



UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ

INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ
Suport de curs

Ș.l.dr ing. Radu – Cristian DINU

INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ

Suport de curs

Ș.l.dr.ing. Radu – Cristian DINU

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

CUPRINS

| | |
|--|-----------|
| Cap. 1. NOȚIUNI GENERALE DESPRE ENERGETICĂ | 3 |
| 1.1. Definiție și părți componente ale sistemului energetic | 3 |
| 1.2. Necesarul, consumul, pierderile de energie, randamentele de conversie și utilizare a energiei în Sistemul Energetic | 5 |
| Cap. 2. NOȚIUNI GENERALE DE TERMOTEHNICĂ | 9 |
| 2.1. Sistem termodinamic, starea termodinamică, ecuația termică de stare | 9 |
| 2.2. Energia internă, lucrul mecanic, căldura, entalpia | 11 |
| 2.3. Principiile termodinamicii..... | 13 |
| 2.4. Diagrame și transformări termodinamice ale vaporilor..... | 17 |
| Cap.3. NOȚIUNI GENERALE DE TRANSFER DE CĂLDURĂ..... | 25 |
| 3.1. Mărimi specifice ale transferului de căldură..... | 25 |
| 3.2. Transferul de căldură prin conducție..... | 25 |
| 3.3. Transferul de căldură prin convecție..... | 28 |
| 3.4. Transferul de căldură prin radiație..... | 30 |
| 3.5. Procese complexe de transfer de căldură..... | 31 |
| Cap.4. COMBUSTIBILI ENERGETICI | 33 |
| 4.1. Generalități..... | 33 |
| 4.2. Combustibili solizi | 33 |
| 4.3. Combustibili lichizi | 36 |
| 4.4. Combustibili gazoși | 36 |
| 4.5. Arderea combustibililor | 37 |
| Cap.5. SIMBOLURI GRAFICE UTILIZATE LA ÎNTOCMIREA SCHEMELOR TERMOMECHANICE ȘI ELECTROENERGETICE | 38 |
| 5.1. Clasificarea centralelor electrice..... | 38 |
| 5.2. Gruparea instalațiilor din centralele electrice | 39 |
| 5.3. Scheme utilizate | 40 |
| 5.4. Simboluri grafice utilizate | 40 |
| Cap.6. NOȚIUNI DE ELECTROTEHNICĂ..... | 49 |
| 6.1 Sarcina electrică..... | 49 |
| 6.2 Intensitatea câmpului electric..... | 50 |
| 6.3 Potențialul electric..... | 51 |
| 6.4 Curentul electric continuu..... | 53 |
| 6.5 Elementele unei rețele electrice..... | 56 |
| 6.6 Energia și puterea electrică..... | 57 |
| 6.7 Curentul electric alternativ..... | 57 |
| Cap.7. CARACTERISTICI GENERALE ALE SISTEMELOR ELECTROENERGETICE..... | 62 |
| 7.1 Generalități..... | 62 |
| 7.2 Transformatoare și autotransformatoare de forță..... | 66 |
| 7.3 Echipamente ale sistemului electroenergetic..... | 69 |
| BIBLIOGRAFIE..... | 74 |

| | | |
|--|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|--|--|---|

1. NOȚIUNI GENERALE DESPRE ENERGETICĂ

ENERGETICA este știința care se ocupă cu extragerea, transportul, distribuția și utilizarea diferitelor forme de energie.

INGINERIA ENERGETICĂ este ramura ingineriei care se ocupă cu proiectarea, producția și exploatarea de echipamente energetice, respectiv cu activități de manageriat tehnic.

ENERGIA, noțiune originară din fizică, constituie la ora actuală subiectul central a numeroase dezbateri științifice, tehnico-economice și social-politice datorită, în principal, caracterului său socio-economic.

ENERGIA (din punct de vedere socio-economic) este un bun material care există sau lipsește, se economisește sau se irosește, se stochează sau se distribuie, are nevoie fiecare de ea și, costă din ce în ce mai mult.

ENERGIA (din punct de vedere fizic) este măsura generală a diferitelor forme de mișcare a materiei și exprimă capacitatea unui sistem fizic de a efectua lucru mecanic atunci când suferă o transformare dintr-o stare în alta.

Pentru clarificarea problemei energiei trebuie făcută o diferențiere a energiei în funcție de diversele etape de conversie și utilizare, deosebindu-se astfel, mai multe forme de energie:

- **ENERGIE PRIMARĂ** - este energia recuperată direct din natură (exemple: cărbunele proaspăt extras, țițeiul, gazele naturale, uraniul natural).
- **ENERGIE SECUNDARĂ** - este acea formă de energie ce poate fi folosită într-o gamă largă de aplicații (exemple: energia electrică, energia termică și benzina).
- **ENERGIE FINALĂ** - este acea formă de energie utilizată pentru a asigura consumatorului servicii energetice.

1.1. Definiție și părți componente ale sistemului energetic

SISTEMUL ENERGETIC (SE) este ansamblul instalațiilor de obținere, prelucrare, transformare, depozitare și utilizare a diferitelor forme sau diferiților purtători de energie, în toate ramurile economiei naționale și ale instalațiilor de alimentare (transport și distribuție) specifice formelor sau purtătorilor de energie respectivi (sisteme de alimentare cu energie electrică, cu gaze, cu energie termică – căldură etc.).

Sistemul energetic are două componente principale de bază: Sistemul Energetic Național (SEN) – care gestionează toate formele de energie, respectiv, Sistemul Energetic Industrial (SEI) – care se compune dintr-o serie de subsisteme, urmărind diversele stadii (faze) ale conversiei energiei (figura 1.1).

1. *Stadiul producerii energiei* - cuprinde subsistemul de combustibil (SSC) și cel al producerii energiei (SSP). Subsistemul de combustibil preia combustibilul din economia națională aparținând Sistemului Energetic Național (SEN) și îl folosește ca materie primă pentru arderea directă în instalațiile tehnologice (TH), ori în subsistemul producerii energiei, pentru producerea căldurii în CT sau căldurii și energiei electrice în instalațiile CET proprii;

2. *Sistemul transformării calitative* a energiei electrice în punctele de transformare electrice (PTE) și a căldurii în punctele termice (PTC). În acest subsistem parametrii energiei electrice și termice sunt adaptați valorilor impuse de subsistemele intermediare și/sau de consumatori;

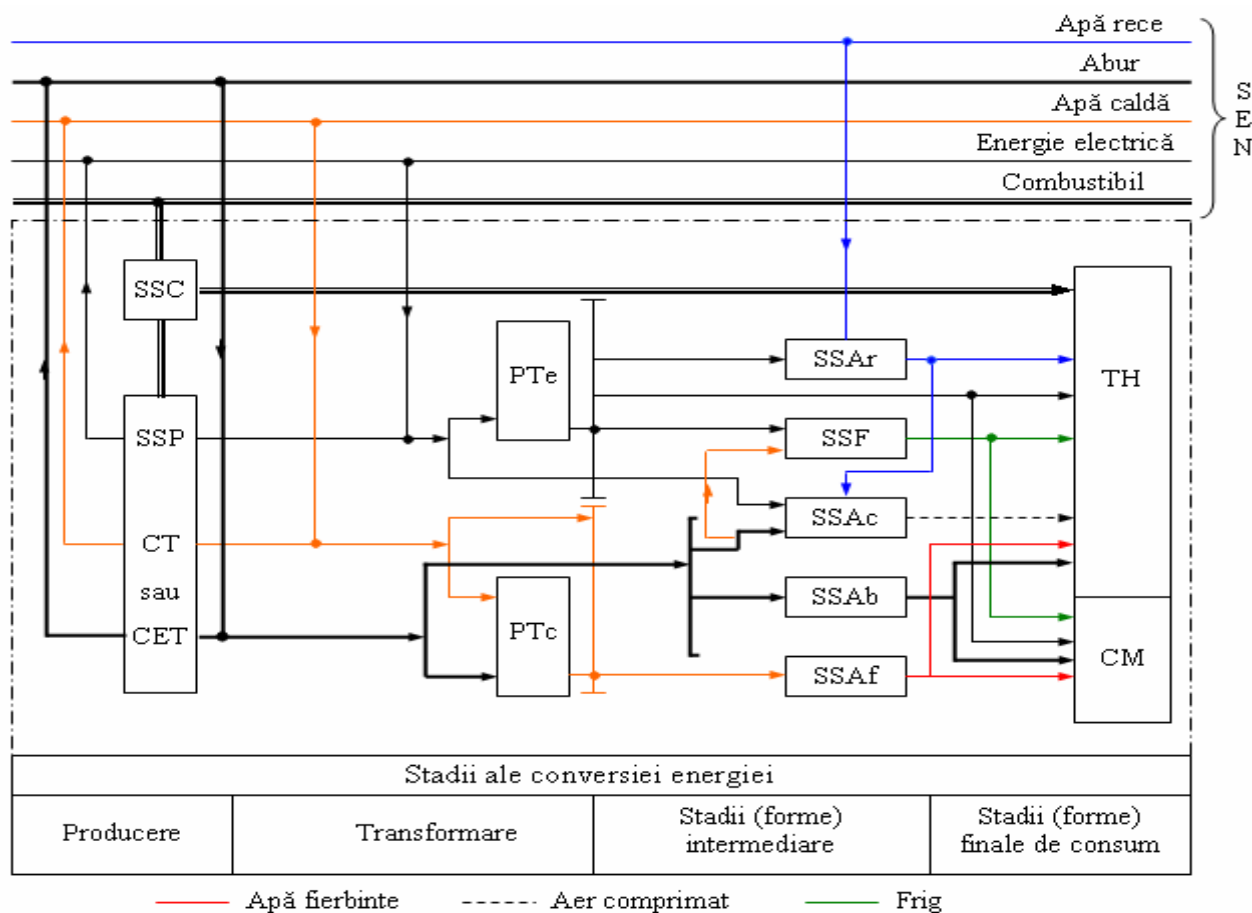


Figura 1.1. Structura sistemului energetic: SSC - subsistemul de combustibil; SSP - subsistemul producerii energiei; CT - centrală termică; CET - centrală electrică de termoficare; PTe - post de transformare a energiei electrice; PTC - punct termic; SSAr - subsistemul de producere a apei de răcire; SSF - subsistemul pentru producere a frigului; SSAC - subsistemul de producere a aerului comprimat; SSAb - subsistemul de distribuție a aburului; SSAf - subsistemul de producere a apei calde și a apei fierbinți; TH - instalație tehnologică; CM - instalații pentru asigurarea condițiilor de muncă

3. *Subsistemele transformării energiei electrice și căldurii în forme intermediare (SSI) și distribuția agenților termici de consum.* Principalele subsisteme din această categorie sunt: - subsistemul de producere a apei de răcire (SSAr); - subsistemul de producere a frigului (SSF); - subsistemul de producere a aerului comprimat (SSAc); - subsistemul de distribuție a aburului (SSAb) și a apei calde sau a apei fierbinți (SSAf);

4. *Subsistemul consumului (SSCons) formelor finale de energie în instalații tehnologice (TH) sau în instalații pentru asigurarea condițiilor de muncă (CM).* Instalațiile tehnologice asigură direct realizarea și desfășurarea proceselor tehnologice, iar cele pentru asigurarea condițiilor de muncă (instalații de încălzire, ventilare și climatizare și cele pentru producerea apei calde în scopuri igienico-sanitare și menajere) participă indirect la procesul de producție.

Legătura între Sistemul Energetic Național și Sistemul Energetic Industrial este univocă în ceea ce privește combustibilul și biunivocă din punct de vedere al energiei electrice și a căldurii sub formă de abur sau apă fierbinte. Legăturile dintre diversele subsisteme sau între Sistemul Energetic Național și Sistemul Energetic Industrial sunt asigurate prin rețele de transport și distribuție a energiei electrice și a diversilor agenți energetici (abur, apă de răcire sau apă caldă, agenți frigorifici, aer comprimat, CO₂, O₂ etc.).

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

Toate subsistemele care asigură formele finale de energie în vederea consumului formează așa numitele utilități ale Sistemului Energetic Industrial.

Amplasarea unei surse de energie față de consumatori este determinată de principalele fluxuri de masă și energie care străbat instalațiile sursei (combustibil, apă de răcire și energia termică și electrică livrată consumatorilor). În funcție de aceste fluxuri de masă și energie determinate, sursa poate fi amplasată astfel:

- *La consumatori*, amplasarea este caracteristică centralelor de rezervă și siguranță;
- *La sursa de apă de răcire*, caracteristică centralelor termoelectrice de condensatie;
- *La sursa de combustibil*, caracteristică centralelor care folosesc combustibili inferiori, neeconomici de transportat.

1.2. Necesarul, consumul, pierderile de energie, randamentele de conversie și utilizare a energiei în Sistemul Energetic

1.2.1. Necesarul, consumul și pierderile de energie

Necesarul teoretic de energie pentru desfășurarea proceselor de consum, $W_{n,t}$, reprezintă cantitatea minimă de energie necesară bunei desfășurări a procesului de consum.

Necesarul real de energie în condiții reale de funcționare W_{rt} , reprezintă cantitatea de energie intrată în aparatul (instalația) consumator(oare), în condițiile reale de funcționare.

Pentru localizarea punctelor în care se face economii de energie și analiza posibilităților tehnico-economice de realizare a acestora, este necesară cunoașterea fazelor de transformare a energiei, de la stadiul de energie primară până la forma finală a consumului (figura 1.2), transformări ce au loc în diversele subsisteme ce compun sistemul energetic național.

Pierderile de energie în aparatele consumatoare reprezintă diferența dintre energie necesară la aparatele consumatoare, în condiții reale de funcționare și necesarul de energie pentru desfășurarea proceselor de consum.

$$\Delta W_{ac} = W_{rt} - W_{n,t} \text{ [kW]} \quad (1.1)$$

Prin transportul energiei de la producătorul forme de energie sau a agentului energetic de consum la aparatul consumator apar pierderile prin rețeaua de distribuție, definite ca diferența dintre energia livrată din subsistemul producerii sau transformării formelor intermediare de energie și energia necesară la aparatele consumatoare.

$$\Delta W_d = W_{ii} - W_{rt} \text{ [kW]} \quad (1.2)$$

Conversia energiei în subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie, pentru a asigura forma finală de energie necesară consumatorilor are loc, conform principiului doi al termodinamicii, cu pierderi egale cu diferența dintre energia consumată în subsistemul producerii sau transformării formelor intermediare de energie și energia livrată din subsistemul respectiv.

$$\Delta W_i = W_{c,l} - W_{i,i} \text{ [kW]} \quad (1.3)$$

Între subsistemul de producere a energiei și cel al transformării formelor intermediare de energie apar pierderi prin transport, față de energia livrată W_l , egale cu diferența dintre energia livrată din subsistemul producerii de energie și energia consumată în sistemul producerii sau transformării formelor intermediare de energie.

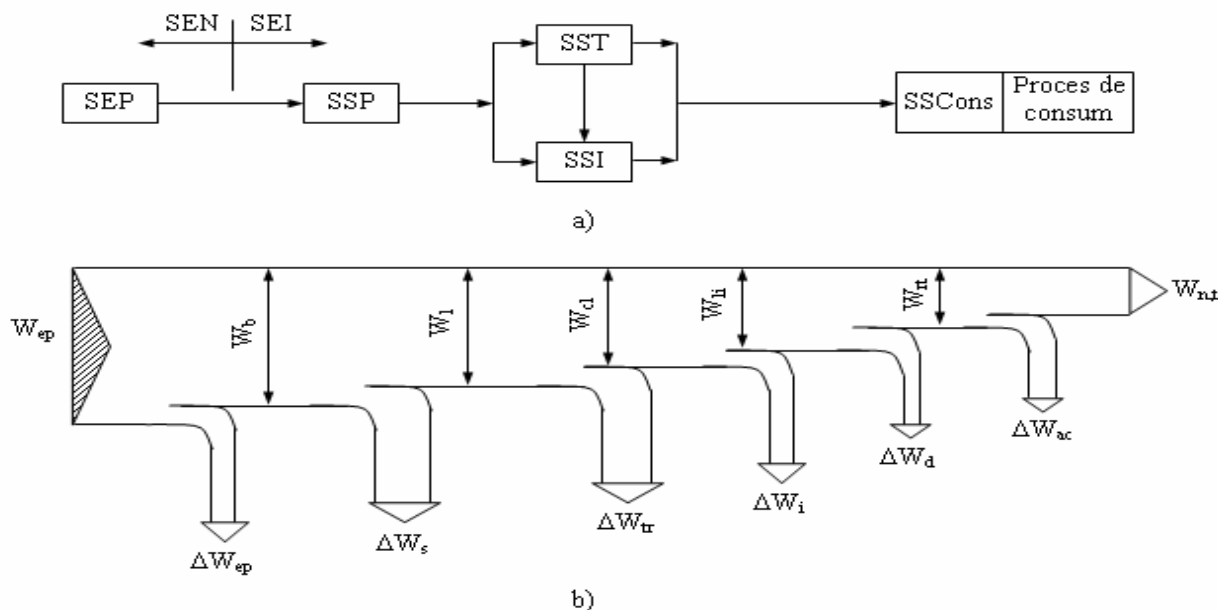


Figura 1.2. Fluxurile energetice de la faza de energie primară la procesul consumator:

- a) Transformări energetice; b) Diagrama Sankey a fluxurilor energetice corespunzătoare alimentării cu energie a consumatorilor industriali; SEP – sursa de energie primară; SSP – subsistemul producerii energiei electrice și/sau căldurii; SSI – subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie (agenți energetici); SSCons – subsistemul aparatelor (instalațiilor) consumatoare;
- W_{ep} – energie primară consumată; W_b - energie primară consumată de subsistemul producerii energiei electrice și/sau căldurii; W_1 - energie electrică și/sau termică, livrată de subsistemul producerii energiei; W_{cl} - energie primară consumată de subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie; W_{li} - energie livrată de subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie; W_{rt} - energie necesară la aparatele consumatoare, în condiții reale de funcționare; W_{nt} – necesar de energie pentru desfășurarea proceselor de consum (tehnologice sau pentru asigurarea condițiilor de muncă); ΔW_{ep} – pierderi de energie primară; ΔW_s – pierderi de energie în cadrul proceselor de conversie care au loc în subsistemul producerii energiei; ΔW_{tr} - pierderi de energie prin rețeaua de transport de la subsistemul producerii energiei la subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie; ΔW_i – pierderi de energie în cadrul proceselor de conversie care au loc în subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie; ΔW_d - pierderi de energie prin rețeaua de distribuție de la subsistemul realizării sau transformării formelor intermediare de energie la instalațiile consumatoare; ΔW_{ac} - pierderi de energie în instalațiile consumatoare corespunzătoare

Ținând seama de randamentul conversiei energiei în subsistemul de producere al acesteia, din forma de energie primară W_b în cea livrată W_1 , vor apărea pierderi de energie egale cu diferența dintre energia primară consumată în subsistemul producerii energiei și energia livrată din subsistemul respectiv.

$$\Delta W_s = W_b - W_1 \text{ [kW]} \quad (1.4)$$

$$\Delta W_{tr} = W_1 - W_{cl} \text{ [kW]} \quad (1.5)$$

Transportul energiei primare de la sursă la subsistemul de producere a energiei se face de asemenea cu pierderi de energie care sunt egale cu diferența dintre energia primară totală preluată din Sistemul Energetic Național și energia consumată în subsistemul producerii energiei.

$$\Delta W_{ep} = W_{ep} - W_b \text{ [kW]} \quad (1.6)$$

Pentru a asigura unui proces de consum cantitatea de energie W_{nt} , la nivelul sistemului energetic național, este necesar un aport de energie W_{ep} , determinat cu relația 1.7:

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

$$W_{ep} = W_{n,t} + \sum \Delta W \text{ [kW]} \quad (1.7)$$

$$W_{ep} = W_{n,t} + \Delta W_{ac} + \Delta W_d + \Delta W_i + \Delta W_{tr} + \Delta W_s + \Delta W_{ep} \text{ [kW]}$$

unde: $\sum \Delta W = \Delta W_{ac} + \Delta W_d + \Delta W_i + \Delta W_{tr} + \Delta W_s + \Delta W_{ep}$ – suma pierderilor de energie, [kW].

La nivelul sistemului energetic industrial (SEI), consumul brut de energie poate fi determinat cu relația 1.8 pentru cazul când sistemul de producere a energiei face parte din sistemul energetic industrial sau, cu relația 1.9 pentru cazul în care subsistemul de producere a energiei nu face parte din sistemul energetic industrial sau energia primară este utilizată ca atare, direct în acesta, adică $\Delta W_s = 0$:

$$W_b = W_{n,t} + \sum \Delta W_{SEI} = W_{n,t} + \Delta W_{ac} + \Delta W_d + \Delta W_i + \Delta W_{tr} + \Delta W_s \text{ [kW]} \quad (1.8)$$

$$W_b = W_{n,t} + \sum W_{SEI} = W_{n,t} + \Delta W_{ac} + \Delta W_d + \Delta W_i + \Delta W_{tr} \text{ [kW]} \quad (1.9)$$

1.2.2. Randamentele de conversie și utilizare a energiei în Sistemul Energetic

Principalele randamente de conversie și utilizare a energiei, determinate pe baza diagramei Sankey a fluxurilor energetice corespunzătoare alimentării cu energie a consumatorilor energetici din figura 1.2, sunt:

1. Randamentul aparatelor consumatoare, η_{ac} , reprezintă raportul dintre energia consumată pentru desfășurarea proceselor de consum și energia la aparatele consumatoare.

$$\eta_{ac} = \frac{W_{n,t}}{W_{rt}} \quad (1.10)$$

2. Randamentul de transport a energiei de la subsistemul intermediar la consumator, η_d , reprezintă raportul dintre energia necesară aparatelor consumatoare și energia livrată de subsistemul producerii sau transformării formelor intermediare de energie.

$$\eta_d = \frac{W_{rt}}{W_{li}} \quad (1.11)$$

3. Randamentul subsistemului realizării sau transformării formelor intermediare de energie, η_{SSI} , reprezintă raportul dintre energia livrată din subsistemul producerii sau transformării formelor intermediare de energie și energia consumată în subsistemul respectiv.

$$\eta_{SSI} = \frac{W_{li}}{W_{cl}} \quad (1.12)$$

4. Randamentul de transport a energiei de la subsistemului de producere a ei la subsistemul transformărilor intermediare, η_{tr1} , reprezintă raportul dintre energia consumată în subsistemul producerii sau transformării energiei și energia livrată din subsistemul producerii energiei.

$$\eta_{tr} = \frac{W_{cl}}{W_1} \quad (1.13)$$

5. Randamentul subsistemului de producere a energiei, η_{SSP} , raportul dintre energia livrată din subsistemul producerii energiei și energia consumată în subsistemul respectiv.

$$\eta_{SSP} = \frac{W_1}{W_b} \quad (1.14)$$

6. Randamentul transportării energiei primare, η_{ep} , reprezintă energia consumată în subsistemul producerii energiei raportată la energia primară consumată.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

$$\eta_{ep} = \frac{W_b}{W_{ep}} \quad (1.15)$$

7. Randamentul total al utilizării energiei, η_{tot} , reprezintă energia consumată pentru desfășurarea proceselor de consum raportat la consumul de energie primară.

$$\eta_{tot} = \frac{W_{n,t}}{W_{ep}} = \eta_{ac} \cdot \eta_d \cdot \eta_{SSI} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{SSP} \cdot \eta_{ep} \quad (1.16)$$

8. Randamentul utilizării energiei la nivelul conturului subsistemului de transformări intermediare:

a) Pentru cazul în care subsistemul de producere a energiei face parte din sistemul energetic industrial, randamentul este egal cu energia consumată pentru desfășurarea proceselor de consum împărțită la energia consumată în subsistemul producerii energiei.

$$\eta_{SEI} = \frac{W_{n,t}}{W_{ep}} = \eta_{ac} \cdot \eta_d \cdot \eta_{SSI} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{SSP} \quad (1.17)$$

b) Pentru cazul în care subsistemul de producere a energiei nu face parte din sistemul energetic industrial sau energia primară W_{ep} este utilizată direct în acesta ($\eta_{SSP}=1$), randamentul este raportul dintre energia consumată pentru desfășurarea produselor de consum și energia livrată din subsistemul producerii.

$$\eta_{SEI} = \frac{W_{n,t}}{W_b} = \eta_{ac} \cdot \eta_d \cdot \eta_{SSI} \cdot \eta_{tr} \quad (1.18)$$

Pentru situația în care nu intervine o conversie intermediară a energiei (lipsește subsistemul transformărilor intermediare) $\Delta W_i=0$ și $\eta_{SSI}=1$, se modifică randamentul total și cel al utilizării energiei, relațiile 1.19...1.21.

$$\eta_{tot} = \eta_{ac} \cdot \eta_d \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{SSP} \cdot \eta_{ep} \quad (1.19)$$

$$\eta_{SEI} = \eta_{ac} \cdot \eta_d \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{SSP} \quad (1.20)$$

$$\eta_{SEI} = \eta_{ac} \cdot \eta_d \cdot \eta_{tr} \quad (1.21)$$

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

2. NOȚIUNI GENERALE DE TERMOTEHNICĂ

TERMODINAMICA studiază proprietățile termice ale corpurilor în condiții de echilibru energetic, precum și procesele care conduc la stabilirea stărilor de echilibru.

Se poate spune că termodinamica este știința care se ocupă cu studiul legilor de transformare a energiei, analizează mișcarea moleculară din interiorul corpurilor și fenomenele determinate de acțiunea particulelor elementare constructive ale acestora.

TERMODINAMICA TEHNICĂ (TERMOTEHNICA) este disciplina care studiază procese ce se desfășoară în mașinile și instalațiile termice, procese în care transferul de energie între corpuri se face sub formă de căldură și lucru mecanic, ocupându-se în special cu problemele legate de producerea, transportul și utilizarea căldurii.

2.1. Sistem termodinamic, starea termodinamică, ecuația termică de stare

CORPUL TERMODINAMIC reprezintă entitatea izolată de mediul ambiant care se studiază din punct de vedere al legilor termodinamicii.

Prin **sistem termodinamic** se înțelege un ansamblu bine delimitat de corpuri care pot interacționa între ele sau cu exteriorul, interacțiuni de natură mecanică sau termică.

Definiția sistemului termodinamic este explicată prin două mărimi tehnice:

- **schimb de căldură** – cantitatea de energie cedată sau primită de sistem, însoțită de variația parametrilor săi externi;
- **lucru mecanic** – cantitatea de energie cedată sau primită de sistem, fără variația parametrilor externi ai acestuia.

Tot ceea ce se găsește în afara limitelor sistemului se numește **mediu ambiant**. Între un sistem termodinamic și mediu ambiant se pot exercita interacțiuni de natură mecanică sau termică însoțite sau nu de schimburi de substanță.

Din acest punct de vedere sistemele termodinamice pot fi:

- ☑ **sisteme termodinamice închise**: sisteme în care este posibil un schimb de energie cu mediul ambiant, dar nu este posibil schimb de masă;
- ☑ **sisteme termodinamice deschise**: sisteme în care au loc atât schimb de energie cât și schimb de masă cu mediul ambiant;
- ☑ **sisteme termodinamice izolate**: sisteme care sunt puse în imposibilitatea de a exercita orice tip de interacțiuni;
- ☑ **sisteme termodinamice izolate adiabate**: sisteme care nu pot realiza interacțiuni de natură termică cu mediul ambiant, dar pot realiza interacțiuni de natură mecanică.

Starea termodinamică a unui sistem este determinată prin natura, masa și energia corpurilor componente, de condițiile lui interioare și de condițiile exterioare.

Mărimile fizice cu ajutorul cărora se poate preciza starea unui sistem aflat în echilibru termodinamic se numesc **mărimi de stare – parametrii de stare**, parametri ce pot fi interni sau externi.

Starea de echilibru termodinamic a unui sistem se atinge atunci când toți parametri care o caracterizează **nu** se modifică în timp.

