin histerezis. În cazul magneților permanenți obținuți prin turnare se efectuează mai întâi un tratament termic de omogenizare (între  $1.100$  și  $1.300^\circ\text{C}$  pentru Alni și Alnico) și apoi unul de revenire, la o temperatură mai redusă ( $600^\circ\text{C}$  pentru Alni).

### 6.3.5. Influența altor factori

*Câmpurile magnetice exterioare* determină o reducere a magnetizației corpurilor (mai ales a magneților permanenți), efectul demagnetizant al acestora depinzând atât de mărimea intensității lor, cât și de caracteristicile punctelor de funcționare ale magneților.

*Radiațiile* nu modifică caracteristicile magnetice, dar magneții supuși unor asemenea solicitări pot deveni radioactivi.

## 6.4. Materiale magnetice moi

Caracteristica cea mai importantă a acestei grupe de materiale magnetice este aceea de a se demagnetiza la încetarea acțiunii câmpului magnetizant. Pentru aceasta, ele trebuie să aibă un conținut cât mai redus de impurități (îndeosebi carbon) și să nu prezinte tensionări locale (interne).

### 6.4.1. Fierul

În funcție de gradul de puritate, se disting trei sorturi de fier moale: tehnic pur, pur și extrapur.

#### Fierul tehnic pur (99,5 . . 99,9%)

Se cunoaște sub diferite denumiri, ca fier Armco (American Rolling Mill Co), suedez, moale, magnetic etc. și are un conținut redus de carbon (0,03%), fosfor și sulf. Are permeabilitatea magnetică maximă  $\mu_{rmax}=8.000...32.000$ ,  $H_c=6...100$  A/m,  $B_r=1...1,2$  T,  $\rho=0,1 . . 0,15$   $\mu\Omega$ m și  $B_s>2$  T.

#### Fierul pur

Având gradul de puritate de 99,90...99,98% și cel *extrapur* (99,99%) se obțin în condiții și prin procese tehnologice speciale. Fiind foarte scumpe, nu se utilizează decât în cazuri speciale.

#### Fierul electrolitic

Este constituit din particule alungite, are o puritate foarte mare și se utilizează mai ales la fabricarea aliajelor Alni și Alnico. *Fierul carbonil* (obținut prin procedeul carbonil) este constituit din particule sferice - deci nu deteriorează izolația tolelor aflate la presiuni mari - și se utilizează și la obținerea - prin presare - a unor miezuri magnetice pentru frecvențe înalte, a magneților sinterizați Alni și Alnico etc.

Fierul moale are două zone critice de fragilitate: prima între 260 și 450°C, iar a doua între 815 și 1.050°C. Pentru temperaturi cuprinse în aceste zone materialul este foarte casant, neputând fi prelucrat mecanic (prin laminare, forjare etc.).

## 6.4.2. Oțeluri și fonte

### Oțelurile

Se utilizează la confecționarea circuitelor magnetice care necesită caracteristici mecanice superioare. Au inducție de saturație destul de mare (între 1,4 și 2 T), dar permeabilitate magnetică redusă ( $\mu_{rmax}=2.000$ ) și câmp coercitiv mare (2 kA/m). Pentru obținerea unor caracteristici mecanice superioare, oțelurile se aliază cu Cr, V, Co etc., iar pentru îmbunătățirea caracteristicilor termice cu Cr și W. În aceste cazuri, inducția de saturație poate depăși 2T, câmpul coercitiv scade sub 1.000 A/m, iar rezistivitatea crește până la 0,7  $\mu\Omega\text{m}$ .

### Fontele

Au caracteristici inferioare oțelurilor, dar sunt mai ieftine. Caracteristicile lor magnetice variază foarte mult în funcție de natura și structura materialului. Astfel, cementita are  $H_c=8$  kA/m, spre deosebire de fonta feritică sau fierul  $\alpha$  la care  $H_c<200$  A/m.

Proprietățile magnetice ale fontelor se modifică cu conținutul de impurități: fosforul mărește câmpul coercitiv și reduce permeabilitatea, manganul și sulful reduc inducția de saturație și permeabilitatea și cresc câmpul coercitiv, carbonul - sub formă de cementită - înrăutățește toate caracteristicile magnetice etc. Fontele se utilizează la construcția carcaselor, jugurilor, pieselor polare etc. ale mașinilor electrice.

## 6.4.3. Aliaje fier-siliciu

Prin alierea fierului cu siliciu se obțin materiale cu rezistivitate electrică ridicată, deci cu pierderi, prin curenți turbionari reduse. Conținutul de siliciu nu poate depăși însă 4,5% în cazul laminării aliajului la cald și 3,3% în cazul laminării la rece, deoarece fragilitatea crește atât de mult, încât materialul devine neprelucrabil. Pe de altă parte, introducerea siliciului determină și o micșorare a conductivității termice și a inducției de saturație a fierului (cu 0,0575 T pentru fiecare procent de siliciu).

Aliajele fier-siliciu se utilizează sub formă de table (pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari), bare sau alte profile.

### Tablă silicioasă luminată la cald

Se obține din blocuri de fier-siliciu, prin laminări și recoaceri succesive. După obținerea dimensiunilor dorite, tablele se supun unui tratament termic de scurtă durată (800°C) urmat de o răcire lentă, în urma căreia cresc grăunții cristalini și scad tensiunile interne. Aceleași tratamente se aplică și după efectuarea prelucrărilor mecanice (stanțare, tăiere etc.). Au anizotropie redusă, de cele mai multe ori considerându-se ca izotrope. Tablele slab aliate (până la 1% Si) au inducția de saturație mare, iar cele supraaliate (peste 4% Si) au pierderile specifice reduse. Conținutul de carbon este sub 0,08% pentru tablele E I și E II și sub 0,07% pentru tablele E III și E IV.

Pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari, tolele se izolează cu hârtie (între 0,013 și 0,03 mm), prin oxidare superficială (pentru inducții care nu

depășesc 1,4 T după care, datorită încălzirii, rezistivitatea oxidului se reduce considerabil) sau prin lăcuire (cu lacuri sintetice).

### **Tablă silicioasă texturată, laminată la rece**

Obținerea tablei texturate presupune orientarea - în timpul procesului de laminare la rece - a unei axe a cristalelor de fier (evident axa de ușoară magnetizare [100]) în direcția de laminare. Se obține în acest mod o structură de tipul celei prezentate în figura 10.13,a, numită structură Goss. Introducând tabla texturată într-un câmp magnetic a cărui direcție coincide cu direcția de laminare (care reprezintă acum o direcție de ușoară magnetizare) corpul se magnetizează cu ușurință.

Principalele caracteristici ale tablei texturate sunt:  $B_s=2,03$  T,  $H_c=16$  A/m,  $\rho=0,48$   $\mu\Omega\text{m}$  și  $d=7.650$  kg/m<sup>3</sup>. Este foarte sensibilă la acțiunea solicitărilor și tratamentelor mecanice: de exemplu, permeabilitatea magnetică maximă scade de 2,5 ori când presiunea crește de la zero la 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>. De aceea, după efectuarea unor tratamente mecanice, tablele se supun unor tratamente termice (la temperaturi cuprinse între 790 și 800°C).

Izolarea tablei texturate se face cu oxizi ceramici (carlit) sau cu pelicule pe bază de fosfați. Straturile izolante fiind foarte netede și subțiri, miezurile magnetice confecționate din table texturate sunt caracterizate prin valori mari ale factorului de umplere (0,96 . . . 0,97).

### **Alte aliaje fier-siliciu**

*Tabla silicoasă cu adaos de nichel* conține 5% și și 5,5% Ni, este laminată la cald, izotropă și se utilizează în construcția mașinilor electrice rotative. *Tabla silicoasă cu adaos de aluminiu* conține 2-3% și și 2-3% Al, este laminată la rece, izotropă și are permeabilitate magnetică foarte mare. *Aliajele fier-siliciu sinterizate* conțin 6-9% și și au valori mici ale constantelor de anizotropie și magnetostricțiune. *Aliajele aluminiu-siliciu-fier* (Alsifer) conțin 7,5% Si, 5,5% Al și 87% Fe, au coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura negativ și proprietăți asemănătoare cu cele ale aliajelor nichel-fier. Se prelucrează prin sinterizare.

## **6.4.4. Aliaje fier-aluminiu**

Având 16% Al și un conținut foarte redus de impurități (<0,0025% C) aceste aliaje au proprietăți remarcabile:  $\mu_{rmax}=10^5$ ,  $H_c \leq 2$  A/m,  $B_s=0,8$  T și  $\rho=1,44$   $\mu\Omega\text{m}$ . Se laminează la cald, se izolează prin oxidare și se pot lipi prin cositorire. Se utilizează în construcția transformatoarelor de impuls de medie frecvență, a magnefoanelor etc.

## **6.4.5. Aliaje nichel-fier**

Aliajele nichel-fier (sau *permalloy*) sunt cele mai reprezentative materiale magnetice moi, ele având permeabilitate magnetică foarte mare (2 H/m), pierderi prin histerezis mici și câmp coercitiv foarte redus (0,3 A/m).



Proprietățile acestor aliaje variază foarte mult cu conținutul de nichel. Astfel, aliajele cu conținut mare de nichel (65...80% Ni) au permeabilitate foarte mare, câmp coercitiv și pierderi prin histerezis reduse, dar au inducție la saturație și raportul  $B_r/B_s$  relativ mici ( $B_s \ll 1$  T). Aliajele cu conținut redus de nichel (35% Ni) au permeabilitate mică (<9 mH/m), dar rezistivitate mare (0,75  $\mu\Omega$ m) și deci pierderi prin curenți turbionari reduse. Adăugându-se mici cantități de Mo, Co, Cu, Cr, Ti etc. se obțin aliaje cu caracteristici îmbunătățite. De exemplu, un conținut de 2% Mo determină o creștere a permeabilității aliajului cu un ordin de mărime (concomitent cu o majorare a rezistivității), iar dacă se adaugă Cu și Co se obțin aliaje cu permeabilitate constantă.

### **Aliaje cu permeabilitate magnetică mare**

Din această grupă fac parte aliajele cu un conținut mare de nichel (76...79% Ni), caracterizate prin valori mari ale permeabilității magnetice (0,13...2 H/m), câmpuri coercitive (0,015...5 A/m) și pierderi (0,015...0,045 W/kg la 0,5 T) reduse, dar prin valori mici ale inducției de saturație (0,8 T). Sunt maleabile, ductile și pot fi laminate la dimensiuni foarte reduse. Se cunosc sub diferite denumiri comerciale: permalloy, supermalloy, mu-metal etc. Dacă se elimină impuritățile nefavorabile (O, C etc.) se obțin aliaje cu constante de magnetostricțiune și anizotropie nule. Se utilizează în construcția transformatoarelor de măsură ( $f=50$  Hz și inducții mici), a aparatelor feromagnetice cu repulsie, a ecranelor magnetice etc.

### **Aliaje cu ciclul de histerezis dreptunghiular**

Aceste materiale se obțin printr-o laminare la rece urmată de o serie de tratamente termice (încălzire de scurtă durată pentru recristalizare, răcire în câmp magnetic etc.) a unor aliaje pe bază de nichel (Permalloy, Deltamax, Rectimphy, Dynamax etc.) sau chiar a tablei texturate. Se utilizează în construcția amplificatoarelor magnetice, a dispozitivelor de comutare, a calculatoarelor etc.

### **Aliaje cu permeabilitate magnetică constantă**

Aceste aliaje se obțin prin procese speciale (o cristalizare completă, reduceri de secțiune de pește 98% etc.) și au un conținut mai redus de nichel. Aliajele *perminvar* care conțin numai nichel și fier se utilizează doar în câmpuri magnetice slabe. Adăugându-li-se și Co sau Mo pot fi utilizate până la 8 kA/m. Au pierderi reduse și se folosesc în construcția aparatelor acustice, a transformatoarelor de măsură etc.

## **6.4.6. Aliaje cu inducție de saturație mare**

Aceste aliaje se obțin pe bază de cobalt (între 35 și 50%), singurul element care determină o creștere a inducției de saturație până la 2,5 T. Cu creșterea conținutului de cobalt, crește însă fragilitatea și duritatea aliajului (permendurul cu 50% Co fiind, practic, neprelucrabil), motiv pentru care se adaugă și vanadiu (2%). Poartă diferite denumiri comerciale (Permendur, Vacoflux, Hyperm etc. și se utilizează în construcția mașinilor electrice speciale, a membranelor telefonice, a amplificatoarelor magnetice etc.

## 6.4.7. Aliaje eu proprietăți speciale

### Aliaje termomagnetice

Sunt soluții solide pe bază de nichel (Ni-Fe, Ni-Fe-Cr, Ni-Cu, Ni-Si-Fe) cu punctul Curie foarte scăzut (sub 100°C) și coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura negativ. Cum inducția magnetică variază destul de mult cu temperatura, aceste materiale se utilizează în construcția șunturilor magnetice pentru compensarea erorilor de temperatură din aparatele de măsură. Au inducția la saturație foarte mică: 0,2-0,3 T. Cele mai cunoscute sunt aliajele Calmalloy (70 Ni, 30 Cu), Thermalloy (70 Fe, 30 Ni) și Compensator (57 Fe, 35 Ni, 8 Cr).

### Aliaje magnetostrictive

Magnetostricțiunea caracterizează variațiile dimensionale ale materialelor (feri- sau feromagnetice) introduse în câmp magnetic. Se definește prin raportul dintre alungirea a unei laturi a corpului și mărimea ei inițială. Poate fi pozitivă sau negativă, după cum corpul se lungeste sau se scurtează. Magnetostricțiunea depinde de natura materialului, de natura și conținutul adaosului etc. Valoarea maximă a magnetostricțiunii se obține pentru o frecvență a câmpului magnetic egală cu frecvența proprie (de rezonanță) a materialului.

Ca materiale magnetostrictive se utilizează Ni ( $\lambda < 0$ ), Co ( $\lambda = 0$ ), aliajele Ni-Fe, Ni-Co, Co-Fe, Fe-Pt ( $\lambda = 18 \cdot 10^{-5}$ ) și Fe-Al, unele ferite și îndeosebi aliajele fierului cu Terbiul ( $TbFe_2$ ) sau Erbiul ( $EbFe_2$ ) pentru care  $\lambda$  este de peste 16 ori mai mare decât în cazul feritelor sau aliajelor Fe-Pt. Se utilizează în construcția generatoarelor sonore și ultrasonore, pentru purificarea apei, accelerarea reacțiilor chimice, sudarea metalelor etc.

### Filme feromagnetice

Păturile subțiri sau filmele feromagnetice se obțin din aliaje Ni-Fe sau din elemente pure. Au pierderi prin curenți turbionari foarte reduse și ciclul de histerezis dreptunghiular, magnetizarea efectuându-se doar prin rotirea momentelor magnetice. Se utilizează în construcția dispozitivelor electronice cu comutație rapidă: memorii magnetice, calculatoare etc.

## 6.4.8. Ferite magnetic moi

Feritele sunt materiale semiconductoare cu rezistivitate  $\rho = 10^5 \dots 10^8 \Omega m$ , adică de  $10^6 \dots 10^7$  ori mai mare decât cea a materialelor feromagnetice. După structura chimică, feritele sunt compuși ai oxidului de fier ( $Fe_2O_3$ ) și ai altor metale bivalente (Mn, Ni, Zn, Mg, Cu, Li etc.).

Față de materialele feromagnetice, feritele prezintă avantajele unei rezistivități și stabilități mari a caracteristicilor magnetice. Se prelucrează însă cu dificultate (fiind dure și casante) și prezintă valori mici ale inducției de saturație ( $< 0,6$  T) și temperaturii Curie (60...450°C). În funcție de compoziția chimică și tratamentele aplicate se obțin ferite cu proprietăți ce diferă foarte mult: cu permeabilitate magnetică mare, cu constante de anizotropie și magnetostricțiune foarte mici sau foarte mari, cu cicluri de histerezis înguste sau dreptunghiulare etc. Atât inducția de saturație, cât și permeabilitatea magnetică, se modifică cu

temperatura, pentru temperaturi superioare punctului Curie remarcându-se chiar variații foarte mari. Componentele  $\mu'$  și  $\mu''$  ale permeabilității magnetice complexe ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) prezintă variații cu frecvența similare cu cele ale permitivității dielectricilor, iar pierderile prin histerezis prezintă, la fel, un maxim pentru o frecvență apropiată de frecvența proprie a materialului.

Feritele se utilizează îndeosebi în domeniul frecvențelor înalte: miezuri de bobine, memorii și amplificatoare magnetice, antene, transformatoare pentru TV etc.

*Feritele mangan-zinc* se utilizează la confecționarea transformatoarelor de impulsuri, a filtrelor etc. (pentru  $f < 1$  MHz).

*Feritele nichel-zinc* au temperatura Curie foarte scăzută (60...80°C) și coeficientul de variație a permeabilității cu temperatura mare ( $10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ). Măriindu-se conținutul de zinc, permeabilitatea inițială (100...15.000) crește, iar câmpul coercitiv (6...160 A/m) și inducția de saturație (0,25...0,38 T) scad. Se utilizează în construcția transformatoarelor și bobinelor, pentru frecvențe de ordinul unităților sau zecilor de MHz.

*Feritele litiu-zinc* au pierderi foarte reduse și se utilizează pentru frecvențe de ordinul zecilor de MHz.

*Feritele magneziu-zinc și magneziu-mangan* au rezistivitatea foarte mare ( $10^6 \dots 10^7 \Omega\text{m}$ ), dar permeabilitatea și inducția de saturație reduse. Se utilizează în domeniul frecvențelor ultraînalte (până la 10 GHz).

### 6.4.9. Materiale magnetodielectrice

Magnetodielectricii sunt constituiți din granule fero- sau ferimagnetice înglobate într-un dielectric. Datorită dimensiunilor reduse ale granulelor și rezistivității mari a dielectricilor, pierderile prin curenți turbionari sunt foarte mici, magnetodielectricii utilizându-se îndeosebi în domeniul frecvențelor înalte.

Proprietățile lor depind atât de natura materialelor magnetice, cât și de conținutul și caracteristicile lianților utilizați. Astfel, utilizându-se granule de fier carbonil sau ferite, se obțin materiale cu permeabilitatea relativă de ordinul unităților. Volumul dielectricului este cuprins între 4 și 8% pentru magneto-dielectrici cu  $\mu_{r,i} > 40$  și ajunge până la 50% pentru materiale cu permeabilitate de ordinul unităților.

**Magnetodielectricii feroplastici** (cu șelac, poliesteri, bachelite etc.) sunt materiale casante, cu câmp coercitiv mic și permeabilitate mare (zeci, sute) și se utilizează în construcția miezurilor de bobine și transformatoare.

**Magnetodielectricii feroelastici** (pe bază de cauciucuri, PVC, PK etc.) au elasticitate mare și permeabilitate mai mică (unități, zeci) și se utilizează în construcția ecranelor magnetice, ca absorbanți de microunde etc.

## 6.5. Materiale magnetice dure

Materialele magnetice dure își păstrează starea de magnetizare și după întreruperea acțiunii timpului magnetizant și au cicluri de histerezis largi, inducție remanentă, câmp coercitiv și indici de calitate superiori.

Fiind utilizate la fabricarea magneților permanenți, pentru materialele magnetice dure, prezintă o deosebită importanță curbele de demagnetizare și cele ale produsului  $BH$  (în funcție de  $H$  sau  $B$ ) (Figura 6-7). Într-adevăr, cum eficacitatea unui magnet permanent se apreciază prin valoarea energiei câmpului magnetic din întrefier și cum această energie este direct proporțională atât cu produsul ( $BH$ ), cât și cu volumul magnetului permanent, acesta trebuie să funcționeze la o asemenea inducție încât produsul ( $BH$ ) să fie maxim, adică volumul magnetului să fie minim. Așadar, pentru utilizarea optimă a unui material magnetic dur cu  $B_r$  și  $H_c$  cunoscute, într-un circuit magnetic cu inducția în întrefier dată, trebuie ca dimensiunile magnetului să fie alese astfel încât produsul dintre inducția magnetică și intensitatea câmpului magnetic corespunzătoare punctului de funcționare să fie maxim.

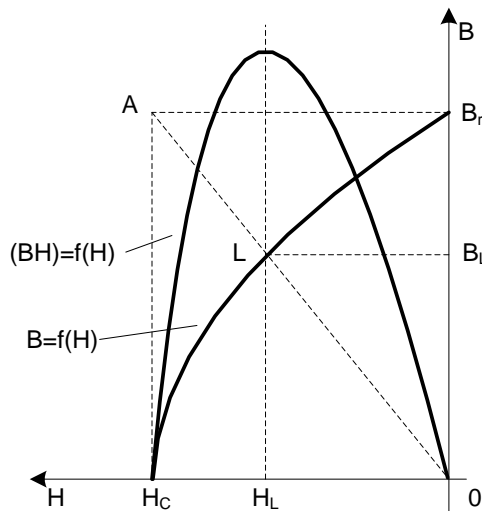


Figura 6-7 Curbe caracteristice pentru materiale magnetice dure

Valoarea maximă a produsului ( $BH$ ), numită **indice de calitate** este cu atât mai mare, cu cât  $B_r$  și  $H_c$  sunt mai mari, iar ciclul de histerezis se apropie mai mult de unul dreptunghiular.

### 6.5.1. Oțeluri martensitice și aliate

#### Oțeluri cu structură martensitică

Structura martensitică se obține printr-o răcire bruscă (călire) a oțelului aflat la o temperatură ridicată (900°C), când cementita rămâne în material și formează, împreună cu fierul  $\alpha$ , o soluție suprasaturată. Excesul de cementită produce însă importante tensiuni interne (rețeaua cristalină se deformează) și conferă materialului un câmp coercitiv relativ mare (4 kA/m). Având indice de calitate redus și fiind foarte susceptibile la șocuri, vibrații și variații de temperatură, oțelurile martensitice sânt înlocuite cu oțeluri aliate (îndeosebi cu W).

#### Oțeluri aliate

Reducînd conținutul de carbon (sub 1%) și adăugînd - în anumite proporții - W, Co, Cr etc. se obțin oțeluri aliate, cu caracteristici magnetice superioare celor martensitice. Prin aliere cu **wolfram** se formează carbura de wolfram (WC) care are ca efect creșterea tensiunilor interne din material și deci, a câmpului coercitiv (6.400 A/m). Crește, de asemenea, indicele de calitate, dar scade inducția remanentă. Alierea cu **cromul** are aceleași efecte, dar costul aliajului este mai redus. Introducîndu-se și **cobalt** se obțin aliaje cu câmp coercitiv de 20kA/m și produsul  $(BH) > 8\text{kJ/m}^3$ .

### 6.5.2. Aliaje plastice

Aceste aliaje suportă deformări plastice pronunțate (forjare, laminare), până la dimensiuni reduse, fără ca proprietățile lor magnetice să se modifice prea mult. Sunt însă foarte scumpe și se utilizează doar în situații speciale, când aliajele Alni sau Alnico nu pot fi folosite. **Aliajele Vicalloy** (S.U.A.) sau **Koerflex** (Germania) au un conținut mare de Co, la care se adaugă V și Cr. Se obțin sub formă izotropă sau anizotropă (prin laminare la cald sau la rece) și se utilizează în construcția memoriilor magnetice, a motoarelor cu histerezis etc. **Aliajele Cunife** (Cu-Ni-Fe) sunt cele mai maleabile și ductile materiale magnetic dure. Rezistă foarte bine la șocuri și vibrații. Prin laminare la rece li se conferă o anizotropie pronunțată și ciclul de histerezis dreptunghiular. Se utilizează în construcția dispozitivelor de înregistrare a informației. **Cemendurul** (52 Co; 44 Fe; 3,5 V; 0,5 Mn) are  $B_r = 2\text{ T}$ ,  $H_c = 3.200\text{ A/m}$ , produsul  $(BH) = 4\text{kJ/m}^3$  și o mare stabilitate la variații de temperatură. Se utilizează în telecomunicații. **Aliajele Fe-Co-Cr-Si** se obțin din materii prime foarte pure - prin tratare în câmp magnetic - și au proprietăți magnetice remarcabile:  $H_c = 47\text{ kA/m}$ ,  $B_r = 1,3\text{ T}$  și produsul  $(BH) = 42\text{kJ/m}^3$ . **Aliajele Fe-Ni-Cr** (73 Fe ; 15 Ni; 12 Cr) sînt mai ieftine, se pot lamina și trefila până la 0,05 mm, au produsul  $(BH) = 20\text{kJ/m}^3$  și  $B_r/B_s > 0,9$ . Se utilizează în construcția dispozitivelor de înregistrare și de comandă, în automatizări etc.

### 6.5.3. Aliaje cu magnetostricțiune mică

În această categorie intră aliajele *Co-Fe-Au* (82Co; 12Fe; 6Au), *Co-Fe-Ti*, *Co-Fe-Be* și *Co-Fe-Nb*. Se pot lamina la dimensiuni reduse, au inducție remanentă

mare (1,3...1,8 T), câmp coercitiv mic (1...2 kA/m) și  $B_r/B_s=0,83...0,96$ . Având ciclul de histerezis relativ îngust și dreptunghiular și constantă de magnetostricțiune mică se utilizează în construcția dispozitivelor electronice de comandă și control, a memoriilor etc.

#### 6.5.4. Aliaje pe bază de mangan și din metale prețioase

Prin alierea manganului (element neferomagnetic) cu Al, Bi, Ag etc. se obțin materiale cu indice de calitate și câmp coercitiv foarte mari. Astfel, aliajele *Bi-Mn* (80 Bi; 20 Mn), *Mn-Al* (71 Mn; 29 Al), *Ag-Mn-Al* etc. au  $(BU)_{max}=42\text{kJ/m}^3$  și  $H_c=280$  kA/m. Unele dintre ele (Mn-Al etc.) prezintă și inducție remanentă mare, stabilitate termică bună și sunt anticorozive. Aliajele din metale prețioase (*Ag-Mn-Al*, *Pt-Co* etc.) au proprietăți foarte bune și se elaborează prin procedee simple. Fiind însă foarte scumpe, se înlocuiesc cu compuși ai pământurilor rare.

#### 6.5.5. Aliaje cu durificare prin dispersie de fază

Din această grupă fac parte aliajele *Alni* și *Alnico*, materiale mai ieftine și cu proprietăți remarcabile :  $H_c = 20...90$  kA/m,  $B_r=0,6...1,15$  T și  $(BU)_{max}=6...40\text{kJ/m}^3$ .

Proprietățile lor magnetice deosebite se datorează efectuării unui tratament de durificare prin dispersie de fază.

Caracteristicile magnetice ale acestor aliaje depind de proporția dintre elementele constitutive, de conținutul de adaosuri și impurități, de tratamentele mecanice, termice sau termomagnetice efectuate etc. Astfel, *cobaltul* mărește inducția la saturație, ridică temperatura Curie și încetinește procesul de difuziune, ceea ce permite realizarea unor magneți de secțiuni mari. *Nichelul* duce la creșterea câmpului coercitiv, dar scade inducția remanentă și temperatura Curie. Conținutul de Al nu depășește 12% căci creșterea sa cu 1% peste limita admisă determină o reducere a inducției remanente cu 30%. *Cuprul* (2...6%) încetinește procesul de difuziune, micșorează fragilitatea aliajului și crește câmpul coercitiv, dar reduce inducția remanentă. Cel mai dăunător element este *carbonul* (<0,03%), acesta determinând o înrăutățire a tuturor caracteristicilor aliajelor.

Prin efectuarea unor tratamente termomagnetice (răcirii în câmp magnetic) se obțin aliaje (îndeosebi *Alnico*) cu anizotropie pronunțată și caracteristici magnetice superioare. Caracteristici asemănătoare au și aliajele cu structură *columnară* (ale căror cristale sunt dirijate în timpul procesului de turnare).

##### Aliaje Alni

Au inducții remanente cuprinse între 0,5 și 1,25 T, câmpuri coercitive între 20 și 90 kA/m și indici de calitate între 5,5 și 24 kJ/m<sup>3</sup>. Cele cu conținut redus de Ni au  $H_c$  mic și  $B_r$  mare și se utilizează în construcția magneților de secțiuni mari.

##### Aliaje Alnico

Datorită cobaltului au temperatura Curie și inducția remanentă superioare aliajelor Alni. În funcție de conținutul de cobalt și de tratamentele efectuate în

decursul proceselor tehnologice se obțin aliaje cu câmp coercitiv mare (Alnico 32, Alnico 34, Alnico 38, Triconal 1500), cu indice de calitate și câmp coercitiv mare (Alnico 900, Magnicol), cu cristale dirijate (Alnico 24), izotrope (Alnico 12, Alnico 15), cu structură semicolumnară sau columnară etc.

Aliajele anizotrope au inducții remanente până la 1,4 T, cele cu structură columnară au indicele de calitate de 4 ori mai mare decât aliajele normale, cele care conțin titan sau niobiu au câmpuri coercitive până la 160 kA/m (Alnico 40), iar cele care conțin și mici cantități de sulf, seleniu, telur etc. au indicele de calitate până la 117 kJ/m<sup>3</sup> (Ticonal X).

Magneții Alnico și Alni se obțin prin turnare sau sinterizare. Sintetizarea permite obținerea unor magneți - chiar de dimensiuni mari - cu structură omogenă și compoziție exactă, rezistenți la șocuri și vibrații, cu indici de calitate superiori etc.

### 6.5.6. Ferite magnetic dure

Magneții permanenți din ferite sunt ieftini și cu rezistivitate electrică și câmp coercitiv mare (până la 800 kA/m). Au însă inducție remanentă redusă (0,2...0,4 T). Se obțin, în general, prin sinterizare, presarea efectuându-se - eventual - în câmp magnetic. Prin adăugarea unor lianți organici se obțin magneți flexibili, dar cu caracteristici magnetice reduse.

### 6.5.7. Alte materiale pentru magneților permanenți

#### Pământuri rare

Elementele din grupa lantanidelor, numite și pământuri rare, pot forma cu elementele de tranziție (Fe, Ni, Co etc.) compuși feromagnetici cu proprietăți superioare materialelor metalice.

Astfel, prin sintetizare în atmosferă inertă, s-au obținut magneți de densități foarte mari, cu  $B_r=0,8...0,9$  T,  $H_c=640...720$  kA/m și  $(BH)_{max}=128...160$  kJ/m<sup>3</sup>.

Dintre elementele de tranziție, cel mai utilizat este cobaltul, iar dintre lantanide, samariul (Sm), ceriul (Ce), lantanul (La) etc. Cum atât șamanul, cât și cobaltul, sunt foarte scumpe, acestea se pot înlocui cu aliaje pe bază de lantan, ceriu, erbiu și fier (mai ieftine), proprietățile produselor obținute fiind totuși comparabile cu cele ale magneților metalici. Având indici de calitate înalți, aliajele pe bază de lantanide permit o miniaturizare a circuitelor magnetice și deci o reducere a costului instalațiilor din care fac parte.

#### Particule alungite

Din particule mici, de formă alungită se obțin magneți permanenți cu valori foarte mari ale câmpului coercitiv și îndeosebi ale indicelui de calitate. Astfel, în cazul particulelor din fier cu diametrul de 100...200 Å rezultă, teoretic,  $(BH)_{max}=312$  kJ/m<sup>3</sup>, iar în cazul aliajului fier-cobalt  $(BH)_{max}=400$  kJ/m<sup>3</sup>. Au structură omogenă (deci o repartitie uniformă a fluxului magnetic), stabilitate bună la șocuri, vibrații și variații de temperatură, reproductibilitate mare și se pot fabrica la dimensiuni reduse. Tehnologia de fabricație este însă complicată, până acum neputându-se obține magneți cu caracteristici apropiate de cele estimate prin

calculare. Cei construiți în prezent (Lodex) se utilizează pentru circuite cu structuri complicate, la micromotoare, difuzoare, circuite imprimate etc.

### Oxizi de crom

Particulele foarte mici ( $d=3\text{...}6\text{ }\mu\text{m}$ ) de oxizi de crom ( $\text{CrO}_2$ ) se utilizează la fabricarea unor magneți permanenți pentru frecvențe înalte, cu  $B_r=1,6\text{ T}$  și  $H_c >100\text{ kA/m}$ .

### Pături subțiri

Formate, prin depunere în vid, dintr-un strat de crom și unul de cobalt, acestea au proprietăți magnetice asemănătoare **celor** ale materialelor magnetice dure de bună calitate ( $H_c=48\text{ kA/m}$  etc.). Au ciclul de histerezis dreptunghiular ( $B_r/B_s=0,95$ ) și se utilizează în construcția aparatelor numerice.

## 6.6. Materiale cu proprietăți magnetice reduse (nemagnetice)

Materialele nemagnetice au permeabilitate magnetică și inducție de saturație reduse ( $\mu_R < 1,01$  pentru  $H=8\text{ kA/m}$ ) și se utilizează în construcția circuitelor magnetice cu reluctanță magnetică mare (carcasele busolelor, ale mașinilor și aparatelor electrice etc.). Din această categorie fac parte elementele diamagnetice (Cu), paramagnetice (Al), aliaje ale acestora, oțeluri, fonte etc.

Caracterul nemagnetic al unui aliaj este determinat și de proporția în care se află elementele sale. Astfel, un aliaj 60%Ni-40%Cu este nemagnetic, deși nichelul este un element feromagnetic, iar cuprul sau alumiul - elemente nemagnetice - prezintă proprietăți magnetice, dacă conțin impurități feromagnetice.

### Oțelurile nemagnetice (cu structură austenitică)

Au permeabilitatea magnetică relativă mai mică de 1,02. Ele conțin întotdeauna, în anumite proporții, Cr, Ni și Co. Dacă conținutul de crom depășește 12%, oțelurile devin *inoxidabile* și foarte rezistente la acțiunea acizilor. Se pot prelucra prin laminare sau forjare și se pot suda (punctele de sudură devenind însă feromagnetice). Sub acțiunea solicitărilor mecanice își măresc permeabilitatea magnetică și inducția de saturație. **Fontele nemagnetice** sunt mai ieftine decât oțelurile și au rezistivitate electrică mai mare. Caracteristicile lor depind de natura elementelor adaos (Mn, Ni, Si, Cr, Cu etc.) și, mai ales, de tratamentele termice efectuate.

În afară de fonte și oțeluri, se mai obțin aliaje nemagnetice (pe bază de Ni, Cr, Cu etc.) cu proprietăți speciale. Astfel, aliajul **Nimonic** (75 Ni; 20 Cr; 0.05 Cu ; 0,005 B ; rest Ti, Al. Co, Mn și Si) are  $\mu_r < 1,001$  și  $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6}\text{ }\Omega\text{m}$ , este inoxidabil, anticoroziv și cu bune proprietăți mecanice; aliajele **Monel** - pe bază de Ni (>60%) și Cu - au conductivitate electrică mare etc.



## Cap.7. Rezistoare

### 7.1. Elemente de circuit

Elementele de circuit electric sunt clasificate ca **rezistive** prezentând doar proprietăți de **rezistență** și **reactive** posedând doar **reactanța**. Al doilea grup acoperă bobinele inductive și condensatorii, având reactanțe capacitive și inductive.

Elementele rezistive de circuit sunt cele în care fluxul de curent produce doar o irecuperabilă pierdere de energie, pe când în toate elementele reactive de circuit nu există această pierdere.

Fluxul de curent produce o diferență de potențial în lungul elementelor de circuit, mărimea acestei diferențe depinzând de valoarea curentului. Cu alte cuvinte, ele împiedică trecerea curentului prin circuit și pentru acest motiv sunt numite *în ansamblu impedanțe*, termen care poate fi limitat în cazuri speciale la o **rezistență**, o **inductanță**, la o **capacitate**, sau la fel de bine **la o combinație a acestora**.

Trebuie notat, totuși, ca conceptul de element de circuit posedând doar rezistență, inductanță, sau capacitate este puțin cam fals, întrucât toți trei parametri sunt prezenți, fiecare cu o extindere mai mare sau mai mică. O bobină inductivă, spre exemplu, fiind făcută dintr-un conductor cu o anumită conductivitate, întotdeauna posedă o anumită rezistență. În același timp ca orice corp metalic, acesta are o anumită capacitate. Pe de altă parte, un condensator prezintă într-un anumit grad, de multe ori foarte mic, o inductanță, întrucât este format din conductori individuali înconjurați de un câmp magnetic creat de deplasarea de sarcina din interiorul lor. Energia pierdută în dielectricul capacității se transformă integral în căldură, și drept consecință, este de nerecuperat ca și în cazul rezistenței. Pentru considerente similare se poate arăta ca orice bucată de conductor, prezintă o anumită inductanță și capacitate în plus față de rezistența sa.

Aceasta face mult mai dificilă examinarea exactă a comportamentului unui curent alternativ în aceste elemente reale de circuit. Practic, dificultatea este depășită având de-a face cu elemente de circuit în care unul din parametri este predominant astfel că ceilalți doi pot fi ignorați fără să afecteze semnificativ rezultatele calculului circuitului. În aceste condiții, elementul de circuit poate fi tratat ca un element **ideal** posedând doar rezistență, inductanță sau capacitate.

Când o astfel de simplificare este nepermisă din anumite considerente, elementul de circuit este reprezentat printr-un circuit echivalent alcătuit dintr-un număr de elemente ideale. Spre exemplu, un condensator cu pierderi de energie care nu pot fi neglijate și o bobină inductivă cu o rezistență considerabilă, pot fi reprezentate prin circuitele echivalente. Aceste circuite nu sunt chiar complete întrucât nu țin cont de capacitatea spirelor bobinei și de inductanța elementelor

constructive ale condensatorului. În cazurile unde acești parametri sunt dați datorită anumitor considerații (spre exemplu când ne ocupăm cu curenți de înaltă frecvență), circuitele echivalente devin mai complicate.

Folosirea circuitelor echivalente face studiul proceselor ce apar în circuite electrice mult mai ușor, fiind suficient să folosească doar trei elemente ideale de circuit **R, L, C** și să trateze toate celelalte cazuri ca diverse combinații ale acestor trei tipuri de elemente, cu toate că pentru scopuri practice nu toate trei tipurile trebuie să fie prezente în fiecare circuit.

Elementele de circuit se clasifică în două grupuri distincte: **cu caracteristici liniare și neliniare**. Dacă impedanța elementului de circuit este independentă de mărimea curentului sau diferenței de potențial produsă de curent în lungul elementului, acesta este numit *element liniar de circuit*. Curentul într-un astfel de element este direct proporțional cu diferența de potențial și procesele ce au loc în circuite alcătuite din astfel de elemente sunt descrise cu ecuații algebrice liniare sau ecuații diferențiale derivate din legile lui Kirchhoff.

În multe cazuri, impedanța elementului de circuit luat în considerație este supusă variației cu curentul sau diferența de potențial. Aceste elemente de circuit sunt *numite neliniare* și procesele din circuit sunt descrise cu ecuații neliniare.

În general, toate elementele de circuit sunt mai mult sau mai puțin neliniare și pot fi tratate ca liniare într-o anumită aproximație doar într-un domeniu specificat de curent sau diferență de potențial, care depinde mult de condițiile reale ale experimentului și de acuratețea impusă experimentului. Astfel, rezistența unui conductor metalic ordinar rămâne practic constantă în cazul curenților mici, dar crește când trec curenți mari. Această creștere în rezistență este datorată încălzirii conductorului datorită curentului. Schimbarea în temperatură cauzată de un curent mic (prin mic se înțelege o densitate de curent mică în conductor) este atât de mică încât este practic depășită de mulți alți factori predominanți cum ar fi modificarea temperaturii ambiante, încălzirea prin radiație și în mod normal nu este luată în considerație.

Impedanța unui element de circuit poate de asemenea să varieze sub acțiunea unor factori externi, independenți de curentul sau diferența de potențial din circuit. Elementele de circuit cu un astfel de parametru variabil (impedanța) sunt numite *elemente parametrice*. De exemplu: un reostat cu cursor este un element de circuit liniar la fluxuri de curent mici, dar când rezistența sa este variată prin deplasarea cursorului el devine un element parametric întrucât mărimea curentului va depinde de poziția cursorului.

Nelinaritatea rezistenței, inductanței sau capacității face ca analiza performanțelor circuitului să nu fie ușoară întrucât soluția ecuațiilor neliniare reprezintă o problemă serioasă. Elementul de circuit este considerat a fi liniar atâta timp cât neliniaritățile se pot neglija în limitele de variație ale curentului sau diferenței de potențial. O astfel de aproximație, poate, bineînțeles să aibă un efect negativ în rezultatele calculului de circuit. Din acest punct de vedere, valabilitatea lor este necesar să fie testată pentru fiecare caz specific.

## 7.2. Rezistoare - generalități

Rezistoarele sunt componentele pasive cel mai des întâlnite în aparatura electronică. Acestea reprezintă aproximativ 30...40% din numărul pieselor componente ale unui aparat electronic.

Rolul rezistoarelor în circuitele electrice și electronice este de a limita și modifica valorile intensităților curenților electrici ce le străbat. Deoarece în funcționarea lor se degajă căldură rezistoarele pot fi folosite și la construcția aparatelor electrice de încălzit.

*Rezistorul este un dipol pentru care impedanța are un caracter în special rezistiv.*

Parametrul principal al rezistoarelor este *rezistența electrică*.

În practica industrială se utilizează o mare varietate de rezistoare. Clasificarea acestora se face utilizând mai multe criterii și anume: din punct de vedere constructiv, din punctul de vedere al modului de realizare a elementului rezistiv, după modul de variație al rezistenței electrice, după valoarea intensității curentului electric care le străbate etc.

Din punct de vedere **constructiv** se deosebesc:

- **rezistoare fixe**, a căror rezistență electrică, stabilită în procesul de fabricație, rămâne constantă pe parcursul întregii perioade de funcționare a rezistorului;
- **rezistoare variabile**, a căror rezistență electrică poate fi modificată în anumite limite în timpul funcționării, de cele mai multe ori pentru operații de reglaj.

Din punctul de vedere al modului de realizare a **elementului rezistiv** se disting următoarele tipuri de rezistoare:

- **rezistoare bobinate**, constituite dintr-un conductor metalic de mare rezistivitate înfășurat (bobinat) pe un suport izolator;
- **rezistoare peliculare**, al căror element rezistiv îl constituie o peliculă conductoare cu grosime mai mică de 100  $\mu\text{m}$ , depusă pe un suport din material dielectric (există o mare varietate de rezistoare peliculare în funcție de tehnologia de depunere a peliculei rezistive);
- **rezistoare de volum**, al căror element rezistiv este constituit de întregul corp al rezistorului.

După modul de **variație al rezistenței electrice** rezistoarele se împart în următoarele categorii:

- **rezistoare liniare**, care au caracteristica statică  $U-I$  liniară;
- **rezistoare neliniare**, a căror caracteristica statică este o funcție neliniară.

După **valoarea intensității curentului electric** care le străbate se deosebesc:

- **rezistoare pentru curenți slabi** (utilizate în general în electronică și automatizări);
- **rezistoare pentru curenți tari** (au utilizare în electronica de putere și electrotehnică).

### 7.3. Structura constructivă a rezistoarelor fixe

Orice rezistor (fix sau variabil) este constituit din următoarele elemente:

- elementul rezistiv;
- suportul izolant;
- terminalele;
- învelișul de protecție la acțiunea factorilor mecano-climatici.

#### 7.3.1. Elementul rezistiv

Așa cum rezultă și din clasificarea prezentată, elementele rezistive utilizate în construcția rezistoarelor sunt *conductoarele și peliculele din materiale de înaltă rezistivitate*.

Pentru rezistoarele bobinate elementul rezistiv este constituit din *conductoare metalice* (fire) caracterizate prin: rezistivitate cât mai mare, tensiune electromotoare în raport cu cuprul cât mai mică, coeficient de temperatură al rezistivității cât mai mic posibil și temperatură de topire cât mai ridicată (în special pentru rezistoarele de puteri mari).

În Tabelul 7-1 sunt prezentate comparativ câteva caracteristici ale principalelor aliaje utilizate la fabricarea rezistoarelor bobinate.

Elementul rezistiv al *rezistoarelor peliculare* constă dintr-o *peliculă rezistivă*, de grosime variind între 0,001 și 100 mm, din carbon aglomerat, carbon cristalin, bor-carbon, straturi subțiri metalice sau din oxizi metalici.

**Tabelul 7-1 Caracteristicile aliajelor utilizate pentru fabricarea rezistoarelor bobinate**

Caracteristica	Manganin	Constantan	Kanthal	Nikrothal	Crom-nichel
Rezistivitatea ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )	0,42	0,5	1,35	1,33	1,15
Coeficient de temperatură ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	15	20	20	20	130
Temperatura maximă de utilizare ( $^{\circ}\text{C}$ )	100	535	150	230	1000
Tensiunea electromotoare de contact cu Cuprul ( $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ )	2	43	3,5	2	-
Rezistența la tracțiune ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	400...550	400...500	800...1100	1100...1400	920
Densitatea ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	8,4	8,9	8,9	8,1	8,4

(Manganin (4Ni, 84Cu, 12Mn); Constantan (45Ni, 55Cu); Kanthal (75Fe, 20Cr, 4,5Al, 0,5Co); Nikrothal (75Ni, 17Cr, 8Mn,Si); Crom-nichel (80Ni, 20Cr))

**Peliculele rezistive din carbon aglomerat** sunt obținute dintr-un amestec de două materiale: unul cu rezistivitate mică (pe bază de negru de fum sau grafit) și altul de mare rezistivitate (pe bază de oxizi metalici semiconductori) utilizându-se ca liant rășinile formaldehidice.

**Peliculele rezistive din carbon cristalin** se obțin prin descompunerea termică (piroliza) a unor hidrocarburi saturate (metan, benzen etc.) în vid sau în atmosferă inertă, grosimea peliculelor fiind de aproximativ 0,1 mm.

Structura cristalină prezintă o mai bună stabilitate în timpul depozitării și utilizării, comparativ cu peliculele din carbon aglomerat.

**Peliculele rezistive din bor-carbon** sunt obținute prin piroliză, utilizându-se în acest caz compuși organici ai borului.

Față de peliculele rezistive din carbon cristalin, cele din bor-carbon prezintă un coeficient de temperatură mai mic.

**Peliculele metalice** sunt formate dintr-un strat foarte subțire din aliaje metalice de tipul *nichrome* (Ni, Cr, Fe), *monel* (Ni, Cu) etc., care în urma evaporării și depunerii în vid își păstrează compoziția neschimbată. Aliajele au avantajul că prezintă rezistivități mai mari decât metalele pure.

**Peliculele din oxizi metalici** se depun prin hidroliză sau prin pulverizare pe suportul dielectric. Cele mai utilizate sunt cele din dioxid de staniu ( $\text{SnO}_2$ ) având grosimi cuprinse între 0,2 și 1 mm.

O categorie importantă de rezistoare peliculare o constituie cele obținute prin *tehnologiile straturilor subțiri și a straturilor groase (TSS și TSG)*. Prin aceste tehnologii se obțin atât componente pasive de sine-stătătoare (rezistoare, condensatoare) cât și componente pentru circuitele hibride.

### 7.3.2. Suportul izolat

Constructiv, suporturile izolante utilizate la fabricarea rezistoarelor pot fi cilindrice, tubulare sau paralelipipedice.

Materialele utilizate pentru suporturile izolante, trebuie să se caracterizeze prin:

- rezistență mecanică și electrică ridicată;
- conductibilitate termică bună;
- să fie nehigroscopice;
- să fie stabile la acțiunea factorilor chimici și termici;
- permeabilitate magnetică, permitivitate electrică, pierderi dielectrice și magnetice cât mai reduse.

Pentru *rezistoarele bobinate*, suportul izolat poate fi realizat din:

- **sticlă**, în cazul rezistoarelor ce lucrează la temperaturi care nu depășesc  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- **mică și micanită** - pentru rezistoarele care funcționează la temperaturi mai mici de  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- **ceramică** - pentru temperaturi de până la  $360\text{ }^\circ\text{C}$ .

În prezent cele mai utilizate suporturi izolante sunt fabricate din materiale ceramice sau fibră de sticlă. Suprafața lor trebuie să fie uniformă, fără a necesita prelucrări speciale.

În cazul *rezistoarelor peliculare*, suporturile izolante se realizează din materiale ceramice, care trebuie să aibă un coeficient de dilatare termică cât mai apropiat de cel al peliculei rezistive. În vederea obținerii elementului rezistiv, suprafața suportului izolat trebuie prelucrată mai întâi mecanic, pentru a obține o suprafață uniformă (fără găuri, zgârieturi, ciupituri etc.), și apoi chimic, rezultând o suprafață curată (degresată) și cu o porozitate fină în scopul obținerii unei bune aderențe a peliculei rezistive depuse, indiferent de grosimea acesteia.

Suporturile izolante pentru *rezistoarele realizate prin tehnologia straturilor groase* sunt realizate din alumină, steatită etc., iar în cazul celor *realizate prin tehnologia straturilor subțiri*, din materiale ceramice, sticlă ș.a.

Pentru rezistoarele din circuitele integrate suportul izolant se realizează din siliciu monocristalin sau, mai nou, din materiale plastice speciale.

### 7.3.3. Terminalele

*Terminalele* cu care sunt prevăzute orice rezistor sunt realizate din materiale metalice cu o bună conductibilitate electrică. Acestea se fixează la extremitățile corpului rezistorului și servesc la conectarea acestuia în montajele electronice sau electrice. Diametrele preferențiale ale terminalelor sunt 0,4; 0,5; 0,6; 0,8 și 1 mm.

În Figura 7-1 sunt prezentate câteva tipuri de terminale utilizate la rezistoarele bobinate.

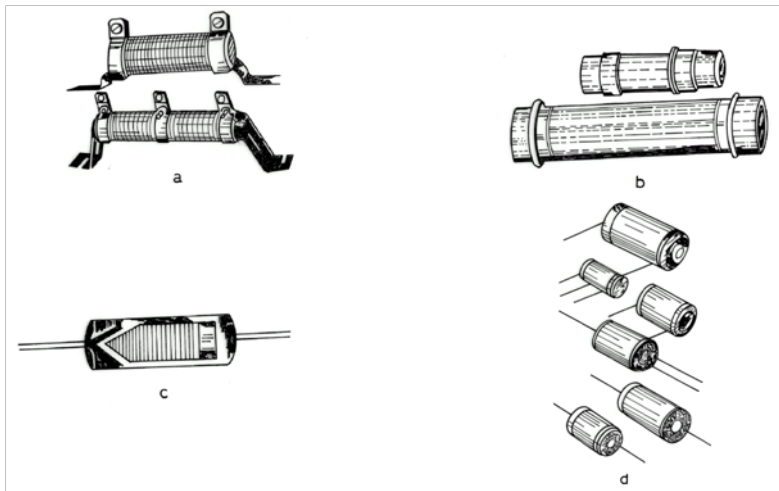
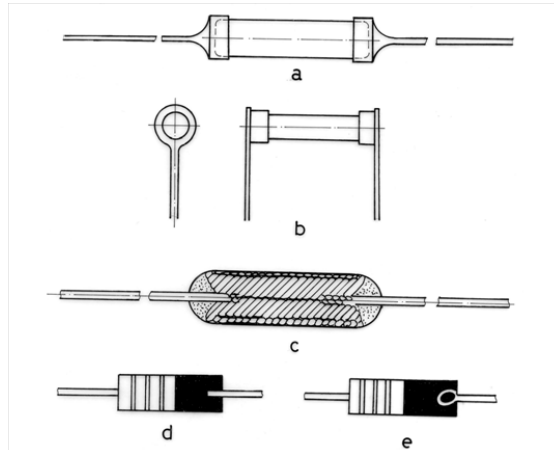


Figura 7-1 Tipuri de terminale pentru rezistoare bobinate: a) pentru rezistoare neprotejate; b) de formă inelară, pentru rezistoare tropicalizate; c) pentru rezistoare de precizie mulate în bachelită; d) cu căpăcele axiale și radiale

Terminalele pentru rezistoarele peliculare și de volum sunt prezentate în Figura 7-2. În cazul terminalelor axiale lipite sau încastrate se utilizează cuprul, iar pentru cele inelare cuprul cositorit.



**Figura 7-2** Tipuri de terminale pentru rezistoare peliculare: a) axiale cu căpăcel; b) radiale cu căpăcel; c) axiale lipite; d) axiale încastate, pentru rezistoare de volum

Pentru terminalele axiale cu căpăcel se utilizează alama, oțelul sau alte materiale conductoare.

În vederea asigurării unui contact cât mai bun, între elementul rezistiv și terminale, capetele rezistoarelor peliculare se acoperă cu o masă de rezistivitate foarte mică prin grafitare, argintare sau metalizare (cu alt metal în afară de argint).

### 7.3.4. Protecția rezistoarelor la acțiunea factorilor mecano-climatici

Pentru a realiza o protecție corespunzătoare a rezistoarelor la acțiunea factorilor de mediu, materialul cu care se protejează trebuie să aibă următoarele proprietăți:

- să fie rezistent mecanic;
- să aibă o rezistență electrică cât mai mare;
- să fie nehigroscopic;
- să aibă conductibilitate termică bună;
- să aibă permitivitate electrică, permeabilitate magnetică și pierderi magnetice și dielectrice cât mai mici.

Metodele de protecție și materialele folosite se aleg în funcție de condițiile de lucru ale rezistoarelor.

Astfel, rezistoarele bobinate care în timpul funcționării nu depășesc temperatura de  $125^{\circ}\text{C}$  se protejează prin *lăcuire* iar, dacă temperatura superficială ajunge la  $360^{\circ}\text{C}$  protejarea se face prin *cimentare* cu ciment siliconic.

În cazul în care protecția se face cu un strat protector vitrifiat în cuptor la circa  $1000^{\circ}\text{C}$ , temperatura superficială pe care o poate atinge rezistorul în timpul funcționării este de  $400^{\circ}\text{C}$ .

Pentru rezistoarele de medie și mare putere protecția se realizează introducându-le în *corpuri ceramice* care constituie și un radiator termic pentru rezistor.

*Tropicalizarea* rezistoarelor se face prin introducerea rezistoarelor bobinate în tuburi de sticlă astupate prin topire sau în tuburi de porțelan astupate cu ajutorul unui ciment necombustibil.

Rezistoarele peliculare sunt protejate prin acoperire cu un compund de protecție și eventual prin ceruire.

Rețelele rezistive realizate prin *TSS* și *TSG* sunt protejate prin încapsularea lor în capsule de tipul celor utilizate la circuitele integrate.

Rezistoarele bobinate de mare putere, utilizate în electrotehnică, nu se protejează.

## 7.4. Tehnologia de fabricație a rezistoarelor bobinate

### 7.4.1. Tehnologia rezistoarelor bobinate de medie putere

#### Suportul izolanț

Acesta are în mod obișnuit formă cilindrică și se realizează din fibre de sticlă. Suportul din fibre de sticlă prezintă o serie de proprietăți comune și altor tipuri de materiale izolatoare și în plus este foarte elastic.

#### Elementul rezistiv

Pentru aceste tipuri de rezistoare elementul rezistiv se obține prin bobinarea unui fir rezistiv din aliaj Cu-Ni sau Cr-Ni pe suportul izolanț. Diametrul conductorului utilizat depinde de valoarea rezistenței nominale și de puterea nominală necesară. Pasul de bobinare are uzual valori cuprinse în intervalul  $(1,5...3)d$ ,  $d$  fiind diametrul conductorului.

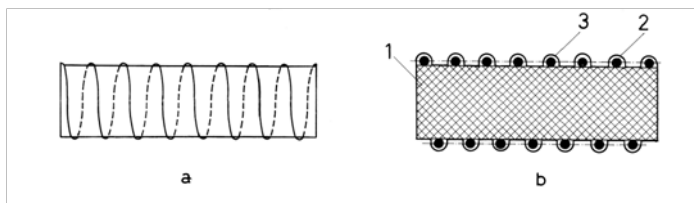


Figura 7-3 Tronson rezistiv bobinat: a) vedere generală; b) secțiune; 1-suport izolanț; 2-element rezistiv; 3-lac dielectric

Pentru a împiedica deplasarea spirelor în timpul operațiilor tehnologice ulterioare, acestea se rigidizează pe suportul izolanț prin acoperire cu un lac dielectric. Din tronsonul de „bară” astfel obținut se taie tronsoanele rezistive la lungimea necesară obținerii rezistenței dorite (Figura 7-3).

#### Terminalele



Terminalele se realizează din sârmă de cupru dublu cositorit, cu diametrul de 0,8 mm. Acestea sunt prevăzute cu căpăcele și se conectează la tronsonul rezistiv prin presare (sertizare).

În funcție de modul de montare a rezistoarelor în circuit există mai multe variante constructive. În Figura 7-4 se prezintă două variante constructive pentru montaje orizontale și verticale.

