

# CAPITOLUL 6

## Senzori

### OBIECTIVELE

După studierea acestui capitol, ar trebui să fiți familiarizați cu caracteristicile și funcționarea unor senzori precum:

- Senzori de poziție, inclusiv potențiometre, codificatoare rotative optice și transformatoare diferențiale variabile lineare.
- Senzori de viteză, inclusiv tahometre optice și de curent continuu.
- Senzori de proximitate, inclusiv comutatoare de limită, comutatoare optice de proximitate și comutatoare cu efect Hall.
- Senzori de sarcină, inclusiv tensiometre cu fir, tensiometre de forță semiconductoare și senzori de forță redusă.
- Senzori de presiune, inclusiv tuburi Bourdon, și senzori semiconductori de presiune.
- Senzori de temperatură, inclusiv senzori de temperatură bimetalici, termocupluri, detectoare de temperatură de rezistență, termistoare și senzori de temperatură IC.
- Senzori de debit, inclusiv plăci de orificiu, cu tub Venturi, tuburi Pitot, turbine și debitmetre magnetice.
- Senzori de nivel lichid, inclusiv tipuri discrete și continue.

### INTRODUCERE

Dispozitivele care informează sistemul de control despre ceea ce se întâmplă de fapt se numesc **senzori** (cunoscuți și sub numele de traductoare). De exemplu, corpul uman are un sistem de senzori uimitor care prezintă continuu creierul nostru o imagine destul de completă a mediului - indiferent dacă avem nevoie de toate sau nu. Pentru un sistem de control, proiectantul trebuie să verifice exact ce parametri trebuie monitorizați - de exemplu, poziția, temperatura și presiunea - și apoi să specifice senzorii și circuitele interfeței de date pentru a face treaba. De multe ori este posibilă o alegere. De exemplu, am putea măsura fluxul de lichid într-o conductă cu un debitmetru sau am putea măsura fluxul indirect văzând de cât timp

este nevoie ca lichidul să umple un recipient de dimensiuni cunoscute. Alegerea ar fi dictată de cerințele de sistem, de cost și de fiabilitate.

Majoritatea senzorilor funcționează prin conversia unor parametri fizici, cum ar fi temperatura sau poziția, într-un semnal electric. Acesta este motivul pentru care senzorii sunt numiți și **traductoare**, care sunt dispozitive care convertesc energia de la o formă la alta.

---

## 6.1 SENZORI DE POZIȚIE

Senzorii de poziție raportează poziția fizică a unui obiect în raport cu un punct de referință. Informațiile pot fi un unghi, ca și în câte grade s-a deplasat o antenă radar sau liniară, ca în câte centimetri s-a extins un braț robot.

### Potențiometre

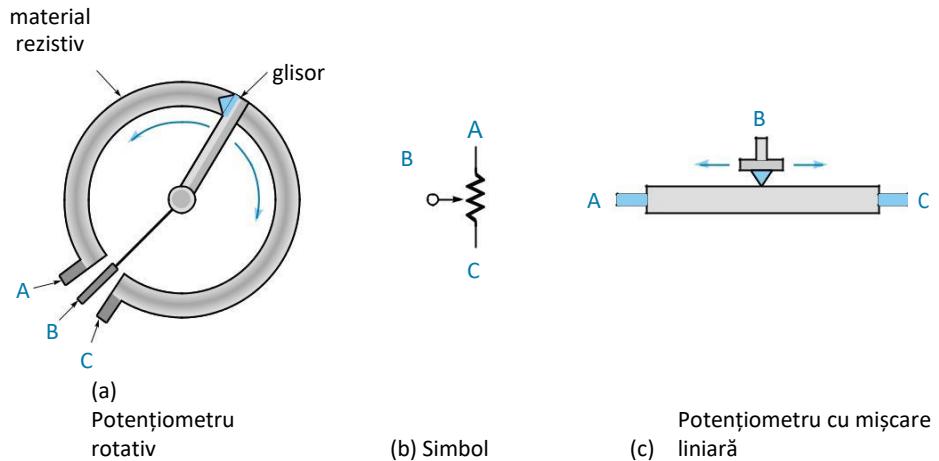
Un **potențiometru** poate fi folosit pentru a converti deplasarea rotativă sau liniară la o valoare electrică în volti. De fapt, potențiometrul în sine dă rezistență, dar după cum vom vedea, această valoare a rezistenței poate fi ușor convertită într-o tensiune. Potențiometrele folosite pentru senzorii de poziție sunt aceiași, în principiu, ca un potențiometru standard de "control al volumului audio", dar există o diferență. Un potențiometru utilizat pentru un controlul audio volumului poate avea *proprietăți nelineare*, ceea ce înseamnă că rezistența se schimbă într-un mod neliniar pentru a se potrivi perceptiei umane de "a deveni mai tare". Un potențiometru folosit pentru măsurarea poziției unghiulare trebuie să fie *liniar*, ceea ce înseamnă că rezistența se schimbă liniar cu rotația arborelui.

Figura 6.1(a) ilustrează modul în care funcționează potențiometrului. Un material rezistiv, cum ar fi plasticul conductiv, se formează în formă de cerc (care se termină la contactele A și C). Acest material are o rezistivitate uniformă, astfel încât valoarea ohmilor pe inch de-a lungul lungimii sale este o constantă. Conectat la arbore este **glisorul sau cursorul**, care alunecă de-a lungul rezistorului și atinge o valoare [contact B din figura 6.1 litera (a)]. Figura 6.1 litera (b) prezintă simbolul circuitului. Potențiometrul descris mai sus este tipul cu o singură trecere, care poate măsura de fapt doar aproximativ 350° din gama utilă. Un potențiometru cu o singură trecere poate avea "opriri" la fiecare capăt al călătoriei sale. Evident, un astfel de potențiometru ar putea fi folosit numai în cazul în care rotația nu depășește niciodată 350°. Un potențiometru fără opriri are o mică "zonă moartă" atunci când cursorul(glisorul) traversează capătul rezistorului. Potențiometrele multitoră sunt disponibile cu un glisor care se mișcă într-o mișcare spiralată, permitând până la 25 sau mai multe rotații ale arborelui de la pornire la oprire. Figura 6.1 litera (c) ilustrează un potențiometru cu mișcare liniară. În acest caz, glisorul se poate deplasa înainte și înapoi în linie dreaptă. Potențiometrele cu mișcare liniară sunt utile pentru detectarea poziției obiectelor care se mișcă într-un mod liniar.

Figura 6.2(a) prezintă un potențiometru care detectează poziția unghiulară a unui braț robotic. În acest caz, corpul potențiometrului este ținut staționar, iar arborele potențiometrului este conectat direct la arborele motorului. Tensiunea de zece volți este menținută pe terminalele potențiometrului. Studiați Figura 6.2 (b) și imaginați-vă cum tensiunea se schimbă uniform de la 0 la 10 Vdc de-a lungul elementului rezistiv. Glisorul doar "citește" căderea de tensiune dintre punctul său de contact și masă. De exemplu, dacă glisorul este în partea de jos, ieșirea este de 0 V corespunzătoare

**Figura 6.1**

Potențiometru.



unui unghi de  $0^\circ$ . Când glisorul este în partea de sus, ieșirea este de 10 V corespunzătoare unui unghi de  $350^\circ$ ; în mijlocul potențiometrului, o ieșire de 5 V indică un unghi de  $175^\circ$  ( $350^\circ/2 = 175^\circ$ ). Exemplul 6.1 demonstrează modul de calculare a tensiunii potențiometrului pentru un anumit unghi.

### EXEMPLUL 6.1

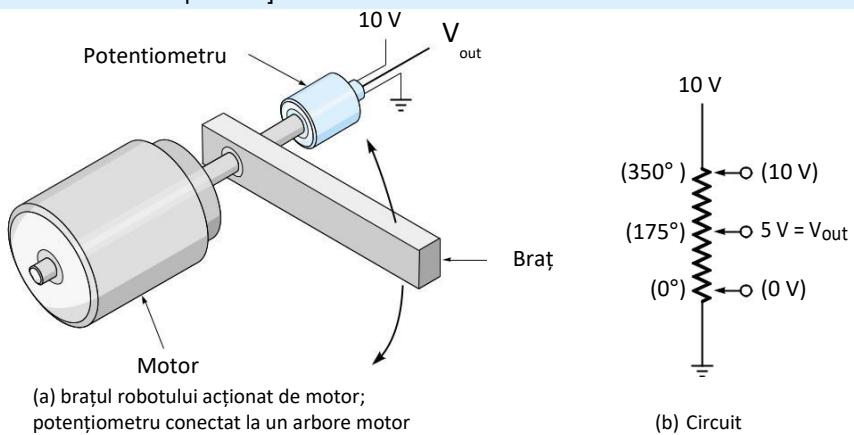
Un potențiometru este alimentat cu 10 V și este setat la  $82^\circ$  [similar cu figura 6.2 litera (b)]. Gama de unghiuri pentru acest potențiometru cu o singură trecere este de  $350^\circ$ . Calculați tensiunea de ieșire.