Parametrii de stare externi sunt mărimile ce caracterizează starea exterioară a sistemului și care sunt funcții numai de coordonatele generalizate ale corpurilor (volum, intensități de câmpuri de forțe).

Parametrii de stare interni sunt mărimile ce caracterizează starea internă a sistemului, depind de proprietățile sistemului (presiunea, temperatura, densitatea).

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

Prin **ciclul termodinamic** se înțelege o succesiune de transformări termodinamice în urma cărora mașina revine de fiecare dată în starea inițială.

Definirea unei stări a unui sistem termodinamic se realizează cu ajutorul ecuației termice de stare, dezvoltată pe baza postulatului doi al termodinamicii, denumit și **principiul zero al termodinamicii**:

Enunț 1: Orice mărime de stare a unui sistem aflat în condiții de echilibru termodinamic poate fi determinată în funcție de parametrii de stare externi ai sistemului și de o mărime ce caracterizează starea interioară a sistemului, numită temperatură.

Enunț 2: Două sisteme aflate în echilibru termic cu un al treilea simultan și succesiv se află în echilibru termic între ele.

Ecuația termică de stare (relația 2.1) – permite determinarea unuia dintre parametrii de stare, presiunea p , [bar], volumul specific, v , [m³/kg] sau temperatura, t , [°C] dacă se cunosc ceilalți doi:

$$\begin{aligned} F(V, T, p, m) &= 0 \\ f(v, t, p) &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Rezultă:

a) volumul specific al unei substanțe este univoc determinat dacă se cunosc presiunea, p și temperatura termodinamică T :

$$v = v(p, T) \quad (2.2)$$

b) presiunea este univoc determinată dacă se cunosc volumul specific, v și temperatura termodinamică T :

$$p = p(v, T) \quad (2.3)$$

c) temperatura termodinamică T este univoc determinată dacă se cunosc presiunea, p și volumul specific, v :

$$T = T(p, v) \quad (2.4)$$

Prin diferențierea (derivarea) celor trei ecuații (2.2...2.4), rezultă:


$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \cdot dT + \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \cdot dv \quad (2.5)$$

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p \cdot dv + \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v \cdot dp \quad (2.6)$$

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \cdot dp \quad (2.7)$$

Înlocuind relația 2.6 în relația 2.5, rezultă expresia generală a ecuației termice de stare (relația 2.8):

$$\begin{aligned} dp &= \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \cdot \left[\left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p \cdot dv + \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v \cdot dp \right] + \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \cdot dv \Rightarrow \\ \Rightarrow dp &= \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p \cdot dv + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v \cdot dp + \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \cdot dv : dp \Rightarrow \end{aligned}$$

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

$$\begin{aligned} \Rightarrow 1 &= \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v + \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \Rightarrow \\ \Rightarrow 1 &= \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \cdot \left(\frac{dv}{dp}\right)_T + 1 + 1 \\ \Rightarrow \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \cdot \left(\frac{dv}{dp}\right)_T &= -1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.2. Energia internă, lucrul mecanic, căldura, entalpia

2.2.1. Energia internă

Energia internă este o mărime de stare care reprezintă starea de agitație moleculară a unui corp (energia conservată într-un corp) într-o stare termodinamică oarecare.

Energia internă se notează cu U și se măsoară în Jouli [J] sau [cal] (relația 2.9). Dacă ne referim la 1 kg de substanță, atunci se numește *energie specifică*, se notează cu u și se măsoară în [J/kg].

$$U = U_{\text{cin}} + U_{\text{pot}} + U_0 \quad [\text{J}] \quad (2.9)$$

unde: U_{cin} - suma energiilor cinetice moleculare corespunzătoare mișcărilor de translație, rotație și vibrație, [J];

U_{pot} - suma energiilor potențiale datorate forțelor de interacțiune dintre molecule, [J];

U_0 - suma energiilor dintre molecule și atomi, [J].

În calculele termotehnice nu interesează valoarea absolută a energiei interne ci numai variația acestei ΔU , adică:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad [\text{J}] \quad (2.10)$$

unde: U_1, U_2 - energia sistemului în starea inițială, respectiv starea finală, [J].

2.2.2. Lucrul mecanic

La interacțiunea unui sistem cu mediul ambiant se poate produce schimb de energie de natură mecanică atât de la sistem la mediul ambiant, cât și de la mediul ambiant la sistem.

a) Lucrul mecanic reprezintă energia schimbată de-a lungul interacțiunii mecanice dintre sistem și mediul ambiant. Lucrul mecanic produs de o forță care își deplasează punctul de aplicație pe o distanță x este determinat cu relația:

$$L = F \cdot x \quad (2.11)$$

Dacă se consideră o deplasare elementară dx , se va efectua un lucru mecanic elementar:

$$dl = F \cdot dx \quad (2.12)$$

Considerând o suprafață de arie S asupra căreia acționează la un moment dat presiunea p , se va efectua un lucru mecanic elementar:

$$dl = F \cdot dx = p \cdot S \cdot dx \quad (2.13)$$

Deoarece $dv = S \cdot dx$ rezultă:

$$dl = p \cdot dv \quad (2.14)$$

b) Lucrul mecanic de dislocare, l_d (relația 2.15) – reprezintă lucrul mecanic necesar pentru deplasarea unui volum de fluid într-o conductă, dintr-o poziție dată până în poziția următoare, în condiții de presiune constantă.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

$$l_d = \frac{p \cdot V}{m} = p \cdot v \quad [\text{J/kg}] \quad (2.15)$$

unde: V - volumul de fluid, $[\text{m}^3]$;
 p - presiunea fluidului, $[\text{bar}]$;
 m - masa fluidului, $[\text{kg}]$.
 v - volumul specific de fluid, $[\text{m}^3/\text{kg}]$.

c) Lucrul mecanic absolut efectuat de un gaz prin deplasarea pistonului unui cilindru pe o distanță x , la trecerea dintr-o stare termodinamică inițială, 1, într-o stare termodinamică finală, 2, se obține prin însumarea (integrarea) cantităților elementare de lucru mecanic (relația 2.16).

$$L_{12} = \int_1^2 dl = \int_1^2 p \cdot dV \quad [\text{J}] \quad (2.16)$$

Pentru o cantitate de gaz egală cu unitatea, lucrul mecanic absolut este definit prin relația 2.17:

$$l_{12} = \int_1^2 p \cdot dv \quad [\text{J/kg}] \quad (2.17)$$

d) Lucrul mecanic total pe care îl dezvoltă agentul termic într-o mașină termică (care include atât lucrul mecanic absolut produs în trecerea de la starea 1 la starea 2, cât și lucrul mecanic de admisie și evacuare a agentului termic), poartă denumirea de *lucrul mecanic tehnic* sau *lucrul mecanic util exterior* și este determinat cu relațiile 2.18 și 2.19.

$$L_{t12} = L_a + L_{12} + L_e = p_1 \cdot V_1 + L_{12} - p_2 \cdot V_2 \quad (2.18)$$

$$L_{t12} = L_{12} - (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1) = \int_1^2 p \cdot dV - \int_1^2 d(p \cdot V) = \int_1^2 p \cdot dV - \int_1^2 p \cdot dV - \int_1^2 V \cdot dp = -\int_1^2 V \cdot dp \quad (2.19)$$

Pentru o cantitate de agent termic egală cu unitatea, lucrul mecanic total se determină cu relația:

$$l_{t12} = -\int_1^2 v \cdot dp \quad (2.20)$$

CONVENȚIE DE SEMNE:

1. Dacă sistemul primește energie prin interacțiune mecanică atunci, sistemul respectiv consumă lucru mecanic și, ca urmare, acesta este negativ ($L < 0$);
2. Dacă sistemul cedează energie prin interacțiune mecanică atunci, sistemul respectiv produce lucru mecanic și, ca urmare, acesta este pozitiv ($L > 0$).

2.2.3. Căldura

Între un sistem termodinamic și mediul ambiant apare independent de interacțiunile de natură mecanică, un schimb de energie pus în evidență fie prin creșterea temperaturii T a sistemului când aceasta este mai mică decât temperatura mediului ambiant fie prin scăderea temperaturii T a sistemului când acesta este superioară temperaturii mediului ambiant. Energia transmisă în acest schimb de energie se numește căldură și, se determină cu relația 2.21.

$$dq = m \cdot c \cdot dt \quad [\text{J}] \text{ sau } [\text{kcal}] \quad (2.21)$$

unde: m - masa fluidului, $[\text{kg}]$;
 c - căldura specifică a fluidului, $[\text{J/kg}^\circ\text{C}]$;
 dt - variația (gradientul) de temperatură, $[\text{°C}]$.

CONVENȚIE DE SEMNE:

1. Căldura primită de un corp sau de un sistem termodinamic în timpul unui proces este pozitivă, conducând la creșterea temperaturii ($dT > 0$);

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

2. Căldura cedată de un corp sau de un sistem termodinamic în timpul unui proces este negativă, conducând la scăderea temperaturii ($dT < 0$);

2.2.4. Entalpia

Este o mărime de stare cu caracter energetic, referindu-se ca și energia internă, la nivelul energetic al unui sistem definită ca suma dintre energia internă a corpului sau sistemului și lucrul mecanic de dislocare (termen introdus de H. Kamerling – Onnes în anul 1909). Ea se notează cu $H(I)$, se măsoară în J și se determină cu relația 2.22, respectiv, $h(i)$, caz în care se numește entalpie specifică, se măsoară în J/kg și se determină cu relația 2.23:

$$H(I) = U + p \cdot V \quad [J] \quad (2.22)$$

$$h(i) = u + p \cdot v \quad [J/kg] \quad (2.23)$$

2.3. Principiile termodinamicii

2.3.1. Principiul I al termodinamicii

Primul principiu al termodinamicii reprezintă legea conservării energiei și de asemenea se referă la modul în care variază energia internă a unui sistem care interacționează mecanic sau termic cu mediul exterior, având mai multe enunțuri:

Enunț 1. Variația energiei interne a unui sistem ΔU , la trecerea dintr-o stare inițială de echilibru într-o stare finală de echilibru este egală cu suma dintre lucru mecanic efectuat de sistem L și căldura schimbată Q de acesta în cursul procesului.

Enunț 2. O mașină pentru a produce lucru mecanic trebuie să consume o cantitate echivalentă de energie. În cazul în care aceasta nu este primită din exterior, se consumă din energia internă sau externă a sistemului.

O consecință a primului principiu o constituie infirmarea posibilității existenței unui perpetuum mobile de speța I.

(Perpetuum mobile de speța I este o mașină care ar produce lucru mecanic fără a consuma o cantitate echivalentă de energie).

a) Pentru sisteme închise

A. În cazul unui sistem închis izolat față de mediul ambiant – care nu schimbă nici căldură nici lucru mecanic, energia se păstrează constantă în timpul acestei transformări:

$$E_1 = E_2 \quad (2.24)$$

B. În cazul unui sistem închis izolat adiabatic față de mediul ambiant – care nu schimbă căldură dar schimbă lucru mecanic cu mediul exterior, se poate scrie:

$$E_1 - L_{12} = E_2 \quad (2.25)$$

C. În cazul unui sistem închis – care schimbă și lucru mecanic și căldură cu mediul înconjurător, se poate scrie:

$$E_1 - L_{12} + Q_{12} = E_2 \quad (2.26)$$

Energia conținută de sistem în cele două stări 1 și 2 (E_1 și E_2) este compusă din energia cinetică și energie potențială – energia externă - și energia internă.

$$E_1 = U_1 + \frac{m \cdot w_1^2}{2} + m \cdot g \cdot h_1 \quad (2.27)$$

$$E_2 = U_2 + \frac{m \cdot w_2^2}{2} + m \cdot g \cdot h_2 \quad (2.28)$$

Cu aceste relații, relația 2.26 devine:

$$U_1 + m \cdot \frac{w_1^2}{2} + m \cdot g \cdot h_1 + Q_{12} - L_{12} = U_2 + m \cdot \frac{w_2^2}{2} + m \cdot g \cdot h_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_{12} - L_{12} = U_2 - U_1 + m \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.29)$$

sau pentru unitatea de masă:

$$q_{12} - l_{12} = u_2 - u_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \quad (2.30)$$

sau forma diferențială:

$$dq = dl + du + w \cdot dw + g \cdot dh = du + p \cdot dv + w \cdot dw + g \cdot dh \quad (2.31)$$

Se poate considera: $\begin{cases} w_1 \cong w_2 \\ h_1 \cong h_2 \end{cases} \Rightarrow$ **ecuația diferențială a primului principiu al termodinamicii**

pentru sisteme închise:

$$dq = du + dl = du + pdv \quad (2.32)$$

b) Pentru sisteme deschise

Se consideră o mașină termică în care agentul termic primește căldură și efectuează lucru mecanic. Mașina lucrează în sistem deschis (figura 2.1): mediul de lucru este preluat din exterior și după ce efectuează o serie de transformări este cedat din nou mediului înconjurător. Fluidul de lucru trebuie să traverseze de două ori limita sistemului: la intrare și la ieșire. De fiecare dată produce sau consumă lucru mecanic.

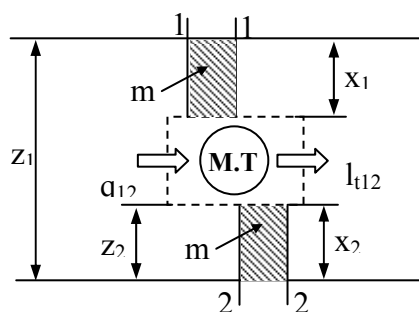


Figura 2.1. Sistem termodinamic deschis

Lucrul mecanic produs de masa m la intrarea în mașină, respectiv lucrul mecanic consumat la ieșirea din mașină pentru a trece peste limita sistemului, va fi:

$$l_1 = p_1 \cdot \frac{A \cdot x_1}{m} = p_1 \cdot v_1 \quad (2.33)$$

$$l_2 = p_2 \cdot \frac{A \cdot x_2}{m} = p_2 \cdot v_2 \quad (2.34)$$

unde: A - aria secțiunii de intrare, $[m^2]$.

Scriind bilanțul energetic pentru o astfel de mașină între stările 1-1 și 2-2 se obține:



$$u_1 + p_1 \cdot v_1 + \frac{w_1^2}{2} + g \cdot z_1 + q_{12} = u_2 + p_2 \cdot v_2 + \frac{w_2^2}{2} + g \cdot z_2 + l_{12} \quad (2.35)$$

unde: $h(i) = u + pv$ - o mărime de stare numită entalpie, [J/kg].

l_{12} - lucru mecanic tehnic efectuat de mașină în interacțiunea cu mediul înconjurător sau în interacțiunea cu un alt sistem, [J/kg].

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} + g \cdot z_1 + q_{12} = h_2 + \frac{w_2^2}{2} + g \cdot z_2 + l_{12} \quad (2.36)$$

$$q_{12} - l_{12} = (h_2 - h_1) + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \quad (2.37)$$

Se poate considera: $\begin{cases} w_1 \cong w_2 \\ z_1 \cong z_2 \end{cases} \Rightarrow$ prin derivarea relației 2.37 *ecuația diferențială a*

principiului I al termodinamicii pentru sisteme deschise:

$$dq_{12} = dh + dl_{12} = dh - v \cdot dp \quad (2.38)$$

2.3.2. Principiul al - II - lea al termodinamicii

Principiul I al termodinamicii stabilește numai relații cantitative ale schimburilor energetice dintre sisteme fără a face precizări cu privire la condițiile în care se pot face transformările și la sensul de desfășurare al acestora.

Principiul al II-lea al termodinamicii stabilește relații calitative pentru fenomene termice din natură, cele două principii se completează reciproc, pe baza lor putându-se realiza mașinile termice prin cicluri termodinamice.

O prima formulare a principiului II al termodinamicii a fost dată de Sadi Carnot: O mașină termică nu poate produce în mod continuu (ciclic) lucru mecanic decât dacă agentul termic schimbă căldură cu două surse de căldură de temperaturi diferite. O mașină care ar funcționa continuu cu o singură sursă de căldură și ar transforma energia primită de la această sursă integral în lucru mecanic s-ar numi perpetuum mobile de speța a doua.

În 1850 Rudolf Clausius a enunțat ***o nouă formulare pentru principiul al II-lea: Căldura nu trece de la sine de la un corp cu temperatura scăzută la un corp cu temperatura mai ridicată. Acest proces este totuși posibil dacă se consumă lucru mecanic din exterior.***

În concordanță cu cele de mai sus Lord Kelvin (W. Thomson 1851) a enunțat principiul al II-lea sub forma: În natura, transformările ciclice al căror efect constă în producerea de lucru mecanic echivalent cu cantitatea de căldură preluată de la o singură sursă, sunt imposibile.

Observație:

Principiul al II-lea scoate în evidență calitatea energiei: există energii superioare care pot fi integral transformate în lucru mecanic (energie electrică, energie mecanică) sau alte forme de energie, și energii parțial transformabile (energie internă).

Exprimarea matematică a conținutului principiului al II-lea al termodinamicii a necesitat găsirea unei noi funcții care să permită stabilirea unor relații valabile pentru toate procesele termodinamice care au loc în sistemele izolate, aceasta fiind entropia.

Într-un ciclu reversibil integrala lui Clausius este nulă (relația 2.39) și deci, expresia de sub integrală reprezintă diferența unui funcții de stare. Acesta nouă funcție este notată cu S este definită de Clausius ca entropie și este o capacitate calorică de stare cu caracter extensiv pe baza căreia se poate scrie ***expresia matematică a principiului II al termodinamicii pentru procese reversibile (cvasistatice)*** (relația 2.40):

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (2.39)$$

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad [J/K] \quad \text{sau} \quad ds = \frac{dq}{T} \quad [J/kgK] \quad (2.40)$$

Fiind o funcție de stare, variația entropiei într-un proces reversibil depinde exclusiv de starea inițială și finală a sistemului:

$$dS = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (2.41)$$

Pentru sisteme izoterm-reversibile relația devine:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (2.42)$$

iar pentru procese adiabatice reversibile în care $dQ_{rev}=0$:

$$dS = 0, S = ct \quad (2.43)$$

Principiul al doilea al termodinamicii pentru procese ireversibile se poate scrie:

$$dS_{irev} > \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad (2.44)$$

Cu cât variația de entropie este mai mare decât valoarea integralei Clausius cu atât gradul de ireversibilitate al procesului este mai ridicat. Pentru un sistem izolat, integrala lui Clausius este nulă fiindcă sistemul nu schimbă căldură cu exteriorul.

2.3.3. Principiul al III-lea al termodinamicii (teorema lui Nerst)

Principiul al III-lea oferă posibilitatea de a calcula valorile absolute ale unor parametri de stare și ale constantelor de echilibru.

Teorema lui Nerst

Experimental, Nerst a constatat că la temperaturi apropiate de 0K variația potențialului Gibbs (entalpie liberă) prezintă valori apropiate de variația entalpiei, iar cele două mărimi devin egale. S-a formulat astfel următoarea concluzie:

Teorema căldurii: În sistemele la echilibru, care tind către temperatura zero absolut prin procese izoterm cvasistatice, variația entalpiei libere nu mai depinde de temperatură.

Teorema lui Nerst sau principiul al III-lea al termodinamicii se enunță și sub forma: Este imposibil de răcit o substanță până la zero absolut luându-i căldura; zero absolut este inaccesibil.

2.3.4. Ecuații calorice de stare

Relațiile stabilite între u și h pe de o parte și p , v , T pe de altă parte se numesc *ecuațiile calorice de stare*:

$$u = u(T, v); \quad h = h(T, p)$$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \cdot dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \cdot dv \quad (2.45)$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \cdot dp$$

Relațiile 2.45 se introduc în expresiile primului principiu al termodinamicii pentru sisteme închise și deschise.



a) Pentru sisteme închise:

$$dq = du + pdv = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \cdot dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \cdot dv + pdv \Rightarrow$$
$$dq = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \cdot dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] \cdot dv \quad (2.46)$$

b) Pentru sisteme deschise:

$$dq = dh - vdp = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \cdot dp - vdp \Rightarrow$$
$$dq = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left[\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v\right] \cdot dp \quad (2.47)$$

unde: $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$ - căldura specifică la volum constant;

$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$ - căldura specifică la presiune constantă.

Căldura specifică este căldura necesară pentru a crește (micșora) temperatura unității de masă dintr-un corp cu un grad.

2.4. Diagrame și transformări termodinamice ale vaporilor

Ciclurile termice ale mașinilor și instalațiilor termoenergetice sunt compuse din transformări simple. Transformările suferite de sistemele termodinamice se pot grupa în transformări de echilibru și transformări de neechilibru.

Transformarea este numită *reversibilă* dacă sistemul trece prin aceleași stări într-un sens sau altul de parcurgere. În cazul când stările parcurse de sistem diferă, transformarea se numește *irreversibilă*.

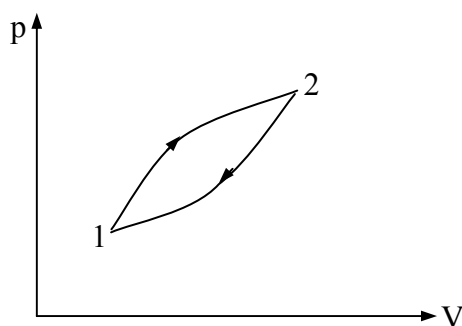


Figura 2.2. Procese reversibile în diagrama p-V

Diagramele termotehnice ale vaporilor se obțin prin reprezentarea grafică a tabelor în sisteme de două axe de coordonate, în care sunt trasate curbe de $v=ct$; $p=ct$; $t=ct$; $i=h=ct$; $s=ct$; $x=ct$.

Toate aceste diagrame au la baza reprezentarea **procesului de vaporizare**. Se numesc **vapori** corpurile în stare gazoasă în apropierea domeniului de lichefiere.

Vaporizarea este procesul de trecere a unei substanțe din faza lichidă în faza de vapori prin fierbere, proces ce se desfășoară în întreaga masă de lichid.

Titlul vaporilor umezi x reprezintă raportul dintre cantitatea (în kg) de vapori saturați uscați, și cantitatea de vapori saturați umezi (relația 2.48):

$$x = \frac{m_{\text{vap}}}{m_{\text{amestec}}} = \frac{m_{\text{vap}}}{m_{\text{vap}} + m_{\text{lich}}} \quad (2.48)$$

unde: m_{vap} - masa vaporilor, [kg];
 m_{amestec} - masa amestecului (lichid + vapori), [kg];
 m_{lich} - masa lichidului, [kg].

Observație:

Procesul de vaporizare, ca orice proces de schimbare de fază, are loc la temperatură și presiune constantă, deci este un proces izobar-izoterm.

Deci putem concluziona că în timpul vaporizării faza gazoasă și faza lichidă se găsesc în stare de echilibru termic, numită *stare de saturație*.

Temperatura la care are loc vaporizarea se numește *temperatură de saturație*; valoarea ei depinde de presiunea la care se desfășoară procesul.

Trecerea de la lichidul în stare de saturație la vapori saturați uscați se face cu coexistența fazei lichide și gazoase, care formează împreună un amestec numit *vapori saturați umezi*.

Diagramele termodinamice ale vaporilor permit citirea directă cu suficientă precizie a mărimilor de stare. Prin utilizarea diagramelor se obține o imagine intuitivă a desfășurării proceselor termodinamice în domeniul vaporilor.

2.4.1. Diagrama p-v a vaporilor de apă

Diagrama p-v permite evaluarea lucrului mecanic efectuat de vapori în timpul transformării termodinamice la care sunt supuși (figura 2.3). Sunt trasate cele două ramuri ale curbei limită, familiile de curbe izoterme și curbele de titlu constant.

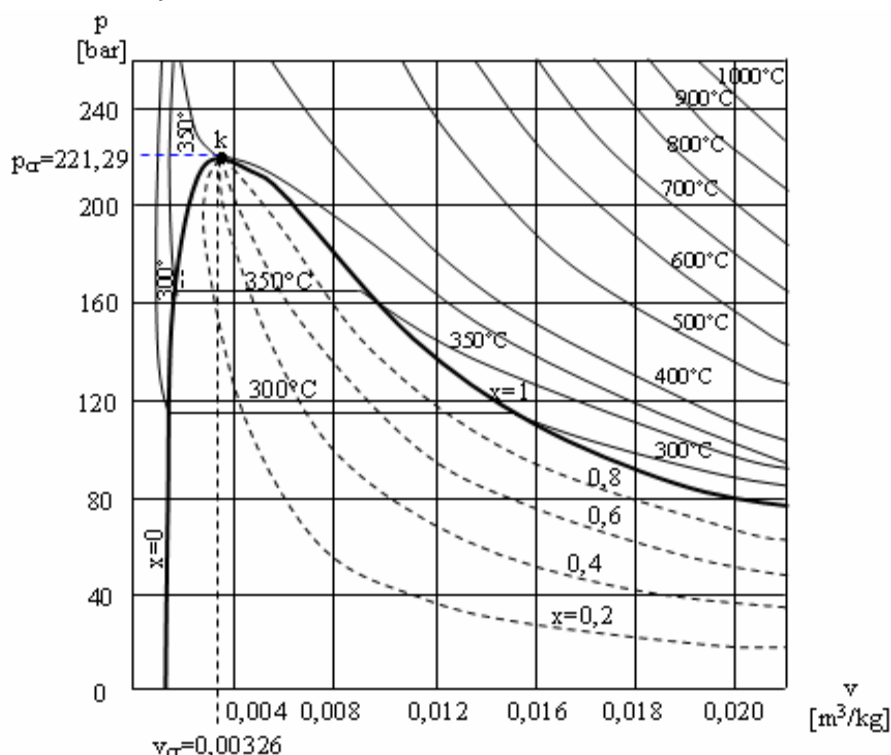


Figura 2.3. Diagrama p-v a vaporilor de apă

Pentru apă coordonatele punctului critic au valorile: $p_{\text{cr}}=221,29$ bar; $v_{\text{cr}}=0,00326$ m³/kg; $t_{\text{cr}}=374,15$ °C. Dacă se unesc punctele ce reprezintă începutul și sfârșitul vaporizării se obține curba limită sau curba de saturație alcătuită din două ramuri (curba lichidului la saturație $x=0$, respectiv curba vaporilor la saturație $x=1$) care se unesc în punctual critic k.

2.4.2. Diagrama T-s a vaporilor de apă

Diagrama se utilizează în calculele termodinamice pentru a pune în evidență căldura schimbată în procesele de încălzire, vaporizare, condensare sau supraîncălzire (figura 2.4). În zona umedă izobarele, fiind și izoterme, se prezintă sub formă de segmente orizontale, iar izocorele formează un fascicul de curbe care converg spre punctul de înghețare.