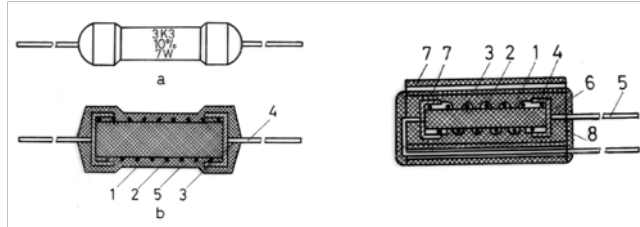


Figura 7-4 a) Rezistor bobinat cimentat (1-suport izolant, 2-element rezistiv acoperit cu lac, 3-căpăcel metallic, 4-terminal); b) Rezistor bobinat în corp ceramic (1-suport ceramic, 2-element rezistiv, 3-ciment siliconic, 4- căpăcel metallic, 5-terminal, 6-material izolant, 7- corp ceramic, 8-ciment)

### Protecția la acțiunea factorilor mecano-climatici

Această protecție se poate realiza în două variante și anume:

- prin acoperire cu ciment siliconic;
- prin introducerea tronsonului rezistiv într-un corp ceramic.

Corpul ceramic poate fi tubular sau paralelipipedic, cu secțiune pătrată sau profilată, de diferite dimensiuni. Tehnologia de fabricație a corpului ceramic este aceeași cu tehnologia de obținere a suportului izolant al rezistoarelor cu peliculă de carbon, diferențele care apar înregistrându-se la forma acestora și prelucrările de suprafață.

În interstițiul format între tronsonul rezistiv și corpul ceramic se introduce un material izolant, iar capetele se cimentează.

Structura unor rezistoare bobinate obținute după tehnologia descrisă mai sus este prezentată în Figura 7-4.

Puterile uzuale ale acestor rezistoare sunt cuprinse în intervalul 1...20 W.

## 7.4.2. Tehnologia rezistoarelor bobinate de mare putere

### Suportul izolant

Pentru rezistoarele bobinate de mare putere se utilizează suporturi izolante fabricate din material ceramic, sub formă cilindrică.

Tehnologia de fabricație a acestor suporturi este identică cu cea a suporturilor izolante de la rezistoarele cu peliculă de carbon. Se impun însă condiții mai severe la prelucrarea suprafețelor exterioare.

### Elementul rezistiv

Elementul rezistiv se obține prin bobinarea conductorului pe suportul izolant cu ajutorul unor mașini automate. Operația de înfășurare trebuie executată

cu multă atenție deoarece tensiunea mecanică din conductor influențează alături de alți factori (diametrul și calitatea suportului izolant etc.) caracteristicile electrice ale acestor rezistoare.

Un dezavantaj important al acestor rezistoare îl constituie prezența elementelor parazite semnificative (inductanță, capacitate). Pentru obținerea unor rezistoare bobinate „neinductive” se utilizează bobinajul Ayrton-Perry care constă în două conductoare, bobinate în sensuri inverse și legate în paralel.

Această dispunere a conductoarelor determină formarea a două fluxuri magnetice de sensuri contrare, ceea ce conduce la o valoare foarte scăzută a inductanței rezistorului.

### **Protecția la acțiunea factorilor mecano-climatici**

Pentru rezistoarele bobinate există două metode tehnologice de protejare.

Prima dintre metode constă în *acoperirea cu ciment siliconic* a rezistorului. În acest caz terminalele sunt realizate din coliere radiale, la care se pot atașa cabluri flexibile sau papuci de contact.

În cadrul celei de a doua metode se folosește pentru acoperire un *email glazură*. Terminalele sunt plate și se fixează peste stratul de glazură.

Sortarea și marcarea rezistoarelor protejate și controlate din punct de vedere electric se face semiautomat cu ajutorul unor mașini automate de tip *offset*. Marcarea se face în clar, prin imprimarea rezistenței nominale, a puterii nominale și a toleranței pe corpul rezistorului.

## **7.5. Tehnologia de fabricație a rezistoarelor peliculare**

### **7.5.1. Tehnologia rezistoarelor cu peliculă rezistivă pe bază de carbon**

Rezistoarele din această categorie au o formă cilindrică și sunt prevăzute cu terminale axiale. Mărimea acestora depinde de puterea nominală disipată.

#### **Suportul izolant**

Suportul izolant se confecționează din ceramică. Ca materii prime de bază se pot folosi caolinul, carbonatul de calciu, carbonatul de magneziu etc.

Materiile prime de bază sub formă de pulbere se amestecă cu un liant, formându-se o pastă din care se presează tronsoanele la forma și dimensiunile dorite.

La extremitățile tronsonului se realizează orificiile necesare pentru fixarea și conectarea terminalelor. În această stare tronsoanele sunt supuse unui tratament termic, în timpul căruia se produc transformări complexe în structura rețelei și se obțin caracteristicile electrice necesare.

Prelucrarea mecanică a suportului izolant trebuie să asigure obținerea unei suprafețe exterioare netede (lipsită de găuri, zgârieturi, înțepături etc.) și fără abateri de formă.

După prelucrarea mecanică, suprafața exterioară a suportului izolant este tratată cu o soluție de acid fluorhidric, în scopul obținerii unor porozități distribuite uniform, care conduc în final la o aderență ridicată a peliculei rezistive.

Trebuie remarcat faptul că gradul de porozitate influențează valoarea rezistenței electrice a peliculei depuse.

### Elementul rezistiv

Depunerea peliculei rezistive se poate obține prin două metode:

- prin piroliză;
- prin metalizare.

În cazul *depunerii peliculei rezistive prin piroliză* se folosește un amestec format prin barbotarea azotului cu o hidrocarbură (benzină de extracție pentru valori ale rezistenței de 1...100  $\Omega$  și benzen pentru valori cuprinse între 100  $\Omega$  și 10 k $\Omega$ ).

Pelicula de carbon se depune prin tratarea la temperatură înaltă a hidrocarburii în atmosferă de azot. Rezistența peliculei depinde de temperatură (invers proporțională), de compoziția amestecului (rezistența crește cu scăderea debitului de azot), de viteza de trecere a tronsoanelor prin cuptor (cu creșterea vitezei se mărește instabilitatea rezistenței) și de debitul amestecului.

*Depunerea elementului rezistiv prin metalizare* constă în acoperirea întregii suprafețe a tronsonului cu o peliculă de nichel pe cale chimică. Grosimea peliculei rezistive în acest caz este mai mică de 100 nm, fiind invers proporțională cu valoarea rezistenței. După depunerea elementului rezistiv.

Tronsoanele cu peliculă de carbon sunt metalizate la capete în vederea conectării terminalelor, așa cum se prezintă în Figura 7-5.

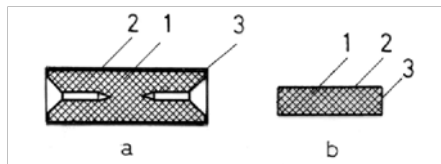


Figura 7-5 Tronson rezistive nespiralizate: 1-suport ceramic; 2-peliculă rezistivă; 3-peliculă metalică pentru conectarea terminalelor

În scopul creșterii și ajustării valorii rezistenței la valoarea nominală dorită (de la 10 k $\Omega$  se poate ajunge la 10 M $\Omega$ ) se execută operația de filetare a elementului rezistiv. Operația constă în îndepărtarea unei părți din pelicula de carbon depusă anterior cu ajutorul unor discuri abrazive sau a laserului, asemănător executării unui filet pe o suprafață cilindrică exterioară.

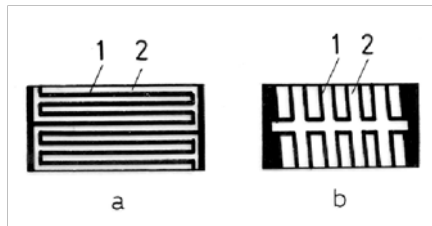
Filetarea elementului rezistiv trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- lungimea zonei filetate să fie de cel puțin 70 % din lungimea suportului izolant;
- filetul să înceapă de lângă zona metalizată (fără să o atingă) pentru cele cu peliculă de carbon și de la aproximativ 1 mm de capătul tronsonului pentru cele cu peliculă de nichel;

- pasul filetului trebuie să fie de cel puțin 2,5 ori mai mare decât lățimea șanțului:
- pierderile de suprafață îndepărtate la „filetare” să nu depășească 30 % pentru a nu diminua excesiv puterea de disipație.

Filetarea rezistoarelor cu rezistențe electrice mai mici decât 100 k $\Omega$ , se realizează cu *discuri abrazive* având grosimea de (0,2...0,5) mm, iar pasul filetului de (0,5...3) mm.

Rezistoarele cu valoare nominală a rezistenței electrice mai mare decât 100 k $\Omega$  se filetează cu *laser*. În acest caz pasul filetului ia valori cuprinse în intervalul (0,3...1,5) mm.



**Figura 7-6 Rezistoare spiralizate pentru înaltă frecvență: a) cu canale axiale; b) cu canale circulare; 1-peliculă metalică, 2-canal**

*Îmbunătățirea performanțelor rezistoarelor spiralizate (filetate) de înaltă frecvență* se poate face prin adoptarea unor forme speciale pentru canalele create în pelicula rezistivă, astfel încât să apară căi de curent apropiate, axiale sau circulare, prin care circulă curentul electric în sensuri inverse, reducându-se în felul acesta efectul de inductanță. În Figura 7-6 sunt prezentate două tipuri de rezistoare peliculare pentru înaltă frecvență.

### Terminalele

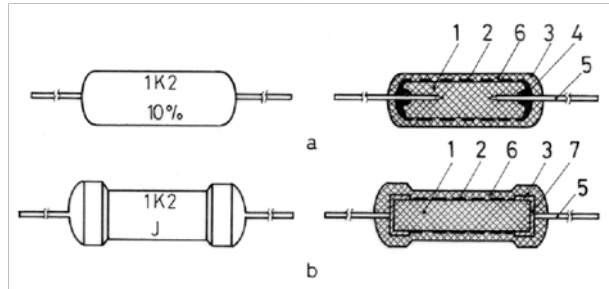
Terminalele se realizează din sârmă de cupru dublu cositorită, cu diametrul de 0,6; 0,8 și 1 mm. Conectarea acestora la tronsonul rezistiv se face în două moduri, în funcție de puterea rezistorului.

Astfel, pentru rezistoarele cu puterea nominală mai mare de 0,25 W, conectarea se face prin lipire utilizând un aliaj de lipit ce conține 90%Pb și 10%Sn, iar pentru rezistoarele cu puterea nominală de 0,125 W terminalele, prevăzute cu căpăcele, se sudează la capetele tronsonului rezistiv (Figura 7-7).

### Protecția la acțiunea factorilor mecano-climatici

Pentru protejarea rezistoarelor peliculare se folosește un lac dielectric cu care se acoperă rezistorul după atașarea terminalelor. Structurile unor rezistoare cu peliculă de carbon sunt prezentate în Figura 7-7.

După sortarea valorică, are loc marcarea, ce se realizează semiautomat pe mașini de tip *offset*. Pe corpul rezistorului se marchează în clar rezistența nominală și toleranța. Se poate face marcarea și prin utilizarea codului literar. Puterea disipată nominală nu se marchează, deoarece valoarea acesteia se recunoaște după dimensiunile rezistorului.



**Figura 7-7 Rezistoare peliculare: a) cu canale lipite; b) cu căpăcele; 1-suport ceramic, 2-peliculă rezistivă, 3-peliculă metalică pentru conectarea terminalelor, 4-lipitură, 6-strat de protecție, 7-căpăcel metalic**

Controlul de fabricație cuprinde teste electrice, mecanice și vizuale, care se realizează în diverse faze bine stabilite prin tehnologia de fabricație, și care au ca scop înlăturarea pieselor defecte încă din fazele respective. Un test foarte important este testul de suprasarcină, ce se face după conectarea terminalelor. Testul constă în aplicarea pentru o durată scurtă 1...5 secunde, a unei supratensiuni, în scopul îndepărtării scurtcircuitelor superficiale între spirele alăturate și pentru stabilizarea valorii rezistorului. Durata de solicitare este proporțională cu puterea nominală.

### 7.5.2. Tehnologia rezistoarelor cu peliculă rezistivă pe bază de oxizi metalici

În cadrul acestei tehnologii depunerea rezistivă se realizează pe o singură parte a suportului izolant. Rezistoarele de acest tip se prezintă sub formă de plachete cu terminalele de implantare, de mărimi diferite funcție de puterea nominală disipată.

#### Suportul izolant

Materialul utilizat pentru fabricarea suportului izolant este *alumina*. Inițial suportul izolant se realizează la dimensiuni mult mai mari decât cele necesare unui „cip” rezistiv, deoarece, pe același suport se realizează un număr mai mare de *cipuri* rezistive (circa 100 sau 120). Realizarea simultană a unui număr mare de *cipuri* pe același suport simplifică foarte mult efectuarea operațiilor tehnologice specifice acestei tehnologii, mărind astfel productivitatea procesului și scăderea costului produsului. Totodată se obține și o constanță a calității *cipurilor* executate pe același suport.

#### Elementul rezistiv

Depunerea peliculei rezistive propriu-zise este precedată de depunerea peliculei pentru conectarea terminalelor. În acest scop se depune mai întâi o peliculă de aliaj Ag-Pb pentru conectare și apoi pelicula groasă de înaltă rezistivitate. Ambele pelicule se depun prin *serigrafie*. Pentru protecția peliculelor depuse, în următoarele operații tehnologice, acestea se glazurează.

Deoarece procesul tehnologic de depunere a peliculei rezistive nu permite obținerea exactă a valorii nominale, este necesar să se efectueze și o operație de ajustare la valoarea și toleranța dorită. Această operație se realizează prin înlăturarea unei părți din pelicula rezistivă, utilizând metode de prelucrare cu pulberi abrazive sau prelucrarea cu laser.

Forma și dimensiunile peliculelor de contactare și rezistive depind de puterea și rezistența nominală a rezistorului, în funcție de aceasta realizându-se și sita serigrafică.

Separarea *cipurilor* rezistive realizate simultan pe același suport izolant se face prin tăiere cu laser.

În figura 2.11 sunt prezentate etapele de realizare ale unui set de *cipuri* fabricate pe același suport.

### Terminalele

Ca și la celelalte tipuri de rezistoare, terminalele se realizează din sârmă de cupru dublu cositorit, cu diametrul de 0,64 mm.

Conectarea terminalelor la *cipul* rezistiv se face prin lipire cu aliaje de lipit a căror temperatură de topire trebuie să fie mai mică decât temperaturile la care s-au realizat depunerile anterioare.

### Protecția la acțiunea factorilor mecano-climatici

Protejarea *cipurilor* rezistive cu peliculă din oxizi metalici se face prin acoperirea cu un strat de rășină termodură și prin ceruire.

Ca și la celelalte tipuri de rezistoare, marcarea se face notându-se în clar rezistența nominală și toleranța.

## 7.5.3. Tehnologia rezistoarelor de volum

Elementul rezistiv este constituit de întreaga masă a rezistorului, care din punct de vedere fizic reprezintă un sistem format din două sau mai multe faze metalografice, dintre care una este *conductoare* iar cealaltă *izolantă* - constituită dintr-un material izolant de umplutură (dioxid de titan, caolin etc.) - al cărui rol este de a asigura creșterea stabilității termice și a stabilității la umiditate precum și îmbunătățirea rezistenței mecanice și a conductivității termice a compoziției.

Faza conductoare este constituită de obicei din carbon sub formă de grafit sau negru de fum. În masa rezistivă se mai adaugă și un liant izolant (de obicei rășină formaldehidică) care ajută la solidificare.

Procesul de fabricație a acestor tipuri de rezistoare cuprinde următoarele etape tehnologice:

- pregătirea componentelor (măcinare, uscare și sortare granulometrică);
- dozarea și amestecarea cu liant;
- formarea pieselor prin presare la cald sau extrudare;
- solidificarea;
- fixarea terminalelor (ca și la rezistoarele peliculare cu carbon);
- impregnarea de protecție.

Deși au un cost mai redus decât al altor rezistoare și o bună rezistență electrică și termică, rezistoarele de volum prezintă o serie de dezavantaje importante, cum ar fi: valorile ridicate ale tensiunii electromotoare de zgomot și coeficientului de temperatură, ca și dificultatea obținerii unei stabilități a toleranțelor în procesul de producție, ceea ce conduce la o dispersie mare a valorilor rezistenței nominale. Acesta este unul din motivele pentru care se manifestă tendința de înlocuire a acestora cu alte tipuri de rezistoare.

#### 7.5.4. Tehnologia straturilor subțiri pentru fabricarea rezistoarelor

În contextul miniaturizării componentelor și montajelor electronice, tendința constă în realizarea rezistoarelor într-o formă miniaturizată, comparabilă cu a componentelor electronice active. În acest context se utilizează tehnologia straturilor subțiri (TSS) și tehnologia straturilor groase (TSG).

Pe baza acestor tehnologii pot fi realizate rezistoare și rețele rezistive, precum și rezistoarele din cadrul circuitelor hibride.

Grosimea peliculelor rezistive realizate prin TSS este sub 5  $\mu\text{m}$  (de obicei de ordinul a 100...30.000 Å), pe când a celor realizate prin TSG este de circa 10...50  $\mu\text{m}$ .

**Tabelul 7-2 Caracteristicile și performanțele unor tipuri de rezistoare**

Caracteristica	Tipul rezistorului				
	bobinate		cu peliculă		de volum
	de precizie	de putere	metalică	de carbon	
Gama valorilor ( $\Omega$ )	0,1...250	0,1...150k	1...25M	0,1...250k	2,7...100M
Toleranța (%)	1...0,05	10...5	1...0,1	10...2	20...5
Putere nominală	1...15	2...225	0,05...2	0,1...2	0,125...2
Coeficientul de variație cu temperatura a rezistenței ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	50	250	100	200...500	200...1.500
Coeficientul de variație a rezistenței (%)					
- sub sarcină	0,5	max.3	0,5	0,6	3
- sub acțiunea căldurii umede	0,2	0,4	0,3	0,4	6
- sub acțiunea supratensiunii	max. 0,2	max. 2		1	1
- sub acțiunea șocului termic	0,3	0,5	0,5	2	2...10
Cost	foarte ridicat	ridicat	mediu	scăzut	foarte scăzut

#### Tehnologia straturilor subțiri

*Peliculele rezistive realizate prin TSS* se obțin prin condensarea vaporilor materialului de depunere pe un strat solid și inert din punct de vedere electric. Pentru realizarea peliculei rezistive propriu-zise se utilizează aliajul crom-nichel (Cr-Ni), tantalul (Ta), nitrura de tantal ( $\text{TaN}_2$ ) ș.a.

*Suporturile izolante* cu cele mai bune rezultate sunt sticlele speciale care nu conțin sodiu și sulf, și care au în compoziție plumb, introdus în scopul reducerii mobilității ionilor alcalini.

Un rezistor obținut prin *TSS* se prezintă ca o bandă rezistivă cu grosime foarte mică, având diferite forme geometrice, aflată împreună cu terminalele, pe suprafața plană a substratului pasiv din punct de vedere electric.

Fabricarea rezistoarelor de precizie prin *TSS* presupune parcurgerea următoarelor *etape tehnologice principale*:

**a) Depunerea stratului rezistiv și a zonelor de contactare.** Operația este foarte importantă deoarece de caracteristicile stratului obținut depinde direct calitatea rezistorului pelicular. Ca metode tehnologice de depunere se folosesc evaporarea în vid înalt (recomandată în cazul aliajelor Cr-Ni și a cermeturilor), pulverizarea catodică în plasma unui gaz inert (indicată pentru Ta și TaN<sub>2</sub>) și metodele chimice.

**b) Definirea formelor geometrice.** Este operația prin care se realizează conturul geometric al viitorului rezistor; se poate face prin *mascare* (acoperirea zonelor cu un fotorezist care nu trebuie acoperite cu peliculă rezistivă) sau prin *decapare selectivă* (sau *gravare selectivă*), care presupune îndepărtarea materialului depus din locurile nedorite, utilizând în acest scop fasciculul laser comandat de un calculator de proces. Trebuie remarcat faptul că în general, pentru obținerea formei finale a traseului rezistiv și a zonelor de contactare, operațiile de definire a formelor sunt repetate de mai multe ori.

**c) Ajustarea valorii rezistenței.** Se realizează în scopul obținerii toleranței finale admise (de obicei sub 1%). Această operație se poate face individual sau în bloc, prin ajustarea simultană a tuturor rezistențelor cuprinse pe un substrat, urmărindu-se obținerea unei anumite valori nominale precise sau a unui raport între două sau mai multe rezistoare ale unui circuit. Referitor la această operație trebuie arătat că ajustarea nu se poate face decât într-un singur sens (de creștere a valorii rezistenței) și diferă ca principiu în funcție de materialul rezistiv utilizat. Este indicat ca la proiectarea parametrilor constructivi ai rezistențelor să se țină seama și de detaliile specifice tehnologiei de ajustare.

**d) Stabilizarea valorii.** Această operație reprezintă, de obicei, o îmbătrânire accelerată a rezistoarelor peliculare, având ca rezultat stabilizarea valorii rezistenței.

**e) Aplicarea terminalelor.** Această operație se face prin lipire cu aliaje de lipit adecvate.

**f) Încapsularea.** Este operația finală care asigură protecția la acțiunea factorilor mecano-climatici, atât a părții active a rezistorului pelicular, cât și a substratului.

Rezistoarele și rețelele rezistive realizate prin *TSS* sunt tot mai mult utilizate în aplicațiile profesionale, în special, datorită unor avantaje importante pe care acestea le prezintă și anume: precizia foarte mare de realizare a valorii nominale, stabilitate deosebită în timp și la variațiile temperaturii, posibilitatea utilizării la frecvențe foarte înalte ș.a.



La realizarea rețelelor rezistive prin *TSS*, pe lângă gradul ridicat de miniaturizare obținut, se înregistrează și o reproductibilitate superioară a caracteristicilor electrice și termice și posibilitatea reducerii elementelor parazite.

Proiectarea unor astfel de structuri ridică probleme mai deosebite și trebuie să respecte o serie de cerințe privind amplasarea componentelor rezistive și a conductoarelor de legătură pe substrat.

### 7.5.5. Tehnologia straturilor groase

În cazul *TSG*, rezistoarele se obțin prin arderea controlată a unor paste rezistive, depuse prin procedeul sitei serigrafice pe substraturi izolante, de obicei din alumina.

Cernelurile sau pastele rezistive utilizate sunt de două categorii:

- *cermeturi* - amestecuri de pulberi de metale prețioase sau oxizi ai acestora și pulbere de sticlă, în suspensie într-un liant organic;
- *metalice* - pulbere de metal nobil în suspensie într-un liant organic.

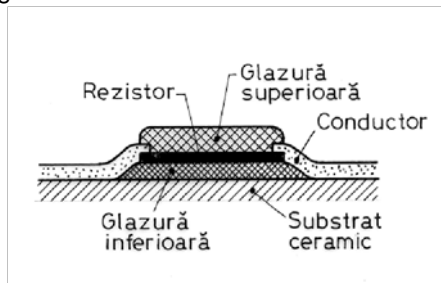


Figura 7-8 Structura unui rezistor metalic

În funcție de performanțele tehnice ale rezistorului se aleg acele cerneluri (paste) care, pentru dimensiunea dată a substratului, au rezistivitatea peliculară necesară. În cazul în care, de exemplu, la realizarea unui circuit integrat hibrid, pe lângă rezistoare este necesar să se realizeze și alte componente electrice, se preferă acele cerneluri care permit obținerea celor mai multe componente într-un proces de depunere - ardere sau, altfel spus, care necesită cele mai puține operații de mascare pentru realizarea circuitului.

În Figura 7-8 se prezintă structura unui rezistor metalic. Se observă că sub pelicula rezistivă se află o glazură inferioară. Rolul acestei glazuri este de a asigura o suprafață netedă pentru pelicula rezistivă. Totodată substratul nu mai influențează rezistivitatea rezistorului și coeficientul lui de temperatură.

În cazul rezistoarelor cermet, care de fapt, sunt cele utilizate în *TSG* nu mai este necesar să se folosească stratul de glazură inferioară, deoarece acestea sunt mai puțin sensibile la asperitățile substratului.

Glazurarea superioară se practică la toate tipurile de rezistoare realizate în *TSG*, deoarece mărește stabilitatea rezistorului și conferă o rezistență mecanică mai mare, structurile glazurate putând astfel să fie suprapuse în timpul procesului automat de prelucrare.

Fluxul tehnologic pentru fabricarea rezistoarelor prin TSG cuprinde următoarele operații tehnologice:

**a) Pregătirea substratelor.** Această operație se face parcurgând următoarele etape: spălarea ultrasonică în mediu apos adecvat, clătirea în apă deionizată, uscarea, arderea în cuptoare la 800...1000°C pentru îndepărtarea unor contaminanți.

**b) Obținerea configurației dorite pe site.** Se utilizează site din fire de nylon sau de oțel inoxidabil, iar configurarea lor se poate face prin mai multe metode. Metoda directă constă în acoperirea sitei cu o emulsie sensibilă la radiația ultravioletă. Aceasta se iluminează printr-un clișeu fotografic pe care s-a realizat configurația rezistoarelor și a zonelor de conectare; în regiunea iluminată gelatina se întărește putând fi îndepărtată numai din locurile neiluminate. Metoda are dezavantajul că rezoluția pe care o determină este limitată de desimea sitei, deoarece prin acest procedeu un ochi al sitei poate fi liber sau astupat.

Îmbunătățirea rezoluției se poate face utilizând metoda indirectă. În acest caz stratul de gelatină se întinde pe o folie de plastic, numită folie suport, se expune, se dezvoltă, și apoi se pune în contact direct cu sita. După uscarea gelatinei folia suport se îndepărtează. Metoda permite ca un anumit contur să treacă printr-un ochi al sitei și prin urmare asigură obținerea unei rezoluții mai bune. O rezoluție foarte bună se obține în cazul folosirii sitelor dublu decapa-te. În cazul utilizării metodei indirecte, stratul de gelatină poate fi înlocuit cu o folie metalică subțire, având o grosime tipică cuprinsă între 25 și 100 μm, în care se gravează configurația dorită și care se lipește pe sită. Lățimea minimă a traseelor ce se pot obține este de 125 μm pentru metoda directă, 75 μm pentru metoda indirectă și 50 μm pentru metoda indirectă cu folie metalică.

**c) Imprimarea.** Pastele utilizate în tehnologia straturilor groase sunt consistente și din această cauză nu curg sub acțiunea forței de gravitație sau a tensiunii superficiale prin ochiurile neastupate ale sitelor. Prin urmare, procesul de imprimare constă în trecerea forțată a pastelor prin ochiurile neacoperite ale sitelor, în scopul obținerii imaginilor dorite pe suprafața stratului. În vederea imprimării, pasta se depune pe o față a sitei, care este suspendată la o distanță de aproximativ 0,5 mm deasupra substratului și se acționează asupra ei cu o presiune adecvată prin intermediul unei raclete înclinate care traversează sita de la un capăt la celălalt. Presiunea exercitată de racletă servește în același timp și la a aduce în contact sita cu substratul, astfel încât pasta să ude suprafața substratului. După trecerea racletei, datorită elasticității ei naturale, sita se dezlipește de pe substrat, lăsând pe substrat pasta în configurația dorită sub forma unor mici coloane, determinate de ochiurile sitei. După imprimare, coloanele se unesc între ele formând un strat continuu în dreptul deschiderilor sitei. Pentru a preveni curgerea pastei, și prin urmare lățirea liniilor imprimate, vâscozitatea trebuie să fie bine controlată.

Imprimarea se realizează cu ajutorul unor mașini de imprimat specializate. În principiu, o mașină de imprimat are următoarele părți principale: un suport pe care sunt menținute substraturile, folosind de obicei acțiunea de sugere a unei pompe de vid, o structură pentru susținerea ramei în care se fixează sita și o racletă care poate trece peste suprafața sitei în scopul forțării pătrunderii pastei prin perforațiile neastupate ale acesteia. Racleta se confecționează de obicei din

poliuretan sau alte mase plastice. Racleta trebuie să prezinte o duritate corespunzătoare astfel încât uzura acesteia să se producă cu viteză cât mai mică.

De asemenea, mașinile de imprimat încorporează și un mecanism fin pentru reglarea poziției relative, substrat-sită, necesar pentru aliniere, adică pentru realizarea corectă a imprimărilor suprapuse.

Parametrii care se controlează sunt: mărimea jocului (distanța dintre sită și substrat), paralelismul dintre sită și substrat, presiunea exercitată de racletă, viteza racletei, unghiul dintre racletă și suprafața sitei, elasticitatea sitei, vâscozitatea pastei, volumul de pastă așezat pe sită ș.a.

**d) Uscarea și arderea.** Straturile groase obținute prin imprimare sunt supuse unui ciclu de uscare și ardere. Procesele de uscare-ardere asigură pe de o parte, îndepărtarea solventului organic din pastă, iar pe de altă parte, producerea unor reacții chimice și fizice în urma cărora se obțin proprietățile electrice dorite ale diverselor paste.

Uscarea se face la temperaturi cuprinse între 70 și 150°C, cu viteze lente pentru a împiedica evaporarea violentă a solventilor și deteriorarea stratului depus. Procesul de uscare se poate efectua folosind cuptoare sau radiații infraroșii.

Procesul de ardere se desfășoară la temperaturi mai ridicate (până la 1000°C) și este mai complet decât uscarea. În timpul arderii, compușii nevolatili ai lianților organici se descompun, praful de sticlă se înmoaie, udă ceramica și înglobează particulele de metal din pastă într-o matrice aderentă la substrat, determinând totodată reacții chimice în urma cărora se obțin proprietățile electrice dorite ale pastelor. Procesul de ardere trebuie să se facă cu o viteză suficient de mică pentru ca substanțele organice să se ardă sau să se descompună complet înainte ca sticla să se topească.

Ciclul de ardere afectează proprietățile straturilor depuse: aderența, rezistența specifică, coeficientul de temperatură și stabilitatea straturilor rezistive.

De aceea, este deosebit de important ca procesul de ardere să fie controlabil și să se poată reproduce în cicluri identice.

Arderea se face în cuptoare prevăzute cu bandă transportoare care pot realiza un profil controlat de temperatură. Încălzirea se face din exterior utilizând rezistențe electrice de crom-nichel sau Kanthal; temperatura se controlează în 4 până la 12 zone, depinzând de dimensiunile cuptorului. Un profil de temperatură odată stabilit trebuie respectat cu o precizie de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Viteza benzii transportoare este cuprinsă între 1,5 și 15 cm/min.

Atmosfera din cuptoare trebuie controlată. Majoritatea pastelor se ard de obicei în aer și de aceea este suficientă asigurarea unui flux de aer adecvat, care însă trebuie astfel controlat încât să nu modifice profilul de temperatură necesar. Soluția cea mai simplă pentru obținerea unei atmosfere controlate constă în înclinarea ușoară ( $1...3^\circ$ ) a cuptorului față de orizontală, intrarea fiind mai ridicată față de ieșire.

Realizarea rețelelor rezistive prin TSG presupune efectuarea a trei imprimări urmate de ciclurile de uscare și arderea corespunzătoare a fiecărui tip de pastă.

Prima dată se realizează depunerea peliculei conductoare de Ag-Pb, prin care se realizează zonele de contactare cu terminalele sau a rezistoarelor care sunt realizate pe același substrat.

Urmează depunerea peliculei rezistive care se face după arderea peliculei conductoare.

Ultima depunere este cea cu glazură care se face după atașarea terminalelor.

Se respectă în acest fel principiul potrivit căruia temperaturile maxime din timpul arderii diferitelor straturi depuse succesiv pe același substrat, să fie din ce în ce mai scăzute pentru a nu produce modificări ale straturilor depuse anterior.

**e) Ajustarea valorii rezistenței electrice.** Precizia inițială de realizare a rezistoarelor cu peliculă groasă conduce la toleranțe largi (15...20%). Din acest motiv, la proiectare rezistoarele se dimensionează cu arie mai mare și valoare scăzută a rezistenței electrice, iar după ardere pelicula este ajustată în lățime, până la obținerea rezistenței dorite. Precizia ajustării permite obținerea unor toleranțe de 2% sau 5%, cu atenție specială realizându-se chiar toleranțe sub 1%.

Ajustarea se face cel mai frecvent prin sablare, cu fascicul laser, cu ajutorul ultrasunetelor sau descărcării de radiofrecvență.

**f) Aplicarea terminalelor.** Această operație se face prin lipire ca și la rezistoarele obținute prin TSS.

**g) Încapsularea.** Această operație se face prin acoperirea cu un strat de rășină termodură și ceruire sau glazurare. Rezistoarele se marchează pe mașini de tip *offset*, notându-se incolor rezistența nominală și toleranța. Puterea nominală nu se marchează pe corpul rezistorului, ea recunoscându-se după dimensiuni.

Tehnologiile și materialele folosite pentru fabricarea rezistoarelor în TSS și TSG conduc la obținerea de performanțe diferite.

## 7.6. Structura constructivă și tehnologia rezistoarelor variabile (potențioanelor)

### 7.6.1. Tipuri de potențioanete

*Potențioanetele* sunt rezistoare a căror rezistență electrică poate fi modificată continuu sau în trepte, prin deplasarea rectilinie, circulară sau elicoidală a unui contact mobil (cursor) pe suprafața unui element rezistiv (bobinat, pelicular etc.), delimitat de două contacte terminale.

În prezent se fabrică o mare diversitate de potențioanete. Clasificarea acestora se face după mai multe criterii.

Primul criteriu îl constituie *modul de realizare a elementului rezistiv*. În baza acestui criteriu se deosebesc două tipuri de potențioanete și anume:

- **potențioanete bobinate**, care sunt realizate prin înfășurarea unui conductor metalic de rezistivitate ridicată pe un suport izolanț; ca formă acestea pot fi rectilinii sau circulare și au valori nominale ale

rezistenței cuprinse între  $100\Omega$  și  $50k\Omega$ ; datorită coeficientului de temperatură scăzut pot fi utilizate la puteri relativ ridicate;

- **potențiometre peliculare**, realizate prin depunerea unei pelicule rezistive (carbon aglomerat, metal, cermet etc.) pe un suport izolant prin procedee fizico-mecanice complexe; au valori nominale ale rezistenței cuprinse între  $50\Omega$  și  $10M\Omega$ . Potențiometrele cu peliculă de carbon au un cost scăzut dar și performanțe mai slabe, fiind utilizate în echipamente de uz curent, pe când cele cu peliculă metalică sau cu cermet, tind să înlocuiască potențiometrele bobinate în aplicațiile profesionale, datorită coeficientului lor redus de temperatură.

Din punct de vedere constructiv se deosebesc o mare varietate de tipuri de potențiometre. Dintre cele mai frecvent utilizate în aparatura electronică se menționează:

- **potențiometre simple**, care conțin un singur element rezistiv;
- **potențiometre duble**, ce conțin două elemente rezistive; în scopul reducerii influențelor reciproce, între cele două elemente rezistive trebuie să se plaseze un ecran metalic;
- **potențiometre tandem**, sunt potențiometre cu două sau mai multe secțiuni, comandate de un singur ax pe care sunt fixate cursoarele; sunt utilizate pentru reglarea simultană a două sau mai multe circuite;
- **potențiometre multitură** cu revenire și înregistrarea turelor;
- **potențiometre miniatură**, care au dimensiuni foarte reduse, ceea ce permite utilizarea lor ca dispozitive de reglaj în aparatura electronică miniaturizată.

Trebuie menționat faptul că, în general, potențiometrele miniatură se realizează cu peliculă rezistivă de cermet sau metalică. Există potențiometre simple, duble sau triple, care sunt deosebit de utile în cazul aparaturii electronice miniaturizate. Unele potențiometre miniatură sunt prevăzute cu întrerupătoare monopolare.

## 7.6.2. Structura constructivă a rezistoarelor variabile

### Elementul rezistiv

În cazul *potențiometrelor bobinate*, pentru realizarea elementelor rezistive se utilizează materiale conductoare de înaltă rezistivitate:

- manganin (pentru potențiometre cu valori până la  $2000\Omega$ );
- nichrom (pentru valori ale rezistenței electrice de peste  $2000\Omega$  și pentru cele de putere) ș.a.

După bobinare elementele rezistive sunt impregnate cu rășini fenolice și uscate în etuvă în scopul fixării spirelor. Extremitățile conductorului bobinat sunt fixate cu coliere din alamă argintată, obținându-se astfel un contact electric bun cu bornele de ieșire.

Pentru *potențiometrele cu peliculă de carbon*, pelicula rezistivă formată dintr-o combinație de două paste (una cu rezistivitate mare și alta cu rezistivitate scăzută) care se amestecă într-o proporție determinată de rezistența nominală a potențiometrului. După depunerea pastei pe suportul izolant (utilizând instalații

speciale) urmează uscarea timp de 2 minute la  $50...80^{\circ}\text{C}$ , după care se menține la temperatura ambiantă timp de 5 ore. Capetele de contact ale elementului rezistiv se acoperă cu pastă de argint. După depunerea pastei de argint, se introduce într-un cuptor aflat la temperatura de  $160...170^{\circ}\text{C}$  pentru uscare.

### Suportul izolanț

Materialul folosit pentru fabricarea suporturilor izolante la potențiometrele bobinate este ales în funcție de temperatura maximă de utilizare. La potențiometrele de mică putere la care temperatura nu depășește  $70^{\circ}\text{C}$  se utilizează suporturi din pertinax subțire. Pentru potențiometrele bobinate de mare putere, care lucrează până la temperaturi de  $300^{\circ}\text{C}$ , se folosește ceramică termorezistentă sau aluminiu izolat de conductorul rezistiv prin intermediul unor foi de mică. Suportul metalic permite disiparea căldurii produse prin șasiu.

Forma suportului este determinată de legea de variație a rezistenței. Astfel, pentru un suport de formă dreptunghiulară rezistența variază liniar, iar pentru un suport trapezoidal, rezistența variază logaritmic.

În Figura 7-9 sunt prezentate câteva elemente rezistive pentru potențiometre bobinate.

În Figura 7-10 este prezentat un tip de suport izolanț din pertinax pentru potențiometre cu element rezistiv pelicular.

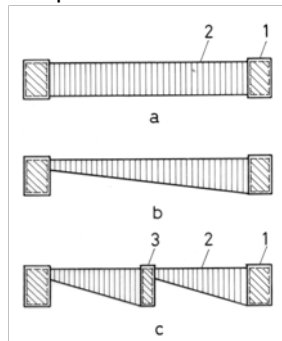


Figura 7-9 Elemente rezistive pentru potențiometre bobinate: a) dreptunghiular; b) trapezoidal; c) dublu trapezoidal

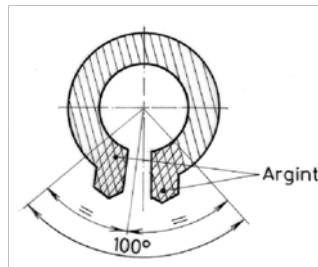


Figura 7-10 Suport izolanț din pertinax

### Cursorul

În cazul potențiometrelor bobinate cursorul se realizează dintr-o lamelă de oțel care poartă la capăt o perie de grafit sau bronz grafitat. Lamela de oțel serveș-

te numai pentru a realiza presiunea de contact necesară a periei pe conductorul bobinat, iar pentru legătura electrică dintre perie și cealaltă extremitate a lamelei cursorului se prevede o tresă de cupru.

La potențiometrele peliculare cursorul trebuie să îndeplinească trei condiții esențiale:

- să nu uzeze pelicula rezistivă;
- să facă un contact sigur în toate pozițiile;
- să nu se oxideze.

Cursorul se confecționează fie din bronz fosforos, fie din aliaj de nichel, cupru și zinc rezistent la uzură, din care se realizează și contactul central. Presiunea cursorului pe pelicula de contact trebuie să asigure un contact electric bun și o uzură minimă. De asemenea, cursorul trebuie să fie izolat față de axul potențiometrului, acesta fiind întotdeauna legat la masă printr-o bucușă filetată.

## 7.7. Caracteristicile rezistoarelor fixe

Rezistoarele fixe sunt caracterizate din punctul de vedere al funcționării de următoarele mărimi:

### 7.7.1. Rezistența nominală și toleranța acesteia ( $R, t$ )

Realizarea tuturor valorilor nominale necesare în aplicațiile electronice ar însemna o mare complexitate a procesului tehnologic de fabricație a rezistoarelor, complexitate inutilă întrucât în practică valorile rezistoarelor admit o abatere mai mare sau mai mică de la valoarea nominală, fără a modifica parametrii circuitului. De aceea s-au ales valori nominale discontinue, însoțite de toleranțe.

*Toleranța  $t$*  exprimă (procentual) abaterea maximă admisibilă a valorii reale  $R$  față de valoarea nominală  $R_n$ :

$$t = \pm \max \frac{|R - R_n|}{R_n} \quad (60)$$

Valorile nominale ale rezistoarelor se aleg astfel încât să îndeplinească condițiile:

- pentru două valori nominale consecutive dintr-o serie ( $R_{n1} < R_{n2}$ ) să existe relația:

$$R_{n1}(1 + t) \geq R_{n2}(1 - t) \quad (61)$$

- toleranța din fiecare serie să fie independentă de valoarea nominală. Îndeplinirea condițiilor de mai sus presupune ca valorile nominale să alcătuiască o progresie geometrică, având primul termen  $R_0$  și rația  $r$ :

Conform recomandărilor Comitetului Electrotehnic Internațional (C.E.I.), seriile valorilor nominale ale rezistoarelor alcătuiesc progrese geometrice în domeniile 1...10Ω, 10...100Ω etc. Practic este suficient să se determine valorile nominale ale rezistoarelor din gama 1...10Ω, pentru celelalte game utilizându-se multiplii zecimali ai acestor valori.

Numărul de valori  $n$  dintr-o clasă de toleranță se poate calcula. Valorile nominale standardizate ale rezistoarelor din seria E<sub>6</sub> sunt: 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 și multiplii lor zecimali.

Caracteristicile seriilor de valori nominale ale rezistoarelor - conform recomandărilor C.E.I. - sunt indicate în Tabelul 7-3.

Valorile nominale ale rezistoarelor din seriile uzuale E<sub>6</sub>, E<sub>12</sub> și E<sub>24</sub> sunt date în Tabelul 7-4.

Alegerea unui rezistor cu o toleranță mai mică sau mai mare este determinată de locul ocupat de acesta în schema electronică. În circuitele unde chiar o modificare relativ mare a valorii rezistenței nu influențează sensibil regimul de funcționare a schemei.

**Tabelul 7-3 Caracteristicile seriilor de valori nominale ale rezistoarelor**

Seria	E6	E12	E24	E48	E96	E192
Rația progresiei	$\sqrt[6]{10}$	$\sqrt[12]{10}$	$\sqrt[24]{10}$	$\sqrt[48]{10}$	$\sqrt[96]{10}$	$\sqrt[192]{10}$
Toleranța	±20%	±10%	±5%	±2,5%	±1,25%	±0,6%

La stabilirea valorilor toleranțelor admisibile trebuie avut în vedere și curentul electric care le parcurge, deoarece curentul continuu produce modificări ireversibile ale caracteristicilor rezistoarelor, accelerând procesul de îmbătrânire.

**Tabelul 7-4 Valorile nominale ale rezistoarelor din seriile E<sub>6</sub>, E<sub>12</sub> și E<sub>24</sub>**

E <sub>6</sub> ±20%	E <sub>12</sub> ±10%	E <sub>24</sub> ±5%	E <sub>6</sub> ±20%	E <sub>12</sub> ±10%	E <sub>24</sub> ±5%
		1,0			3,3
1,0	1,0	1,1	3,3	3,3	3,6
	1,2	1,2		3,9	3,9
		1,3			4,3
	1,5	1,5		4,7	4,7
1,5		1,6	4,7		5,1
	1,8	1,8		5,6	5,6
		2,0			6,2
	2,2	2,2		6,8	6,8
2,2		2,4	6,8		7,5
	2,7	2,7		8,2	8,2
		3,0			9,1

*Marcarea valorii nominale a rezistenței* pe corpul rezistorului se poate face „în clar” (Figura 7-11, a și b) sau utilizând codul culorilor (Figura 7-11, c și d și Tabelul 7-5).



Tabelul 7-5 Codul culorilor pentru marcarea rezistoarelor

Culoarea	Prima cifră semnificativă	A doua cifră semnificativă	Multiplicator	Toleranță
Negru	0	0	1	-
Maro	1	1	10	±1%
Roșu	2	2	10 <sup>2</sup>	±2%
Portocaliu	3	3	10 <sup>3</sup>	-
Galben	4	4	10 <sup>4</sup>	-
Verde	5	5	10 <sup>5</sup>	-
Albastru	6	6	10 <sup>6</sup>	-
Violet	7	7	10 <sup>7</sup>	-
Gri	8	8	10 <sup>8</sup>	-
Alb	9	9	10 <sup>9</sup>	-
Auriu	-	-	10 <sup>-1</sup>	±5%
Argintiu	-	-	10 <sup>-2</sup>	±10%
Fără culoare	-	-	-	±20%
Verde-gălbui	-	-	-	profesionale

Marcarea toleranței se poate face „în clar” (Figura 7-11, a), cod literar (Figura 7-11, b și tab. 2.8) sau codul culorilor (Figura 7-11, c, d și Tabelul 7-5).

Utilizarea codului culorilor este avantajoasă în producția de serie mare și permite totodată o mai ușoară citire a valorii rezistenței, în special în montajele foarte compacte. Marcarea în codul culorilor standardizată (recomandată de către C.E.I.) se realizează cu ajutorul *benzilor colorate* (Figura 7-11, c). Unele fabrici constructoare mai utilizează marcarea prin *puncte colorate* (Figura 7-11, d).

Tabelul 7-6 Codul literar pentru marcarea toleranței rezistoarelor

Toleranța	±0,1%	±0,25%	±0,5%	±1%	±2%	±2,5%	±5%	±10%	±20%
Cod	B	C	D	F	G	H	J	K	M

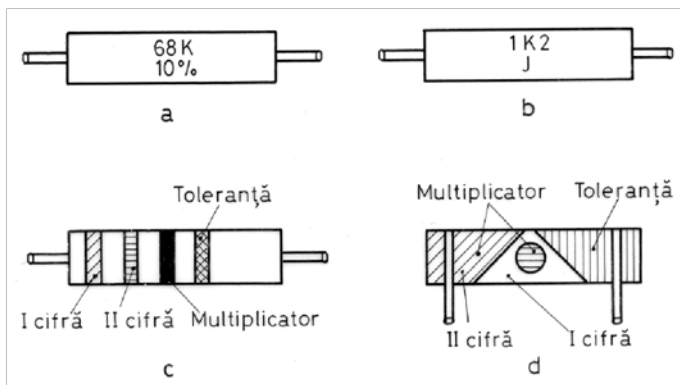


Figura 7-11 Marcarea rezistoarelor

### 7.7.2. Puterea de disipație nominală ( $P_n$ )

Puterea de disipație nominală, exprimată în wați (W), reprezintă puterea electrică maximă pe care o poate dezvolta rezistorul în regim de funcționare îndelungată, fără să-și modifice caracteristicile. Depășirea puterii nominale duce, în timp, la distrugerea rezistorului, de obicei prin întrerupere.

Din considerente de siguranță în funcționare, stabilitate etc., este recomandabil ca puterea disipată de rezistor în circuit să fie mai mică decât 50% din  $P_n$ .

Puterea nominală poate fi mărită asigurând o răcire corespunzătoare a montajului în care se află rezistoarele, printr-o circulație forțată a aerului sau a apei (în cazul rezistoarelor de foarte mare putere).

Încărcarea unui rezistor la puterea lui de disipație nominală este permisă numai la o anumită temperatură ambiantă, determinată fie de încălzirea proprie, fie de căldura radiată de alte componente învecinate. Peste această temperatură, puterea de disipație admisibilă a rezistorului scade liniar cu temperatura.

Puterile uzuale standardizate ale rezistoarelor sunt: 0,05W; 0,10W; 0,125W; 0,25W; 0,5W; 1W; 2W; 4W; 6W; 10W; 16W; 25W; 40W; 50W; 100W.

În schemele electronice, puterea nominală a rezistoarelor este de obicei indicată cu ajutorul unor scheme convenționale situate în interiorul rezistoarelor.

Puterea de disipație nominală se marchează „în clar” pe corpul rezistoarelor bobinate. Pentru rezistoarele peliculare nu se marchează, ci se recunoaște după dimensiunile rezistorului.



Figura 7-12 Marcarea convențională a puterii nominale a rezistoarelor în scheme electronice

### 7.7.3. Tensiunea nominală ( $U_n$ )

Tensiunea nominală pentru un anumit rezistor este definită ca tensiunea maximă ce se poate aplica la bornele rezistorului în regim de funcționare îndelungată, fără modificarea parametrilor acestuia.

### 7.7.4. Zgomotul rezistoarelor

Într-un rezistor prin care circulă un curent continuu, o dată cu mișcarea ordonată a electronilor are loc și o mișcare haotică a acestora, care creează la

bornele rezistorului o tensiune variabilă aleatoare - a cărei valoare eficace este denumită *tensiune electromotoare de zgomot* (exprimată în  $\mu\text{V}$ ).

Tuturor rezistoarelor, indiferent de tip, le este caracteristic *zgomotul termic*, datorat mișcării termice a electronilor; valoarea t.e.m. de zgomot termic este foarte mică (zeci de  $\mu\text{V}$ ) și de aceea rezistoarele bobinate și cele cu peliculă metalică cu conexiuni perfecte - care prezintă doar zgomot termic - pot fi utilizate în punctele schemelor electronice unde este necesar un zgomot redus (de exemplu, la intrările amplificatoarelor).

Rezistoarele cu peliculă de carbon și cele de volum (constituite dintr-un număr de particule conductoare - de obicei din carbon - în contact adesea imperfect unele cu altele) prezintă la trecerea curentului nu numai un *zgomot termic*, ci și un zgomot de curent datorat trecerii fluctuante a curentului printre particulele materialului.

### 7.7.5. Intervalul temperaturilor de lucru

Reprezintă intervalul de temperatură în limitele căruia se asigură funcționarea de lungă durată a rezistorului.

### 7.7.6. Coeficientul de variație cu temperatură al rezistenței

Influența temperaturii asupra rezistenței rezistorului este pusă în evidență prin *coeficientul de variație cu temperatură al rezistenței*, definit prin relația:

$$\alpha_r = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad (62)$$

De asemenea, se mai definesc o serie de *coeficienți de variație a rezistenței* sub acțiunea diferiților factori, cum sunt: tensiunile aplicate, modul de depozitare, umiditatea, îmbătrânirea etc.

### 7.7.7. Precizia rezistoarelor

După performanțe (toleranțe, tensiune de zgomot, valorile maxime admisibile ale coeficienților de variație), rezistoarele se împart în *clase de precizie*. Se obișnuiește clasificarea rezistoarelor în clase de precizie după coeficientul de variație la îmbătrânire, după 5000 ore de funcționare la sarcina nominală. Valoarea procentuală a acestui coeficient indică și denumirea clasei: 0,5; 2; 5; 7; 15.

Rezistoarele se împart în trei categorii: *rezistoare etalon*, *rezistoare de precizie* și *rezistoare de uz curent*, ale căror caracteristici sunt prezentate comparativ în Tabelul 7-7.

Tabelul 7-7 Caracteristicile diferitelor categorii de rezistoare

Categorie	Toleranța	Tensiunea de zgomot	Coefficienți de variație
Etalon	$\pm 1\%; \pm 2,5\%$	$\ll 1\mu\text{V}$	foarte mici
De precizie	$\pm 2,5\%; \pm 5\%$	$< 1\mu\text{V}$	medii
De uz curent	$\pm 5\%; \pm 10\%; \pm 20\%$	$< 15\mu\text{V}$	mari

## 7.8. Caracteristicile rezistoarelor variabile

### 7.8.1. Caracteristici electrice

Potențiometrele sunt caracterizate din punct de vedere funcțional de mărimi similare rezistoarelor fixe: rezistența nominală ( $R_n$ ) și toleranța ( $t$ ) a acesteia, puterea de disipație nominală ( $P_n$ ), tensiunea nominală ( $U_n$ ), tensiunea electromotoare de zgomot, coeficienții de variație a rezistenței sub acțiunea diverșilor factori ambianți.

Potențiometrelor le sunt specifice următoarele caracteristici principale:

- **rezistența inițială** ( $r_0$ ), reprezentând rezistența în poziția inițială a contactului mobil. Această valoare limitează inferior domeniul de lucru al potențiometrului;
- **rezistența de contact** ( $r_k$ ), reprezentând rezistența dintre contactul mobil și elementul rezistiv;
- **legea de variație a rezistenței**, definită printr-o expresie de forma  $R = f(R_n, \varphi, r_0, r_k)$ , unde  $\varphi$  reprezintă, în procente, poziția relativă a cursorului. În Figura 7-13 sunt reprezentate grafic legile de variație a rezistenței potențiometrelor: legea A-pentru potențiometre liniare; legea B-pentru potențiometre logaritmice; legea C-pentru potențiometre negativ logaritmice; legea D-pentru potențiometre exponențiale; legea E-pentru potențiometre negativ exponențiale; legea F-pentru potențiometre dublu logaritmice; legea S-pentru potențiometre tip „S”.

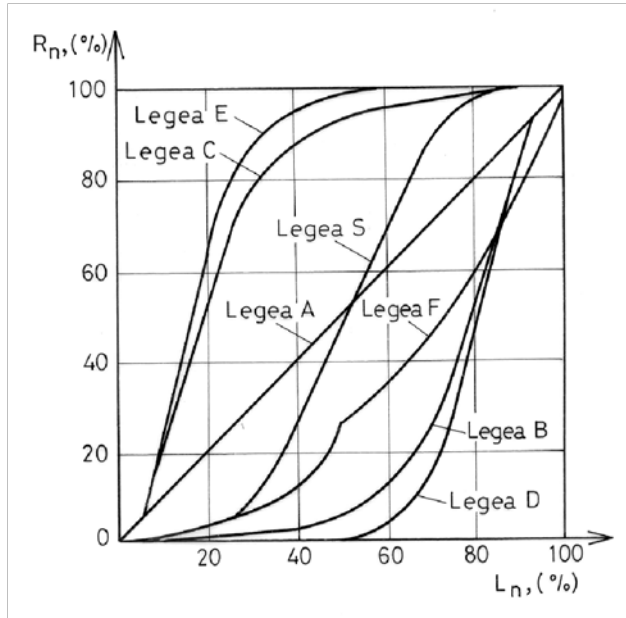


Figura 7-13 Variația rezistenței în funcție poziția cursorului

## 7.9. Criterii de alegere a rezistoarelor

Nu se pot propune reguli general valabile de alegere a unui tip de rezistor sau a altuia, deoarece alegerea lui este determinată de funcționalitatea circuitului, de parametrii sistemului din care face parte circuitul, de condițiile ambiante în care lucrează (temperatură, umiditate, vibrații etc.) și de obținerea unui cost cât mai redus. Pentru un rezistor utilizat într-o schemă electronică trebuie cunoscute foarte exact caracteristicile necesare, întrucât acestea sunt cele care dictează alegerea tipului de rezistor. Necunoașterea corectă a caracteristicilor rezistorului duce la o alegere necorespunzătoare a acestuia, ceea ce implică înrăutățirea parametrilor circuitului și scăderea fiabilității.

Din proiectarea electrică a circuitului rezultă exact valoarea rezistenței  $R$  necesare, tensiunea  $U$  la bornele rezistorului și curentul  $I$  ce-l străbate. Pentru stabilirea caracteristicilor optime ale rezistorului, este recomandat să se respecte câteva reguli, și anume:

- în vederea stabilirii *rezistenței nominale*  $R_n$  și a *toleranței*  $t$ , se analizează influența modificării rezistenței  $R$  asupra regimului de funcționare al circuitului, calculând limita inferioară  $R_i$  și limita superioară  $R_s$  a intervalului în care rezistența  $R$  poate lua valori fără a modifica parametrii circuitului. Rezistența nominală  $R_n$  și toleranța  $t$  se vor alege astfel încât să fie satisfăcută relația:

$$R_i \leq R_n(1 - t) \leq R_n \leq R_n(1 + t) \leq R_s \quad (63)$$

→ pentru a stabili *puterea disipată nominală*  $P_n$ , se calculează puterea disipată de rezistor cu relația:

$$P = UI \quad (64)$$

La alegerea puterii disipate nominale  $P_n$  trebuie să se țină seama de următoarele:

- este recomandabil ca  $P_n$  să fie cel puțin de două ori mai mare ca  $P$ ;
  - puterea nominală  $P_n$  scade o dată cu creșterea valorii rezistenței  $R_n$  și cu creșterea temperaturii ambiante  $T_a$  (dependența este dată în cataloage);
- pentru a determina *factorul de zgomot admisibil*  $F$ , se analizează influența zgomotului asupra circuitului respectiv. Pentru circuitele sensibile la zgomot se vor alege rezistoare cu zgomot redus (rezistoare bobinate, rezistoare cu pelicule pe bază de oxizi metalici);
- *intervalul temperaturilor de lucru*. Cunoscându-se temperatura maximă  $T_s$  și minimă  $T_i$  la care lucrează circuitul, se va alege acel rezistor care lucrează corect în intervalul de temperatură;
- pentru a stabili *coeficientul de temperatură* al rezistenței necesar, se calculează modificările rezistenței datorate temperaturilor  $T_i$  și  $T_s$  și se analizează influența acestor modificări ale rezistenței asupra regimului de funcționare al circuitului, alegându-se coeficientul de temperatură al rezistenței corespunzător.