### SOLUȚIE

Dacă potențiometrul este alimentat la capete cu 10 V, atunci unghiul maxim de  $350^\circ$  va produce o ieșire de 10 V. Folosind aceste valori, putem configura un raport de ieșire la intrare și de a folosi acest raport pentru a calcula ieșirea pentru orice intrare [acest raport este un exemplu de funcție de transfer simplă (TF) discutată în capitolul 1]:

**Figura 6.2**

Potențiometru ca senzor de poziție.



$$TF_{pot} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{10 \text{ Vdc}}{350^\circ}$$

Pentru a găsi tensiunea de ieșire pentru un anumit unghi, înmulțiți unghiul cu funcția de transfer (și, ca întotdeauna, asigurați-vă că unitățile funcționează corect - în acest caz, *gradele* se anulează, lăsând *voltii* ca unitate):

$$\text{Pot voltage (at } 82^\circ) = \frac{10 \text{ Vdc}}{350^\circ} \times 82^\circ = 2.34 \text{ Vdc}$$

Circuitul echivalent al potențiometrului discutat aici este de fapt un divizor de tensiune, și funcționează corect dacă același curent trece prin întreaga rezistență a potențiometrului. O eroare de încărcare (citire) apare atunci când glisorul potențiometrului este conectat la un circuit cu o rezistență de intrare care *nu* este considerabil mai mare decât rezistența potențiometrului. Când se întâmplă acest lucru, curentul curge prin brațul glisorului, permitând trecere unui curent prin porțiunea inferioară a rezistorului fapt care duce la o citire eronată (a se vedea exemplul 6.2). Pentru a se rezolva această problemă, un circuit tampon de înaltă impedanță, (discutat în capitolul 3) poate fi introdus între potențiometru și circuitul căruia trebuie să-i furnizeze tensiunea. Eroarea de încărcare este diferența dintre ieșirea fără sarcină și cea cu sarcină, așa cum este prezentată în ecuația 6.1a:

$$\text{Eroare de încărcare} = V_{NL} - V_L \quad (6.1a)$$

unde

$V_{NL}$  = tensiune de ieșire fără sarcină

$V_L$  = tensiune de ieșire cu sarcină aplicată

### EXEMPLUL 6.2

Un potențiometru de  $\Omega$  de 10 k este utilizat ca senzor de poziție (Figura 6.3). Să presupunem că glisorul se află în mijlocul gamei sale. Găsiți eroarea de încărcare atunci când

- Circuitul de interfață prezintă o rezistență infinită.
- Circuitul de interfață prezintă o rezistență de 100 k $\Omega$ .

### SOLUȚIE

- Figura 6.3 litera (a) arată situația ideală în care rezistența circuitului interfeței este atât de mare încât nu există practic nici un curent în glisorul potențiometrului. Glisorul se va comporta ca două rezistoare de 5 k $\Omega$  în serie și putem folosi regula divizorului de tensiune pentru a calcula tensiunea potențiometrului:

$$V_{pot} = 10 \text{ V} \times \frac{5 \text{ k}\Omega}{5\text{k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ V}$$

Așa cum ne-am așteptat, tensiunea potențiometrului este exact jumătate din tensiunea de alimentare de 10 V. Nu există nicio eroare de încărcare în acest caz.

- b. Acum, luati în considerare cazul în care rezistența la intrare a circuitului de interfață este de  $100\text{ k}\Omega$ , așa cum se arată în Figura 6.3 (b). Vom folosi din nou regula divizorului de tensiune pentru a calcula tensiunea potențiometrului, dar de data aceasta rezistența mai mică este dată de combinația paralelă de  $5\text{ k}\Omega$  și  $100\text{ k}\Omega$  (așa cum se arată în [Figura 6.3 (c)]:

$$5\text{ k}\Omega / 100\text{ k}\Omega = \frac{1}{5\text{ k}\Omega} + \frac{1}{100\text{ k}\Omega} = 4.76\text{ k}\Omega$$

care este echivalentul unei rezistențe mai mici. Folosind această valoare în divizorul de tensiune, acum recalcăm tensiunea potențiometrului:

$$V_{\text{pot}} = 10\text{ V} \times \frac{4.76\text{ k}\Omega}{5\text{ k}\Omega + 4.76\text{ k}\Omega} = 4.88\text{ V}$$

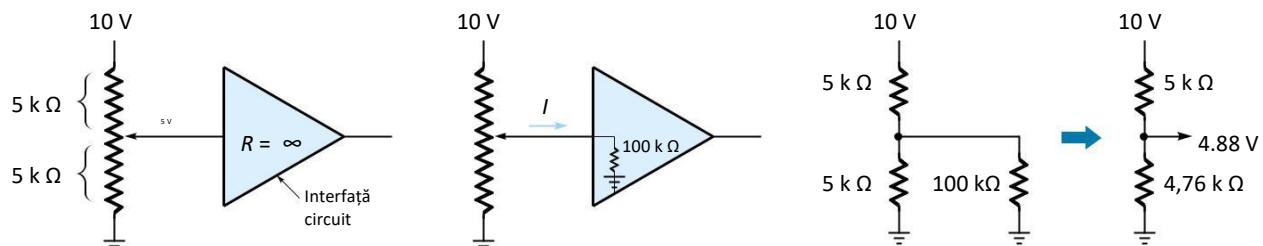
Astfel, tensiunea reală a potențiometrului este de numai 4,88 V atunci când ar trebui să fie de 5 V. Eroarea de încărcare este

$$5\text{ V} - 4.88\text{ V} = .12\text{ V}$$

Eroarea maximă de încărcare apare atunci când potențiometrul este de  $2/3$  din gama completă. Dacă ar fi să refaceti această problemă pentru o tensiune a potențiometrului de 2,5 V, ati găsi că eroarea este de numai 0,045 V. Prin urmare, efectul erorilor de încărcare nu este liniar.

**Figura 6.3**

Erori de încărcare.



(a) Potențiometrul nu are sarcină; nu avem erori (b) rezistență de  $100\text{ k}\Omega$  (c) Circuit echivalent care cauzează eroarea de încărcare

În multe aplicații, mișcarea rotativă totală care trebuie măsurată este mai mică decât o revoluție completă. Luăți în considerare brațul din figura 6.4 care se deplasează cu unghi de numai 90°. Utilizarea cât mai mult a potențiometrelor pentru a obține o rată de eroare medie mai mică este avantajoasă, așa că am putea folosi un raport de transmisie 3 : 1 care face ca potențiometrul să se întoarcă la 270°. (În figura 6.4, angrenajul potențiometrului trebuie să facă trei rotații pentru fiecare rotație a unghiului motorului.) Controlerul va fi programat să înțeleagă că 3° din potențiometru corespunde la doar 1° din brațul real.

La fel ca în toate sistemele fizice, trebuie să fim conștienți de anumite erori care se strecoară. În acest caz, potențiometrele cu carbon nu pot fi făcute perfect liniare, așa că definim **eroarea de liniaritate** ca diferența dintre ceea ce este unghiul cu adevărat și ceea ce potențiometrul raportează că este. Graficul din Figura 6.5 arată rezistență ideală față de cea reală ( $R$ ) pentru un senzor în funcție de poziția potențiometrului. Eroarea este diferența de rezistență dintre aceste două linii. Observați că eroarea nu este aceeași peste tot, dar eroarea maximă este desemnată ca  $\Delta R$ . Eroarea de liniaritate este definită în procente, așa cum se arată mai jos, și variază între 1,0 și 0,1% (precizia mai mare costă mai mult, desigur):

$$\text{Linearity error} = \frac{\Delta R \times 100}{R_{\text{tot}}}$$

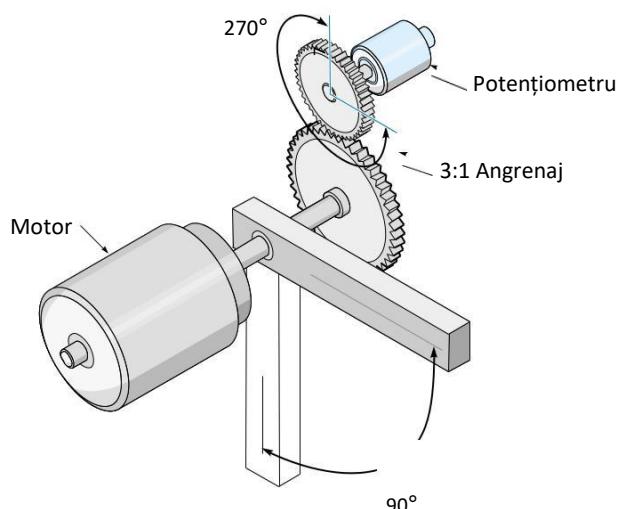
unde

$\Delta R$  = eroare maximă a rezistenței

$R_{\text{tot}}$  = rezistență totală a potențiometrului

Când potențiometrul este utilizat ca senzor de poziție, tensiunea de ieșire este direct proporțională cu poziția unghiulară a arborelui, astfel încât eroarea de liniaritate poate fi exprimată și în termeni de unghi:

$$\text{Linearity error} = \frac{\Delta\theta \times 100}{\theta_{\text{tot}}} \quad (6.1c)$$



**Figura 6.4**

Când arborele motorului este limitat la 90°, angrajul cu 3:1 transformă unghiul potențiometrului la 270°.

unde

$$\Delta\theta = \text{eroare de unghi maxim (în grade)}$$

$$\theta_{\text{tot}} = \text{intervalul total al potului (în grade)}$$

(Notă: Efectele de încărcare vor contribui, de asemenea, la eroare.)

### EXEMPLUL 6.3

Un potențiometru cu o singură trecere ( $350^\circ$ ) are o eroare de liniaritate de 0,1% și este conectat la o sursă de 5 Vdc. Calculați eroarea de unghi maxim care ar putea fi așteptată de la acest sistem.

### SOLUȚIE

Pentru a calcula eroarea de unghi maximă posibilă, rearanjați ecuația 6.1c și rezolvați:

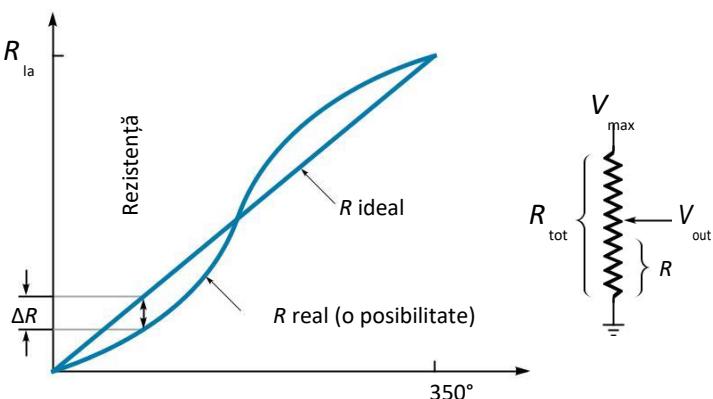
$$\Delta\theta = \frac{\text{linearity} \times \theta_{\text{tot}}}{100} = \frac{0.1 \times 350^\circ}{100} = 0.35^\circ$$

În cazul în care acest potențiometru este cuplat într-un sistem de control, controlerul ar ști doar poziția de  $0.35^\circ$  sau aproximativ o treime dintr-un grad.