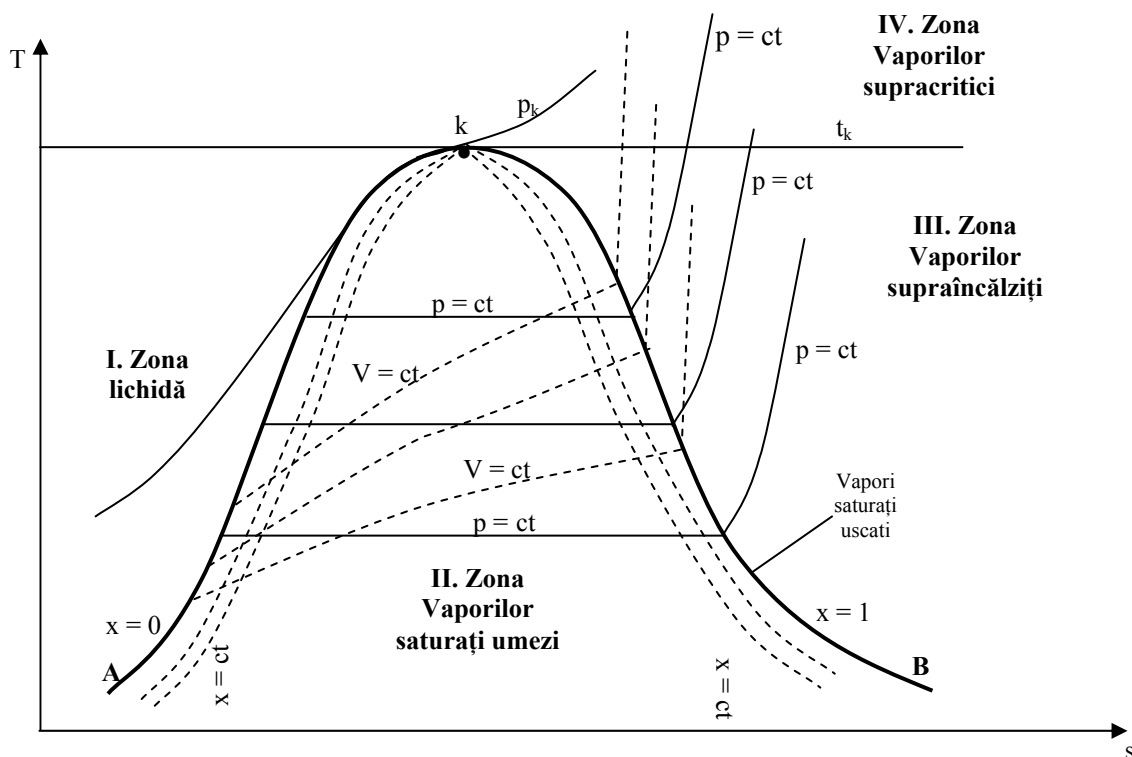


Figura 2.4. Diagrama T-s

În zona de supraîncălzire izobarele și izocorele au o formă logaritmică, subtangentele la aceste curbe reprezentând căldurile specifice c_p și c_v , curbele la volum constant sunt mai înclinate decât izobarele.

Între curbele limită procesele de vaporizare sau condensare sunt izobar-izoterme. Căldura ce trebuie furnizată pentru definitivarea vaporizării dintre curbele limită depinde de presiune.

- ☑ **ramura A-k** reprezintă curba limită la saturație a lichidului sau curba limită inferioară (curba de titlu constant $x=0$);
- ☑ **ramura k-B** reprezintă curba limită a vaporilor la saturație sau curba limită superioară (curba de titlu constant $x=1$).

Pe diagramă T-s (figura 2.4) se disting următoarele zone, și anume:

- **zona I** – situată în stânga ramurii lichidului la saturație; corespunde stărilor în care fluidul se află în stare lichidă ($x=0$);
- **zona II** – situată între ramurile procesului de vaporizare; reprezintă domeniul vaporilor saturați umezi – zona amestecului lichid-vapori. Zona este formată dintr-o infinitate de curbe de titlu constant ce pornesc din punctual critic iar spre baza diagramei tind să devină paralele ($x \in (0,1)$);
- **zona III** – cuprinsă între izoterma critică și curba limită superioară; reprezintă domeniul vaporilor supraîncălziți ($x=1$);
- **zona IV** – zona vaporilor supracritici ($x=1$).

Pentru mărimile de stare ale vaporilor se utilizează următoarele notații:

- pentru lichid la saturație: v' ; ρ' ; u' ; i' ; s' ;

- pentru vapori saturați uscați: v'' ; ρ'' ; u'' ; i'' ; s'' .
- pentru zona amestecului, parametrii se calculează în funcție de valoarea titlului termodinamic al curbei pe care se află situat punctul de studiu:

$$\begin{aligned} v &= v' + x \cdot (v'' - v') \\ i &= i' + x \cdot (i'' - i') \\ s &= s' + x \cdot (s'' - s') \end{aligned} \quad (2.49)$$

2.4.3. Diagrama i - s a vaporilor de apă

Diagrama i - s este utilizată în calculele cu vapori de apă (abur) deoarece permite determinarea entalpiei și implică a lucrului mecanic obținut prin destinderea adiabată a aburului în turbină (figura 2.5).

Punctul k nu mai este punct de maxim pe curbele limită, ci un punct de inflexiune (punct în care se schimbă alinura curbei și pentru care derivata de ordinul al - II-lea este zero).

Pe întregul câmp al diagramei, izocorele au o formă apropiată de cea a curbilor logaritmice. În zona vaporilor saturați umezi izotermele se suprapun peste izobare, care sunt reprezentate prin drepte înclinate. În zona vaporilor supraîncălziți izobarele devin curbe logaritmice, a căror pantă este mai mică decât cea a izocorelor, iar izotermele devin curbe cu concavitatea în jos, tinzând către asimptote orizontale.

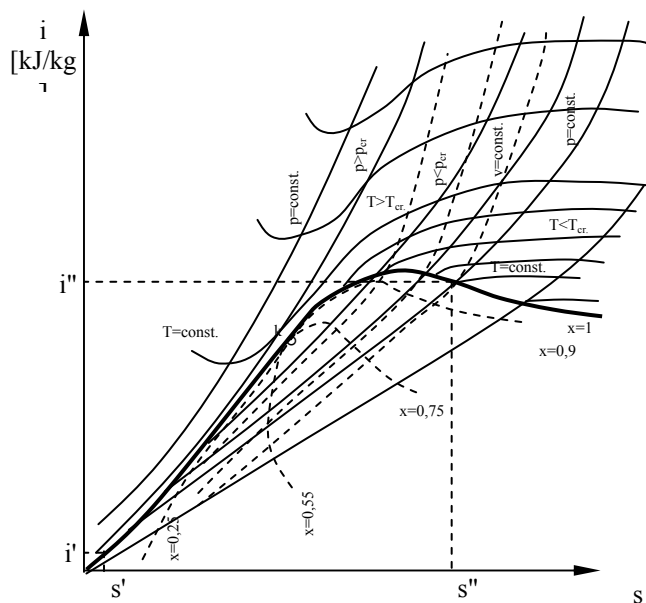


Figura 2.5. Diagrama i - s a vaporilor de apă

2.4.4. Transformări termodinamice ale vaporilor

2.4.4.1. Transformare izocoră sau legea lui Charles

Transformarea izocoră (figura 2.6) poate avea loc în domeniul vaporilor umezi sau supraîncălziți. Prin încălzire la volum constant aburul saturat umez (starea 1) își micșorează umiditatea (starea 2), $x_2 < x_1$ sau devine abur saturat (starea 1'') uscat sau supraîncălzit (starea 3).

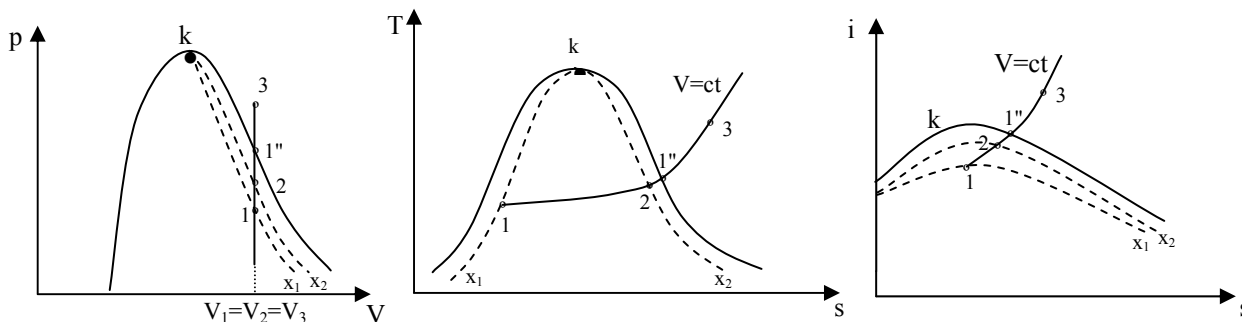


Figura 2.6. Transformarea izocoră a vaporilor de apă

Parametrii de stare care se modifică sunt presiunea și temperatura, volumul rămânând constant. Ecuația care descrie starea unui proces izocor, conform Legii lui Charles este:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{p}{T} = \text{ct} \quad (2.50)$$

Observație:

O astfel de transformare are loc în cazul în care o butelie umplută cu gaz este introdusă într-un mediu cu temperatură variabilă.

Pentru transformarea izocoră, conform ecuațiilor principiului I al termodinamicii pentru sisteme închise și deschise, se poate scrie:

☑ *Căldura schimbată în timpul transformării:*

$$\begin{aligned} dq &= du + p dV \\ V &= \text{ct} \Rightarrow dV = 0 \Rightarrow dq = du = C_V \cdot dT \Rightarrow q_{12} = C_V \cdot (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (2.51)$$

☑ *Lucru mecanic:*

$$\begin{aligned} dl &= p \cdot dV \\ V &= \text{ct} \Rightarrow dV = 0 \Rightarrow l_{12} = 0 \end{aligned} \quad (2.52)$$

☑ *Lucrul mecanic tehnic:*

$$dlt = -V \cdot dp \Rightarrow lt_{12} = -V \cdot (p_2 - p_1) = V \cdot (p_1 - p_2) \quad (2.53)$$

☑ *Variația de energie internă:*

$$du = dq = C_V \cdot dT \Rightarrow q_{12} = C_V \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.54)$$

☑ *Entalpia:*

$$\begin{aligned} dq &= dh - V \cdot dp \Rightarrow dh = dq + V \cdot dp \Rightarrow dh = C_V \cdot dT + V \cdot dp \\ h_{12} &= C_V \cdot (T_2 - T_1) + V \cdot (p_2 - p_1) \end{aligned} \quad (2.55)$$

2.4.4.2. Transformarea izobară sau legea Guy - Lussac

În timpul transformării izobare (figura 2.7), parametri de stare care se modifică sunt temperatura și volumul, presiunea rămâne constantă. Această transformare este cel mai des întâlnită în funcționarea mașinilor și instalațiilor termice (procese de condensare și vaporizare), ecuația care descrie starea unui proces izobar, conform Legii lui Guy - Lussac fiind:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{V}{T} = \text{ct} \quad (2.56)$$

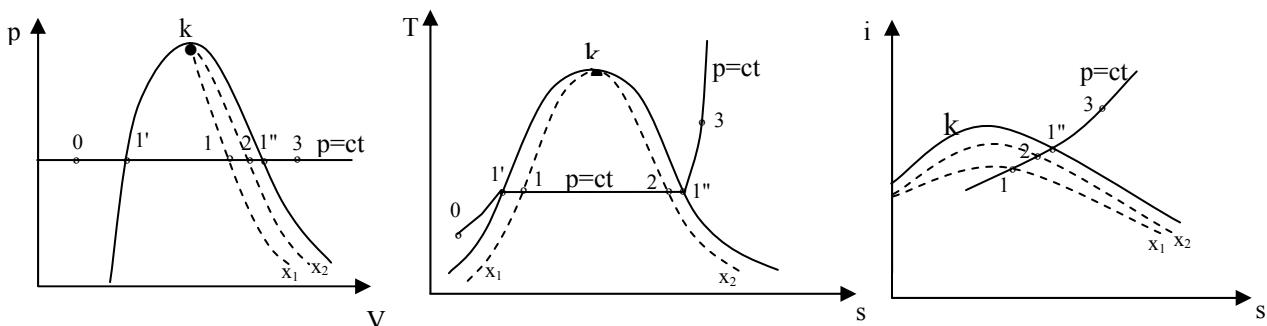


Figura 2.7. Transformarea izobară a vaporilor de apă

Pentru transformarea izobară, conform ecuațiilor principiului I al termodinamicii pentru sisteme închise și deschise, se poate scrie:

☞ *căldura schimbată în timpul transformării:*

$$dq = dh - V \cdot dp$$

$$p = ct \Rightarrow dp = 0 \Rightarrow dq = dh = C_p \cdot dT \Rightarrow q_{12} = h_{12} = C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.57)$$

⇨ *lucrul mecanic exterior:*

$$dl = p \cdot dV \Rightarrow l_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = p \cdot (V_2 - V_1) \quad (2.58)$$

⇨ *lucrul mecanic tehnic:*

$$dl_t = -V \cdot dp$$

$$p = ct \Rightarrow dp = 0 \Rightarrow lt_{12} = 0 \quad (2.59)$$

⇨ *variația de energie internă:*

$$dq = du + p \cdot dV \Rightarrow du = dq - p \cdot dV = C_p \cdot (T_2 - T_1) - p \cdot (V_2 - V_1) \quad (2.60)$$

2.4.4.3. Transformarea izotermă sau legea Boyle - Mariote

În timpul transformării izoterme (figura 2.8) se modifică presiunea și volumul sistemului termodinamic, temperatura rămânând constantă. În domeniul vaporilor saturați umezi procesul este și izobar și izoterm, iar ecuația termică care stă la baza procesului este:

$$T = ct; \quad p \cdot V = ct \quad T = ct; \quad p \cdot V = ct \quad (2.61)$$

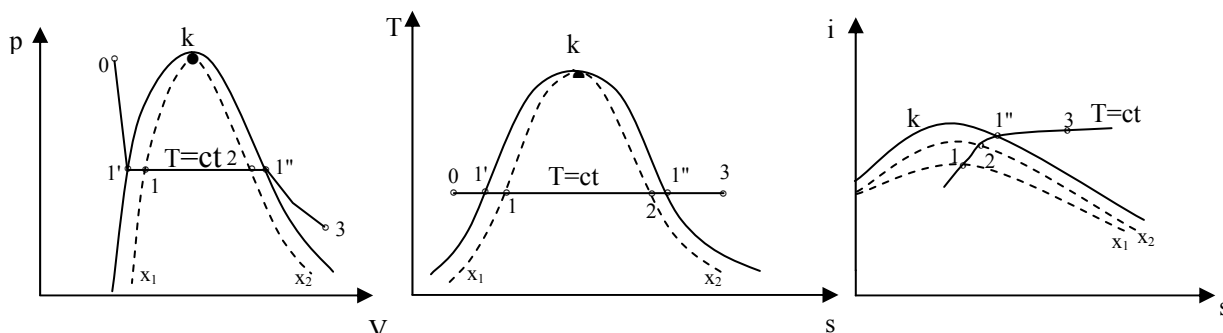


Figura 2.8. Transformarea izotermă a vaporilor de apă

Pentru această transformare se poate scrie, conform ecuațiilor principiului I al termodinamicii pentru sisteme închise și deschise:

➤ *căldura:*

$$dq = du + p \cdot dV = C_v \cdot dT + p \cdot dV \Rightarrow$$

$$T = ct \Rightarrow dT = 0 \Rightarrow dq = p \cdot dV \Rightarrow q_{12} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (2.62)$$

➤ *energia internă:*

$$du = C_v \cdot dT$$

$$T = ct \Rightarrow dT = 0 \Rightarrow du = 0 \Rightarrow u_2 - u_1 = 0 \quad (2.63)$$

➤ *entalpia:*

$$dh = C_p \cdot dT$$

$$T = ct \Rightarrow dT = 0 \Rightarrow dh = 0 \Rightarrow h_2 - h_1 = 0 \quad (2.64)$$

2.4.4. Transformarea adiabată

Procesele adiabatice presupun transformări ale sistemului termodinamic fără schimb de căldură cu exteriorul (figura 2.9). În timpul unei astfel de transformări se modifică temperatura, presiunea și volumul sistemului.

$dq=0$ - destinderea aburului în turbină (mașinile termice) se consideră că se desfășoară după o transformare adiabetică neglijând schimbul de căldură între vapori și mediu exterior sau între vapori și organele mașinilor.

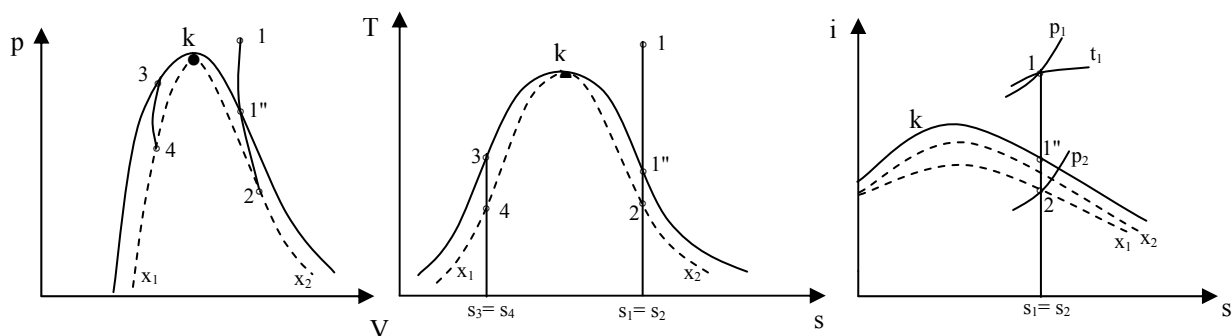


Figura 2.9. Transformarea izotermă a vaporilor de apă

Transformările adiabatice reversibile sunt caracterizate printr-o entropie constantă – se reprezintă în diagramele T-s și i-s printr-un segment vertical. Prin destinderea adiabetică vaporii supraîncălziți se transformă în vapori saturați umezi (starea 2). Lichidul saturat (starea 3) supus unei destinderi adiabatice se vaporizează transformându-se în vapori saturați umezi (starea 4).

Se definește în acest caz coeficientul $k = \frac{C_p}{C_v}$ – exponent adiabetic.

Pentru această transformare se poate scrie:

$$\begin{aligned} dq = du + p \cdot dV = 0 &\Rightarrow C_v \cdot dT = -p \cdot dV \Rightarrow \frac{C_p}{C_v} = \frac{V}{p} \cdot \frac{dp}{dV} \\ dq = dh - V \cdot dp = 0 &\Rightarrow C_p \cdot dt = V \cdot dp \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\text{Cum } k = \frac{C_p}{C_v} \Rightarrow k \cdot p \cdot dV + V \cdot dp = 0 \Rightarrow k \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0 \Rightarrow k \cdot \ln V + \ln p = ct \quad (2.66)$$

$$\ln p \cdot V^k = ct \Rightarrow p \cdot V = R \cdot T \Rightarrow p = \frac{R \cdot T}{V} \Rightarrow p \cdot V^k = ct \Rightarrow T \cdot V^{k-1} = ct \text{ sau } \frac{T^k}{p^{k-1}} = ct \quad (2.67)$$

➤ *căldura:*

$$dq = 0 \Rightarrow q_{12} = ct \quad (2.68)$$

➤ *lucru mecanic exterior:*

$$dl = p \cdot dV \Rightarrow l_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = \frac{p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2}{k-1} \quad (2.69)$$

➤ *lucrul mecanic tehnic:*

$$dl_t = -V \cdot dp \Rightarrow l_{t12} = \frac{k}{k-1} \cdot (p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2) \quad (2.70)$$

➤ *variația de energie internă:*

$$dq = du + p \cdot dV \Rightarrow u_2 - u_1 = -p \cdot dV = -l_{12} = \frac{p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1}{k-1} \quad (2.71)$$

➤ *entalpia:*

$$dq = dh - V \cdot dp = 0 \Rightarrow dh = -V \cdot dp = -dl_t \Rightarrow h_2 - h_1 = -l_{t12} = \frac{k}{k-1} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1) \quad (2.72)$$

2.4.4.5. Transformarea politropă sau generală

În cursul transformării politropice agentul termic schimbă energie sub formă de căldură și lucru mecanic cu exteriorul (figura 2.10). Aceste procese sunt ireversibile, și se produc cu creștere de entropie.

$$p \cdot V^n = ct$$

$$n = \frac{C_p - C_n}{C_v - C_n} \quad (2.73)$$

unde: n – exponent politropic;
 C_n – capacitate calorică masică generalizată.

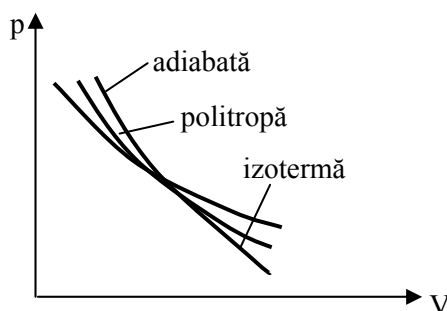


Figura 2.10. Transformarea adiabată, izotermă și politropă a vaporilor de apă

Pentru această transformare se poate scrie, conform principiului I al termodinamicii:

➤ *căldura:*

$$dq = du + p \cdot dV \Rightarrow q_{12} = C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.74)$$

➤ *lucrul mecanic exterior:*

$$l_{12} = \frac{p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2}{n-1} \quad (2.75)$$

➤ *lucrul mecanic tehnic:*

$$l_{t12} = \frac{n}{n-1} \cdot (p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2) = n \cdot l_{12} \quad (2.76)$$

➤ *variația de energie internă:*

$$dq = du + p \cdot dV \Rightarrow du = dq - p \cdot dV \Rightarrow u_2 - u_1 = C_n \cdot (T_2 - T_1) - \frac{p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2}{n-1} \quad (2.77)$$

➤ *entalpia:*

$$dq = dh - V \cdot dp \Rightarrow dh = dq + V \cdot dp \Rightarrow h_2 - h_1 = C_n \cdot (T_2 - T_1) - \frac{n}{n-1} \cdot (p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2) \quad (2.78)$$

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

3. NOȚIUNI GENERALE DE TRANSFER DE CĂLDURĂ

3.1. Mărimi specifice ale transferului de căldură

Transferul de căldură reprezintă un proces dinamic în care energia termică la anumiți parametri este transformată în energie termică la alți parametri cu respectarea legilor fundamentale ale termodinamicii, mai precis a principiului conservării energiei.

Transferul de căldură are loc în interiorul aceluiași sistem termodinamic sau între sisteme diferite reprezentând schimbul de energie termică ca rezultat al unei diferențe de temperatură.

Principalele mărimi specifice transferului de căldură sunt:

1. Debitul de căldură, reprezintă căldura totală transferată în unitatea de timp.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} \quad [\text{J/s}], [\text{W}] \quad (3.1)$$

unde: ΔQ - căldura transferată, [J];

$\Delta \tau$ - timpul de transfer a căldurii, [s].

2. Fluxul de căldură q , reprezintă căldura transferată pe unitatea de suprafață, în unitatea de timp.

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{\Delta Q}{S \cdot \Delta \tau} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.2)$$

unde: S – suprafața prin care se realizează transferul de căldură, [m²].

3. Câmpul de temperatură, reprezintă totalitatea valorilor temperaturilor “ t ” în întreg spațiul la un timp oarecare τ .

Temperatura, ca parametru de stare, depinde de poziție și de timp $t=f(x, y, z, t)$ cu x, y, z coordonate spațiale ale unui punct cu temperatura t față de un sistem de referință. Câmpul de temperatură poate fi *permanent* (staționar) când temperatura nu se modifică în timp sau *variabil* (nestaționar) când temperatura variază în timp.

4. Suprafața izotermă, reprezintă totalitatea punctelor din spațiul considerat care la momentul dat au aceeași temperatură “ t ”.

5. Gradientul de temperatură, reprezintă limita raportului dintre variația temperaturii Δt dintre două suprafețe izoterme și distanța Δn dintre acestea, măsurată pe normala la suprafață, când Δn tinde către zero.

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) \quad (3.3)$$

unde: grad t – căderea elementară de temperatură.

Transferul de căldură se poate realiza prin patru moduri diferite, în funcție de principiul de realizare: prin conducție, prin convecție, prin radiație și transfer global de căldură.

3.2. Transferul de căldură prin conducție [3]

Conducția termică reprezintă procesul de transfer de căldură dintr-o zonă cu temperatură mai ridicată către o zonă cu temperatură mai coborâtă în interiorul unui corp termodinamic (solid, lichid, gazos) sau între diferite medii în contact fizic direct între care există o diferență de temperatură.

Transferul de căldură prin conducție se realizează în cazul corpurilor solide prin difuzia electronilor liberi, iar în cazul corpurilor fluide (lichide sau gaze) prin ciocniri elastice din aproape în aproape între molecule sau atomi.

Conductivitatea termică este caracterizată prin *coeficientul de conductivitate termică* λ [$W/(m \cdot K)$] determinat teoretic (relația 6.4), dependent de substanța din care este alcătuit materialul, de starea de agregare, de presiune, de temperatură, de axele de cristalizare etc.

$$\lambda = k \cdot \frac{\rho}{\delta} \quad [W/(m \cdot K)] \quad (3.4)$$

unde: k – constantă dimensională, $\left[\frac{W}{kg \cdot mol^{1/3} \cdot K} \right]$;

ρ - densitatea, [kg/m^3];

$\delta = (M/\rho)^{1/3}$ – parametru structural, [$m/mol^{1/3}$];

M – masa moleculară, [kg/mol].

Transferul de căldură prin conducție în corpurile solide cu temperatură neuniformă se realizează din zonele cu temperatură mai ridicată către zonele cu temperatură mai scăzută.

Fluxul termic transferat prin conducție între două suprafețe izoterme cu temperaturi diferite pe direcția normală, n și prin suprafața dS va fi, conform legii lui Fourier:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dS \quad [W] \quad (3.5)$$

unde: λ - conductivitatea termică a materialului, [$W/(m \cdot K)$];

$\frac{\partial t}{\partial n}$ - gradientul de temperatură pe direcție normală la suprafață;

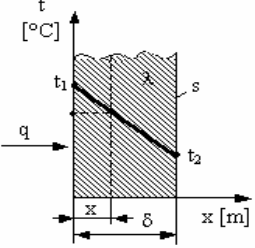
dS – elementul de suprafață prin care trece fluxul de căldură dQ , [m^2].

Pe unitatea de suprafață, fluxul termic unitar se determină cu relația:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad [W/m^2] \quad (3.6)$$

În funcție de tipul secțiunii suprafeței (plană, cilindrică, sferică), expresiile de calcul pentru fluxul de căldură transmis prin conducție sunt prezentate în tabelul 3.1.

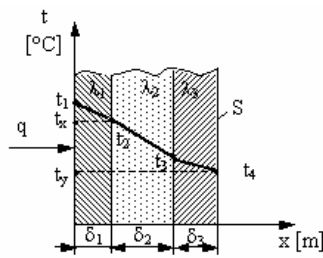
Tabelul 3.1. Relații de calcul pentru transferul de căldură prin conducție

| Figura | Relații de calcul |
|---|--|
| 3.1.1. PERETE PLAN $Q = q \cdot S$ [W] | |
| A. Perete plan omogen cu fețe paralele | |
|  | <p>Fluxul termic:</p> $q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad [W/m^2] \quad (3.7)$ <p>Temperatura la distanța x de suprafața caldă a peretelui:</p> $t_x = t_1 - q \cdot \frac{x}{\lambda} \quad [^{\circ}C] \quad (3.8)$ |

Figura

Relații de calcul

B. Perete plan neomogen cu fețe paralele



Fluxul termic:

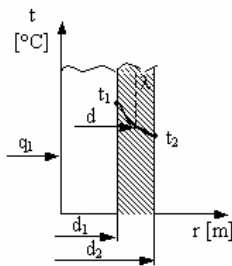
$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.9)$$

Temperatura la distanța x de suprafața caldă a peretelui:

$$t_x = t_1 - q \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.10)$$

3.1.2. PERETE CILINDRIC Q = q · L [W]

A. Perete cilindric omogen



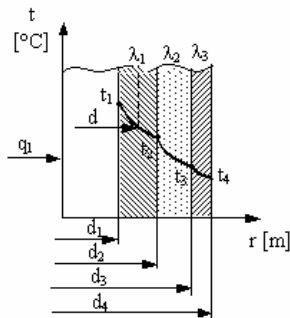
Fluxul termic:

$$q_1 = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad [\text{W/m}] \quad (3.11)$$

Temperatura la distanța d de suprafața caldă a peretelui:

$$t_d = t_1 - q_1 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.12)$$

B. Perete cilindric neomogen



Fluxul termic:

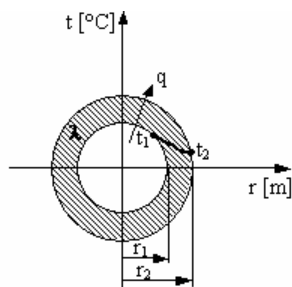
$$q_1 = \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad [\text{W/m}] \quad (3.13)$$

Temperatura la distanța x de suprafața caldă a peretelui:

$$t_x = t_1 - q_1 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.14)$$

3.1.3. PERETE SFERIC Q = q · S_{sferă} [W]

A. Perete sferic omogen


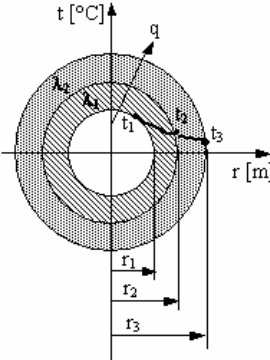


Fluxul termic:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{4\pi \cdot \lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad [\text{W/sferă}] \quad (3.15)$$

Temperatura la distanța x de suprafața caldă a peretelui:

$$t_x = t_1 - q \cdot \frac{1}{4\pi \cdot \lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.16)$$

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
| Figura | | Relații de calcul |
| B. Perete sferic neomogen | | |
|  | <p>Fluxul termic:</p> $q = \frac{t_1 - t_3}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_i} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right)} \text{ [W/sferă]} \quad (3.17)$ <p>Temperatura la distanța r_1 de suprafața caldă a peretelui:</p> $t_{r_1} = t_1 - q \cdot \frac{1}{4\pi \cdot \lambda_1} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.18)$ | |

3.3. Transferul de căldură prin convecție

Convecția termică reprezintă modul de transfer de căldură în cazul fluidelor în mișcare forțată sau liberă, aflate în contact cu suprafața unui solid sau între cantități de același fluid. Fluxul termic unitar de suprafață q_s se exprimă prin legea de răcire a lui Newton sub forma produsului între o proprietate a sistemului α și forța care generează procesul (este vorba de diferența de temperatură sau diferența de potențial termic):

$$q_s = \alpha(t_s - t_f) \quad (3.19)$$

Definirea în acest mod simplist a unui mecanism de transfer în esență complicat conferă coeficientului de transfer de căldură prin convecție, α , proprietatea de a îngloba toți factorii care determină procesul.