Cunoscându-se caracteristicile impuse de funcționarea corectă a circuitului, se va alege tipul de rezistor cu caracteristicile cele mai apropiate. Se vor avea în vedere și coeficienții de variație a rezistenței sub acțiunea diferiților factori (tensiune aplicată, umiditate, îmbătrânire, depozitare etc.).

Un alt element foarte important la alegerea tipului de rezistor îl constituie frecvența (banda de frecvență) la care lucrează rezistorul. O dată cu creșterea frecvenței, elementele parazite ale rezistorului modifică comportarea acestuia. De aceea, la frecvențe înalte (zeci de megahertzi) se vor utiliza rezistoare cu elemente parazite (în special inductanța) reduse, iar la frecvențe foarte înalte - rezistoare speciale.

## 7.10. Fiabilitatea rezistoarelor

Prin numărul lor, rezistoarele constituie componente a căror fiabilitate are o mare influență asupra fiabilității ansamblului. Pe baza datelor statistice, s-a estimat că defecțiunile datorate rezistoarelor reprezintă aproximativ 15% din numărul total al defecțiunilor.

Tabelul 7-8 Valori medii ale ratei defectărilor

Tipul rezistorului	$\lambda_{med}(h^{-1})$
Bobinate	$2 \cdot 10^{-6}$
Cu peliculă de carbon cristalin	$1,5 \dots 2 \cdot 10^{-6}$
Cu pelicule metalice	$10^{-7}$
De volum	$3 \dots 5 \cdot 10^{-7}$
Realizate prin tehnologia straturilor subțiri	$10^{-8}$

Tabelul 7-9 Moduri și mecanisme de defectare a rezistoarelor

Tipuri de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare care rezultă (rezistență...)	Tip de rezistor			
			de volum	peliculă de carbon	peliculă metalică	bobinat
<b>Solicitare electrică</b>						
Tensiune excesivă	Deteriorarea sau străpungerea elementului rezistiv sau a izolației	modificată	x	x	x	x
		întreruptă	x	x	x	
		scurtcircuitată	xx	xx	xx	x
Putere disipată excesivă	Deteriorarea elementului rezistiv	modificată	X	x	x	x
		întreruptă	X	x	x	x
		Scurtcircuitată	x			
<b>Solicitare generată de mediul ambiant</b>						
Șocuri, vibrații	Deteriorarea elementului rezistiv sau a elementului de fixare	întreruptă		x	x	x
Temperatură înaltă	Deteriorarea elementului rezistiv sau a izolației	modificată	x	x	x	x
Șoc termic	Deteriorarea elementului rezistiv	modificată	x	x	x	x
		Întreruptă	x	x	x	x
Umiditatea ridicată	Deteriorarea elementului rezistiv	întreruptă	x	x	x	x
	Coroziune	Întreruptă		x	x	x
	Scurgere la suprafață	Modificată	x	x	x	x
Atmosferă corozivă	Coroziune	Întreruptă		x	x	x
	Scurgere la suprafață	Modificată	x	x	x	x
Radiație	Deteriorarea elementului rezistiv	Modificată	x			

Pentru a permite compararea cantitativă, din punctul de vedere al fiabilității, a diferitelor categorii de rezistoare, în Tabelul 7-8 au fost indicate valorile medii ale ratelor (intensităților) de defectare  $\lambda$  ale acestora.

Defecțiunile *rezistoarelor fixe*, determinate în special de solicitările electrice excesive, ca și de factorii ce țin de mediul ambiant, depind esențial de tipul rezistorului. În Tabelul 7-9 sunt evidențiate mecanismele și modurile de defectare corespunzătoare principalelor tipuri de rezistoare fixe.

Pe baza acestor date rezultă că cele mai fiabile sunt rezistoarele cu peliculă metalică sau de oxizi metalici, ceea ce justifică utilizarea lor în aparatura electronică profesională.

Datorită prezenței contactului mobil și a unor piese mecanice în mișcare, *rezistoarele variabile* sunt componente mai puțin fiabile, valoarea medie a ratei de defectare  $\lambda$  fiind  $4 \cdot 10^{-5} (h^{-1})$ .





## Cap.8. Condensatoare

### 8.1. Clasificarea condensatoarelor

Condensatorul este componenta electronică pasivă de circuit care, alături de rezistor se utilizează cel mai des în schemele electronice.

Impedanța condensatorului are un caracter preponderent capacitiv.

Constructiv, un condensator este alcătuit dintr-un mediu dielectric plasat între două armături metalice. Conectarea în circuit se face prin intermediul a două terminale aflate în strâns contact cu armăturile metalice.

Condensatoarele se clasifică după mai multe criterii: după natura dielectricului dintre armături, după modelul constructiv, după tensiunea de lucru, după regimul de lucru, după materialul utilizat, după regimul climatic în care vor lucra și după valoarea curenților ce le străbat.

*După natura dielectricului* condensatoarele se împart în:

- condensatoare cu dielectric gazos (vid, aer, gaz);
- condensatoare cu dielectric lichid (ulei);
- condensatoare cu dielectric anorganic (sticlă, mica, ceramică, email);
- condensatoare cu dielectric organic solid (hârtie, pelicule plastice etc.);
- condensatoare cu dielectric electrolitic (oxizi metalici, ca  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  etc.).

*După modelul constructiv* se deosebesc:

- condensatoare fixe;
- condensatoare variabile;
- condensatoare semireglabile.

*După tensiunea de lucru* la care lucrează condensatoarele, acestea se împart în:

- condensatoare de joasă tensiune (sub 100 V);
- condensatoare de înaltă tensiune (peste 100 V). *După regimul de lucru* se deosebesc:
- condensatoare pentru curent continuu;
- condensatoare pentru curent alternativ (cu frecvența de 50 Hz);
- condensatoare pentru frecvențe înalte (peste 1 kHz).

*Din punctul de vedere al condițiilor climatice* în care vor lucra, condensatoarele sunt fabricate pentru:

- climat temperat normal;
- climat tropical uscat;
- climat tropical umed;
- climat polar.

*După valoarea curenților* care-i străbat se deosebesc:

- condensatoare pentru curenți mici (radio-televiziune, radiolocație, telefonie, automată, măsurători electrice etc.);
- condensatoare pentru curenți mari (condensatoare pentru pornirea motoarelor, condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere, condensatoare de protecție, condensatoare de cuplare etc.).

## 8.2. Caracteristicile și formele constructive ale condensatoarelor fixe

Principalele caracteristici ale condensatoarelor fixe sunt:

- capacitatea nominală ( $C_n$ );
- tensiunea nominală ( $U_n$ );
- rezistența de izolație ( $R_{iz}$ );
- tangenta unghiului de pierderi ( $\text{tg}\delta$ );
- intervalul temperaturilor de lucru;
- coeficientul de variație a capacității cu temperatura ( $\alpha_c$ );
- coeficientul de variație a capacității ( $K$ );
- capacitatea specifică.

### 8.2.1. Capacitatea nominală ( $C_n$ )

Capacitatea nominală a unui condensator este determinată de forma constructivă, dimensiunile acestuia și de caracteristicile dielectricului utilizat.

Formele constructive cele mai utilizate pentru condensatoarele fixe sunt: plană, cilindrică și bobinată.

*Condensatorul plan* sub formă de disc, plachetă etc., este utilizat pentru dielectrici gazoși, lichizi și dielectrici anorganici solizi ca mica, sticla, ceramica (Figura 8-1, a). Capacitatea condensatorului plan are expresia:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (65)$$

în care:  $A$  este suprafața armăturilor;  $d$  - distanța dintre armături;  $\varepsilon_0$  - permitivitatea dielectrică absolută a vidului;  $\varepsilon_r$  - permitivitatea dielectrică relativă a vidului.

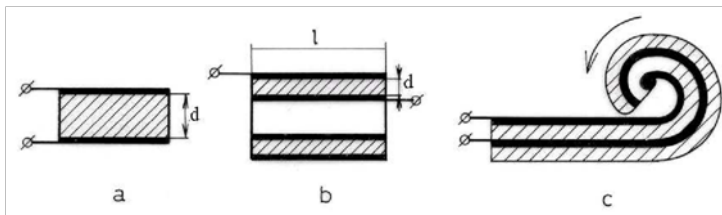


Figura 8-1 Formele constructive ale condensatoarelor fixe

*Condensatorul cilindric* (Figura 8-1, b) are dielectricul sub forma unui cilindru iar armăturile sunt depuse pe suprafețele exterioară respectiv interioară ale acestuia. Capacitatea condensatorului cilindric se poate calcula aproximativ cu relația:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(b/a)} \quad (66)$$

unde  $l$  - este lungimea cilindrului;  $a$  - raza cilindrului interior;  $b$  - raza cilindrului exterior.

Condensatoarele cilindrice utilizează dielectrici lichizi și dielectrici anorganici solizi ca sticla și ceramica.

*Condensatorul bobinat* este constituit din două folii de material dielectric și două armături metalice bobinate în lungul foliei (Figura 8-1, c). Prin bobinare se formează două condensatoare în paralel unul având ca dielectric prima folie, iar celălalt pe a doua. Capacitatea acestor condensatoare poate fi calculată cu relația:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{A}{d} \quad (67)$$

unde  $A$  - este aria armăturilor;  $d$  - grosimea foliei dielectrice;  $\epsilon_0$  - permitivitatea dielectrică absolută a vidului;  $\epsilon_r$  - permitivitatea dielectrică relativă a dielectricului.

Condensatoarele bobinate se pot realiza cu dielectric: solid (hârtie sau pelicule din material plastic) sau cu pelicule de oxizi ai metalelor (electrolitici).

Capacitatea nominală este *capacitatea înscrisă sau marcată pe corpul condensatorului*. Măsura capacității se poate face la temperatura de 25°C, la o anumită frecvență, de exemplu 900Hz, 1kHz, 1MHz, având aplicată la borne o anumită tensiune. Condițiile în care au fost măsurate capacitățile nominale indicate sunt precizate, de regulă, în catalog.

Tabelul 8-1 Marcarea în cod a condensatoarelor

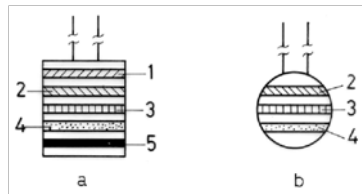
Numărul colorii	Semnificația numărului de ordine al colorii	Culoarea	Culoarea										
			Negru	Maro	Roșu	Portocaliu	Galben	Verde	Albăstru	Violet	Gri	Alb	Auriu
1	Coeficientul de variație cu temperatura	1/°C	0	-33	-75	-150	-220	-330	-470	-750	-	-	+100
		ppm/°C	0	-33	-75	-150	-220	-330	-470	-750	-	-	+100
2	Prima cifră semnificativă		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-
3	Valoarea capacității	A doua cifră semnificativă	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-
4	Toleranțe	Coeficient de multiplicare	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	-	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-
5		C > 10 pF (%)	20	-	-	-	-	5	-	-	-	10	-
		C < 10 pF (%)	2	1	-	-	-	0,5	-	-	0,25	1	-

Pentru valorile până la 1  $\mu\text{F}$ , capacitatea nominală  $C_n$  respectă valorile normalizate din scările internaționale  $E_6$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{24}$ ,  $E_{48}$  etc., corespunzătoare toleranțelor 20%, 10%, 5%, 2,5% etc.

**Tabelul 8-2 Marcarea în cod a condensatoarelor**

Notații fig. 2.2 Culoare	b, c, j. Cifre semnificative	d			e				a	f		
		Factor multiplicare			Toleranța				Coef. temp.	Tensiune nominală (V)		
		CC CT a	C M	CH CM	$C_N \leq 10$ pF(pF) CC	$C_N > 10$ pF (%) CC	(%) CM	(%) CH	(ppm/ °C) CC	CH CM	CS	CT a
<b>Negru</b>	0	1	1	1	$\pm 2$	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$	0		630	10
<b>Maro</b>	1	10	10	10	$\pm 0,1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	-33	100		1,6
<b>Roșu</b>	2	$10^2$	$10^2$	$10^2$	$\pm 0,25$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	-75	250	160	4
<b>Portocaliu</b>	3	$10^3$	$10^3$	$10^3$		$\pm 2,5$	$\pm 3$		-150	300		40
<b>Galben</b>	4	$10^4$	$10^4$	$10^4$					-220	400	63	6,3
<b>Verde</b>	5	$10^5$		$10^5$	$\pm 0,5$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$	-330		250	16
<b>Albastru</b>	6	-		$10^6$					-470	630	25	
<b>Violet</b>	7	-		$10^7$					-750	700		
<b>Gri</b>	8	$10^{-2}$		$10^8$			$+0,5$		-2200	800		25
<b>Alb</b>	9	$10^{-1}$		$10^9$	$\pm 1$	$\pm 10$		$\pm 10$	+120	900		2,5
<b>Auriu</b>	-	-	$10^{-1}$	$10^{-1}$			$\pm 5$		+100	1000		
<b>Argintiu</b>	-	-					$\pm 10$			2000		

Marcarea condensatoarelor se face atât în clar, prin imprimarea valorii capacității și a toleranței pe corpul componentei electronice, cât și utilizând codul culorilor. În cazul condensatoarelor ceramice, marcarea în cod se face ca în Tabelul 8-1. Citirea culorilor se face în ordinea arătată în Figura 8-2.



**Figura 8-2 Ordinea de citire a culorilor**

Pentru condensatoare cu capacități mai mari de 1  $\mu\text{F}$ , se întâlnesc uzual valorile: 1; 2; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 32  $\mu\text{F}$  etc. cu toleranțe cuprinse între -40% și +100%.

### 8.2.2. Tensiunea nominală ( $U_n$ )

Tensiunea nominală este tensiunea continuă maximă, sau cea mai mare valoare eficace a tensiunii alternative, care se poate aplica în regim de funcționare îndelungată la bornele condensatorului. Valoarea tensiunii nominale definită la temperatura maximă de lucru depinde de rigiditatea dielectrică a dielectricului

condensatorului și de forma sa constructivă. În tabela 3.2. se prezintă valorile uzuale ale tensiunilor nominale, acestea nefiind încă normalizate.

**Tabelul 8-2 Valorile uzuale ale tensiunilor nominale ale condensatoarelor**

<i>Valorile uzuale ale tensiunilor nominale</i>														
$U_n(V)$	6	12	16	25	63	70	100	125	250	350	450	500	630	1000

Tensiunea de probă la care sunt supuse condensatoarele este de obicei cuprinsă în intervalul  $(1,5...3)U_n$ . Condensatoarele care nu rezistă acestei probe sunt eliminate și, în acest fel, se reduce considerabil numărul condensatoarelor care s-ar putea distruge la o utilizare mai îndelungată sub o tensiune egală cu  $U_n$ . Condensatoarele nu se încearcă peste o valoare  $3U_n$ , deoarece în structura dielectricului ar putea apărea modificări ireversibile.

### 8.2.3. Rezistența de izolație ( $R_{iz}$ )

Rezistența de izolație este definită ca fiind raportul între tensiunea continuă aplicată unui condensator și curentul care se stabilește prin condensator după un interval de 1 minut de la aplicarea tensiunii. Condițiile în care se fac măsurările sunt specificate în catalog de fiecare producător de componente și se referă la condiții electrice (valoarea tensiunii la care se determină  $R_{iz}$ ) și condiții climatice de temperatură (de obicei cea normală,  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) și de umiditate (de exemplu, 75 % umiditate relativă).

Ca valori uzuale se menționează:  $10^4\text{ M}\Omega$  pentru condensatoare ceramice;  $10^2\text{ M}\Omega$  pentru condensatoare cu polistiren având  $U_n < 100\text{ V}$ ;  $10^5\text{ M}\Omega$  pentru condensatoarele cu polistiren având  $U_n > 100\text{ V}$  etc.

Uneori, în locul rezistenței de izolație  $R_{iz}$  se indică alte caracteristici. Astfel, pentru condensatoarele având o capacitate nominală mai mare de  $0,1\text{ }\mu\text{F}$  se indică, în locul rezistenței de izolație, *constantă de timp* ( $\tau = R_{iz} C_n$ ). Constanta de timp depinde de proprietățile materialului din care este confecționat dielectricul (de exemplu, pentru condensatorul cu folie de polistiren metalizată și  $C_n > 0,33\text{ }\mu\text{F}$ ,  $\tau = 10^4\text{ s}$  și pentru condensatoarele cu hârtie uleiată și  $C_n > 1\text{ }\mu\text{F}$ ,  $\tau = 2 \cdot 10^4\text{ s}$ ).

Pentru condensatoarele electrolitice se dă *curentul de conducție*, numit și *curent de fugă* ( $I_f$ ) și reprezintă curentul care trece prin condensator, la aplicarea la borne a tensiunii nominale  $U_n$ . Condensatoarele electrolitice polarizate, miniatură, pentru care  $C_n U_n < 100\text{ }\mu\text{FV}$ , au curentul de fugă  $I_f = 5\text{ }\mu\text{A}$ , iar în cazul când  $C_n U_n > 100\text{ }\mu\text{FV}$ , curentul de fugă depinde de produsul  $C_n U_n$ :  $I_f \leq 0,03 C_n U_n + 20\text{ }\mu\text{A}$ .

### 8.2.4. Tangenta unghiului de pierderi ( $\text{tg}\delta$ )

Într-un condensator se disipă putere activă din cauza pierderilor în dielectric și din cauza pierderilor în rezistența electrică nenulă a armăturilor, ceea ce are ca efect încălzirea acestuia. Un condensator este cu atât mai bun cu cât puterea activă disipată este mai mică. Tangenta unghiului de pierderi se definește

ca raportul între puterea activă care se disipă pe condensator și puterea reactivă a acestuia, măsurată la frecvența la care se determină capacitatea nominală.

Mărimea tgδ care caracterizează pierderile într-un condensator depinde de natura dielectricului și de tehnologia de realizare a condensatorului respectiv. În Tabelul 8-3 sunt prezentate valorile parametrului tgδ pentru diferite tipuri de condensatoare.

**Tabelul 8-3** Valorile tgδ pentru diferite tipuri de condensatoare

<i>Tipul condensatorului</i>	$\text{tg } \delta$	<i>Condițiile de măsurare</i>
<b>Ceramice de tip I</b>	$10 \cdot 10^{-4}$	$C_n = 1 \text{ nF}$ $f = 1 \text{ MHz}$
<b>Ceramice de tip II</b>	$350 \cdot 10^{-4}$	$C_n = 1 \text{ nF}$ $f = 1 \text{ MHz}$
<b>Cu polistiren</b>	$5 \cdot 10^{-4}$	$C_n = 1 \text{ nF}$ $f = 1 \text{ kHz}$
<b>Cu hârtie</b>	$10^{-2}$	$f = 1 \text{ kHz}$
<b>Electrolitic miniatură</b>	0,25	$f = 100 \text{ Hz}$
<b>Electrolitic cu tantal</b>	0,08	$f = 50 \text{ Hz}$

**Tabelul 8-4** Gama de temperatură pentru diferite tipuri de condensatoare

<i>Tipul condensatorului</i>	<i>Gama de temperatură (°C)</i>	
	<i>min.</i>	<i>max.</i>
<b>Condensator cu hârtie uleiată</b>	- 40	+ 85
<b>Condensator cu hârtie cerată</b>	- 10	+ 70
<b>Condensator cu polistiren</b>	- 10	+ 70
<b>Condensator cu polistiren metalizat</b>	- 40	+ 85
<b>Condensator ceramic</b>	- 40	+ 85
<b>Condensator electrolitic</b>	- 25	+ 70
<b>Condensator electrolitic cu tantal</b>	- 40	+ 125

### 8.2.5. Intervalul temperaturilor de lucru

Acest interval reprezintă *limitele de temperatură între care condensatorului i se asigură o funcționare îndelungată*. Limitele intervalului temperaturii de lucru depind, în special, de natura dielectricului.

În funcție de domeniul de utilizare, se pot folosi condensatoare cu o gamă de temperaturi de lucru, mai largă sau mai restrânsă (Tabelul 8-4).

### 8.2.6. Coeficientul de variație a capacității cu temperatura ( $\alpha_C$ )

Acest coeficient este definit de relația:

$$\alpha_C = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT} [1/^\circ\text{C}] \quad (68)$$

Coeficientul de temperatură este exprimat în literatura de specialitate și în cataloage tot mai frecvent în „ppm/ $^\circ\text{C}$ ” - părți pe milion pe grad Celsius - definit astfel:

$$\alpha_C = \frac{C - C_0}{(T - T_0)C} \cdot 10^6 [ppm/^\circ\text{C}] \quad (69)$$

În Tabelul 8-1 sunt prezentate valorile coeficientului de variație cu temperatura pentru condensatoare ceramice și gama temperaturilor uzuale de lucru în cele două modalități de exprimare.

Sunt situații când, în montaje, există grupe de condensatoare legate în paralel sau serie. În acest caz, expresia coeficientului de variație a capacității grupului de condensatoare cu temperatura se calculează pentru fiecare variantă în parte.

### 8.2.7. Coeficientul de variație a capacității (K)

Se definește astfel:

$$K_p = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100 [\%] \quad (70)$$

Această caracteristică a condensatoarelor arată cum se modifică capacitatea acestora sub acțiunea unor factori ( $p$ ): umiditate, durată de păstrare, tensiune aplicată, acțiunea radiațiilor etc.

### 8.2.8. Capacitatea specifică

Capacitatea specifică, notată  $c$ , este determinată de procesul tehnologic de fabricație a condensatorului și este definită ca raportul dintre capacitatea nominală  $C_n$  și volumul total al condensatorului.

### 8.3. Materiale utilizate la fabricarea condensatoarelor

Așa cum s-a arătat anterior, condensatorul este constituit din *două armături metalice* separate între ele printr-un *dielectric*, iar conectarea lui în circuit se face prin intermediul *terminalelor*.

#### 8.3.1. Armăturile

Armăturile sunt confecționate din materiale conductoare a căror rezistivitate trebuie să fie cât mai mică posibil. Se utilizează de obicei *cuprul, argintul, aluminiul ș.a.* Formele armăturilor depind de forma constructivă a condensatoarelor și de tehnologia de realizare, putând fi *plane, cilindrice, bobinate etc.*

#### 8.3.2. Dielectricul

Dielectricul este un material izolator solid, lichid sau gazos, organic sau anorganic, caracterizat în principal prin *permitivitatea  $\epsilon$* .

Dacă între armăturile unui condensator se introduce un dielectric cu permitivitatea complexă relativă  $\epsilon$ , presupunând că liniile de câmp electric se închid în întregime prin material (neglijându-se efectul de margine) *admitanța la bornele condensatorului* are expresia:

$$Y = \frac{1}{R_{ech}} + j\omega C_{ech} \tag{71}$$

cea ce corespunde unei structuri de impedanță paralel (Figura 8-3, a, b) formată dintr-un condensator ideal (fără pierderi) de capacitate  $C_{ech}$  și o rezistență echivalentă  $R_{ech}$ :

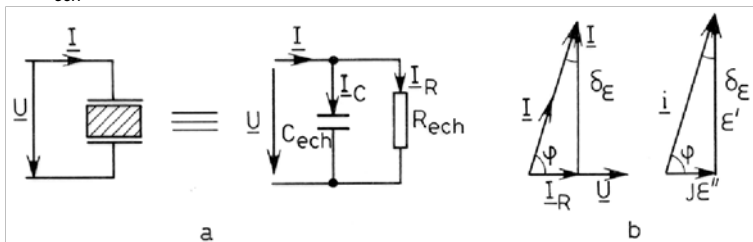


Figura 8-3 Condensatorul cu dielectric

Dacă se reprezintă diagrama de fazori pentru circuitul din anterioară, se observă că între tensiunea aplicată și curentul prin circuit apare un defazaj mai mic decât  $\pi/2$  cât ar trebui să fie în cazul unui condensator fără pierderi. Aceasta se explică tocmai prin pierderile pe care le introduce dielectricul. Complementul unghiului de defazaj se numește *unghi de pierderi*. Tangenta *unghiului de pierderi*



este, așa cum s-a mai arătat, o mărime ce caracterizează dielectricul din punctul de vedere al pierderilor.

Inversul tangentei unghiului de pierderi se numește *factor de calitate* al materialului dielectric și se notează cu  $Q$ .

**Tabelul 8-5 Proprietățile unor dielectrici uzuali**

<i>Materialul dielectric</i>	<i>Constanta dielectrică</i>	<i>Rigiditatea dielectrică, (kV/mm)</i>
<b>Vid</b>	1,00000	–
<b>Aer</b>	1,00054	0,8
<b>Apă</b>	78	–
<b>Hârtie</b>	3,5	14
<b>Porțelan</b>	6	4
<b>Sticlă de cuarț</b>	3,8	8
<b>Bachelită</b>	4,8	12
<b>Polietilenă</b>	2,3	50
<b>Poliester</b>	2,6	25
<b>Teflon</b>	2,1	60

În câmpurile electrice puternice, densitatea curentului de conducție în materialul dielectric nu mai depinde liniar de intensitatea câmpului, materialul pierzându-și proprietățile izolante. Fenomenul se numește *străpungerea dielectricului*, iar valoarea intensității câmpului ( $E_{st}$ ) la care se produce acest fenomen poartă denumirea de *rigiditatea dielectrică*. În Tabelul 8-5 sunt prezentate proprietățile unor materiale dielectrice utilizate în mod frecvent la fabricarea condensatoarelor.

Străpungerea dielectricului se poate realiza prin mai multe mecanisme, ce vor fi prezentate în continuare.

### **Străpungerea prin ionizare**

Străpungerea prin ionizare, în cazul dielectricilor gazoși, se datorează, în majoritatea cazurilor, ionizărilor prin ciocnire, străpungerea producându-se atunci când energia cinetică a purtătorilor de sarcină liberi (electroni și ioni), accelerați de câmpul electric, este suficientă pentru a produce ionizarea prin ciocnire a moleculelor gazului. Datorită lungimii mari a drumului liber mediu al purtătorilor de sarcină în gaze, deci datorită unei energii mari acumulate sub acțiunea câmpului între două ciocniri, rigiditatea gazelor sub presiune normală nu este prea ridicată (pentru aer la presiune normală  $E_{st}=3\text{MV/m}$ . Pe măsură ce scade puritatea, scade și rigiditatea din cauza unor adaosuri de apă, bule de gaz etc.

Străpungerea prin ionizare este specifică și dielectricilor solizi datorită ionizărilor în incluziunile gazoase din dielectric sau în dielectricul lichid de impregnare. Dacă în incluziunea gazoasă intensitatea câmpului atinge o valoare suficient de ridicată pentru a declanșa străpungerea în gaz, atunci aceasta

favorizează în continuare apariția străpungerii în acea parte a dielectricului solid care se învecinează cu incluziunea.

În cazul dielectricilor organici elementele care favorizează străpungerea pot fi:

- acțiunea nemijlocită asupra dielectricului prin bombardament cu ioni și electroni proveniți prin ionizarea gazului;
- acțiunea temperaturilor ridicate generate local prin străpungerea incluziunilor gazoase;
- acțiunea chimică asupra dielectricului a produselor rezultate prin ionizarea gazului, în special a ozonului și a oxizilor de azot, care produc oxidări puternice.

Acțiunea primelor două dintre aceste fenomene, și în special a primului, este de scurtă durată, în timp ce ultimul este un proces îndelungat. Ca urmare, străpungerea dielectricilor solizi cauzată de străpungerea prin ionizare poate dura de la zecimi de secundă la zeci de ore, în funcție de preponderența acțiunilor amintite.

Dielectricii anorganici, a căror stabilitate chimică este mai ridicată comparativ cu cei organici, pot prezenta, de asemenea, datorită incluziunilor gazoase, străpungeri prin ionizare. Acestea însă, datorită temperaturii pe care o degajă, favorizează mai mult străpungerea termică sau determină, prin apariția unor forțe mecanice, fisurarea dielectricului.

### **Străpungerea termică**

Străpungerea termică se explică prin diferența ce apare între cantitatea de căldură ce se dezvoltă datorită pierderilor în dielectricii solizi și cantitatea de căldură pe care dielectricul o poate ceda mediului ambiant. În cazul în care cele două cantități de căldură ar fi egale, dielectricul nu s-ar încălzi și străpungerea termică nu s-ar manifesta. În cazul în care cantitatea de căldură dezvoltată este mai mare decât cea cedată, diferența de căldură determină o intensificare a încălzirii locale, ceea ce contribuie la ridicarea temperaturii dielectricului și implicit la o creștere a curentului de conducție. Aceasta are ca rezultat creșterea în mai mare măsură a cantității de căldură dezvoltată. Se produce astfel o avalanșă termică, care continuă până la distrugerea dielectricului (cei anorganici se topesc, cei organici ard).

### **Străpungerea electrică**

Cu toate că drumul liber mediu al purtătorilor de sarcină este foarte mic în dielectricii solizi, comparativ cu cei gazoși și lichizi, totuși în acest caz pot avea loc ionizări prin ciocnire, care duc la străpungerea electrică. Drumul liber mediu fiind foarte mic, rezultă rigidități dielectrice de ordinul sutelor de MV/m. În cazul dielectricilor polari, rigiditatea are o valoare mai mare din cauza dipolilor sau a grupelor polare care nu favorizează, datorită legăturilor puternice existente între ele, eliberarea electronilor care să participe la străpungere. Creșterea temperaturii determină, ca de altfel și la celelalte tipuri, micșorarea rigidității dielectrice.

### **Străpungerea electrochimică**

La o acțiune mai îndelungată a curentului continuu asupra dielectricului, în acesta pot apărea procese electrochimice care duc, în ultimă instanță, la distrugerea sa. Acest tip de străpungere este condiționat de existența în dielectric a unui

curent de conducție de natură ionică. Temperaturile ridicate, favorizând atât conducția cât și reacțiile chimice, accelerează străpungerea electrochimică a dielectricilor. Acest proces este de lungă durată, de ordinul a sute de mii de ore. La utilizarea dielectricilor este necesar să se țină seama de această caracteristică, deoarece influențează în mod direct fiabilitatea dispozitivului ce folosește dielectricul.

*Notă.* Pentru un anumit tip de material dielectric, funcție de natura sa și de condițiile specifice de utilizare, predomină unul sau altul din cele patru mecanisme de străpungere menționate. În plus, de foarte multe ori același tip de material poate prezenta mecanisme de străpungere ce se schimbă în funcție de condițiile de utilizare (de exemplu de la străpungerea prin ionizare să se treacă la cea termică).

## 8.4. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor fixe

### 8.4.1. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor ceramice

Condensatoarele ceramice, pot fi din punct de vedere constructiv, *plane* (*disc sau plachete*) sau *cilindrice*.

*Dielectricul* este o ceramică formată dintr-un amestec de silicați de magneziu, silicați de aluminiu, corindon, zircon etc., la care se adaugă, în funcție de permitivitatea dorită, una sau mai multe din combinațiile chimice: MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaTiO<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, BaZrO<sub>3</sub>. Deși materialele ceramice folosite la fabricarea condensatoarelor au caracteristici destul de diferite, ele pot fi încadrate în două grupe:

- materiale ceramice din grupa I, care au la bază titații de magneziu sau de calciu, iar constanta lor dielectrică este cuprinsă între 5 și 200. Condensatoarele realizate cu acești dielectrici se bucură de o bună stabilitate a capacității, un unghi de pierderi scăzut și o variație liniară a capacității cu temperatura;
- materialele ceramice din grupa a II-a au la bază titații și zircoții de bariu sau de stronțiu, prezintă o permitivitate foarte mare ajungând chiar până la 15 000; sunt însă foarte instabile, iar tangenta unghiului de pierderi este mai mare decât în cazul materialelor din grupa I cu cel puțin un ordin de mărime. Din acest motiv, materialele dielectrice din grupa a II-a se utilizează numai la fabricarea condensatoarelor a căror toleranță și instabilitate admisibilă pot fi relativ mari.

Indiferent de tipul materialului ceramic folosit ca dielectric, procesul tehnologic de fabricare a condensatoarelor ceramice comportă următoarele faze:

- obținerea dielectricului de forma și dimensiunile dorite printr-o tehnologie ceramică;
- depunerea armăturilor condensatorului;
- lipirea conexiunilor terminale;

- acoperirea de protecție cu lacuri de acoperire sau încapsularea în rășini termorigide.

Tehnologia ceramică permite obținerea unor forme relativ complicate ale dielectricului care favorizează micșorarea câmpului de margine pentru condensatoarele de înaltă tensiune. În Figura 8-4 se prezintă câteva forme ale marginilor condensatoarelor ceramice care conduc la micșorarea efectului de margine.

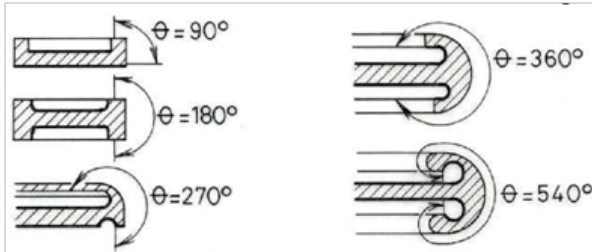


Figura 8-4 Diferite moduri de rotunjire

*Armăturile* condensatoarelor ceramice sunt realizate prin *depunerea* pe suprafața dielectricului a *argintului*. Argintul care se depune se obține prin descompunerea termică a unei soluții coloidale de  $\text{AgCO}_3$ ,  $\text{BiO}_3$  sau  $\text{PbB}_4\text{O}_7$ . În urma tratamentului termic (care se face la temperaturi cuprinse între  $200...850^\circ\text{C}$ ) se obține un strat de argint cu o grosime de  $7...12\ \mu\text{m}$ . Dacă se urmărește obținerea unor armături mai groase, necesare condensatoarelor de curenți mari, operația de argintare se repetă de câteva ori. Folosirea armăturilor de argint urmată de operația tehnologică de lipire a terminalelor, permite o bună aderență a argintului la dielectric și elimină eventualele incluziuni de aer ce ar putea apărea între dielectric și armătură. Aceasta contribuie substanțial la creșterea rigidității condensatoarelor ceramice.

Tehnologia descrisă permite obținerea unor capacități nominale cu valori de la  $10^{-9}$  farazi până la  $10^{-6}$  farazi, cu valori ale tensiunii nominale variind de la zeci de volți la zeci de mii de volți.

Aria redusă a armăturilor condensatoarelor ceramice plane conduce la o limitare în obținerea de condensatoare ceramice cu capacități de valori mari. Pentru eliminarea acestui inconvenient s-a dezvoltat în ultimul timp tehnologia de obținere a *condensatoarelor ceramice multistrat*. Acestea se realizează sub forma unor straturi succesive de dielectric și material conductor. Capacitatea condensatorului va fi cu atât mai mare cu cât numărul straturilor este mai mare.

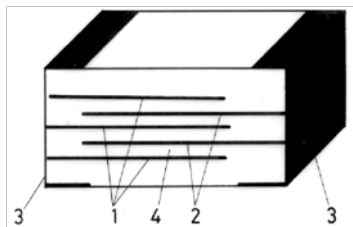


Figura 8-5 Condensatorul ceramic multistrat

Ulterior, se scurtcircuitează convenabil foliile conductoare, constituindu-se astfel armăturile condensatorului (Figura 8-5; 1-armături impare; 2-armături pare; 3-strat conductor pentru scurtcircuitarea armăturilor; 4- dielectric).

După aplicarea prin lipire a terminalelor, condensatoarele sunt încapsulate în rășini termorigide.

## 8.4.2. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu mică

Din punct de vedere constructiv condensatoarele cu mică sunt plane. *Dielectricul* folosit la aceste condensatoare este *mica*, unul dintre materiale dielectrice cu constanta dielectrică  $\epsilon$  și rigiditatea dielectrică  $E_{str}$  cele mai mari.

*Armăturile* sunt constituite din folii de staniu, cupru electrolitic, aluminiu etc., dispuse alternativ între straturile de dielectric care au grosimea de 20...25  $\mu\text{m}$ .

Armăturile pare se scurtcircuitează pe o latură, iar cele impare pe cealaltă latură, și în acest mod apar mai multe condensatoare legate în paralel, ceea ce conduce la creșterea capacității totale (fig. 3.6). În această variantă tehnologică, existența unor interstiții între foliile metalice și straturile de mică este inevitabilă chiar la cea mai înaltă presiune de presare admisă de materiale.

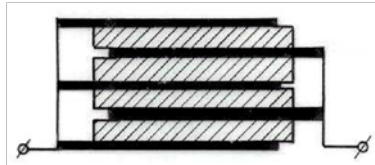


Figura 8-6 Condensatorul cu mică cu armături din folii metalice

Dacă condensatorul este neimpregnat aceste interstiții conțin aer astfel încât capacitatea reală este dată de cele două condensatoare care se formează (unul cu aer și celălalt cu mică) ce se conectează în serie.

La asamblarea foliilor de mică cu cele metalice pentru constituirea condensatorului, se folosesc presiuni de 5...7,5  $\text{N/mm}^2$  pentru armături de staniu și circa 15  $\text{N/mm}^2$  pentru armăturile de cupru.

Prin impregnare capacitatea condensatorului crește (deoarece impregnantul are permitivitatea reală mai mare decât a aerului), însă cresc și pierderile într-o oarecare măsură. Impregnarea se face cu *cerezină* sau *parafină*.

Pentru obținerea unor performanțe superioare, condensatoarele cu mică pot fi realizate din armături obținute prin depunerea directă a metalelor pe suprafețele dielectricului, ceea ce înlătură interstițiile dielectric-armătură. Peliculele utilizate sunt cele din *argint* depuse din argint coloidal sau prin evaporare în vid.

Pe lângă înlăturarea dezavantajelor generate de existența interstițiului dielectric-armătură, condensatoarele cu mică argintată, permit și obținerea unui coeficient de temperatură al capacității mai mic.

După fabricație, atât condensatoarele din folii metalice cât și cele cu peliculă de argint trebuie să fie perfect ermetizate deoarece mica este higroscopică, iar apa, chiar în cantități mici, micșorează rezistența de izolație și crește mult tangenta unghiului de pierderi. În funcție de domeniul de temperatură,

pentru ermetizare se folosesc ceruri minerale, rășini formaldehidice, rășini epoxidice, ceramică sau sticlă.

Condensatoarele cu mică sunt fabricate pentru valori ale capacității nominale de la picofarazi la sute de nanofarazi, pentru tensiuni nominale până la mii de volți.

### 8.4.3. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu sticlă

Condensatoarele cu sticlă folosesc ca *dielectric* sticlele cu conținut mare de oxizi grei (BaO sau PbO) care au  $\epsilon$  mare, pierderi dielectrice relativ mici și rigiditate dielectrică mare, putând ajunge până la 250...350MV/m pentru straturi subțiri.

Tehnologia cea mai folosită utilizează folii din sticlă cu grosimi de ordinul a 25  $\mu\text{m}$  obținute prin extrudare. Din această folie se decupează plăcuțe care se utilizează pentru condensatoare multistrat asemănătoare celor cu mică.

Pentru *armături* se utilizează *alumiul* sau *aurul*. Tehnologia de fabricație cuprinde și o operație de presare a foliilor de dielectric și a foliilor metalice la o temperatură apropiată de temperatura de topire a sticlei. Astfel, prin înmuierea sticlei și datorită presiunii aplicate, aerul conținut între armături și dielectric este eliminat obținându-se o masă compactă.

După scurtcircuitarea armăturilor pare și a celor impare și atașarea terminalelor, urmează încapsularea condensatoarelor sau acoperirea de protecție a acestora. Condensatoarele cu sticlă se fabrică pentru valori ale capacității nominale de la  $10^{-12}$  farazi la  $10^{-8}$  farazi, ele concurând condensatoarele cu mică printr-o mai bună stabilitate la umezeală și la variații ciclice ale mediului ambiant.

La aceiași parametri nominali capacitatea specifică a unui condensator cu sticlă este de aproximativ de trei ori mai mare decât a unui condensator cu mică, însă prețul său este mai mare datorită tehnologiei mai scumpe de obținere a foliei de sticlă.

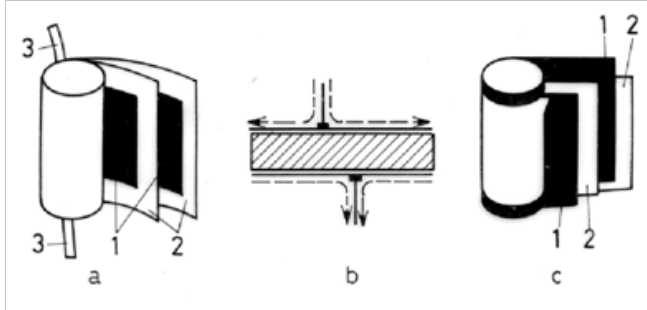
### 8.4.4. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu hârtie

Constructiv, condensatoarele cu hârtie sunt de tipul condensatoarelor bobinate obținute prin bobinarea a două sau mai multe folii de hârtie impregnate (hârtia de condensator) plasate între două folii de aluminiu, având rolul de armături.

*Dielectricul* este constituit din două sau chiar trei folii de hârtie, suprapunerea acestora micșorând probabilitatea de scurtcircuitare datorită unor particule conductoare (de exemplu, incluziuni de carbon) care sunt incluse în masa hârtiei. Numărul foliilor suprapuse nu trebuie să fie însă prea mare deoarece o grosime totală prea mare a dielectricului conduce la micșorarea rigidității și la micșorarea capacității specifice a condensatoarelor.

*Armăturile* sunt confecționate de obicei din folii de aluminiu având grosimi ce variază între 5 și 15  $\mu\text{m}$ . Dacă armăturile sunt așezate față în față (Figura 8-7, a), atunci contactele terminale se execută din bandă de cupru cositorită fixate pe cele două armături decalat cu aproximativ o jumătate de spirală, pentru a evita străpungerea între terminale. În aceste condiții inductivitatea serie a condensatorului are o valoare importantă. Pentru ca valoarea inductivității să

scadă, cele două armături se decalază între ele cu circa 1 mm în sensul axei bobinei (obținându-se un condensator neinductiv - Figura 8-7, c).



**Figura 8-7 Condensatoare cu hârtie 1-armături; 2-dielectric; 3-contacte electrice**

În final spirele fiecărei armături se scurtcircuitază la capete. Datorită faptului că prin decalare scade suprafața armăturilor, capacitatea specifică a condensatoarelor inductive scade pe seama creșterii altor caracteristici.

După bobinare și atașarea terminalelor, condensatoarele cu hârtie se impregnează. Principalele materiale utilizate pentru impregnare sunt:

- *dielectrici lichizi* (uleiul de condensator, triclordifenilul și pentaclordifenilul);
- *dielectrici solizi* (parafina, cerezina, rășinile epoxidice, policlor-naftalina, polivinil-carbozolul, diverse compounduri).

Alegerea tipului de impregnant are de asemenea o mare influență și asupra coeficientului de temperatură al capacității și a tangentei unghiului de pierderi, variații care, în cazul condensatoarelor cu hârtie, sunt destul de mari.

O creștere importantă a capacității specifice a condensatoarelor cu hârtie se realizează prin utilizarea *hârtiei metalizate*. Aceasta se obține prin depunerea în vid pe hârtie a unui strat metalic foarte fin, cu o grosime de circa  $0,1 \mu\text{m}$ . Avantajul acestor condensatoare constă în faptul că la străpungerea accidentală a dielectricului (eventualul scurtcircuit poate fi cauzat de incluziunile metalice existente în dielectric) armătura foarte subțire se evaporă datorită căldurii degajate pe seama curentului de scurtcircuit. Astfel se izolează locul defecțiunii, condensatorul rămânând în stare de funcționare. Evident, deoarece suprafața efectivă a armăturilor este mai mică, se micșorează, de asemenea, și capacitatea condensatoarelor.

Înainte de depunerea stratului metalic, hârtia se acoperă cu un lac izolanț (de obicei pe bază de etilceluloză, acetilceluloză sau polistiren) pe ambele fețe sau numai pe fața care urmează a fi metalizată. Stratul de lac, având o grosime de circa  $1 \mu\text{m}$ , îmbunătățește rigiditatea dielectrică prin umplerea unor porozități în dielectric, apără armătura metalică de coroziune izolând-o de resturile de umiditate care ar exista eventual în porii hârtiei și micșorează mult curentul de conducție prin dielectric.

Metalizarea se face cu *zinc* sau cu *aluminu*. În cazul folosirii zincului, care are temperatura de evaporare scăzută, în incinta de lucru vidul nu trebuie să fie prea înăntat ( $10^{-1}$  mm Hg). Este de remarcă faptul că zincul are o aderență scăzută pe hârtie (din cauza temperaturii scăzute la care se face depunerea) și nu

este prea stabil împotriva corodării și oxidării. Din acest motiv este necesar să se utilizeze un substrat de staniu sau argint, ceea ce complică tehnologia de depunere și mărește costul operației.

În schimb aluminiul, care aderă bine pe hârtie și este mai stabil din punct de vedere chimic, are o temperatură de vaporizare mai ridicată ( $10^{-4}$  mm Hg). Metalizarea se execută pe o singură parte, pentru bobinarea condensatorului utilizându-se două folii de hârtie metalizată. Pentru tensiuni mai mari de 400 V se introduc în condensator și folii de hârtie nemetalizată. Datorită faptului că nu se poate evita apariția unui interstițiu de aer între dielectric și una dintre armături, stabilitatea în timp a capacității condensatorului scade. Pentru a reduce acest efect se poate utiliza hârtie metalizată pe ambele fețe. De asemenea, este necesar ca folia de hârtie să rămână nemetalizată pe una din laturi (pe o lățime de 1,5...4 mm), pentru a se evita contactul electric între cele două armături. În acest scop, la metalizare se vor folosi măști corespunzătoare.

Impregnarea condensatoarelor cu hârtie metalizată se face în mod obișnuit cu parafină sau cerezină, care nu corodează armăturile (în special armăturile din zinc).

Contactele terminale se lipesc pe stratul de cupru, obținut prin *pulverizare* sau *evaporare*, la cele două extremități ale condensatorului la care se scot armăturile.

La sfârșitul procesului tehnologic, condensatoarele cu hârtie metalizată se *formează*, aplicându-li-se progresiv o tensiune alternativă egală cu tensiunea de lucru. În timpul formării, eventualele incluziuni conductoare din hârtie se izolează prin evaporarea armăturii.

Condensatoarele cu hârtie și hârtie metalizată se fabrică cu valori nominale de la  $10^{-8}$  farazi la  $10^{-5}$  farazi, pentru tensiuni de lucru până la mii de volți. Datorită pierderilor relativ mari, instabilitatea în timp ca și coeficientul de temperatură ridicat, condensatoarele cu hârtie sunt recomandate pentru circuitele de cuplaj între etaje sau de decuplare.

### 8.4.5. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor cu peliculă din material plastic

Condensatoarele cu peliculă din mase plastice, denumite și cu *film plastic*, sunt din punct de vedere constructiv condensatoare bobinate și se realizează după o tehnologie similară celor cu hârtie.

*Dielectricul* este în acest caz constituit din folii din materiale plastice termoplaste nepolare sau polare. Dintre acestea, cele mai utilizate sunt: polistirenul, polipropilena, politetrafluoretilena, poliparaxilenul, polifenilenoxidul etc. Aceste materiale se caracterizează prin pierderi dielectrice mici și independența caracteristicilor față de frecvența de lucru.

Din această categorie utilizarea cea mai largă o au *condensatoarele cu peliculă din polistiren*, denumite și *condensatoare stirolflex*. Aceste condensatoare au temperatura maximă de utilizare de 70...75 °C.

Condensatoarele cu polistiren se fabrică asemănător cu condensatoarele cu hârtie folosind armături din *aluminu*. După bobinare, printr-un tratament termic se obține o contracție a foliei dielectrice pe seama dezorientării moleculelor.



Prin această contracție se micșorează foarte mult interstițiile dintre armături și dielectric, ceea ce micșorează pierderile, prin ionizarea aerului din interstiții și crește rigiditatea dielectrică. Trebuie remarcat faptul că încercările de a obține condensatoare cu polistiren metalizat nu au dat rezultatele scontate.

Condensatoarele cu polistiren se fabrică până la valori nominale de ordinul  $0,5 \mu\text{F}$  și tensiuni nominale de  $1000 \text{ V}$ , cu constante de timp de descărcare foarte mari, depășind  $10^6 \text{ s}$  (aceasta echivalează cu o rezistență de pierdere foarte mică).

Ermetizarea condensatoarelor cu polistiren se realizează în același mod ca și cele cu hârtie. Pentru unele aplicații aceste condensatoare se pot folosi și neermetizate.

Folosind tehnologia condensatoarelor cu polistiren se pot fabrica și condensatoare cu folie dielectrică din polietilenă. Temperatura maximă de lucru a acestora este de  $85...90^\circ\text{C}$ , și prezintă o constantă de timp mai mică și un coeficient de temperatură al capacității mai mare.

*Condensatoarele cu politetrafluoretilenă* pot atinge temperaturi de lucru de până la  $200...250^\circ\text{C}$ .

Pelicula de politetrafluoretilena este foarte elastică și creează probleme la bo-binare. Din acest motiv se folosește pentru armături o *folie de aluminiu* moale (re-copt).

Elasticitatea peliculei favorizează însă creșterea rigidității, deoarece în timpul bobinării nu apar în peliculă defecțiuni de tipul fisurilor.

Condensatoarele din politetrafluoretilena se protejează în mod obișnuit în carcase de aluminiu, deoarece pelicula dielectrică este moale și elastică, deși din punct de vedere al higroscopicității aceste condensatoare ar putea lucra și neermetizate. Pentru tensiuni înalte carcasa de aluminiu se umple cu azot la o presiune de  $4...5 \text{ bar}$ . Constanta de timp a acestor condensatoare este de ordinul  $10^6 \text{ s}$  pentru temperatura camerei și  $10^3 \text{ s}$  pentru temperatura de  $200^\circ\text{C}$ , iar coeficientul de temperatură al capacității nu depășește  $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Prețul condensatoarelor cu politetrafluoretilenă este ridicat, ceea ce face ca acestea să fie utilizate numai atunci când este esențială stabilitatea termică foarte bună.

Pentru obținerea unor capacități specifice mai mari, la condensatoarele cu pelicule plastice se utilizează folii din materiale termoplastice polare cum sunt: polietilentereftalatul, policarbonatul și rășinile poliamidice.

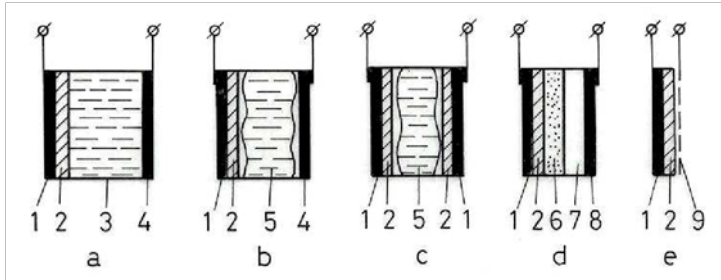
Tehnologia de realizare a acestor tipuri de condensatoare este asemănătoare cu a celor prezentate anterior, diferențele apărând la tratamentele termice post bo-binare și la impregnare respectiv la încapsulare.

#### 8.4.6. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor electrolitice

*Dielectricul* condensatoarelor electrolitice este o peliculă din oxizi ai metalelor. Anumiți oxizi ai metalelor ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  etc.) prezintă proprietăți dielectrice remarcabile și posibilități tehnologice comode de obținere a unor straturi cu grosimea de  $1 \mu\text{m}$ , ceea ce conduce la obținerea unor valori foarte mari ale capacității specifice.

Una dintre *armăturile* condensatorului este constituită chiar din metalul pe care se obține stratul de oxid dielectric. A doua armătură o formează un electrolit care se găsește în contact cu o folie metalică ce asigură legătura de ieșire a

acestua. Electrolitul poate fi lichid (Figura 8-8, a) sau impregnat într-un suport poros: hârtie sau pânză (este așa-numitul condensator semiuscat, Figura 8-8, b).



**Figura 8-8** Tipuri constructive de condensatoare electrolitice: a) condensatoare cu electrolit lichid; b) condensator semiuscat; c) condensator semiuscat nepolarizat; d) condensator cu electrolit solid (condensator oxid-semiconductor); e) condensator oxid-metal; 1-armătura anod; 2-pelicula de oxid dielectric; 3-electrolit lichid; 4-folia metalică în contact cu electrolitul; 5-electrolit impregnat într-un dielectric poros; 6-strat semiconductor; 7-strat de grafit; 8-strat metalic depus prin pulverizare; 9-strat metalic depus prin evaporare în vid.

În ambele cazuri rezistența electrolitului se înserează cu capacitatea stratului de oxid dielectric, măbind pierderile condensatorului electrolitic și influențând asupra variației acestora cu frecvența (datorită rezistenței serie pierderile cresc cu creșterea frecvenței).

De asemenea, deoarece rezistența electrolitului (care are conducție ionică) crește mult prin scăderea temperaturii datorită scăderii mobilității, pierderile condensatorului vor crește prin scăderea temperaturii.

Pentru tipurile constructive din Figura 8-8, a și Figura 8-8, b este necesar ca armătura anod să fie în permanență polarizată pozitiv față de armătura catod (folia metalică în contact cu electrolitul). Această polarizare corespunde unei polarizări inverse a joncțiunii metaloxid, adică unui curent de conducție minim prin condensator. Prin urmare este necesar ca tensiunea alternativă să fie întotdeauna suprapusă peste o componentă continuă având valoarea mai mare decât amplitudinea tensiunii alternative.

În cazul în care tensiunea alternativă are amplitudinea mult mai mică decât tensiunea nominală a condensatorului, atunci condensatoarele electrolitice pot funcționa și fără polarizare, dacă curentul direct al joncțiunii metal-oxid care circulă prin condensator timp de o semiperioadă nu produce o încălzire excesivă. Obișnuit, pentru condensatoarele funcționând fără componentă continuă (condensatoare nepolarizate), se aplică soluția constructivă din Figura 8-8,c constând în conectarea în serie a două joncțiuni metal-oxid, astfel încât pentru fiecare alternanță a tensiunii aplicate, una din joncțiuni să fie în sens invers, limitând curentul prin condensator.

*Condensatoarele cu aluminiu semiuscate* sunt constructiv condensatoare bobinate. *Armătura anod* se realizează din folii de aluminiu având grosimi cuprinse între 50 și 120 μm. Folia anod se asperizează pentru mărirea artificială a suprafeței efective.

Oxidarea are loc în celule electrolitice în care folia de aluminiu reprezintă anodul, folosind electrolizi care să nu dizolve aluminiul sau oxidul de aluminiu (de exemplu, acidul boric cu adaos de borat de sodiu). Operația următoare este bobi-

narea condensatorului, care se face similar tehnologiei condensatoarelor cu hârtie. Pentru confecționarea unui condensator se folosesc folii de *aluminiu oxidat* (anodul), o folie de aluminiu neasperizată (catodul) și două folii de hârtie cu grosimea cuprinsă între 25 și 100  $\mu\text{m}$  care reprezintă suportul în care se va impregna electrolitul.

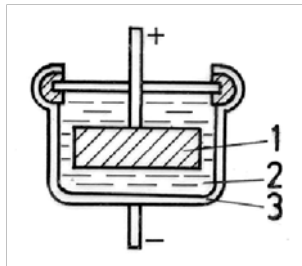
Electrolitul folosit trebuie să fie stabil în timp și să aibă o rezistivitate cât mai mică și cât mai puțin variabilă cu frecvența și temperatura. Se folosește în mod obișnuit acid boric, hidroxid de amoniu și glicoletilenă  $[\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2]$ . După impregnare și etanșare condensatorul se *formează* la o tensiune ușor superioară tensiunii nominale, ceea ce reface pelicula dielectrică de oxid, dacă ea a fost cumva deteriorată în timpul fabricației.

Condensatoarele electrolitice cu aluminiu se fabrică cu valori nominale între 0,5 și 40 000  $\mu\text{F}$  și tensiuni nominale până la 500 V, având domeniul de temperaturi de utilizare  $-50\dots+60\text{ }^\circ\text{C}$ .

*Condensatoarele cu tantal semiuscate* sunt asemănătoare constructiv cu condensatoarele cu aluminiu. Proprietățile mecanice superioare ale tantalului permit folosirea unei folii de grosime mai mică, ceea ce permite, ținând seama și de faptul că permitivitatea oxidului de tantal este aproape dublă comparativ cu cea a aluminiului, obținerea unor capacități specifice mult mai mari.