Eroarea de liniaritate determină precizia unui senzor. Un concept legat, dar diferit de măsurătoare este rezoluția. **Rezoluția** se referă la cea mai mică creștere a datelor care pot fi detectate și/sau raportate. În sistemele digitale, rezoluția se referă de obicei la valoarea celui mai puțin semnificativ **bit** (LSB), deoarece aceasta este cea mai mică schimbare care poate fi raportată. De exemplu, un număr pe 2 biți are patru stări posibile (00, 01, 10, 11). Dacă am folosi acest număr de 2 biți pentru a cuantifica nivelul gazului din rezervor, am putea specifica

**Figura 6.5**

Eroare de liniaritate a unui potențiometru: ideal vs. real.



Unghiul arborelui

cantitatea de gaz doar până la cel mai apropiat al patrulea, adică gol, un sfert, jumătate și trei sferturi. Astfel, rezoluția ar fi de un sfert dintr-un rezervor de gaz. "Precizia" unui sistem digital ar trebui să fie  $\pm\frac{1}{2}$  LSB (deși ar putea fi mai rău, ca în cazul în care LSB nu ar însemna foarte mult). În exemplul indicatorului de gaz, precizia  $\pm\frac{1}{2}$  LSB corespunde  $\pm\frac{1}{8}$  rezervor, deci, dacă ecartamentul citește jumătate plin, s-ar ști că nivelul real a fost plin între trei-optimi și cinci-optimi.

Pentru un dispozitiv analogic, cum ar fi un potențiometru, rezoluția se referă la cea mai mică schimbare care poate fi măsurată. Aceasta este de obicei exprimată în procente:

$$\begin{aligned}\% \text{ resolution} &= \frac{\text{smallest change in resistance} \times 100}{\text{total resistance}} \\ &= \frac{\Delta R}{R_{\text{tot}}} \times 100\end{aligned}\quad (6.2)$$

Să examinăm rezoluția împreună cu **potențiometrul de tip reostat**. Reostatul utilizează o bobină cu conductor pentru elementul rezistiv (a se vedea figura 6.6). Cursorul se deplasează pe partea de sus a bobinei. În mod clar, rezoluția în acest caz este rezistența unei bucle a bobinei. Acest concept este ilustrat în exemplul 6.4.

#### EXEMPLUL 6.4

Elementul rezistiv al unui reostat este fabricat din conductor cu o rezistență de de 100  $\Omega$ /in cu lungimea de 10 inch și este înfășurat ca o bobină cu 200 de spire. Gama de măsură a reostatului este de  $350^\circ$ . Care este rezoluția acestui reostat?

#### SOLUȚIE

$$\text{Total resistance} = R_{\text{tot}} = 10 \text{ in.} \times \frac{100 \Omega}{\text{in.}} = 1 \text{ k}\Omega$$

Bobina reostatului are 200 de spire. Prin urmare, cea mai mică creștere a rezistenței corespunde unei spire a bobinei. Rezistența unei spire este

$$\text{Resistance/loop} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{200 \text{ loops}} = 5 \Omega/\text{loop}$$

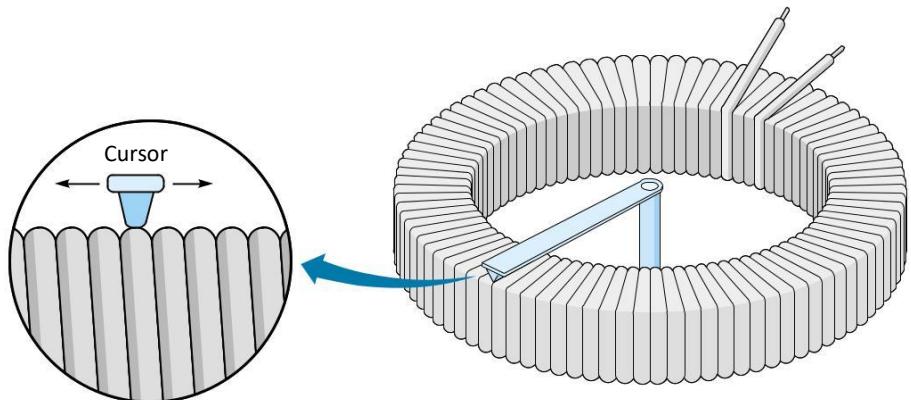
Astfel, rezoluția este

$$\frac{\Delta R \times 100}{R_{\text{tot}}} = \frac{5 \Omega \times 100}{1 \text{ k}\Omega} = 0.5\%$$

Dacă acest reostat ar fi folosit ca senzor de poziție, ar fi util să știm care este rezoluția în grade. Cea mai mică schimbare măsurabilă corespunde unei bucle a bobinei de rezistență, iar această bobină împarte  $350^\circ$  în 200 de spire; prin urmare, rezoluția în grade ar fi de  $350^\circ/200$  spire =  $1.75^\circ$ .

**Figura 6.6**

Rezoluție într-un potențiometru bobinat.



Ieșirea unui senzor de poziție ar trebui să fie o tensiune dc continuă, dar acțiunea glisorului poate provoca uneori efecte tranzitorii de tensiune. Acest lucru este valabil mai ales pentru potențiometrele cu fir, deoarece glisorul poate rupe momentan contactul pe măsură ce se deplasează de la o spiră la alta. Dacă acest fenomen este o problemă, acesta poate fi rezolvat de obicei cu un filtru trece jos, care este pur și simplu un condensator la masă (Figura 6.7). Condensatorul rămâne încărcat până la tensiunea potențiometrului și rezistă la schimbările de tensiune de momentane.

Exemplul 6.5 utilizează un potențiometru ca senzor de poziție pentru un sistem digital de control cu feedback. Principalul considerent aici este rezoluția de la analog la digital.

### EXEMPLUL 6.5

Brațul robot ilustrat în Figura 6.7 se rotește de la  $0^\circ$  la  $120^\circ$  și folosește un potențiometru ca senzor de poziție. Controlerul este un sistem digital pe 8 biți și trebuie să cunoască poziția reală a brațului cu o precizie de  $0,5^\circ$ . Determinați dacă configurarea prezentată în Figura 6.7 va face funcționarea.

### SOLUȚIE

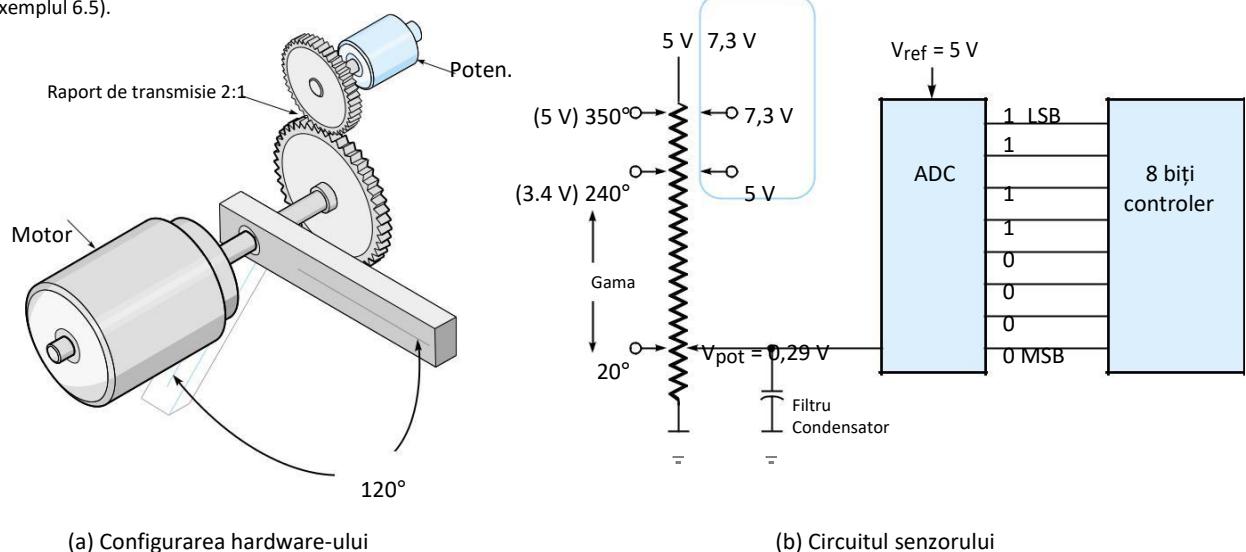
A avea o rezoluție de  $0,5^\circ$  înseamnă că întregul  $120^\circ$  va fi împărțit în 240 de incrementări, fiecare creștere fiind de  $0,5^\circ$ . Un număr de 8 biți are 255 de niveluri (de la 00000000 la 11111111), deci are mai mult decât suficient pentru a funcționa. (Asta e bine!)

Potențiometrul este alimentat cu 5 V. Prin urmare, ieșirea potențiometrului ar fi de 5 V pentru unghiul maxim al potului de  $350^\circ$  (dacă s-ar putea roti atât de mult). Observați că tensiunea de referință a ADC (convertor analog-digital) este, de asemenea, setată la 5V; astfel, dacă tensiunea potențiometrului ( $V_{pot}$ ) este de 5 V, ieșirea digitală ar fi de 255 (11111111<sub>bin</sub>). Tabelul 6.1 rezumă acest lucru (a se vedea ultimele trei coloane).

Un potențiometru cu o singură trecere are o autonomie de  $350^\circ$ , dar brațul robotului se rotește doar la  $120^\circ$ , de unde și raportul de transmisie 2: 1 dintre potențiometru și braț. Cu acest aranjament, potențiometrul se rotește la  $240^\circ$  atunci când brațul se rotește la  $120^\circ$ . Prin dublarea

**Figura 6.7**

Sistem de poziție a senzorului pentru brațul robotului  
(Exemplul 6.5).



gamei de funcționare al potențiometrului, erorile de liniaritate și de rezoluție (ale potențiometrului) sunt reduse la jumătate.