Transferul de căldură prin convecție este influențat de:

1. Factori hidrodinamici:

1. a. *cauza mișcării*: - *mișcarea liberă* este cauzată de forțe gravitaționale determinate de gradientul de temperatură, iar *mișcarea forțată* de o diferență de potențial (presiune) creată de o pompă, ventilator sau suflantă.

1. b. Regimul hidrodinamic al curgerii: - *regim de curgere laminar*, $Re < 2320$;
- *regim de curgere tranzitoriu* $2320 < Re < 10000$
- *regim de curgere turbulent*, $Re > 10000$

Criteriul Reynolds se determină cu relația:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (3.20)$$

unde: w – este viteza fluidului, [m/s];
 d – diametrul hidraulic echivalent, [m];
 ν - vâscozitatea cinematică, [m²/s].

1.c. *Caracterul curgerii*: - *subsonic*, *sonic*, *supersonic*, ținându-se seama de problemele specifice fiecărui tip.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

2. Factori termofizici:

2. a. *Diferența de temperatură dintre perete și fluid:* - la diferențe de temperatură $\Delta t > 500^\circ\text{C}$ se ține cont în calcule și de efectul radiant.

2. b. *Comportarea fluidului în curgere:* - *fluide newtoniene;*
- *fluide ne-newtoniene.*

2.c. *Parametrii termofizici ai fluidului:* - densitatea, ρ , căldura specifică la presiune constantă, c_p , vâscozitatea cinematică, ν și coeficientul de conductivitate termică, λ , au o influență mare asupra convecției termice.

Valoarea medie a coeficientului de convecție α între un fluid și un perete, se obține din relația:

$$\alpha = \frac{q}{t_p - t_f} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (3.21)$$

Pentru diferite regimuri hidrodinamice și condiții geometrice, valorile coeficientului de convecție α , se obțin din ecuații criteriale de forma:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}, \dots) \quad (3.22)$$

Determinând valorile criteriilor de similitudine pentru cazul respectiv, se obține valoarea numerică a criteriului Nusselt în funcție de care se obține valoarea medie a coeficientului de convecție:

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_f}{l} \quad (3.23)$$

unde: λ_f – conductivitatea termică a fluidului, $[\text{W/m} \cdot \text{K}]$;
 l – lungimea caracteristică a peretelui solid, $[\text{m}]$.


Valoarea medie a lui α în lungul unei suprafețe S se obține cu relația:

$$\alpha = \frac{1}{S} \int \alpha_x \cdot dS = C \cdot x^{-n} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (3.24)$$

Fluxul termic convectiv schimbat între un fluid și un perete se determină cu ajutorul relațiilor matematice prezentate în tabelul 3.2.

Tabelul 3.2. Relațiile de calcul ale fluxului termic convectiv

| Nr. crt. | Condiții geometrice | Fluxul termic unitar $[\text{W/m}^2]$ sau $[\text{W/m}]$ | Fluxul termic, $[\text{W}]$ | Temperatura peretelui, $[\text{°C}]$ | Observații |
|----------|---|--|--------------------------------|--|--|
| 1. | Legea lui Newton pentru un perete oarecare | $q = \frac{t_f - t_p}{\frac{1}{\alpha}}$ | $Q = q \cdot S$ | $t_p = t_f - q \cdot \frac{1}{\alpha}$ | $t_f > t_p$ $S = \text{suprafața}$ |
| 2. | Legea lui Newton pentru un perete plan | $q = \frac{t_f - t_p}{\frac{1}{\alpha}}$ | $Q = q \cdot S$ | $t_p = t_f - q \cdot \frac{1}{\alpha}$ | - |
| 3. | Legea lui Newton pentru un perete cilindric | $q_1 = \frac{t_f - t_p}{\frac{1}{\pi \cdot d \cdot \alpha}}$ | $Q = q_1 \cdot S$ | $t_p = t_f - q_1 \cdot \frac{1}{\pi \cdot d \cdot \alpha}$ | l – lungimea conductei, $[\text{m}]$ q_1 , $[\text{W/m}]$ |
| 4. | Legea lui Newton pentru un perete sferic | $q = \frac{t_f - t_p}{\frac{1}{\pi \cdot d^2 \cdot \alpha}}$ | $Q = q \cdot S_{\text{sferă}}$ | $t_p = t_f - q_1 \cdot \frac{1}{\pi \cdot d^2 \cdot \alpha}$ | $S_{\text{sferă}}$ – aria sferei, $[\text{m}^2]$ |

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

3.4. Transferul de căldură prin radiație

Radiația termică reprezintă ansamblul schimburilor de energie la distanță între corpuri prin unde electromagnetice.

Fenomenul se manifestă sub diverse aspecte : unde hertziene, luminoase, termice, raze X, gama sau cosmice. Aceste radiații pot fi descompuse într-un spectru alcătuit din radiații periodice simple (radiații monocromatice) caracterizate prin frecvența lor ν sau lungimea de undă λ , aceasta fiind legată de frecvență prin relația:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3.37)$$

unde: $c = c_0 / n$ - viteza de propagare a undelor în mediul traversat ;

c_0 – viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid ($c_0=3 \cdot 10^8$ m/s);

n – indicele de refracție al mediului.

Frecvența unei radiații monocromatice rămâne constantă dacă aceasta se propagă în medii cu indici de refracție diferiți, în timp ce λ și c variază în funcție de indicele de refracție al mediului traversat.

Radiația termică este emisă de un corp datorită temperaturii sale și se realizează prin transformarea energiei interne în energie a undelor electromagnetice. Ea ocupă în spectrul radiației electromagnetice domeniul de lungimi de undă cuprins între 0,1 și 100 μm și sunt percepute de noi sub forma unei senzații de căldură. În domeniul mult mai restrâns (0,4...0,8 μm) numit spectru vizibil, radiațiile devin perceptibile cu ochiul liber.

Căldura schimbată prin radiație între două suprafețe plane, infinite de mari, așezate față în față se determină cu relația 3.38 ținând cont de faptul că suprafața cu temperatura cea mai ridicată este cea cu indicele 1.

$$q_{1,2} = e_{1,2} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.38)$$

unde: $e_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1}$ - coeficientul mutual între placa 1 (e_1) și placa 2 (e_2).

Căldura mai poate fi exprimată și printr-o relație de forma:

$$q_{1,2} = \alpha_r \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.39)$$

unde: $\alpha_r = \frac{e_{1,2} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{t_1 - t_2} = \varepsilon_{1,2} \cdot C_0 \cdot \varepsilon_T$ - coeficient de radiație, $[\text{W/m}^2\text{K}]$;

cu $\varepsilon_T = \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}$.

Căldura schimbată prin radiație între două suprafețe plane, infinite de mari, despărțite de un ecran se determină cu relația 3.40.

$$q_{1,2} = \frac{e_{1,E} \cdot e_{E,2} \cdot C_0}{e_{1,E} + e_{E,2}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.40)$$

| | | |
|---|--|---|
|  | UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ | INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU |
|---|--|---|

unde: $e_{1,E} = \frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_E} - 1}$ - coeficient mutual de emisie între placa 1 și ecran;

$e_{E,2} = \frac{1}{\frac{1}{e_E} + \frac{1}{e_2} - 1}$ - coeficient mutual de emisie între ecran și placa 2.

3.5. Procese complexe de transfer de căldură

Studiul operațiilor și tehnicilor de îmbunătățire a proceselor de transfer de căldură, întâlnit uzual sub denumirea de *tehnici de intensificare a transferului de căldură*, vizează utilizarea atât a unor metode noi dar și extinderea unor metode deja cunoscute, constituind subiectul unor cercetări teoretice și practice cu mare răspândire. Rezultatele practice ale acestor lucrări, sunt justificate tehnico-economic prin luarea în considerare a: costurilor investițiilor, energiei necesare vehiculării fluidelor, cheltuielilor de exploatare și întreținere și se materializează prin micșorarea dimensiunilor și greutateii, îmbunătățirii indicatorilor de exploatare și conducerea cu maximă eficiență a utilajelor sau instalațiilor, cu economie de combustibil.

În aplicațiile tehnice presupunând schimb de căldură între două fluide separate de un perete despărțitor, transferul de căldură are loc prin acțiunea combinată a celor trei moduri de transfer termic.

Pentru considerarea simultană a celor trei procese de transfer termic se definește coeficientul global de schimb de căldură. Astfel, fluxul termic total, Q , schimbat între două fluide prin pereți se exprimă cu ajutorul următoarelor relații:

a. pereți plani omogeni:

$$Q = q_s \cdot S = k_s \cdot S \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2) \cdot S}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [\text{W}] \quad (3.41)$$

b. pereți plani neomogeni:

$$Q = q_s \cdot S = k_s \cdot S \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2) \cdot S}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [\text{W}] \quad (3.42)$$

c. pereți cilindrici omogeni:

$$Q = q_1 \cdot L = k_1 \cdot L \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2) \cdot L}{\frac{1}{\pi d_i \alpha_i} + \frac{1}{2\pi \lambda_p} \ln \frac{d_e}{d_i} + \frac{1}{\pi d_e \alpha_e}} \quad [\text{W}] \quad (3.43)$$

d. pereți cilindrici neomogeni:

$$Q = q_1 \cdot L = k_1 \cdot L \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2) \cdot L}{\frac{1}{\pi d_i \alpha_i} + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\pi d_e \alpha_e}} \quad [\text{W}] \quad (3.44)$$

e. pereți sferici omogeni:

$$Q = q_s \cdot S = k_{sf} \cdot S_{sf} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2) \cdot S_{sf}}{\frac{1}{d_i^2 \alpha_i} + \frac{1}{2\pi \lambda_p} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_e} \right) + \frac{1}{d_e^2 \alpha_e}} \quad [\text{W}] \quad (3.45)$$

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

f. pereți sferici neomogeni:

$$Q = q_s \cdot S = k_{sf} \cdot S_{sf} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2) \cdot S_{sf}}{\frac{1}{d_i^2 \alpha_i} + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{pi}} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_e} \right) + \frac{1}{d_e^2 \alpha_e}} \quad [W] \quad (3.46)$$

unde: k_s, k_l – coeficientul global de schimb de căldură pentru un perete plan, respectiv cilindric, $[W/(m^2 \cdot \text{grad})]$;

S, L – suprafața peretelui plan, $[m^2]$, respectiv lungimea peretelui cilindric, $[m]$;

t_1, t_2 – temperatura peretelui cald, respectiv rece, $[^\circ C]$.

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

4. COMBUSTIBILI ENERGETICI

4.1. Generalități

ARDEREA, reprezintă procesul chimic de combinare a două substanțe (combustibilul și oxidantul) care are loc cu degajare de căldură, provocând o creștere bruscă a temperaturii amestecului substanțelor aflate în reacție.

COMBUSTIBILUL este orice substanță care conține și poate degaja liber elemente carburante în stare atomică, care reacționând cu O_2 din aerul atmosferic și prin ardere dezvoltă căldură utilizabilă avantajos din punct de vedere economic.

Din punct de vedere energetic, pentru ca o substanță să fie folosită drept combustibil trebuie să îndeplinească o serie de condiții:

- să se combine cu oxigenul din aer exotermic, cu degajare specifică de căldură suficient de mare la o temperatură cât mai ridicată;
- să-și mențină constante în timp caracteristicile fizico-chimice și tehnologice;
- să conțină în cantități foarte reduse substanțe care prin ardere produc gaze cu acțiune nocivă (sulfur sau vanadiu);
- să se găsească în cantități suficiente și să se poată exploata cu cheltuieli minime;
- să nu aibă o utilizare superioară arderii.

OXIDANTUL este orice substanță care conține și care poate degaja atomi de oxigen în stare liberă.

Clasificarea combustibililor

a) Din punct de vedere al provenienței

- naturali;
- artificiali – sunt forme îmbogățite, derivate dintr-un proces de îmbogățire a celor naturali prin procedee mecanice sau termomecanice fie forme de substanțe organice, fabricate industrial pentru a înlocui combustibili naturali;

b) Din punct de vedere a stării de agregare


- combustibili solizi:
 - naturali;
 - sintetici;
 - artificiali;
- combustibili lichizi:
 - naturali;
 - sintetici;
 - artificiali;
- combustibili gazoși:
 - naturali;
 - sintetici;
 - artificiali.

4.2. Combustibili solizi

Combustibilii solizi sunt acei combustibili compuși, în alcătuirea cărora intră elementele: oxigen (O_2), sulf (S), carbon (C), unele elemente necombustibile, compuși minerali și apă (relația 4.1).

$$S^i_S + C^i + H^i + O^i + N^i + S_o^i + A^i + W_t^i = 100 \% \quad (4.1)$$

Principalii combustibili solizi folosiți în industria energetică din țara noastră sunt cărbunii, care sunt clasificați conform STAS 3632-52 în cinci clase (tabelul 4.1).

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

Combustibilii solizi sunt caracterizați de o serie de proprietăți și caracteristici, care permit clasificarea acestora.

Tabelul 4.1. Clasele de cărbuni și grupele aferente lor extrase din bazinele carbonifere din țară

| Nr. crt. | Denumirea clasei | Simbolul clasei | Denumirea grupei | Denumirea bazinului carbonifer |
|----------|---------------------|-----------------|------------------|---|
| 1. | TURBA | T | - | Mandra, Miercurea-Ciuc, Dersca |
| 2. | CĂRBUNE BRUN | B | pământos | Ilieni |
| | | | lemnos(lignit) | Rovinari,Schitu-Golesti, Doicești, Filipeștii de Pădure |
| | | | mat | Comănești, Țebea |
| | | | cu luciu smolos | Codlea |
| 3. | CĂRBUNE BRUN-HUILOS | B/H | - | Valea Jiului |
| 4. | HUILA | H | cu flacăra lungă | Valea Jiului |
| | | | pentru gaz | Valea Jiului |
| | | | grasă | Secui |
| | | | pentru cocs | Anina |
| | | | slabă degresată | Baia Mare |
| | | | antracitoasă | Cozla |
| 5. | ANTRACIT | A | - | Schela Gorj |

4.2.1. Caracteristici fizico – chimice

Principalele caracteristici fizico – chimice ce caracterizează cărbunii din țara noastră sunt:

a) *Umiditatea* - reprezintă conținutul de apă ce se găsește într-un kilogram de combustibil. Din punct de vedere al arderii umiditatea este un balast și poate fi:

- **totală** (W_t^i) reprezentând cantitatea de apă ce se găsește într-o sută de kilograme de combustibil la starea inițială a acestuia

$$W_t^i = W_h^i + W_i^i \quad [\%] \quad (4.2)$$

- **higroscopică** (W_h^i), reprezentând conținutul de apă din combustibilul solid care provine de la plantele din care s-a format acesta și este funcție de vârsta geologică și gradul de încarbonizare.

- **de îmbibație** (W_i^i), reprezentând conținutul de apă din combustibilul solid funcție de zăcămintul din care se extrage acesta (cca.20÷30 %, $W_i^i > W_h^i$).

b) *Sulfur*. Toți combustibilii conțin sulf în proporție de 2%...3% și poate fi sulf organic (S_o), sulf mineral (S_s), sulfat (S_{SO_4}).

c) *Materiile volatile* reprezintă cantitatea de gaze combustibile ce se degajă în timpul arderii și în timpul pregătirii pentru ardere a combustibilului. Materiile volatile sunt: CO, H_2, CH_4, C_2H_2 etc. Conținutul de materii volatile este de aproximativ 50% la cărbunii tineri și 10% la cărbunii vechi.

d) *Cocsul*, reprezintă ceea ce rămâne după îndepărtarea umidității și a materiilor volatile:

$$K^i = 100 - (W_t^i + V^i) \quad [\%] \quad (4.3)$$

Conținutul de cocs are două componente :

- **cărbunele fix** (C_f) care reprezintă partea din conținutul de cocs care rămâne după scăderea umidității, a materiilor volatile și a cenușii.

$$C_f^i = K^i - A^i \quad [\%] \quad (4.4)$$

- **cenușa** reprezentând cantitatea de masă minerală ce rămâne după arderea combustibililor solizi sau lichizi.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

4.2.2. Caracteristici tehnologice

- a) Densitatea poate fi:
- relativă „ ρ ” (care nu ia în calcul porozitatea și golurile dintre particulele combustibilului);
 - aparentă „ ρ_a ”;
 - de vrac „ ρ_v ”.
- b) Compoziția granulometrică reprezentând repartitia pe dimensiuni a particulelor combustibililor. Pentru combustibil concasat: 5, 10, 30, 80, 100, 150, 350, 400 mm iar pentru praf: 45, 63, 80, 88(90), 125, 150, 200, 300, 500 μm .
- c) Capacitatea de alunecare apreciată prin unghiul taluzului natural, adică unghiul obținut într-un depozit de cărbune prin alunecarea liberă a bucăților de cărbune. Ea este influențată de umiditatea combustibililor și de mediul ambiant (temperatura).
- d) Segregarea este proprietatea combustibilului de a se separa pe tipuri de dimensiuni. Dacă combustibilul este depozitat în grămezi, particulele mari sunt la baza acesteia, iar dacă combustibilul este transportat pe benzi, particulele mari sunt la suprafață.
- e) Rezistența la stocare reprezintă capacitatea combustibililor de a-și menține proprietățile timp îndelungat.
- f) Gradul de aglutinare este proprietatea combustibilului de a produce cocs.

4.2.3. Caracteristici energetice

Sunt cele mai importante din punct de vedere al arderii combustibililor.

a) Cenușa și umiditatea raportată

$$A^{\text{rap}} = \frac{A^i}{Q_i^i} \quad (4.5)$$

$$W^{\text{rap}} = \frac{W^i}{Q_i^i} \quad (4.6)$$

unde: Q_i^i - puterea calorică inițială, [kJ/kg].

b) Puterea calorică (calorifică) reprezintă căldura degajată prin arderea completă a unui kilogram de combustibil în anumite condiții [kcal/kg], [kJ/kg].

Poate fi:

1. Superioară (Q_s^i) definită ca fiind căldura degajată prin arderea completă a unui kilogram de combustibil și răcirea gazelor de ardere până la temperatura de 25°C astfel încât H_2O din combustibil și cea rezultată în urma arderii să fie în stare lichidă.

2. Inferioară (Q_i^i) definită ca acea căldură degajată prin arderea completă a unui kilogram de combustibil, gazele de ardere având temperatura mai mare decât temperatura de condensare a H_2O .

Relația de legătură dintre cele două puteri calorifice este:

$$Q_i^i = Q_s^i - 2512 \cdot \left(\frac{9 \cdot H + W}{100} \right) \text{ [kJ/kg]} \quad (4.7)$$

c) Criteriul de aprindere [k_a] (4.8) - conduce la clasificarea cărbunilor astfel:

- cărbuni cu capacitate redusă de aprindere ($k_a < 0,5$ - antracitul)
- cărbuni cu capacitate medie de aprindere ($0,5 < k_a < 1$ - huile și cărbune brun)
- cărbuni cu capacitate mare de aprindere ($k_a > 1$ - ligniții).

$$k_a = \frac{V^i}{C_f^i} = \frac{V^i}{100 - W_t^i - A^i - V^i} \quad (4.8)$$



d) *Criteriul de intensitate al arderii* [k_i] (7.9) clasifică cărbunii astfel:

- cărbuni cu capacitate mare de ardere ($k_i < 0,5$ - huila);
- cărbuni cu capacitate medie de ardere ($0,5 < k_i < 1$);
- cărbuni cu capacitate redusă de ardere ($k_i < 1$ - lignit).

$$k_a = \frac{A^i}{C_f^i} = \frac{A^i}{100 - W_t^i - A^i - V^i} \quad (4.9)$$

e) *Măcinabilitatea*, reprezintă proprietatea combustibililor de a se sfărâma, deosebit de importantă pentru instalațiile în care arderea se face sub formă de praf. Este caracterizată prin coeficientul de măcinabilitate „m”.

f) *Temperatura de autoaprindere* este o caracteristică a capacității de aprindere a cărbunilor ($400 \div 450$)°C.

4.3. Combustibili lichizi

Combustibilii lichizi în marea lor majoritate provin din țiței cunoscut și sub denumirea de „petrol brut”.

ȚITEIUL reprezintă combustibilul lichid natural, de culoare brună închisă, uneori castanie, cu o fluorescență albastră sau verde închis. Este alcătuit dintr-un amestec de hidrocarburi gazoase, lichide și solide cu mici cantități de substanțe organice care conțin sulf și azot (4.10).

$$S^i + C^i + H^i + O^i + N^i + A^i + W_t^i = 100 \% \quad (4.10)$$

Produsele petroliere rezultate din distilarea și cracarea țițeiului, pot fi clasificate în funcție de utilizarea principală care li se dă, în următoarele grupe: benzină, petrol, motorina și păcură.

Principalele caracteristici ale combustibililor lichizi sunt:

a) *Materii volatile*. Conținutul lor este mult mai mare decât la combustibilii solizi. Funcție de tendința de volatilitate, combustibilii pot fi clasificați în:

- **combustibili ușori** – cu volatilitate ridicată (benzinele);
- **combustibili semifluizi** (motorina);
- **combustibili grei** – cu volatilitate redusă – păcura.

b) *Cantitatea de cocs* este cea care permite o altă clasificare a combustibililor lichizi, astfel:

- **combustibili lichizi ușori** cu până la 1,5% cocs;
- **combustibili lichizi semifluizi** cu până la 10% cocs;
- **combustibili lichizi grei** cu un conținut de cocs de (12...15)%.

c) *Conținutul de vanadium* este de circa 20ppm cea produsă în România și de aproximativ 80...120 ppm cea din import. Vanadium-ul conținut în păcură la temperaturi ridicate produce pentoxidul de Vanadiu (Va_2O_5) producând coroziunea de înaltă temperatură.

4.4. Combustibili gazoși

Gazele combustibile folosite în scopuri energetice se împart în două mari clase:

4.4.1. Gazele naturale

Gazele naturale sunt definite ca fiind acele gaze combustibile obținute în mod natural prin sondajele efectuate în zăcămintele subterane constituite din amestecuri de hidrocarburi saturate cu impurități ca: bioxidul de carbon, hidrogen sulfurat, mercaptan, oxizi de azot (rel. 7.11).

$$O_2^{anh} + H_2^{anh} + H_2S^{anh} + N_2^{anh} + CH_4^{anh} + C_2H_2^{anh} + CO^{anh} + \sum C_m H^{anh} = 100 \% \quad (7.11)$$

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

Gazele naturale pot fi:

- **gaze libere**, reprezentate prin amestecuri de gaze obținute prin sondaje, din zăcăminte în care se află numai gaze;
- **gaze dizolvate**, acele amestecuri de gaze combustibile, constituite din metan, hidrocarburi saturate și impurități, care se află dizolvate în țiței și care se obțin prin sondaje din zăcăminte de țiței odată cu acestea;
- **gaze asociate**, care sunt amestecuri de gaze, constituite din metan, hidrocarburi saturate și impurități care se află în cupole în vecinătatea zăcămintului de țiței și care se exploatează prin sondaje, la sfârșitul exploatării zăcămintului de țiței ori concomitent cu exploatarea acestuia.

4.4.2. Gazele artificiale

Gazele artificiale sunt acele gaze combustibile obținute prin prelucrarea termică a cărbunilor (gaze de gazogen, de furnal, de cocserie) și a produselor petrolifere (gaze de rafinărie).

4.5. Arderea combustibililor

4.5.1. Calculul puterii calorice

Puterea calorică a unui combustibil se poate determina direct, pe cale experimentală, sau indirect cunoscându-se analiza elementară a combustibilului.

Pentru calcule curente de ardere, puterea calorică inferioară se poate determina pentru combustibilii solizi și lichizi cu relația 4.12, iar pentru combustibilii gazoși cu relația 4.13.

$$H_i = 339 \cdot C^i + 1029,1 \cdot H^i - 109 \cdot (O^i - S_c^i - 25,1 \cdot W) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.12)$$

$$H_i = 126 \cdot CO^i + 107,98 \cdot H_2^i + \frac{1}{100} \sum (H_i)_{mn} (C_m H_n) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.13)$$

unde: C^i , H^i , S_c^i și W^i - participațiile masice ale carbonului, hidrogenului, oxigenului, sulfului și umidității totale în masa de lucru (inițială), [%];

CO^i , H_2^i , $C_m H_n^i$ - participațiile volumice ale diferitelor gaze combustibile din compoziția elementară a combustibilului;

$(H_i)_{mn}$ - puterea calorică inferioară pentru hidrocarburile de tipul $C_m H_n$, cu valorile pentru diverse gaze combustibile.

4.5.2. Coeficientul de exces de aer

Cum procesul de ardere are loc în prezența oxigenului din aerul atmosferic, pentru desfășurarea corespunzătoare a acestui proces, în focarul cazanelor trebuie să existe un exces de aer care se poate calcula, în funcție de analiza gazelor de ardere cu relația:

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \cdot \frac{O_2 - 0,5 \cdot CO - 2 \cdot CH_4 - 0,5 \cdot H_2}{100 - (RO_2 + O_2 + CO + CH_4 + H_2)}} \quad (4.14)$$

unde: RO_2 - participația volumetrică a gazelor triatomice în gazele de ardere, determinată cu relația 4.15;

$$RO_2 = CO_2 + SO_2 \quad (4.15)$$

CO_2 , SO_2 , O_2 , N_2 , CO , CH_4 , H_2 - participațiile volumetrice procentuale de bioxid de carbon, bioxid de sulf, oxigen, azot, oxid de carbon, metan și hidrogen în gazele de ardere.

Pentru controlul analizei gazelor de ardere și al coeficientului de exces de aer se utilizează triunghiul arderii (Ostwald).

5. SIMBOLURI GRAFICE UTILIZATE LA ÎNTOCMIREA SCHEMELOR TERMOMECHANICE ȘI ELECTROENERGETICE

5.1. Clasificarea centralelor electrice

O centrală termoelectrică este un ansamblu sistemic de echipamente și instalații care realizează un lanț (o serie) de transformări energetice succesive, în scopul obținerii de energie electrică și eventual termică pe care o distribuie centralizat.

Criteriul principal de clasificare al centralelor electrice, în general, îl constituie felul energiei primare care stă la baza lanțului de transformări.

Pentru centralele termoelectrice clasice energia primară care stă la baza lanțului de transformări este:

- energia solară fosilă** înmagazinată în cărbuni, petrol, gaz, șisturi, roci;
- resursele energetice secundare** din deșeuri lichide, solide sau gazoase.