Creșterea prea mică a suprafeței active a foliei de tantal prin asperizare a condus la soluția folosirii unor anozii din tantal sinterizat care, datorită porozității mari a tantalului prezintă o suprafață activă foarte mare. Funcție de granulația pulberii și de condițiile de sinterizare se poate ajunge la o suprafață activă de  $1\text{ m}^2$  pentru un anod cu volumul de  $1\text{ cm}^3$ . Stratul de oxid este format dintr-o celulă având ca electrolit o soluție de 70%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  în apă. Anozii din tantal sinterizat sunt utilizați în condensatoarele cu electrolit lichid (Figura 8-9).

Pentru aceste condensatoare se obține o capacitate specifică de 200...300  $\mu\text{F}/\text{cm}^3$ , pentru o tensiune nominală de 100...125 V și un domeniu al temperaturilor de lucru cuprins între  $-60$  și  $+200\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 8-9** Condensator cu tantal cu electrolit lichid: 1-anod din tantal sinterizat acoperit cu peliculă de oxid; 2-electrolit; 3-corpul condensatorului (din argint acoperit la exterior cu o peliculă de oțel)

Pentru același tip de condensatoare pot fi utilizați și anozii sinterizați din pulbere de titan. Oxidarea anodului de titan se face într-o soluție de săruri topite (azotat de sodiu și calciu) iar ca electrolit lichid se folosește acidul azotic.

O îmbunătățire substanțială a condensatoarelor electrolitice s-a obținut prin fabricarea *condensatoarelor cu electrolit solid* (Figura 8-8, d). În aceste condensatoare, în locul electrolitului cu conducție ionică a cărei rezistență electrică se ma-

nifestă negativ în proprietățile condensatorului, se utilizează o peliculă semiconductoră (de exemplu  $MnO_2$ ) cu conducție electronică. Astfel, în domeniul temperaturilor normale rezistența acestei pelicule (denumită impropriu electrolit solid) depinde puțin de temperatură și coeficientul de temperatură al capacității se aproprie de cel al stratului de oxid dielectric, iar pierderile depind foarte puțin de temperatură. Dependența de frecvență a capacității și a pierderilor devine, de asemenea, mai puțin critică și performanțele condensatoarelor cu electrolit solid se aproprie de ale celor cu hârtie sau cu pelicule din mase plastice polare, pe care le pot înlocui în montajele miniaturizate.

Primele condensatoare fabricate cu electrolit solid au fost cele pe bază de tantal. Peste anodul de tantal sinterizat, pe care ulterior s-a format stratul de oxid dielectric, se depune pelicula de electrolit solid (de obicei  $MnO_2$ ). Această peliculă se obține prin impregnarea anodului într-o soluție apoasă de azotat de mangan 50% și apoi încălzire timp de câteva minute la temperatura de  $400^\circ C$  și prin descompunerea termică se obține stratul de  $MnO_2$  cu rezistivitatea de ordinul a 25  $\Omega cm$ .

Operația se repetă de 8...10 ori, timp în care de cel puțin 2...3 ori trebuie refăcut stratul de oxid dielectric care se distruge în timpul tratamentului termic. Pelicula de dioxid de mangan se acoperă cu *grafit* depus într-o suspensie coloidală în apă și apoi pe stratul de grafit se depune prin pulverizare *cupru* sau *plumb+staniu*, pe care se poate lipi conexiunea terminală. Printr-o tehnologie similară se obțin și condensatoare cu electrolit solid de niobiu. Protejarea condensatoarelor cu electrolit solid se face prin încapsulare în rășini epoxidice sau prin introducerea în cutii metalice ermetice.

*Condensatoarele oxid-metal* (Figura 8-8, e) sunt condensatoarele cele mai performante. La acest tip de condensator electrolitul este eliminat și a doua armătură a condensatorului este constituită dintr-un strat metalic depus în vid peste stratul de oxid dielectric.

În aceste condiții proprietățile condensatoarelor sunt dictate în întregime de proprietățile peliculei de oxid dielectric, iar proprietățile de redresare sunt foarte slabe, aproape inexistente, practic condensatorul funcționând nepolarizat. Stratul de oxid dielectric, datorită grosimii foarte mici, conține în structura sa mai multe defecțiuni. În punctele cu defecte, datorită curentului mare de scurtcircuit, armătura depusă în vid se evaporă, evitându-se astfel scurtcircuitarea condensatorului (proces similar cu cel din condensatoarele cu hârtie metalizată). Cu toate acestea suprafața condensatoarelor oxid-metal nu poate fi prea mare, deoarece ar crește prea mult probabilitatea de scurtcircuitare. În această variantă se fabrică condensatoare pe bază de oxid de tantal, de titan sau aluminiu cu capacități nominale de zeci și sute de nanofarazi.

## 8.5. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor variabile

### 8.5.1. Caracteristicile și construcția condensatoarele variabile

Condensatoarele variabile sunt componente electronice a căror capacitate poate fi modificată între anumite limite, impuse de anumite cerințe de funcționare în circuitele aparaturii electronice. De asemenea, sunt folosite și pentru acordarea circuitelor oscilante pe anumite frecvențe determinate. Un domeniu deosebit de cunoscut al utilizării lor este acela al radiocomunicațiilor unde, pentru recepționarea unui semnal de o anumită frecvență, circuitul oscilant trebuie să rezonanze pe frecvența respectivă. Aducerea circuitului în rezonanță se face modificând unul dintre elementele circuitului, de exemplu capacitatea condensatorului.

Pentru condensatoarele la care variația capacității se obține prin modificarea suprafeței armăturilor (distanța dintre armături fiind constantă) se folosesc formele constructive plane sau cilindrice (fig. 3.15).

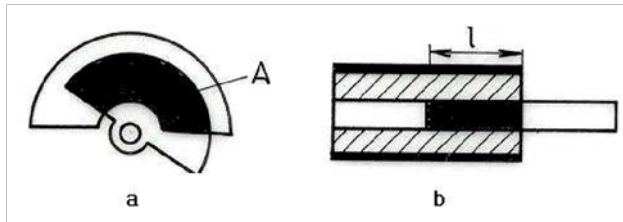


Figura 8-10 Forme constructive pentru condensatoarele variabile cu modificarea suprafeței: a) forma plană; b) forma cilindrică

În cazul condensatoarelor plane, armătura mobilă (rotorul) are o mișcare de rotație față de armătura fixă (statorul), adică variază suprafața, iar în cazul condensatoarelor cilindrice armătura interioară înaintază, obișnuit prin mișcare de rotație, în interiorul armăturii cilindrice exterioare. Deoarece dependența între capacitatea și suprafața armăturilor este liniară se poate obține legea de variație a suprafeței în funcție de poziția relativă a rotorului față de cursor.

În ceea ce privește condensatoarele variabile la care variația capacității se obține prin modificarea distanței dintre armături, acestea sunt foarte puțin folosite.

Din punct de vedere funcțional, condensatoarele variabile sunt caracterizate de mărimi similare condensatoarelor fixe:

- capacitatea nominală și toleranța acesteia;
- tensiunea nominală;
- tangenta unghiului de pierderi;
- coeficienții de variație a capacității sub acțiunea factorilor ambianți.

În afara caracteristicilor menționate, condensatoarelor variabile le sunt proprii unele caracteristici specifice, dintre care cea mai importantă este *legea de variație a capacității*.

Prin **capacitatea nominală** se va înțelege, de regulă, capacitatea maximă ( $C_{max}$ ) pe care o poate lua capacitatea condensatorului variabil.

**Capacitatea minimă** ( $C_{min}$ ) este definită ca valoarea minimă a capacității care se poate obține la bornele condensatorului variabil. Valoarea lui  $C_{min}$  depinde de construcția condensatorului, având valori obișnuite cuprinse în intervalul  $(0,05...0,2) \cdot C_{max}$ .

**Coeficientul de temperatură al capacității** condensatorului variabil ( $\alpha_c$ ) variază cu valoarea capacității după relația:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_{c1} C_{min} + \alpha_{c2} (C - C_{min})}{C},$$

unde:  $\alpha_{c1}$  este coeficientul de temperatură corespunzător valorii  $C_{min}$  a capacității și depinde, în special, de variația cu temperatura a capacității având ca dielectric suporturile ceramice;  $\alpha_{c2}$  - corespunzător capacității variabile ( $C - C_{min}$ ) și depinde de variația cu temperatura a suprafeței lamelelor, a distanței dintre lamelele rotorului și statorului etc.

**Tangenta unghiului de pierderi** a condensatorului depinde, de asemenea, de valoarea capacității condensatorului variabil, înscriindu-se, de regulă, între limitele  $(10...30)10^{-4}$ . Este influențată de coeficientul de temperatură al capacității.

**Legea de variație a capacității.** Aceasta este aleasă în concordanță cu utilizarea condensatorului variabil. În Figura 8-11 se prezintă câteva legi uzuale de variație a capacității.

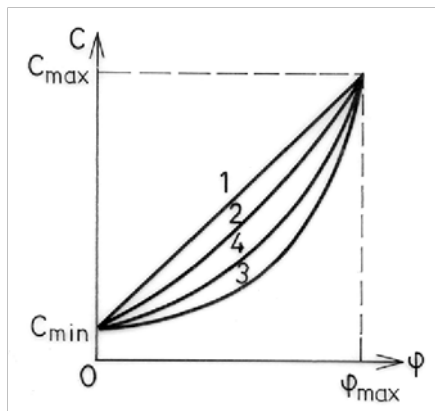


Figura 8-11 Legi uzuale de variație a capacității: 1) liniară; 2) pentru frecvență variabilă liniară; 3) pentru lungime de undă variabilă liniară; 4) variație logaritmică

## 8.5.2. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor variabile cu aer

Condensatoarele variabile cu aer (Figura 8-12) sunt alcătuite din două părți componente distincte: rotorul și statorul. Forma lamelelor este dictată de legea de variație a capacității.

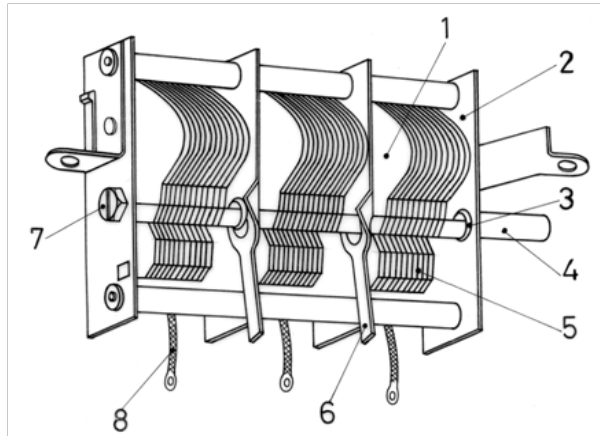


Figura 8-12 Condensatorul variabil cu aer: 1-rotor; 2-șasiu; 3, 7-lagăre cu bile; 4-ax; 5-stator; 6-arcuri conductoare; 8-conductoare flexibile

Lamelele rotorului, 1, pătrund între lamelele statorului 5, modificând în acest mod aria condensatorului, ceea ce produce modificarea capacității acestuia. Statorul este izolat electric față de șasiu prin intermediul unor izolatoare ceramice, în timp ce rotorul are potențialul electric egal cu al șasiului. Armăturile rotorului și statorului sunt confecționate din lamele de alamă sau aluminiu cu grosimea de 0,5...1 mm.

Lamele rotorului se încastrează într-un ax din alamă 4, iar cele ale statorului se rigidizează cu ajutorul unor plăci de legătură. Întreg ansamblul se fixează într-o carcasă metalică (statorul prin izolatoare ceramice iar axul rotor prin lagărele cu bile 3, 7) sau, pentru condensatoarele miniaturizate într-o carcasă ceramică. Rotorul este pus în mișcare prin intermediul unui angrenaj de demultiplicare acționat de un ax de comandă. Demultiplicarea oferă avantajul unui acord mai fin cu frecvența dorită.

Întrucât conexiunea electrică la rotor numai prin intermediul bilelor este nesigură și generează zgomot, se mai folosesc, uneori, arcuri conductoare 6 sau conductoare flexibile 8, având un capăt lipit de rotor. Această soluție constructivă introduce însă un efect de inductivitate în serie cu capacitatea condensatorului. Alteori se folosesc lamele elastice conductoare în contact prin presiune cu axul sau cu un disc fixat pe axul rotorului.

În cazul condensatoarelor variabile destinate frecvențelor foarte înalte, se poate utiliza un contact capacitiv cu rotorul, ceea ce introduce însă o capacitate suplimentară între rotor și stator.

Pentru condensatoarele variabile cu aer capacitatea maximă  $C_{max}$  nu poate avea valori prea mari deoarece volumul acestora ar fi prea mare. Obișnuit se obțin

capacități specifice de  $5...6 \text{ pF/cm}^3$ . De aceea pentru frecvențe până la 3 MHz se folosesc condensatoare cu capacități  $C_{max} = 350...600 \text{ pF}$ , iar peste valori de 30 MHz capacitatea maximă  $C_{max}$  are valori cuprinse între 20 și 50 pF. Numai în cazuri foarte rare se construiesc condensatoare cu capacități maxime în domeniul 1000...5000 pF. Valoarea lui  $C_{min}$  depinde, așa cum s-a mai arătat, de construcția condensatorului având obișnuit  $(0,05...0,2) \cdot C_{max}$ .

În cazul condensatoarelor variabile pentru *tensiuni de lucru ridicate* (de ordinul kilovoltilor) se pot folosi ca dielectrici, în locul aerului, *gaze electronegative* sau *incinte vidate*.

Creșterea rigidității dielectrice, în cazul gazelor electronegative, se explică prin aceea că străpungerea dielectrică se datorează faptului că atomii halogenoizi (Cl, Br, F sau I) acaparează electronii liberi din gaz, transformând molecula gazului într-un ion negativ, care are o mobilitate mult mai mică decât a electronilor, datorită masei sale mai mari.

Ținând seama de numărul circuitelor ce trebuie acordate, condensatoarele variabile se realizează cu 1, 2 sau 3 secțiuni care, pot fi identice sau nu.

### 8.5.3. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor variabile cu dielectric solid

Pentru a depăși limitele tehnologiei de realizare a condensatoarelor variabile cu aer sau cu gaze electronegative, în ceea ce privește capacitatea specifică s-a recurs la folosirea dielectricilor solizi și în construcția condensatoarelor variabile.

În acest caz se folosesc ca dielectrici, *folii din materiale sintetice termoplaste*, ce se dispun între rotorul și statorul condensatoarelor variabile plane. Condensatoarele care folosesc folii din *polistiren* sau *politetrafluoretilenă*, au dimensiuni comparabile montajelor tranzistorizate sau cu circuitele integrate.

Trebuie menționat faptul că utilizarea foliilor de dielectric solid nu aduce avantaje și din punctul de vedere al rigidității dielectrice. Acest neajuns este cauzat de interstițiile de aer ce se formează inevitabil, între armături și foliile dielectrice.

## 8.6. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor semireglabile

Condensatoarele semireglabile, denumite și semivariabile sau trimeri, se caracterizează prin faptul că valoarea capacității lor poate fi reglată la punerea în funcție sau la verificările periodice; în timpul funcționării, ele îndeplinesc rolul unor condensatoare fixe.

Se fabrică în mod uzual condensatoare reglabile *cu aer*, *cu dielectric anorganic* sau *dielectric organic*, în următoarele variante constructive: *plane*, *cilindrice*, *bobinate*.



### 8.6.1. Condensatoare semireglabile cu aer

În Figura 8-13 se prezintă *condensatorul semivariabil cilindric cu aer* care se compune din două piese prevăzute cu lamele concentrice. Aceste lamele formează armăturile condensatorului.

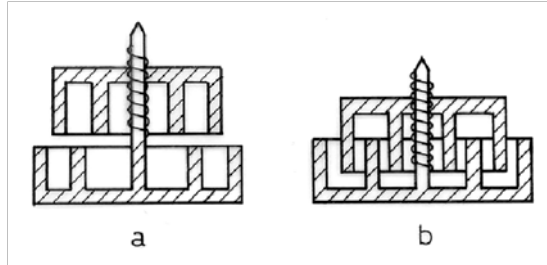


Figura 8-13 Condensatorul semivariabil cu aer: a) capacitate minimă; b) capacitate maximă

Prin mișcarea rotorului, armăturile lui intră mai mult sau mai puțin între armăturile statorului, în direcție axială, provocând modificarea suprafeței comune și deci a capacității. De obicei, legea de variație a capacității este liniară. Capacitatea maximă este de câteva zeci de picofarazi, iar capacitatea reziduală de 3,5 pF.

### 8.6.2. Condensatoare semireglabile cu dielectric anorganic

#### Trimerii ceramici plani

Aceștia au un stator din ceramică pe care este depusă o armătură din argint sub forma unui sector de cerc cu unghiul la centru de aproape  $180^\circ$  și un rotor tot din ceramică, pe care este depusă o armătură din argint similară celei de pe stator. Asamblarea se realizează astfel încât cele două armături să se afle de o parte și de cealaltă a rotorului. Pentru micșorarea interstițiilor se realizează o finisare cât mai perfectă a suprafețelor ce vin în contact. Valoarea maximă a capacității trimerilor ceramici plani poate ajunge până la 200 pF.

#### Trimerii ceramici cilindrici

Aceștia se compun dintr-un dielectric tubular ceramic pe a cărei suprafață exterioară se depune o armătură sub forma unui cilindru. Armătura mobilă este formată dintr-un șurub care poate pătrunde în interiorul cilindrului, permițând astfel modificarea capacității. Capacitatea reziduală a unui asemenea condensator este de ordinul 0,1 pF, iar capacitatea lui maximă de 3.20 pF. Legea de variație a capacității este liniară. Variația totală a capacității se obține pentru mai multe rotații complete ale rotorului.

Pe același principiu constructiv se pot realiza și *trimeri cilindrici cu sticlă*. Aceștia au capacități specifice mult mai reduse decât ai celor ceramici din cauza permitivității dielectrice mai mici a sticlei.

Trimerii cilindrici din ceramică sau sticlă se fabrică și în varianta bobinată.

*Trimerii bobinați*, la care armătura fixă este un cilindru metalic interior tubului de dielectric, au armătura mobilă sub forma unui fir bobinat chiar pe tubul dielectric, cu un număr de spire în funcție de capacitatea dorită.

Pe măsură ce se scot spirele, capacitatea trimerului scade. Este destul de dificil să se rebobineze spirele, motiv pentru care capacitatea se poate modifica numai în sensul scăderii acesteia, ceea ce constituie un dezavantaj.

Un alt tip de condensator ajustabil bobinat folosește în locul tubului ceramic sau de sticlă un conductor de cca. 2 mm diametru, pe care se bobinează o sârmă izolată. Izolația sârmei (organică sau anorganică) constituie dielectricul condensatorului ajustabil.

### 8.6.3. Condensatoare semireglabile cu dielectric organic

#### Trimeri cilindrici cu dielectric organic

În cazul acestor tipuri de condensatoare, variația capacității se realizează, în limitele 0,5...3,5 pF, prin deplasarea unui piston metalic (armătura mobilă) în interiorul unui tub metalic (armătura fixă), pe suprafața interioară a acestuia fiind depus un strat din *material termo-plastic nepolar*, cu grosimea de cca. 0,25 mm. Acești trimeri își găsesc aplicații în special pentru neutrodinarea etajelor de amplificare.

#### Condensatoarele semivariabile bobinate cu polistiren

Au capacitate mare (până la  $C_{max}=1$  nF) și, prin acționarea asupra secțiunii bobinate, cu ajutorul unui șurub melc, posibilitatea de variație a capacității în limitele  $\pm 10\%$ .

## 8.7. Tehnologia de fabricație a condensatoarelor de trecere

Reprezentative pentru această categorie sunt *condensatoarele imprimate*, care se realizează în două variante constructive:

a) Condensatoare la care armăturile sunt formate din două **folii conductoare** ce se plasează pe ambele fețe ale suportului izolant care, în acest caz, constituie dielectricul; folosind un placat normal (grosime 1,5 mm și  $\epsilon_r=5$ ), se obține o capacitate specifică de  $5,5 \cdot 10^4$  pF/m<sup>2</sup>.

Pentru a putea obține capacități mai mari se recurge fie la folosirea de materiale cu constanta dielectrică mai mare, fie la micșorarea grosimii dielectricului;

b) Condensatoare la care armăturile se realizează sub formă de **pieptene**, cu imprimarea pe o singură față a suportului izolant. În acest fel se pot obține condensatoare cu capacități mai mici, destinate să funcționeze la tensiuni cu valori reduse.

## 8.8. Fiabilitatea condensatoarelor

Condensatoarele sunt, după rezistențe, componentele cu cea mai largă utilizare în aparatura electronică. Ponderea lor atinge, în medie, 25 % din numărul total al componentelor utilizate. Ținând seama de faptul că defecțiunile pe care le produc condensatoarele reprezintă circa 15 % din numărul total al defecțiunilor și că, după opinia unor autori, jumătate din aceste defecțiuni se datorează alegerii sau folosirii necorespunzătoare, se poate afirma că *fiabilitatea condensatoarelor este relativ bună*.

*Mecanisme de defectare.* Una dintre defecțiunile care survin cel mai frecvent în cazul condensatoarelor este *micșorarea rezistenței de izolație* care, în faza incipientă, poate duce la pierderi mai mari prin conducție (crește tgδ), iar în final, la deteriorarea prin străpungere a condensatorului.

Motivul principal ce determină această defecțiune este, în cazul funcționării condensatorului într-o atmosferă umedă, *umiditatea* care pătrunde în dielectricul incomplet etanșat. Ca urmare, se micșorează rezistența de izolație și prin urmare cresc pierderile. O etanșare perfectă sau, acolo unde este posibil, folosirea condensatoarelor cu dielectric ne higroscopic (polistiren, polietilentereftalat) micșorează mult probabilitatea de apariție a acestui defect.

Micșorarea rezistenței de izolație poate surveni, de asemenea, datorită unor *schimbări fizico-chimice* care au loc în dielectric sub acțiunea tensiunii aplicate un timp îndelungat sau datorită *depozitării necorespunzătoare (îmbătrânirii condensatoarelor)*.

Condensatoarele cu hârtie metalizată sau pelicule termoplastice metalizate se deteriorează în special prin *pierderea capacității (distrugerea armăturilor)* în urma *menținerii un timp îndelungat la o tensiune ridicată*.

*Evacuarea impregnantului* (datorită unei etanșări necorespunzătoare din condensatoarele impregnate) conduce atât la *variația rezistenței de izolație*, cât și la *variația capacității*, de cele mai multe ori în afara toleranțelor admisibile.

În cazul condensatoarelor electrolitice semiuscate sau cu electrolit lichid, atât *evacuarea electrolitului*, datorită unei etanșări necorespunzătoare sau datorită temperaturilor ridicate, cât și *micșorarea mobilității purtătorilor de sarcină din electrolit*, prin micșorarea temperaturii, conduc la *creșterea pierderilor și la micșorarea capacității*. Rezistența de izolație poate să scadă și din cauza unei depozitări îndelungate, care conduce la *distrugerea stratului de oxid dielectric*. Acest neajuns se remediază printr-o *reformare* (menținerea condensatorului un anumit timp la tensiunea nominală); stratul de oxid se reface în cazul condensatoarelor semiuscate și, în special, la cele cu electrolit lichid.

Condensatoarele se pot distruge, în special, din cauza *ruperii conexiunilor terminale în punctul de contact cu armătura*. Cele *ceramice* de tipul disc sau placchetă se pot sparge.

Cantitativ, fiabilitatea condensatoarelor, se apreciază prin *rata de defectare*  $\lambda$ . Acest parametru variază de la un tip de condensator la altul, fiind dependent de condițiile de lucru ale condensatorului. În Tabelul 8-6 sunt prezentate valorile medii ale ratei de defectare ( $\lambda$ ) pentru principalele tipuri de condensatoare, în condițiile valorilor nominale ale tensiunii și temperaturii.

Așa cum este normal, o solicitare ușoară conduce întotdeauna la scăderea ratei de defectare și la creșterea duratei de viață a condensatorului.

Fiabilitatea condensatoarelor variabile este mai mică decât a condensatoarelor fixe, datorită existenței unor părți în mișcare.

Principala defecțiune care survine în cazul condensatoarelor variabile, în special a celor cu aer, este străpungerea datorată fie apropierii accidentale între armături în urma unei defecțiuni mecanice, fie depunerii pe armătură a unor particule de praf ca urmare a funcționării într-un mediu necorespunzător. În cazul condensatoarelor variabile pot surveni și defecte pur mecanice ca uscarea, sau chiar blocarea lagărelor sau a sistemului de deplasare a armăturii mobile, ceea ce se manifestă negativ asupra preciziei reglării și asupra performanțelor nominale. Orientativ, rata de defectare pentru condensatoarele variabile cu aer poate fi considerată de  $5\%/10^3\text{ h}$ .

*Condensatoarele semivariabile* au rata de defectare inferioară condensatoarelor variabile, neatingând însă valoarea celor fixe.

**Tabelul 8-6** Valorile medii ale ratei de defectare pentru principalele tipuri de condensatoare

Tipul condensatorului	$\lambda$ ( $\%/10^3\text{ h}$ )
Condensatoare cu mică	0,03
Condensatoare ceramice	0,01
Condensatoare cu polistiren	0,005
Condensatoare cu hârtie	0,1
Condensatoare cu hârtie metalizată	0,05
Condensatoare electrolitice cu aluminiu semiuscate	0,5
Condensatoare cu tantal semiuscat	0,5

## 8.9. Criterii de alegere a condensatoarelor

Alegerea tipului de condensator ce urmează a fi utilizat într-o schemă electronică dată este determinată de *performanțele impuse schemei*, pe de o parte și de *caracteristicile condensatoarelor* avute la dispoziție, pe de altă parte.

Astfel, pentru alegerea unui tip de condensator trebuie să se țină cont de următorii factori: stabilitatea impusă parametrilor schemei, tensiunea de lucru a condensatorului, domeniul temperaturilor de lucru și coeficientul termic admis pentru capacitatea condensatorului, domeniul frecvențelor de lucru al condensatorului, fiabilitatea minimă impusă schemei, gabaritul impus pentru montaj, prețul maxim admis pentru montaj etc.

În ceea ce privește *caracteristicile condensatoarelor* se fac următoarele recomandări:

- *Valoarea necesară și toleranța admisă pentru capacitatea condensatorului* în schema respectivă determină *capacitatea nominală și clasa de valori nominale* (clase de toleranțe) din care trebuie să facă parte condensatorul ales. Astfel, dacă  $C_1$  și  $C_2$  sunt valorile, minimă și maximă, admise pentru valoarea capacității din schema respectivă, se poate alege un condensator cu capacitatea nominală  $C_n$  și cu toleranța necesară.

- În orice circuit se va ține cont ca **tensiunea de lucru** a condensatorului să fie  $U < U_n$ , pentru a asigura o fiabilitate bună a circuitului și o durată lungă de viață a condensatorului.
- **Intervalul temperaturilor de lucru** este un parametru foarte important pentru componente ce lucrează în condiții speciale. În funcție de temperaturile limită de lucru  $T_1$  și  $T_2$  și de coeficientul  $\alpha_c$  al condensatorului ales, se calculează variațiile  $\Delta C$  ale capacității în gama de temperatură  $\Delta T$  și implicațiile acestor variații asupra parametrilor circuitului.

**Tabelul 8-7 Caracteristicile principalelor tipuri de condensatoare și recomandări de utilizare a acestora**

Tipul condensatorului	Capacitatea nominală	Banda de frecvență	Caracteristici esențiale	Utilizări
Ceramice	tip I	0,8 pF–1nF	înaltă frecvență - toleranță $\pm 0,25$ pF; $\pm 0,5$ pF pentru $C_n \leq 10$ pF $\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ pentru $C_n \geq 10$ pF $\text{tg } \delta \leq 15 \cdot 10^{-4}$ $U_n = 63; 500 V_{cc}$ - stabilitate a capacității - variație liniară cu temperatura cu $\alpha_c = (-750 \pm 250)$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ $R_{oz} \geq 10 \text{ G}\Omega$	echipamente electronice industriale și profesionale
	tip II	33 pF–100 nF	înaltă frecvență - toleranță $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ $-20 + 80\%$ ; $-20 + 50\%$ $\text{tg } \delta \leq 0,035$ $U_n = 25 V_{cc}, 500 V_{cc}, 3 \text{ kV}_{cc}$ - coeficient nedefinit de variație cu temperatura; între $-40^{\circ}\text{C}$ și $+85^{\circ}\text{C}$ $C = (-90 \dots + 30\%) \cdot C_n$ ( $C_n$ la $20^{\circ}\text{C}$ ) $R_{oz} \geq 3 \text{ G}\Omega$	circuite de cuplare și decuplare, filtre în echipamente de telecomunicații și industriale, circuite de înaltă tensiune
Ceramică multistrat	tip „chip” tip I (ceramică)	3,3 pF–18 nF	fără restricții - capacitate specifică mare - toleranță $\pm 2\%$ ; $\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ $\text{tg } \delta \leq 15 \cdot 10^{-4}$ , pentru $C \geq 50$ pF; $\text{tg } \delta \leq 1,5 (150/C_n + 7) \cdot 10^{-4}$ , pentru $5 < C_n < 50$ pF $U_n = 50; 100; 200 V_{cc}$ - între $-550^{\circ}\text{C}$ și $+125^{\circ}\text{C}$ , variație liniară cu temperatura cu $\alpha_c = \pm 30$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ $R_{oz} \geq 10 \text{ G}\Omega$	circuite hibride
	tip II	100 pF–1 $\mu\text{F}$	fără restricții - toleranță $\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ $\text{tg } \delta \leq 3 \cdot 10^{-2}$ $U_n = 50; 100; 200 V_{cc}$ - între $-55^{\circ}$ și $120^{\circ}\text{C}$ , variația capacității $\Delta C/C \leq \pm 20\%$ $R_{oz} \geq 4 \text{ G}\Omega$ pentru $C_n \leq 25$ nF $R_{oz} C_n = 100\text{s}$ pentru $C_n > 25$ nF	circuite hibride
	protejate tip I	3,3 pF–27 nF	fără restricții - capacitate specifică mare - toleranță $\pm 1\%$ ; $\pm 2\%$ ; $\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ $U_n = 25, 50; 100; 200 V_{cc}$ $\text{tg } \delta \leq 15 \cdot 10^{-4}$ , pentru $C \geq 50$ pF; $\text{tg } \delta \leq 1,5 (150/C_n + 7) \cdot 10^{-4}$ , pentru $5 < C_n < 50$ pF - între $-55^{\circ}\text{C}$ și $+125^{\circ}\text{C}$ , variație liniară cu temperatura cu $\alpha_c = \pm 30$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ $R_{oz} \geq 10 \text{ G}\Omega$	echipamente electronice profesionale
	tip II	100 pF–1,5 $\mu\text{F}$	fără restricții - toleranță $\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ $\text{tg } \delta \leq 3 \cdot 10^{-2}$ $U_n = 25; 50; 100; 200 V_{cc}$ - între $-55^{\circ}$ și $125^{\circ}\text{C}$ , variația capacității $\Delta C/C \leq \pm 20\%$ $R_{oz} \geq 4 \text{ G}\Omega$ pentru $C_n \leq 25$ nF $R_{oz} C_n = 100\text{s}$ pentru $C_n > 25$ nF	echipamente electronice profesionale

Tipul condensatorului	Capacitatea nominală	Banda de frecvență	Caracteristici esențiale	Utilizări
cu polistiren (stiroflex)	47 pF-100 nF	$f < 100$ kHz	- toleranță $\pm 2,5\%$ ; $5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ - $\text{tg } \delta \leq 5 \cdot 10^{-4}$ - $U_n = 2,5 \dots 1000 V_{cc}$ - stabilitate bună cu temperatura $\alpha_c = (-60 \dots 220) \text{ ppm}^\circ\text{C}$ - domeniul limitat de frecvență datorită inductanței parazite - $R_p \geq 100 \text{ G}\Omega$	echipamente electronice industriale și aparatură de larg consum
cu mylar (polietilentereftalat)	10 nF-6,8 $\mu\text{F}$	$f < 100$ kHz $f > 100$ kHz	- toleranță $\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ - $\text{tg } \delta \leq 0,01$ și puternic dependent de temperatură - $U_n = 100 \dots 630 V_{cc}$ - efectul inductiv parazit poate fi neglijat la orice frecvență - între $-40^\circ$ și $+80^\circ\text{C}$ $\Delta C_n = (-4\% \dots +2\%) C_n$ - $R_p \geq 3,75 \text{ G}\Omega$ pentru $C_n \leq 0,33 \mu\text{F}$ $R_p C_n \geq 1250\text{s}$ pentru $C_n > 0,33 \mu\text{F}$	aparatură industrială și de larg consum, în general de uz curent
cu hârtie	0,01 $\mu\text{F}$ -20 $\mu\text{F}$	joasă frecvență	- capacitate specifică mică - toleranță $\pm 20\%$ - $U_n = 220 \dots 1300 V_{cc}$ - $\text{tg } \delta \leq 0,01$ , dependentă puternic de temperatură - variație mare a capacității cu temperatura: - între $-25^\circ\text{C}$ și $+85^\circ\text{C}$ , $\Delta C_n = (0 \dots -50\%) C_n$ - rezistența de izolație depinde exponențial de temperatură, $R_p \geq 6 \text{ G}\Omega$	circuite de curent continuu, cuplări, decuplări filtre, descărcări în gaze, antiparazitare, circuite de putere, pomiri motoare
Electrolitice cu aluminiu	Miniatură	1 $\mu\text{F}$ -2200 $\mu\text{F}$	joasă frecvență - capacitate specifică mare - toleranță $-20 \dots +100\%$ - $U_n = 3 \dots 350 V_{cc}$ - polarizate	circuite de cuplare, decuplare, filtre în echipamente industriale și aparatură de larg consum
	de mare capacități	100 $\mu\text{F}$ - $10^4 \mu\text{F}$	joasă frecvență - capacitate specifică mică - $\text{tg } \delta \leq 0,75$ - toleranță $-20 \dots +50\%$ - $U_n = 70 \dots 450 V_{cc}$ - polarizate - elemente parazite mari	filtre după redresare de tensiune medie și înaltă
Cu tantal, cu electrolit solid	tip picătură, de uz general	0,1 $\mu\text{F}$ -680 $\mu\text{F}$	$f_{max} = 10$ kHz - capacitate specifică mare - $\text{tg } \delta < 0,1$ - toleranță $-20 \dots +30\%$ - $U_n = 3 \dots 50 V_{cc}$ - elemente parazite neglijabile	cuplare și decuplare în aparatură industrială și de larg consum
	profesionale	1 $\mu\text{F}$ -330 $\mu\text{F}$	$f_{max} = 10$ kHz - toleranță $\pm 20\%$ - $\text{tg } \delta \leq 0,08$ pentru $C_n \leq 100 \mu\text{F}$ ; - $\text{tg } \delta \leq 0,1$ pentru $C_n > 100 \mu\text{F}$ - capacitate specifică mare - $U_n = 6,3 \dots 63 V_{cc}$ - variația capacității cu frecvența foarte mică	cuplare și decuplare în aparatură profesională și specială
	nepolarizare	4,7 $\mu\text{F}$ -150 $\mu\text{F}$	$f < 20$ kHz - toleranță $\pm 20\%$ - $\text{tg } \delta \leq 15 \cdot 10^{-2}$ - $U_n = 10 V_{cc}$	circuite de c.c și c.a la frecvențe audio

Tipul condensatorului	Capacitatea nominală	Banda de frecvență	Caracteristici esențiale	Utilizări
cu mică	1 pF-100 nF		- toleranța $\pm 0,5\% \dots \pm 20\%$ - $\text{tg } \delta < 15 \cdot 10^{-4}$ - $U_s = 100 \text{ V} - 35 \text{ kV}$ - $\alpha_c = 20 \dots 65 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$	echipament telecomunicații, filtre, circuite de înaltă tensiune
ceramice ajustabile disc	2/7...5/15 pF 3/10...10/60 pF 5/20...20/100 pF (tip II)	întă frecvență	- $\text{tg } \delta \leq 20 \cdot 10^{-4}$ - $U_s = 250 \text{ V}_{cc}, 350 \text{ V}_{cc}$ - $\alpha_c = -1800 \dots + 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$	circuite electronice în radiofrecvență
ceramice ajustabile cilindrice	0,5/3...3/15 pF 1/9 pF	întă frecvență $f < 250 \text{ MHz}$	- $\text{tg } \delta < (2 \dots 5) 10^{-3}$ - $U_s = 250; 400 \text{ V}$	circuite de înaltă frecvență în aparatura radio-TV
Variable	cu aer	întă frecvență	- $\text{tg } \delta \leq 2 \cdot 10^{-3}$ - $U_s = 450 \text{ V}_{cc}$ - unghi efectiv de rotație $180^\circ + 3^\circ$ - volum mare	receptoare de radiofuziune
	cu dielectric solid	întă frecvență	- $\text{tg } \delta \leq 7 \cdot 10^{-3}$ - $U_s = 50 \text{ V}$ - unghi efectiv de rotație $174^\circ + 3^\circ$ - volum redus	receptoare de radiofuziune

- **Coeficientul de variație cu temperatura,  $\alpha_c$ ,** este o caracteristică esențială pentru circuitele care trebuie să aibă parametri electrici neinfluențați de variațiile de temperatură ale mediului de lucru. Coeficientul  $\alpha_c$  se determină ținând cont de felul în care variază valoarea elementelor circuitului cu temperatura, aceasta - pentru a putea compensa prin variații adecvate de capacitate modificarea parametrilor electrici, așa încât aceștia să rămână în domeniul funcțional. În cazul în care nu se găsește un condensator care să aibă coeficientul termic dorit, el se poate obține prin conectarea serie-paralel sau mixt a unor condensatoare cu coeficient termic dat.
- **Domeniul frecvențelor** în care poate fi utilizat un condensator este dependent de structura sa constructivă, de tehnologia de realizare, fiind direct influențat de natura dielectricului întrebunțat. De exemplu, în înaltă frecvență se pot folosi condensatoare ceramice monostrat și multistrat, al căror element inductiv parazit poate fi neglijat; în joasă frecvență, alături de condensatoarele electrolitice clasice de volum mare și de elemente parazite uneori supărătoare, se pot folosi condensatoare cu tantal (care au proprietăți superioare, permit miniaturizarea, dar implică un preț de cost mai ridicat).

Caracteristicile unor tipuri de condensatoare realizate după tehnologiile expuse anterior precum și unele recomandări de utilizare ale acestora sunt prezentate în Tabelul 8-7.





## Cap.9. Bobine

### 9.1. Calculul inductivității

Bobina electrică este elementul de circuit format din spire conductoare ce produce un câmp magnetic sau în care se induce o tensiune electromotoare. În mod ideal între tensiunea la bornele bobinei și curentul ce o străbate există relația:

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (72)$$

în care  $L$  este inductivitatea bobinei și se definește ca fiind raportul dintre fluxul magnetic creat de bobină și intensitatea curentului electric ce o străbate:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (73)$$

Bobinele se realizează fără miez magnetic (bobine cu aer) sau, dacă este necesară o inductivitate mare, pe miezuri magnetice de diferite forme. Din punct de vedere funcțional bobinele pot fi:

- **bobine fixe**, pentru care inductivitatea este constantă în tot timpul funcționării componentei;
- **bobine variabile**, la care se poate modifica inductivitatea.

Domeniile diferite de utilizare au impus conceperea și realizarea a numeroase tipuri de bobine care se deosebesc constructiv prin *forma geometrică a bobinei și a spirelor, numărul de spire al înfășurării, numărul de straturi al înfășurării, dispunerea relativă a straturilor, utilizarea sau neutilizarea carcusei, tipul de carcasă, existența sau inexistența miezului magnetic, tipul miezului, posibilitatea de variație a inductanței* etc.

Elementele constructive, pe de o parte și condițiile de utilizare, pe de altă parte, impun folosirea diferitelor materiale pentru înfășurări, pentru carcuse, pentru miezuri etc., iar realizarea concretă determină folosirea unor tehnologii specifice atât pentru construcția propriu-zisă a bobinei, cât și pentru obținerea materialelor necesare.

Calculul inductivității se face anterior realizării bobinei, în general cu formule empirice.

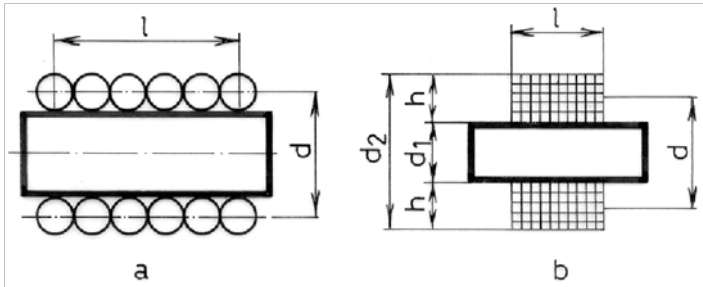


Figura 9-1 Bobine fără miez - modele pentru calculul inductivității: a) cu un strat; b) cu mai multe straturi

Astfel, pentru *bobine fără miez, cu un singur strat, spiră lângă spiră* (Figura 9-1, a), inductivitatea se poate calcula cu relația:

$$L_0 = \frac{0,001 \cdot d \cdot n^2}{0,44 + l/d} [\mu\text{H}] \quad (74)$$

unde:  $d$  - este diametrul mediu al bobinei, în mm;  $l$  - lungimea bobinei, în mm;  $n$  - numărul de spire.

În cazul *bobinelor cu mai multe straturi* (Figura 9-1, b) inductivitatea se calculează cu relația:

$$L_0 = \frac{0,008 \cdot d^2 \cdot n^2}{3d + 9l + 10h} [\mu\text{H}] \quad (75)$$

unde:  $d$  - este diametrul mediu al bobinei, în mm;  $l$  - lungimea bobinei, în mm;  $h$  - înălțimea bobinei, în mm.

Considerând o bobină ideală (fără pierderi) care are în vid inductivitatea  $L_0$  (care depinde, așa cum s-a prezentat anterior, de caracteristicile dimensionale și de tipul constructiv) și introducând în interiorul bobinei un material magnetic în așa fel încât întregul flux magnetic să circule numai prin material (flux de scăpări nul), impedanța la bornele bobinei va fi:

$$\underline{Z} = j\bar{\omega}L_0\bar{\mu} = j\bar{\omega}\mu' L_0 + \mu''\bar{\omega}L_0 = r_m + j\bar{\omega}L \quad (76)$$

unde:  $\bar{\mu}$  - este permeabilitatea complexă;  $\mu'$  - partea reală a permeabilității complexe;  $\mu''$  - partea imaginară a permeabilității complexe;  $r_m = \mu''\bar{\omega}L_0$  și reprezintă pierderile în materialul magnetic la frecvența de lucru;  $L = \mu' L_0$  reprezintă inductivitatea echivalentă a unei bobine fără pierderi.

În aceste condiții schema echivalentă a unei bobine cu miez va fi formată dintr-o inductanță fără pierderi de valoare  $\mu' L_0$ , în serie cu o rezistență  $r_m$ .

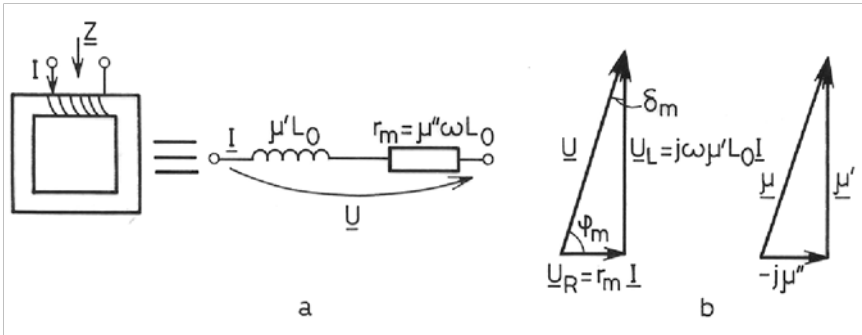


Figura 9-2 Bobine cu miez: a) schema echivalentă; b) diagrama de fazori

Tangenta unghiului de pierderi va fi definită de relația:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{U_R}{U_L} = \frac{r_m I}{\omega L I} = \frac{\mu'' \omega L_0 I}{\mu' \omega L_0 I} = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (77)$$

Inversul tangentei unghiului de pierderi poartă denumirea de *factor de calitate* al materialului magnetic:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_m} = \frac{\mu'}{\mu''} \quad (78)$$

O bobină este considerată cu atât mai bună cu cât unghiul de pierderi este mai mic, ceea ce presupune că rezistența electrică a înfășurării bobinei să fie cât mai mică în raport cu inductanța acesteia.

În cazul a două bobine aflate una în câmpul magnetic al celeilalte, între curentul care străbate prima bobină și tensiunea la bornele celei de-a doua există, în mod ideal, relația:

$$u_2 = M \frac{di}{dt} \quad (79)$$

în care  $M$  este inductivitatea mutuală între cele două bobine.

Între inductivitatea mutuală și inductivitățile proprii ale celor două bobine există relația:

$$M = k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (80)$$

unde  $k$  reprezintă coeficientul de cuplaj magnetic.

Cuplajul între două bobine poate fi fix (dacă coeficientul de cuplaj nu se modifică în timpul funcționării) sau variabil (dacă variația coeficientului de cuplaj este funcțional necesară).

## 9.2. Construcția și tehnologia de fabricație a bobinelor

### 9.2.1. Tipuri constructive de carcase pentru bobinaj

Suportul pe care se înfășoară conductorul bobinei (carcasa), trebuie să permită bobinarea ușoară, efectuarea cu ușurință a conexiunilor, fixarea simplă și montarea comodă a miezului magnetic, prezentând în același timp o rezistență mecanică satisfăcătoare. Din punct de vedere constructiv se deosebesc:

- *carcase tubulare fără flanșe*, cu secțiune pătrată, rotundă, dreptunghiulară, după tipul miezului; neavând flanșe laterale aceste carcase se utilizează numai pentru anumite tipuri de bobinaje.
- *carcase cu flanșe* (sau tip mosor) prevăzute cu flanșe laterale pentru a limita lungimea bobinei, iar uneori și cu flanșe intermediare pentru a secționa înfășurarea în vederea micșorării capacităților parazite; flanșele, atât cele laterale cât și cele intermediare, sunt prevăzute cu orificii prin care se scot terminalele.

În Figura 9-3 sunt prezentate câteva tipuri de carcase folosite pentru fabricarea bobinelor.

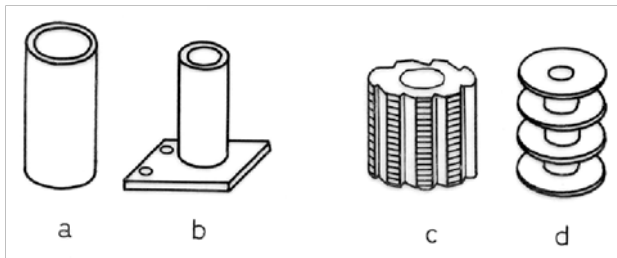


Figura 9-3 Tipuri constructive de carcase: a) simplă; b) cu flanșă; c) cu nervuri; d) cu flanșe intermediare (galeți)

Carcasele pot fi prevăzute și cu piese pentru fixarea pe șasiu. De obicei pereții carcaselor sunt netezi, condiție obligatorie pentru bobinajul multistrat. Pentru bobinajul într-un singur strat se pot utiliza și carcase cu nervură elicoidală, pentru fixarea conductorului. Acest din urmă tip permite bobinarea uniformă a bobinelor cu spire distanțate, pentru bobine cu capacități parazite reduse și factor de calitate ridicat.

Materialul din care se confecționează carcasele pentru bobinaje trebuie să prezinte caracteristici mecanice și electrice corespunzătoare și anume: rigiditate dielectrică suficientă, pierderi dielectrice reduse, stabilitate termică și stabilitate la acțiunea umidității și la variația parametrilor ambianți, stabilitate în timp. Materialul se alege în funcție de domeniul de frecvență la care lucrează bobina și de performanțele ce se impun.

Cele mai utilizate materiale din care se realizează carcusele (în ordine crescândă a performanțelor) sunt: cartonul electroizolant, pertinaxul, textolitul, materialele plastice termorigide (bachelita), materialele plastice termoplaste (polisti-renul, policlorvinilul, polietilena, teflonul), materialele ceramice.

*Cartonul, textolitul, pertinaxul și bachelita* sunt utilizate în domeniul frecvențelor joase.

Carcusele din materiale termoplastice au proprietăți superioare și pot fi utilizate la frecvențe înalte și au avantajul că se prelucurează mecanic ușor și nu sunt casante.

Este necesar însă, ca temperatura de utilizare a acestora să nu depășească temperatura de înmuiere ce caracterizează fiecare material termoplastic.

**Tabelul 9-1 Materiale pentru carcusele bobinelor de joasă frecvență**

Materialul Caracteristica	Polistiren	Bachelită	Materiale stratificate	Carton (preșpan) impregnat
	<b>Comportarea la diverse temperaturi</b>	Slabă. Admite max. 70...80 °C	Bună (termodură)	Foarte bună. Admite peste 100 °C
<b>Proprietăți electrice în JF</b>	Foarte bune	Bune	Bune	Acceptabile
<b>Proprietăți mecanice</b>	Slabe; se îmbunătățesc cu adaosuri	Medii (oarecum fragilă)	Foarte bune	Bune, dependente de execuție
<b>Modul de execuție al carcusei</b>	Prin turnare în matrice	Prin turnare în matrice	Tăiere (ștanțare) și asamblare	Înfășurare pe șablon și impregnare
<b>Domeniul de utilizare</b>	Toate tipurile de bobine și carcuse; mult folosit în JF și IF	Numai pentru bobine de JF;	Pentru bobine de JF, la unicate sau serii mici	Puțin folosit, pentru carcuse cu forme simple
<b>Aspect, observații</b>	Aspect translucid sau colorat dacă are adaosuri	Culoare neagră, verde închis sau maro închis	Se folosește pertinax, textolitul mai rar steclotextolitul	Se impregnează cu lacuri bachelitice

*Materialele ceramice* au cele mai bune performanțe deoarece până la *frecvențe foarte ridicate* au pierderi dielectrice extrem de mici și oferă o bună rigiditate mecanică. De asemenea, au un coeficient de dilatare termică scăzut, sunt stabile la acțiunea umidității și a variațiilor de temperatură, păstrându-și proprietățile în timp. Au însă dezavantajul că sunt casante.

În ultimul timp se utilizează și *alumiul* pentru confecționarea carcuselor de bobine. În acest caz carcasa se oxidează la suprafață, stratul subțire superficial de oxid de aluminiu fiind un bun izolator electric.

## 9.2.2. Materiale conductoare pentru bobinaj

Materialele folosite pentru bobinaje se caracterizează prin: *conductivitate electrică ridicată, rezistență mecanică suficientă și rezistență la coroziune chimică.*

Cel mai folosit material în calitate de conductor este *cuprul*, care, datorită conductivității electrice mari determină pierderi reduse și implicit factori de calitate ridicați pentru bobine și proprietăți tehnologice de prelucrare foarte bune.

În general, se utilizează *conductoare cu secțiune circulară* cu diametre standardizate și acoperite cu un strat electroizolant.

**Tabelul 9-2 Caracteristicile conductoarelor de bobinaj Cu + Em**

Diametrul firului, $d$ (mm) (fără izol.)	Diametrul firului cu izolație, $d_{iz}$ (mm) (cu izol.)	Rezistivi- tatea, $\rho_{25}$ ( $\Omega/m$ )	Masa, $m$ (g/m)	Secțiunea, $S$ ( $g/m^2$ )	Densitatea de curent, $J$ (A/mm <sup>2</sup> )					Nr. Spire/cm	Nr. spire/cm <sup>2</sup>	
					$J = 2$	$J = 25$	$J = 3$	$J = 35$	$J = 4$		Fără izol. între straturi Cu	izol. între straturi
0,05	0,068	8,85	0,019	0,00196	3,9	4,9	5,9	6,9	8	147	16150	13250
0,07	0,092	4,52	0,036	0,00385	7,7	9,6	11,5	13,5	15,4	106	9700	8330
0,1	0,123	2,21	0,073	0,00785	15,7	19,7	23,6	27,5	31	80	6100	4470
0,12	0,149	1,537	0,105	0,01131	226	273	34	39,6	45,3	66	4210	3190
0,15	0,18	0,983	0,126	0,01767	35,3	44,2	53	61,8	70,7	55	2880	2260
0,18	0,21	0,682	0,222	0,02545	51	63,7	76,5	89,3	102	47,5	2050	1730
0,2	0,231	0,552	0,287	0,03142	62,9	78,6	94,3	110	126	43,4	1715	1465
0,22	0,255	0,457	0,347	0,03801	76	95	114	135	152	39,2	1460	1210
0,25	0,285	0,354	0,447	0,0490	98	123	147	172	196	35	1140	978
0,28	0,317	0,282	0,559	0,06158	122	154	185	216	246	31,5	925	813
0,3	0,337	0,245	0,741	0,07069	141	177	212	248	283	29,6	807	722
0,35	0,394	0,1806	0,873	0,09621	192	240	289	334	385	25,3	594	530
0,4	0,444	0,1383	1,14	0,1257	252	315	378	441	504	22,5	470	350
0,45	0,501	0,1092	1,45	0,159	318	393	477	556	636	19,9	371	277
0,5	0,551	0,0885	1,78	0,1964	392	490	590	686	788	18,1	300	224
0,55	0,639	0,0731	2,56	0,2376	475	594	713	831	952	16,4	250	190
0,6	0,659	0,0615	2,96	0,2827	566	707	848	990	1136	15,1	209	162
0,65	0,709	0,0524	2,99	0,3312	662	838	993	1160	1328	14,1	180	142
0,7	0,759	0,0452	3,48	0,3848	770	960	1150	1350	1540	13,1	153	125
0,8	0,872	0,0346	4,54	0,5027	1000	1256	1510	1760	2012	11,4	127	92,5
0,9	0,972	0,0276	5,73	0,6362	1270	1590	1910	2220	2540	12,2	93	78
1	1,087	0,0221	7,08	0,7854	1570	1960	2360	2750	3145	9,3	75	65
1,2	1,291	0,0153	10,19	1,131	2260	2739	3400	3960	4530	7,7	52	40,5
1,5	1,595	0,00984	15,87	1,767	3530	4428	5300	6180	7070	6,2	33,5	26,5
2	2,1	0,00556	28,2	3,142	6290	7850	9430	11000	12560	4,75	19	15,5

Pentru instalațiile de mare putere, la care înfășurările bobinelor sunt parcurse de curenți foarte mari, se utilizează *conductoare cu secțiune dreptunghiulară* sau chiar *tubulare* (care se răcesc cu apă în timpul funcționării).

Conductoarele din *aluminu* se folosesc pentru bobinele instalațiilor de putere.

În funcție de domeniile de utilizare se folosesc diferite tipuri de conductoare.

### **Pentru frecvențe audio**

În domeniul frecvențelor audio conductoarele sunt *izolate cu email* (lacuri din polivinilacetat, poliuretanic, epoxidice sau silicoorganice), cu *email și fibre textile* (email cu unul sau două straturi de mătase, email cu mătase) sau cu fibre anorganice (sticlă). Din punctul de vedere al rezistenței la temperaturi înalte, emailurile din polivinilacetat au cea mai scurtă durată de viață la temperaturi mari, fiind urmate în ordine de emailurile pe bază de rășini poliuretanic, epoxidice, silicoorganice. Emailurile poliuretanic sunt preferate la producția de mare serie, deoarece având un punct de topire scăzut nu mai implică dezizolarea anticipată a terminalelor în operațiile de lipire cu aliaje pe bază de staniu. Temperaturile de lucru limită sunt de circa 80°C pentru fibrele textile neimpregnate, 100...150°C pentru izolație de email și peste 150°C pentru izolație din fibră de sticlă.

### **Pentru frecvențe înalte (frecvențe radio)**

În domeniul frecvențelor înalte se folosesc *conductoare lițate* (liță RF), constituite din 7...15 conductoare de diametru foarte mic, fiecare fibră fiind izolată individual, iar ansamblul izolat cu bumbac sau mătase. Lița are rezistență scăzută în curent alternativ, datorită micșorării efectului pelicular, ceea ce conduce la pierderi mici în conductorul luat în ansamblu. Conductorul lițat se poate folosi până la frecvențe de 1...3 MHz.

### **Pentru frecvențe foarte înalte**

În acest caz se folosesc *conductoare din cupru argintate*, deoarece, datorită efectului pelicular, curentul circulă practic numai prin stratul de la suprafață, care trebuie să aibă conductibilitatea electrică foarte ridicată. În acest domeniu, conductorul se folosește fie izolat, pentru bobinaje cu pas mai mare decât diametrul conductorului, fie cu izolație email-mătase când bobinajul este de tipul „spiră lângă spiră”.

## **9.2.3. Tipuri de bobinaje**

Bobinajele utilizate în electronică se pot realiza într-un *singur strat* sau în mai multe *straturi (multistrat)*.