Luati în considerare cazul în care brațul robotului este la  $10^\circ$  (a doua linie din tabelul 6.1). Din cauza raportului de transmisie 2: 1, potențiometrul ar fi la  $20^\circ$ . Pentru a calcula tensiunea potențiometrului la  $20^\circ$ , folosim funcția de transfer a potențiometrului ( $5\text{ V}/350^\circ$ ):

$$V_{pot} = \frac{5\text{ V}}{350^\circ} \times 20^\circ = 0.29\text{ V}$$

Acest  $0.29\text{ V}$  este apoi convertit în binar cu ADC (a se vedea figura 6.7). Pentru a calcula ieșirea binară, formați mai întâi funcția de transfer ADC:

$$\frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{255 \text{ states}}{5\text{ V}}$$

Acum calculați ieșirea binară ADC folosind  $0.29\text{ V}$  (tensiunea potului) ca intrare:

$$\frac{255 \text{ states}}{5\text{ V}} \times 0.29\text{ V} = 14.8 \approx 15_{\text{states}} = 00001111_{\text{bin}}$$

Acum ne îndreptăm atenția către rezoluția sistemului, care este cea mai mică schimbare care poate fi sesizată. Într-un sistem digital, acest lucru corespunde de obicei valorii atribuite LSB. Putem găsi rezoluția calculând unghiul potului corespunzător unei singure stări binare. Acest lucru se face prin înmulțirea funcțiilor de transfer ale fiecăruiua dintre elementele sistemului împreună

pentru a obține o funcție generală de transfer de sistem (este posibil să observați că am folosit de fapt inversa funcțiilor de transfer pentru a obține unitățile dorite):

$$\frac{\frac{1^\circ_{\text{arm}}}{2^\circ_{\text{pot}}} \times \frac{350^\circ_{\text{pot}}}{5\text{ V}} \times \frac{5\text{ V}}{255 \text{ states}}}{\text{Gears} \quad \text{Pot} \quad \text{ADC}} = \frac{0.686^\circ_{\text{arm}}}{\text{state}}$$

Acest rezultat ne spune că LSB-ul ADC este de  $0.686^\circ$ , ceea ce este prea mare! Avem nevoie ca LSB-ul să fie de  $0.5^\circ$ . În forma sa actuală, acest design nu îndeplinește specificațiile cerute. Poate fi remediată? Da, privind calculele făcute, puteți vedea că la  $350^\circ$  potențiometrul trimite 5 V la ADC, dar acest lucru nu se va întâmpla niciodată, deoarece potențiometrul este limitat la  $240^\circ$ . Pentru a obține o rezoluție maximă de la ADC, potențiometrul ar trebui să trimítă 5 V la ADC atunci când potențiometrul este de  $240^\circ$ . Acest lucru va necesita creșterea tensiunii de alimentare a potențiometrului la 7.3 V [prin raport,  $5\text{ V} \times (350^\circ / 240^\circ) = 7.3\text{ V}$ ].

Tensiunile revizuite sunt prezentate în cercul întrerupt din figura 6.7. Acum, rezoluția este recalculată pentru a fi

$$\frac{\frac{1^\circ_{\text{arm}}}{2^\circ_{\text{pot}}} \times \frac{350^\circ}{7.3\text{ V}} \times \frac{5\text{ V}}{255 \text{ states}}}{\text{Gears} \quad \text{Pot} \quad \text{ADC}} = 0.470^\circ/\text{state}$$

Acest rezultat se încadrează în specificația de  $0.5^\circ$  pentru rezoluție.

## Codificatoare rotative optice

Un **codificator rotativ optic** produce date de poziție unghiulară direct în formă digitală, eliminând astfel convertorul ADC. Conceptul este ilustrat în Figura 6.8, care arată un disc cu fante atașat la un arbore. O sursă de lumină și o fotocelulă sunt montate astfel încât sloturile (fantele) să treacă prin fața fascicolului de lumină pe măsură ce discul se rotește. Unghiul arborelui este dedus din ieșirea fotocelulei. Există două tipuri de codificatoare rotative optice: codificatorul absolut și codificatorul incremental.

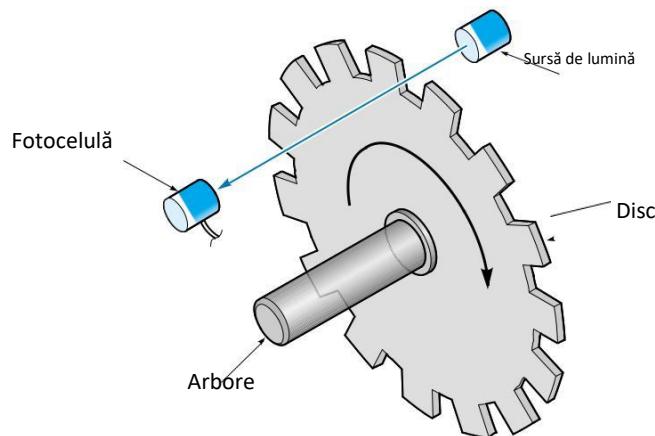
**TABELUL 6.1**

**Valori de sistem pentru diferite unghiuri ale brațului robotului**

Unghiul brațului (grade)	Unghi potențiometru (grade)	Tensiunea potențiometrului (V)	Ieșire ADC (stări binare)
0	0	0	00000000
10	20	0.29	00001111
120	240	3.43	10110000
175	350	5	11111111

**Figura 6.8**

Codificator optic rotativ

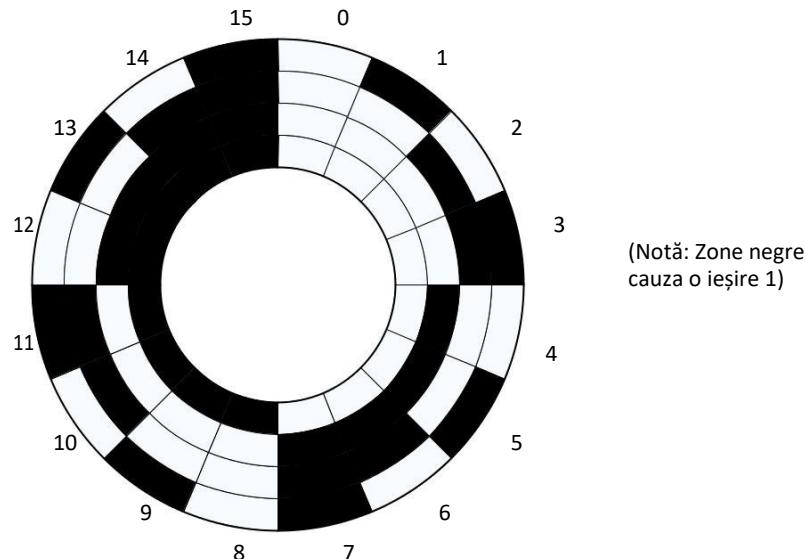


#### *Codificatoare optice absolute*

**Codificatoare optice absolute** utilizează un disc de sticlă marcat cu un model de piste concentrice (Figura 6.9). Un fascicul de lumină separat este trimis prin fiecare pistă la senzori foto individuali. Fiecare senzor foto contribuie cu 1 bit la cuvântul digital de ieșire. Codificatorul din Figura 6.9 scoate un cuvânt pe 4 biți cu LSB-ul provenind de pe pistă exterioară. Discul este împărțit în 16 sectoare, astfel încât rezoluția în acest caz este de  $360^\circ / 16 = 22,5^\circ$ . Pentru o rezoluție mai bună, ar fi necesare mai multe piste. De exemplu, opt piste (oferind 256 de stări) produc  $360^\circ / 256 = 1,4^\circ/\text{stare}$ , iar zece piste (oferind 1024 stări) produc  $360^\circ / 1024 = 0,35^\circ/\text{stare}$ .

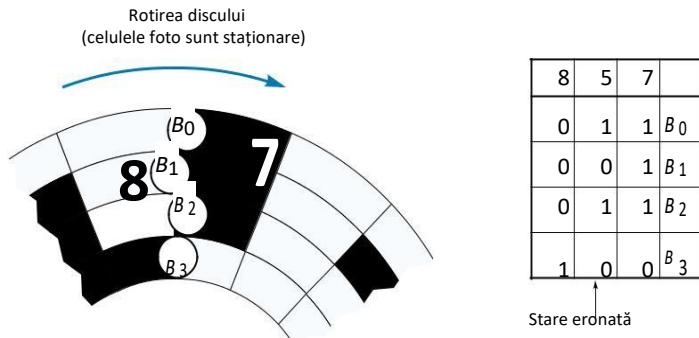
**Figura 6.9**

Un codificator optic folosind cod binar.



**Figura 6.10**

Un codificator optic care arată modul în care o fotocelulă în afara alinierii poate provoca o stare eronată. (Notă: Zonele întunecate produc un 1, iar zonele luminoase produc un 0.)

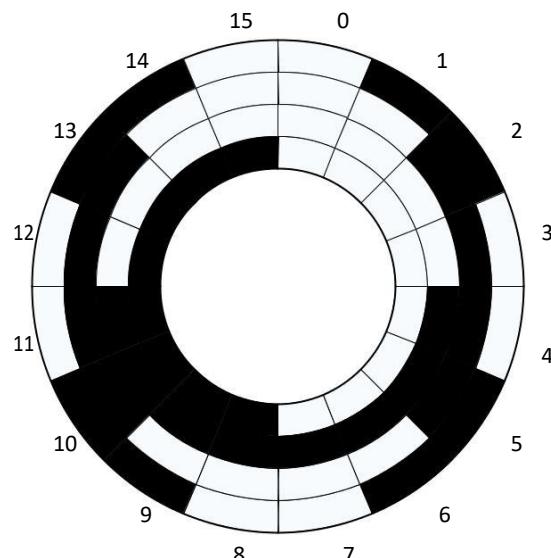


Un avantaj al acestui tip de codificator este că ieșirea este în formă digitală simplă și, ca un potențiomtru, și oferă întotdeauna poziția absolută. Acest lucru este în contrast cu codificatorul incremental care, după cum se va arăta, oferă doar o poziție relativă. Un dezavantaj al codificatorului absolut este că este relativ scump, deoarece necesită ca multe fotocelule să fie montate și aliniate foarte precis.