Lanțul de bază al transformărilor este:

energie chimică → energie termică → energie mecanică → energie electrică (figura 5.1).

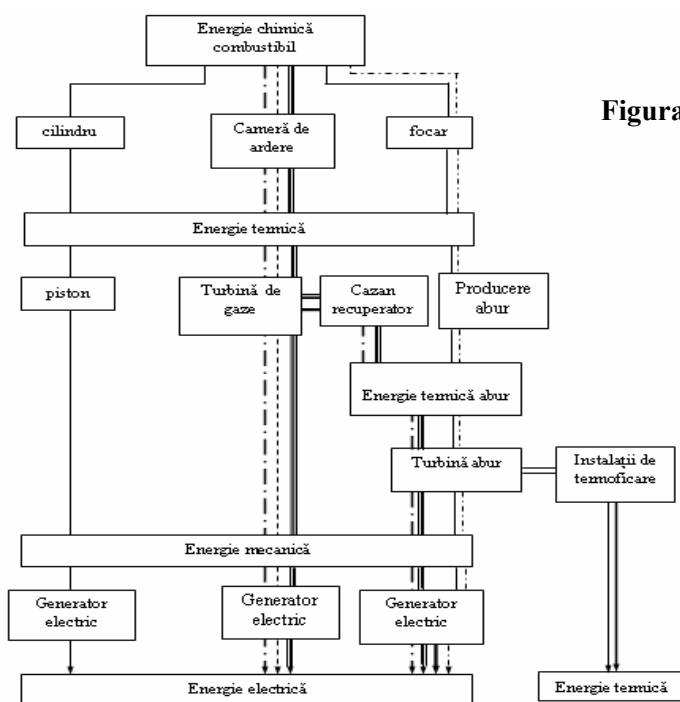


Figura 5.1. Structura și configurația lanțului de transformări

- Centrale Diesel Electrice (CDE)
- Centrale cu Turbine cu Gaze (CTG)
- · - · Centrale Ciclu Mixt Abur Gaze (CMAG) fără postardere
- Centrale Electrice de Termoficare (CET)
- ==== Centrale Ciclu Mixt Abur Gaze (CHAG) cu postardere
- · · · Centrale Termoelectrice (CTE)

Acest lanț de transformări se realizează prin intermediul unor fluxuri de masă și energie care realizează transformări succesive în instalații termoenergetice distincte, specializate, dimensionate și echipate în mod corespunzător. Fiecare din aceste instalații reprezintă un ansamblu de dotări

tehnice, necesare și suficiente pentru desfășurarea sigură și eficientă energetic a uneia sau mai multor transformări energetice înseriate.

Structura și configurația lanțului de transformări precum și instalațiilor termoenergetice de bază specifice permit clasificarea centralelor termoelectrice clasice, după cum se prezintă în figura 5.1.

Pe lângă instalațiile termoenergetice de bază, specificate în figura 8.1 unele din centrale mai dispun de o centrală termică de pornire, tratare chimică a apei, alimentarea cu combustibil de rezervă, tratare apă de adaos etc.

5.2. Gruparea instalațiilor din centralele electrice

Gruparea instalațiilor dintr-o CTE/CET se face după criteriul funcțional, putând aparține unui echipament sau comune mai multor. Atunci când instalațiile sunt legate de un echipament și afectează direct funcționarea acestuia, atunci echipamentul împreună cu instalațiile aferente, constituie o instalație complexă. În general, în CTE/CET apar următoarele grupe de instalații (figura 5.2.):

- instalația complexă a cazanului de abur (A);
- instalația complexă a turboagregatului (B);
- instalațiile termomecanice ale circuitului termic (C), care asigură cuplarea și deservirea în comun a instalațiilor complexe A și B;

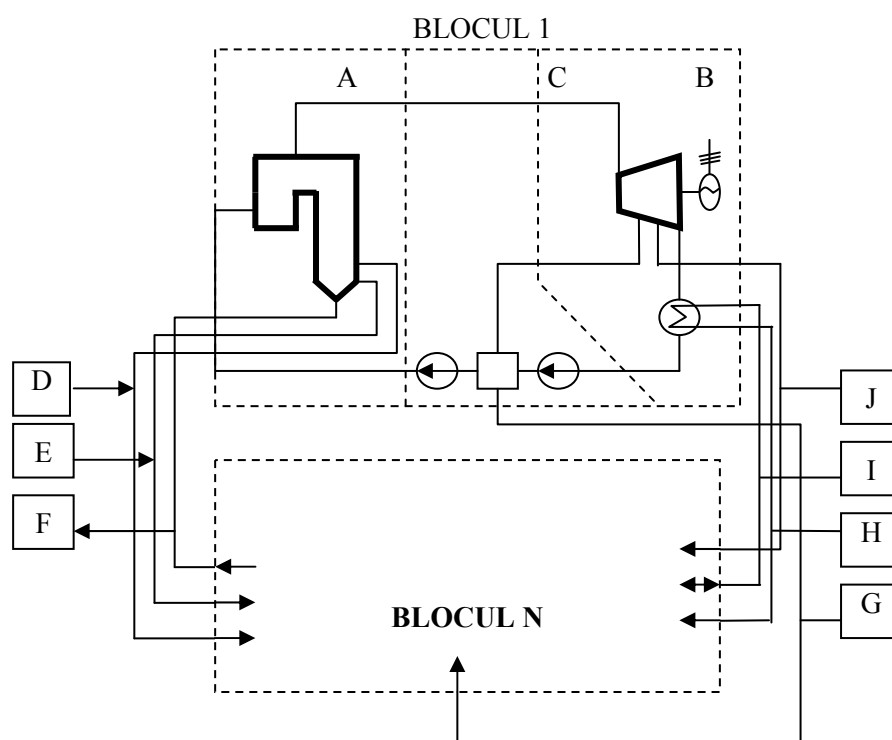


Figura 5.2. Gruparea instalațiilor dintr-o CTE/CET echipată cu blocuri termoenergetice

- instalațiile gospodăriilor specializate, comune mai multor unități energetice din CTE/CET precum: combustibil principal (D), combustibil secundar (E), noxe (solide, lichide, gazoase) (F), centrala termică de pornire (G), stația de tratare chimică a apei (H), circuitul hidrotehnic (I), termoficare (J) etc.

Primele trei grupe de instalații sunt amplasate în clădirea principală respectiv în sala cazanelor, sala mașinilor, corpul intermediar și eventual corpul degazorilor.

Orice instalație termoenergetică de tip CTE sau CET, cuprinde funcțional, în esență patru categorii de componente tehnologice:

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

- **echipamentele**, care realizează transformările tehnologice specifice instalației;
- **elementele de legătură** (conducte, canale și benzi) care asigură circulația controlată și dirijată a agenților de lucru, între echipamentele instalației sau între acestea și instalațiile anexe;
- **alimentările cu energie și acționările**;
- **aparatele de măsură și automatizare**;
- sistemul informatic de supraveghere, reglare, control și conducere cu calculatorul a **procesului de producere a energiei electrice și/sau termice**.

5.3. Scheme utilizate

Pentru o centrală electrică schemele funcționale se întocmesc în funcție de natura componentelor vizate și în consecință se pot clasifica în 4 categorii distincte:

- **scheme termoenergetice** care cuprind echipamente termoenergetice și elementele de legătură dintre acestea;
- **scheme electrice** care cuprind echipamentele electrice și cablurile de legătură;
- **scheme de măsură și automatizare** care cuprind amplasarea aparatelor de măsură, protecție și automatizare;
- **scheme informatice**.

Schemele termoenergetice concentrează informații tehnice legate atât de structura circuitului termic cât și de variantele și regimurile de exploatare impuse componentelor acestora, transmise prin intermediul simbolurilor grafice. Nu sunt incluse informații constructive și geometrice asupra echipamentelor.

Clasificarea schemelor termoenergetice în funcție de gradul de detaliere presupune existența următoarelor categorii:

- **scheme de principiu** - întocmite pentru un circuit sau generală;
- **scheme funcționale de calcul** - în care se indică regimul de calcul și valorile parametrilor în punctele caracteristice;
- **scheme termomecanice** - pentru un grup CTE/CET sau total centrală (CET), care include instalațiile circuitului termic;
- **scheme specializate** - pentru sistemele funcționale din cadrul centralei (răcire, termoficare, tratare apă, protecția mediului, combustibil, amplasare etc.);
- **secțiuni și vederi** – prin clădirea principală cu indicarea cotelor de amplasare a principalelor echipamente;
- **scheme de detaliu** - constructive sau de montare pentru anumite componente sau sisteme.


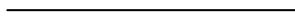
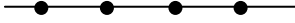
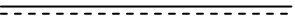
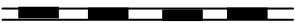
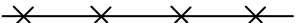




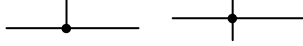
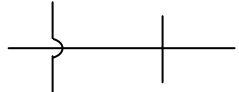

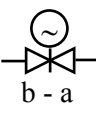





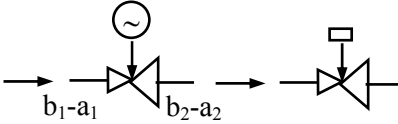
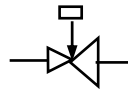
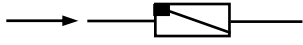
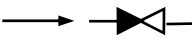
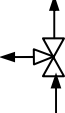
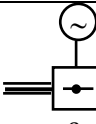
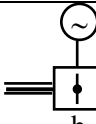
Întocmirea și interpretarea schemei termomecanice necesită formate de desen adecvate, care să permită folosirea judicioasă a spațiului grafic și utilizarea unor simboluri grafice care reprezintă indirect, în mod convențional sau în virtutea unei corespondențe analogice, aceste scheme.



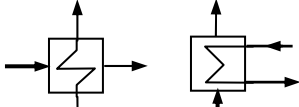
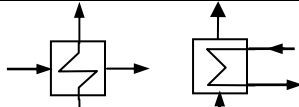
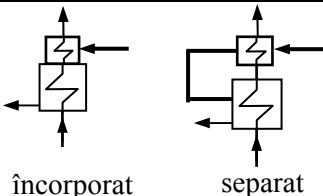
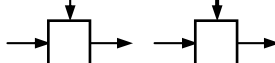
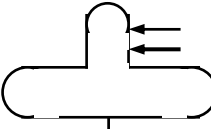
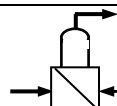
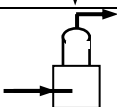
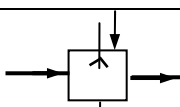
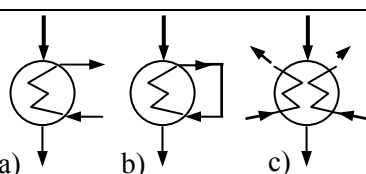
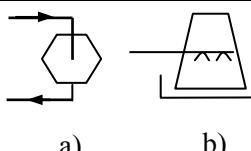
5.4. Simboluri grafice utilizate

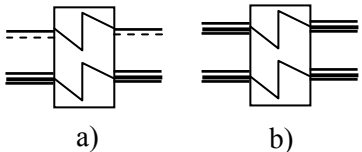
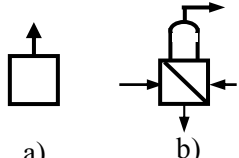


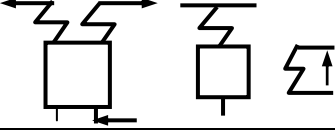
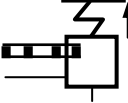
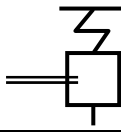



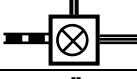
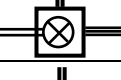
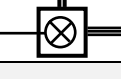
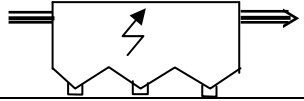
Simbolurile grafice utilizate pentru schemele termoenergetice (tabelul 5.1) și electroenergetice (tabelul 5.2) sunt semne convenționale standardizate sau uzuale.

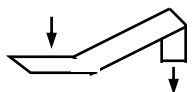
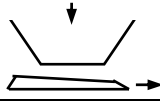


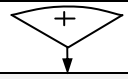
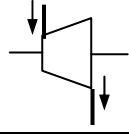
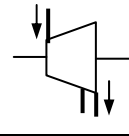
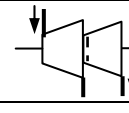
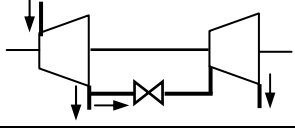
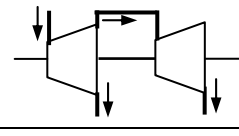
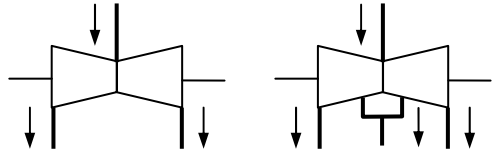
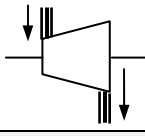
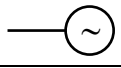
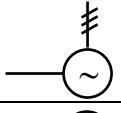

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

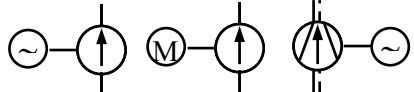
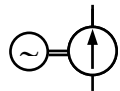
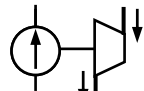
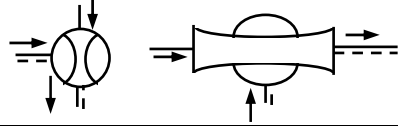
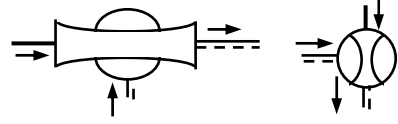
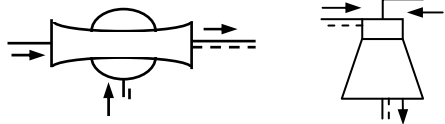
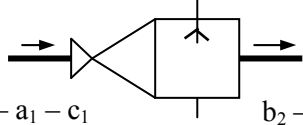

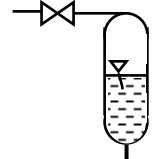
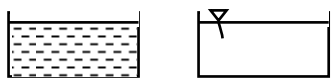

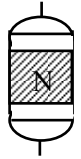
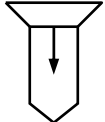
Tabelul 5.1. Simboluri grafice la întocmirea schemei termomecanice

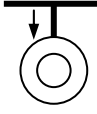
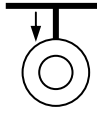
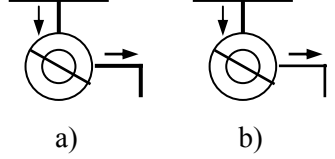
| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic | STAS |
|---------------------------------------|--|--|------------------|
| Conducte pentru diverse fluide | | | |
| 1 | - abur Dxs (dimensiuni standardizate) D - diametrul exterior s - grosimea | ϕ Dxs  | 2644/3-73 |
| 2 | - apă și condensat |  | 2644/3-73 |
| 3 | - purjă |  | 2644/3-73 |
| 4 | - aer |  | 2644/3-73 |
| 5 | - căldură, zgură |  | 2644/3-73 |
| 6 | - cenușă |  | - |
| 7 | - gaze de ardere |  | 2644/3-73 |
| 8 | - combustibil lichid |  | 2644/3-73 |
| 9 | - combustibil gazos |  | 2644/3-73 |
| 10 | - eșaparea aburului în atmosferă |  | 2644/3-73 |
| 11 | - intersecție conducte |  | - |
| 12 | - intersecție aparentă |  | - |
| Organe de închidere | | | |
| 13 | - robinet cu sertar (vană), cu acționare manuală sau electrică D_a ; p_n b (p -presiune fluid) |   | 185/3-79 |
| 14 | - robinet de reglare cu ventil, cu acționare: manuală, electrică sau servomotor |    | - |
| 15 | - robinet cu ventil, cu închidere rapidă |   | - |
| 16 | - robinet cu ventil de reducere a presiunii, cu acționare electrică sau servomotor D_n a_1/a_2 ; P_n b_1/b_2 ($a_1 < a_2$; $b_1 > b_2$) |   | - |
| 17 | - robinet de reținere cu clapetă |  | 185/3-79 |
| 18 | - robinet de reținere cu ventil |  | - |
| 19 | - robinet cu trei căi |  | 185/3-79 |
| 20 | - clapetă de închidere a) deschis b) închis |   | 185/3-79 |

| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic | STAS |
|--|---|--|------------------|
| 21 | - separator de condensat (amestec abur + condensat) |  | 185/3-79 |
| Aparate schimbătoare de căldură | | | |
| 22 | - suprafață de transfer de căldură (semn general) |  | 2644/3-73 |
| 23 | - schimbătoare de căldură prin suprafață, abur-apă (semne generale) |  | - |
| 24 | - schimbătoare de căldură prin suprafață, apă-apă (semne generale) |  | - |
| 25 | - preîncălzitor de apă prin suprafață, cu abur, cu suprafață pentru preluarea căldurii de supraîncălzire (desupraîncălzitor). |  | - |
| 26 | - schimbătoare de căldură cu amestec |  | - |
| 27 | - rezervor de apă cu preîncălzitor de amestec și degazor (degazor) |  | 2644/3-73 |
| 28 | - vaporizator de suprafață și răcitoare prin condensarea vaporilor |  | 2644/3-73 |
| 29 | - răcitor de abur prin condensarea aburului sub apă. |  | 2644/3-73 |
| 30 | - răcitor de abur cu injecție de apă. |  | 2644/3-73 |
| 31 | - condensator de suprafață: a) în circuit deschis; b) în circuit închis; c) cu două circuite. |  | 2644/3-73 |
| 32 | - turn de răcire: a) uscat; b) umed. |  | - |

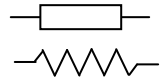








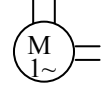


| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic | STAS |
|----------------------------|--|--|------------------|
| 33 | -preîncălzitor rotativ (regenerativ): a) de aer; b) de gaze. |  a) b) | 2644/3-73 |
| Generatoare de abur | | | |
| 34 | a) cazan (semn general); b) generator de abur. |  a) b) | 2644/3-73 |
| 35 | - cazan de abur fără supraîncălzitor |  | - |
| 36 | - cazan de abur cu supraîncălzitor |  | - |
| 37 | - cazan de abur cu supraîncălzitor și supraîncălzitor intermediar |  | - |
| 38 | - cazan de abur cu cărbune |  | - |
| 39 | - cazan de abur cu focar pentru combustibil lichid |  | - |
| 40 | - cazan recuperator încălzit cu gaze de evacuare |  | - |
| 41 | - cazan de apă fierbinte |  | 2644/3-73 |
| 42 | - reactor nuclear (semn general) |  | 2644/3-73 |
| 43 | - generator de gaze pentru cărbune |  | - |
| 44 | - focar pentru combustibil lichid |  | - |
| 45 | - focar pentru combustibil gazos |  | - |
| Instalații anexe | | | |
| 46 | - electrofiltru |  | 2644/3-73 |




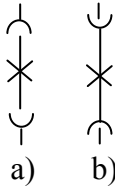














| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic | STAS |
|------------------------|--|--|------------------|
| 47 | - elevator |  | - |
| 48 | - alimentator |  | - |
| 49 | - concasor material mare |  | - |
| 50 | - buncăr |  | - |
| 51 | - moară pentru măcinare fină |  | - |
| Turbine | | | |
| 52 | - monoflux, fără prize |  | 2644/3-73 |
| 53 | - monoflux, cu prize nereglabile |  | 2644/3-73 |
| 54 | - cu diafragmă și prize reglabile |  | - |
| 55 | - cu priză reglabilă și ventil de reglare a presiunii între cele două corpuri. |  | - |
| 56 | - cu priză reglabilă în două corpuri reglabile înseriate |  | - |
| 57 | - în dublu flux cu admisie centrală, fără prize și cu prize |  | - |
| 58 | - cu gaze |  | 2644/3-73 |
| Mașini rotative | | | |
| 59 | - generator electric (semn general) |  | 2644/3-73 |
| 60 | - generator electric, sincron, trifazat |  | - |
| 61 | - generator electric de excitație, în curent continuu (excitatrice). |  | 2644/3-73 |

| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic | STAS |
|--------------------------------------|---|--|-----------|
| 62 | - pompă, ventilator |  | 2644/3-73 |
| 63 | a) electropompă; b) turbopompă |   a) b) | 2644/3-73 |
| Instalații anexe | | | |
| 64 | - ejector (semn general) |  | 2644/3-73 |
| 65 | - ejector cu abur pentru aspirarea aerului |  | - |
| 66 | - ejector cu apă pentru aspirarea aerului |  | - |
| 67 | - stație de reducere răcire: $D_n \ a_1/a_2; \ P_n \ b_1/b_2; \ T_n \ c_1/c_2;$ $a_1 < a_2; \ b_1 > b_2; \ c_1 > c_2$ |  $b_1 - a_1 - c_1$ $b_2 - a_2 - c_2$ | 2644/3-73 |
| 68 | - acumulator vertical pentru egalizare de presiune, acumulator de gaze |  | - |
| 69 | - condensator de volum, presurizoare |  | - |
| Rezervoare | | | |
| 70 | - rezervor deschis |  | 2644/3-73 |
| 71 | - rezervor închis, sub presiune |  | 2644/3-73 |
| Instalații de tratare chimică | | | |
| 72 | - filtru ionic pentru epurarea apei (litera reprezintă substanța de umplere) |  | 2644/3-73 |
| 73 | - decantor |  | - |

| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic | STAS |
|----------------------------|---|--|------------------|
| Consumatori de abur | | | |
| 74 | - consumator de abur (semn general) |  | 2644/3-73 |
| 75 | - consumator de abur fără recuperare de condensat |  | - |
| 76 | - consumator de abur cu suprafață de schimb de căldură: a) fără condensarea aburului; b) cu condensarea aburului. |  | - |

Tabelul 8.2. Simboluri grafice la întocmirea schemei electroenergetice

| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic |
|----------|---|---|
| 1 | Rezistor. Semn general. |  |
| 2 | Rezistor cu rezistență variabilă |  |
| 3 | Condensator |  |
| 4 | Condensator variabil |  |
| 5 | Bobină |  |
| 6 | Transformator cu două înfășurări |  |
| 7 | Transformator cu trei înfășurări |  |
| 8 | Autotransformator |  |
| 9 | Bobină de reactanță |  |
| 10 | Motor asincron monofazat cu rotor cu fază auxiliară cu borne de ieșire și rotor în scurtcircuit |  |
| 11 | Contact normal deschis, Întreruptor (cu acționare mecanică) |  |
| 12 | Contact normal închis |  |

|  | UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ | INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU |
|---|--|--|
| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic |
| 13 | Întreruptor automat cu releu termic |  |
| 14 | Întreruptor cu releu termic |  |
| 15 | Întreruptor debroșabil de joasă și de medie tensiune a) cu priză pe partea fixă b) cu priză pe partea mobilă |  |
| 16 | Separator (mecanic) |  |
| 17 | Separator de sarcină |  |
| 18 | Separator de sarcină cu deschidere automată |  |
| 19 | Contactator |  |
| 20 | Contactator cu releu de protecție |  |
| 21 | Voltmetru |  |
| 22 | Ampermetru |  |
| 23 | Watmetru |  |
| 24 | Varmetru |  |
| 25 | Cosfimetru |  |
| 26 | Fazmetru |  |
| 27 | Frecvențmetru |  |
| 28 | Contor de energie activă |  |
| 29 | Siguranța fuzibilă |  |



| Nr. crt. | Dotarea simbolizată | Simbolul grafic |
|----------|---|-----------------|
| 30 | Eclator | |
| 31 | Descărcător | |
| 32 | Paratrăsnet | |
| 33 | Legare la pământ | |
| 34 | Defect | |
| 35 | Conductor, Grup de conductoare, Linie, Cablu, Circuit | |

6. NOȚIUNI DE ELECTROTEHNICĂ

6.1. Sarcina electrică

Prin frecare, contact sau inducție corpurile pot fi aduse într-o stare specială, în care interacționează între ele prin forțe numite *forțe de interacțiune electrică*, care pot fi de atracție sau de respingere.

Pentru a exprima cantitativ proprietatea pe care o manifestă corpurile electrizate se *definește sarcina electrică*, Q , care este o mărime fizică scalară definită ca produs între intensitatea curentului electric, staționar dintr-un conductor, I și, timpul în care conductorul este parcurs de curent, t , (relația 6.1).

$$Q = I \cdot t \quad [C] \quad (6.1)$$

Ca urmare, un Coulomb se definește ca fiind sarcina electrică transportată prin secțiunea transversală a unui conductor de curent staționar, cu intensitatea de un amper, în timp de o secundă (relația 6.2).

$$1C = [Q]_{SI} = [I]_{SI} \cdot [t]_{SI} = A \cdot s \quad (6.2)$$

Deoarece între corpurile electrizate există cele două feluri de interacțiune (atracție și respingere), sarcina electrică poate fi **negativă** sau **pozitivă**. Corpurile cu sarcină electrică de același semn se resping, iar corpurile cu sarcină electrică de semne opuse se atrag.

Cea mai mică sarcină electrică pusă în evidență prin experimentele realizate de fizicieni, poartă denumirea de sarcină electrică elementară, care este *sarcina electrică a unui electron* $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$.

În cursul interacțiunilor dintre corpurile unui sistem care nu schimbă sarcină electrică cu exteriorul (sistem izolat din punct de vedere electric), sarcina electrică se redistribuie între corpurile sistemului, fără ca valoarea ei totală să se modifice și astfel se poate enunța *principiul conservării sarcinii electrice*:

Pentru un sistem izolat din punct de vedere electric suma algebrică a sarcinilor electrice ale corpurilor ce alcătuiesc sistemul respectiv rămâne constantă.

Charles Auguste de Coulomb (1736-1806) a stabilit expresia cantitativă a forței de interacțiune, F , dintre două corpuri punctiforme cu sarcinile electrice q_1 și q_2 , aflate la distanța r unul de celălalt, numită *Legea lui Coulomb*:

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad [N] \quad (6.3)$$

unde: k – constantă de proporționalitate care depinde de mediul în care se află sarcinile electrice în interacțiune (relația 6.4), $[(N \cdot m^2)/C^2]$:

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \quad [(N \cdot m^2)/C^2] \quad (6.4)$$

cu: ϵ - permitivitatea specifică fiecărui mediu (pentru vid $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F/m$).

Ca urmare, Legea lui Coulomb se poate scrie astfel:

- dacă cele două sarcini se află într-un mediu omogen oarecare:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (6.5)$$

- dacă cele două sarcini se află în vid:

$$F_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (6.6)$$

Forțele de interacțiune dintre două corpuri punctiforme cu sarcină electrică sunt orientate după direcția care unește cele două corpuri, iar sensul lor depinde de semnul ambelor sarcini. Pentru a exprima atât modulul cât și orientarea acestor forțe, legea lui Coulomb trebuie scrisă vectorial. În acest scop se alege punctul O în care se află sarcina q_1 , ca origine a vectorului de poziție \vec{r} al sarcinii q_2 (figura 6.1).