La rândul lor bobinajele într-un singur strat pot fi *cilindrice, toroidale sau dublu D* (Figura 9-4), iar cele multistrat pot fi *spiră lângă spiră, piramidale sau bobinaje „fagure”*. Toate aceste bobinaje se execută pe carcase cilindrice, dar în unele cazuri se fabrică și bobinaje *toroidale multistrat*, la care se aplică izolație între straturi pentru a evita alunecarea straturilor.

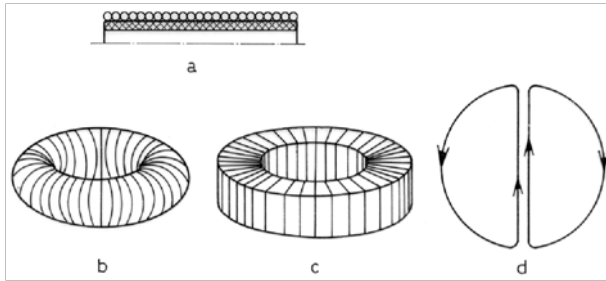


Figura 9-4 Tipuri de bobinaje realizate într-un singur strat: a) cilindric; b) toroidal cu secțiune circulară; c) toroidal cu secțiune dreptunghiulară; d) în dublu D.

### Bobinaje cilindrice într-un singur strat

Bobinajele cilindrice se execută atât *pe carcasa* cât și *fără carcasa* (pentru frecvențe foarte înalte). În cele mai multe cazuri, bobinajul cilindric pe carcasă se execută în exteriorul carcasei. La bobinele cărora li se impune condiția de stabilitate ridicată a inductivității la variațiile de temperatură, înfășurarea se execută cu conductorul parțial îngropat în scutul elicoidal practicat pe suprafața carcasei. Înfășurarea conductorului se face la cald, așa încât după răcire conductorul va adera la carcasă și nu-și va mai modifica dimensiunile la variația temperaturii mediului ambiant.

Bobinajele cilindrice se execută din conductor, de obicei, izolat simplu cu email sau, în cazul în care spirele sunt puține și rare, se poate folosi și conductor neizolat.

Acest tip de bobinaj este caracterizat printr-o rezistență mică în curent continuu, pentru aceeași inductivitate, precum și prin capacități parazite mici.

În cazul bobinajului cilindric simplu strat nu se pot obține inductivități mari din cauza numărului mic de spire. Câmpul magnetic perturbator creat în exterior este mare, ceea ce conduce nu numai la o eventuală perturbare a funcționării celorlalte elemente din circuit, ci și la o posibilă modificare a inductivității proprii, sub influența maselor metalice din vecinătate.

### Bobinajul toroidal

Bobinajele toroidale executate dintr-un singur strat se caracterizează printr-o valoare scăzută a câmpului magnetic de dispersie, care prezintă o rezistență de curent continuu mai mare decât a bobinei cilindrice pentru o aceeași conductivitate sau secțiune dreptunghiulară.

### Bobine în simplu strat, în dublu D

Acest tip de bobină (Figura 9-4, d) se caracterizează printr-un câmp magnetic extern relativ redus și o rezistență de curent continuu scăzută.

În plus, prezintă avantajul că reglarea se face relativ ușor, pentru că bobinele individuale sunt bobinate, impregnate și asamblate înaintea reglării finale.

### Bobinajele multistrat spiră după spiră

Bobinajele din această categorie prezintă o capacitate distribuită mare și un pericol sporit de străpungere a izolației, în special la spirele care vin în contact la extremitățile straturilor, unde și diferențele de potențial sunt mai mari. Pentru



micșorarea pericolului de străpungere se pot folosi straturi intermediare de izolație, chiar dacă în acest fel se micșorează coeficientul de umplere.

Pe carcasa fără flanșe bobinajul cilindric multistrat se execută micșorând mereu cu câte o unitate numărul de spire pe strat (Figura 9-5, b și Figura 9-5, c).

### Bobinajele piramidal și cilindric secționat

Pentru micșorarea capacității parazite și evitarea străpungerilor, se realizează bobinaje la care spirele între care există diferențe mari de potențial sunt depărtate. Aceasta se poate realiza fie prin bobinaj *piramidal* (Figura 9-5, c), fie prin *bobinaj cilindric secționat cu flanșe intermediare* (Figura 9-5, d).

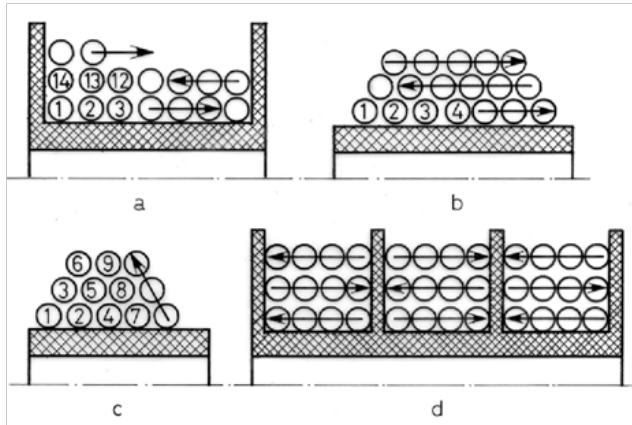


Figura 9-5 Tipuri de bobinaje multistrat: a) cilindric cu flanșe; b) cilindric; c) piramidal; d) cilindric secționat cu flanșe intermediare.

Bobinajul piramidal este recomandat în special pentru obținerea inductanțelor mari care lucrează la tensiuni ridicate (transformatoare de impulsuri). La bobinajul cilindric secționat, fiecare secțiune având puține spire, are și o capacitate proprie mică, iar capacitățile secțiunilor sunt legate în serie. Cu toate acestea nu se folosesc mai mult de 3 sau 4 secțiuni.'

### Bobinaje „fagure”

Bobinajul tip fagure permite reducerea capacității proprii și scade probabilitatea de străpungere. În timpul bobinării se imprimă carcasa o mișcare de translație în lungul axei sale, sincronizată cu mișcarea sa de rotație, astfel încât conductorul se bobinează înclinat în raport cu suprafața de rotație a înfășurării. Astfel, spirele între care există diferențe mari de potențial sunt depărtate și neparalele. Bobinajul „fagure” poate fi „fagure propriu-zis”, când spirele sunt distanțate între ele sau „universal”, când spirele sunt nedistanțate.

Bobinajul „fagure” are capacități proprii reduse și o rigiditate mecanică bună, bobinele astfel realizate menținându-și forma și fără a fi impregnate. De asemenea, bobinajele „fagure” pot fi executate și pe secțiuni, pe carcase tubulare cu flanșe intermediare, bobinele putând fi conectate atât în serie, cât și în paralel.

Trebuie remarcat faptul că bobinajele multistrat se pot realiza și *fără carcasă*, atunci când bobina trebuie să aibă un anumit profil sau când pierderile în

carcasă aduc inconveniente. Rigiditatea mecanică se realizează în acest caz prin legarea fiecărui strat sau a unui grup de straturi cu fâșii de pânză și prin impregnarea ulterioară a ansamblului.

### 9.2.4. Impregnarea bobinajelor

Procesul tehnologic de fabricație al oricărei bobine se încheie cu impregnarea acesteia, care asigură obținerea unei robusteți mecanice pe de o parte, iar pe de altă parte, obținerea unei protecții deosebite împotriva umidității. Avantajele impregnării sunt următoarele:

- rigidizează înfășurările;
- îmbunătățește disiparea căldurii, lacul utilizat pentru impregnare prezentând o conductibilitate termică mai bună decât aerul sau izolația de hârtie;
- îmbunătățește proprietățile electrice ale izolației, în special rigiditatea dielectrică, anulând efectul microfisurilor din email;
- evită pătrunderea umezelii din atmosferă în golurile izolației.

Câteva lacuri de impregnare împreună cu caracteristicile lor sunt prezentate în Tabelul 9-3.

**Tabelul 9-3 Materiale pentru carcasa bobinelor de joasă frecvență**

<i>Tipul lacului</i>	<i>Bază</i>	<i>Solvent</i>	<i>Caracteristici</i>	<i>Modul de întărire</i>	<i>Domeniile de utilizare</i>
<b>De șelac</b>	Șelac	Alcool	Proprietăți electrice satisfăcătoare	evaporare	Impregnarea bobinelor pentru rețea și AF
<b>Oleobituminoase</b>	Uleiuri sicative; bitumuri	White spirt; solvent nafta	Nehigroscopice; proprietăți electrice bune; se dizolvă în uleiuri minerale	evaporare și reacție chimică	Impregnarea bobinelor pentru rețea, care lucrează în atmosferă umedă
<b>Celulozice</b>	Benzil celuloză; acetil celuloză	Esteri sau cetone	Proprietăți electrice bune	evaporare	Acoperirea înfășurărilor la exterior; rol estetic
<b>Bachelitice sau oleobachelitice</b>	Bachelită A (ulei sicativ)	Alcool, white spirt, xilen	Proprietăți electrice bune; rezistă la uleiuri și la umezeală	reacție chimică	Impregnarea bobinelor pentru rețea, foarte rar pentru AF
<b>Epoxidice</b>	Rășină epoxidică și întăritor	Fără solvent	Proprietăți electrice foarte bune; contracție redusă la întărire; adezivitate mare	reacție chimică	Impregnarea înfășurărilor pentru condiții de lucru grele (tensiuni mari, temperaturi mari, umezeală)
<b>Poliesterice</b>	Poliesteri nesaturăți cu catalizatori pentru întărirea	Fără solvent	Proprietăți electrice f. bune în JF și IF până la 80...90 °C; impregnează bine	reacție chimică	Mult folosit la impregnarea bobinelor pentru rețea, AF și chiar frecvențe ridicate
<b>Siliconice</b>	Rășini siliconice	Xilen	Proprietăți electrice foarte bune până la 200 °C, în medii umede	evaporare	Impregnarea înfășurărilor mașinilor cu regim termic foarte greu

Calitatea operației de impregnare este influențată în mare măsură de respectarea următoarelor cerințe:

- fluiditatea lacului să fie suficient de mare pentru a putea pătrunde și ocupa toate interstițiile bobinajului (fluiditatea este influențată de cantitatea de solvent care nu trebuie să depășească 50...60%);
- rășinile folosite trebuie să aibă molecule mici, sferice;
- nu se pot folosi lacuri cu uscarea numai prin evaporarea solventului, deoarece contracția la uscarea ar fi prea mare; este indicat să se folosească lacuri cu întărire atât prin evaporare, cât și prin reacții chimice sau lacuri fără solvent;
- viteza de întărire trebuie reglată cu atenție (prin reglarea temperaturii), în caz contrar se produce întărirea numai la suprafață, iar solventul din interior nu se mai poate evapora;
- lacul și solventul să nu reacționeze chimic (să nu atace) emailul conductoarelor.

## 9.2.5. Tehnologii de realizare a înfășurărilor

### Bobine fixe

Bobinele se execută cu mașini automate, construite special pentru tipul de bobinaj impus. Operațiile de impregnare se realizează manual.

Astfel, pentru transformatoarele de semnal (intrare, ieșire, cuplaj), la care caracteristica de frecvență este foarte importantă, trebuie micșorat fluxul de dispersie, deci inductanța de scăpări. Pentru aceasta una din bobine se secționează și între cele două secțiuni se introduce cea de-a doua bobină.

Când cerințele tehnice nu sunt prea severe și nu se impun restricții asupra scăpărilor de flux magnetic (de exemplu, pentru transformatoare de alimentare) dispunerea înfășurărilor se face din considerente economice. Astfel, conductorul mai scump se înfășoară imediat lângă carcasa, obținându-se în acest fel numărul necesar de spire cu o cantitate mai mică de conductor. Dacă transformatoarele sunt de mare putere și condițiile de răcire sunt severe, se renunță la criteriul economic și se bobinează la exterior înfășurarea de diametru minim, care disipă cea mai mare cantitate de căldură.

### Bobine cu inductivitate variabilă

Bobinele cu inductivitate variabilă continuu în limite largi, *variometrele*, se realizează după unul din următoarele principii:

- prin varierea numărului de spire;
- prin modificarea cuplajului (inductanței mutuale  $M$ ) între două secțiuni ale bobinei;
- prin modificarea poziției unui miez magnetic (ferovariometru).

*Variometrele de joasă frecvență* se realizează, de regulă, prin ultimul procedeu. Un miez din tole comandat de un sistem mecanic, de exemplu cu șurub melcat, poate fi scos sau introdus în bobină.

*În înaltă frecvență* se folosesc toate cele trei soluții. La bobinele pentru puteri mari modificarea continuă a numărului de spire se obține cu un contact glisant pe conductorul bobinei, care este rotită cu un sistem mecanic potrivit.

O altă metodă constă în secționarea inductanței în două bobine cuplate mutual. Sistemul este utilizat la *bobinele de putere*.

Variometrele de mică putere se bazează, în general, pe principiul modificării poziției unui miez magnetic în interiorul unei bobine. Prin introducerea sau scoaterea miezului de ferită din bobină, inductivitatea variază aproximativ între limitele  $L_0$  și  $\mu_{ef}L_0$ . Deplasarea relativă a miezului se poate realiza în mai multe moduri: axial (translație), unghiular (rotație), prin deplasarea bobinei etc.

Variometrele de acest tip se utilizează, în special, la radioreceptoare, aparate electronice etc.

## 9.2.6. Miezuri magnetice pentru bobine

### **Materiale magnetice utilizate la fabricarea miezurilor**

Pentru obținerea inductivităților de valori mari, se utilizează bobine cu miez magnetic. Miezul magnetic împreună cu eventualele întrefieruri (întreruperi longitudinale ale miezului) formează un circuit magnetic care are calitatea de a concentra aproape integral liniile câmpului magnetic.

Bobinele utilizate în echipamentele electronice (transformatoare și șocuri de alimentare, transformatoare de semnal, șocuri de radio frecvență, bobinele circuitelor selective, bobinele din filtrele electrice, inductanțele de cuplaj etc.) au miezurile realizate din materiale feromagnetice moi.

*Materialele feromagnetice moi* se folosesc sub formă de *lamine* (pentru miezuri din tole sau benzi) sau sub formă de *pulbere* pentru realizarea materialelor *magnetodielectrice*, pentru miezuri feromagnetice presate.

Cele mai utilizate materiale feromagnetice moi și caracteristicile lor sunt prezentate în Tabelul 9-4.

*Materialele magnetodielectrice* sunt materiale obținute din pulbere feromagnetică (granulele fiind fiecare în parte, izolate din punct de vedere electric, printr-o oxidare superficială obținută prin tratament termic) amestecată cu un liant polimerizant. Amestecul cu concentrația bine determinată este presat sub forma dorită. Astfel, se obțin miezuri care prezintă o rezistivitate de volum foarte mare (atât datorită peliculei de oxid de pe fiecare granulă în parte, cât și izolării realizate prin intermediul liantului dielectric). Prin urmare, pierderile prin curenți turbionari sunt mult micșorate, miezul astfel obținut putând fi utilizat la frecvențe foarte înalte. Pe de altă parte, materialul dielectric micșorează permeabilitatea relativă efectivă a magnetodielectricilor până la valori de ordinul sutelor, zecilor sau chiar unităților.

După natura liantului și a tratamentul termic aplicat, materialele magnetodielectrice pot dobândi proprietăți magnetice și mecanice deosebite. Se disting magnetodielectrici *feroplastici* și *feroelastici*.

*Magnetodielectricii feroplastici* nu au elasticitate, au permeabilitatea efectivă de ordinul 10...100 și se utilizează pentru miezuri de bobine și transformatoare de înaltă frecvență (IF).

*Magnetodielectricii feroelastici* prezintă elasticitate mecanică, dar au permeabilități efective reduse (2...10); se folosesc pentru ecrane magnetice, miezuri în bobinele de pupinizare la cablurile de telecomunicații de mare capacitate, absorbantți în microunde.

O categorie specială o constituie *magnetodielectricii cu pulbere ferimagnetică din magnetit* ( $\text{FeOFe}_2\text{O}_3$ ), care se pot folosi până la frecvențe de zeci de megahertzi.

La frecvențe foarte înalte, materialele magnetodielectrice încep să aibă pierderi importante, rezistivitatea prezentată de liantul dielectric nemaifiind suficientă pentru micșorarea curenților Foucault, iar pierderile în dielectric începând să conteze mai mult în pierderile globale. Pentru acest domeniu de frecvență se folosesc *materialele metaloceramice* (sau *feritele*).

**Tabelul 9-4 Materiale feromagnetice moi**

Materialul	$\mu_{r1}$	$\mu_{rmax}$	$H_c$ (A/m)	$B$ (T)	Domeniul frecvențelor de lucru	Domeniul de utilizare	Observații
Aliaje Fe-Si (oțeluri electrotehnice)	400...500	1000...2000	40...80	1,5...1,8	(funcție de grosimea tolelor)	-tole pentru transformatoare și șocuri de alimentare	
Laminate la cald	500...800	20000...30000	8...24	1,5...1,6	AF	-tole sau benzi pentru transformatoare de semnal	Prezintă anizotropie magnetică longitudinală pe direcția de laminare
Aliaje Fe-Si-Al (alsifer)	18000	84000	3,2	0,7	sute kHz	-ecrane magnetice (prin turnare) -pulbere pentru magnetodielectrici	Conținutul de siliciu îi scade mult inducția maximă $B_m$ și îl face foarte fragil. Nu poate fi prelucrat sub grosimi de 2 mm.
Aliaje Fe-Ni (permaloy)	10000	10000	4	1,07	MHz	-benzi pentru miezuri la transformatoarele de impulsuri -permaloy cu CHD pentru amplificatoare magnetice	la Poate fi laminat în folii foarte subțiri Proprietăți mult influențate de tratamentul termic aplicat
Fe-Ni-Cu (fizoperm)	60	70	-	1,6	sute kHz	-pulbere pentru magnetodielectrici	Termomagnetic
Fe-Ni+Cr sau Si	20000	100000	0,24	0,8	sute kHz	-miezuri pt. bobine cu inductanță constantă cu $H$	
Aliaje Fe-Co (permendur)	800	5000		2,4	AF	-miezuri pentru electromagneți -membrane telefonice (aliaje Fe-Co tratat termic)	Dure și casante Cu adaos de vanadiu se poate lamina
Fe-Co-Ni (ferminvar)		150000	5	1,56	1 MHz	-transformatoare cu distorsiuni neglijabile -bobine de pupinizare pentru cabluri de telecomunicații	$H = \text{constant}$ Nestabile magnetic

Tehnologia de fabricație a feritelor este similară cu tehnologia de obținere a magnetodielectricilor, liantul folosit fiind parafina (care după presarea miezului se îndepărtează prin încălzire).

Sinterizarea pieselor (tratamentul termic ce se aplică după presarea miezurilor) reprezintă operația cea mai importantă și este cea care conferă structura de soluție solidă.

Miezurile din ferite au proprietăți magnetice bune și rezistivitate electrică mare, din punctul de vedere al conducției curentului electric feritele fiind semiconductoare.

Rezistivitatea foarte mare ( $10^2 \dots 10^6 \Omega \text{cm}$ ) conduce la pierderi prin curenți turbionari foarte mici, limitarea frecvenței de lucru fiind impusă numai de rezonanța magnetică. De asemenea, caracteristicile magnetice ale feritelor sunt foarte stabile la solicitări mecanice.

Dezavantajele prezentate de ferite sunt în special de natură fizică (sunt dure și casante, greu de prelucrat după sinterizare). Se mai pot menționa permeabilitatea inițială și inductanța maximă mai mici decât cele ale feromagneticelelor, precum și variația caracteristicilor magnetice cu temperatura. Temperatura Curie este de  $60 \dots 450 \text{ }^\circ\text{C}$ , în funcție de tipul feritei.

### Tipuri constructive pentru miezuri

Proprietățile fizice ale materialelor magnetice (maleabilitatea, rezistența mecanică la compresiune sau șocuri mecanice) impun și formele corespunzătoare pentru miezuri.

Miezurile din materiale feromagnetice moi, utilizate la transformatoarele de joasă frecvență (alimentare, AF), la șocuri AF, la amplificatoare magnetice sau chiar la unele transformatoare de impulsuri, se execută din *pachete de tole* sau *benzi*.

#### Miezuri din pachete de tole

*Tolele* sunt plăci subțiri, izolate între ele, care au avantajul de a reduce pierderile în miez, curenții turbionari ce se închid prin plăcuța subțire având valori mici. Se realizează astfel un circuit magnetic, prin care fluxul magnetic corespunde secțiunii circuitului compact, dar pe ansamblu are rezistivitate electrică foarte mare datorită micșorării curenților turbionari, care se închid prin fiecare tola subțire.

Tolele se *confeccionează prin ștanțare* după care sunt debavurate prin vâlțuire și apoi supuse unui tratament termic prin care se reface structura cristalină a materialului, distrusă parțial din cauza tensiunilor mecanice de la ștanțare și vâlțuire.

În Tabelul 9-5 sunt prezentate caracteristicile unor tole din tablă silicioasă ștanțată fără deșeuri.

*Tratamentul termic* poate fi făcut în cuptoare cu acces limitat al aerului, realizându-se totodată și o peliculă izolatoare din oxizi metalici prin reacția chimică a aerului cu materialul tolei, sau în cuptoare speciale cu o atmosferă de hidrogen sau vid, caz în care impuritățile din materialul magnetic sunt eliminate sub formă de gaze. Recoacerea în atmosferă de hidrogen sau în vid necesită o operație ulterioară de izolare a tolelor.

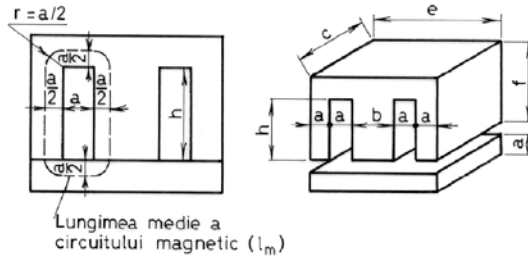
*Izolarea tolelor* se poate face prin trei metode:

- acoperirea cu lacuri izolante, metodă neeficientă, deoarece lacul se poate distruge la anumite tensiuni de comprimare;
- izolarea cu foiță izolantă între tole, ceea ce conduce la micșorarea coeficientului de umplere al volumului și la pierderi datorită fluxului de scăpări;

- fosfatarea tolelor prin acoperire cu o pastă de fosfat și azotat de zinc și coacerea la cca. 100°C, timp de 10...12 ore. Pelicula obținută are proprietăți mecanice și dielectrice foarte bune, iar costul este de cca. 4 ori mai mic decât la acoperirile cu lac.

**Tabелul 9-5 Caracteristicile tablei silicioase stanțate fără deșeuri**

Tipul tolei	a (cm)	b=2a (cm)	h=3a (cm)	e=6a (cm)	f=4a (cm)	$l_m=8a + \pi a$ (cm)	ah (cm <sup>2</sup> )	pentru c/b=1,5		Masa totală E (g)		Masa totală I (g)	
								$S_m$ (cm <sup>2</sup> )	$V_m$ (cm <sup>3</sup> )	0,35 (mm)	0,5 (mm)	0,35 (mm)	0,5 (mm)
E4	0.40	0.8	1.2	2.4	1.6	4.5	0.48	0.96	4.6	0.78	1.126	0.256	0.37
E5	0.50	1.0	1.5	3.0	2.0	5.6	0.75	1.5	9.0	1.2	1.76	0.4	0.58
E6,4	0.64	1.28	1.92	3.84	2.56	7.13	1.23	2.46	18.9	2.07	3.04	0.66	0.95
E8	0.80	1.6	2.4	4.8	3.2	8.9	1.92	3.74	36.8	3.08	4.53	1.03	1.48
E10	1.0	2.0	3.0	5.6	4.0	11.15	3.00	6	72	4.95	7.1	1.63	2.31
E12,5	1.25	2.5	3.75	7.5	5.0	13.96	4.70	9.38	141	7.28	10.7	2.53	3.61
E14	1.40	2.8	4.2	8.4	5.6	15.6	5.90	11.8	198	9.40	13	3.17	4.53
E16	1.60	3.2	4.8	9.5	6.4	17.8	7.70	15.4	2.95	12.4	18	4.14	5.91
E18	1.80	3.6	5.4	10.8	7.2	20	9.72	19.4	420	15.6	23	5.24	7.48
E20	2.00	4.0	6.0	12	8.0	22.3	12.0	24	573	24.3	28.3	6.47	9.24
E25	2.50	5.0	7.5	15	10	27.9	18.8	37.5	1125	30	44	10.1	14.54
E32	3.20	6.4	9.6	19.2	12.8	35.7	30.75	61.5	2360	50	73	16.6	23.7



După formă, tolele pot fi de tip U, E și I, împachetarea lor făcându-se în manta (din tole E și I) sau cu coloane (din tole U și I sau I), așa cum se prezintă în Figura 9-6.

Miezurile în manta se pot împacheta pe o singură parte (pentru întrefier fix sau reglabil) sau prin între țesere (împachetarea fără întrefier). Bobina se plasează pe coloana din mijloc, lungimea l a circuitului magnetic și secțiunea A a miezului magnetic fiind indicate în Figura 9-6.

Miezurile cu coloane se realizează din tole U și I (pentru miezuri cu întrefier reglabil - împachetarea pe o parte, pentru miezuri fără întrefier - împachetarea întrețesută) sau din tole I (numai cu împachetare întrețesută). Bobina se plasează pe una dintre coloane sau se secționează, împărțindu-se pe ambele coloane. La transformatoare, pe cele două coloane se plasează separat înfășurările primară respectiv secundară.

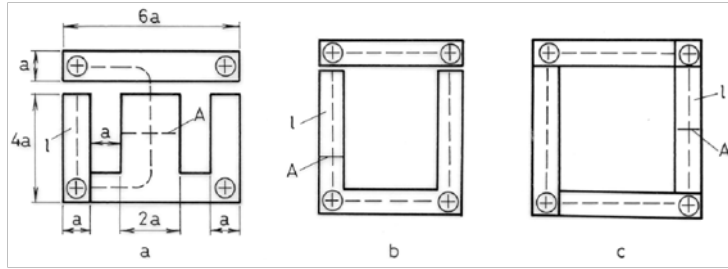


Figura 9-6 Tipuri de tole: a) E + I; b) U + I; c) I; l-lungimea circuitului magnetic; A-secțiunea miezului magnetic.

Cu excepția miezurilor din tole  $l$ , miezurile din tole nu permit folosirea integrală a proprietăților de anizotropie magnetică ale materialului magnetic.

La asamblarea pachetului de tole, datorită tensiunii de comprimare, se pot schimba caracteristicile materialului, conducând atât la scăderea rezistenței izolației și a permeabilității materialului magnetic, cât și la creșterea pierderilor prin curenți turbionari. De asemenea, o dată cu creșterea frecvenței de lucru scade efortul de comprimare permis la asamblare. Prin încercări, pentru fiecare tip de material feromagnetic se poate determina o dependență a pierderilor globale în miez în funcție de efortul de comprimare al pachetului de tole, iar pentru dependența obișnuită se poate aprecia tensiunea optimă de comprimare.

### Miezurile din benzi

Miezurile din benzi se realizează folosind bandă de material feromagnetic moale, tăiat în lungul direcției cu cea mai ușoară magnetizare, așa încât proprietățile anizotropice ale materialului să poată fi utilizate integral.

Prelucrarea materialului pentru realizarea benzilor este similară prelucrării tolelor. Materialul se taie în sensul de laminare, iar după tăiere, benzile se debavurează și se tratează termic pentru refacerea structurii cristaline.

Izolarea benzilor nu se poate face prin lăcuire sau fosfatare, deoarece la îndoirea acestora pentru obținerea formei de miez dorite, pelicula izolatoare se crapă. Izolarea cu hârtie conduce la micșorarea coeficientului de umplere.

Un procedeu modern de izolare pentru benzile din oțel electrotehnic texturat constă din depunerea unei pelicule din pulbere fină izolantă, foarte adezivă, în câmp electrostatic. Procesul are loc în zona descărcării Corona, la 3..4 kV/cm.

Izolarea benzilor din aliaje speciale (Fe-Ni; Fe-Co; Fe-Co-Ni) este mai dificilă deoarece stratul izolant nu trebuie să interacționeze cu materialul magnetic. Izolarea se face prin electroforeză, substanța izolantă în formă de suspensie fiind transportată pe suprafața benzii sub acțiunea câmpului electric. Se fac depuneri cu suspensii de magneziu (prin anafereză) sau suspensii de siliciu (prin cataforeză).

Tehnologia realizării miezului din benzi constă în obținerea de miezuri închise, după care bobinajul trebuie executat fie direct pe miezul închis (fără carcasă), fie separat. În cel de-al doilea caz, după introducerea carcasi bobinate, se unesc cele două jumătăți și se fixează. În planul de secționare apare un întrefier cu dielectric, chiar dacă acest lucru nu este neapărat necesar.



Constructiv, miezurile în benzi pot fi *cu coloane*, *în manta* (prin asamblarea a două miezuri cu coloane) sau *toroidale*.

*Miezurile cu coloane* se realizează prin suprapunerea de benzi din ce în ce mai scurte și îndoirea după un profil *U*, exercitându-se simultan forțe de apăsare de sens contrar asupra centrului pachetului și asupra extremităților sale.

*Miezul toroidal* se realizează dintr-o singură bandă înfășurată în spirală.

Avantajele miezurilor din bandă constau în utilizarea integrală a proprietăților anizotropice ale materialului și micșorarea fluxului de scăpări. Prin aceasta se obține lărgirea benzii de frecvență de lucru și eliminarea ecranelor magnetice.

### Miezuri presate

Pentru bobinele ce lucrează în înaltă frecvență nu se mai folosesc miezuri din tole sau benzi, din cauza creșterii cu frecvența a pierderilor prin curenți Foucault. Din acest motiv în domeniul frecvențelor înalte se folosesc *miezuri presate*.

După *tipul de material magnetic* folosit, miezurile de înaltă frecvență pot fi *magnetodielectrice* (când pulberea este obținută din material feromagnetic) sau *magnetoceramice* (ferite).

Operațiile tehnologice de obținere a miezurilor de înaltă frecvență sunt laborioase și trebuie executate foarte îngrijit. Performanțele miezurilor magnetice obținute prin această tehnologie, apreciate prin proprietățile mecanice și magnetice, sunt influențate de următorii parametri:

- compoziția chimică a amestecului;
- metoda tehnologică de formare (presare, extrudare etc.);
- temperatura și durata procesului de sinterizare.

*Formele constructive* cele mai utilizate pentru miezurile presate (ferite și materiale magnetodielectrice) sunt *în manta* sau *cu coloane* (pentru transformatoarele de impulsuri de adaptare în RF) sau *miezuri cilindrice*, *miezuri oală și toruri* (în FFI, în circuite de comutație). *Miezurile cilindrice* pot fi *pline* sau *tubulare* (cu perete gros sau subțire). Pentru circuite de deflexie magnetică se utilizează și formele speciale, numite *juguri de ferită*.

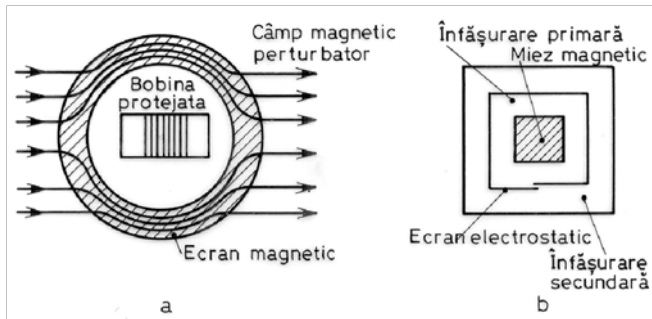
Forma miezului plin se obține încă de la presarea materialului, rectificările ulterioare pot fi executate numai cu pietre abrazive din carborund, scule diamantate sau prin procedee neconvenționale (cu ultrasunete sau electroeroziune).

## 9.3. Ecranarea bobinelor

Împotriva acțiunii perturbatoare a câmpurilor magnetice exterioare, bobinele se protejează prin închidere în ecrane magnetice (Figura 9-7, a). Pentru câmpuri magnetice perturbatoare de frecvență joasă ecranele se realizează din materiale feromagnetice de înaltă permeabilitate care deviază liniile de câmp magnetic protejând astfel bobina.

În acest scop se utilizează ecrane de permaloy, alsifer etc., cu grosimea de 1 mm, așezate cât mai distanțat de bobina protejată și fără să fie în contact

magnetic cu miezul acestei bobine (ecranarea este cu atât mai puternică cu cât distanța între miezul bobinei și ecran este mai mare, însă aceasta conduce la creșterea dimensiunilor ecranului). Prin creșterea frecvenței câmpurilor perturbatoare proprietatea de ecranare scade pe măsura scăderii permeabilității materialului feromagnetic. La frecvențe ridicate este convenabilă realizarea ecranelor din materiale nemagnetice cu conductibilitate ridicată (cupru, aluminiu). Efectul de ecranare se bazează în acest caz pe scăderea intensității câmpului magnetic care pătrunde în ecran datorită curenților turbionari.



**Figura 9-7 Ecranarea bobinelor: a) ecran magnetic; b) ecran electrostatic între înfășurările primară și secundară ale unui transformator.**

Împotriva tensiunilor parazite transmise prin cuplaje capacitive, bobinele se protejează prin închiderea în ecrane electrostatice, realizate din materiale cu conductibilitate electrică ridicată (cupru, aluminiu) legate galvanic de un punct cu potențial nul (punct rece). Un exemplu de ecran electrostatic este folia conductoare care separă înfășurarea primară de înfășurarea secundară a transformatoarelor în scopul micșorării capacității parazite între cele două înfășurări (Figura 9-7, b). Pentru a se evita transformarea ecranului metallic într-o spiră în scurtcircuit, capetele ecranului trebuie izolate.

## 9.4. Fiabilitatea bobinelor

Bobinele sunt elemente cu siguranță în funcționare relativ scăzută, defecțiunile lor putând conduce și la defectarea altor piese cu care sunt conectate sau alături de care sunt montate. La rândul lor însă, defecțiunile bobinelor pot fi provocate de defectarea altor componente ale sistemului.

Fiabilitatea bobinelor este destul de diferită în funcție de tipul bobinei, domeniul de utilizare, condițiile de construcție, modul de întreținere și exploatare, dar, orientativ, rata de defectare poate fi considerată  $\lambda = 0,01/1000$  h.

*Cele mai frecvente defecțiuni sunt întreruperea conductorului sau scurtcircuitul între spire.*

Cauzele principale care conduc la apariția acestor defecțiuni sunt:

- tensiuni mari între spire sau între spire și miez, care pot produce străpungeri, direct sau indirect, prin ionizarea peliculei de aer în

jurul conductorului, antrenând încălzirea locală a izolației și apoi străpungerea;

- temperaturi înalte, ce conduc la străpungerea termică a izolației;
- temperaturi prea joase, care favorizează străpungerea, deoarece materialele de etanșare pot crăpa și astfel este posibilă pătrunderea umidității;
- umiditatea, care poate pătrunde în bobinele neimpregnate sau prost impregnate, conducând la scăderea rezistenței de izolație, sau chiar la distrugerea izolației și corodarea conductorului până la ruperea acestuia. Umiditatea poate provoca atât variația și instabilitatea parametrilor bobinei, cât și întreruperea conductorului.

*La bobinele cu miez din tole*, în cazul neasamblării corespunzătoare, pot apărea *defecte mecanice* (vibrația sau deplasarea tolelor), care, la rândul lor, pot antrena supraîncălzirea bobinei, cu toate consecințele temperaturilor prea ridicate.

*Pentru creșterea siguranței în funcționare a bobinelor* se pot lua măsuri încă din etapa de proiectare, alegând tipul de bobinaj și de izolație corespunzător frecvențelor și tensiunilor de lucru, tipul de conductor corespunzător puterilor dezvoltate în circuit, ecranarea și amplasarea corespunzătoare a bobinei. În procesul tehnologic, asamblarea bobinei trebuie să se facă îngrijit. Se recomandă, de asemenea, să se evite folosirea bobinelor neprotejate, mai cu seamă în medii cu umiditate sau atmosferă corosivă.

Bobinele din blocurile de alimentare (șocuri sau transformatoare) se impregnează (pentru puteri mari, chiar se etanșează în vid) și, pentru mărirea rezistenței mecanice, se amplasează pe șasiu în locurile cu rigiditate mecanică maximă.



## Cap.10. Alte componente pasive

### 10.1. Rezonatorul piezoelectric

Este o componentă cu rezonanță mecanică, echivalentă cu un circuit rezonant electronic. Prezintă o rezonanță serie și una paralel, cu factor de calitate foarte mare (de ordinul miilor). Mai are proprietatea unei stabilități foarte bune a frecvențelor de rezonanță. Este folosit ca dipol rezonant în oscilatoare care au nevoie de stabilitate bună a frecvenței (în circuitele de telecomunicații, în calculatoare, în microcalculatoarele cu scop industrial, în toate ceasurile digitale).

Prima variantă tehnologică a fost o lamă tăiată dintr-un cristal de cuarț, pe fețele căreia au fost depuse contacte metalice. Din acest motiv, mulți practicieni numesc „cuarț” orice rezonator piezoelectric. În prezent, se mai fabrică rezonatoare și din ceramice piezoelectrice, cu proprietăți similare cu ale cuarțului.

Circuitul electronic echivalent al cristalului și variația reactanței sale sunt prezentate în Figura 10-1. Capacitatea paralel corespunde - în mare măsură - capacității parazite a electrozilor metalici depuși pe suprafață. Celelalte elemente ale circuitului echivalent nu au un corespondent electric în rezonatorul fizic, ele sunt doar un model al comportării rezonante. Frecvențele de rezonanță sunt foarte apropiate între ele (sute de Hz). Principalii parametri ai dipolului rezonant sunt:

- Frecvența de rezonanță serie
- Distanța între frecvențele de rezonanță
- Stabilitatea frecvenței de rezonanță (dată în ppm/oră sau ppm/an).
- Dispersia frecvenței pentru un lot de cristale

Pentru multe produse de acest tip, abaterea relativă a frecvenței pe termen scurt sau lung nu depășește 1/100.000, motiv pentru care marcarea pe capsulă a frecvenței de 10 MHz poate apărea astfel: 10.000 MHz (a fost folosit punctul zecimal). Zerourile nesemnificative au drept scop indicarea erorii maxime admise (în acest exemplu, se subînțelege că frecvența nu va ieși din intervalul 9.9995 MHz - 10.0005 MHz).

În afară de utilizarea ca dipol rezonant, dispozitivele piezoelectrice se mai folosesc ca filtre „trece bandă”, având caracteristica amplificare-frecvență din Figura 10-2, a. Un circuit echivalent aproximativ al rezonatorului este cel din Figura 10-2, b, în care circuitele rezonante sunt acordate pe frecvența centrală a benzii de trecere. (În realitate, structura echivalentă este puțin mai complicată, întrucât trebuie să asigure și lățimea de bandă de trecere.) Aceste dispozitive sunt pasive, au trei terminale, volum foarte mic și o bună stabilitatea a proprietăților de filtrare. Sunt utilizate în circuitele de frecvență intermediară din radioreceptoare MF (10,7 MHz), din canalul de sunet al televizoarelor (5,5 sau 6,5MHz). Principalii parametri sunt: frecvența centrală și lățimea benzii de trecere.

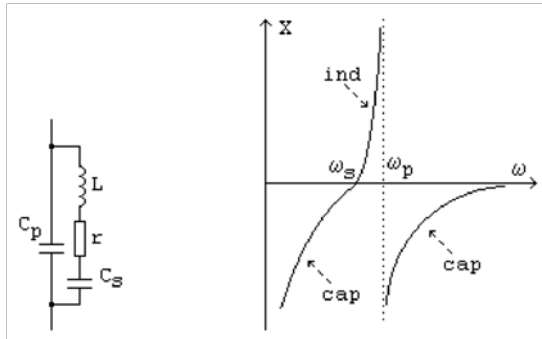


Figura 10-1 Circuit echivalent și variația reactanței unui cristal piezoelectric

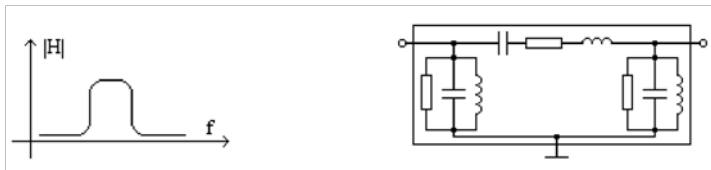


Figura 10-2 Caracteristica amplificare-frecvență și un circuit echivalent al filtrului „trece-bandă”

## 10.2. Lămpi cu descărcare în gaz sau în vid

Sunt componente electrice cu caracteristică neliniară. Tuburile folosite la reclamele luminoase, la iluminat (inclusiv în becurile economice, controlate electronic), la startere, au acest tip de caracteristică. Principala proprietate în funcționare este că permit amorsarea condukției numai la o tensiune mare, după care tensiunea pe lampă se reduce foarte mult. Din acest motiv, este necesar un dispozitiv de limitare a curentului (bobină de balast sau circuit electronic). Simbolul lămpii conține uneori un punct care semnaleză prezența gazului: gaze nobile (neon, argon - la tuburile cu lumină colorată), vapori de mercur (la tuburile de iluminat, blitz-uri, tuburi de putere), vapori de sodiu (cele de culoare galbenă, de la iluminatul stradal).

Descărcătoarele sunt componente de aceeași natură, folosite pentru protejarea circuitelor electronice împotriva supratensiunilor și a descărcărilor electrice violente (cel mai adesea, provenind din electricitatea statică atmosferică). Aparatele care sunt legate la cabluri din exteriorul clădirilor (telefon, radioreceptor, placa de rețea sau fax/modem) au în compunere astfel de componente.

Unele tuburi au atașat un al treilea electrod, care permite amorsarea descărcării la tensiuni mai mici (este cazul lămpii de blitz).

În circuitele electronice mai vechi (peste 60 ani), tuburile au fost folosite în circuite stabilizatoare, datorită porțiunii de caracteristică în care tensiunea variază foarte puțin. În afară de proprietățile stabilizatoare nu foarte bune, amorsarea

conducției era principala problemă dificilă, motiv pentru care nu au mai fost folosite în acest scop, după apariția semiconductoarelor.

### 10.3. Siguranța fuzibilă

Este o componentă electrică, a cărei destinație este protejarea circuitelor electronice la depășirea curentului maxim admisibil. Siguranța are un corp izolanț, un conductor electric subțire care trece prin corp și două terminale metalice. Corpul poate fi plin cu aer sau cu nisip. Protecția la supracurent se realizează prin topirea firului. Pe fiecare siguranță sunt marcate curentul maxim admis și tensiunea maximă de lucru, pentru care topirea firului nu provoacă arc electric. Întrucât încălzirea firului până la temperatura de topire durează un timp semnificativ, siguranța protejează doar componentele care au inerție termică mai mare decât ea. De cele mai multe ori, dispozitivele semiconductoare (tranzistoare, diode, tiristoare) nu sunt protejate la supracurent de către siguranța fuzibilă. În circuitele electronice de putere mare, din industrie, se folosesc siguranțe fuzibile ultrarapide, cu conductor din argint (sunt scumpe iar efectul lor nu este întotdeauna cel scontat).

### 10.4. Becul

Este o componentă electrică, cu comportare rezistivă, care, la trecerea curentului electric prin el, emite lumină. Becurile cu incandescență sunt realizate dintr-un filament din tungsten sau un alt metal cu temperatură de topire ridicată și se prezintă sub forma unei spirale de mici dimensiuni (pentru creșterea lungimii traseului rezistiv). Datorită acestei forme a filamentului, prin apariția unor șocuri și vibrații mecanice în filament, becurile cu incandescență au o durată de viață mai mică decât alte componente electronice.

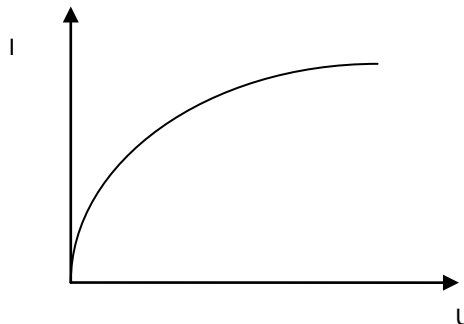


Figura 10-3 Caracteristica curent-tensiune pentru becuri cu incandescență

Caracteristica curent-tensiune a becurilor este puternic neliniară, fiind influențată foarte mult de coeficientul de variație cu temperatura a rezistenței electrice a acestuia.

## 10.5. Electromagnetul, releul

Electromagnetul este un magnet temporar, a cărui acțiune de atragere sau de eliberare a unei armături feromagnetice este determinată de prezența curentului electric într-un circuit de excitație. Au drept elemente constructive de bază o bobină amplasată pe un miez feromagnetic. Miezul este format dintr-o armătură fixă și una mobilă. Când bobina este parcursă de curentul de excitație, armătura mobilă este deplasată de forțe sau cupluri active.

**Elementele constructive** principale ale unui electromagnet pot fi urmărite în Figura 10-4, unde s-a notat: a - electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de translație, b - electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de rotație, 1 - jug feromagnetic, 2 - piese polare, 3 - armătură mobilă, 4 - bobină, 8 - întrefier de lucru liniar.

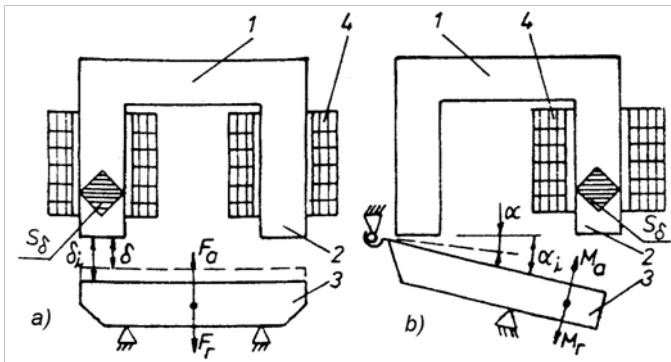


Figura 10-4 Elementele constructive ale electromagneților: a - electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de translație, b - electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de rotație

Elementele constructive menționate mai sus se regăsesc la toate tipurile de electromagneți. Aceștia li se adaugă un grup de repere constructive auxiliare, având rol mecanic și care servesc pentru deplasarea predeterminată a armăturii mobile, pentru ghidarea cu frecări minime a acesteia, pentru fixarea electromagnetului.

Circuitul magnetic al electromagnetului este format din: armătura fixă, (jug + piese polare), armătura mobilă și traseele prin aer străbătute de fluxul magnetic produs de bobină.

Circuitul electric este format din bobină (bobine).

Circuitelor magnetic, respectiv electric, ale unui electromagnet li se atașează scheme echivalente, utile în calculul parametrilor ce caracterizează funcționarea acestui dispozitiv.

Clasificarea electromagneților se face după mai multe criterii, și anume:



- *După modul de lucru:* electromagneți de atragere, la care armătura mobilă se atrage dacă prin bobină circulă curentul de excitație și, electromagneți de reținere, la care armătura se eliberează dacă prin bobină circulă curentul de excitație.
- *După forma constructivă:* electromagneți cu mișcare de translație, de rotație, de tip plonjor, cu armătura fixă, având formă de U, E sau în manta.
- *După durata acționării:* normali, rapizi, temporizați;
- *După funcția îndeplinită:* pentru măsurare și control, respectiv de execuție (acționare).

### 10.5.1. Caracteristicile electromecanice ale electromagneților

Caracteristicile electromecanice stabilesc dependența dintre forța activă,  $F_a$ , dezvoltată de un electromagnet și valorile întrefierului de lucru;  $\delta_f$  este valoarea finală a întrefierului, corespunzătoare poziției ocupate de armătura mobilă cu mișcare de translație după acționare, iar  $\delta_i$  - valoarea inițială, obținută la revenirea armăturii mobile.

Pentru electromagneții având armătura mobilă cu mișcare de rotație, caracteristicile electromecanice sunt funcții de forma  $M_a(\alpha)$ ,  $M_a$  fiind cuplul activ, iar  $\alpha$  [ $\alpha_f$ ,  $\alpha_i$ ] - întrefierul unghiular de lucru. În cazul electromagneților de c.c. forțele (cuplurile) active se consideră prin valorile lor medii.

Deoarece fluxul magnetic util, este limitat de valorile întrefierului de lucru, electromagneții de c.c. sunt utilizați obișnuit pentru a dezvolta forțe active de valori mari, de-a lungul unor deplasări totale, de lungime mică (sub 10 mm).

Valoarea finală a întrefierului electromagneților de c.c. trebuie să fie diferită de zero (în întrefier se amplasează opritoare din materiale neferomagnetice) pentru a se evita reținerea armăturii mobile, prin remanență magnetică, după întreruperea curentului de excitație.

Forța activă a electromagneților de c.a. depinde de valorile întrefierului de lucru prin intermediul factorului de dispersie, dar dependența este relativ slabă. În aceste condiții, electromagneții de c.a. se utilizează pentru valori relativ mari ale deplasării armăturii mobile, 25...50 mm. În funcționare, valorile finale ale întrefierului de lucru trebuie să fie cât mai mici, pentru a se limita astfel intensitatea curentului absorbit de bobină; în acest scop, suprafețele polare se supun unei operații tehnologice de rectificare. Pentru funcționarea sigură a electromagneților este necesară corelarea caracteristicilor electromecanice  $F_a$ ,  $M_a$  cu caracteristicile forței sau cuplului rezistent.

### 10.6. Contacte electrice

Contactul electric este ansamblul constructiv cu ajutorul căruia se realizează legătura electrică între două sau mai multe părți conductoare pentru a permite trecerea curentului electric.

Deoarece contactele electrice reprezintă porțiuni ale căilor de curent care suportă solicitări de intensități mari, este necesar ca acestea să se caracterizeze prin siguranță ridicată în funcționare, rezistență corespunzătoare la solicitări de diverse naturi (mecanică, electrică, factori de mediu), cât și printr-o suficientă stabilitate termică și electrodinamică.

După cinematica pieselor de contact, pot exista:

- *contacte fixe* (legături fixe de contact), obținute prin îmbinări demontabile sau nedemontabile (cu șuruburi, nituri, prin sudare etc.) ale pieselor de contact;
- *contacte alunecătoare sau glisante*, la care piesele de contact se pot deplasa una în raport cu cealaltă, fără întreruperea conducerii electrice;
- *contacte amovibile*, având un element fix și altul amovibil, fără sarcină și fără tensiune (de exemplu, contactul siguranțelor fuzibile);
- contacte de comutație, având cel puțin un element de contact mobil, prin deplasarea căruia se obține comutația dinamică în circuitele instalațiilor electrice.

### Rezistența de contact ( $R_c$ )

Prezența unui contact electric pe o cale de curent pune, întotdeauna, în evidență o rezistență electrică suplimentară,  $R_c$ , numită rezistență de contact.

Existența rezistenței de contact se explică pe seama a două procese, constând în stricțiunea liniilor de curent și în acoperirea suprafeței de contact cu pelicule disturbatoare.

**Stricțiunea liniilor de curent.** Indiferent de rugozitatea suprafețelor de contact, atingerea acestora nu poate avea loc decât într-un număr finit de puncte, suprafața reală de contact, considerată ca sumă a microsuprafețelor de contact, rezultă întotdeauna mai mică decât suprafața aparentă de contact, dependentă de dimensiunile geometrice ale pieselor de contact.

### Rezistența peliculară ( $R_p$ )

Este efectul formării unor pelicule disturbatoare, de obicei cu proprietăți semiconductoare, pe suprafețele pieselor de contact. Structura și grosimea peliculei disturbatoare depinde de metalul pieselor de contact, de temperatura suprafeței de contact și de compoziția chimică a mediului ambiant.

Din acest punct de vedere, contactele electrice pot fi:

- cu atingere metalică, realizate în vid, din metale care nu au suferit acțiuni ale mediului ambiant;
- cu atingere cvasimetalică, realizate din metale nobile în atmosferă normală, unde acestea se acoperă cu pelicule având grosimi de 1...2 nm, pe care electronii le străbat aproape în mod liber, prin efect tunel;
- cu peliculă disturbatoare, cum sunt de exemplu contactele din cupru în atmosferă normală sau cele din argint în vapori sulfuroși; în acest caz, între metalul pieselor de contact și gazele din mediul ambiant au loc reacții chimice, compușii rezultați având grosimi de ordinul a 100 nm.

În cazul contactelor cu peliculă perturbatoare conducția electrică se stabilește fie prin fenomenul de fritare, fie ca urmare a deformării plastice a suprafețelor de contact.

Dacă valorile forței de apăsare în contact sunt relativ mici (la contactele releelor), stabilirea conducției electrice prin fenomenul de fritare are la bază proprietățile semiconductoare ale peliculei disturbatoare.

Sub acțiunea unei forțe de contact mari, pelicula disturbatoare se fisurează, iar materialul pieselor de contact, care în zona vârfurilor atinge limita de plasticitate, curge prin fisurile formate; în acest caz conducția electrică se stabilește prin punți metalice, care se formează între piesele de contact.

Valorile rezistenței peliculare specifice se determină prin calcul, cu ajutorul unor relații determinate experimental.

În practica proiectării obișnuite, calculul contactelor electrice se efectuează ținându-se seama numai de rezistența de stricțiune,  $R_s$ .

### Rezistența de stricțiune ( $R_s$ )

Studiul analitic al contactului punctiform se face apelând fie la modelul sferei de conductivitate infinită, fie la modelul microsuprafeței de contact eliptice, ambele elaborate de Holm.

Potrivit *modelului sferei de conductivitate infinită*, se consideră că între două piese metalice, contactul electric elementar se realizează prin intermediul unei sfere, având raza  $a$  și rezistivitatea nulă. În aceste condiții, în zona locului de contact, liniile de curent sunt radiale, iar suprafețele echipotențiale sunt sfere, concentrice cu sfera de contact.

În cazul *modelului microsuprafeței de contact eliptice*, suprafața de contact dintre două piese metalice se consideră realizată după o elipsă; astfel, liniile de curent se orientează după curbele geodezice.

Indiferent de modelul utilizat, pentru calculul rezistenței de stricțiune se apelează la un procedeu bazat pe dualitatea existentă între relațiile ce caracterizează câmpul electrostatic în vid și câmpul electric staționar al curenților continui, într-un mediu conductor.

$$R_s = \frac{\rho}{2a} \quad (81)$$

### Influența forței de apăsare, asupra rezistenței de contact

Expresia analitică a dependenței dintre forța,  $F_c$ , de apăsare în contact și rezistența de contact este o relația necesară în proiectarea contactelor electrice.

$$R_s = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F_c}} \quad (82)$$

unde  $H$  este duritatea materialului de contact. Relația pune în evidență faptul că un contact punctiform poate fi considerat o porțiune a căii de curent, având rezistența electrică dependentă de forța de apăsare în contact.

### Regimul permanent de încălzire al contactelor

Un contact electric prezintă o rezistență de contact, în care va apare efectul Joule-Lentz, deci se va produce o încălzire suplimentată a zonei căii de curent unde se află contactul electric.

### **Încălzirea la scurtcircuit a contactelor electrice**

La creșterea rezistenței de contact  $R_c$  sau la creșterea intensității curentului prin contact ( $U_c = R_c I$ ), căderea de tensiune pe contact crește și poate atinge chiar valorile  $U_p$  sau  $U_c$ , corespunzătoare plastifierii, respectiv topirii contactului în zona de contact.  $U_{cad}$  este căderea de tensiune pe contact admisibilă în regim de lungă durată.

Dacă în timpul funcționării în regim de lungă durată  $U_c < U_{cad} < U_p$ , în timpul scurtcircuitelor, căderea de tensiune pe contact,  $U_c$ , poate atinge valoarea  $U_t$ , ajungându-se astfel la topirea și sudarea suprafețelor de contact.

O solicitare mai intensă se întâlnește atunci când curentul de scurtcircuit este stabilit prin închiderea contactelor; datorită forței în contact mici, rezistența de contact este mare, deci energia termică degajată este mare, de unde rezultă temperaturi mari, deci topirea metalului și sudarea acestora.

La scurtcircuit se consideră un regim termic adiabatică calculul contactului punctiform se face pe baza modelului sferei de conductivitate infinită și se urmăresc condițiile pentru care stabilitatea termică la scurtcircuit a contactului este asigurată.

Un contact electric este stabil din punct de vedere termic la scurtcircuit, dacă rezistența de contact este suficient de mică, fapt care reclamă valori corespunzătoare pentru forța de apăsare în contact.

### **Solicitările electrodinamice ale contactelor electrice**

Stricțiunea liniilor de curent în zona contactelor elementare constituie cauza producerii forțelor electrodinamice de repulsie în contact, care acționează în sensul depărtării pieselor de contact, una în raport cu cealaltă.