Dacă codificatorul optic absolut nu este aliniat corespunzător, acesta poate raporta date complet eronate. Figura 6.10 ilustrează această situație și apare atunci când se schimbă mai mult de 1 bit la un moment dat, să zicem, de la sectorul 7 (0111) la 8 (1000). În figură, senzorii foto nu sunt exact în linie dreaptă. În acest caz, senzorul B<sub>1</sub> este în afara alinierii (este înainte) și comută de la un 1 la un 0 înaintea celorlalți. Acest lucru provoacă o eroare momentană masurată de 5 biți (0101). Dacă computerul solicită date în timpul acestei "tranzitii", ar primi răspunsul greșit. O soluție este să utilizați codul **Grey** de pe disc în loc de codul binar (Figura 6.11). Cu codul Grey, doar 1 bit se schimbă

**Figura 6.11**

Un codificator optic absolut folosind un cod Grey.



între oricare două sectoare. În cazul în care fotocelulele sunt în afara liniei, cel mai rău lucru care s-ar putea întâmpla este că ieșirea s-ar schimba mai devreme sau mai târziu. Altfel spus, eroarea nu poate fi niciodată mai mare decât valoarea de 1 LSB atunci când se utilizează codul Gray.

### Codificatoare optice incrementale

**Codificadorul optic incremental** (Figura 6.12) are o singură pistă de sloturi distanțate în mod egal. Poziția este determinată prin numărarea numărului de sloturi care trec printr-un senzor foto, unde fiecare slot reprezintă un unghi cunoscut. Acest sistem necesită un punct de referință inițial, care poate proveni de la un al doilea senzor pe o pistă interioară sau pur și simplu de la un comutator mecanic cu oprire sau limită. În multe aplicații, arborele monitorizat va fi mișcat înainte și înapoi, oprindu-se în diferite unghiuri. Pentru a urmări poziția, controlerul trebuie să știe în ce direcție se rotește discul, precum și numărul de sloturi trecute. Exemplul 6.6 ilustrează acest lucru.

#### EXEMPLUL 6.6

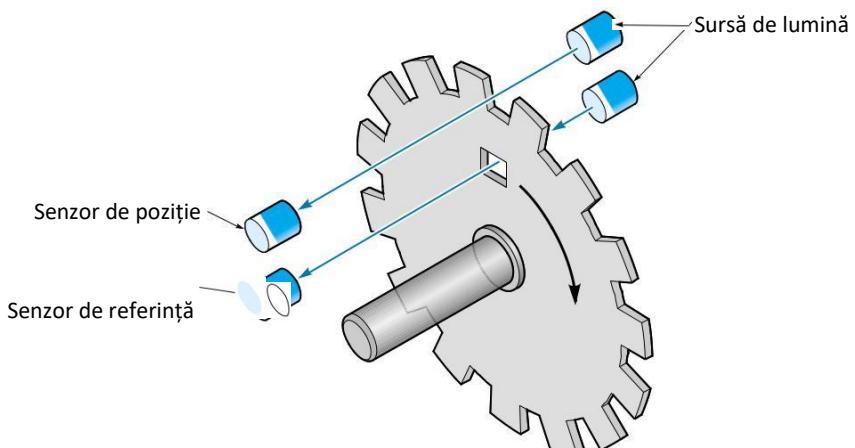
Un codificador incremental are 360 de sloturi. Pornind de la punctul de referință, senzorul foto numără 100 de sloturi în sensul acelor de ceasornic (CW), 30 de sloturi în sens invers acelor de ceasornic (CCW), apoi 45 de sloturi CW. Care este poziția actuală?

#### SOLUȚIE

Dacă discul are 360 de sloturi, atunci fiecare slot reprezintă  $1^\circ$  de rotație. Începând de la punctul de referință, ne-am rotit mai întâi la  $100^\circ$  CW, apoi am inversat  $30^\circ$  la  $70^\circ$ , și în cele din urmă inversat din nou pentru  $45^\circ$ , aducându-ne în cele din urmă la  $115^\circ$  (CW) de la punctul de referință.

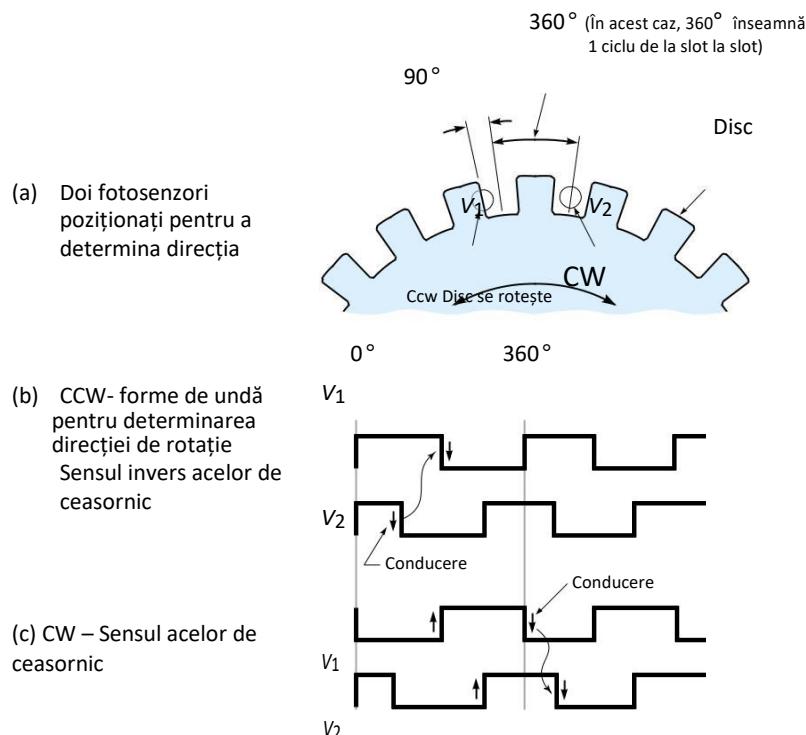
**Figura 6.12**

Un codificador optic incremental.



Un singur senzor foto nu poate transmite în ce direcție se rotește discul; cu toate acestea, un sistem intelligent folosind doi senzori poate. După cum ilustrează figura 6.13 litera (a), cei doi senzori,  $V_1$  și  $V_2$ , sunt situați usor unul de celălalt pe aceeași pistă. Pentru acest exemplu,  $V_1$  este initial opriț (bine, aproape - puteți vedea că este pe jumătate acoperit), iar  $V_2$  este pornit. Acum imaginați-vă că discul începe să se rotească CCW. Primul lucru care se întâmplă este că  $V_1$  vine complet pe (în timp ce  $V_2$  rămâne pornit). După mai multă rotație,  $V_2$  se stinge, iar puțin mai târziu  $V_1$  se stinge din nou. Figura 6.13 litera (b) prezintă forma de undă pentru  $V_1$  și  $V_2$ . Acum, luând în considerare ce se întâmplă atunci când discul este rotit în direcția CW [pornind din nou de la poziția prezentată în Figura 6.13 (a)]. De data aceasta  $V_1$  se stinge imediat, iar  $V_2$  rămâne pornit pentru o jumătate de slot și apoi se stinge. Mai târziu vine  $V_1$ , urmat de  $V_2$  care vine pe. Figura 6.13 litera (c) prezintă formele de undă generate de  $V_1$  și  $V_2$ . Comparați cele două seturi de forme de undă, observați că în cazul CCW  $V_2$  conduce  $V_1$  cu  $90^\circ$ , în timp ce pentru cazul CW  $V_1$  este urmat de  $V_2$  pe  $90^\circ$ . Această diferență de fază determină direcția în care se întreprăță discul.

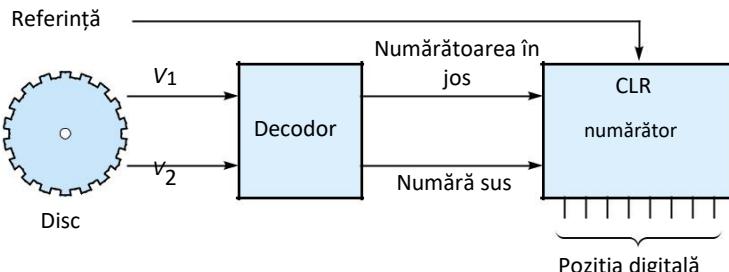
**Decodarea  $V_1$  și  $V_2$**  Hardware-ul codificatorului incremental este mai simplu decât pentru tipul absolut. Prețul plătit pentru această simplitate este că nu obținem informații directe despre poziția binară de la  $V_1$  și  $V_2$ . În schimb, un circuit decodor trebuie folosit pentru a inversa semnalele de la senzorii foto într-un cuvânt binar. De fapt, circuitul are două părți: Prima parte extrage informații despre direcție, iar a doua parte este un contor sus-jos, care menține numărul de sloturi. Diagrama bloc din figura 6.14 arată acest lucru. Referindu-ne la diagramă, vedem că  $V_1$  și  $V_2$  sunt convertite în două semnale noi



**Figura 6.13**  
Un codificator optic incremental.

**Figura 6.14**

Diagrama bloc a unui sistem de codificator incremental.



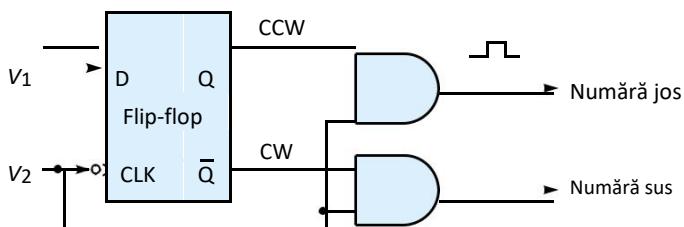
notat cu "count-down" și "count-up". Semnalul de numărare în jos dă un puls pentru fiecare slot trecut atunci când discul merge în sens invers acelor de ceasornic. Semnalul de numărare dă un puls pentru fiecare slot atunci când discul se rotește în sensul acelor de ceasornic. Aceste semnale sunt apoi alimentate la un contor up-down, cum ar fi TTL 74193. Acest contor începe de la 0 (de obicei este resetat de senzorul de referință) și apoi continuă să mențină poziția prin urmărirea numărului CCW și CW. Referindu-se din nou la exemplul 6.6, contorul ar începe de la 0, conta până la 100, conta în jos 30 impulsuri la 70, și apoi conta până la 45 impulsuri la 115. Astfel, totalul acumulat reprezintă întotdeauna poziția absolută actuală.