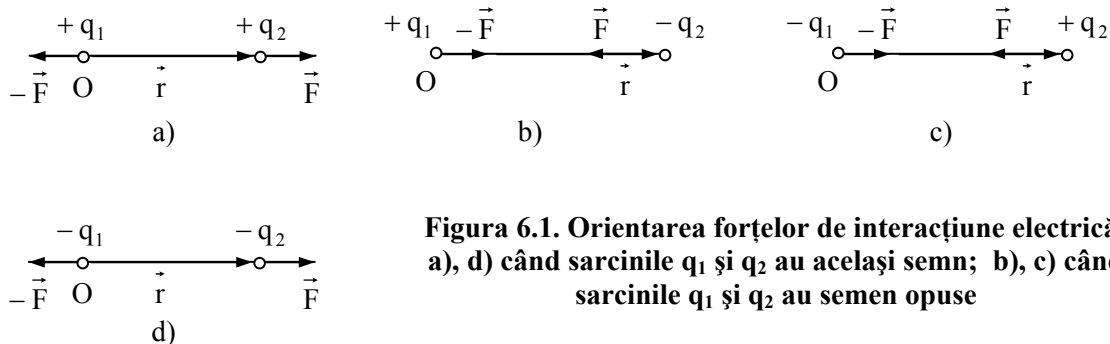


Figura 6.1. Orientarea forțelor de interacțiune electrică:
a), d) când sarcinile q_1 și q_2 au același semn; b), c) când sarcinile q_1 și q_2 au semne opuse

Cu ajutorul vectorului \vec{r}/r , având direcția forței și modulul egal cu unitatea, se poate scrie vectorul forță \vec{F} , cu care sarcina q_1 acționează asupra sarcinii q_2 (relația 6.7):

$$\vec{F} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^3} \cdot \vec{r} \quad (6.7)$$

Când sarcinile q_1 și q_2 au același semn, $q_1 \cdot q_2 > 0$, deci \vec{F} are același sens cu \vec{r} (figura 9.1 a și d), sarcinile se resping. Când sarcinile q_1 și q_2 au semne opuse, $q_1 \cdot q_2 < 0$, deci \vec{F} este de sens opus lui \vec{r} (figura 9.1 b și c), sarcinile se atrag. Forța cu care sarcina q_2 acționează asupra sarcinii q_1 este $-\vec{F}$, egală în modul, dar de sens opus lui \vec{F} .

6.2. Intensitatea câmpului electric

De regulă, un corp cu sarcină electrică modifică proprietățile fizice ale spațiului din jurul său, aspect pus în evidență cu ajutorul unui alt corp încărcat, de dimensiuni mai mici, numit corp de probă. Experimentele efectuate au arătat că, dacă se aduce corpul de probă în apropierea unui corp cu sarcină electrică, în fiecare punct din jurul corpului încărcat se exercită forțe asupra corpului de probă, existând în jurul corpului încărcat cu sarcină electrică un *câmp electric*.

Forma de existență a materiei din jurul corpurilor electrizate, care se manifestă prin acțiuni asupra corpurilor cu sarcină electrică, se numește câmp electric.

Un câmp electric produs de un corp cu sarcină electrică aflat în repaus, este constant în timp și se numește câmp electrostatic.

Conform legii lui Coulomb (relația 6.5), într-un punct la distanța „ r ” de corp, forța electrică va depinde atât de sarcina generatoare de câmp, Q , cât și de sarcina corpului de probă, q (relația 6.8):

$$F = \frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \quad (6.8)$$

Intensitatea câmpului electric, \vec{E} , într-un punct oarecare, este definită ca fiind raportul dintre forța \vec{F} cu care acționează câmpul asupra unui corp de probă aflat în acel punct și sarcina electrică q a corpului de probă (relația 6.9).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (6.9)$$

Intensitatea câmpului electric generat de un corp punctiform, cu sarcina Q , la distanța r , va avea relația:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r^3} \cdot \vec{r} \quad (6.10)$$

Ca urmare, sensul vectorului intensității câmpului electric, \vec{E} , coincide cu sensul forței cu care câmpul electric acționează asupra unui corp de probă depinzând de semnul sarcinii Q (de la corp spre exterior pentru sarcină pozitivă – figura 6.2 a respectiv, de la exterior spre corp pentru sarcina negativă - figura 6.2 b), având modulul dat de relația 6.11, care scade invers proporțional cu pătratul distanței, r :

$$E = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r^2} \text{ [N/C]} \quad (6.11)$$

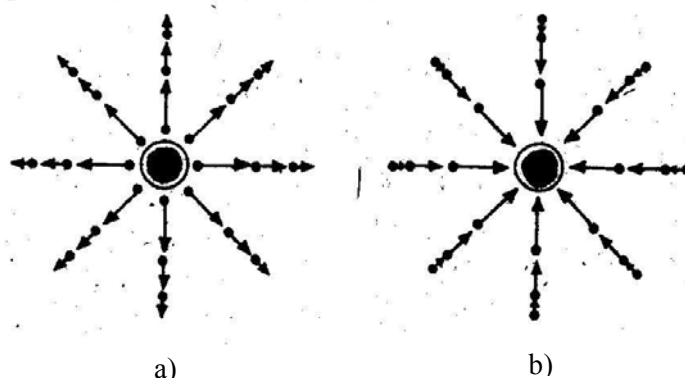


Figura 6.2. Vectorii intensitate a câmpului electric generat de un corp punctiform (sau sferic) conductor având sarcină: a) pozitivă; b) negativă

6.3. Potențialul electric

Câmpul electric poate fi descris nu numai cu ajutorul mărimii vectoriale \vec{E} , ci și cu ajutorul unei mărimi scalare, numită **potențial electric**.

Pentru definirea potențialului electric se va studia pentru început lucrul mecanic efectuat în câmpul electric, arătându-se că lucrul mecanic efectuat pentru deplasarea unui corp de probă încărcat între două puncte ale câmpului electric nu depinde de drumul urmat între cele două puncte, ci depinde de sarcina generatoare de câmp, Q , de punctul inițial, r_M , de punctul final r_N din câmpul electric și de sarcina de probă, q . Lucrul mecanic efectuat de câmpul electric al sarcinii Q pentru a deplasa sarcina de probă q dintr-un punct M , la distanța de Q , într-un punct N , la distanța r_N de Q (figura 6.3) este dat de produsul dintre valoarea medie a forței pe intervalul $[r_M, r_N]$, determinată ca medie geometrică a valorilor forței la capetele intervalului (relația 6.12) și deplasarea punctului ei de aplicație (relația 6.13).

$$F_{\text{medie}} = \sqrt{F_M \cdot F_N} = \sqrt{\frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_M^2} \cdot \frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_N^2}} = \frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_M \cdot r_N} \text{ [N]} \quad (6.12)$$

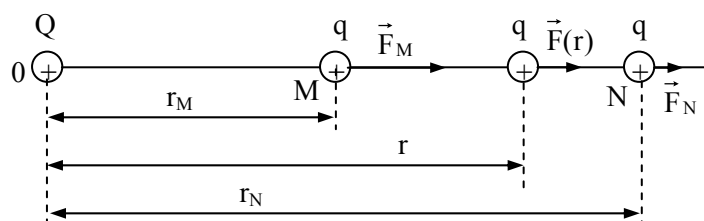


Figura 6.3. Forța electrică variabilă sub acțiunea căreia corpul cu sarcina q se deplasează din M și N într-un câmp produs de un corp punctiform încărcat

$$L = F_{\text{medie}} \cdot |MN| = \frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_M \cdot r_N} \cdot (r_N - r_M) = \frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right) \text{ [J]} \quad (6.13)$$

Raportul L/q este caracteristic pentru fiecare pereche de puncte ale câmpului electric și nu mai depinde nici de sarcina de probă, q , deplasată în câmp și nici de drumul pe care s-a deplasat, ci numai de sarcina generatoare de câmp, Q și de poziția celor două puncte M și N (relația 6.14).

$$\frac{L}{q} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right) \quad (6.14)$$

Diferența de potențial electric $V_M - V_N$ dintre două punct, M și N , sau tensiunea electrică, U , dintre acele puncte, este o mărime fizică egală cu câtul dintre lucrul mecanic efectuat de câmp la deplasarea unui corp încărcat între cele două puncte și sarcina electrică a corpului (relația 6.14).

$$U = V_M - V_N = \frac{L}{q} \text{ [V]} \quad (6.14)$$

Potențialul electric într-un punct este o mărime fizică egală cu raportul dintre lucrul mecanic efectuat de câmp la deplasarea unui corp de probă încărcat, din acel punct în punctul de referință arbitrar ales și, sarcina acelu corp (relația 6.15).

$$V_M = \frac{L}{q} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_M} \text{ [V]} \quad (6.15)$$

În cazul unui câmp electric uniform, deoarece vectorul intensitate a câmpului electric, \vec{E} , este constant, rezultă că și forța electrică ce acționează asupra corpului cu sarcina, q , pe o distanță, d , este la rândul ei constantă (figura 6.4, relația 6.16), caz în care tensiunea electrică are expresia dată de relația 6.17).

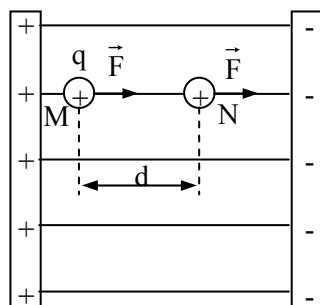


Figura 6.4. Forța electrică constantă sub acțiunea căreia corpul cu sarcină electrică q se deplasează din punctul M în N într-un câmp electric uniform

Prin câmp electric uniform se înțelege câmpul electric dintre două plăci metalice plane și paralele, izolate una de alta, încărcate cu sarcini egale dar de sens contrar, caracterizat prin vectorul intensității constant în fiecare punct și linii de câmp paralele și echidistante.

$$F = q \cdot E \quad (6.16)$$

$$U = \frac{F \cdot d}{q} = \frac{q \cdot E \cdot d}{q} = E \cdot d \text{ [V]} \quad (6.17)$$

Un volt, reprezintă diferența de potențial dintre două puncte ale unui câmp electric, între care se efectuează un lucru mecanic de 1 J pentru a deplasa o

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

sarcină electrică de 1 C.

Pe baza relației 6.17 se stabilește unitatea de măsură pentru intensitatea câmpului electric în Sistemul Internațional (SI):

$$[E]_{SI} = \frac{[U]_{SI}}{[d]_{SI}} = \frac{V}{m} \quad (6.18)$$

6.4. Curentul electric continuu

Curentul electric reprezintă o mișcare ordonată a electronilor liberi printr-un conductor electric sub efectul unei energii primite de la un dispozitiv ce poartă denumirea de generator electric sau sursă electrică.

Curentul electric poate fi *continuu*, când sensul de deplasare a sarcinilor electrice în circuit nu se schimbă, sau *alternativ*, când acest sens se schimbă.

Principalele mărimi ce caracterizează curentul electric continuu sunt:

a) Intensitatea curentului electric, I, [A] - reprezintă mărimea fizică numeric egală cu cantitatea de electricitate, Δq, care străbate o suprafață dată în unitatea de timp, Δt:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} [A] \quad (6.19)$$

Instrumentul utilizat în vederea măsurării intensității curentului electric este *Ampermetrul*.

În general, intensitatea curentului electric este o mărime care își modifică valoarea în timp, curentul electric care are o intensitate constantă în timp fiind denumit *curent electric staționar*.

b) Densitatea de curent, j, A/m² - reprezintă intensitatea curentului, I, raportată la unitatea de de suprafață, S:

$$j = \frac{I}{S} [A/m^2] \quad (6.20)$$

c) Tensiunea electrică, U, [V] - determină mișcarea purtătorilor de sarcini electrice. Tensiunea electrică dintre două puncte ale unui circuit electric este dată de diferența de potențial dintre cele două puncte:

$$U = V_A - V_B [V] \quad (6.21)$$

d) Rezistența electrică, R, [Ω] - este o mărime fizică numeric egală cu raportul dintre tensiunea electrică, U și, intensitatea curentului electric care străbate conductorul, I, expresie ce reprezintă Legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit:

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (6.22)$$

Dispozitivul care din punct de vedere al comportării într-un circuit electric are numai rezistență electrică este numit *rezistor* și poate fi:

- linear sau ohmic, dacă este valabilă legea lui Ohm;
- nelineare sau neohmice, dacă dependența I(U) nu este o funcție lineară.

Rezistența electrică depinde de natura și dimensiunile conductorului străbătut de curent prin relația:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (6.23)$$

unde: l – lungimea conductorului, [m];
S – secțiunea conductorului, [m²];

ρ - rezistivitatea electrică a conductorului care depinde de materialul din care este alcătuit conductorul ρ_0 (tabelul 6.1), de temperatura, t și, de coeficientul termic al rezistivității, α :

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \text{ } [\Omega \cdot \text{m}] \quad (6.24)$$

Tabelul 6.1. Rezistivitățile electrice și coeficienții termici pentru principalele materiale folosite la realizarea conductoarelor electrice

| Nr. crt. | Materialul | ρ_0 , [$\Omega \cdot \text{m}$] | α , [grd^{-1}] |
|----------|---------------|---|-------------------------------------|
| 1. | Platină (Pt) | 1,1 | 0,00267 |
| 2. | Aur (Au) | 2,2 | 0,00377 |
| 3. | Argint (Ag) | 1,5 | 0,00390 |
| 4. | Cupru (Cu) | 1,6 | 0,00390 |
| 5. | Aluminiu (Al) | 2,6 | 0,00400 |
| 6. | Fier (Fe) | 10,0 | 0,00550 |
| 7. | Bronz | 18,0 | 0,00050 |

Curentul electric circulă prin elementele circuitului electric care are ca elemente principale generatoarele și consumatorii. Porțiunea de circuit situată în afara generatorului electric se numește circuit exterior, iar porțiunea de circuit aflată în interiorul generatorului se numește circuit interior. În cadrul circuitului electric (figura 6.5), generatorul transferă energia W_{gen} consumatorului prin conductoarele de legătură:

$$W_{\text{gen}} = W_{\text{ext}} + W_{\text{int}} \text{ } [\text{J}] \quad (6.25)$$

unde: W_{ext} – energia furnizată de generator porțiunii exterioare a circuitului;

W_{int} – energia furnizată de generator porțiunii interioare a circuitului.

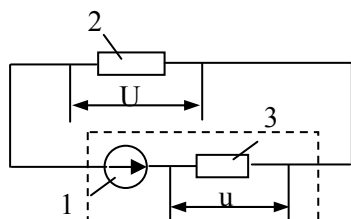


Figura 6.5. Circuit electric simplu:
1 – generator electric; 2 – rezistență electrică a circuitului exterior, R ;
3 – rezistență electrică a circuitului interior, r

Tensiunea la bornele generatorului, U , se definește ca raport între energia furnizată de generator circuitului exterior, W_{ext} , într-un interval de timp oarecare și sarcina electrică, Q , care trece prin circuit în acel interval de timp:

$$U = \frac{W_{\text{ext}}}{Q} \text{ } [\text{V}] \quad (6.26)$$

Tensiunea interioară, u , se definește ca raport între energia furnizată de generator circuitului interior, W_{int} , într-un interval de timp oarecare și sarcina electrică, Q , care trece prin circuit în acel interval de timp:

$$u = \frac{W_{\text{int}}}{Q} \text{ } [\text{V}] \quad (6.27)$$

Tensiunea electromotoare, E , reprezintă raportul dintre energia furnizată de generator întregului circuit, W_{gen} , într-un interval de timp oarecare și sarcina, Q , care trece prin circuit în acel interval de timp:

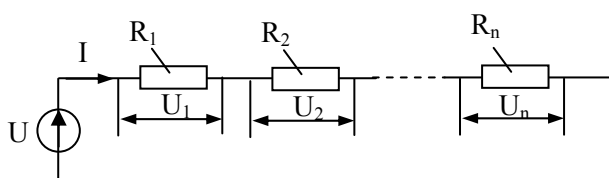
$$E = \frac{W_{\text{gen}}}{Q} \text{ } [\text{V}] \quad (6.28)$$

În cazul unui circuit electric simplu (figura 6.5) tensiunea electromotoare este dată de relația 6.29, astfel încât Legea lui Ohm pe întregul circuit este dată prin relația 6.30 și se poate enunța astfel: **Intensitatea curentului electric printr-un circuit este direct proporțională cu tensiunea electromotoare din circuit și invers proporțională cu rezistanța totală a circuitului.**

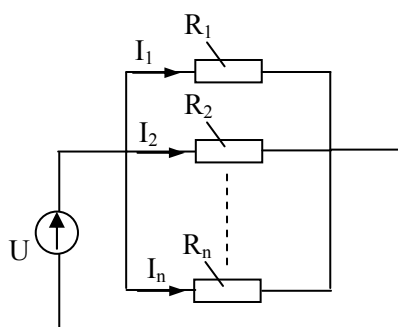
$$E = U + u \text{ [V]} \quad (6.29)$$

$$I = \frac{E}{R + r} \text{ [A]} \quad (6.30)$$

Pentru un circuit electric format din mai multe rezistențe legate în serie sau în paralel (figura 6.6 a și b) este necesară determinarea rezistenței echivalente a circuitului, astfel:



a)



b)

Figura 6.6. Circuit electric cu n rezistențe electrice: a) legate în serie; b) legate în paralel

a) La legarea în serie, pornind de la faptul că toate rezistențele sunt parcurse de aceeași intensitate a curentului electric, fiecare rezistență având la borne propria tensiune, rezultă expresia de calcul a rezistenței electrice de forma:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (6.31)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (6.32)$$

Din legea lui Ohm $I = \frac{U}{R}$ \Rightarrow pentru circuitul serie $I = \frac{U}{R_{sch,s}}$ și ca urmare:

$$U = I \cdot R_{sch,s} \text{ [V]} \quad (6.33)$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \text{ [V]} \Rightarrow$$

$$I \cdot R_{sch,s} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n \Rightarrow$$

$$R_{sch,s} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{j=1}^n R_j \text{ [\Omega]} \quad (6.34)$$

b) La legarea în paralel, pornind de la faptul că toate rezistențele au la borne aceeași cădere de tensiune, U, fiind parcurse de intensități diferite ale curentului electric, rezultă expresia de calcul a rezistenței electrice de forma:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (6.35)$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (6.36)$$

Din legea lui Ohm $I = \frac{U}{R}$ \Rightarrow pentru circuitul serie $I = \frac{U}{R_{sch,p}}$ și ca urmare:

$$I = \frac{U}{R_{sch,p}} \text{ [A]} \quad (6.37)$$

$$\frac{U}{R_{sch,p}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} \text{ [V]} \Rightarrow \frac{1}{R_{sch,p}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{R_{sch,p}} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3} \text{ [\Omega]} \Rightarrow$$

$$R_{sch,p} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3} \text{ [\Omega]} \quad (6.38)$$

De asemenea, în cadrul unui circuit electric se pot utiliza mai multe generatoare *legate în serie* (figura 6.7 a), caz în care toate generatoarele sunt parcurse de același curent ceea ce conduce la creșterea tensiunii de utilizare (relația 6.39), sau *legate în paralel* (figura 6.7 b), caz în care toate generatoarele au la borne aceași tensiune ceea ce conduce la creșterea curentului debitat (relația 6.40).

$$U_{\text{echiv}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{j=1}^n U_j \text{ [V]} \quad (6.39)$$

$$I_{\text{echiv}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{j=1}^n I_j \text{ [A]} \quad (6.40)$$

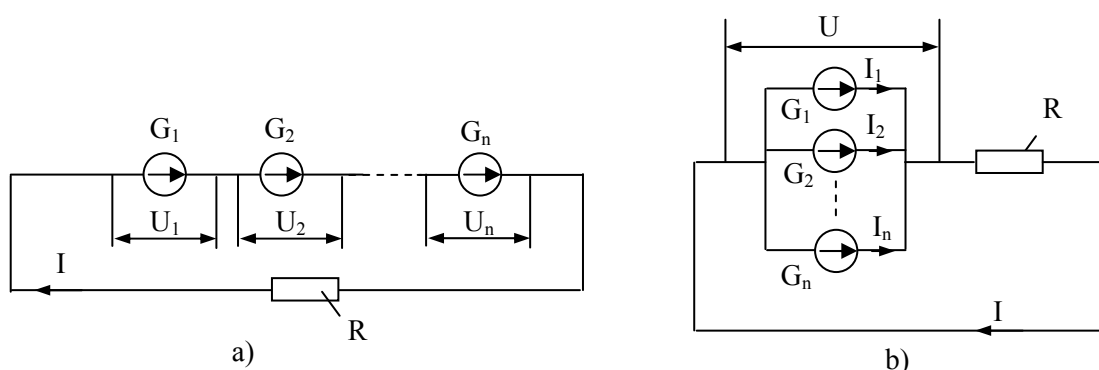


Figura 6.7. Circuit electric cu n generatoare electrice: a) legate în serie; b) legate în paralel

La cuplarea în serie sau în paralel a mai multor generatoare trebuie luate în considerare următoarele aspecte:

- ❖ la legarea în serie, bornele care se leagă între ele trebuie să fie de semn contrar. Dacă această condiție nu se respectă, tensiunea rezultată va fi egală cu diferența tensiunilor parțiale;
- ❖ la legarea în paralel, bornele care se leagă între ele trebuie să fie de același semn. Dacă această condiție nu se respectă, un curent de scurtcircuit va străbate generatoarele.

6.5. Elementele unei rețele electrice

Un circuit electric cu mai multe ramificații alcătuiește o rețea electrică. Diferite ramuri ale rețelei electrice sunt parcurse de curenți diferiți. Pentru descrierea unei rețele electrice se definesc elementele de structură (topologice) ale acesteia:

- a) **nodul** – punctul unui circuit în care sunt interconectate cel puțin trei elemente de circuit;
- b) **latura sau ramura** – este acea porțiune de circuit care este cuprinsă între două noduri, nu cuprinde nici un nod în interior și este parcursă de același curent;
- c) **ochiul sau bucla** – este acea porțiune de circuit formată dintr-o succesiune de laturi ce determină o linie poligonală închisă, la parcurgerea căreia se trece prin fiecare nod o singură dată.

În calculul rețelelor electrice o importanță deosebită o au cele două teoreme ale lui Kirchhoff, prima teoremă se referă la noduri, iar cea de-a doua teoremă se referă la ochiuri.

Teorema I – a lui Kirchhoff: *Suma intensităților curenților care intră într-un nod al unei rețele este egală cu suma intensităților curenților care ies din același nod:*

$$\sum I_{\text{intrare}} = \sum I_{\text{iesire}} \text{ [A]} \quad (6.41)$$

Teorema a II – a lui Kirchhoff: *Suma algebrică a tensiunilor de pe consumatorii aflați într-un ochi de rețea este egală cu suma algebrică a tensiunilor electromotoare ale generatoarelor din acel ochi de rețea:*



$$\sum_{j=1}^n I_j \cdot R_j = \sum_{j=1}^n E_j \text{ [V]} \quad (6.42)$$

Rezolvarea unei rețele electrice presupune, în general, determinarea intensităților curenților din fiecare latură, în cazul în care se cunosc toate caracteristicile generatoarelor și consumatorilor. Etapele parcurse în vederea rezolvării unei rețele electrice sunt:

- E1. Se identifică nodurile circuitului;
- E2. Se identifică laturile circuitului, se notează curenții și se aleg arbitrar sensuri pentru aceștia;
- E3. Se aleg $n-1$ noduri pentru care se vor aplica teorema I-a a lui Kirchhoff;
- E4. Se identifică ochiurile rețelei și se aplică pentru acestea teorema a II – a lui Kirchhoff;
- E5. Se rezolvă sistemul de ecuații rezultate prin aplicarea celor două teoreme.

6.6. Energia și puterea electrică

Un corp posedă energie dacă este capabil să producă lucru mecanic. Energia se poate prezenta sub formă de energie calorică, mecanică, chimică, nucleară, electrică. Orice formă de energie poate fi transformată direct sau indirect în altă formă de energie.

Energia pe care un generator electric o poate furniza unui circuit electric este, așa cum s-a prezentat anterior, porțiunii interioare a circuitului (W_{int}), respectiv, porțiunii exterioare a circuitului (W_{ext}). Utilă pentru consumatori este numai energia furnizată pentru circuitul exterior.

Ca urmare, se poate defini randamentul circuitului electric, ca fiind mărimea fizică egală cu raportul dintre energia utilă din circuit (energia furnizată consumatorilor, W_{ext}) și energia totală din circuit (energia totală furnizată de generatorul electric, W_{gen}):

$$\eta = \frac{W_{ext}}{W_{gen}} \quad (6.43)$$

Puterea electrică reprezintă lucrul mecanic capabil a se produce în unitatea de timp, adică este raportul dintre energia electrică și timp (relația 6.44), rezultând că, energia electrică este produsul dintre puterea electrică, W și, timp (relația 6.45).

$$P = \frac{W}{t} \text{ [W]} \quad (6.44)$$

$$W = P \cdot t \text{ [W}\cdot\text{h]} \quad (6.45)$$

Puterea disipată pe circuitul exterior se determină ca produs între tensiunea pe circuitul exterior, U și, intensitatea curentului electric ce străbate circuitul exterior, I :

$$P = U \cdot I \text{ [W]} \quad (6.46)$$

unde:

$$U = E - r \cdot I \text{ [V]} \quad (6.47)$$

cu: r – rezistența interioară a generatorului electric, [Ω].

6.7. Curentul electric alternativ

6.7.1. Generalități

Mărimile fizice, în funcție de dependența de timp, pot fi constante sau variabile. Astfel, intensitatea curentului, tensiunea electrică, intensitatea câmpului electric și inducția câmpului magnetic pot fi constante sau variabile în funcție de factorii care determină funcționarea sistemelor electrice respective.

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

Inducția unui câmp magnetic uniform, B , este o mărime fizică vectorială, al cărei modul este egal cu raportul dintre forța cu care acel câmp magnetic acționează asupra unui conductor rectiliniu, perpendicular pe liniile câmpului magnetic, F și, produsul dintre intensitatea curentului electric din conductor, I și lungimea conductorului, l , aflat în câmpul magnetic (relația 6.48).

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \left[\frac{N}{A \cdot m} \right], [T] \quad (6.48)$$

Câmpul magnetic este o formă a materiei, care se manifestă prin acțiunea asupra acului magnetic sau asupra conductoarelor parcurse de curent electric.

În cazul mărimilor variabile, o importanță practică o au sistemele electrice în care dependența de timp a diferitelor mărimi este periodică. O mărime fizică este periodică dacă există un interval de timp, T , numit perioadă, astfel încât pentru orice t , să fie adevărată relația 6.49:

$$u(t + T) = u(t) \quad (6.49)$$

Mărimile periodice sunt numite mărimi alternative. Dacă intensitatea unui curent este o mărime alternativă, curentul este numit **curent alternativ**.

O categorie aparte de mărimi alternative o reprezintă mărimile alternative sinusoidale pentru care dependența de timp este dată de o funcție sinusoidală.

Intensitatea curentului electric alternativ este o mărime sinusoidală, dependența ei față de timp fiind dată de relația:

$$i = I_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (6.50)$$

unde: i – valoarea intensității în momentul t , numită intensitate instantanee sau intensitate momentană;

I_{\max} – valoarea maximă pe care o poate atinge intensitatea momentană;

$\omega \cdot t + \varphi$ - faza intensității momentane;

ω - viteza de variație a fazei sau, pulsația intensității alternative, [rad];

φ - faza inițială a intensității momentane, i , la momentul de timp $t=0$.

Curentul alternativ, în comparație cu cel continuu, prezintă o serie de avantaje începând cu producerea și continuând cu transportul și alimentarea consumatorilor. Practic, aria de utilizare a curentului alternativ cuprinde aproape toate domeniile tehnice în care este utilizată energia electrică.

6.7.2. Circuitele R , L , C serie și paralel

Dacă în circuitul de curent continuu Legea lui Ohm dădea o relație de legătură între tensiune, intensitatea curentului electric și rezistență, în circuitul alternativ ne interesează relația care se stabilește când avem un circuit cu rezistor și bobină pur inductivă sau condensator.

În curent alternativ, circuitele electrice pot fi:

a) circuite pur rezistive (figura 6.8) – dacă în circuit avem numai rezistență, curentul și tensiunea fiind tot timpul în fază;

b) circuite pur inductive (figura 6.9) – dacă în circuit avem numai inductanță, curba de variație a curentului fiind cu 90° în urma tensiunii, vectorul curentului fiind și el cu 90° în urma vectorului tensiunii;

c) circuite pur capacitive (figura 6.10) - dacă în circuit avem doar capacitate, curba de variație a curentului fiind cu 90° înaintea tensiunii, vectorul curentului fiind și el cu 90° înaintea vectorului tensiunii.