Forța de respingere este cauzată de interacțiunea între curent și câmpul magnetic propriu din interiorul conductorului. Pentru calculul forței electrodinamice de repulsie dintre două piese de contact cilindrice de rază  $R$ , este util modelul sferei de conductivitate infinită de rază  $a$ .

Datorită forțelor electrodinamice de repulsie, forța rezultantă de apăsare în contact scade încât are loc și scăderea valorilor razei  $a$ ; aceasta conduce la creșterea în continuare a forței de repulsie, în cele din urmă ajungându-se fie la topirea și sudarea contactului, fie la autodeschiderea acestuia. Ambele consecințe se elimină prin dimensionarea corespunzătoare a resorturilor care asigură forța de apăsare în contact și prin alegerea judicioasă a geometriei căilor de curent în zona contactului. Pe această ultimă cale, este posibilă compensarea efectelor forțelor electrodinamice de repulsie în contact, prin cele ale unor forțe electrodinamice de contur.

### 10.6.1. Procese fizico-chimice care afectează starea suprafeței de contact

Deoarece starea suprafețelor contactelor electrice constituie un element hotărâtor în ceea ce privește durata de viață a acestora, exploatarea rațională a echipamentelor de comutație cu contacte impune cunoașterea atât a proceselor care pot altera suprafața de contact cât și a măsurilor tehnice necesare pentru încadrarea contactelor în durata de viață proiectată.

#### Coroziunea

Coroziunea este de mare intensitate atunci când piesele de contact sunt realizate din materiale diferite, deci au potențiale electrochimice de valori diferite. Între aceste materiale se inițiază procese de electroliză locală, favorizate de prezența umezelii, a unor gaze active (amoniac, bioxid de sulf, clor) sau de depunerea, în zona de contact, a unor săruri.

Limitarea coroziunii se realizează prin utilizarea unor metale cu potențiale electrochimice de valori cât mai apropiate, sau prin acoperirea contactelor cu lacuri anticorozive, sau prin galvanizarea pieselor de contact. o soluție modernă constă în utilizarea inhibitorilor de coroziune, care sunt săruri de aminoacizi care se depun sub forma unor pelicule pe suprafața de contact, încetinind reacțiile electrochimice.

#### Electroeroziunea

Aceasta este provocată de arcul electric, în special de arcul electric scurt, cu lungimi de câțiva milimetrii, a cărui energie termică se cedează pieselor de contact prin conducție.

Creșterea rapidă a temperaturii contactelor la valori mari duce la evaporarea la suprafață a metalului, proces denumit și arderea contactelor, ceea ce conduce în timp la scăderea masei pieselor de contact.

Intensitatea procesului de uzură electrică este hotărâtoare pentru durata de viață a contactelor, caracterizată prin numărul maxim admisibil de acționări în sarcină. Acesta se poate calcula cu ajutorul unor relații verificate experimental, sau poate fi determinat din curbe, puse la dispoziție de firmele constructoare.

Limitarea electroeroziunii se obține prin:

- în cazul echipamentelor de c.c., prin limitarea supratensiunilor de comutație și a duratei de ardere a arcului electric și prin utilizarea unor materiale cu punct de topire ridicat;
- în c.a., realizarea unei viteze suficient de mari de alungire a coloanei arcului electric. Electroeroziunea se mai produce și prin transportul de material între piesele de contact, fenomen denumit și migrație.

Migrația brută apare în cazul arcului electric scurt de c.c., amorsat la tensiuni de 20...25 V și parcurs de curenți de 5...10 A. Materialul contactelor este transportat de la catod (-) și de la anod (+). Dacă  $U < 20$  V și  $I < 5$  A, transportul are loc de la anod la catod, procesul fiind cunoscut sub numele de migrație fină.

În exploatare, piesele de contact, supuse eroziunii prin migrație se recondiționează periodic, până la atingerea uzurii admisibile, după care se înlocuiesc.

Oxidarea este procesul chimic de combinare cu oxigenul, reacție ce este mai rapidă odată cu creșterea temperaturii. Combaterea oxidării contactelor se obține prin limitarea temperaturilor de funcționare a acestora, prin acoperirea cu galvanică a suprafețelor de contact cu metale ca Ag, Ni, Cd, Zn sau prin utilizarea unor substanțe antioxidante, sub formă de paste. O altă soluție, este montarea contactelor în stații protejate (ulei, vid, hexafluorură de sulf etc.).

## 10.6.2. Materiale pentru construcția contactelor

Materialele destinate construcției contactelor electrice trebuie să îndeplinească următoarele cerințe de baze:

- să prezinte conductivități electrice și termice cât mai mari;
- să aibă duritate și rezistență la oboseală de valori ridicate;
- să aibă temperaturi de topire și vaporizare mare;
- să fie rezistente la eroziune, uzură mecanică și la coroziune, iar peliculele disturbatoare de oxizi să prezinte conductivitate electrică de valori mari;
- să fie ieftine și ușor prelucrabile.

Trebuie remarcat faptul ca nici unul din metalele existente nu satisface integral cerințele enumerate, astfel încât, în construcția contactelor se adoptă soluții diferite, care să răspundă în mod rațional atât unor condiții de funcționalitate, cât și unor criterii tehnico-economice.

Principalele metale, cu proprietățile lor, utilizate în construcția contactelor electrice sunt: Cu, Ag, Au - se caracterizează prin conductivitate electrică și termică mare; paladiu (Pd) și platina (Pt) se comportă corespunzător sub raportul migrației fine; iar wolframul (W) și molibdenul (Mo) prezintă temperaturi de topire și de vaporizare ridicate, fiind recomandate pentru construcții intens solicitate sub acțiunea arcului electric.

Cuprul are elasticitate redusă, și acesta se aliază cu: Ag 2...8%, Ag și Cd; Be 1,2...2%, compoziție utilizată în construcția lamelelor elastice de contact.

Un aliaj nou este  $\text{CuNi}_4\text{AlSi}$ , ce poate înlocui aliajele Cu-Be, (Be este scump și tot rar).

Argintul, are duritate mică, prezintă tendință de sudare și rezistență slabă la electroeroziune. Acesta este folosit pentru acoperirea galvanică cât și pentru placarea contactelor, prin sudare sau lipire.

Aliajul AgCd are bune proprietăți pentru stingerea arcului electric.

Aluminiul: are conductivitate termică și electrică mai mici decât ale cuprului, dar este mai ușor și mai ieftin. Utilizarea Al este restrânsă la realizarea legăturilor fixe de contact, deoarece are duritate și elasticitate de valori reduse, iar oxidul de aluminiu are rezistivitate mare.

Wolframul are o bună stabilitate la contactul cu arcul electric, conductivitatea termică și electrică sunt de valori mici, dar prezintă duritate ridicată și o bună rezistență mecanică. Se utilizează în construcția contactelor de rupere și a armăturilor de preluare a extremităților coloanei arcului electric de deconectare.

O largă utilizare în construcția contactelor electrice o au materialele metalo-ceramice, obținute prin sinterizare.

Cele mai frecvent întâlnite compoziții metalo-ceramice conțin două elemente: Cu-W, Cu-Mo, Ag-Ni, Ag-grafit, dar se pot întâlni și materiale sinterizate din trei elemente: Ag-W-Ni, Ag-Cd-Ni, Cu-W-Ni, Cu-Ni-grafit.

Metalele din grupa Cu, Ag, conferă materialelor metalo-ceramice conductivitate electrică și termică ridicată, celelalte elemente imprimând materialelor de contact o bună rezistență la uzură. Grafitul micșorează tendința de sudare și are rol de lubrifiant, în cazul contactelor alunecătoare.

## 10.7. Întrerupătoare

Întrerupătorul se poate defini ca un aparat destinat închiderii și deschiderii circuitelor electrice când acestea sunt parcurse, fie de curenți normali de lucru, fie de curenți anormali cum sunt cei de suprasarcină sau de scurtcircuit.

Funcția cea mai importantă a unui întrerupător este deschiderea automată a circuitelor electrice în momentul apariției scurtcircuitelor. Importanța acestei funcțiuni constă în faptul că, în acest mod, se asigură întreruperea porțiunii de rețea defectă într-un timp cât mai scurt, prevenindu-se avarierea și distrugerea echipamentelor electrice datorită curenților de scurtcircuit. Întreruperea curenților electrice poate fi realizată principial în două moduri:

- întrerupere prin introducerea în serie a unei rezistențe crescând progresiv (sau mărirea rezistenței circuitului) până la valoarea care anulează curentul, metodă folosită și la întreruperea circuitelor de curent continuu;
- întrerupere folosind momentul trecerii curentului prin zero, în sensul mării rigidității dielectrice a spațiului dintre contactele deschise, pentru a împiedica reaprinderea arcului electric.

Marea majoritate a întrerupătoarelor folosesc pentru întreruperea curentului cea de-a doua metoda. Problema principală a acestor întrerupătoare o reprezintă stingerea arcului electric ce se formează între contacte, pe cât posibil, la prima trecere a curentului prin zero.

O clasificare a întrerupătoarelor după mediul de stingere poate fi următoarea:

- întrerupătoare cu mediu de stingere gazos: cu aer comprimat, cu hexafluorură de sulf;
- întrerupătoare cu mediu de stingere lichid: cu ulei, cu amestec apă și glicol;
- întrerupătoare cu mediu de stingere solid: cu material solid gazogenerator;
- întrerupătoare cu vid.

### Parametrii caracteristici ai unui întrerupător:

**a. Tensiunea nominală** este valoarea standardizată cea mai mare a tensiunii la care este destinat să lucreze întrerupătorul un timp îndelungat.

**b. Nivelul de izolație nominal sau nivelul de ținere nominal** este caracterizat prin valorile tensiunilor de ținere nominale la impuls și la frecvență industrială.

**c. Frecvența nominală** a întrerupătorului este identică cu frecvența nominală a rețelei în care va funcționa întrerupătorul. La noi în țară această frecvență este de 50 Hz.

**d. Curentul nominal** este valoarea standardizată a curentului sub care întrerupătorul poate funcționa în regim permanent fără ca limitele admisibile de încălzire să fie depășite.

**e. Capacitatea de rupere nominală** este cel mai mare curent de scurtcircuit pe care întrerupătorul trebuie să-l întrerupă în condiții specificate privind tensiunea de restabilire și tensiunea tranzitorie de restabilire.

**f. Capacitatea de conectare** este definită de cel mai mare curent de scurtcircuit care poate fi conectat de întrerupător fără nici o avarie care să împiedice funcționarea lui ulterioară. Acest curent este chiar curentul de scurtcircuit de șoc.

**g. Curentul de stabilitate termică** este curentul pe care aparatul îl poate suporta fără a depăși limitele de încălzire un anumit timp (1 s, 4 s etc.) stabilit de constructor.

**k. Timpul propriu de deschidere** al întrerupătorului cu dispozitiv de acționare este intervalul de timp care trece de la închiderea circuitului bobinei de declanșare a dispozitivului de acționare (de la darea impulsului de declanșare) până la începerea desfacerii contactelor de stingere a arcului ale întrerupătorului.

**i. Timpul total de deschidere** al întrerupătorului cu dispozitiv de acționare este intervalul de timp care trece de la închiderea circuitului bobinei de declanșare a dispozitivului de acționare până la stingerea completă a arcului în toate fazele.

**j. Timpul de închidere al unui întrerupător** este intervalul de timp de la aplicarea impulsului pentru închidere până în momentul atingerii contactelor.

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească întrerupătoarele:

- Putere de rupere cât mai mare, care astăzi pentru tensiunile de 110-220 kV ajung până la 6000-12000 MVA și mai mult, pentru 400 kV-20 000 MVA, iar pentru 765 kV-60 000 MVA.
- Întrerupere sigură a curentului în domeniul de la câțiva zeci de amperi până la valoarea nominală a curentului, precum și a curentului de scurtcircuit.
- Durata de întrerupere cât mai scurtă posibilă.
- Posibilitatea reanclanșării automate rapide mono și trifazate.
- Verificare și revizie ușoară a contactelor.
- Siguranță împotriva exploziilor și incendiului.
- Transport fără dificultăți și siguranță în exploatare.

## 10.8. Fotorezistorul sau detectorul fotoconductiv

Este un rezistor a cărui rezistență depinde de fluxul luminos incident pe suprafața sa, funcționând pe baza efectului fotoelectric intern în semiconductoare.

Se consideră structura simplificată a unui fotorezistor din Figura 10-5.

Dependența dintre rezistența fotorezistorului și iluminare este exprimată prin relația:



$$R = ML^{-\alpha} \quad (83)$$

unde:  $L$  - intensitatea fluxului luminos,  $\alpha$  - constanta,  $M$  - constanta fotorezistorului

$$M = \frac{a}{\eta e \mu \tau_0 b} \quad (84)$$

unde:  $\eta$  - constantă ce depinde de lungimea de undă a radiației,  $e$  - sarcina electronului,  $\mu$  - mobilitatea electronilor,  $\tau_0$  - durata medie de viață a electronilor,  $a/b$  - constantă.

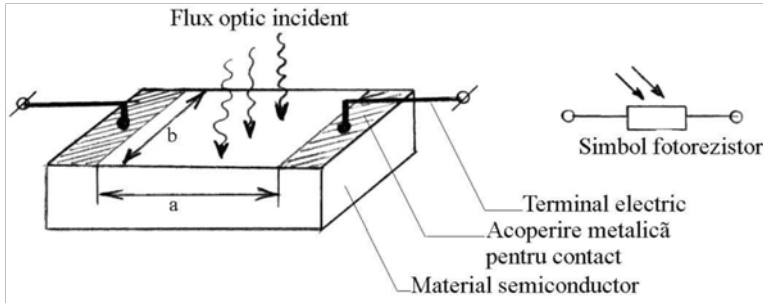


Figura 10-5 Structura unui fotorezistor

Analiza funcției rezistenței conduce la concluzia că o variație importantă a rezistenței apare dacă  $M$  este cât mai mic, fapt care se poate obține prin alegerea unor materiale semiconductoare cu  $\eta$ ,  $\mu$  și  $\tau_0$  cât mai mari, iar la varianta constructivă aleasă, raportul  $a/b$  să fie cât mai mic, ceea ce impune folosirea: a) unor electrozi interdigitali care realizează practic structuri ca cea prezentată, dar conectate în paralel; b) cu electrod transparent optic prin care pătrunde fluxul incident iar celălalt paralel cu el la o distanță foarte mică.

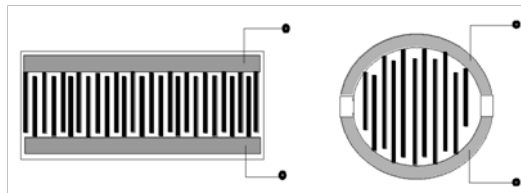


Figura 10-6 Moduri de dispunere a electrozilor interdigitali la fotorezistoare

### 10.8.1. Caracteristici specifice fotorezistoarelor:

#### Rezistența de întuneric, $R_d$

Reprezintă valoarea rezistenței la iluminare nulă.

#### Sensibilitatea integrală, $S$

Reprezintă raportul dintre fotocurent și fluxul luminos incident  $O$ :

$$S = \frac{I_L - I_d}{\phi} \quad (85)$$

unde  $I_L$  este curentul prin fotorezistor sub fluxul incident iar  $I_d$  este curentul de întuneric.

### Sensibilitatea spectrală, $S_\lambda$

Reprezintă raportul dintre fotocurent și fluxul incident la iluminare monocromatică.

### Sensibilitatea fotorezistorului, $S_R$

Se definește ca:

$$S_\lambda = \frac{R - R_d}{R_d \phi} \quad (86)$$

### Caracteristica spectrală a sensibilității

Indică variația sensibilității spectrale  $S_\lambda$ , în funcție de lungimea de undă  $\lambda$ . Primele fotorezistoare au fost realizate din seleniu cristalin. Ulterior, pentru îmbunătățirea performanțelor gama materialelor s-a extins la PbS, CdS, CdSe. Fotorezistoarele realizate din PbS au maximum sensibilității în infraroșu ( $\lambda > 7600\text{Å}$ ) și o inerție mică, cu valori ale rezistenței de întuneric cuprinse între  $10^4$  și  $10^7\Omega$ , iar ale rezistenței de iluminare coborând până la  $10^2\Omega$ . Fotorezistoarele din sulfură de cadmiu (CdS) monocristalin sunt sensibile în domeniul vizibil ( $\lambda = 4000 \dots 7600\text{Å}$ ), au o caracteristică de lumină liniară până la aproximativ 1000 lx. Modificarea maximumului caracteristicii spectrale se face prin doparea cu impurități de Cu și Fe. Fotorezistoarele pe bază de CdSe au sensibilitate mare și inerție redusă în raport cu CdS și prezintă un maximum de sensibilitate spectrală la  $\lambda = 7200\text{Å}$ .

### Dependența curent-tensiune

Prezintă simetrie față de originea axelor de coordonate, deoarece rezistența nu depinde de polaritatea tensiunii aplicate. Se poate scrie:

$$I = I_d + I_L = D_0 U + D_1 \Phi_0^\gamma U \quad (87)$$

unde  $D_0$  și  $D_1$  sunt constante determinate de proprietățile de material în condiții de întuneric și respectiv de iluminare,  $\gamma$  este coeficientul de neliniaritate al caracteristicii energetice, iar  $U$  este tensiunea aplicată la bornele fotorezistorului. Se constată liniaritatea caracteristicilor curent-tensiune având ca parametru fluxul luminos.

### Constanta de timp a fotorezistorului ( $\tau_0$ )

Dacă fotorezistorul este alimentat la tensiunea  $U$  și iluminat cu impulsuri de lumină, care au o variație dreptunghiulară, atunci fotocurentul va prezenta o întârziere la atingerea valorii  $I_S$  de la apariția fluxului luminos și deasemenea o întârziere în scăderea fotocurentului după anularea fluxului luminos. Intervalul de timp  $\tau_0$ , în care curentul  $I$  crește până la valoarea  $0,36 \cdot I_S$  (unde  $I_S$  este valoarea staționară a fotocurentului) se numește timp de creștere sau constanta de timp a creșterii fotocurentului. Intervalul de timp  $\tau_d$  în care curentul  $I$  scade până la

valoarea  $0,36 \cdot I_S$  după încetarea fluxului luminos se numește constanta de timp a descreșterii fotocurentului.

### Nivelul de zgomot și pragul de sensibilitate al fotorezistorului

În fotorezistor apar următoarele tipuri de zgomote: zgomot termic, zgomot de generare-recombinare, zgomot de curent, zgomotul iradierii de fond. Prin compunere, aceste zgomote determină fluctuații ale tensiunii. Fiecare tip de zgomot este determinat de materialul folosit și de varianta constructivă a fotorezistorului. Dacă semnalul detectat este modulată, se constată o scădere a zgomotului global cu frecvența de modulare, dar și o reducere a sensibilității. Se alege o frecvență de modulare optimă pentru care se atinge valoarea minimă a fluxului de prag. Fotorezistoarele pentru semnale slabe în infraroșu funcționează la temperaturi coborâte fiind răcite în azot lichid, oxigen lichid, heliu lichid. Prin acest mod pragul de sensibilitate al acestora este determinat de fluctuațiile fotonilor incidenti.

Inițial fotorezistoarele au fost realizate pe bază de seleniu cristalin. Caracteristica spectrală cuprinde lungimi de undă din domeniul vizibil până în domeniul infraroșu ( $\lambda < 4000 \text{ \AA}$  domeniul ultraviolet,  $\lambda = 4000 \dots 7600 \text{ \AA}$  domeniul vizibil,  $\lambda > 7600 \text{ \AA}$  domeniul infraroșu). Deplasarea caracteristicii către undele lungi a fost realizată prin im-purificare cu Te. Sensibilitatea fotorezistoarelor pe bază de Se este mică în comparație cu a celorlalte fotorezistoare.

O largă răspândire o au fotorezistoarele realizate din PbS. Din caracteristica spectrală (în valoare relativă, față de valoarea maximă), se observă că maximul sensibilității se găsește în infraroșu deplasându-se către unde lungi la scăderea temperaturii. Fotorezistoarele (PbS) au inerție mică și în funcție de tehnologia de fabricație se poate obține o gamă largă a valorii rezistenței de întuneric ( $R_{\sigma} = 10^4 \dots 10^7 \Omega$ ).

În domeniul vizibil, cea mai mare parte a fotorezistoarelor sunt fabricate pe bază de CSd monocristalin (sensibil și la radiația X) sau poli-cristalin. Acestea s-au impus datorită sensibilității integrale mari, caracteristicii de lumină liniară până la iluminare de 1000 lx. Sulfura de cadmiu policristalin are caracteristica spectrală mai largă și poate fi modificată prin conținutul de impurități (Cu, Fe) și permite puteri de disipație mai mari (până la 2 ... 2,5 W).

Fotorezistoarele pe bază de CdSe au sensibilitatea de câteva ori mai mare decât cele cu CdS, inerție mică, având  $S_{\lambda_{\max}}$  la 7200 Å. Prin folosirea în diferite procente a CdS și a CdSe se pot obține proprietăți intermediare și cu sensibilitatea spectrală maximă ( $S_{\lambda_{\max}}$ ) cuprinsă între valorile caracteristice materialelor (5100 Å respectiv 7200 Å).

## 10.9. Termistoare

Proprietatea de a-și modifica puternic rezistivitatea sub influența temperaturii a diferitelor materiale (conductoare, semiconductoare) este folosită în scop funcțional pentru a realiza componente a căror rezistență este funcție de temperatură (numite și termistoare). Funcție de modul de variație al rezistivității cu temperatura se obțin termistoare cu coeficient de temperatură negativ sau pozitiv.

### 10.9.1. Termistoare cu coeficient de temperatură negativ.

Rezistivitatea materialelor semiconductoare depinde de temperatură, scăzând odată cu creșterea ei. Pentru fabricarea termistoarelor se folosesc oxizi și elemente de tranziție din grupa fierului: Cr, Mn, Fe, Co, sau Ni. În stare pură, acești oxizi au o rezistivitate foarte mare, putând fi transformați prin impurificare cu ioni străini în semiconductoare, mărindu-le conductibilitatea și variația acestora cu temperatura. De exemplu, dacă în oxidul de fier ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o mică parte din ionii de fier  $\text{Fe}^{3+}$  sunt înlocuiți cu ioni de  $\text{Ti}^{4+}$ , aceștia vor fi compensați de o cantitate egală de ioni  $\text{Fe}^{2+}$ . La temperatură joasă electronii superiori ai ionilor de  $\text{Fe}^{2+}$  sunt situați pe ioni în vecinătatea ionilor  $\text{Ti}^{4+}$ . La creșterea temperaturii acești electroni sunt treptat pierduți, contribuind la creșterea conductibilității; se formează un semiconductor de tip *n*. Asemănător, dacă în NiO, parte din ionii  $\text{Ni}^{2+}$  sunt înlocuiți cu ionii de  $\text{Li}^{1+}$ , aceștia vor fi compensați de o cantitate egală de ioni  $\text{Ni}^{3+}$ . La joasă temperatură „golul” format pe ionul  $\text{Ni}^{3+}$  este situat în vecinătatea ionului străin ( $\text{Li}^{1+}$ ). La creșterea temperaturii golurile astfel formate vor contribui la creșterea conductivității, formându-se un semiconductor de tip „p”.

Amestecate în proporții bine definite, folosind o tehnică asemănătoare materialelor ceramice, termistoarele se fabrică sub formă de plachete, cilindri, discuri, tuburi, filamente (protejate în tuburi de sticlă). În practică, pentru dependența rezistență-temperatură, se folosește relația aproximativă

$$R_T = A e^{\frac{B}{T}} \quad (88)$$

unde *A* este o constantă de proporționalitate (se mai notează  $R_\infty$ , constituind valoarea rezistenței când  $T \rightarrow \infty$ ), iar *B* este o constantă, ce are valoarea, în funcție de materialul și tehnologia utilizată, în domeniul 2000...5500K.

#### Rezistența nominală a termistorului ( $R_n$ )

Reprezintă valoarea rezistenței când corpul termistorului are temperatura de 25°C.

#### Coeficientul de temperatură al termistorului ( $\alpha_R$ )

este dat de relația:

$$\alpha_R = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (89)$$

$\alpha_R$  este dependent de constanta de material *B* și de temperatură  $\alpha = (3 \dots 6)10^{-2}/K$ . De obicei se indică coeficientul de temperatură la 25°C, la care se dă și valoarea nominală a rezistenței termistorului.

#### Constanta de timp termică ( $\tau_d$ )

Reprezintă timpul necesar unui termistor pentru ca temperatura sa să ajungă la 63,2% din temperatura finală atunci când este supus unui salt de temperatură în condiții de disipație nulă. Acest timp este de cca. 40...220s în funcție de varianta constructivă. Această inerție poate cauza erori în prelucrarea datelor prin imposibilitatea de a urmări variații rapide de temperatură.

### Coeficientul de disipare ( $D$ )

Reprezintă puterea consumată pentru ridicarea temperaturii corpului termistorului cu un grad.

$$D = \frac{P}{T - T_{amb}} \quad (90)$$

### Curentul și puterea maxim admisă ( $P$ )

Reprezintă valorile până la care în termistor au loc transformări reversibile. După modul cum se face încălzirea, termistoarele se pot împărți în două categorii:

- **termistoarele cu încălzire proprie**, care își modifică rezistența datorită încălzirii prin efect Joule;
- **termistoare cu încălzire indirectă**, pentru care căldura este produsă de un curent ce trece printr-o rezistență de încălzire (izolată electric de termistor) așezată în apropierea termistorului (căldura produsă de curentul propriu este neglijabilă), având în acest caz patru terminale.

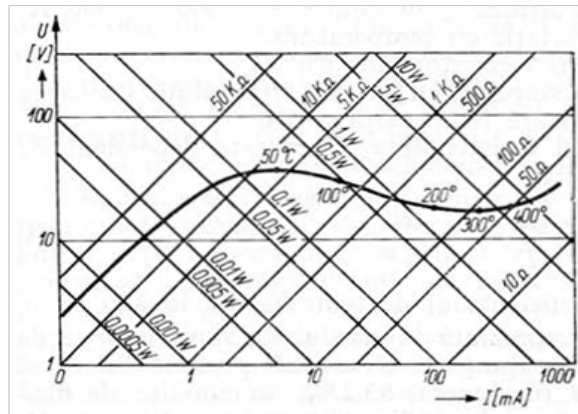


Figura 10-7 Dependența tensiune-curent pentru un termistor cu coeficient de temperatură negativ

Un termistor poate funcționa cu încălzire indirectă în zona curenților mici și cu încălzire directă în zona curenților ce produc o încălzire a termistorului. Din caracteristica  $U(I)$ , se observă că se obține un maxim al tensiunii (Figura 10-7) în funcție de curent. SE poate demonstra, că acest maxim există numai dacă  $B > 4T_{amb}$ . Pentru valori uzuale ale lui  $B$ , (2.000 .... 4.000) K, temperatura la care se obține este cuprinsă între 85 și 45°C.

Termistoarele cu coeficient de temperatură negativ sunt utilizate ca elemente neliniare pentru stabilizarea amplitudinii oscilațiilor la oscilatoare, pentru stabilizarea tensiunii, compensarea variației cu temperatura a altor elemente și în principal ca traductoare de temperatură.

### 10.9.2. Rezistoare dependente de temperatură cu coeficient de temperatură pozitiv

Termistoarele cu coeficient de temperatură pozitiv sunt fabricate pe baza de titanat de bariu ( $\text{BaTiO}_3$ ) sau soluție solidă de  $\text{BaTiO}_3$  cu titanat de stronțiu ( $\text{SrTiO}_3$ ) printr-o tehnologie asemănătoare materialelor ceramice. Prin substituirea ionilor de  $\text{Ba}^{2+}$  cu ioni trivalenți de  $\text{La}^{3+}$ ,  $\text{Ba}^{3+}$  sau a ionilor tetravalenți  $\text{Ti}^{4+}$  cu ioni pentavalenți  $\text{Sb}^{5+}$ ,  $\text{Nb}^{5+}$  se obține o conducție de tip „n”.

Prin tratament termic în atmosfera de oxigen, acesta pătrunde prin porii de la suprafața cristalelor devenind, în timpul răcirii, ioni negativi  $\text{O}^{2-}$ , captând electroni dintr-un strat superficial al cristalitei semiconductoare (tip n). Se realizează în acest mod o barieră de potențial (sarcina superficială negativă și sarcina spațială pozitivă rezultată prin deplasarea electronilor către suprafață) ce determină o rezistență suplimentară în termistor. Astfel, rezistența va fi proporțională cu:

$$R \sim n \exp\left(\frac{qV_b}{kT}\right) \quad (91)$$

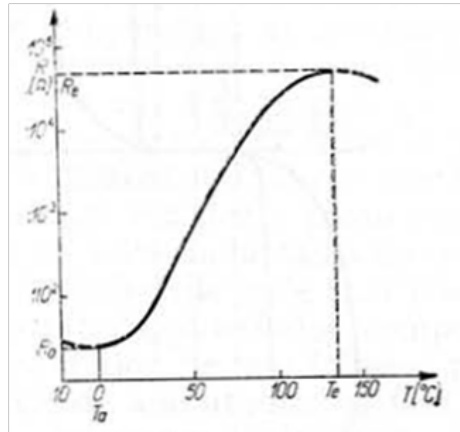


Figura 10-8 Dependența rezistenței de temperatură pentru un termistor cu coeficient de temperatură pozitiv

Potențialul barierei  $V_b$  are o variație invers proporțională cu permitivitatea materialului  $\epsilon'$ . Titanatul de bariu fiind un feroelectric,  $\epsilon'$  se modifică puternic cu temperatura, deci și rezistența este puternic influențată de temperatură. Pentru temperaturi mai mici decât temperatura Curie ( $T_c$ ) deoarece  $\epsilon'$  este foarte mare, iar polarizarea spontană compensează sarcina de volum, efectul barierei de potențial este neglijabil. Pentru  $T > T_c$  permitivitatea are valoarea:

$$\epsilon' = \frac{C}{T - T_c} \quad (92)$$

ceea ce va duce la creșterea potențialului barierei, deci va crește puternic rezistența. Pe măsura creșterii temperaturii, electronii capturați de atomii de oxigen sunt eliberați, scăzând potențialul barierei, scade rezistența ( $T > T_e$ )(Figura 10-8).

Deci efectul de creștere a rezistenței cu temperatura se manifestă într-un domeniu limitat de temperatură, deasupra temperaturii Curie (între temperaturile  $T_a$  și  $T_e$ ,  $T_a$  variind între  $-30$  și  $+180^\circ\text{C}$ ). În zona cu coeficient pozitiv de temperatură al rezistenței, legea de variație a rezistenței se poate scrie:

$$R_T = A + C e^{BT} \text{ pentru } T_a < T < T_e \quad (93)$$

unde  $A$ ,  $B$  și  $C$  sunt constante.

Rezultă coeficientul de variație cu temperatura:

$$\alpha_{RT} = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{BCe^{BT}}{A+Ce^{BT}} \quad (94)$$

Datorită structurii granulare și a permitivității foarte mari comportarea în regim dinamic se înrăutățește. În paralel pe termistor apărând o capacitate parazită. Termistoarele cu coeficient de temperatură pozitiv se folosesc în aplicații ce necesită încălzire indirectă (traductoare de temperatură, protecție la încălzire excesivă) sau încălzire directă (stabilizatoare și limitatoare de curent, protecție la scurtcircuit, supratensiuni).

## 10.10. Varistoare

Varistoarele sunt rezistoare a căror valoare este determinată de tensiunea la bornele sale. Pentru fabricarea varistoarelor se folosesc materiale pe baza de carbură de siliciu (SiC), oxid de zinc (ZnO), fiind făcute încercări și cu alți oxizi ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ). Tehnologia de fabricație este apropiată de cea a materialelor ceramice, folosindu-se materialul de bază și un liant. În urma amestecului, presării și apoi sinterizării, se obțin contacte stabile între granulele carburii de siliciu sau oxidului de zinc. După sintetizare, varistoarele sunt supuse unui tratament de îmbătrânire, supunând materialul unui regim electric în impulsuri ce depășesc tensiunea nominală de lucru. Explicația modificării rezistenței la variația tensiunii trebuie căutată în mecanismele ce se petrec la suprafața granulelor. Unul din mecanisme este legat de forma granulelor (cu proeminențe) ce duc la diferite tipuri de conducție electrică în funcție de mărimea tensiunii și supraîncălzirii contactelor dintre granule. Fenomenul ce explică într-o măsură mai mare variația rezistenței se bazează pe existența la suprafața granulelor a două tipuri de conducție, adică formarea unei joncțiuni în timpul sinterizării. La contactul dintre două granule se formează un circuit serie de două diode în opoziție.

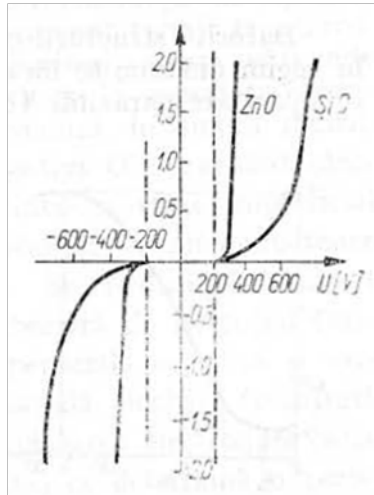


Figura 10-9 Caracteristici curent-tensiune la varistoare cu ZnO și SiC

Caracteristica unui asemenea circuit este a unui microvaristor, obținându-se în ansamblu prin suprapunere serie-paralel și paralel-serie caracteristica totală a varistorului (Figura 10-9). Pentru varistoarele oxidice (unde granulele conductoare de ZnO sunt separate de o fază intergranulară extrem de subțire ~100Å) la tensiuni mari, în regiunea de străpungere, apare *efectul de tunelare* (efect Fowler-Nordheim), în care electronii pot tunela în banda de conducție.

### Caracteristica statică

a varistorului este dată de:

$$I = aU + bU^n \quad (95)$$

unde  $a$  și  $b$  sunt constante iar  $n > 1$ .

O altă formă de exprimare a dependenței este:

$$I = KU^\alpha \quad (96)$$

unde  $K$  este o constantă care indică tensiunea de lucru a varistorului, iar  $\alpha$  este o constantă care dă neliniaritatea caracteristicii ( $\alpha \sim 5$  pt. SiC și  $\alpha \sim 25$  pt. ZnO).

Practic se realizează varistoare cu tensiuni de deschidere între 6V și 2KV și curenți în impuls de la 30mA la 4KA.

Principalii parametri ai varistorului sunt:

- *constanta K* (sau  $C$ )
- *constanta de neliniaritate  $\alpha$*  (sau  $\beta$ )
- *puterea maximă de disipație*, ce reprezintă puterea până la care în varistor au loc transformări reversibile;
- *coeficientul de temperatură al constantei C*. În general nu se indică variația rezistenței cu temperatura
- *viteza de răspuns* ( $< 10^{-7}$  s)
- *capacitatea electrică* (300 ... 15.000 pF).



Pentru studiul comportării în regim dinamic, este necesar să se considere pe lângă rezistența terminalelor  $R$ , și rezistența de fugă  $R_p$ , elementele reactive parazite, inductanța terminalelor  $L$  și capacitatea varistorului  $C$ .

Utilizările cele mai frecvente ale varistoarelor sunt pentru protecția aparatului, diferitelor componente, contactelor de rupere împotriva supratensiunilor. Se mai folosesc pentru stabilizarea tensiunii și curentului, modulație de amplitudine și fază, multiplicatoare de frecvență. Avantajul varistorului asupra diodei Zener este acoperirea unui domeniu mai mare de tensiuni și curenți de lucru și simetria caracteristicii (tensiunea poate ajunge la 1.800 V, iar curentul de vârf 4 kA).

## 10.11. Descărcătoare electrice

Descărcătoarele sunt echipamente electrice care asigură protecția izolației instalațiilor electrice împotriva supratensiunilor. Solicitățile electrice la care este supusă izolația echipamentelor electrice sunt date de următoarele tensiuni:

- **tensiunea de serviciu** (50 Hz): solicitări de lungă durată, cu valori maxime prescrise;
- **supratensiuni temporare**: solicită izolația pe o durată scurtă și au valori mai mari decât tensiunea de serviciu;
- **supratensiuni de comutație**: solicitări de scurtă durată, de regulă sub forma unor oscilații amortizate;
- **supratensiuni externe**: de origine atmosferică, care sunt supratensiuni cu durate foarte mici, având valori de vârf foarte mari.

Izolația echipamentelor electrice se caracterizează, în funcție de solicitările menționate, prin:

- tensiune nominală;
- tensiune nominală de ținere la supratensiuni de frecvență industrială;
- tensiune nominală de ținere la supratensiuni de comutație și atmosferice.

**Nivelul de izolație nominal al echipamentelor de JT** se definește prin tensiunea nominală de ținere la supratensiuni de frecvență industrială (având valori între 1000 și 3500 V, funcție de tensiunea nominală  $U_n$ );

**Nivelul de izolație nominal al echipamentelor de ÎT** se definește prin tensiunea nominală de ținere la supratensiuni atmosferice, la care se adaugă fie tensiunea nominală de ținere la supratensiune de frecvență industrială (pt.  $U_n=1...300$  kV), fie tensiunea nominală de ținere la supratensiuni de comutație (pt.  $U_n>300$  kV).

Constructiv un descărcător este alcătuit, de regulă, dintr-un dispozitiv care să permită amorsarea arcului în cazul supratensiunilor și dintr-un dispozitiv de stingere a curentului de însoțire de frecvență industrială.

În funcție de modul de realizare a dispozitivelor de amorsare și de stingere se disting următoarele categorii de descărcătoare:

- descărcătoare cu coarne;
- descărcătoare cu rezistență variabilă;
- descărcătoare cu suflaj magnetic;
- descărcătoare cu oxizi metalici.

### 10.11.1. Descărcătoare cu rezistență variabilă - DRV

Partea activă a descărcătorului este formată din spațiile disruptive (eclatoarele) 1, înseriate cu rezistența variabilă 2, ce este alcătuită din mai multe discuri de carbură de siliciu înseriate.

Construcția este protejată de anvelopa de porțelan 3, prevăzută cu capacele frontale metalice 4, având rol de etanșare a construcției și de borne de conexiuni. În interiorul anvelopei se introduc substanțe higroscopice (clorură de calciu) sau azot uscat la presiune atmosferică.

În paralel cu eclatoarele sunt cuplate rezistențele de egalizare, având rolul de a asigura o distribuție uniformă a tensiunii pe lanțul de eclatoare.

Eclatoarele sunt formate din discuri de tablă de alamă ambutisate și izolate între ele. La unele construcții, în zona eclatoarelor se montează piese din titanat de bariu, care mențin o stare de preionizare, favorabilă amorsării descărcărilor între electrozi.

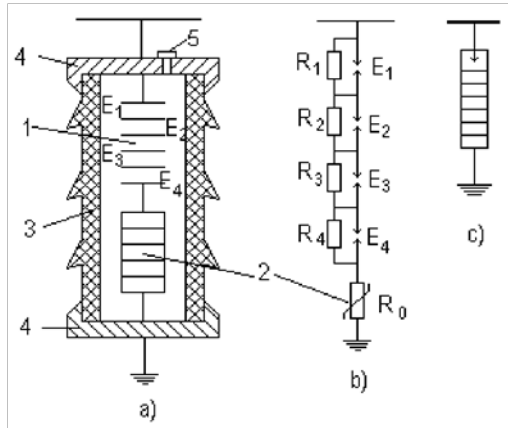
Distanța dintre electrozi corespunde amorsării la tensiuni de 3-6 kV.

Rezistența neliniară, este alcătuită din discurile 2, de carbură de siliciu (carborund), având diametre de 75-100 mm și grosimi de 20-70 mm.

În regim normal de funcționare, sub acțiunea tensiunii alternative de serviciu a liniei, prin descărcător circulă un curent de conducție având intensitatea de 0,3-1 mA, care se închide la pământ prin capacitățile dintre electrozii eclatoarelor.

Sub acțiunea unei unde de supratensiune, când se atinge tensiunea de amorsare la impuls, spațiile disruptive ale eclatoarelor sunt străpunse și prin descărcător circulă curentul de descărcare, sarcinile electrice corespunzătoare unde de supratensiune fiind conduse la pământ.

Creșterea tensiunii determină scăderea rezistenței dinamice, unda de supratensiune fiind limitată în amplitudine. Valoarea maximă a tensiunii la bornele descărcătorului după amorsare, se numește tensiune reziduală.



**Figura 10-10** Elementele constructive ale DRV: 1 - lanț de eclatoare; 2 - rezistență neliniară; 3 - carcasă de porțelan; 4 - capace metalice de etanșare; 5 - supapă mecanică. a) partea activă a unui descărcător cu rezistență variabil; b) schema electrică echivalentă a unui DRV; c) simbolul unui DRV.

Deoarece funcționarea descărcătorului cu rezistență variabilă este foarte scurtă (sub 0,01 s), protecția prin relele a instalației nu sesizează punerea la pământ produsă, și deci nu acționează.

### 10.11.2. Descărcătoare cu rezistență variabilă și suflaj magnetic

Descărcătoarele electrice pentru tensiuni foarte înalte, care trebuie să facă față atât supratensiunilor atmosferice cât și de comutație, se realizează cu suflaj magnetic pentru stingerea arcului electric.

Construcția unui descărcător tip DRVM este dată în Figura 10-11, unde  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , sunt elemente de tip varistor din carbură de siliciu,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  eclatoare,  $R_e$  - rezistor liniar de egalizare; bobinele de suflaj magnetic de inductanțe  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$  sunt conectate în paralel cu varistoarele  $R_1$ ,  $R_2$ . În Figura 10-11,b este reprezentată schema electrică echivalentă a unui descărcător DRVM.

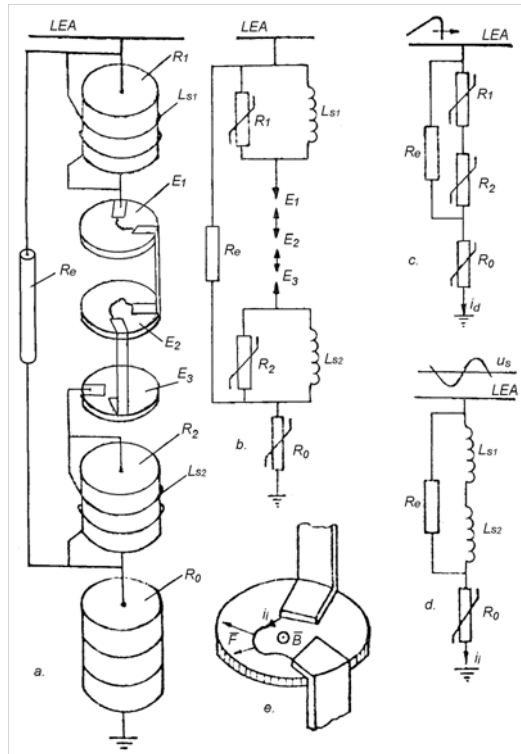


Figura 10-11 Descărcător cu rezistență variabilă și fluj magnetic

Până la un moment funcționarea descărcătoarelor tip DRV și DRVM decurge în același mod. Traseul pe care circulă curentul de descărcare al descărcătoarelor DRVM este reprezentat în Figura 10-11,c; acesta este justificat de faptul că rezistențele dinamice ale rezistoarelor  $R_1, R_2$  au valori mici (tensiunea are valori mari) în timp ce reactanțele inductive ale bobinelor de suflaj magnetic sunt de valori mari (componentele spectrului armonic al curentului de descărcare sunt de frecvențe înalte).

Când o parte importantă a curentului circulă prin bobinele de suflaj magnetic în zona eclatoarelor se produce un câmp magnetic, arcul electric fiind supus forțelor electromagnetice, care îl introduc în camera de stingere cu pereți reci. Se asigură în acest fel întreruperea curentului de însoțire la prima anulare a intensității acestuia.

### 10.11.3. Parametrii și caracteristicile descărcătoarelor cu rezistență variabilă

**Capacitatea de descărcare** - proprietatea descărcătorului de a permite, fără să se deterioreze, circulația unor curenți de impuls, specificați ca număr, formă și amplitudine.

Verificarea capacității de descărcare se face trecând prin descărcător două impulsuri succesive de curent, undă 4/10  $\mu$ s și 20 de impulsuri dreptunghiulare de curent.

**Curentul nominal** - valoarea de vârf a intensității impulsului de curent 8/20 $\mu$ s, care se poate repeta fără deteriorarea descărcătorului.

**Precizia** cu care se obține amorsarea eclatoarelor și stingerea arcului electric dintre electrozii acestora. Precizia tensiunii de amorsare se îmbunătățește prin alegerea convenabilă a formei constructive a electrozilor și printr-o repartizare uniformă a tensiunii pe lanțul de eclatoare, realizabilă cu ajutorul divizoarelor rezistive de tensiune. Cu toate aceste măsuri, abaterea tip a valorilor tensiunii de amorsare nu poate scădea sub 2 - 3%.

**Tensiunea de amorsare la impuls pe frontul undei**, reprezintă valoarea maximă a tensiunii la bornele descărcătorului, înainte de trecerea curentului de descărcare.

**Tensiunea de 100% amorsare la impuls de 1,2/50 $\mu$ s** reprezintă valoarea de vârf minimă a undei normale de impuls de tensiune care, aplicată repetat descărcătorului produce cel puțin 5 amorsări consecutive ale acestuia.

Pentru un descărcător dat, tensiunea de amorsare la impuls pe frontul undei divizată prin 1,15, tensiunea de 100% amorsări la impuls de 1,2/50 și tensiunea reziduală, sunt de valori apropiate, cea mai mare dintre acestea constituind nivelul de protecție.

Caracteristicile de protecția ale unui descărcător sunt curbele tensiune-timp de amorsare la undă de impuls normală, la care, pentru descărcătoarele destinate serviciului intensiv, se adaugă curbele tensiune-timp de amorsare la supratensiuni de comutație.

Ridicarea caracteristicii tensiune-timp de amorsare la undă de impuls normală se efectuează utilizând polaritatea impulsului care prezintă tensiunea de amorsare cea mai ridicată. Datele necesare se obțin aplicând impulsuri cu valori de vârf progresiv crescătoare pentru fiecare amorsare înregistrându-se valoarea maximă a tensiunii înainte de amorsare și durata până la amorsare, măsurată din originea convențională.

Caracteristica tensiune-timp de amorsare la supratensiuni de comutație se ridică experimental printr-un procedeu similar, pentru același tip de descărcător, aceasta obținându-se în prelungirea curbei tensiune-timp de amorsare la undă de impuls normală.

Un inconvenient important al descărcătoarelor prezentate constă în existența eclatoarelor în construcția acestora.

Prezența eclatoarelor favorizează producerea unor descărcări puternice pe suprafața exterioară a anvelopei de porțelan, mai ales când aceasta este poluată. Aceste descărcări influențează partea activă a descărcătorului, prin capacitățile parțiale C; datorită scurtcircuitării unor spații disruptive, apar creșteri ale potențialelor pe altele, astfel încât devine posibilă amorsarea accidentală completă a descărcătorului.

Utilizarea tensiunilor foarte înalte în instalațiile de transport a energiei electrice reclamă realizarea unor nivele de protecție scăzute, astfel încât scumpirea izolației, odată cu creșterea tensiunii nominale, să nu devină excesivă.

Aceste cerințe apropie nivelul de protecție de cel al supratensiunilor temporare (la care descărcătorul nu trebuie să funcționeze), încât este necesară asigurarea unei înalte selectivități în funcționare pentru un astfel de descărcător.

În acest context, dezvoltarea tehnicii descărcătoarelor trebuie să vizeze obiectivul obținerii unor materiale cu proprietăți de varistor, având caracteristica volt-ampere cât mai aproape de cea ideală.

#### 10.11.4. Descărcătoare cu oxizi metalici

Construcția și funcționarea descărcătoarelor cu oxizi metalici se bazează pe utilizarea, ca element cu caracteristică de tip varistor a unui material ceramic obținut prin sinterizare din oxizi metalici (ZnO, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoO, etc.). Structura masei sinterizate este aproape matricială, conținând granule de ZnO, cu o bună conductivitate electrică, înconjurate de o peliculă foarte fină din Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, care dă caracterul puternic nelinier al conducției electrice printr-un astfel de material.

Coeficientul de neliniaritate având valori  $a > 20$ , în construcția descărcătorului nu mai sunt necesare spațiile disruptive ale eclatoarelor și nici rezistoarele de egalizare.

Sub acțiunea tensiunii de serviciu, prin descărcător trece un curent capacitiv de mică intensitate (0,5-3 mA), punctul de funcționare situându-se pe porțiunea de impedanță maximă. La apariția unei unde de impuls de tensiune, punctul de funcționare se deplasează pe porțiunea de impedanță mică și supratensiunea este limitată la valoarea nivelului de protecție.

În comparație cu tehnica clasică (DRV, DRVM) descărcătoarele cu oxizi metalici prezintă importante avantaje, dintre care se menționează:

- simplitatea constructivă, gabarit redus și fiabilitate sporită prin eliminarea eclatoarelor și a rezistențelor de egalizare;
- nivelul de protecție este cu circa 20% mai mic decât în cazul tehnicii clasice;
- stabilitate foarte bună a caracteristicii de protecție tensiune-timp.

Drept dezavantaje ale tehnicii pe bază de ZnO se poate menționa:

- creșterea puterii consumate în regim normal de funcționare odată cu mărirea temperaturii;
- existența unui pericol de ambalare termică datorită trecerii continue a unui curent de ordinul 1-2 mA prin varistoare.

## 10.12. Elemente de afișare

### 10.12.1. Tubul catodic

Tubul electronic a fost primul element activ (amplificator) în electronică. Cu toate ca sunt demodate pentru majoritatea amplificatoarelor miniaturizate, tuburile și-au găsit locul unde trebuie manipulate tensiuni înalte sau unde sunt implicate semnale de putere mare și înaltă frecvență (în emițătoarele radio). Suplimentar acestor aplicații specializate, tuburile electronice au fost utilizate extensiv în echipamentele electronice până prin anii 1960.

## Emisia termoelectronică

Încă din anul 1883, Thomas Edison, a studiat și construit o lampă cu filament de carbon, atrăgându-i atenția înnegrirea tubului de sticlă după câteva ore de funcționare. Cu intenția de a capta unele din particulele care înnegreau sticla, a introdus în balonul de sticlă o placă metalică și a fost surprins să descopere că dacă făcea placa pozitivă în raport cu filamentul, în circuit apărea un curent. Timp de douăzeci de ani nimeni nu a știut ca acest efect numit „**efect Edison**”, era datorat electronilor emiși de filamentul cald și captați de anodul (placa) încărcat pozitiv. Termenul de „**emisie termoionică**” (**emisie termoelectronică**) a fost desemnat să descrie această eliberare activată termic de particule „ioni termici” (electroni). Cu toate ca acum cuvântul ion înseamnă un atom care a pierdut sau a primit un electron, semnificația sa originală era mult mai largă, însemnând pur și simplu o particulă liberă să călătorească.

## Construcție și funcționare

Un dispozitiv termoelectronic care este foarte puțin probabil sa devină demodat în viitorul apropiat este **tubul catodic (CRT)**. Tubul catodic este folosit ca dispozitiv de afișare în osciloscopae și bineînțeles ca dispozitiv final pentru imagine în sistemele de televiziune (receptoare și monitoare TV).

Tubul catodic este alcătuit din trei elemente de bază: un tun electronic care produce un fascicol intens și focalizat de electroni, un sistem de deflexie a fascicolului de electroni (poate fi electrostatic sau magnetic) și un ecran fluorescent care emite radiații vizibile în punctele de impact cu fascicolul de electroni, datorită stratului de luminofor existent. Fluorescența este o fotoluminiscentă care încetează practic odată cu excitația care o produce (după o întârziere de  $10^{-5} \dots 10^{-8}$  secunde), nedepinzând de temperatură. La ecranele fosforescente fotoluminiscentă continuă cu o intensitate din ce în ce mai mică și după ce a fost întrerupta excitarea. Durata sa (remanența) depinde de natura materialului (sulfura de calciu, wolfram de bariu, etc.) și de temperatura, putând depăși 1 secundă. Principalele părți constructive ale tubului catodic (CRT) cu deflexie electrostatică sunt prezentate în Figura 10-12.

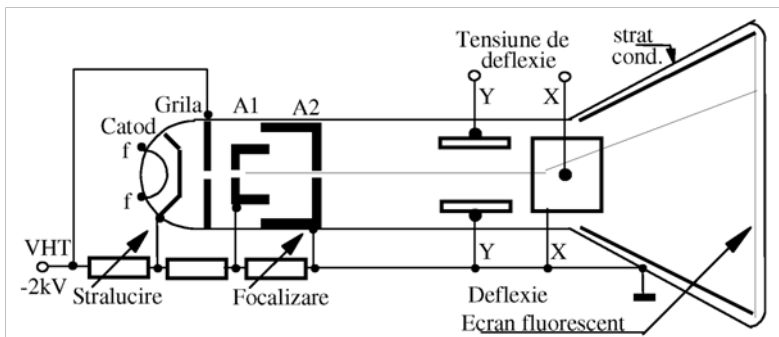


Figura 10-12 Tub catodic cu deflexie electrostatică

Catodul emite electroni care sunt accelerați spre primul anod A1 care este menținut pozitiv, la câteva sute de volți în raport cu catodul. Fluxul de electroni este controlat de grilă, a cărei polarizare negativă este reglată de controlul „de strălucire”. Fascicolul de electroni trece prin orificiul primului anod și se îndreaptă

spre al doilea anod A2, care este ușor mai pozitiv decât primul. Scopul celor doi anodi este de a produce un câmp electric local cu linii de forță curbate astfel ca toți electronii din fascicol vor converge spre același punct de pe ecranul fluorescent. Diferența de potențial dintre A1 și A2 este reglată de unitatea de control a focalizării până când pe ecran apare un spot mic și bine conturat. Aceasta combinație cu doi anodi (A1-A2) poate fi considerată ca o lentilă electrostatică. Se poate aplica în mod similar un câmp magnetic, pentru a avea o lentilă magnetică, procedeu folosit la unele tuburi catodice. Acest gen de „lentile” (electrostatice, electromagnetice) sunt larg folosite în „**microscopia electronică**”, unde combinații ale lentilelor electronice permit obținerea unor mărimi foarte mari cu rezoluții apreciabile, ca și în cazul microscopelor optice.

Fascicolul de electroni după ce părăsește zona anozilor de focalizare se îndreaptă spre plăcile de deflexie, pe care se aplica potențiale pentru realizarea deplasării verticale (plăcile Y) sau orizontale (plăcile X) a fascicolului în drumul său spre ecranul fluorescent (fosforescent). Energia fascicolului de electroni este suficient de mare pentru a produce electroni secundari, care sunt expulzați (smulși) din ecran și sunt colectați de stratul conductor care acoperă ecranul și este legat la masa montajului. De fapt există atâtea sarcini pierdute de ecran încât acesta se menține la câțiva volți pozitiv față de ultimul anod (A2).

Emisia secundară este utilizată în tuburile catodice cu memorie (stocare de imagine) care au fost folosite la osciloscopia cu memorie. Aceste tuburi catodice cu memorie (cu remanență foarte mare) sunt în stare să stocheze o imagine pe ecran pentru o durată de o oră. Aceasta proprietate este folosită pentru examinarea formelor de undă tranzitorii. Stocarea (memorarea) se face acoperind stratul fosforescent cu un strat țintă care este foarte eficient emițător de electroni secundari și de asemenea un foarte bun izolator.

Când fascicolul de electroni trasează o curbă pe ecran, stratul țintă devine pozitiv în punctele atinse de fascicol. Pentru a vizualiza aceasta imagine „stocată” se pornește un al doilea tun electronic. Acest tun produce un fascicol divergent de electroni, inundând ținta cu electroni. Ținta respinge fascicolul de electroni spre ecranul fluorescent în zonele unde aceasta a fost încărcată pozitiv și astfel se evidențiază „curba memorată”, aceasta rămâne pe ecran până când sarcina pozitivă este complet neutralizată. În practică, definiția imaginii uzual rămâne acceptabilă, pentru un interval de circa zece minute.

Cu toate că deflexia electrostatică este un standard în multe osciloscopia, ea nu este folosită la tuburile catodice folosite în receptoarele de televiziune. Aceste tuburi, cu ecrane mari cu diagonala de 60...70 cm, cer o energie mare a fascicolului de electroni pentru a asigura o „strălucire și luminozitate” adecvată, iar corespunzător unghiurilor mari de deflexie cerute ( $110^\circ$ ,  $90^\circ$ ), plăcile de deflexie ar necesita potențiale enorme dacă s-ar utiliza deflexia electrostatică. Deflexia magnetică a devenit standard pentru acest gen de aplicații. Figura 10-13 prezintă un aranjament tipic pentru deflexie magnetică, unde se folosesc două bobine pentru a produce câmpul necesar deflexiei. Trebuie amintit ca axele bobinelor sunt perpendiculare pe direcția de deflexie, spre deosebire de cele electrostatice, care sunt paralele cu direcția de deflexie.