Cel mai simplu mod de a efectua decodarea este cu un singur flip-flop de tip D și două portii AND (Figura 6.15). Pentru a înțelege cum funcționează acest circuit, trebuie să testăm formele de undă ale  $V_1$  și  $V_2$  (Figura 6.16). În cazul CCW, de fiecare dată când  $V_2$  scade,  $V_1$  este ridicat; în cazul CW, când  $V_2$  scade,  $V_1$  este scăzut. Acest fapt este folosit pentru a separa rotația CCW și CW.  $V_2$  este conectat la ceasul negativ al flip-flop-ului, iar  $V_1$  este conectat la intrarea D. De fiecare dată când  $V_2$  scade,  $V_1$  este blocat și apare la ieșire. Astfel, atât timp cât discul se rotește CCW, ieșirea va fi ridicată; și atât timp cât se rotește CW, ieșirea va fi scăzută. Aceste semnale de direcție pot fi strobate cu  $V_2$  pentru a produce intrările contor necesare în numărare în sus și numărare (decrementare)jos. Semnalul de numărare pulsează o dată pe slot atunci când discul se rotește în sensul acelor de ceasornic, iar semnalul de numărare în jos pulsează atunci când discul se rotește în sens invers acelor de ceasornic.

Decodarea descrisă până în prezent este abordarea simplă cu rezoluție scăzută. Obținerea unei rezoluții de patru ori mai bună cu o decodare mai sofisticată este posibilă deoarece semnalele  $V_2$  și  $V_1$  trec prin patru stări distincte de fiecare dată când un slot trece de senzori. Aceste stări pot fi văzute în Figura 6.17. Dacă ar fi să decodăm fiecare dintre aceste stări în exemplul 6.7, atunci am ști unghiul de la cel mai apropiat  $0,36^\circ$  ( $1,44^\circ/4 = 0,36^\circ$ ) în loc de  $1,44^\circ$ .

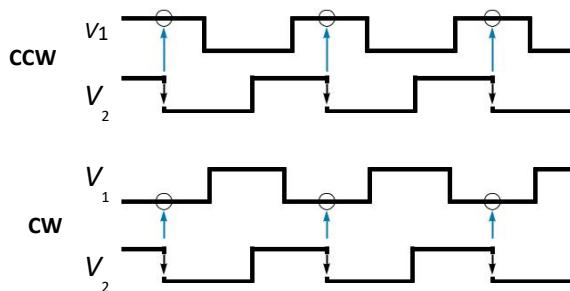
**Figura 6.15**

Un decodator pentru un codificator optic



**Figura 6.16**

Direcția de decodare de la  $V_1$  și  $V_2$ .



### EXEMPLUL 6.7

Un sistem de senzori de poziție (Figura 6.14) utilizează un disc cu 250 de sloturi. Valoarea curentă a contorului este 00100110. Care este unghiul arborelui măsurat?

### SOLUȚIE

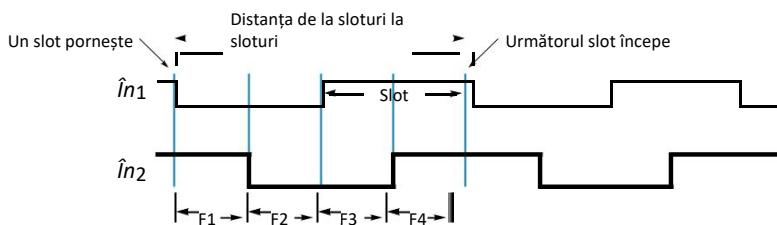
Pentru un disc cu 250 de sloturi, fiecare slot reprezintă  $360^\circ / 250 = 1,44^\circ$ , iar un număr de 00100110 = 38 zecimale, astfel încât poziția este de  $38 \times 1,44^\circ = 54,72^\circ$ .

**Interfațarea codificatorului incremental la un computer** Există un problemă specială atunci când încercați să transmită date unui computer de la un contor digital standard de tip ripple.\* Contorul este folosit pentru numărarea evenimentelor din lumea reală și aşa nu este sincronizat cu computerul. În cazul în care computerul solicită date de poziție în timp ce contorul se schimbă, acesta poate foarte bine obține date lipsite de sens. Deoarece aceasta este o posibilitate, erorile rezultate sunt rare și în multe aplicații pot fi ignorate. Dar alte situații necesită ca datele să fie întotdeauna corecte.

O abordare a problemei ar putea fi dezactivarea sau "înghețarea" contorului în timpul în care computerul primește date. Dar dacă apare un puls de numărare în timp ce contorul

**Figura 6.17**

Un codificator care afișează patru stări unice pentru fiecare ciclu de slot.



este "înghețat", se va pierde. Solutia este de a pune un *buffer* (un registru temporar de memorare) între contor și computer (figura 6.18). Cu această configurare, contorul nu este niciodată dezactivat și deține în totdeauna numărul corect. Bufferul este conectat astfel încât să conțină în mod obisnuit aceeași valoare ca și contorul. În acele momente scurte în care contorul este în proces de numărire, bufferul este inhibat de la schimbare. Cu acest sistem, un număr nu este niciodată pierdut definitiv. Cea mai gravă situație ar fi dacă ar veni o numărătoare în timp ce un schimb de date cu calculatorul era în curs de desfășurare; în acest caz, noul număr nu va fi raportat cu schimbul curent, deoarece bufferul este înghețat. De îndată ce contorul a terminat actualizarea, bufferul ar fi actualizat, iar numărul ar fi raportat cu următorul schimb de date cu calculatorul.

### EXEMPLUL 6.8

Pozitia unghiulară a unui arbore trebuie să fie cunoscută la o rezoluție de  $0,5^\circ$ . Se propune un sistem care utilizează un codificator cu 720 de sloturi (Figura 6.19). Controlerul utilizează un microcontroler 8051 care are porturi pe 8 biți. Acest design va îndeplini specificațiile?

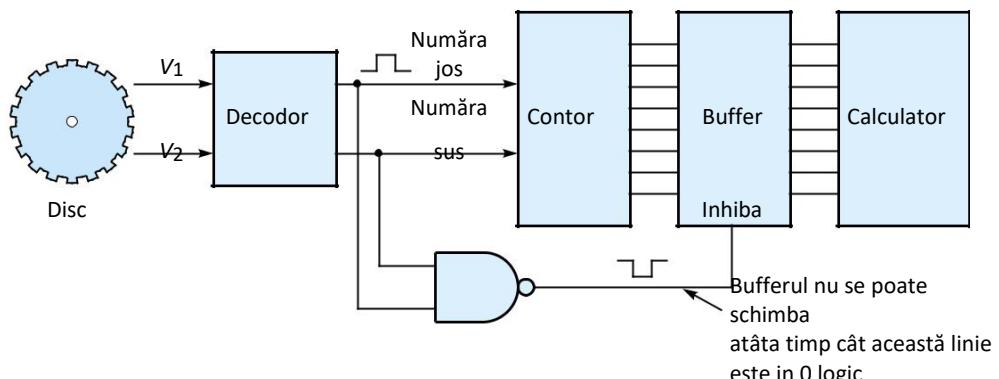
### SOLUȚIE

Pentru o rezoluție de  $0,5^\circ$ , codificatorul trebuie să aibă un slot la fiecare  $0,5^\circ$  cel puțin. În primul rând, calculați numărul de sloturi necesare:

$$\frac{360^\circ}{0,5^\circ/\text{slot}} = 720 \text{ slots}$$

Codificatorul cu 720 de sloturi va funcționa foarte bine. Fiind un sistem digital, rezoluția este determinată de LSB, care în acest caz ar trebui să corespundă la 1 slot pe disc ( $0,5^\circ$ ). Ieșirea binară ar trebui să aibă o gamă de 0-719 (pentru 720 de stări), astfel încât circuitul trebuie să aibă capacitatea de a gestiona date pe 10 biți (deoarece este nevoie de 10 biți pentru a exprima 719).

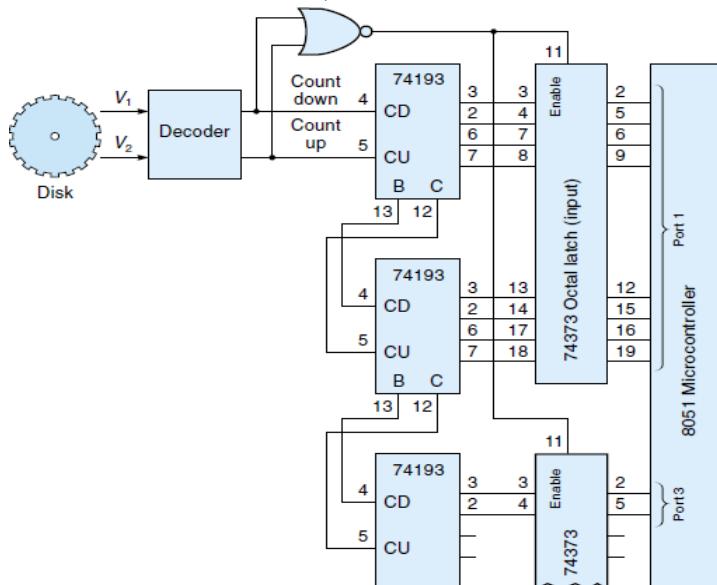
$$719 \text{ (zecimal)} = 1011001111 \text{ (binar)}$$



Deoarece controlerul este un microcontroler pe 8 biți, va fi nevoie de două porturi pentru a introduce numărul pe 10 biți. După cum se arată în figura 6.19, contorul este format din trei contoare de 74193 pe 4 biți în sus în jos. Iesirile contorului sunt în mod constant memorate în bufferul de 10 biți făcute din două 74373s. Iesirile bufferului sunt conectate la porturile 1 și 3 ale microcontrolerului 8051.