Dacă considerăm un circuit în care avem o rezistență, R , o inductanță, L și, o capacitate, C , legate în serie (figura 6.11 a), prin toate aceste componente va trece același curent I , fiecare dintre aceste elemente de circuit având propria cădere de tensiune la borne, U_R , U_L , respectiv, U_C . Tensiunea U_R este în fază cu intensitatea curentului, tensiunea pe inductanță U_L este defazată cu 90° înaintea curentului, iar tensiunea pe capacitate U_C este defazată cu 90° în urma curentului (figura 6.11 b), rezultând impedanța Z , dată prin relația:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [\Omega] \quad (6.51)$$

unde: $X_L = \omega \cdot L$ - reactanța inductivă a circuitului, $[\Omega]$;

$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ - reactanța capacitivă a circuitului, $[\Omega]$.

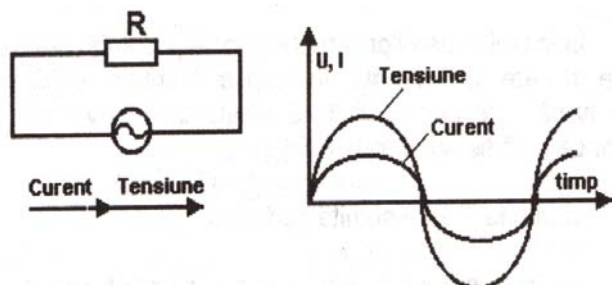


Figura 6.8. Circuit electric pur rezistiv: schema circuitului, curba de variație a tensiunii și curentului și vectorii tensiune și curent

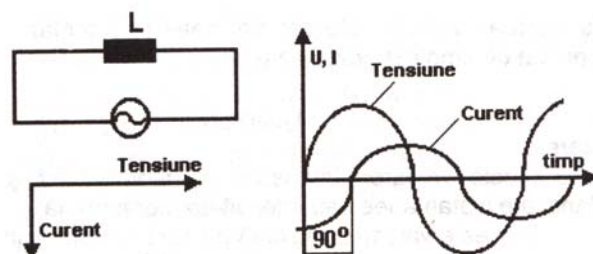


Figura 6.9. Circuit electric pur inductiv: schema circuitului, curba de variație a tensiunii și curentului și vectorii tensiune și curent

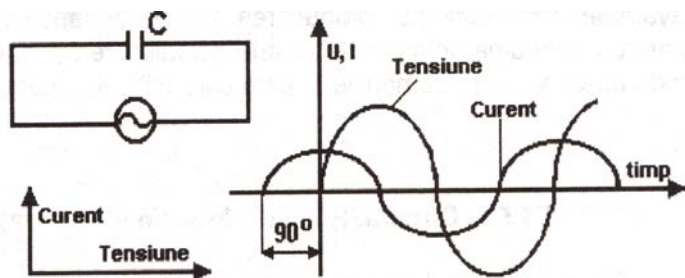


Figura 6.10. Circuit electric pur capacitiv: schema circuitului, curba de variație a tensiunii și curentului și vectorii tensiune și curent

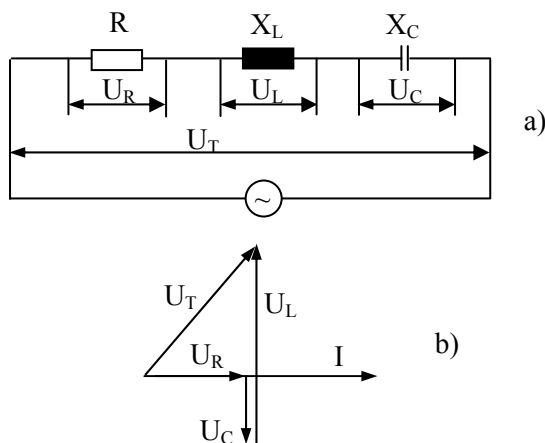


Figura 6.11. Circuit RLC serie: a) schema circuitului; b) diagrama fazorială

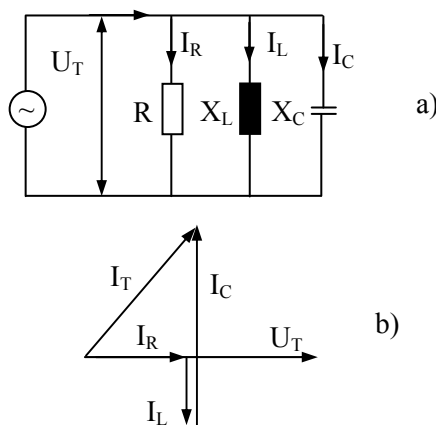


Figura 6.12. Circuit RLC paralel: a) schema circuitului; b) diagrama fazorială

Prin **impedanță** se înțelege mărimea caracteristică a unui circuit electric de curent alternativ, egală cu raportul dintre tensiunea eficace la bornele circuitului, u și, intensitatea eficace a curentului, i (relația 6.52).

$$Z = \frac{u}{i} \quad [\Omega] \quad (6.52)$$

În cazul unui circuit R, L, C paralel (figura 6.12 a), se observă că intensitățile curenților I_L și I_C sunt defazate la 180° (adică sunt în opoziție de fază) și pot avea valori mai mari decât valoarea curentului total I_T (figura 6.12 b). Ca urmare, pentru un circuit R, LC paralel, impedanța circuitului

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

se va determina cu relația 6.53, tensiunea la bornele circuitului va fi dată prin relația 6.54, iar curentul total va fi exprimat prin relația 6.55.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} \quad [\Omega] \quad (6.53)$$

$$U_T = U_R = U_L = U_C \quad [V] \quad (6.54)$$

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \quad [A] \quad (6.55)$$

6.7.3. Puterea și factorul de putere

În cazul unui circuit de curent alternativ care conține rezistențe, inductanțe și capacități, se poate vorbi de trei tipuri de puteri (figura 6.13):

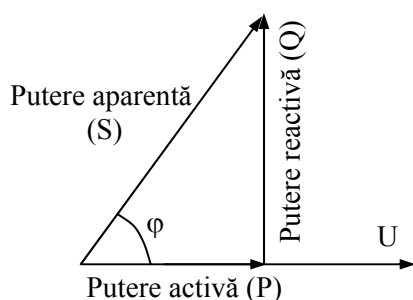


Figura 6.13. Triunghiul puterilor pentru un circuit de curent alternativ

- **Puterea activă, P**, datorată trecerii curentului electric prin rezistența R a circuitului:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [W] \quad (6.56)$$

- **Puterea reactivă, Q**, datorată trecerii curentului electric prin inductanța L sau capacitatea C a circuitului:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [VAR] \quad (6.57)$$

- **Puterea aparentă, S**, datorată combinației puterii active P cu puterea reactivă Q:

$$S = U \cdot I \quad [VA] \quad (6.58)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad [VA] \quad (6.59)$$

Un consumator electric alimentat la o tensiune U absoarbe atât un curent activ în fază cu tensiunea cât și un curent reactiv, defazat cu 90° față de tensiune. Curentul total absorbit, I, va fi defazat cu unghiul φ față de tensiune, cosinusul acestui unghi (*cos φ*) reprezentând **factorul de putere al consumatorului**.

Livrarea curentului electric în Sistemul Energetic Național (SEN) este în sistem trifazat (fazele R, S, T), datorită următoarelor cauze:

- generatoarele și motoarele monofazate au un volum mare, spațiul pentru bobine nefiind cel mai bine folosit;
- costul generatoarelor și motoarelor monofazate este mult mai mare față de cel al motoarelor trifazate;
- motoarele trifazate au un timp de pornire mai mic;
- motoarele trifazate se pot transporta mai ușor.

Generatorul electric trifazat (figura 6.14) este compus din trei bobine așezate în spațiu sub un unghi de 120°. Datorită câmpului magnetic rotitor, generatorul trifazat, va induce o tensiune în fiecare bobină, cele trei tensiuni fiind egale ca amplitudine, dar decalate una față de cealaltă cu 120°.

Fiecare dintre cele trei faze ale unui generator de curent alternativ trifazat este scoasă afară prin două capete terminale (rezultă 6 capete terminale). În scopul ieftinirii transportului energiei se pot reduce cele șase conductoare prin realizarea unei conexiuni serie (figura 6.14 a) sau triunghi (figura 6.14 b). În cazul **conexiunii stea**, punctul N poartă numele de punct de neutru. La conductorul neutru se poate renunța, întrucât prin el nu circulă curent atunci când curenții consumați de sarcină sunt egali pe cele trei faze. Dacă cele trei faze (R, S, T) nu sunt echilibrate, conductorul de neutru este necesar.

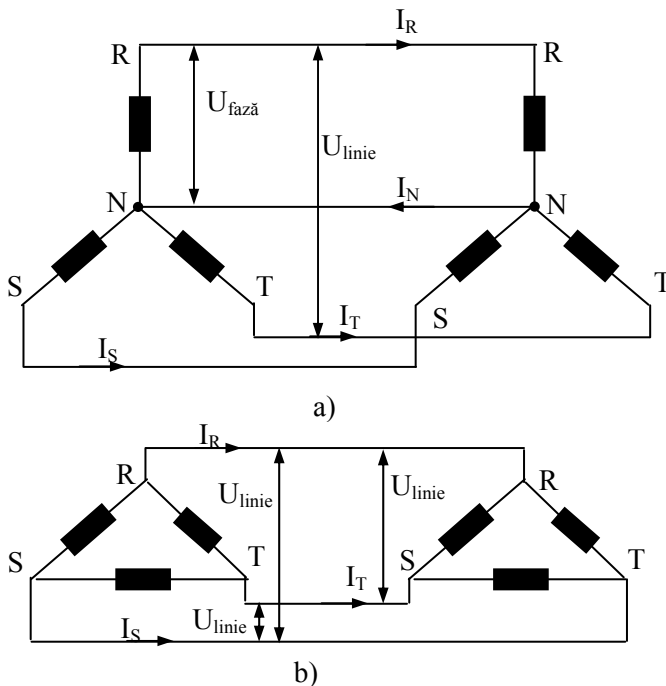


Figura 6.14. Generator electric trifazat:
a) conectarea fazelor în stea; b) conectarea fazelor în triunghi

$$U_{\text{linie}} = U_{\text{faza}} \quad [\text{V}] \quad (6.62)$$

$$I_{\text{linie}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{faza}} \quad [\text{A}] \quad (6.63)$$

Pentru ca suma tensiunilor conectate în triunghi să fie egală cu zero, este necesar ca înfășurările să fie conectate cu polaritatea corectă, ceea ce implică necesitatea efectuării de măsurători a tensiunilor, înainte de închiderea triunghiului.

Frecvența, f , a unui generator trifazat este dată de relația 6.64, în funcție de numărul de perechi de poli, p și, de turația, n :

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (6.64)$$

Dacă cele trei faze (R, S, T) nu sunt echilibrate, conductorul de neutru este necesar. Tensiunile între fazele R, S, T și punctul neutru N se numesc **tensiuni de fază** și sunt defazate cu 120° între ele, iar tensiunile între fazele R și S, R și T, S și T se numesc **tensiuni de linie**, determinate cu relația 11.13:

$$U_{\text{linie}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{faza}} \quad [\text{V}] \quad (6.60)$$

Datorită faptului că același curent circulă și pe fază și pe linie, în cazul conexiunii în stea curentul de linie este egal cu cel de fază (relația 6.61):

$$I_{\text{linie}} = I_{\text{faza}} \quad [\text{A}] \quad (6.61)$$

În cazul conexiunii în triunghi, datorită faptului că fiecare fază a conexiunii este direct conectată la două linii, tensiunea de linie devine egală cu tensiunea de fază (relația 6.62), iar curentul de linie va fi determinat cu relația 6.63:

7. CARACTERISTICI GENERALE ALE SISTEMELOR ELECTROENERGETICE

7.1. Generalități

Sistemul Electroenergetic (SEE) reprezintă totalitatea instalațiilor care concurează la producerea, transportul, distribuția și consumul de energie electrică, presupunând realizarea unor conexiuni de o formă oarecare între toate elementele sale componente: generatoarele electrice din sursele de producere a energiei electrice, transformatoarele, liniile de transport și distribuție și consumatorii de energie electrică.

Descoperirea fenomenelor electromagnetice și a aplicațiilor acestora, a făcut ca la sfârșitul secolului al XIX – lea să fie posibilă utilizarea industrială a energiei electrice pentru consum, datorită numeroaselor avantaje pe care energia electrică le prezintă pentru utilizare în raport cu alte forme de energie:

1. poate fi transmisă rapid și economic la distanțe mari și la un număr mare de consumatori de puteri diferite;
2. se poate transforma în alte forme de energie în general în condiții avantajoase (randamente ridicate în procesele de transformare);
3. în urma utilizării ei nu rezultă reziduuri;
4. se pretează bine la automatizări și se poate măsura cu precizie.

În primii ani de utilizare industrială a energiei electrice în curent alternativ, elementele implicate în procesul de producere, transport (eventual distribuție) și consum a energiei electrice, erau situate într-o zonă geografică de dimensiuni limitate și funcționau izolat, conectate între ele după o schemă simplă. Creșterea continuă a numărului și puterii consumatorilor, diversificarea acestora și a amplasării lor geografice, a determinat creșterea numărului de surse de producere a energiei electrice și, implicit, a rețelelor de transport și distribuție, astfel că s-a realizat interconectarea zonelor funcționând izolat, rezultând astfel sistemul electroenergetic (figura 7.1).

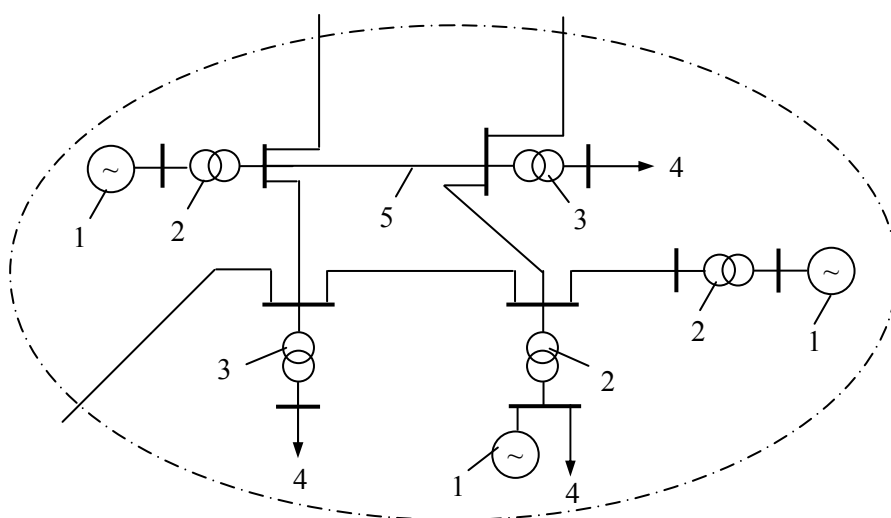


Figura 7.1. Porțiuni de sistem electroenergetic: 1 – generator electric; 2 – transformator ridicător; 3 – transformator coborâtor; 4 – consumator; 5 – linie electrică

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.L.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

7.1.1. Evoluția structurii sistemului electroenergetic

Prima centrală electrică din țara noastră, destinată deservirii mai multor consumatori, a fost pusă în funcțiune la Timișoara, la finele anului 1884, urmată la scurt timp de centrala de la Grozăvești – București, astfel că odată cu încheierea celui de-al doilea Război Mondial, în țara noastră (în 1945) exista o putere electrică instalată în centrale electrice de 720 MW. În perioada 1945-1989, strategiile energetice naționale au vizat creșterea permanentă a puterii instalate în centralele electrice astfel că, la sfârșitul anului 1989, în România, puterea totală instalată era de 22.000 MW.

Pe planul dezvoltării sistemelor de producere a energiei electrice, strategia energetică a continuat și după 1989 prin punerea în funcțiune în 1996 a primului reactor nuclear de la Centrala Nuclearo-Electrică Cernavodă, cu puterea unitară de 700 MW, care în prezent asigură aproximativ 10% din producția de energie electrică a țării.

În ceea ce privește sistemul de transport a energiei electrice, prima linie trifazată este construită între București și Florești în anul 1924, având tensiunea nominală $U_n=60$ kV, pentru ca, puțin mai târziu, în anul 1930, să se construiască prima linie electrică de 110 kV între Dobrești și București.

O caracteristică definitorie a perioadei pe care o trăim este aceea că, în ultimul timp, s-a înregistrat un consum scăzut de energie, în anul 2002 înregistrându-se un consum intern mai mic cu 60% față de consumul realizat în 1989. Datorită scăderii cererii de energie, puterea instalată s-a redus în ultimul timp la aproximativ 17.000 MW prin retragerea din exploatare a majorității grupurilor energetice vechi care funcționau cu consumuri specifice mari.

7.1.2. Avantajele și dezavantajele formării sistemului electroenergetic

Formarea Sistemului Electroenergetic (SEE) a fost impusă de avantajele ce le prezintă funcționarea interconectată în raport cu funcționarea izolată a elementelor ce concură la alimentarea consumatorilor.

Existența Sistemului Electroenergetic prezintă avantajele:

- determină *reducerea vârfului de putere la nivelul sistemului* (datorită faptului că vârfurile de putere ale consumatorilor care intră în componența sistemului nu se ating simultan, vârful de putere simultan la nivelul sistemului va fi mai mic decât suma vârfurilor de putere ale consumatorilor componenți – relația 7.1). Ca o consecință, puterea instalată totală necesară la nivel de sistem este mai mică decât în cazul funcționării izolate și ca urmare cheltuielile de investiții și exploatare se reduc;

$$P_{\text{var f, sistem}} < \sum_{i=1}^n P_{\text{var f, consum, i}} \quad [\text{kW}] \quad (7.1)$$

- determină *creșterea siguranței în alimentarea consumatorilor*;
- determină *aplatizarea curbei de sarcină*, permițând o utilizare economică a centralelor din sistem;
- permite *utilizarea economică a instalațiilor din sistem*, fiind posibil ca în fiecare moment de funcționare să se mențină numai acele componente care permit furnizarea energiei electrice la costul minim, datorită existenței conexiunii între toate elementele sistemului și în funcție de valoarea totală a consumului;
- permite *utilizarea cu eficacitate mărită a resurselor energetice ale țării*;
- permite *utilizarea resurselor energetice sporadice* de genul gazelor de furnal, gazelor de sondă, energiei eoliene, energiei solare etc., în condiții avantajoase;
- permite *creșterea puterii unitare a grupurilor din sistem* și a puterii instalate în centrale prin reducerea cheltuielilor de investiție și exploatare;
- permite *o planificare judicioasă a reviziilor și reparațiilor* elementelor din sistem, deoarece în condițiile existenței unei interconectări între elementele componente, deconectarea uneia din ele la momentul și pe durata necesară nu afectează alimentarea consumatorilor, funcțiile sale fiind preluate de alte componente;

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

- Sistemul Electroenergetic reprezintă o *întreprindere* unică, cu *potențial economic ridicat*, ceea ce îi permite să angajeze investiții mari, extinderi de anvergură, introducerea de automatizări și tehnică nouă etc., în concordanță cu necesitățile și cu soluția optimă rezultată.

Pe lângă avantajele amintite, odată cu formarea Sistemului Electroenergetic au apărut o serie de probleme, care pot fi considerate dezavantaje:

- creșterea puterii de scurtcircuit la bare ceea ce ridică pretenții în ce privește aparatajul de comutație și alte instalații din sistem;
- introducerea problemei stabilității care reprezintă problema funcționării sincrone a generatoarelor din sistem, problemă care la funcționarea izolată nu există;
- complicarea tuturor aspectelor funcționale de regim normal (determinarea circulației de puteri, reglajul de tensiune, reglajul de frecvență, funcționarea economică etc.) și regim de avarie (determinarea curenților de scurtcircuit, calculul regimurilor nesimetrice etc.) pentru a căror rezolvare se cere formarea de modele matematice foarte complicate și utilizarea mijloacelor de calcul puternice;
- dificultate în supravegherea regimurilor de funcționare;
- necesitatea utilizării unui aparataj de producție și automatizare foarte complex care să țină cont de corelația care trebuie respectată la funcționarea numărului mare de elemente componente ale sistemului.

7.1.3. Evoluția și dezvoltarea Sistemului Electroenergetic Național

Dezvoltarea instalațiilor de producere, transport, distribuție și consum a energiei electrice în țara noastră a urmat îndeaproape dezvoltarea acelorași domenii pe plan mondial.

În țara noastră, prima centrală electrică destinată a deservi mai mulți consumatori, a fost pusă în funcțiune la Timișoara, la finele anului 1884, urmată de centrala electrică de la Grozăvești – București.

În ceea ce privește sistemele de transport și distribuție a energiei electrice, prima linie electrică trifazată cu tensiunea nominală de 60 kV, a fost construită în anul 1924 între Florești și București, iar prima linie de 110 kV a fost construită în anul 1930 între Dobrești și București.

Puterea totală instalată în centralele electrice din România era la nivelul anului 1945 de 720 MW, iar producția totală de energie pe cap de locuitor era de 80 kW, cu mult, atât sub media mondială, cât și sub media consumatorilor de Europa.

În urma adoptării, în anul 1950, a Planului de electrificare de 10 ani, la sfârșitul anului 1960 puterea instalată era de 1779 MW, cu o utilizare de circa 4250 ore pe an, ceea ce a reprezentat o creștere a puterii de 13,7%.

În această perioadă, o atenție sporită a fost acordată construirii de noi centrale termoelectrice cu abur, atât cu parametri ai aburului reduși - cu puteri unitare instalate între 12...20 MW (Ovidiu, Doicești, Comănești) -, cât și cu parametri mai ridicați ai aburului (98 bar, 510°C) - cu puteri ale grupurilor energetice mai mari (25 MW și 50 MW) (Sângeorgiu de Pădure – 150 MW și Paroșeni – 150 MW).

Paralel cu aceste noi surse de producere a energiei electrice și termice, au fost instalate și un număr important de grupuri electrogene cu motoare Diesel și s-a elaborat baza tehnico-economică pentru introducerea termoficării la noii consumatori industriali și urbani. Toate aceste studii s-au concretizat prin punerea în funcțiune a centralei de termoficare Borzești.

Dezvoltarea continuă a subsistemului de producere a energiei electrice și termice la nivel național, a condus în anii '60, la crearea unui sistem energetic unic, obținut prin dezvoltarea și interconectarea mai multor sisteme energetice regionale și care dispunea de o rețea de bază de 110 kV sub forma unei bucle cu mai multe diagonale, care cuprindea practic toate marile noduri consumatoare și producătoare de energie electrică de pe teritoriul României și ulterior, la punerea în funcțiune a primei linii de 220kV între Bicz și Fîntînele, iar în anul 1963 a primei linii de 400kV pe traseul Luduș – Mukacevo (URSS) – Lemeșanz (RSC) care realiza interconexiunea cu sistemele energetice vecine.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

Sistemele de producere a energiei au cunoscut în perioada 1960 – 1970 o evoluție continuă, marcată prin folosirea în termocentrale a unităților (grupurilor) cu condensare cu supraîncălzire intermediară de putere mare (100...315 MW). De asemenea, au fost puse în funcțiune importante amenajări hidrotehnice pe valea Bistriței și valea Argeșului. Punctul culminant în dezvoltarea energetică din această perioadă, a fost atins odată cu punerea în funcțiune a centralei de termoficare Brazi (200 MW) cu unități cu treaptă de parametri superiori (137 bar și 570°C).

Pentru perioada mai sus amintită, creșterea medie de producție a fost de 16,80%, Sistemul Energetic Național fiind alimentat în principal de centralele termoelectrice (cca. 80% din puterea instalată și produceau 88% din energie). Termoficarea se dezvoltă în continuare prin implementarea sistemelor de cogenerare cu unități de 25, 50, 100 MW la parametrii de 98 bar și 110°C, respectiv 137 bar și 570°C.

În perioada imediat următoare anului 1970 și până spre sfârșitul anului 1980, dezvoltarea ramurii energiei este marcată de faptul că balanța de energie devine deficitară. Hidrocarburile și gazul metan găsindu-și o utilizare mai eficientă, ca materie primă, în industria chimică, a condus la o puternică sporire a potențialului hidroenergetic al țării. Punerea în funcțiune a Centralei Hidroelectrice de la Porțile de Fier cu o capacitate de 1068 MW și a hidrocentralei de pe Lotru, a făcut ca întreaga cantitate de energie electrică produsă în hidrocentrale până în anul 1978 să crească de 62 de ori.

Și totuși, dezvoltarea sistemului energetic din România a continuat, obiectivele principale fiind formate din mari centrale electrice de condensare cu grupuri energetice de 330 MW sau 125 – 150 MW, folosind ligniți din Oltenia (Rovinari, Turceni).

7.1.4. Structura organizatorică a sistemului electroenergetic național după 1990

Preocupările în domeniul energetic au vizat în principal dezvoltarea sistemelor de producere a energiei electrice și termice în concordanță cu dezvoltarea economică. Ca urmare, evoluția sistemului energetic a condus la mărirea capacităților de producție, cu punerea accentului pe construirea de noi unități hidrotehnice. Totodată, construirea la Cernavodă a unei centrale nucleare-electrice cu grupuri de 700 MW a contribuit la reducerea consumurilor de combustibili naturali. Astfel, la sfârșitul anului 1989, în țara noastră, puterea instalată era de peste 22000 MW, gradul de utilizare fiind de 50%.

Din punct de vedere organizatoric toate componentele sistemului electroenergetic au fost grupate, până în anul 1990, în cadrul Ministerului Energiei Electrice.

În perspectiva aderării la Uniunea Europeană, începând cu anul 1990, se înființează RENEL¹, ca regie națională, preluând structura din fostul minister al energiei electrice.

Ca o încununare a eforturilor de dezvoltare și modernizare a sistemului energetic, în anul 1996 s-a pus în funcțiune primul reactor nuclear de la CNE - Cernavodă cu puterea unitară de 700 MW, iar ulterior, în anul 2007, cel de-al doilea reactor nuclear.

O altă caracteristică deloc de neglijat a perioadei despre care vorbim, este aceea că, în comparație cu anul 1989, consumul de energie a scăzut foarte mult, ajungând în anul 2006 la un consum intern de aproximativ 60% din consumul înregistrat în 1989, ceea ce a avut un impact dur asupra puterii instalate, care a ajuns să nu depășească 17000 MW. Ca urmare a acestor aspecte, țara noastră s-a transformat dintr-un importator de energie în exportator, confruntându-se chiar și în prezent cu o criză de supracapacitate.

Dacă din punct de vedere funcțional, perioada de după 1989 n-a fost una prea liniștită, același lucru se poate spune și despre sistemul organizatoric. După înființarea RENEL au avut loc schimbări profunde ale structurii organizatorice a acestei Companii, care au însemnat divizări și externalizări ale diferitelor activități.

Astfel, în anul 1998 prin HG nr.365/1998 ia ființă CONEL având în componență trei filiale, organizate ca societăți comerciale pe acțiuni: S.C. Electrica S.A, S.C. Termoelectrica S.A și respectiv, S.C. Hidroelectrica S.A. De asemenea, în anul 2000, prin HG 627/31.07.2000, CONEL s-

¹ Regia Autonomă de Electricitate

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

a divizat în actualele societăți comerciale care acționează și azi în SEN, entități care au suferit la rândul lor, transformări organizatorice succesive, mai mult sau mai puțin importante, în funcție de politica fiecăreia:

- **S.C. TRANSELECTRICA S.A.** – Compania Națională de Transport a Energiei Electrice;
- **S.C. TERMOELECTRICA S.A.** – Societatea Comercială de Producere a Energiei Electrice și Termice;
- **S.C. HIDROELECTRICA S.A.** – Societatea Comercială de Producere a Energiei Electrice;
- **S.C. ELECTRICA S.A.** – Societatea Comercială de Distribuție și Furnizare a Energiei Electrice.

7.2. Transformatoare și autotransformatoare de forță

7.2.1. Noțiuni generale

Transformatorul electric este un aparat static cu două sau mai multe înfășurări cuplate magnetic (figura 7.2.), cu ajutorul cărora se transformă parametrii electrici (tensiunea și curentul) ai puterii electrice, în curent alternativ, frecvența rămânând neschimbată. Înfășurarea care primește puterea se numește **înfășurare primară**, iar cea care debitează puterea se numește **înfășurare secundară**. Autotransformatorul, spre deosebire de transformator, are o singură înfășurare.