O întreaga varietate de materiale fluorescente (fosforescente) sunt folosite în construcția tuburilor catodice. Cel mai eficient din punctul de vedere al strălucirii optice, pentru un curent dat al fascicolului de electroni incident, este verde sau verde-albastru, acestea fiind culorile uzual văzute în cazul tuburilor catodice pentru



osciloscopae. Unele materiale au o rapidă descreștere a intensității luminoase emise la încetarea expunerii la fasciculul electronic (materiale „cu persistență mică”), în timp ce altele au o „persistență lungă” (remanența de ordinul secundelor). Aceste materiale cu „persistență” (remanență) sunt folosite pentru examinarea fenomenelor tranzitorii de joasă frecvență și pentru ecranele instalațiilor radar. Unele osciloscopae cu memorie au posibilitatea de a controla „durata persistenței” prin modificarea ratei de descărcare a țintei.

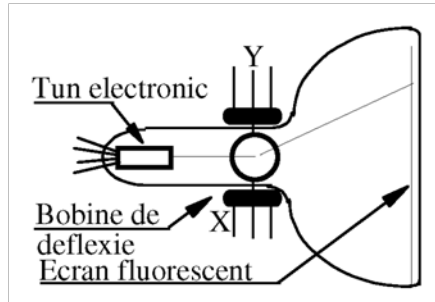


Figura 10-13 Deflexia magnetică pentru tuburi cinescop

Pentru tuburile cinescop alb-negru ale receptoarelor TV se folosesc materiale cu persistență mică pentru a împiedica „măzgălirea” (mânjirea) imaginilor în mișcare. Ca luminofori se folosesc sulfuri, selenuri, silicați, wolframați sau fluoruri ale elementelor din coloana a doua a tabelului lui Mendeleev (Zn, Cd, Mg, etc.). La aceste materiale se adaugă pentru activare Ag, Mn, Cu, Cr, ș.a.

Pentru realizarea cinescoapelor color se folosesc materiale fluorescente care corespund cât mai apropiat culorilor „primare aditive” RGB (roșu, verde și albastru) care prin combinare vor da toate culorile dorite. În cele mai răspândite tuburi cinescop color, tuburile cu masca perforată (de umbrire - **Shadow Mask**, realizat de firma RCA în 1950), ecranul este acoperit cu grupuri de puncte (3x500.000 granule de luminofori). Fiecare grup este o formație triunghiulară (în delta; nu se mai utilizează) sau în linie (tip PIL - **Precision In-Line**, RCA, 1972), din puncte de material fluorescent roșu, verde și respectiv albastru. Tubul cinescop dispune de trei tunuri electronice independente, unul acoperind punctele roșii, altul cele verzi și al treilea pe cele albastre. Cum ne putem aștepta, este necesară o aranjare extrem de precisă pentru ca fiecare tun electronic să acționeze doar asupra punctelor fluorescente corespunzătoare. Acest lucru este asigurat prin plasarea unei „măști metalice perforate (de umbrire)” cu orificii precise, între tunurile electronice și ecranul fluorescent. În această mască există câte un singur orificiu pentru fiecare grup (roșu, verde, albastru) de luminofori. Figura 10-14 prezintă schematic imaginea celor trei tunuri și a măștii perforate într-un astfel de tub cinescop. După cum se vede, masca permite tunului „roșu” să expună doar punctele fluorescente „roșii”; la fel și pentru celelalte două culori. Controlând intensitățile relative ale celor trei tunuri electronice, se poate produce orice culoare oriunde pe ecran.

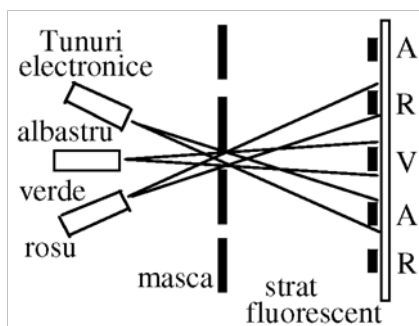


Figura 10-14 Principiul constructiv pentru un cinescop cu mască perforată

Dintre tuburile cinescop color (tricromatice) se remarcă tipul **trinitron**, creat de firma SONY în 1968. La tuburile **black-trinitron**, ecranul tubului reprezintă o porțiune din suprafața unui cilindru, ceea ce reprezintă un avantaj față de cele cu masca perforată **in-line**, care au ecranul o porțiune din suprafața unei sfere. Colturile sunt drepte, fără distorsiuni și nu reflectă lumina ambientă. Ecranul negru este mai ușor suportat de ochi, iar contrastul este mai mare.

## 10.12.2. LCD

Tehnologia TFT-LCD (Thin Film Transistors-Liquid Crystal Display) a permis apariția unei game largi de aplicații care nu ar fi fost posibile cu tehnologia CRT (Cathode Ray Tube). Ecranele LCD sunt subțiri și plate ceea ce le face ideale pentru aplicații mobile. În plus Tehnologia LCD funcționează cu tensiuni de alimentare mult mai mici și disipă puțină căldură. Inițial ecranele LCD au fost folosite la calculatoare portabile având dimensiuni și rezoluții similare ecranelor CRT cu diagonala de 12-14 inch. Tehnologia LCD a evoluat, iar în prezent sunt disponibile dimensiuni și rezoluții mult mai mari decât cele accesibile tehnologiei CRT.

În prezent tehnologia LCD a depășit monitoarele CRT în aplicații desktop. S-au găsit soluții care au făcut aceste ecrane foarte atractive: sunt foarte ușoare și subțiri. Tranzistorii TFT fac posibilă o rezoluție mai mare astfel încât chiar și computerele portabile pot afișa mai multă informație decât monitoarele CRT de ultima generație. Ecranele LCD au apărut exact în momentul când DVD player-ele au devenit populare așa că cele două tehnologii s-au susținut reciproc. De asemenea odată cu apariția rețelelor de telefonie mobilă de generația a 3-a, care permit aplicații video, ecranele LCD au o nouă piață.

O altă aplicație a ecranelor LCD o reprezintă domeniile în care există constrângeri privind spațiul ocupat. Este cazul domeniului aerospațial al domeniului medical sau cel financiar.

Pentru fiecare domeniu de aplicație există anumite caracteristici care trebuie îmbunătățite. Pentru aplicațiile mobile sunt esențiale dimensiunile, greutatea și puterea. Aplicațiile TV sau monitoarele desktop urmăresc alte caracteristici cum sunt: rezoluția, adâncimea culorii, contrastul sau strălucirea.

## Funcționarea ecranelor LCD

Cristalele lichide au fost descoperite de Fredreich Rheinizer în 1888. În anii 60 s-a demonstrat că stimulate de o diferență de potențial, cristalele lichide pot modifica proprietățile luminii care trece prin ele. Ecranele LCD color produse în prezent conțin cristale lichide (biphenyl) așezate între două straturi de sticlă transparentă.

Elementul funcțional al unui ecran LCD este pixel-ul, format dintr-o celulă LCD. Cristalele care formează celula își schimbă polarizarea sub acțiunea unei diferențe de potențial electric și modifică cantitatea de lumină care trece prin celula. Dacă se modifică diferența de potențial se modifică și cantitatea de lumină care trece prin celula. Diferența de potențial este creată printr-un sistem de electrozi. Lumina este generată de o sursă care se află în spatele ecranului.

Exista două metode de a produce imagini folosind celule LCD: metoda segmentelor și metoda matricii. Metoda segmentelor afișează caractere folosind electrozi de forme specifice. Metoda matricii afișează caractere și imagini folosind electrozi în formă de puncte.

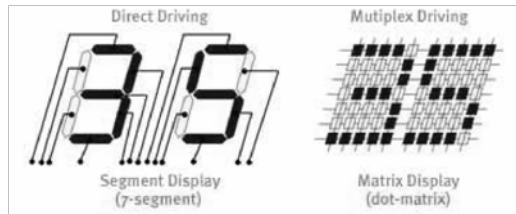


Figura 10-15 Producerea imaginilor pentru LCD

Metoda segmentelor este folosită pentru afișaje simple care trebuie să afișeze doar caractere. Metoda matricii este folosită pentru afișaje de rezoluție mare cum este cazul monitoarelor sau televizoarelor.

Exista două tipuri de adresare a elementelor matricii. Adresarea pasivă folosește un set de electrozi verticali și un set de electrozi orizontali. Fiecare pixel se află la intersecția unui electrod vertical cu un electrod orizontal. Pentru a controla strălucirea pixelului se transmite un curent pe fiecare din cei 2 electrozi. Matricea activă conține câte un tranzistor TFT (Thin Film Transistors) pentru fiecare pixel fiind nevoie de un curent mai mic pentru controlul strălucirii acestuia. Deasemenea, acești curenți pot fi comutați mult mai rapid îmbunătățindu-se astfel rata de înprospătare a ecranului.

Ecranele LCD color sunt formate din celule care conțin cristale lichide. Aceste celule sunt protejate de două straturi de sticlă transparentă. O matrice de tranzistori TFT (Thin Film Transistors) bombardează cu sarcini electrice celulele cu cristale lichide. Cristalele se reorientează și filtrează lumina albă generată de o sursă aflată în spatele ecranului. Filtrele de culoare combina roșu, verde și albastru pentru a crea culoarea dorită. Monitoarele LCD reproduc lumina printr-un proces de substracție: din lumina albă sunt extrase componente spectrale astfel încât să rezulte culoarea dorită.

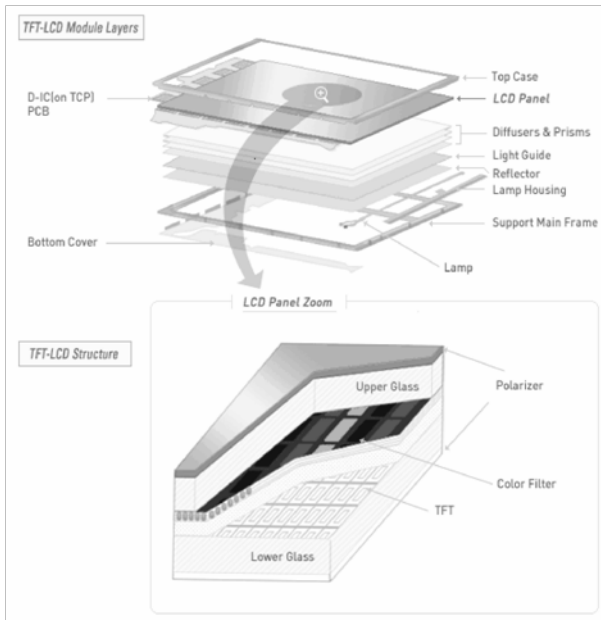


Figura 10-16 Producerea imaginilor color pentru LCD

Un pixel este format din trei sub-pixeli (roșu, verde, albastru). Fiecare sub-pixel are asociat un tranzistor TFT care controlează potențialul între electrodul glass și electrodul color-filter. Astfel se modifică direcția cristalelor și se controlează cantitatea de lumină care penetrează stratul de cristale lichide și ajunge la filtrele de culoare (roșu, verde, albastru).

### 10.12.3. Plasma

Principiile care stau la baza tehnologiei PDP (Plasma Display Panel) au fost demonstrate în anii '60. Tehnologia a fost de atunci îmbunătățită în mod constant și este acum una din cele mai utilizate soluții pentru televiziunea de mari dimensiuni. Începând cu anii '90 aproape toți producătorii de televizoare au început să se implice în dezvoltarea de PDP.

#### Funcționarea ecranelor cu plasmă

Un ecran cu plasmă (PDP) conține două straturi de sticlă aflate la o distanță de 100-200  $\mu\text{m}$ . Spațiul dintre straturile de sticlă este umplut cu un gaz rar (de obicei xenon) aflat la o presiune de 400-500 Torr.

Fiecare strat de sticlă conține pe fața interioară un număr mare de electrozi paraleli. Electrozii de pe cele două straturi au direcții perpendiculare și formează liniile și coloanele imaginii afișate. În fiecare punct de intersecție al unui electrod orizontal cu un electrod vertical se poate comanda, independent, apariția unei descărcări în gaz aplicând potențiale corespunzătoare electrozilor. Descărcarea în gaz produce lumina în spectrul vizibil și UV. Ecranele monocrome folosesc lumina albă pentru a crea imaginea. Ecranele color folosesc lumina UV pentru a excita

fosforii care emit lumina roșie, verde sau albastră. Funcționarea ecranelor color cu plasma se bazează pe compuși chimici numiți fosfori. Pentru fiecare pixel există 3 subpixeli, 3 celule roșu, albastru și verde, realizate din fosfori. Culoarea dorită se obține prin amestecul aditiv de roșu, verde și albastru.

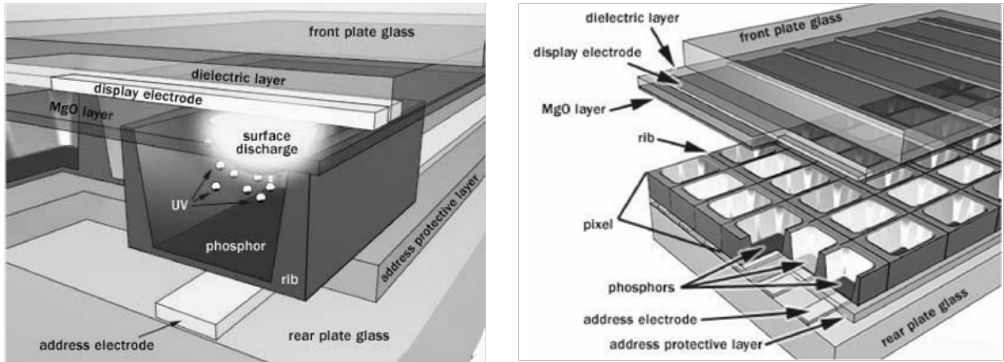


Figura 10-17 Producerea imaginilor color pentru ecranele cu plasmă

Pentru a ioniza gazul dintr-o anumită celulă sunt încărcăți electrozii care se intersectează la acea celulă. Când electrozii sunt încărcăți (cu o diferență de potențial între ei) gazul din celula este străbătut de un curent electric. Apare un transport de electroni care stimulează atomii gazului să emită lumina UV.

Lumina UV emisă interacționează cu fosforii care depuși pe pereții interiori ai celulei. Este emisă astfel lumina roșie, verde sau albastră în funcție de tipul fosforului.

Fiecare pixel este format din 3 sub-pixeli fiecare conținând un fosfor de culoare diferită (roșu, verde, albastru).

Variind intensitatea curenților care străbat diferite celule, se poate controla intensitatea luminii generate de fiecare sub-pixel obținându-se milioane de culori ca și combinații de roșu, verde și albastru.

#### 10.12.4. Plasma vs LCD

Piața televizoarelor și a monitoarelor flat este în plină expansiune. Tehnica PDP (Plasma Display Pane) a devenit un standard *de facto* pe aceasta piață. Pentru mulți consumatori termenul *plasma* a devenit sinonim cu ecranele plate, chiar dacă pe piața există și ecrane LCD.

Până nu demult piața televizoarelor plate era clar segmentată datorită faptului că ecranele LCD aveau dimensiuni de maxim 30 de inch, în timp ce tehnologia PDP permitea diagonale în intervalul 42-61 de inch. În prezent segmentele de piață ale celor două tehnologii converg pe măsură ce tehnologia LCD permite realizarea de ecrane cu diagonale mare.

Alegerea între LCD și PDP nu este una simplă. Atât LCD cât și PDP au avantaje și dezavantaje. Nici una din cele două tehnici nu este perfectă. Alegerea între LCD și PDP se face în funcție de necesitățile aplicației.

## Contrastul

Tehnologia PDP a obținut rezultate remarcabile în ceea ce privește rata de contrast. Panasonic a anunțat ca televizoarele cu plasma sunt capabile să obțină o rata de contrast de 2.000.000:1 (un raport între negrul cel mai negru și albul cel mai alb). Sistemele PDP construiesc un pixel negru dacă descărcarea în gaz este nulă.

Tehnologia LCD folosește o diferență de potențial pentru a alinia cristalele și a bloca fluxul de lumină. Cu cât diferența de potențial este mai mare, cu atât cristalele blochează mai eficient lumina. Procesul este mai complicat decât în cazul PDP și, deși în ultima perioadă s-au observat îmbunătățiri considerabile, ecranele LCD nu reușesc să obțină valori ale contrastului mai mari de 1.000.000:1.

*Avantaj:* PDP. În cazul redării unor scene care conțin simultan zone închise și zone cu strălucire mare, avantajul PDP este evident.

## Culoarea

Tehnologia PDP are disponibile, pentru fiecare pixel elemente roșii, verzi și albastre care pot reproduce 16.77 milioane de culori. Cu alte cuvinte, fiecare pixel are toate elementele necesare pentru a sintetiza orice culoare și, ca urmare, informația de culoare este reprodusă mult mai fidel pe ecranele PDP.

Tehnologia LCD reproduce o culoare printr-un proces de subtracție: din lumina albă sunt extrase lungimi de undă astfel încât să rămână culoarea dorită. Este un procedeu care nu garantează stabilitatea culorii. Deși informația de culoare beneficiază de rezoluția mai bună a ecranelor LCD (în comparație cu ecranele PDP), acestea nu impresionează din acest punct de vedere dacă sunt comparate cu ecrane PDP având aceeași rezoluție.

*Avantaj:* PDP. Ecranele PDP sunt apreciate în special în cazul imaginilor în mișcare, în timp ce ecranele LCD sunt mai bune dacă se afișează imagini statice.

## Unghiul de vizualizare

Tehnologia PDP a realizat un unghi de vizualizare care ajunge la 160° datorită faptului ca fiecare pixel își creează propria sursă de lumină și nu folosește o sursă de lumină unică, centrală.

Tehnologia LCD folosește o sursă de lumină centrală și un material de substrat care uniformizează lumina pe toată suprafața ecranului. Chiar dacă proprietățile materialului de substrat au fost mult îmbunătățite de către Sharp și NEC, unghiul de vizualizare ajunge, în cele mai fericite cazuri, până la 130°-140°.

*Avantaj:* PDP. Utilizarea ca monitor

Monitoarele LCD afișează imagini statice (provenite de la un computer) de o calitate extraordinară fără flickering și fără remanența ireversibilă. În plus rezoluția ecranelor LCD este, în general, mai mare decât cea a ecranelor PDP ceea ce constituie un avantaj atunci când trebuie afișate cantități mari de date (aplicații Excel).

Monitoarele PDP au probleme în a afișa imagini statice în special datorită remanentei ireversibile care rămâne o problema majoră a acestei tehnologii. Deasemenea rezoluția mai mică duce la scăderea calității.

*Avantaj:* LCD, mai puțin în cazul în care unghiul de vizualizare este mare.

## Utilizarea ca televizor

Tehnologia PDP are performanțe excepționale în afișarea imaginilor în mișcare. Nivelul de contrast este foarte bun, la fel și redarea culorilor.

Ecranele LCD nu oferă o calitate multumitoare în cazul afișării imaginilor în mișcare. *Avantaj:* PDP.

### **Utilizarea la altitudine înaltă**

Tehnologia LCD este preferată în cazul ecranelor folosite în avioane, deoarece nu este afectată de creșterea sau scăderea presiunii aerului. Performanțele ecranelor LCD nu sunt influențate de altitudinea la care funcționează.

Tehnologia PDP se bazează pe descărcarea electrică într-un gaz rar (de obicei xenon). Acesta se află sub presiune între două straturi de sticlă și este afectat de scăderea presiunii atunci când ecranul funcționează la altitudini mari.

*Avantaj:* LCD.

### **Durata de viață**

Durata de viață a ecranelor LCD este între 50.000 și 75.000 de ore. Un ecran LCD este funcțional atât timp cât sursa centrală de lumină este funcțională. Sursa de lumină poate fi ușor înlocuită.

Ecranele PDP sunt afectate de îmbătrânirea fosforilor care își pierd în timp strălucirea. După aproximativ 20.000 - 30.000 de ore de funcționare, strălucirea acestora se înjumătățește. Fosforii nu pot fi înlocuiți.

*Avantaj:* LCD. Ecranele LCD sunt preferate în aplicațiile care funcționează 24/7.

### **Remanența ireversibilă**

Ecranele PDP pot suferi un efect de remanență ireversibilă produs de imaginile statice. După perioade mai lungi (15 minute), imaginile nemișcate produc acest efect, utilizatorul rămânând pentru totdeauna cu imaginea „fantoma” pe fundal.

Ecranele LCD nu sunt vulnerabile la acest efect. *Avantaj:* LCD.

### **Dimensiunea diagonalei**

Ecranele cu plasma sunt fabricate la dimensiuni care ajung să aibă diagonale de până la 90 inch. Prețul acestor ecrane este mare însă nu există o scădere a calității ecranelor odată cu creșterea diagonalei.

Materialul de substrat utilizat în tehnologia LCD pentru uniformizarea sursei centrale de lumină pe ecran este dificil de produs pentru ecrane cu dimensiune mare. Cele mai mari ecrane LCD produse în acest moment au diagonala de 52 inch. *Avantaj:* PDP

### **Energia consumată**

Deoarece tehnologia LCD folosește o sursă centrală de lumină consumă mult mai puțină energie decât tehnologia PDP. Ecranele LCD folosesc jumătate din energia consumată de ecranele PDP. Motivul: Tehnologia PDP luminează independent fiecare pixel, chiar și pixelii negrii. *Avantaj:* LCD.

### **Greutatea**

Ecranele PDP sunt destul de grele și, în unele cazuri au nevoie de suporti suplimentari pentru a putea fi montate pe perete.

Ecranele LCD cântăresc mai puțin decât ecranele PDP de aceeași mărime. *Avantaj:* LCD.

### **Transportul**

Datorită naturii fragile, ecranele PDP trebuie transportate cu grijă. Nu se recomandă transportul cu un curier rapid. Metodele speciale de transport ajung la costuri foarte mari datorită greutateii ecranului.

Transportul ecranelor LCD nu este dificil și nici atât de costisitor ca transportul ecranelor PDP. *Avantaj:* LCD.

### **Instalarea**

Ecranele PDP sunt mai grele, consumă mai mult curent și se încălzesc mai tare decât ecranele LCD, și de aceea trebuie montate cu grijă. Se recomandă ca ecranele PDP să fie montate de specialiști.

Ecranele LCD sunt mult mai puțin pretențioase, și pot fi instalate cu ușurință de către utilizatori.



# Cap.11. Cablaje imprimate

## 11.1. Generalități

Utilizarea cablajelor (circuitelor) imprimate constituie actualmente soluția constructivă cea mai performantă și mai răspândită de interconectare a componentelor în circuite electrice/electronice din montaje, aparate și echipamente electronice. Folosite pentru prima dată în 1945 (în aparatură militară), cablajele imprimate au înlocuit, treptat și pretutindeni, vechile cablaje „spațiale”, filare (convenționale), introducând modificări importante în construcția și tehnologia echipamentelor electronice atât profesionale cât și de larg consum.

Principalele avantaje ale cablajelor imprimate sunt:

- realizează o mare densitate de montare a componentelor, permițând reducerea volumului și greutateii (deci miniaturizarea) aparatelor electronice;
- asigură poziționarea precisă și fixă a componentelor și a interconexiunilor acestora în circuite - permițând creșterea fiabilității în funcționare și reducerea/compensarea cuplajelor parazite dintre componente și/sau circuite;
- asigură o rezistență superioară a echipamentelor electronice (din care fac parte) la solicitări mecanice, termice și climatice, îmbunătățind totodată considerabil mentenabilitatea acestora;
- simplifică și reduce durata operațiilor de montaj, facilitând automatizarea acestora, reducând posibilitățile de montare eronată și asigurând un înalt grad de reproductibilitate;
- fac posibilă unificarea și standardizarea constructivă a subansamblelor (blocurilor, modulelor) funcționale din structura aparatelor/echipamentelor electronice, permițând interconectarea simplă, rapidă, precisă și fiabilă a acestora.

Există totuși și unele dezavantaje, minore, ale cablajelor imprimate:

- orice modificări ulterioare ale circuitelor (și, uneori, chiar ale componentelor) sunt relativ dificil de efectuat;
- majoritatea tipurilor de cablaje imprimate sunt sensibile la șoc termic - ceea ce impune unele precauții la lipirea terminalelor componentelor.

## 11.2. Structura și clasificarea cablajelor imprimate

Un cablaj imprimat este un sistem de conductoare plate (imprimate) amplasate în unul, două sau mai multe plane paralele și fixate (cu adeziv) pe suprafața unui suport electroizolant (dielectric) care asigură și susținerea mecanică a componentelor.

### 11.2.1. Suportul electroizolant

Suportul electroizolant al circuitelor imprimate este realizat din materiale având proprietăți fizico-chimice, electrice, mecanice și termice adecvate.

Există mai multe categorii de asemenea materiale, dar cele mai frecvent utilizate în prezent pentru cablaje rigide sunt:

- **PERTINAXUL** (temperatura maximă de lucru 105°C) - pe bază de textură din hârtie impregnată cu rășini fenolice - ce constituie materialul standard pentru solicitări normale în cele mai diverse aplicații.
- **STECLOTEXTOLITUL** (temperatură maximă de lucru: 150°C) - pe bază de textură din fibre de sticlă impregnată cu rășini epoxidice - larg utilizat în aparatura electronică profesională întrucât permite obținerea unor performanțe superioare.

În ultimul timp, pentru realizarea cablajelor profesionale sunt utilizate și suporturi ceramice (anorganice) având proprietăți termice excelente, dar rezistență mecanică (la șocuri) redusă.

Circuitele imprimate flexibile utilizează drept suport materiale termoplaste ca: ACLAR (max. 200°C), TEFLON (max. 274°C), KAPTON (max. 400°C).

### 11.2.2. Traseele conductoare

Traseele conductoare (cablajul imprimat propriu-zis) se realizează din materiale având proprietăți adecvate: rezistivitate electrică redusă, bună sudabilitate, rezistentă mare la coroziune. În general, cel mai frecvent utilizat material este cuprul electrolitic de înaltă puritate - formând o folie (de grosimi normalizate uzuale: 35 μm sau 70 μm) aplicată pe suprafața suportului electroizolant (împreună cu care formează semifabricatul „placat” din care, prin operații tehnologice specifice, se obțin cablajele imprimate având diferite structuri, configurații, dimensiuni etc.)

În unele aplicații profesionale se pot utiliza și aurul, argintul sau nichelul, în scopul facilitării lipirii terminalelor componentelor (pe aceste trasee conductoare) ca și pentru asigurarea unor contacte electrice fiabile (în cazul utilizării unor conectoare special construite pentru cablaje imprimate, folia de cupru se acoperă - uneori - cu o peliculă de cositor (prin „precursorire”), de aur sau de argint.

### 11.2.3. Adezivi

Adezivii utilizați pentru fixarea foliei de cupru pe suportul electroizolant de tip PERTINAX - de regulă, rășini speciale - trebuie să reziste la temperatura de lipire și să fie suficient de elastici (pentru a prelua - la lipire - diferențele de dilatare dintre suport și folie).

Materialele electroizolante de tip STECLOTXTOLIT nu necesită adezivi.

Semifabricatele placate cu cupru se produc la diferite dimensiuni - mai frecvente fiind: 900x900 mm sau 900X1800 mm. Din acestea se debitează plăcile cu viitoarele cablaje imprimate ale căror dimensiuni nu trebuie să depășească 240x360 mm - pentru cablaje simplu/dublu strat și 200x240 mm - pentru cablajele multistrat, astfel încât procesul tehnologic de realizare a acestora să nu devină prea dificil.

O clasificare a cablajelor imprimate se poate face după numărul planelor în care sunt amplasate traseele conductoare precum și după caracteristicile mecanice ale suportului izolant:

**Cablajele cu o față** („cablaje simplu strat” sau „cablaje monostrat”) - sunt cele mai vechi și mai frecvent utilizate cablaje imprimate, fiind destinate - în special - aparatului electronic de larg consum. Au cel mai simplu proces tehnologic de fabricație și cele mai reduse costuri de producție, dar nu permit obținerea unor mari densități de montaj, motiv pentru care ponderea lor - pe ansamblul producției de cablaje imprimate - este în scădere;

**Cablajele dublu față** („cablaje dublu strat”) - sunt actualmente cele mai utilizate în construcția aparatelor și echipamentelor electronice profesionale întrucât asigură o densitate ridicată de montaj, la un preț de cost relativ scăzut. Procesul tehnologic de realizare este însă mai complex, implicând - în unele cazuri - și metalizarea găurilor în care se implantează terminalele componentelor.

**Cablajele multistrat** - sunt destinate exclusiv echipamentelor electronice profesionale întrucât asigură o densitate de montaj și proprietăți electrice superioare tuturor celorlalte tipuri (permițând interconectarea mai simplă a numeroase circuite integrate tip LSI sau VLSI). Dar procesul lor tehnologic de realizare este complex și costisitor întrucât metalizarea găurilor este mult mai dificilă.

**Cablajele cu suport flexibil** - au tendința de-a înlocui, în ultimul timp, atât cablajele imprimate rigide - prezentate mai sus - cât și „forme de cablu” (compuse din diferite tipuri de conductoare) care interconectează subansamblele echipamentelor electronice.

Cablajele imprimate flexibile au numeroase avantaje:

- sunt mai ușoare și mai puțin voluminoase decât cele rigide (fiind destinate în principal echipamentelor la care greutatea și volumul sunt esențiale - de ex. aparatele electronice aerospațiale, calculatoarele electronice etc.;
- permit realizarea unor mari densități de montaj și obținerea unei fiabilități superioare în exploatare, reducând mult - sau chiar eliminând - posibilitatea cuplajelor parazite între circuite;
- formează un sistem de interconectare tridimensională întrucât nu numai că pot fi - eventual - îndoite, răsucite și deplasate, dar pot

avea orice geometrie (spre diferență de cablajele rigide având, de regulă, formă dreptunghiulară).

Dar lipirea componentelor pe astfel de cablaje este, de obicei mai avantajoasă dacă se efectuează manual (deci cu o productivitate relativ scăzută) și nu automat.

### 11.3. Metode și tehnologii de realizare a cablajelor imprimate

Prin tehnologie de realizare se înțelege realizarea cablajelor imprimate cu mijloace industriale sau artisanale. Cablajul imprimat este un sistem de conductoare imprimate care asigură toate conexiunile electrice dintre componente, ecranările și punerile la masă. Conductoarele imprimate reprezintă o porțiune de strat metalizat pe un suport izolat, echivalent unei conexiuni electrice obișnuite de montaj. Procesul de proiectare a cablajelor imprimate constă în plasarea elementelor de circuit pe placă și în stabilirea traseelor în conformitate cu schema electrică și principiile de proiectare. Principiile de proiectare sunt o consecință de natură electrică (tensiunea maximă între două trasee conductoare alăturate, intensitatea maximă a curentului ce parcurge fiecare traseu conductor, frecvența maximă, minimizarea cuplajelor parazite între elementele schemei), mecanică (solicitări mecanice în timpul funcționării), climatice (asigurarea unui regim termic corespunzător prin evacuarea căldurii produse în timpul funcționării, umiditatea relativă, temperatura mediului ambiant), tehnologice (tehnologia de realizare, de echipare, de conectare).

Lățimea maximă a conductorului imprimat este dată de intensitatea maximă a curentului electric ce parcurge traseul.

Lățimea efectivă a traseului conductor imprimat rezultă din compromisul dintre două criterii și anume:

- asigurarea unei supratemperaturi din punct de vedere al disipației;
- asigurarea de impedanțe proprii traseului de valoare optimă.

Frecvența de lucru a subsansamblului este o condiție fundamentală. Pentru cablaje imprimate se definesc două domenii pe frecvență de lucru cu particularizarea corespunzătoare și anume:

- frecvență mai mică de 100Hz, pentru sursele de alimentare, amplificatoare de audiofrecvență etc.;
- frecvență mai mare de 100Hz, pentru aparatura radio și TV etc. La creșterea frecvenței semnalelor electrice apar două efecte nedorite:
  - creșterea efectului capacității parazite;
  - creșterea rezistenței electrice a traseelor conductoare imprimate prin efect pelicular.

Pentru reducerea capacităților parazite între trasee se realizează asamblarea judicioasă pe placă a elementelor în sensul reducerii lungimii conexiunilor și prin introducerea unor trasee de ecranare conectate electric la masa plăcii între traseele de semnal.

Proiectarea cablajelor imprimate se face respectând următoarele principii:

- principiul de cuadripol: constă în respectarea, conform schemei electrice a ordinii intrare-ieșire, precum și a ordinii de asamblare pe placă a etajelor care procesează un semnal.
- principiul respectării căilor de semnal: traseele de semnal mic se poziționează departe de traseele de semnal mare pentru a minimiza cuplarea parazită (inductivă sau capacitivă). Dacă spațiul nu permite depărtarea căilor de semnal se va folosi ecranarea.
- principiul decuplării într-un punct de masă comun: decuplarea la masă a condensatoarelor de cuplare în puncte cât mai apropiate.

Solicitările mecanice la care va fi supus subansamblu determină grosimea plăcii cablajului. Structura constructivă a ansamblului este și o consecință a tipăririi unor elemente mecanice.

Dimensiunile geometrice și masa componentelor electronice, electrice și de altă natură amplasate pe placa cu cablaje imprimate, precum și structura constructivă a ansamblului determină gabaritul subansamblelor. Modul de interconectare a subansamblului în sistem influențează proiectarea plăcilor cu cablaje imprimate. Există mai multe posibilitatea de interconectare și anume: prin fixarea de conexiune, interplăci, conectarea directă, conectarea indirectă.

Dacă placa este asamblată vertical, elementele disipative sunt plasate la partea superioară cu axele de simetrie mai mari dispuse vertical pentru optimizarea convecției termice. Dacă placa este asamblată orizontal, elementele disipative sunt plasate pe distanțiere din materiale termoizolante și termorigide, având poziție opusă referitor la evacuarea căldurii (se practică orificii pentru optimizarea convecției naturale). Funcționarea subansamblelor electronice în condiții de umiditate ridicată, impune următoarele măsuri:

- distante mai mari între traseele conductoare imprimate;
- acoperirea traseelor cu vopsea termorigidă.

Tehnologia de realizare a cablajelor imprimate determină proiectarea acestora și pot fi grupate în trei categorii:

- tehnologii substructive: se pleacă de la un semifabricat, traseele conductoare imprimate obținându-se prin îndepărtarea metalului din porțiunile ce trebuiesc să fie izolatoare;
- tehnologii aditive: traseele conductoare imprimate obținându-se prin fixare și formare pe placa suport dielectrică în forma definitivă;
- tehnologii de sinteză: izolatorul și traseele se realizează în aceeași etapă.

Documentația tehnică pentru execuția unui cablaj imprimat trebuie să cuprindă următoarele desene:

- desenul de bază: este executat de către proiectant după schema electrică; reprezintă imaginea fetelor echipate și prin transparență se obține imaginea fețelor cu traseele;
- desenul de poziționare al găurilor sau planul de găuri ce trebuiesc practicate în placa cu cablajul imprimat și numere de ordine asociate găurilor, corespunzătoare echipării prin plantare;
- desenul de acoperire selectivă reprezintă imaginea (găurilor) fetelor lipite, acoperite cu vopsea termorigidă;
- desenul de cablaj: (de trasare) reprezintă la scară, imaginea traseelor conductoare imprimate, văzute dinspre fața de lipire;

- desenul de inscripționare sau poziționare, reprezintă simbolizat, la scară, poziția componentelor care urmează să echipeze placa de cablaj imprimat, văzute dinspre placa de echipare.

Etaplele de stabilire a documentației necesare la realizarea cablajelor imprimate sunt următoarele:

- întocmirea listei cu componentele utilizate la realizarea subansamblului;
- extragerea din cataloage a dimensiunilor componentelor;
- elaborarea desenului de baza a subansamblului;
- numerotarea pe schema electrică tipurile de capsule utilizate, numerele terminalelor, adresele de conectori;
- realizarea după desenul de bază succesiv toate celelalte desene cerute de documentația tehnică.

După stabilirea documentației se trece la realizarea practica a cablajului imprimat. În cazul acestui cablaj, ca tehnologie de realizare se folosește cea substractivă. Etapele realizării practice sunt:

- punctarea plăcii de cablaj, după desenul de baza realizat;
- găurirea plăcii;
- acoperirea foliei de cupru, în vederea obținerii traseelor conductoare, cu cerneală serigrafică;
- se așteaptă uscarea cernelii;
- corodarea cu clorură ferică;
- curățarea cernelii cu diluant;
- cositorirea traseelor conductoare a cablajului imprimat;
- lipirea componentelor pe placă;
- verificarea lipiturilor.

Pentru realizarea cablajelor imprimate - cu mijloace industriale sau artisanale - se pot utiliza peste 30 metode (tehnologii) diferite ce pot fi, totuși, grupate în două mari categorii, principial opuse:

- **metodele substructive** („de corodare”) - implicând prelucrarea unui semifabricat placat cu cupru și obținerea traseelor circuitului imprimat prin înlăturarea unor porțiuni din folia electroconductoare aderentă la suportul electroizolant. Îndepărtarea acestor zone se poate face fie pe cale chimică (prin corodare) - având în prezent cea mai mare pondere pe ansamblul cablajelor imprimate - fie pe cale mecanică, prin segmentarea și eliminarea foliei.
- **metodele aditive** („de depunere”) - impunând metalizarea unui semifabricat din material electroizolant neplacat. Din această categorie fac parte: metoda electrochimică, metoda transferului, metoda arderii în cuptor și metoda pulverizării catodice și termice etc.

Actualmente predomină metodele substructive, dar a apărut și o tendință de extindere a metodelor de depunere - având în vedere necesitatea reducerii consumului de cupru.

Există și o a treia categorie de metode (mai rar utilizate) - „metode combinate” - la care se folosesc tehnologii specifice atât metodelor substructive cât și celor aditive.

Aproape în toate cazurile este necesară transpunerea configurației: circuitului de realizat de pe un desen pe semifabricatul de prelucrat. Această

operație se realizează industrial - cu metode fotografice, serigrafice sau offset, iar artizanal - prin desenare manuală sau vopsire cu șablon și pensulă (sau pulverizatori).

### 11.3.1. Realizarea cablajelor imprimate monostrat prin metode de corodare

În prezent, cablajele imprimate se realizează aproape exclusiv prin metode de corodare. Transpunerea desenului pe folia din cupru realizându-se fie prin fotografiere, fie prin serigrafie.

Orice proces tehnologic de realizare a cablajelor imprimate prin metode de corodare comportă următoarele etape principale:

- Realizarea desenului de cablaj (la o scară mărită, între 2:1 - pentru cablajele normale, și 4:1 - pentru cablajele de mare finețe) pe hârtie specială, conform principiilor de proiectare a cablajelor imprimate. Traseele conductoarelor imprimate se desenează cu tuș negru (sau se realizează din elemente adezive, special concepute), obținându-se astfel originalul desenului cablajului imprimat („foto-originalul”).
- Realizarea filmului fotografic („fotoșablonului” sau „măștii”) prin fotografierea fotooriginalului pe film de mare contrast și cu reducere corespunzătoare a formalului (la scara desenului), astfel încât negativul foto obținut să rezulte în mărime naturală.
- Transpunerea (imprimarea) imaginii cablajului de pe filmul fotografic pe suportul placat cu cupru - fie prin metoda fotografică, fie prin metoda serigrafică.
- Efectuarea unor prelucrări mecanice adecvate (după realizarea corodării): găurire, tăiere (decupare), debavurare etc. urmate de realizarea unei acoperiri de protecție (lăcuire).

#### Metoda fotografică

În cazul transunerii imaginii cablajului imprimat de pe film (fotoșablon) pe semifabricatul placat prin metoda fotografică, principalele etape ale procesului tehnologic respectiv sunt: pregătirea suportului placat, acoperirea suportului placat cu fotorezist, expunerea la lumină prin fotoșablon, dezvoltarea, fixarea, îndepărtarea fotorezistului neimpresionat, corodarea, acoperirea de protecție.

Această metodă permite obținerea unor rezoluții și precizii maxime - deci a unor trasee fine de cablaj - dar are dezavantajul productivității scăzute și este costisitoare. În consecință, se utilizează cu precădere în producția de scrie mică și de unicate.

Într-o primă fază - conform primelor două etape - după o spălare și o degresare prealabilă a foliei de cupru, aceasta se acoperă cu un strat fotosensibil de fotorezist.

În faza următoare, se expune stratul de fotorezist la lumină prin intermediul fotoșablonului (realizat anterior) transferându-se astfel configurația circuitului imprimat de realizat pe folia de cupru.

După dezvoltare și fixare fotografică, anumite zone din fotorezist devin insolubile, iar celelalte pot fi dizolvate și îndepărtate cu ajutorul unui solvent

special. Astfel, la fotorezistul negativ, porțiunile expuse la lumină polimerizează și devin insolubile, spre diferență de fotorezistul pozitiv la care zonele neexpuse luminii devin insolubile.

Se obține astfel - în primul caz - o acoperire a foliei de cupru cu fotorezist, doar în zonele corespunzătoare porțiunilor transparente ale fotoșablonului. Stratul rămas se fixează pentru a-i mări rezistența la reactivul de corodare.

Urmează - conform ultimelor două etape - faza de prelucrare a foliei de cupru. Cea mai importantă etapă constă în corodare (specifică metodelor substructive), implicând imersarea semifabricatului placat într-o cuvă (de dimensiuni adecvate) cu clorură ferică. Au loc reacții chimice determinând corodarea și îndepărtarea foliei de cupru numai în zonele neacoperite cu stratul protector de fotorezist corespunzând, în cazul fotorezistului negativ, zonelor neexpuse la lumină (deci porțiunilor opace ale fotoșablonului). Corodarea poate dura până la câteva zeci de minute și se consideră încheiată atunci când în zonele neacoperite de fotorezist apare suportul electroizolant al semifabricatului. După corodare se realizează succesiv:

- îndepărtarea stratului protector de fotorezist (depus pe traseele circuitului imprimat);
- debitarea/decuparea plăcii la dimensiunile finale;
- efectuarea găurilor necesare montării componentelor pe placă și a plăcii în aparat/echipament;
- debavurarea muchiilor plăcii și a găurilor;
- curățarea (cu apă caldă și spirt);
- lăcuirea - în scopul asigurării protecției anticoroziune și al facilitării efectuării lipirilor cu cositor.

Se obține astfel un produs finit - placa cu cablaj imprimat (sau cu „circuite imprimate”) - pe care urmează să se monteze (prin implantare și lipire) toate componentele pasive și active prevăzute.

### **Metoda serigrafică**

Transpunerea imaginii cablajului imprimat de pe filmul fotografic (fotoșablon) pe semifabricatul placat se poate efectua și prin metoda serigrafică („serigrafică”). Deși aceasta metoda realizează unii parametri calitativi inferiori celor obținuți prin metoda fotografică (rezoluție: 1,5 mm în loc de 0,5 mm; precizie:  $\pm 0,3$  mm în loc de  $\pm 0,15$  mm), ea este larg utilizată în producția industrială de mare serie a cablajelor imprimate întrucât asigură obținerea unei productivități maxime și a unui preț mai redus, permițând totodată automatizarea totală a procesului tehnologic respectiv.

Principalele etape ale metodei serigrafice sunt:

- pregătirea suportului placat;
- realizarea sitei serigrafice;
- acoperirea suportului placat cu cerneală serigrafică;
- corodarea;
- acoperirea de protecție.

În acest caz, configurația cablajului imprimat de realizat este protejată contra corodării prin aplicarea unui strat de vopsea/cerneală serigrafică specială, cu ajutorul unei „site serigrafice” specifice.



Această sită (sau „șablon”) este de regulă o „pânză” cu ochiuri foarte fine și bine întinsă pe o rama dreptunghiulară având dimensiunile mai mari decât cele ale plăcii cu cablaj imprimat. Realizarea sitei serigrafice implică obturarea anumitor ochiuri în scopul transpunerii imaginii alb/negru de pe filmul fotografic într-o imagine cu ochiuri obturate, respectiv libere, pe sită. În acest scop, pe sita nouă (având toate ochiurile libere) se aplică

mai întâi un strat fotosensibil din fotorezist care este expus la lumină prin intermediul fotoșablonului pozitiv (conținând configurația cablajului imprimat), în ochiurile iluminate, fotorezistul polimerizează și se întărește (fixându-se pe sită și obturându-i ochiurile), în timp ce în zonele neluminate fotorezistul poate fi îndepărtat (prin spălare cu apă caldă) permițând reparația ochiurilor libere. Astfel, sita devine un „negativ” conținând imaginea cablajului imprimat.

În etapa următoare, se transpune (imprimă) această imagine pe folia de cupru a semifabricatului placat. Pentru aceasta, se pune sita în contact direct cu folia, iar pe cealaltă față a sitei se aplică vopsea/cerneală serigrafică prin întindere - pe întreaga suprafață a sitei - cu ajutorul unei raclete (șpaclu) speciale. Translatând această racletă, cerneala serigrafică va pătrunde prin ochiurile rămase libere ale sitei, imprimându-se pe folia de cupru - zona ochiurilor obturate rămânând neacoperită cu cerneală.

Astfel se obține pe folia de cupru o imagine „pozitivă” și în relief a cablajului imprimat, realizată cu ajutorul vopselei/cernelei serigrafice. După uscarea acesteia, se realizează corodarea și celelalte operații indicate la metoda fotografică.

În producția de serie - conform metodei serigrafice - a cablajelor imprimate, se utilizează mașini specializate - manuale, semiautomate sau automate.

### 11.3.2. Realizarea fotooriginalului

Configurația cablajului imprimat de realizat este transpusă pe folia de cupru a semifabricatului - printr-una din metodele mai sus indicate - plecând de la un fotoșablon („Film fotografic” sau „mască”) ce se obține, la rândul lui, prin fotografierea configurației originale a cablajului imprimat.

Prin fotooriginal se înțelege acest suport informațional al configurației cablajului imprimat de realizat. Modalitățile actuale de realizare a unui fotooriginal pentru cablaje imprimate sunt: manual prin desen, prin aplicarea de benzi adezive și automat prin printare sau plotare.

De regulă, fotooriginalul este un desen la scară mărită (2:1... 4:1) al cablajului și realizat pe o hârtie specială care asigură atât stabilitatea dimensională cât și contrastul necesar fotografierii. Executarea desenului implică de fapt proiectarea cablajului imprimat - proces relativ complex, ce se realizează fie manual, fie automatizat („proiectare asistată de calculator”), respectând anumite reguli. Plecând de la schema de principiu și parametrii electrici ai blocului funcțional pentru care trebuie proiectat cablajul imprimat, se realizează:

- poziționarea componentelor - în funcție de tipul, rolul, caracteristicile și dimensiunile lor — determinându-se locul punctelor de implantare a terminalelor acestora (ce corespund viitoarelor găuri ale cablajului);
- determinarea traseelor conductoare de interconectare a componentelor - stabilind poziția, lățimea, lungimea și distanțele

relative ale acestora (fără ca traseele să se intersecteze în același plan);

- amplasarea găurilor de fixare mecanică (a unor componente pe placă și a plăcii în aparat).

Principalele aspecte ce trebuie avute în vedere sunt următoarele:

- găurile pentru terminalele componentelor se plasează în nodurile unei rețele (imaginare) având pasul de 2,5 mm;
- diametrele acestor găuri au valori normalizate: 0,8 mm; 1,3 mm și 2 mm;
- lățimea traseelor conductoare depinde de intensitatea curentului prin ele, de temperatura mediului ambiant și de grosimea foliei de cupru (0,35  $\mu\text{m}$  sau 0,70  $\mu\text{m}$ , standardizat);
- distanța minimă între 2 trasee conductoare învecinate este determinată de diferența de potențial dintre acestea;
- pentru reducerea la minimum a posibilelor influențe reciproce, se amplasează cât mai distanțat - grupate separat - traseele de semnal mic și cele de semnal mare, căile de joasă frecvență și cele de înaltă frecvență etc.;
- conductorul de masă se realizează distinct de celelalte conductoare imprimate, având, de preferință, o lățime cât mai mare.

Având în vedere toate aceste considerente, se realizează mai întâi o schiță preliminară de montaj pe baza căreia - după optimizarea și definitivarea tuturor pozițiilor și dimensiunilor - se execută fotooriginalul.

Pe desenul fotooriginalului se reprezintă traseele conductoare și toate găurile (pentru componente și fixare) - fie prin trasare cu tuș negru, fie prin lipirea unor elemente adezive, special concepute (ca de ex.: segmente de traseu de diferite lățimi și lungimi, drepte sau curbe, „pastile de lipire” - pentru diferite tipuri de componente etc.).

Utilizarea elementelor adezive este foarte eficientă întrucât permite realizarea rapidă și estetică a fotooriginalului. În cazul unicateilor (inclusiv al cablajelor experimentale), unele tipuri de elemente adezive pot fi fixate direct pe folia de cupru - înainte de corodare - preluând rolul protector al fotorezistului (de la metoda fotografică) sau al cernelii serigrafice (de la metoda serigrafică).

În absența unor astfel de elemente adezive și numai în cazul unicateilor, desenul cablajului imprimat poate fi realizat și direct pe folia de cupru (fără fotooriginal și fotoșablon), utilizând lichide speciale (ca de ex.: tușul carmin, lacul diluat cu tiner, tinctura de cositorit) rezistente la acțiunea clorurii ferice din baia de corodare.

Aceasta este „metoda manuală” de realizare a desenului cablajului imprimat pe folia de cupru. O variantă a sa, permițând producția economică și în serie mică a cablajelor imprimate fără fotografiere/serografiere, constă în utilizarea unui șablon (din hârtie, preșpan sau foiță metalică) și vopsirea foliei de cupru prin acesta - cu ajutorul unei pensule sau al unui pulverizator.

În afară de fotooriginal („desen de cablaj”) documentația tehnică necesară producției în serie a unei plăci de cablaj imprimat include: desenul de bază, desenul de poziționare a găurilor, desenul de acoperire selectivă, desenul de poziționare (sau de inscripționare), desenul de echipare.

### 11.3.3. Realizarea cablajelor imprimate multistrat

În prezent există câteva sute de metode pentru realizarea cablajelor imprimate multistrat, diferența dintre ele constând, în principal, din modul de realizare a conexiunilor electrice la straturi.

Practic, se utilizează două grupe de procedee de interconectare:

- **procedeele chimice** („de galvanizare”)
- **procedeele mecanice** (prin sudură, lipire, niluire).

Peste 80% din cablajele multistrat produse în prezent în lume sunt realizate pe baza procedeelelor chimice care prezintă următoarele avantaje:

- permit interconectarea unui mare număr de straturi
- asigură o densitate ridicată de montaj a componentelor electronice
- sunt compatibile cu automatizarea.

Diferențele existente între cele două grupe de procedee din punct de vedere al obținerii unei găuri metalizate reies și din Figura 11-1 care prezintă structura unui cablaj cu 2 straturi conductive cuprinse între 3 straturi izolante („suporturi dielectrice”). Unele găuri sunt în contact cu primul strat, iar altele cu al doilea strat - conectarea realizându-se prin procedee chimice sau prin procedee mecanice.

Cel mai răspândit procedeu mecanic de „metalizare” a găurilor constă în introducerea unor capse metalice (având lungimea puțin mai mare decât grosimea stratului izolant) în găurile cablajului finit, urmată de bercluirea (răsfrângerea) ambelor extremități ale capsei.

Este evident că acest procedeu comportă numeroase inconveniente: este laborios și puțin fiabil (întrucât probabilitatea unui contact perfect între capsă și conductorul imprimat este destul de redusă), implică toleranțe foarte strânse pentru găuri și capse, necesită un consum relativ ridicat de materiale (capse) etc.

În consecință, este mai avantajoasă realizarea pe cale chimică a cablajelor imprimate multistrat (și a găurilor metalizate respective).

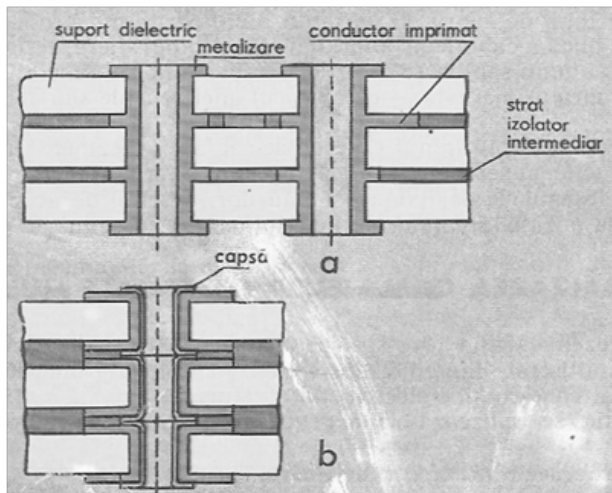


Figura 11-1 Tipuri uzuale de cablaj multistrat

Numărul straturilor conductive (de obicei între 4 și 20) constituie unul din parametrii importanți ai cablajului imprimat multistrat. În general, cu cât acest număr este mai mare, cu atât cablajul realizat este mai compact, iar lungimea totală a conductoarelor sale imprimate este mai mare. Numărul straturilor este totuși limitat de complexitatea și prețul de cost al cablajului multistrat optenabil.

În cazul unui cablaj multistrat cu 5 straturi conductive (cu suportul lor izolan), acestea se prelucreează inițial separat. Începând cu straturile interioare ale căror folii de cupru sunt acoperite selectiv cu fotorezist (utilizând 3 fotoșabloane diferite, corespunzătoare celor 3 configurații de circuit necesare) și prelucrate conform metodei fotografice.

Urmează „asamblarea” celor 5 straturi conductive cu cele 4 straturi izolatoare intermediare - prin suprapunere și presare, pentru a forma o structură unitară, „cablajul multistrat”.

Întrucât cele 2 straturi conductive exterioare au rămas neprelucrate, în etapa următoare se realizează și acoperirea selectivă, cu fotorezist, a foliilor de cupru respective (utilizând alte 2 fotoșabloane diferite, ce corespund configurațiilor circuitelor de realizat în aceste straturi), operație după care acestea sunt prelucrate conform metodei fotografice.

Dar corodarea straturilor exterioare nu se poate realiza decât după prelucrarea găurilor traversând ansamblul celor 5 straturi. În acest scop, este necesară protejarea prealabilă a straturilor conductive exterioare (cu fotorezist depus pe ele) prin acoperirea acestora cu un strat (lac) de protecție - operație după care se poate efectua găurirea transversală a ansamblului.

Urmează îndepărtarea unui strat tubular de material dielectric din interiorul găurilor (corespunzând suporturilor izolante și straturilor izolatoare intermediare), astfel încât unul din straturile conductive intermediare să iasă puțin în relief, depășind profilul longitudinal al găurii.

După îndepărtarea stratului (lacului) de protecție de pe straturile conductive exterioare, se realizează metalizarea cu cupru, pe cale chimică, a găurilor - atât în interiorul lor cât și la extremități - realizându-se astfel contactul electric dintre stratul conductiv intermediar și straturile conductive exterioare. (Este evident că se poate realiza astfel și un contact electric între mai multe straturi intermediare.)

Pentru îngroșarea stratului de cupru depus în interiorul găurii prin metalizare chimică, în continuare se efectuează și o metalizare galvanică a acesteia - mai întâi tot cu cupru și apoi, pentru protejare, cu aliaj Sn-Pb, Sn-Ni (sau chiar cu aur - în cazul unor cablaje mai pretențioase). De remarcat că prin această metalizare galvanică se realizează și o îngroșare a straturilor conductive exterioare, în zonele extremităților găurii.

Abia acum se poate finaliza și prelucrarea straturilor conductive exterioare prin corodare, operație după care fotorezistul este îndepărtat din zonele protejate ale acestor straturi. De menționat că, în general, extremitățile găurilor metalizate sunt izolate electric de traseele straturilor conductive exterioare (dacă schema de principiu corespunzătoare cablajului imprimat multistrat nu impune altfel).

### 11.3.4. Realizarea cablajelor folosind folia de transfer a desenelor PnP-Blue

Cablajul poate fi realizat folosind folia de transfer a desenelor de cablaj pe placa de sticlotextolit placat cu cupru, numită PnP-Blue. Folia de transfer PnP-Blue, având un strat de acoperire special, face posibil transferul desenului unui circuit imprimat pe cablaj, cu ajutorul unei imprimante laser sau a unui copiator, realizându-se astfel circuite imprimate simplu și rapid.

Foliile Press-n-Peel (apasă și cojește) sunt utilizabile numai dacă se dispune de un copiator cu hârtie normală sau o imprimantă laser. Orice program de desenare este utilizabil pentru realizarea desenului circuitului imprimat (de exemplu soft-urile PROTEL sau ORCAD).

Desenele din reviste sau cele realizate cu imprimante matriciale se pot transfera cu ajutorul copiatoarelor pe folia de transfer însă în acest caz rezoluția de realizare a cablajului este mică. Pentru transferul desenului pe folie se reglează imprimanta laser sau copiatorul în poziția de contrast maxim, astfel încât să nu apară urme de vopsea în locurile unde nu vom avea folie de cupru.