### Transformatoare diferențiale variabile liniare

**Transformerul diferențial variabil liniar (LVDT)** este un senzor de poziție de înaltă rezoluție care generează o tensiune de curent alternativ cu o magnitudine proporțională cu poziția liniară. Are o gamă relativ scurtă de aproximativ 2 in., dar are avantajul de a nu utiliza contacte cu alunecare. Figura 6.20 litera (a) ilustrează faptul că unitatea constă din trei înfășurări și un miez de fier mobil. Înfășurarea centrală sau *primă* este conectată la o tensiune de referință ac. Cele două vânturi exterioare, numite *secundare*, sunt cablate pentru a fi în afara fazelor unul cu celălalt și sunt conectate

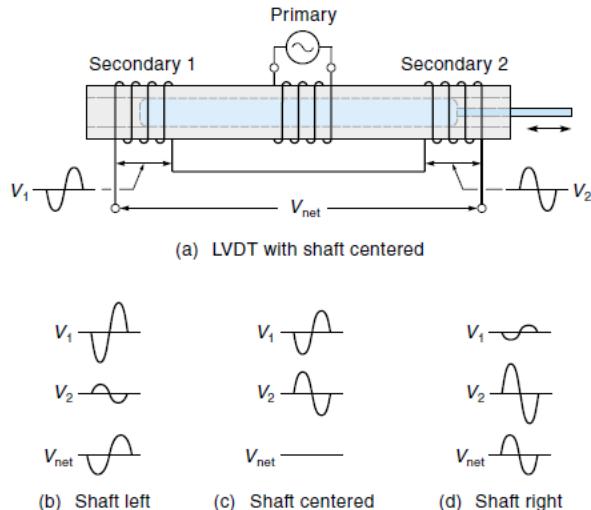


**Figura 6.19**

O diagramă de circuit a interfeței cu codificator optic și microcontroler (exemplul 6.8).

**Figura 6.20**

Un transformator diferențial variabil liniar (LVDT).

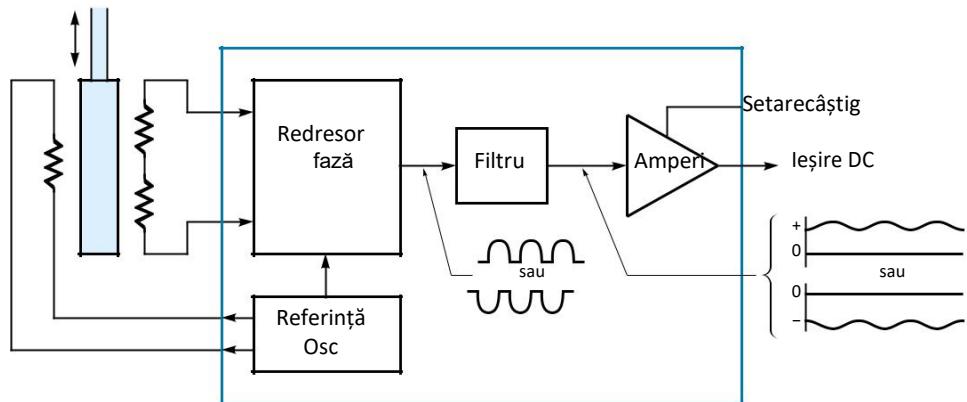


în serie. În cazul în care miezul de fier este exact în centru, tensiunile induse pe secundar de primar va fi egal și opus, oferind o tensiune netă ( $V_{net}$ ) de 0 V [așa cum se arată în figura 6.20 litera (c)]. Luati în considerare ce se întâmplă atunci când miezul este mutat puțin spre dreapta. Acum există mai multă cuplare la secundar 2, astfel încât tensiunea sa este mai mare, în timp ce secundarul 1 este mai mic. Figura 6.20 litera (d) ilustrează formele de undă ale acestei situații. Suma algebrică a celor două secunde este în fază cu secundarul 2, iar magnitudinea (amplitudinea) este proporțională cu deplasarea miezului în afara centrului. Dacă miezul este mutat puțin stânga centrului, atunci secundarul 1 are tensiunea mai mare, producând o ieșire netă care este în fază cu secundarul 1 [Figura 6.20 (b)]. De fapt, singurul mod în care putem spune de la ieșire în ce direcție s-a miscat miezul este faza. Rezumând, ieșirea LVDT este o tensiune de curent alternativ cu o magnitudine (amplitudine) și un unghi de fază. Magnitudinea reprezintă distanța pe care miezul este în afara centrului, iar unghiul de fază reprezintă direcția miezului (stânga sau dreapta).

Figura 6.21 ilustrează un LVDT cu electronică sa de suport cu un singur cip. Un oscilator furnizează tensiunea de referință AC la primar- de obicei, 50-10 KHz la 10 V sau mai puțin. Ieșirea LVDT merge mai întâi la un redresor sensibil la fază. Acest circuit compară fază de ieșire LVDT cu tensiunea de referință. Dacă sunt în fază, redresorul scoate numai partea pozitivă a semnalului. Dacă sunt în afara fazei, redresorul scoate numai părțile negative. Apoi, un filtru trece jos netezește semnalul produs pentru a produce DC. În cele din urmă, un amplificator ajustează câstigul la nivelul dorit. Ieșirea circuitului de interfață LVDT este o tensiune DC a cărei magnitudine și polaritate sunt proporționale cu distanța liniară pe care miezul este deplasat de la centru. Unele integrate

**Figura 6.21**

Un circuit de interfață pentru un LVDT.



circuitele, cum ar fi AD698 (Dispozitive analogice), combină toate funcțiile afișate în figură (din figura 6.21) pe un singur cip.

## 6.2 SENZORI DE VITEZĂ UNGHIALĂ

*Senzorii de viteza unghiulară sau tahometrele* sunt dispozitive care dă o ieșire proporțională cu viteza unghiulară. Acești senzori își găsesc o aplicație largă în sistemele de control al vitezei motorului. Ele sunt, de asemenea, utilizate în sistemele de poziție pentru a îmbunătăți performanța lor.

### Viteza de la senzorii de poziție

Viteza este rata de schimbare a poziției. Exprimat matematic,

$$\text{Velocity} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \quad (6.3)$$

unde

$\Delta\theta$  = schimbarea unghiului

$\Delta t$  = modificare în timp

$\theta_2, \theta_1$  = probe de poziție

$t_2, t_1$  = perioadele în care au fost prelevate probe

Deoarece singurele componente ale vitezei sunt poziția și timpul, extragerea informațiilor de viteză din două eșantioane de date secvențiale de poziție ar trebui să fie posibilă (dacă știi timpul dintre ele). Acest concept este demonstrat în exemplul 6.9. Matematica ar putea fi făcută implementată cu circuite sau în software. Dacă sistemul are deja un senzor de poziție, cum ar fi un potențiometru, utilizarea acestei abordări elimină necesitatea unui senzor adițional (viteză).

### EXEMPLUL 6.9

O piesă rotativă a mașinii are un senzor de poziție de tip potențiometru conectat printr-un ADC astfel încât LSB = 1°. Determinați cum să utilizați această configurație pentru a obține date despre viteza.

### SOLUȚIE

Viteza poate fi calculată din două probe de poziție secvențială— $\theta_1$  prelevată în timpul  $t_1$  și  $\theta_2$  prelevată la  $t_2$ , după cum se specifică în ecuația 6.3:

$$\text{Velocity} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$

Dacă am lua un eșantion de date exact în fiecare secundă, atunci numitorul ecuației 6.3 ar fi 1. În acest caz, viteza ar fi egală ( $\theta_2 - \theta_1$ ), dar 1 s este probabil prea lung pentru ca controlerul să aștepte între probe. În schimb, selectați  $1/10$  s (100 ms) ca timp între probe. Acum,

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{1/10} = 10(\theta_2 - \theta_1)$$

Astfel, tot ce trebuie să facă software-ul pentru a calcula viteza este

1. Se preleveză două probe de poziție exact la  $1/10$  s distanță.
2. Scădeți valorile celor două eșantioane.
3. Înmulțești rezultatul cu 10.

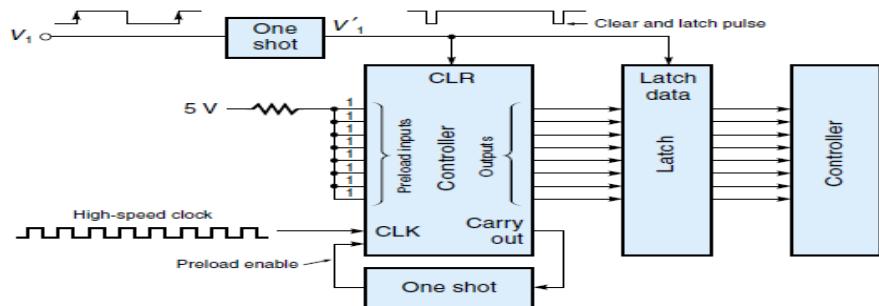
Datele de viteza pot fi derivate dintr-un codificator rotativ optic în două moduri. Prima ar fi metoda descrisă doar pentru potențiometru; a doua metodă implică determinarea timpului necesar pentru ca fiecare slot din disc să treacă. Cu cât viteza este mai lentă, cu atât este nevoie de mai mult timp pentru ca fiecare slot să treacă. Circuitul digital de contor prezentat în Figura 6.22 poate fi folosit ca cronometru la timp cât timp este nevoie pentru ca un slot să treacă. Ideea este de a număra ciclurile unui ceas de mare viteză cunoscut pe durata unei perioade de slot. Numărătoarea finală ar fi proporțională cu timpul necesar pentru ca slotul să treacă.

Funcționarea circuitului (figura 6.22) este după cum urmează. Una dintre ieșirile codificatorului optic (să zicem,  $V_1$ ) este utilizată ca intrare la cronometru.  $V_1$  declanșează un impuls pentru a produce care este numărat de numărătorul controlerului.