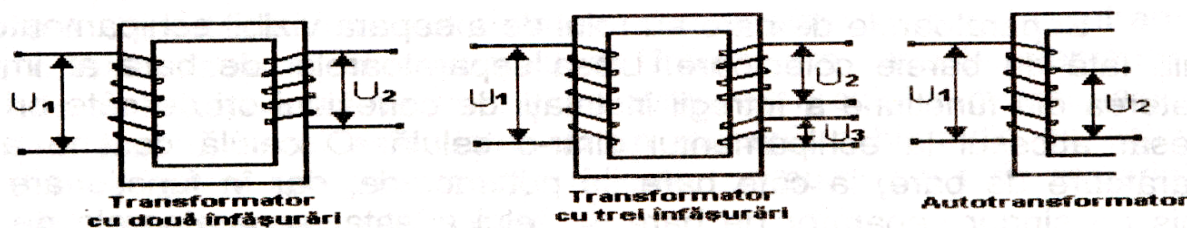


Figura 7.2. Transformatoare electrice de forță

Indiferent de tipul constructiv, transformatoarele și autotransformatoarele au ca elemente constructive de bază miezul magnetic și înfășurările.

Miezul magnetic se construiește din tole din tablă silicioasă puternic aliată. Tolele se izolează între ele cu hârtie sau cu lac izolant. Miezul se construiește din coloane și juguri.

Înfășurările sunt așezate pe coloane. Ele sunt construite din conductor de cupru sau aluminiu, izolat cu bumbac sau hârtie. Înfășurările se pot realiza sub două forme: înfășurări în cilindru sau înfășurări în galeți. La înfășurările în cilindru, bobinele formează un cilindru cu o înălțime puțin mai mică decât înălțimea miezului feromagnetic. La înfășurările în galeți, bobinele de tensiune înaltă alternează în direcție axială cu cele de tensiune joasă.

Capetele înfășurărilor transformatoarelor aparținând aceleiași părți (primar sau secundar) sunt conectate între ele. Modul de cuplare a acapetelor transformatoarelor trifazate se numește conexiune. Se pot utiliza trei tipuri de conexiuni: în stea, în triunghi și în zig-zag.

Pentru ca transformatorul de putere să poată funcționa în condiții normale și în vederea prevenirii unor eventuale incidente, el trebuie să mai conțină un sistem de răcire, un echipament de comutare a platourilor sub sarcină, echipamentul de măsură și control și instalația de stingere a incendiilor.

Modul de răcire al transformatoarelor depinde de modul în care circulă uleiul prin corpurile de răcire și de cel în care este răcită suprafața exterioară a acestora. Circulația uleiului poate fi naturală sau forțată, iar răcirea suprafeței exterioare a elementelor de răcire poate fi:

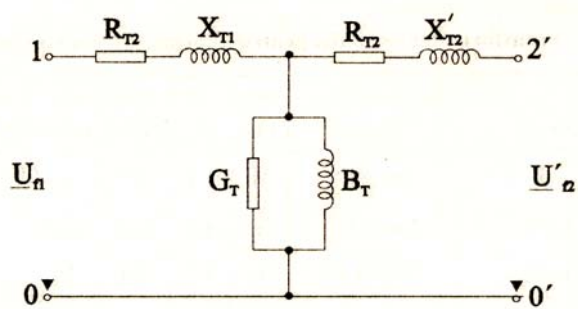
- liberă (naturală), cu aer;
- forțată, prin suflare cu aer.

Miezul și înfășurările transformatoarelor sunt așezate într-o cuvă umplută cu ulei. Uleiul, pe lângă rolul de izolant are și rolul de răcire. El preia căldura de la miez și înfășurări și o transmite mediului de răcire care poate fi aerul sau apa.

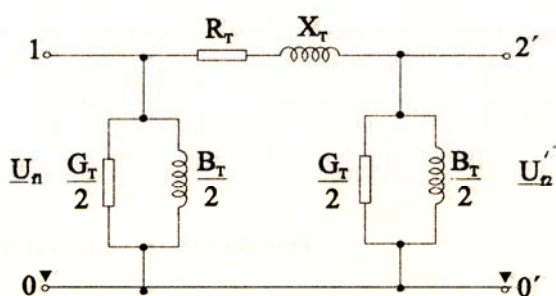
7.2.2. Scheme echivalente și parametrii electrici ai transformatoarelor

Principalele caracteristici tehnice ale transformatoarelor și autotransformatoarelor trifazate sunt:

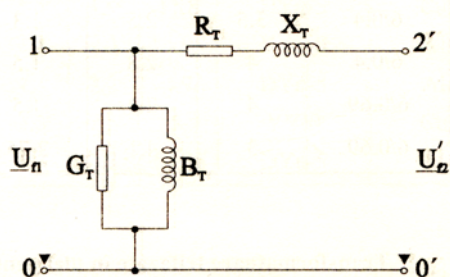
- tensiunea nominală, U_n , [kV];
- raportul de transformare nominal n_T ;



a)



b)



c)

Figura 7.3. Schemele electrice echivalente pentru transformatoarele cu două înfășurări: a) în T; b) în Π; c) în Γ

- puterea nominală, care reprezintă o valoare convențională a puterii aparente luată ca bază la construcția transformatorului, $S_{n,T}$, [MVA];
- curentul nominal, I_n , [A];
- frecvența nominală, f , [Hz];
- pierderile nominale de mers în gol, ΔP_0 , [kW];
- curentul nominal de mers în gol, i_0 , [%];
- tensiunea nominală de scurtcircuit, u_{sc} , [%];
- pierderile nominale de scurtcircuit, ΔP_{sc} , [kW].

Schemele echivalente ale transformatoarelor trifazate cu două înfășurări cu încărcare simetrică a fazelor, în reprezentare monofazată, pot fi de tipul în T, în π și în Γ (figura 7.3.).

La transformatoare, conductanța, G_T și susceptanța B_T , sunt parametrii transversali, conectați la bornele înfășurării cu tensiunea nominală cea mai mică.

Principali parametri ai transformatoarelor de forță sunt:

a) Pentru transformatoarele cu două înfășurări :

- rezistența echivalentă pe fază:

$$R_T = \frac{\Delta P_{sc} \cdot U_n^2}{S_{n,T}^2} [\Omega] \quad (7.2)$$

- reactanța inductivă echivalentă:

$$X_T \approx Z_T = \frac{u_{sc}(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{n,T}} [\Omega] \quad (7.3)$$

- conductanța:

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_n^2} [S] \quad (7.4)$$

- susceptanța:

| | | |
|---|--|---|
|  | UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ | INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU |
|---|--|---|

$$B_T \approx Y_T = \frac{i_0(\%) \cdot S_{n,T}}{100 \cdot U_n^2} [\text{S}] \quad (7.5)$$

b) Pentru transformatoarele cu trei înfășurări:

În sistemul energetic se folosesc trei tipuri de transformatoare cu trei înfășurări: Tip I – 100/100/100; Tip II – 100/100/66,7 sau 100/66,7/100; Tip III – 100/67/67.

- Rezistența transformatorului de tipul I:

$$R_T = R_{T,1} = R_{T,2} = R_{T,3} = \frac{\Delta P_{sc} \cdot U_n^2}{2 \cdot S_{n,T}^2} [\Omega] \quad (7.6)$$

- Rezistența transformatorului de tipul II:

$$R_T = R_{T,1} = R_{T,2} = \frac{\Delta P_{sc} \cdot U_n^2}{2 \cdot S_{n,T}^2} [\Omega] \quad (7.7)$$

$$R_{T,3} = 1,5 \cdot R_{T,1} [\Omega] \quad (7.8)$$

- Rezistența transformatorului de tipul III:

$$R_{T,1} = \frac{\Delta P_{sc} \cdot U_n^2}{1,83 \cdot S_{n,T}^2} [\Omega] \quad (7.9)$$

$$R_{T,2} = R_{T,3} = 1,5 \cdot R_{T,1} [\Omega] \quad (7.10)$$

unde: U_n – tensiunea nominală a treptei la care se face raportarea, [kV];

Pentru transformatoarele trifazate de tipul II, pierderile de putere de scurtcircuit ΔP_{sc} se determină pentru înfășurarea de înaltă tensiune IT și pentru înfășurarea de medie tensiune MT_1 încărcate la sarcină nominală, iar înfășurarea de medie tensiune MT_2 funcționează în gol. Pentru transformatoarele trifazate de tipul III, pierderile de putere de scurtcircuit ΔP_{sc} sunt considerate conform încărcării (100%, 67%, 67%).

- Reactanțele echivalente se determină cu relațiile:

$$X_{T,1} = \frac{1}{2} (X_{T,1-2} + X_{T,1-3} + X_{T,2-3})$$

$$X_{T,2} = \frac{1}{2} (X_{T,1-2} + X_{T,2-3} + X_{T,1-3}) \quad (7.11)$$

$$X_{T,3} = \frac{1}{2} (X_{T,2-3} + X_{T,1-3} + X_{T,1-2})$$

unde: $X_{T,1-2}$, $X_{T,1-3}$, $X_{T,2-3}$ – reactanțele inductive calculate în ipoteza că transformatoarele au două înfășurări, [Ω] (relațiile 7.12...7.14).

$$X_{T,1-2} = \frac{u_{sc,1-2}(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{n,T}} [\Omega] \quad (7.12)$$

$$X_{T,1-3} = \frac{u_{sc,1-2} 3(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{n,T}} [\Omega] \quad (7.13)$$

$$X_{T,2-3} = \frac{u_{sc,2-3}(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{n,T}} [\Omega] \quad (7.14)$$

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

Parametrii transversali, conductanța și susceptanța inductivă, se calculează cu relațiile de la transformatorul cu două înfășurări.

7.2.3. Transformatoare de măsură

Transformatoarele de măsură sunt transformatoare electrice speciale care se folosesc pentru măsurarea curentului și tensiunii din circuitul primar.

Transformatorul de curent este transformatorul de măsură la care curentul secundar este practic proporțional cu curentul primar și defazat față de acesta cu un unghi foarte aproape de zero. El cuprinde o înfășurare primară conectată în serie cu circuitul primar și mai multe înfășurări secundare, la care se conectează circuitele secundare.

În principiu se prevăd miezuri, respectiv înfășurări secundare separate pentru alimentarea următoarelor circuite: de măsură, de protecție și automatizare, pentru protecția diferențială, de curent operativ alternativ.

Transformatorul de tensiune este transformatorul de măsură la care tensiunea secundară, în condiții normale de transformare, este practic proporțională cu tensiunea primară și defazată de aceasta cu un unghi foarte aproape de zero. El este destinat reducerii tensiunii din circuitele primare de la valori mari, la valori mai mici, corespunzătoare aparatelor din circuitele secundare. Transformatorul de tensiune cuprinde un miez feromagnetic pe care sunt plasate două categorii de înfășurări: o înfășurare primară, conectată în paralel la circuitul primar și mai multe înfășurări secundare, la care se conectează circuitele secundare.

În instalațiile de conexiuni se întâlnesc mai multe tipuri de transformatoare de conexiuni:

- transformatoare de tensiune inductive – la care înfășurarea primară se alimentează direct cu tensiunea primară care trebuie transformată:

- transformator de tensiune bipolar (nelegat la pământ);
- transformator de tensiune momopolar (legat la pământ)

- transformatoare de tensiune capacitive – la care înfășurarea primară se alimentează de la un divizor de tensiune capacitiv, căruia i se aplică tensiunea primară care trebuie transformată.

7.3. Echipamente ale sistemului electroenergetic

7.3.1. Bobine de reactanță

Bobinele de reactanță sunt elemente (echipamente) serie de circuit conectate permanent, de aceea ele trebuie să fie caracterizate de pierderi reduse de putere și de căderi minime de tensiune în regim normal de funcționare.

Ele se montează în stațiile de distribuție de medie tensiune, în special de (6...10)kV cu plecări în cablu și, au rolul, de a limita curentii de scurtcircuit la valori mai mici decât capacitatea de rupere a întreruptoarelor. În felul acesta se poate reduce secțiunea cablurilor și îmbunătăți fiabilitatea instalațiilor. Ele permit deasemenea, menținerea în regim de scurtcircuit, a unui anumit nivel de tensiune în amonte de $0,7 \cdot U_n$, care să asigure rămânerea în funcțiune a motoarelor conectate pe bara de medie tensiune.

În exploatare se utilizează bobine de reactanță pe suport de beton sau lemn, fără miez de oțel, pentru menținerea constantă a inductanței. Sunt executate din conductoare flexibile de Al sau Cu, izolate cu bandă de bumbac, impregnate cu lac și uscate în vid. Inductanța bobinei este dată de parametrii constructivi: lățime, înălțime și număr de spire. Se execută în construcție monofazată și se livrează în set de trei faze identice, care se pot monta vertical sau orizontal. La montaj vertical, faza din mijloc se va bobina în sens invers pentru a limita forțele electrodinamice.

În schemele electrice bobinele de reactanță se conectează pe bare limitând astfel valoarea curentului de scurtcircuit al întregii instalații sau, pe linie, caz în care limitează curentul de scurtcircuit pe linie, menținând și nivelul de tensiune necesar în amonte. Bobinele de reactanță de linie se montează și în amonte de întreruptor, permițând reducerea parametrilor acestuia.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

7.3.2. *Înteruptoare de înaltă tensiune*

Înteruptorul de înaltă tensiune este un aparat destinat închiderii sau deschiderii circuitelor primare de înaltă tensiune. Operația de conectare și deconectare duce la apariția arcului electric. Stingerea acestui arc electric se realizează prin provocarea răcirii arcului prin crearea unui violent curent de gaze și prin îndepărtarea cu viteză foarte mare a contactelor.

În stațiile electrice se utilizează mai multe tipuri de întreruptoare:

- > întreruptoare cu ulei mult;
- > întreruptoare cu ulei puțin;
- > întreruptoare cu hexafluorură de sulf (SF₆).

7.3.2.1. *Înteruptoare cu ulei mult*

În etapa inițială a evoluției producerii și distribuției energiei electrice, întreruperea curenților și separarea elementelor de contact de făcea în aer. Pe măsură ce nivelul de tensiune a crescut, întreruperea se realiza în ulei, în ideea de a utiliza un mediu cu calități izolante mai bune decât aerul.

Rolul uleiului în întreruptor este dublu: pe de o parte, de a forma gaze sub presiune care împreună cu uleiul sub stare turbulentă răcesc arc electric și deci îl sting, iar pe de altă parte, de a ocupa spațiul de contact și deci, de a izola elementele de contact.

Înteruptoarele cu ulei mult sunt echipate cu camere de stingere pentru fiecare contact. Aceste camere sunt imersate într-o cuvă de ulei și funcționează după principiul jetului de lichid.

Avantajele întreruptorului cu ulei mult sunt:

- construcție simplă;
- pot fi instalate în exterior la temperaturi scăzute;
- are putere mare de rupere și stingere.

Aceste întreruptoare prezintă însă unele dezavantaje, care fac ca acest tip de întreruptor să fie rar utilizat în sistemul energetic:

- pericol de explozii și incendii;
- consum mare de material;
- masă mare;
- imposibilitatea de a fi montat în spații interioare;
- revizie greoaie în exploatare impusă de evacuarea volumului de ulei;
- posibilități limitate pentru reanclanșare automată rapidă (RAR), din cauza maselor mari în mișcare și a formării arcurilor electrice succesive;
- uzură mare datorită pieselor grele în mișcare.

7.3.2.2. *Înteruptoare cu ulei puțin*

Aceste întreruptoare sunt caracterizate de intensificarea acțiunii de răcire a arcului electric după principiile jetului și expandării. La aceste întreruptoare, uleiul are rolul de agent de stingere a arcului electric, iar izolarea pieselor sub tensiune se asigură cu ajutorul aerului, uleiului și ale materialelor dielectrice ceramice.

Înteruptorul are următoarele părți componente:

- a) șasiu – realizat din profile de oțel sudate pe care se fixează coloanele unei faze;
- b) coloană izolantă – asigură izolația față de pământ a contactelor întreruptorului și este compusă din carcasa de porțelan, tuburile izolante de înaltă presiune și rezervorul de ulei;
- c) ansamblul mecanism de acționare – este compus din: carcasă, mecanismul hidraulic de acționare cu piston; mecanismul de transmitere a mișcării, contactul mobil, sistemul de ghidaj și mecanismul de zăvorâre;
- d) ansamblul camere de stingere – se compune dintr-o carcasă de porțelan în care se află: un tub izolat de rezistență, camera de stingere propriu-zisă, contactul fix inferior, contactul fix superior de tip tulipă.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

În poziția închis a întreruptorului contactul mobil este menținut în poziție superioară de către dispozitivul de zăvorâre al ansamblului mecanismului de acționare. Acest contact mobil stabilește legătura dintre contactul fix inferior și contactul fix superior. La deschiderea întreruptorului, tija contactului mobil se deplasează brusc în jos și se separă de contactul fix superior. În acest moment va apare, între contactul mobil și contactul superior, arcul electric care se dezvoltă în masa de ulei care umple camera de stingere. O dată cu împingerea în jos a contactului mobil se injectează ulei proaspăt de-a lungul coloanei arcului electric grăbind stingerea acestuia.

Întreruptorul cu ulei puțin prezintă următoarele avantaje:

- construcție relativ simplă;
- consum mai mic de material decât la întreruptoarele cu ulei mult;
- revizie ușoară.

Printre dezavantajele acestui tip de întreruptor menționăm:

- existența în continuare a pericolului de explozie și incendiu;
- revizie frecventă a camerelor de stingere;
- putere de rupere limitată.

7.3.2.3. Întreruptoarele cu hexafluorură de sulf

Funcționarea acestor tipuri de întreruptoare se bazează pe proprietățile hexafluorurii de sulf de a transmite bine căldura și de a avea rigiditate dielectrică mare. Elementele componente ale acestui întreruptor sunt: coloana izolantă și ansamblu de întrerupere. Aceste elemente sunt umplute cu hexafluorură de sulf pentru stingerea arcului și pentru asigurarea izolației. Întreruptorul este dotat cu un mecanism hidraulic de acționare și are performanțe ridicate, consum redus de material, dar necesită o precizie crescută în execuție.

7.3.3. Separatoare electrice

Separatorul este un aparat mecanic de conectare care în poziția deschis asigură, din motive de securitate, o distanță vizibilă minimă prescrisă între bornele fiecărui pol. El poate întrerupe numai curenții de valoare neglijabilă, fapt ce face să nu fie echipate cu dispozitive de stingere a arcului electric.

Separatorul trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- pozițiile închis și deschis de funcționare să fie ușor vizibile;
- în poziția deschis să asigure izolația corespunzătoare între contactele unui pol, care să permită întreruperea sigură a circuitelor;
- în poziția închis să suporte curenții nominal și cel de scurtcircuit fără a se deteriora;
- să fie prevăzute cu elemente de blocaj, pentru a exclude posibilitatea manevrării în condiții nepermise;
- separatoarele destinate să funcționeze în exterior trebuie să reziste bine la agenții atmosferici.

Există o mare varietate constructivă de separatoare dintre care menționăm separatoarele rotative și cele tip cuțit.

La separatoarele rotative, izolatoarele suport pot pivota executând o mișcare de 90° sub acțiunea unui sistem de pârghii. Prin rotirea izolatoarelor suport se obține și rotirea tijelor de contact.

La separatoarele tip cuțit, elementul de contact, cuțitul, se deplasează cu ajutorul unui mecanism de acționare, în plan vertical.

Separatoarele pot fi acționate la fața locului cu dispozitive de acționare manuală și de la distanță cu dispozitive cu acționare pneumatică sau electrică. Blocarea separatoarelor contra manevrelor greșite se poate realiza prin blocarea mecanică a dispozitivului de acționare manuală sau prin deschiderea unor contacte din circuitele de comandă la distanță.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

În cadrul celulelor electrice separatoarele pot îndeplini funcția de separator de bare, de separator de linie sau/și separator de legare la pământ.

Separatoarele de bare au rolul de a separa vizibil echipamentul din celulă față de barele colectoare. Lipsa separatoarelor de bară ar impune scoaterea din funcțiune a întregii instalații de conexiuni ori de câte ori este necesar accesul la echipamentul dintr-o celulă. O celulă conține atâtea separatoare de bare, la câte bare se pot racorda, dar în funcționare este închis un singur separator de bare. În felul acesta, separatoarele de bare capătă rolul de comutație, în sensul că se permite trecerea circuitelor celulei de la o bară la alta. Separatoarele de linie au rolul de a separa vizibil linia de întreruptor în scopul de a permite personalului să aibă acces la linie în vederea reviziei.

Separatoarele de punere la pământ sunt prevăzute în scopul legării la pământ a liniei, pentru protecția personalului în caz de intervenție la aceasta. De asemenea ele sunt folosite și pentru descărcarea sarcinii electrostatice remanente în linie, după deconectarea de la sursa de tensiune.

7.3.4. *Circuite de protecție*

Pentru a se asigura scopul urmărit, protecțiile trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să fie rapide astfel încât să deconecteze echipamentul defect într-un timp cât mai scurt;
- să fie selective astfel încât să asigure numai deconectarea echipamentului avariat, toate celelalte părți ale sistemului rămânând în funcțiune;
- să fie sensibile astfel încât să acționeze la defecte sau perturbări oricât de mici ale regimului de funcționare;
- să fie fiabile astfel încât să sesizeze apariția defectului pentru care a fost concepută și să nu aibă refuzuri de acționare sau acționări false;
- să fie compatibile electromagnetic astfel încât să nu fie perturbată în funcționare de influențele diverselor câmpuri electromagnetice și de a nu genera perturbații electromagnetice în mediul înconjurător;
- să îndeplinească funcția de comunicație astfel încât să efectueze schimbul de informații cu operatorul uman pentru reglarea parametrilor de acționare, obținerea valorilor mărimilor supravegheate și a datelor privind mărimile defecte;
- să îndeplinească funcția de autosupraveghere astfel încât să-și testeze permanent starea și să semnalizeze orice defecțiune care poate conduce la o funcționare incorectă.

În funcție de rolul pe care îl au în vederea înlăturării unei avarii se deosebesc următoarele categorii de protecții:

- protecții de bază;
- protecții de rezervă;
- protecții auxiliare.

În funcție de mărimea controlată putem vorbi de următoarele tipuri de protecție:

- a) protecția de curent – este de obicei o protecție maximală care acționează ca urmare a creșterii curentului în circuitul protejat, creștere care are loc în cazul scurtcircuitelor și a suprasarcinilor. Protecțiile minimale de curent se utilizează foarte rar și se prevăd a acționa la întreruperea circuitului protejat.
- b) protecția de tensiune – acționează, în general, la scăderea tensiunii. Sunt și protecții maxime de tensiune, la care elementul de pornire intră în funcțiune la creșterea tensiunii din zona elementului protejat.
- c) protecția direcțională – este o protecție de curent, care acționează numai dacă sensul de circulație al curentului de scurtcircuit este spre zona elementului protejat.
- d) protecția diferențială – este o protecție de curent care intră în funcțiune pe baza diferenței curenților de la capetele zonei protejate.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|---|

- e) protecția de distanță – cuprinde patru tipuri de elemente: elementul de pornire (sesizează apariția defectului), elementul de măsurare a impedanței (măsoară distanța până la locul defectului), elementul de timp (realizează temporizările pe diferite trepte de acționare), elementul direcțional (asigură selectivitatea protecției, determinând zona în care s-a produs defectul).
- f) protecția homopolară – este utilizat în rețelele cu neutru izolat sau compensate și de regulă doar semnalizează apariția defectului. Se întâlnesc mai multe tipuri de protecții homopolare: protecții maxime de curent homopolar, protecții homopolare direcționate; protecții cu relele sensibile la curenți homopolari de armonici superioare.
- g) protecția cu releu de gaze – se folosește exclusiv la transformatoare și autotransformatoare. Ea este o protecție instantanee, elementul de pornire fiind releul de gaze. Funcționarea protecției se bazează pe apariția gazelor care se degajă din ulei la apariția unui scurtcircuit în interiorul cuvei sau a comutatorului de ploturi.
- h) protecția termică – acționează la creșterea temperaturii conductoarelor.

7.3.5. Circuite de măsură și supraveghere

Aparatele de măsură controlează parametrii electrici de funcționare ai instalațiilor echipamentului primar.

Există mai multe tipuri de aparate de măsură:

- *indicatoare*, la care valoarea parametrului este indicată cu ajutorul unui ac indicator;
- *înregistratoare*, la care acul indicator este prevăzut la capăt cu un dispozitiv de scriere, valoarea mărimii măsurate fiind înregistrată;
- *integratoare*, la care se face însumarea valorilor mărimilor măsurate.

Principalii parametri care sunt măsurați sunt:

- ❖ curentul;
- ❖ tensiunea;
- ❖ frecvența;
- ❖ puterea activă și reactivă;
- ❖ energia activă și reactivă.

Sistemul de semnalizare permite operatorului, în orice moment, cunoașterea regimului de funcționare a instalației și eventualele schimbări ale acestuia. Semnalul poate fi optic, optic și acustic sau numai acustic.

Principalele semnalizări sunt:

- ▶ *semnalizările de poziție* – trebuie să diferențieze optic pozițiile închis și deschis ale aparatelor de comutație primară, precum și comenzile manuale de cele automate;
- ▶ *semnalizările de avarie* – anunță optic și acustic declanșarea automată de avarie a întreruptoarelor. Semnalul acustic are rolul de a atrage atenția personalului operativ, iar semnalizarea optică indică întreruptorul care a fost declanșat;
- ▶ *semnalizările preventive* – au rolul de a avertiza personalul asupra instalării unor regimuri anormale de funcționare.

| | | |
|---|--|--|
|  | <p style="text-align: center;">UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ</p> | <p style="text-align: center;">INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ Suport de curs Ș.I.dr ing. Radu – Cristian DINU</p> |
|---|--|--|

BIBLIOGRAFIE

1. Dinu, R.C., Popescu, N., *Introducere în ingineria energetică. Aplicații și teste grilă*, Editura SITECH, Craiova, 2015, ISBN 978-606-11-4399-3.
2. Dinu, R.C., Popescu, N., *Energetica instalațiilor de producere a energiei în cogenerare*, Editura UNIVERSITARIA Craiova, ISBN 978-606-14-0750-7, Craiova, 2013.
3. Mircea, I., Dinu, R.C., *Producerea energiei electrice și termice. Partea a II-a*, Ediția a II-a, Editura UNIVERSITARIA, Craiova, ISBN 978-606-510-572-0, 978-606-510-578-2, 2009.
4. Ionel, I., Popescu, F., *Introducere în termotehnică*, Editura Politehnica, Timișoara, 2007.
5. Duinea, A., Mircea, I., *Transfer de căldură și masă*, Tipografia Universității din Craiova, 2006.
6. Mircea, I., Dinu, R., C., *Scheme și simboluri în instalațiile termoenergetice*, Tipografia Universității din Craiova, 2005.
7. Mircea, I., Ruieneanu, L., Dinu, R.C., *Producerea energiei electrice și termice. Îndrumar de laborator.*, Vol. I, Reprografia Universității din Craiova, 2001.
8. Tomescu, A., ș.a., *Bazele electrotehnicii. Circuite electrice*, Editura MatrixRom, București, 2000.
9. Darie, S., Vădan, I., *Producerea, transportul și distribuția energiei electrice*, Edituras UT Press, Cluj Napoca, 2000.
10. Mircea, I., Duinea, A.M., Ruieneanu, L., Dinu, R.C., *Conversia energiei și energetică generală. Tabele. Formule termotehnice și aplicații, Pentru uzul studenților*, Repografia Universității din Craiova, 1999.
11. Bică, M., *Bazele termotehnicii și mașini termice*, Reprografia Universității din Craiova, 1996.



**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ**

**INTRODUCERE ÎN INGINERIA ENERGETICĂ
Suport de curs**

Ș.Ldr ing. Radu – Cristian DINU