Desenul circuitului trebuie realizat astfel încât în zonele în care dorim să rămână cupru, să fie negru, iar în celelalte părți alb. Este bine să ne convingem că desenul realizat este la fel ca și cum am vedea placa din partea fără cupru (dinspre piese). Aceasta înseamnă oglinda schemei realizate. Dacă executăm un cablaj dublu placat trebuie să avem grijă ca schema să ajungă corect pe placă: desenul trebuie să ajungă pe partea cu stratul acoperit cu emulsie a foliei de transfer. Se introduce folia Press-n-Peel în imprimantă sau în copiator pentru realizarea imprimării ca și când am realiza aceasta pe o hârtie obișnuită.

Curățăm bine suprafața placată cu cupru a plăcii, cu ajutorul unui praf de curățat. Astfel îndepărtăm de pe suprafață petele de oxizi și grăsimi. Pentru curățirea temeinică a suprafeței plăcii este indicată o baie într-o soluție de decapare timp de 30 de secunde. După baie, suprafața este optimă pentru realizarea transferului.

Se decupează schema, astfel încât să lăsăm cel puțin 5mm de la fiecare margine. Aducem placa de sticlotextolit placat cu cupru, un fier de călcat (să nu fie cu aburi) și începem operațiunea de lipire a foliei PnP pe placă. Reglarea temperaturii fierului de călcat depinde de felul tonerului folosit în imprimantă sau în copiator. Prima dată începem cu o valoare mai mică. În cele mai multe cazuri 200...225°C este o temperatură corespunzătoare. Punem folia PnP-Blue cu schema în jos pe placă (schema să fie în contact cu placa). Punem placa cu folia în sus pe un material termoizolant (o placă de bachelită, de exemplu). Cu fierul de călcat în funcțiune la o temperatură medie începem să încălzim cu precauție folia și implicit placa. Prima dată ne concentrăm pe margini până acestea se lipesc. Continuăm încălzirea foliei, prin mișcări circulare precaute, până când se lipește întreaga folie. În general 100...120 de secunde sunt suficiente. Pentru cablaje cu suprafețe mai mari, avem nevoie de un timp mai îndelungat.

Desenul se va vedea foarte bine și pe partea cealaltă a foliei PnP-Blue după ce folia a fost bine încălzită, acesta fiind semnul că operațiunea de încălzire trebuie întreruptă. Dacă desenul se vede foarte bine pe toată suprafața foliei înseamnă că placa a fost încălzită suficient peste tot.

După răcire, tragem folia cu precauție de pe placă începând de la un colț. Eventualele linii întrerupte se vor corecta cu vopsea rezistentă la decapare sau cu un marker de trasat cablaje.

Introducem placa astfel realizată în baia de decapare. Soluția de decapare poate fi clorură de fier sau acid sodic cu amoniac, care se va realiza după indicațiile producătorului. După decapare îndepărtăm de pe placă vopseaua, prin frecare sau șlefuire. Spălăm bine placa după care aceasta este gata pentru găurire.

După operația de găurire se spală placa din nou pentru a îndepărta oxizii și grăsimile apărute și apoi se șterge cu spirt tehnic. Imediat se aplică pe placă un lac care ajută la lipirea terminalelor componentelor. După ce lacul s-a uscat se trece la lipirea tuturor terminalelor componentelor.

## 11.4. Echiparea cablajelor imprimate cu componente electronice

Înainte de lipirea terminalelor componentelor pe fața placată a unui cablaj imprimat, se efectuează amplasarea și implantarea componentelor electronice în găurile acestuia - operații realizate în general manual și având în vedere următoarele reguli/recomandări:

- în fiecare gaură a cablajului se introduce doar un singur terminal; în general, componentele se montează în poziție orizontală, cu marcajul în sus și în același sens - pentru a facilita citirea codurilor marcate și, deci, identificarea componentelor. (În cazul necesității asigurării unei foarte mari densități de montare a componentelor, acestea se pot plasa - prin modul de proiectare a cablajului - în poziție verticală; soluția nu este recomandată întrucât implică unele probleme tehnologice);
- corespondența dintre tipul/codul componentei de implantat și locul prevăzut acesteia pe placă trebuie respectată cu strictețe pentru a evita operațiile ulterioare de depanare. De asemenea, se va acorda atenție unicei poziționări corecte posibile a anumitor componente (circuite integrate, tranzistoare, diode, condensatoare electrolitice etc.);
- pentru creșterea (până la dublare) a vitezei de echipare manuală a plăcilor cu componente este necesară formarea prealabilă a terminalelor prin tăierea și îndoirea acestora la forma cea mai avantajoasă pentru montare și contactare (de exemplu există cel puțin 10 modalități de formare a terminalelor axiale, fiecare având diverse grade de dificultate a operațiilor de formare, implantare, mânăuire, lipire, depanare specifice);
- în funcție de tipul componentei de montat și pentru a-i reduce solicitarea termică (în procesul de lipire), se recomandă acele modalități de formare a terminalelor care asigură atât o distanță suficientă a componentei față de placa imprimată cât și o lungime suficientă a terminalelor (permițând disipația căldurii);

- în toate cazurile, îndoirea terminalelor pe fața placată se va efectua numai în direcția traseelor de cablaj;
- îndoirea terminalelor componentelor nu trebuie efectuată prea aproape de corpul acestora, iar raza de îndoire nu trebuie să fie prea mică (sub 1,5 mm) pentru a nu afecta integritatea componentelor și terminalelor lor. În toate cazurile, se va evita solicitarea mecanică prea intensă a acestora.

Formarea terminalelor se poate realiza manual - cu dispozitive simple, specifice, sau automat - cu echipamente specializate, asigurând o mare productivitate. Există și sisteme de echipare automată a plăcilor de cablaj imprimat, deosebit de eficiente în cazul producției de serie mare și foarte mare. În asemenea cazuri este recomandabilă integrarea operațiilor de formare a terminalelor, echipare a plăcilor și lipire a componentelor, în cadrul unor linii tehnologice automate complexe.

Componentele - pasive și active - care se montează pe cablajele imprimate (după realizarea lor ca mai sus) se fixează de regulă prin terminalele lor, în găurile special prevăzute din cablaj.

Întrucât, în general, dispozitivele semiconductoare sunt sensibile la șoc termic - putând fi distruse la lipire - este recomandabilă fixarea circuitelor integrale pe cablaj prin intermediul unor socluri speciale care se lipesc pe cablaj (în cazul diodelor și al tranzistoarelor lungimea mai mare a terminalelor asigură o disipare importantă a căldurii transmise de la punctele de lipire pe cablaj, uneori acest proces fiind accelerat cu ajutorul unei pensete metalice).

Componentele mai voluminoase și mai grele (condensatoare electrolitice și variabile, transformatoare, comutatoare, conectoare, radiatoare etc.) se fixează adecvat pe cablaj și cu ajutorul unor piese mecanice corespunzătoare (șuruburi și piulițe, coliere, suporturi/socluri speciale etc.).

Structura cablajelor imprimate permite și realizarea unor componente pasive direct pe cablaj (prin folia de cupru și suportul său izolant): rezistoare, condensatoare și - mai frecvent - bobine. Este evident că domeniile de valori și aplicații ale unor asemenea componente sunt relativ restrânse.

În ultimul timp se utilizează pe scară din ce în ce mai largă componentele cu montaj superficial (SMD — Surface Mounted Devices), fără terminale, dar permițând montajul pe cablaj prin lipirea anumitor zone metalizate de pe corpul lor direct pe acesta. Principalele avantaje ale acestor componente constau în eliminarea operațiilor de formare a terminalelor și în obținerea unei fiabilități superioare în exploatare prin creșterea rezistenței la solicitări mecanice.

## 11.5. Protecția la perturbații electromagnetice

Perturbațiile mecanice și cele produse de zgomot pe măsura aglomerării surselor de perturbații, datorită funcționării lor implicite, în multiple studii normale, este necesar ca fiecare sistem, aparat sau dispozitiv să funcționeze corect în comuniune cu alte sisteme sau aparaturi, fără să perturbe electromagnetic sau fără să fie perturbat electromagnetic.

Compatibilitatea electromagnetică constă în abilitatea sistemelor sau subsistemelor de a opera în mediul stabilit, fără să sufere sau fără să cauzeze degradări inacceptabile ale funcționării din cauza influențelor electromagnetice.

Compatibilitatea electromagnetică proiectată se referă la performanțele privitoare la imunitatea la perturbații estimată, rezultat al aplicării din etapa de proiectare a unor metode de rejecție ale semnalelor indezirabile proprii sau externe.

Componentele esențiale ale compatibilității electromagnetice sunt:

- caracteristicile perturbațiilor și ale generatorului de perturbații;
- caracteristicile traseului intermediar de transmitere a perturbației între perturbat și perturbator.
- susceptibilitatea dispozitivului perturbat la tipul energiei perturbante a generatorului;
- timpul sau momentul în care emite perturbatorul în raport cu nivelul de susceptibilitate la perturbații ale dispozitivului perturbat în acel moment.

Perturbatorii sunt constituiți în două grupe:

- surse de perturbații cu spectru discret;
- surse de perturbații cu spectru larg.

Compatibilitatea electromagnetică este starea sistemului în care nivelul de imunitate la perturbații al oricărui dispozitiv din sistem este mai ridicat decât nivelul de perturbații la care este supus dispozitivul în sistem.

Nivelul de compatibilitate electromagnetică reprezintă nivelul de perturbații electromagnetică mai mic sau egal cu nivelul de imunitate al oricărui dispozitiv neperturbabil din sistem, dar mai mare sau egal decât nivelul de perturbații generat de către perturbatorii din sistem.

Nivelul de imunitate electrică al unui dispozitiv se definește drept valoarea maximă a perturbației ce poate fi aplicată dispozitivului fără ca acesta să-și piardă performanțele.

Marginea de compatibilitate electromagnetică se definește ca diferența de decibeli dintre nivelul de imunitate la perturbații și nivelul de perturbații la care este supus dispozitivul.

Interferența rezidă în efecte incompatibile cu realizarea performanțelor impuse.

Susceptibilitatea constă în capacitatea și nivelul cu care dispozitivul răspunde la energia nedorită a perturbației.

Orice semnal nesinusoidal este rezultatul compunerii energiei unor componente sinusoidale. Dacă semnalul este periodic, constituenții sinusoidali sunt dispuși într-un spectru de frecvență discret spre deosebire când semnalul este aperiodic.

Măsurile de compatibilizare electrică impun aplicarea lor din faza de mai înainte a elaborării, implicând cei patru constituenți: perturbatorul, perturbatul, calea de perturbare și momentul de perturbare, cu coeficienți de siguranță mult mai ridicați decât cei indicați.

Cuplajele parazite inductive, capacitive, galvanice și mixte precum și radiația electromagnetică sunt principalii constituenți ai transmisiei și penetrării perturbațiilor electrice.



Perturbațiile pot pătrunde prin toate legăturile electrice, trasee, elemente constructive de structura, supuse cuplajelor parazite sau transportând perturbații de la alte surse.

Cuplajele parazite capacitive constituie principalele căi de penetrare a perturbațiilor, inclusiv dacă traseele perturbate nu sunt învecinate cu traseele parcurse de curenți, ea fiind total indiferentă de mărirea curenților învecinați.

Metodele pentru reducerea cuplajelor parazite capacitive sunt: aplicarea ecranării, torsadării și gardării în vederea atenuării cuplajelor parazite capacitive.

În conductorul aflat în apropierea celui parcurs de curent perturbator apare tensiunea perturbatoare datorită cuplajului inductiv. Spre deosebire de tensiunea de cuplare capacitivă, care depinde de impedanța de intrare a perturbatorului, tensiunea de cuplare inductivă depinde de inductivitatea mutuală și curentul perturbator, manifestându-se în circuitul perturbat ca o sursă echivalentă de curent suplimentar.

Metodele pentru reducerea cuplajelor parazite inductive sunt:

- simetrizarea traseelor circuitului perturbator;
- folosirea legăturilor torsadate sau a cablurilor plate;
- ducerea traseului direct cât mai aproape de returul său;
- ecranarea traseului perturbator de natura inductivă;
- ecranarea antiperturbativă a receptorilor.

Cuplarea prin radiații electromagnetice este mai puțin frecventă, și este în multe situații atenuată prin limitarea la minimum în cazul cel mai defavorabil a benzii de trecere a dispozitivului receptor.

Atenuările perturbațiilor prin cuplaje galvanice sau mixte se fac prin eliminarea curentului unui circuit prin impedanța celuilalt, transmiterea tuturor tensiunilor de alimentare și de semnal cu retur propriu, fără a se utiliza pentru un semnal, returul altui semnal iar borna de masă trebuie să fie realizată conform regulii, paralelogramului cu un singur punct.

Împotriva cuplajelor galvanice se recomandă separarea galvanică, reducerea valorii impedanței de cuplare, separarea surselor, separarea geometrico-spațială, împământarea și desființarea contactelor accidentale parazite și prin curenți de fugă.

Imunitatea la perturbații statice, caracterizarea circuitului la perturbații lente, cu duratele frontului mult mai mari decât timpii de comutare ai circuitului integrat. Valoarea ei indică însă și comportarea la perturbații dinamice deoarece gradul de imunitate față de aceasta este dependent direct de marginile de siguranță la perturbații statice. Faptul este evident deoarece două caracteristici esențiale conferă perturbațiilor dinamice posibilitatea de a deveni deranjante:

- depășirea marginii de imunitate la perturbații statice;
- durata perturbației dinamice.

Perturbațiile dinamice cuprind impulsuri perturbabile comparabile cu timpii de comutare ai circuitului digital. Siguranța la perturbații dinamice caracterizează circuitele prin relația dintre valoarea energiei emise de circuitul perturbator și răspunsul circuitului receptor.

În mediile cu solicitări mecanice ridicate, aparatele electrice și electronice necesită o construcție rezistentă și stabilă. Pentru asigurarea acestei cerințe înainte de proiectare se efectuează un studiu al factorilor mecanici. În aparatele electrice și electronice fenomenele de rezonanță mecanică au acțiune specifică, în sensul că partea electrică nu conține mase importante aflate în mișcare.

Factorii mecanici care produc perturbații sunt:

- vibrațiile;
- șocurile;
- suprasarcinile.

Mărimile caracteristice aparatelor referitor la acțiunea factorilor mecanici sunt:

- rezistența la factori mecanici;
- stabilitatea: proprietatea aparatului de a-și păstra funcționarea corectă în condițiile solicitării prin factori mecanici.

Principala măsură antiperturbativă luată în cazul perturbațiilor introduse prin vibrații este plasarea aparatului pe acea dimensiune a locului de amplasare, pentru care se evită intrarea în rezonanță.

### **11.5.1. Alegerea tipului de cablaj imprimat**

Prin complexitatea sa, construcția aparatelor electronice implică un număr mare de cunoștințe din domeniul fizicii, al chimiei, mecanicii, etc.

Rezultă deci, că pentru proiectarea și construcția unui aparat electronic fiabil trebuie cunoscute în profunzime problemele ridicate de aceasta proiectare și deci rezolvarea lor prin soluțiile juste ce se impun. A nu lua în seamă aceste aspecte duce implicit la un produs instabil, cu parametri modești sau chiar sub parametri, necompetitiv în concluzie. Prin nerespectarea unei bune ecranări influențele pot duce la grave erori, care la rândul lor conduc la avarii, stagnarea procesului tehnologic sau nemulțumirea utilizatorului. De asemenea, o proiectare necorespunzătoare a traseelor de cablaj poate conduce la efecte nedorite în montajul electronic, respectiv la crearea unei inductanțe false, la fluctuații ale punctului de masă, influențe între trasee de tip capacitiv, ș.a. Grosimea traseului modificată în mod nejustificat poate duce la încălzirea cablajului sau chiar arderea și deci întreruperea traseului respectiv. O proiectare necorespunzătoare în funcție de climatul de funcționare a aparatului respectiv poate conduce la scăderea performanțelor sau chiar la nefuncționarea aparatului.

Trebuie acordată deci o mare atenție tuturor acestor aspecte; încadrarea produsului (ce urmează a fi proiectat) într-o clasa climaterică, într-un mediu de funcționare, trebuie să se facă în mod realist și justificat.

### **11.6. Criterii de montare a componentelor**

Înainte de lipirea terminalelor componentelor pe fața placată a unui cablaj imprimat se efectuează amplasarea și implantarea componentelor electronice în găurile prevăzute în acest scop, după următoarele reguli:

- în fiecare gaură a cablajului se introduce doar un singur terminal;
- componentele se montează (de regulă) în poziție orizontală cu marcajul în sus și în același sens pentru a facilita identificarea componentelor; în cazul necesității asigurării unei densități mari

de montare, componentele se pot plasa prin modul de proiectare a cablajului în poziție verticală.

- corelația între tipul componentei de implantat și locul prevăzut acesteia pe placă trebuie respectată cu strictețe pentru a evita operațiile ulterioare de depanare; de asemenea se va acorda atenție unicei poziționări corecte posibile în cazul anumitor componente (circuite integrate, tranzistori, diode, condensatoare electrolitice);
- pentru ușurarea montării componentelor pe plăci este necesară formarea prealabilă a terminalelor prin tăierea și îndoirea acestora la forma cea mai avantajoasă pentru montare și lipire (contactare);
- în funcție de tipul componentei de montat și pentru a-i reduce solicitarea termică (în procesul de lipire) se recomandă acele modalități de formare a terminalelor care asigură atât o distanță suficientă a componentei față de placa imprimată cât și o lungime suficientă a terminalelor (permițând disipația căldurii);
- îndoirea terminalelor componentelor nu trebuie efectuată prea aproape de corpul acestora, iar raza de îndoire nu trebuie să fie mică (sub 1,5 mm) pentru a nu afecta integritatea componentelor și a terminalelor lor; în toate cazurile se va evita solicitarea mecanică prea intensă a acestora;
- în general dispozitivele semiconductoare sunt sensibile la șoc termic, putând fi distruse la lipire; este recomandabilă fixarea circuitelor integrate pe cablaj prin intermediul unor socluri speciale care se lipesc pe cablaj; în cazul diodelor și al tranzistoarelor lungimea mai mare a terminalelor asigură o disipare importantă a căldurii transmise de la punctele de lipire pe cablaj, uneori acest proces fiind completat de o pensetă metalică; se recomandă ca dispozitivele semiconductoare să fie montate la final pentru a nu fi expuse la șocurile termice produse la lipirea componentelor alăturate.

### 11.6.1. Tehnica lipirii componentelor

Prin operația de lipire se înțelege îmbinarea a două sau mai multe reperi metalice între ele la cald cu ajutorul unui metal de adaos. Părțile metalice ale pieselor și traseelor de cablaj reprezintă metalele de bază, iar metalul de adaos reprezintă aliajul de lipit. Acesta are temperatura de topire inferioară celui pe care o au metalele de bază.

În zona de lipire este necesar să se realizeze încălzirea la o temperatură care să asigure fluidizarea aliajului de lipit și totodată curgerea acestuia în spațiile libere dintre suprafețele metalelor ce urmează a fi lipite. Concomitent, se încălzesc straturile superficiale ale metalelor de bază.

Atomii din rețeaua cristalină a aliajului de lipit capătă energii mari și intră în contact nemijlocit cu atomii metalului de bază. În acest fel în interiorul rețelei cristaline au loc schimbări datorită solubilității reciproce dintre aliajul topit și metalul pieselor de bază. Apare fenomenul de „omezire” a metalelor de bază de către aliajul de lipit.

Tensiunile superficiale de la suprafețele metal solid – aliaj lipire trebuie să fie minime, pentru a obține o „umezire” bună a pieselor ce urmează a fi lipite. Pentru ca forța de atracție metale de bază – aliaj topit să fie maximă este necesar ca în procesul de lipire suprafețele metalelor de bază să fie protejate contra oxidării care are loc datorită încălzirii. Pentru acest lucru locul lipirii se acoperă cu un flux decapant care formează o barieră lichido-gazoasă între metalele de bază și aer. Fluxul decapant mai are rolul de a dizolva straturile peliculare de oxizi, favorizând „umezirea” metalelor de bază cu aliajul de lipit.

Aliajul de lipit în stare fluidă ca orice lichid care „umezește” are proprietăți de capilaritate și în acest fel el pătrunde în intersecțiile dintre piesele care se lipesc.

Operația de lipire prezintă următoarele etape:

- încălzirea metalelor de bază până la temperatura apropiată celei de topire a aliajului de lipit;
- topirea aliajului pentru lipit;
- „umezirea” metalelor de bază cu aliajul de lipit în stare lichidă și încărcarea lor cu acesta;
- dizolvarea suprafeței metalelor de bază „umezite” în zona lipiturii și difuziunea reciprocă a celor două metale (metal de bază – metal aliaj de lipit);
- răcirea și solidificarea aliajului de lipit care oferă prin solidificare compactizarea mecanică a pieselor metalice.

Pentru realizarea lipiturilor între părțile metalice a componentelor și traseelor de cablaj, fapt întâlnit în mod frecvent la realizarea montajelor electronice, sunt necesare următoarele:

- pistol de lipit sau ciocanul electric de lipit, care reprezintă sursa de energie termică necesară atât încălzirii părților metalice ale pieselor cât și a aliajului de lipit;
- materialul (fluxul) decapant care are rolul de facilitare a lipiturii; se recomandă obținerea unei soluții prin dizolvarea în spirt a colofoniului (sacâzului); uzual se folosește pasta decapantă sau colofoniu; se vor evita cu strictețe pastele de lipit acide, care se folosesc la lipirea pieselor metalice din fier, deoarece într-un procent foarte mare fluxul acid corodează lipitura în timp și provoacă mari neajunsuri în funcționarea montajului electronic;
- aliajul de lipit – fludor; acesta prezintă un amestec de plumb și staniu astfel dozat încât să fie obținută o proporție care să optimizeze rigiditatea mecanică a lipirii și totodată topirea la o temperatură cât mai scăzută de circa 1800...220°C; fludorul prezintă o formă tubulară și în majoritatea cazurilor el conține în interior un fondant suplimentar care favorizează lipirea.

Modul de lucru:

- Se curăță de oxizi, bavuri și impurități suprafața traseelor de cablaj și terminalele componentelor cu șmirghel fin.
- Imediat după curățarea suprafeței, traseele de cablaj se acoperă cu o peliculă de flux decapant (colofoniu dizolvat în spirt sau colofoniu dizolvat în nitrodiluant).
- Se montează componentele electronice pe placa de cablaj imprimat. În cazul lipirii a două sau mai multe conductoare se recomandă răsucirea lor prealabilă.

- Se pregătește instrumentul de lipit în vederea efectuării lipirii. În cazul ciocanului electric de lipit se lasă ca vârful metalic din cupru să se încălzească, se curăță de oxizi cu o pilă fină, după care se aplică un strat de colofoniu. În cazul pistolului de lipit vârful (ansa) se încălzește imediat după acționarea butonului.
- Se încălzesc piesele metalice ce urmează a fi lipite aplicând pe acestea instrumentul de lipit și imediat se aplică în acel loc și fludorul până se formează picătura de aliaj care va forma lipitura propriu-zisă.
- Se îndepărtează de la locul lipiturii întâi fludorul, apoi ansa pistolului de lipit.

Trebuie să scoatem în evidență faptul că primul lucru de care depinde funcționarea unui montaj electronic este calitatea lipiturilor. Îndemânarea necesară realizării unor lipituri de calitate se capătă în timp exersând.

## 11.7. Componente pasive pentru SMT

Tehnologia montării pe suprafață (Surface Mount Technology, SMT) este o tehnologie de asamblare a dispozitivelor electronice prin lipirea componentelor direct pe suprafața cablajului circuitului electric, și i-a urmat clasicei tehnologii prin inserție (Through-hole Technology, THT), astfel că aceste dispozitive care folosesc montarea pe suprafață se numesc SMD-uri (Surface Mount Device), iar componentele electronice lipite (montate) pe suprafață se numesc SMC-uri (Surface Mount Components).

### 11.7.1. Rezistoarele

Sunt de formă paralelipipedică asemănătoare unor foarte mici „cărămizi” cu două zone metalice (cositorite) la capetele opuse, destinate sudării pe cablaj. Ele se fabrică pentru toate valorile, de la 1  $\Omega$  la 10 M $\Omega$  (inclusiv 0 ohmi pentru ștrapuri, de obicei de culoare verde și inscripționate cu 0). Marcajul valorii se face cu ajutorul a trei cifre. De exemplu: cea pe care scrie 224 este de 220 k $\Omega$  (22 x 10<sup>4</sup>). Dimensiunile lor sunt de obicei de 1,6 x 3,2 mm și au puteri de la o optime de watt până la un sfert de watt și toleranța  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  sau  $\pm 20\%$ . Structura și tehnologia de obținere sunt similare structurii și tehnologiei rezistoarelor cu pelicula de oxizi metalici: pe un substrat de alumina  $Al_2O_3$  de înaltă puritate, se depun prin serigrafie, la extremități, două zone plane din peliculă de argint-paladiu AgPd, iar între acestea pelicula rezistivă. Structura și grosimea acestei pelicule sunt determinate de valoarea nominală a rezistenței ce se dorește a fi obținută, ajustarea efectuându-se cu un fascicul laser, după fixarea peliculei rezistive prin tratament termic. Urmează apoi depunerea unui strat metalic la extremitățile cipului rezistiv, care asigură circuitul electric între pelicula rezistivă și circuitul imprimat și permite fixarea rezistorului pe placa de cablaj. Pelicula rezistivă este protejată cu un strat de glazură.

**Cod numeric-alfanumeric**, este utilizat pentru marcarea rezistoarelor SMD sub formă de chip, la care se marchează uneori doar rezistența nominală, (datorită dimensiunilor mici). Codul este format din cifrele semnificative ale rezistenței nominale, litera R pusă în locul virgulei pentru valori mici ale rezistenței și ordinul de multiplicare (puterea lui zece) pentru valori mari ale rezistenței. Pentru toleranțe de  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  și  $\pm 5\%$ , fiind necesare două cifre semnificative codul folosit este de forma:

$Rxy$ , pentru  $R_N < 1\Omega$ ;  $xRy$ , pentru  $R_N = 1 \dots 9,1\Omega$ ;

$xyR$ , pentru  $R_N = 10 \Omega \dots 99 \Omega$ ;  $xym$ , pentru  $R_N > 100 \Omega$ . unde:

$x$  este prima cifră semnificativă;  $y$  este a doua cifră semnificativă;  $m$  este ordinul de multiplicare. Pentru toleranțe mici de  $\pm 2,5\%$ ,  $\pm 2\%$  și  $\pm 1\%$ , etc. fiind necesare trei cifre semnificative codul folosit este de forma:

$Rxyz$ , pentru  $R_N < 1 \Omega$ .  $xRyz$ , pentru  $R_N = 1 \Omega \dots 9,99 \Omega$

$xyRz$ , pentru  $R_N = 10 \Omega \dots 99,9 \Omega$

$xyzR$ , pentru  $R_N = 100 \Omega \dots 999 \Omega$   $xyzm$ , pentru  $R_N > 1000 \Omega$ .

Pentru rezistoare SMD de dimensiune foarte mică se utilizează un cod alfanumeric conform Tabelul 11-1 și Tabelul 11-2, cod EIA-96.

**Tabelul 11-1 Cod numeric pentru cifrele semnificative**

Code	Valoare	Code	Valoare	Code	Valoare	Code	Valoare
01	100	25	178	49	316	73	562
02	102	26	182	50	324	74	576
03	105	27	187	51	332	75	590
04	107	28	191	52	340	76	604
05	110	29	196	53	348	77	619
06	113	30	200	54	357	78	634
07	115	31	205	55	365	79	649
08	118	32	210	56	374	80	665
09	121	33	215	57	383	81	681
10	124	34	221	58	392	82	698
11	127	35	226	59	402	83	715
12	130	36	232	60	412	84	732
13	133	37	237	61	422	85	750
14	137	38	243	62	432	86	768
15	140	39	249	63	442	87	787
16	143	40	255	64	453	88	806
17	147	41	261	65	464	89	825
18	150	42	267	66	475	90	845
19	154	43	274	67	487	91	866
20	158	44	280	68	499	92	887
21	162	45	287	69	511	93	909
22	165	46	294	70	523	94	931
23	169	47	301	71	536	95	953
24	174	48	309	72	549	96	976

**Tabelul 11-2 Cod literal pentru multiplicator**

Cod literal	S	R	A	B	C	D	E	F
Multiplicator	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$

### Rezistoare semivariabile

S-au construit tipuri cermet, simple sau multitură, cu valoare nominală în gama  $1\Omega \div 500k\Omega$ , de toleranță  $\pm 10$ , cu  $P_n = 0,5W$  (la  $85^\circ$ ) și dimensiunile  $5,1 \times 5,1 \times 3,8$  mm sau  $6,4 \times 6,5 \times 5,1$  mm.

## Potențiometre SMD

Sunt executați de obicei pe ceramică (tehnologie RPM – rezistență cu peliculă metalică) și au valori între  $10\Omega$ + $10M\Omega$ .

## 11.7.2. Condensatoare

### Condensatoare ceramice

Folosite în această tehnologie sunt condensatoare multistrat tip „cip” și sunt disponibile cu valori între  $0,5\text{ pF}$ + $1\mu\text{F}$  și au de obicei dimensiuni mult mai variate, cele uzuale fiind în jurul cotelor  $1,6 \times 0,8\text{ mm}$ . Sunt caracterizate printr-o mare capacitate specifică (capacitate de utilizare pe unitatea de volum). Având dimensiuni mici și valori nominale în limite largi tind să înlocuiască celelalte tipuri de condensatoare folosite în circuitele electronice. Materialul dielectric este o pastă ceramică. Aceasta prin laminare pe suport, permite obținerea unor folii ceramice foarte subțiri de dimensiuni relativ mari față de dimensiunile unui condensator multistrat finit și care va contribui la formarea a „n” componente identice. Pe această folie se depune prin serigrafie o configurație de „n” pelicule de argint-paladiu care constituie armătura stângă a condensatoarelor; pe o altă folie, se depune o configurație similară care constituie armătura dreaptă a condensatoarelor. După suprapunerea acestor folii în număr diferit de straturi (în funcție de valoarea nominală a capacității care trebuie realizată) și presarea lor, urmează decuparea „cip”-urilor condensatoarelor și fixarea proprietăților lor prin tratament termic. Prin metalizare la extremitățile cipului se asigură o structură de condensatoare legate în paralel – structuri pieptene. Sub această formă de „cip” neprotejat, condensatorul este folosit în tehnologia straturilor groase (componente pentru circuite hibride). Zona metalizată care scurt-circuitează armăturile „stângă” respectiv „dreapta” servește și pentru sudarea prin lipire a terminalelor din sârmă de cupru dublu cositorită. Condensatorul este protejat prin acoperirea printr-un strat de rășină epoxidică.

Marcare acestor tipuri de condensatoare se face astfel:

- capacitatea nominală se notează în clar.
- toleranța se notează în cod literar: F-1%, G-2%, J-5%, K-10% sau M-20%.
- Tensiunea nominală în cod de cifre: 1-25Vcc, 2-50Vcc, 3-100Vcc, 4-200Vcc.

### Condensatoare electronice cu aluminiu

După materialul utilizat la confecționarea armăturilor, condensatoarele electrolitice se clasifică astfel : condensatoare cu aluminiu, cu tantal, cu niobiu etc.

Condensatoarele electrolitice cu aluminiu au dielectricul format dintr-un strat de oxid, creat pe suprafața aluminiului. Au capacitatea între  $0,47\mu\text{F}$  -  $4700\mu\text{F}$  și toleranța mare. Prezintă fenomenul de erodare a dielectricului, dacă sunt folosite timp îndelungat la tensiuni prea mici (sau nu sunt folosite de loc). Depășirea tensiunii maxime sau inversarea polarității pot duce la explozia condensatorului. Sunt utilizate pentru filtrarea tensiunii redresate, cuplare între etaje (la frecvențe audio).

Condensatoarele electrolitice sunt din ce în ce mai folosite în tehnologia SMD deoarece asigură un nivel ridicat de capacitate, având costuri reduse.

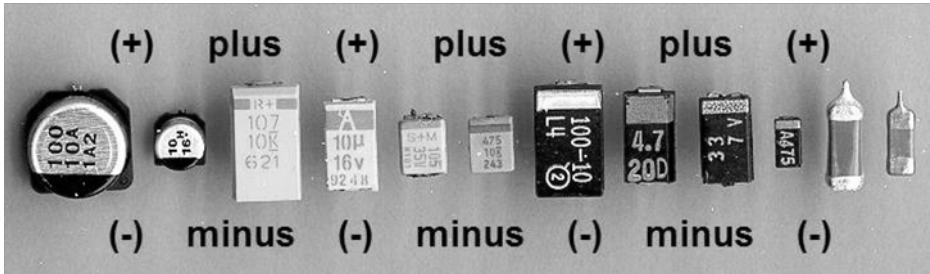


Figura 11-2 Condensatoare SMD

Adesea, condensatoarele electrolitice SMD sunt marcate cu valoarea și tensiunea de lucru. Există două metode de bază utilizate pentru marcarea lor: una este reprezentată de scrierea directă a valorii lor în microfarazi și alta este reprezentată de utilizarea unui cod. Folosind prima metodă, un marcaj de 33 pe 6V, ar indica un condensator 33  $\mu$ F, cu o tensiune de lucru de 6 volți. Prin metoda marcării în cod pe componentă se scrie o litera urmată de trei cifre. Litera indică tensiunea de lucru cum este definită în tabelul de mai jos, iar cele trei cifre indică capacitatea în picofarazi. Ca și în multe alte sisteme de marcarea primele două cifre dau cifra semnificativă și a treia, de multiplicare. În acest caz, un marcaj de G106 ar indica o tensiune de lucru de 4 volți, cu o capacitate de 10 înmulțită cu  $10^6$  picofarazi.

Tabelul 11-3 Marcarea tensiunii pentru condensatoarelor SMD

Litera	Tensiunea
E	2,5
G	4
J	6,3
O	10
C	16
D	20
E	25
V	35
H	50

### Condensatoare electronice cu tantal

Condensatoarele electrolitice cu electrozi din tantal au un volum mai mic decât cele de aluminiu, la aceeași capacitate. Inductanța proprie este mult mai mică, au stabilitate mai bună a capacității și zgomot mai mic. Utilizare tipică: decuplare la frecvențe mai mari, intrare în circuite audio, decuplare circuite digitale.

Au aceeași structură ca și condensatoarele cu tantal cu terminale. Se obțin pentru  $C_n = 0,1 \mu\text{F} \div 100 \mu\text{F}$ , cu toleranța  $\pm (5, 10, 20)\%$  și  $U_n = 4 \div 50\text{V}$ , iar dimensiunile sunt cuprinse între limitele:  $2,54 \times 1,27 \times 1,27 \text{ mm}$ .



### 11.7.3. Termistoare

Folosite în tehnologia SMD, au coeficient de temperatură negativ și sunt construite sub forma unor discuri de diametru  $\varnothing=2,9$  mm, de înălțime  $H = 0,7 \div 3$  mm, cu două zone metalice de contact pe o față a discului. Sunt de valoare nominală de 2,2 k $\Omega$ , cu constante  $B=3,350 \div 4,300K$ . Există și termistoare cu coeficient de temperatură pozitiv, dar de asemenea și varistoare miniatură.

### 11.7.4. Bobinele

Sunt și ele limitate ca performanțe și ca valoare a inductanței, date fiind dimensiunile lor foarte mici, fapt ce impune folosirea unui fir foarte subțire, iar ecranarea lor fiind imposibilă, iar în acest caz trebuie să se apeleze la bobinele clasice. Totuși, ca șocuri de RF sau chiar pentru miniconvertoare sau surse de comunicație ele fac față cu succes. Valorile inductanței pentru bobinele construite în această tehnologie sunt cuprinse, în funcție de valoarea inductanței între următoarele limite:

lungime  $L=2,79\div4,064$ mm

lățime  $l=2,03\div2,794$ mm

înălțime  $H=1,40\div2,54$ mm

diametrul conductorului  $0,27\div0,762$ mm

### 11.7.5. Întrerupătoare SMD

Sunt de obicei de tip baretă (mai rar rotative) mergând de la 2...12 poziții și pot comuta doar curenți mici (până la 100 mA). Acest curent limită, relativ mic, nu reprezintă un impediment, deoarece curenții vehiculați de obicei pe un cablaj cu SMD depășesc rar valori de zeci de mA.

### 11.7.6. Cristale cuarț de tip SMD

Se realizează într-o gamă extrem de variată mergând de la 30KHz...20MHz. Tot aici trebuie amintit și faptul că se produc rezonatoare ceramice pentru radio (455KHz și 10,7MHz) ce pot fi lipite direct pe cablaj (tot SMD-uri).



# Lista tabelelor

Tabelul 1-1 Simboluri și definiții matematice pentru principalii indicatori de conformitate.....	16
Tabelul 1-2 Simboluri și definiții matematice pentru principalii indicatori de fiabilitate .....	17
Tabelul 1-3 Simboluri și definiții matematice pentru principalii indicatori de fiabilitate .....	19
Tabelul 2-1 Higroscopicitatea și permeabilitatea la umiditate a unor materiale electroizolante .....	23
Tabelul 2-2 Proprietăți termice - exemple.....	38
Tabelul 3-1 Caracteristici ale unor metale.....	42
Tabelul 3-2 Temperaturile Debye ale unor metale .....	43
Tabelul 3-3 Temperaturi de tranziție.....	44
Tabelul 3-4 Valori ale temperaturii de tranziție $T_c$ de supraconductibilitate .....	48
Tabelul 4-1 Valori ale temperaturii Debye pentru metale .....	68
Tabelul 4-2 Variația rezistivității metalelor cu schimbarea stării de agregare .....	69
Tabelul 4-3 Proprietățile electrice și termice ale unor metalelor.....	69
Tabelul 4-4 Valori ale potențialul standard de electrod .....	72
Tabelul 4-5 Caracteristicile principale ale cuprului electrolitic .....	74
Tabelul 4-6 Caracteristici ale unor alame utilizate în electrotehnică .....	76
Tabelul 4-7 Caracteristici ale unor bronzuri utilizate în electrotehnică .....	76
Tabelul 4-8 Caracteristicile aluminiului (gradul de puritate 99,6%) .....	77
Tabelul 4-9 Caracteristicile principale ale fierului conductor .....	80
Tabelul 4-10 Caracteristici ale aliajelor tip manganină.....	80
Tabelul 4-11 Caracteristici ale unor aliaje din metale prețioase.....	81
Tabelul 4-12 Caracteristici ale unor aliaje pentru reostate .....	81
Tabelul 4-13 Caracteristici ale unor metale tehnic pure, utilizate în electrotermie. ....	82
Tabelul 4-14 Caracteristici ale unor aliaje pe bază de nichel utilizate în electrotermie.....	82
Tabelul 4-15 Caracteristici ale aliajelor pe bază de fier utilizate în electrotermie ..	83
Tabelul 4-16 Caracteristici ale unor metale pentru contacte .....	85
Tabelul 4-17 Caracteristici ale unor aliaje pentru contacte electrice .....	85
Tabelul 4-18 Caracteristici ale unor compuși sinterizați .....	86
Tabelul 4-19 Caracteristici generale ale periiilor pentru mașini electrice.....	86
Tabelul 4-20 Tensiuni termoelectromotoare față de platină - la o diferență de temperatură de 100°C pentru diferite materiale .....	88
Tabelul 4-21 Aliaje de lipit pe baza de staniu .....	89
Tabelul 5-1 Permitivitatea relativă a claselor de materiale izolante .....	94
Tabelul 5-2 Rigiditatea intrinsecă a unor materiale electroizolante solide .....	111
Tabelul 5-3 Clasificarea materialelor electroizolante după stabilitatea termică ...	122
Tabelul 5-4 Caracteristicile generale ale gazelor .....	124
Tabelul 5-5 Caracteristicile principale ale aerului.....	125
Tabelul 5-6 Compoziția și utilizarea sticlelor anorganice .....	139
Tabelul 5-7 Caracteristici ale unor ramforturi fibroase pentru materiale compozite .....	146

---

Tabelul 7-1 Caracteristicile aliajelor utilizate pentru fabricarea rezistoarelor bobinate.....	172
Tabelul 7-2 Caracteristicile și performanțele unor tipuri de rezistoare .....	183
Tabelul 7-3 Caracteristicile seriilor de valori nominale ale rezistoarelor .....	192
Tabelul 7-4 Valorile nominale ale rezistoarelor din seriile E <sub>6</sub> , E <sub>12</sub> și E <sub>24</sub> .....	192
Tabelul 7-5 Codul culorilor pentru marcarea rezistoarelor .....	193
Tabelul 7-6 Codul literar pentru marcarea toleranței rezistoarelor .....	193
Tabelul 7-7 Caracteristicile diferitelor categorii de rezistoare.....	196
Tabelul 7-8 Valori medii ale ratei defectărilor .....	199
Tabelul 7-9 Moduri și mecanisme de defectare a rezistoarelor.....	199
Tabelul 8-1 Marcarea în cod a condensatoarelor.....	203
Tabelul 8-2 Valorile uzuale ale tensiunilor nominale ale condensatoarelor .....	205
Tabelul 8-3 Valorile tgδ pentru diferite tipuri de condensatoare.....	206
Tabelul 8-4 Gama de temperatură pentru diferite tipuri de condensatoare .....	206
Tabelul 8-5 Proprietățile unor dielectrics uzuali.....	209
Tabelul 8-6 Valorile medii ale ratei de defectare pentru principalele tipuri de condensatoare.....	228
Tabelul 8-7 Caracteristicile principalelor tipuri de condensatoare și recomandări de utilizare a acestora .....	229
Tabelul 9-1 Materiale pentru carcasele bobinelor de joasă frecvență.....	237
Tabelul 9-2 Caracteristicile conductoarelor de bobinaj Cu + Em .....	238
Tabelul 9-3 Materiale pentru carcasele bobinelor de joasă frecvență.....	242
Tabelul 9-4 Materiale feromagnetice moi .....	245
Tabelul 9-5 Caracteristicile tablei silicioase stanțate fără deșeuri.....	247
Tabelul 11-1 Cod numeric pentru cifrele semnificative .....	310
Tabelul 11-2 Cod literal pentru multiplicator .....	310
Tabelul 11-3 Marcarea tensiunii pentru condensatoarelor SMD .....	312

# Lista figurilor

Figura 1-1 Etapele principale ale unui lanț tehnologic.....	3
Figura 1-2 Schema bloc a unui circuit electronic.....	6
Figura 1-3 Controlul cibernetic al nivelului de calitate .....	13
Figura 1-4 Nivelul optim al calității.....	13
Figura 1-5 Definirea indicatorilor de conformitate .....	16
Figura 1-6 Rata de defectare.....	18
Figura 2-1 Schemele de definire a tensiunilor mecanice în corpurile solide supuse acțiunii unor forțe (încărcări) exterioare .....	25
Figura 2-2 Tipuri de deformații produse de tensiunile mecanice: a - deformații liniare; b - deformații unghiulare.....	25
Figura 2-3 Mecanismul deformării plastice prin alunecare în absența dislocațiilor	27
Figura 2-4 Mecanismul deformării plastice prin alunecare în prezența dislocațiilor	28
Figura 2-5 Mecanismul deformării plastice a structurilor policristaline și formării structurii fibroase .....	29
Figura 2-6 Schema determinării durtății prin metoda Brinell .....	34
Figura 2-7 Schema determinării durtății prin metoda Vickers.....	35
Figura 3-1 Ordonarea unor materiale după valoarea rezistivității .....	41
Figura 3-2 Dependența rezistivității de temperatură .....	44
Figura 3-3 Influența câmpului magnetic asupra temperaturii de supraconductibilitate $T_{sc}$ : a - supraconductori de speța I; b - supraconductori de speța a II-a.....	45
Figura 3-4 Dependența rezistivității electrice de tipul fazelor din aliajele binare: a - soluții solide de substituție; b - soluții solide și amestecuri eutectice; c - compus definit și amestecuri eutectice .....	46
Figura 3-5 Dependența câmpului magnetic critic de temperatură .....	47
Figura 3-6 Dependența de temperatură a rezistivității electrice și a adâncimii de pătrundere .....	48
Figura 3-7 Efecte ale supraconducției electrice .....	49
Figura 3-8 Repartiția electronilor din banda de conducție: a) în conductorul „normal”; b) în supraconductor.....	52
Figura 3-9 Conducția în semiconductorii intrinseci.....	57
Figura 3-10 Conducția în semiconductorii extrinseci a) dopare cu elemente acceptoare b) dopare cu elemente donoare .....	58
Figura 3-11 Influența temperaturii asupra conducției semiconductoarelor și metalelor .....	59
Figura 3-12 Efectul Hall în semiconductori.....	59
Figura 3-13 Fenomenul piezoelectric în cristale.....	60
Figura 3-14 Rigiditatea dielectrică .....	61
Figura 3-15 Polarizarea electrică a) electronică; b) ionică; c) de orientare .....	62
Figura 3-16 Determinarea factorului de pierderi.....	63
Figura 3-17 Absorbția de apă la două materiale electroizolante .....	65
Figura 3-18 Influența umidității asupra rezistivității și rigidității dielectrice a hârtiei utilizată în atmosferă umedă .....	66
Figura 4-1 Acoperiri metalice cu caracter a) catodic; b) anodic .....	73

Figura 4-2 Deformarea bimetalului sub acțiunea căldurii .....	87
Figura 4-3 Schema simplificată a unui termocuplu.....	88
Figura 5-1 Dipolul electric .....	92
Figura 5-2 Material dielectric polarizat.....	92
Figura 5-3 Referitoare la polarizația electronică.....	94
Figura 5-4 Referitoare la polarizația ionică.....	97
Figura 5-5 Orientarea moleculelor polare în câmp electric .....	98
Figura 5-6 Referitor la polarizația de orientare .....	99
Figura 5-7 Variația cu temperatura a permitivității relative pentru gaze și lichide polare .....	100
Figura 5-8 Variația cu temperatura a polarizației de orientare a solidelor.....	100
Figura 5-9 Modelul lui Frochlich pentru calculul polarizației de orientare a solidelor .....	101
Figura 5-10 Variația cu temperatura a permitivității relative a unor solide .....	102
Figura 5-11 Referitoare la polarizația de neomogenitate .....	103
Figura 5-12 Fenomenul piroelectric.....	105
Figura 5-13 Structură moleculară fără centru de simetrie .....	106
Figura 5-14 Fenomenul piezoelectric direct .....	106
Figura 5-15 Fenomenul piezoelectric invers.....	107
Figura 5-16 Variația raportului dintre tensiunea de străpungere a aerului funcție de frecvență.....	113
Figura 5-17 Variația componentelor permitivității relative complexe cu frecvența câmpului electric.....	117
Figura 5-18 Curba de ionizare tipică pentru materiale poroase .....	118
Figura 5-19 Referitoare la pierderile prin histerezis.....	120
Figura 5-20 Clasificarea rășinilor sintetice.....	131
Figura 6-1 Paramagnetismul materialelor .....	150
Figura 6-2 Feromagnetismul materialelor.....	151
Figura 6-3 Ciclul histerezis al materialelor feromagnetice.....	152
Figura 6-4 Ciclul histerezis ale materialelor magnetic moi .....	154
Figura 6-5 Ciclul histerezis ale materialelor magnetic dure.....	155
Figura 6-6 Cicluri histerezis ale fierului pentru temperaturi vecine punctului Curie (770°C) .....	156
Figura 6-7 Curbe caracteristice pentru materiale magnetice dure .....	164
Figura 7-1 Tipuri de terminale pentru rezistoare bobinate: a) pentru rezistoare neprotejate; b) de formă inelară, pentru rezistoare tropicalizate; c) pentru rezistoare de precizie multate în bachelită; d) cu căpăcele axiale și radiale.....	174
Figura 7-2 Tipuri de terminale pentru rezistoare peliculare: a) axiale cu căpăcel; b) radiale cu căpăcel; c) axiale lipite; d) axiale încastrate, pentru rezistoare de volum .....	175
Figura 7-3 Tronson rezistiv bobinat: a) vedere generală; b) secțiune; 1-suport izolant; 2-element rezistiv; 3-lac dielectric .....	176
Figura 7-4 a) Rezistor bobinat cimentat (1-suport izolant, 2-element rezistiv acoperit cu lac, 3-căpăcel metalic, 4-terminal); b) Rezistor bobinat în corp ceramic (1-suport ceramic, 2-element rezistiv, 3-ciment silionic, 4- căpăcel metalic, 5-terminal, 6-material izolant, 7- corp ceramic, 8-ciment).....	177

Figura 7-5 Tronson rezistive nesprializate: 1-suport ceramic; 2-peliculă rezistivă; 3-peliculă metalică pentru conectarea terminalelor.....	179
Figura 7-6 Reziptoare spiralizate pentru înaltă frecvență: a) cu canale axioale; b)cu canale circulare; 1-peliculă metalică, 2-canal .....	180
Figura 7-7 Reziptoare peliculare: a) cu canale lipite; b)cu căpăcele; 1-suport ceramic, 2-peliculă rezistivă, 3-peliculă metalică pentru conectarea terminalelor, 4-lipitură, 6-strat de protecție, 7-căpăcel metalic .....	181
Figura 7-8 Structura unui rezistor metalic.....	185
Figura 7-9 Elemente rezistive pentru potențiometre bobinate: a) dreptunghiular; b) trapezoidal; c) dublu trapezoidal .....	190
Figura 7-10 Suport izolant din pertinax.....	190
Figura 7-11 Marcarea rezistoarelor .....	193
Figura 7-12 Marcarea convențională a puterii nominale a rezistoarelor în scheme electronice .....	194
Figura 7-13 Variația rezistenței în funcție poziția cursorului.....	197
Figura 8-1 Formele constructive ale condensatoarelor fixe .....	203
Figura 8-2 Ordinea de citire a culorilor .....	204
Figura 8-3 Condensatorul cu dielectric.....	208
Figura 8-4 Diferite moduri de rotunjire .....	212
Figura 8-5 Condensatorul ceramic multistrat.....	212
Figura 8-6 Condensatorul cu mică cu armături din folii metalice.....	213
Figura 8-7 Condensatoare cu hârtie 1-armături; 2-dielectric; 3-contacte electrice .....	215
Figura 8-8 Tipuri constructive de condensatoare electrolitice: a) condensatoare cu electrolit lichid; b) condensator semiuscat; c) condensator semiuscat nepolarizat; d) condensator cu electrolit solid (condensator oxid-semiconductor);e) condensator oxid-metal; 1-armătura anod; 2-pelicula de oxid dielectric; 3-electrolit lichid; 4-folia metalică în contact cu electrolitul; 5-electrolit impregnat într-un dielectric poros; 6-strat semiconductor; 7-strat de grafit; 8-strat metalic depus prin pulverizare; 9-strat metalic depus prin evaporare în vid.....	218
Figura 8-9 Condensator cu tantal cu electrolit lichid: 1-anod din tantal sinterizat acoperit cu peliculă de oxid; 2-electrolit; 3-corpul condensatorului (din argint acoperit la exterior cu o peliculă de oțel) .....	219
Figura 8-10 Forme constructive pentru condensatoarele variabile cu modificarea suprafeței: a) forma plană; b) forma cilindrică.....	221
Figura 8-11 Legi uzuale de variație a capacității: 1) liniară; 2) pentru frecvență variabilă liniar; 3) pentru lungime de undă variabilă liniar; 4) variație logaritmică .....	222
Figura 8-12 Condensatorul variabil cu aer: 1-rotor; 2-șasiu; 3, 7-lagăre cu bile; 4-ax; 5-stator; 6-arcuiri conductoare; 8-conductoare flexibile .....	223
Figura 8-13 Condensatorul semivariabil cu aer: a) capacitate minimă; b) capacitate maximă .....	225
Figura 9-1 Bobine fără miez - modele pentru calculul inductivității: a) cu un strat; b) cu mai multe straturi .....	234
Figura 9-2 Bobine cu miez: a) schema echivalentă; b) diagrama de fazori .....	235
Figura 9-3 Tipuri constructive de carcase: a) simplă; b) cu flanșă; c) cu nervuri; d) cu flanșe intermediare (galeți).....	236

Figura 9-4 Tipuri de bobinaje realizate într-un singur strat: a) cilindric; b) toroidal cu secțiune circulară; c) toroidal cu secțiune dreptunghiulară; d) în dublu D.....	240
Figura 9-5 Tipuri de bobinaje multistrat: a) cilindric cu flanșe; b) cilindric; c) piramidal; d) cilindric secționat cu flanșe intermediare. ....	241
Figura 9-6 Tipuri de tole: a) E + I; b) U + I; c) I; I-lungimea circuitului magnetic; A-secțiunea miezului magnetic. ....	248
Figura 9-7 Ecranarea bobinelor: a) ecran magnetic; b) ecran electrostatic între înfășurările primară și secundară ale unui transformator.....	250
Figura 10-1 Circuit echivalent și variația reactanței unui cristal piezoelectric .....	254
Figura 10-2 Caracteristica amplificare-frecvență și un circuit echivalent al filtrului „trece-bandă” .....	254
Figura 10-3 Caracteristica curent-tensiune pentru becuri cu incandescență .....	255
Figura 10-4 Elementele constructive ale electromagneților: a - electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de translație, b - electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de rotație.....	256
Figura 10-5 Structura unui fotorezistor .....	265
Figura 10-6 Moduri de dispunere a electrozilor interdigitali la fotorezistoare .....	265
Figura 10-7 Dependența tensiune-curent pentru un termistor cu coeficient de temperatură negativ .....	269
Figura 10-8 Dependența rezistenței de temperatură pentru un termistor cu coeficient de temperatură pozitiv .....	270
Figura 10-9 Caracteristici curent-tensiune la varistoare cu ZnO și SiC.....	272
Figura 10-10 Elementele constructive ale DRV: 1 - lanț de eclatoare; 2 - rezistență neliniară; 3 - carcasă de porțelan; 4 - capace metalice de etanșare; 5 - supapă mecanică. a) partea activă a unui descărcător cu rezistență variabil; b) schema electrică echivalentă a unui DRV; c) simbolul unui DRV.....	275
Figura 10-11 Descărcător cu rezistență variabilă și fluj magnetic.....	276
Figura 10-12 Tub catodic cu deflexie electrostatică .....	279
Figura 10-13 Deflexia magnetică pentru tuburi cinescop .....	281
Figura 10-14 Principiul constructiv pentru un cinescop cu mască perforată.....	282
Figura 10-15 Producerea imaginilor pentru LCD .....	283
Figura 10-16 Producerea imaginilor color pentru LCD .....	284
Figura 10-17 Producerea imaginilor color pentru ecranele cu plasmă.....	285
Figura 11-1 Tipuri uzuale de cablaj multistrat.....	299
Figura 11-2 Condensatoare SMD.....	312



# Bibliografie

- 1 Braithwaite N, Weaver Gr., Electronics materials, Open University course, Butterworth Scientific Ltd., London, 1990
- 2 Cătuneanu M.V., ș.a., Materiale pentru electronică, E.D.P., București, 1982
- 3 Cătuneanu M.V., Svasta I.P. ș.a., Tehnologie electronică, E.D.P., București, 1984
- 4 Ifrim A., Noțingher P., Materiale electrotehnice, E.D.P., București, 1992
- 5 Shackelford F. J., Introduction to materials science for engineers, Macmillan Publishing Company, New York, 1991
- 6 Smithells C. J., Metals Reference Book vol.1, Butterworths Scientific Publications, London 1955
- 7 Van Vlack L. H., Elements of Materials Science and Engineering, Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1989.
- 8 \* \* \* Metals Handbook Ninth Edition, vol.9, American Society for Metals, Ohio, 1986
- 9 Braithwaite N, Weaver Gr., Electronics materials, Open University course, Butterworth Scientific Ltd., London, 1990
- 10 Cătuneanu M.V., ș.a., Materiale pentru electronică, E.D.P., București, 1982
- 11 Cătuneanu M.V., Svasta I.P. ș.a., Tehnologie electronică, E.D.P., București, 1984
- 12 Gâdea S., Petrescu M., Metalurgie fizică și studiul metalelor, vol. II., Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- 13 Ifrim A., Noțingher P., Materiale electrotehnice, E.D.P., București, 1992
- 14 Lakhtine I., Métallographie et traitements thermiques des métaux, Moscova, Mir, 1978
- 15 Shackelford F. J., Introduction to materials science for engineers, Macmillan Publishing Company, New York, 1991
- 16 Smithells C., Metals. Reference book, vol. I, Butterworths Publications Ltd. & Interscience Publishers Inc., London & New York, 1955
- 17 Van Vlack L. H., Elements of Materials Science and Engineering, Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1989
- 18 Zecheru Gh. Drăghici Gh. Elemente de știința și ingineria materialelor, vol. 1, Ed. ILEX și Ed. UPG Ploiesti, 2001