$V'$ , care este un scurt puls negativ pentru a goli contorul. Când  $V'$  se întoarce mare Când următorul slot declanșează un impuls, datele contorului sunt transferate într-un buffer separat, iar contorul este sters astfel încât să poată începe să numere din nou. Controlerul citește numărul din buffer. Valoarea numărului este proporțională cu reciprocă vitezei unghiulare. Cu cât viteza este mai mică, cu atât numărul este mai mare. Acest lucru înseamnă că, pentru viteze foarte lente, contorul ar putea intra în depășire și să înceapă să numere din nou de la 0 (cum ar fi odometrul mașinii care se întoarce de la 99.999 la 00.000). De fapt, atunci când discul vine la un stop mort, orice contor ar intra în depășire în cele din urmă. Pentru a rezolva această problemă, un circuit special folosind un alt impuls a fost

**Figura 6.22**

Circuit pentru numărarea timpului ciclului de slot

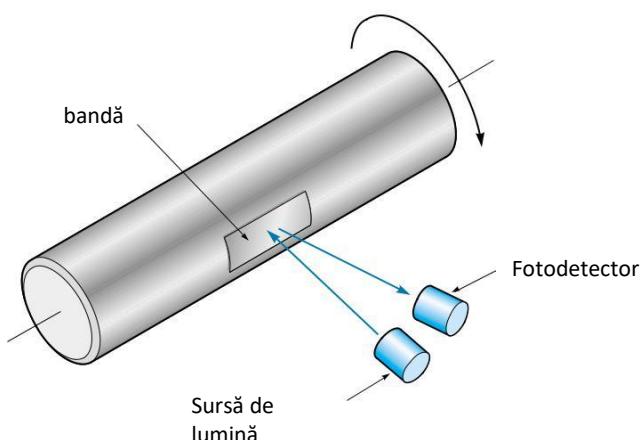


adăugat. De fiecare dată când contorul ajunge la maxim, un impuls reîncarcă 1s în toți biții. Această acțiune împiedică contorul să revină la 0. Rezultatul este că un contor cu valoarea maximă este interpretat de către controler ca însemnând "viteza prea mică pentru a măsura."

## Tahometre

### Tahometre optice

**Tahometrul optic**, este un dispozitiv simplu, ce poate determina o viteza a arborelui în ceea ce privește numărul de turări pe minut (rpm). După cum se arată în figura 6.23, pe arbore este plasată o bandă contrastantă. Un senzor foto este montat în așa fel încât să genereze un puls de fiecare dată când banda trece. Perioada acestei forme de undă este invers proporțională cu turația arborelui și poate fi măsurată folosind un circuit cu contor precum cel descris pentru arborele optic



codificator (Figura 6.22). Observați că acest sistem nu poate detecta poziția sau direcția. Cu toate acestea, dacă se utilizează doi senzori foto, direcția ar putea fi determinată prin fazare, similar cu codificatorul arborelui optic incremental.

### Tahometre cu rotor dințat

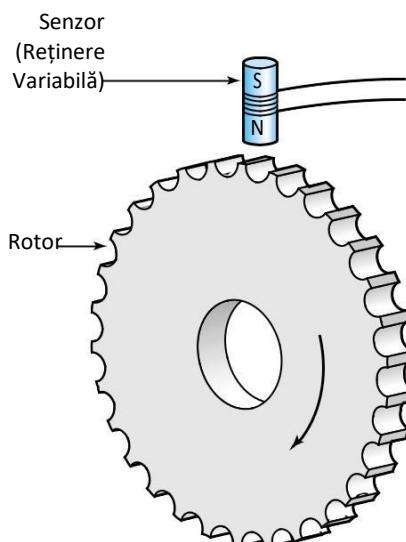
Un **tahometru cu rotor dințat** constă dintr-un senzor staționar și o roată rotativă, dințată, pe bază de fier (a se vedea figura 6.24). Roata dințată (care arată ca o rolă mare) poate fi încorporată în piesa care urmează să fie măsurată - de exemplu, arborele cotit al unui motor de mașină. Senzorul generează un puls de fiecare dată când un dinte trece. Viteza unghiulară a roții este proporțională cu frecvența impulsurilor. De exemplu, dacă roata ar avea 20 de dinți, atunci ar exista 20 de impulsuri pe revoluție (a se vedea exemplul 6.10).

Există două tipuri de senzori rotor dințat în uz. Un tip se numește **senzor cu reținere variabilă** și constă dintr-un magnet cu o bobină în jurul său (a se vedea figura 6.24). De fiecare dată când un dinte de fier trece în apropierea magnetului, câmpul magnetic din magnet crește, inducând o tensiune mică în bobina. Aceste impulsuri pot fi convertite într-o undă dreptunghiulară cu circuite de detector de prag (după cum se discută în capitolul 3). Celălalt tip de senzor utilizat pentru această aplicație este senzorul cu efect Hall. Detaliile senzorului cu efect Hall sunt discutate mai târziu în acest capitol, așa că deocamdată vom spune pur și simplu că acest senzor dă și un puls de fiecare dată când trece un dinte de fier.

### EXEMPLUL 6.10

Un senzor cu rotor dințat are 20 de dinți. Găsiți rotațiile pe minut (rpm) dacă senzorul produce impulsuri la 120 Hz.

**Figura 6.24**  
Un tahometru cu rotor dințat.



### SOLUȚIE

O abordare este de a găsi funcția generală de transfer (TF) pentru sistem și apoi utilizați TF pentru a găsi rpm pentru orice frecvență. Începem cu faptul că 1 rps (1 revoluție pe secundă) a rotorului ar duce la o frecvență a senzorului de 20 Hz.

$$TF = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{\text{freq (Hz)}_{\text{sensor}}}{\text{rpm}_{\text{rotor}}} = \frac{20 \text{ Hz}}{1 \text{ rps}} \times \frac{1 \text{ rps}}{60 \text{ rpm}} = \frac{0.33 \text{ Hz}_{\text{sensor}}}{1 \text{ rpm}_{\text{rotor}}}$$

Prin urmare, relația intrare/ieșire a sistemului este: o viteză de 1 rpm a rotorului produce o frecvență de .33 Hz la senzor. Putem folosi această relație pentru a găsi turăția rotorului atunci când frecvența senzorului a fost de 120 Hz.

$$120 \text{ Hz} \times \frac{1 \text{ rpm}}{0.33 \text{ Hz}} = 360 \text{ rpm}_{\text{rotor}}$$

Astfel rotorul se rotește la 360 rpm. Observați că a trebuit să inversăm TF lăsând unitatea dorită rpm.

### Tahometre cu curent continuu

Un **tahometru de curent continuu** este, în esență, un generator de curent continuu care produce o tensiune de ieșire dc proporțională cu viteza arborelui. Polaritatea de ieșire este determinată de direcția rotației. De obicei, aceste unități au magneti permanenti staționari (discutați în capitolul 7), iar partea rotativă constă din bobine. Un astfel de design menține inerția în jos, dar necesită utilizarea de perii, care în cele din urmă se uzează. Totuși, aceste unități sunt utile deoarece oferă o conversie directă între viteză și tensiune.

Figura 6.25 prezintă specificațiile tahometrului CK20. Carcasa acestei unități este construită astfel încât să poată monta "piggyback" pe un motor, oferind accesul direct la viteza motorului. Funcția de transfer pentru tahometru are unități de volți/1000 rpm. Putem folosi funcția de transfer pentru a calcula tensiunea de ieșire pentru o anumită viteză. Privind în partea de jos a figurii 6.25, puteți vedea că CK20 vine în trei modele. De exemplu, CK20-A are ieșire de 3 V pentru 1000 rpm (3 V/Krpm). Are o gamă de viteză de 0-6000 rpm, astfel încât tensiunea maximă ar fi de 18 V la 6000 rpm. Aceste informații pot fi afișate ca un grafic liniar (Figura 6.26). Din grafic, putem găsi cu ușurință tensiunea de ieșire pentru orice viteză. "Liniaritatea" motorului este dată ca 0,2%, ceea ce înseamnă că viteza reală poate fi de până la 0,2%, diferită de ceea ce ar trebui să fie. De exemplu, dacă ieșirea este de 9 V, viteza trebuie să fie de 3000 rpm; cu toate acestea, deoarece  $0,2\% \times 3000 = 6$  rpm, viteza reală ar putea fi oriunde între 2994 la 3006 rpm.

**Figura 6.25**

Tahometrul  
CK20 DC.

## CK20 DC TACHOMETER

The model CK20 is a moving coil tachometer designed for use in applications requiring velocity feedback with minimum system inertia load.



Parameter	Value	Units
Linerity	.2	% max. deviation
Ripple	1.5	max, % peak to peak AC
Ripple Frequency	19	Cycles per revolution
Speed Range	1-6000	RPM
Armature Inertia	$9 \times 10^{-5}$	in-oz-sec <sup>2</sup>
Friction Torque	.25	in-oz, max.
Rated Life	10,000	Hours at 3000 RPM

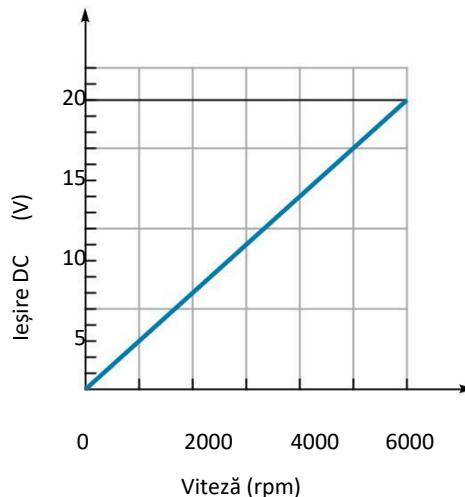
### WINDING VARIATIONS

	CK20-A	CK20-B	CK20-C
Output Voltage Gradient (V/KRPM)	3.0	2.5	1

Vitezele de mii de rpm sunt mult mai mari decât s-ar găsi în mod normal, pentru piese mecanice grele reale. Prin urmare, tahometrul este atașat frecvent la motor, iar motorul este orientat în jos pentru a conduce sarcina. Exemplul 6.11 demonstrează acest lucru.

**Figura 6.26**

Grafic privind viteza versus tensiunea de ieșire DC volți pentru tachometrul CK20-A.

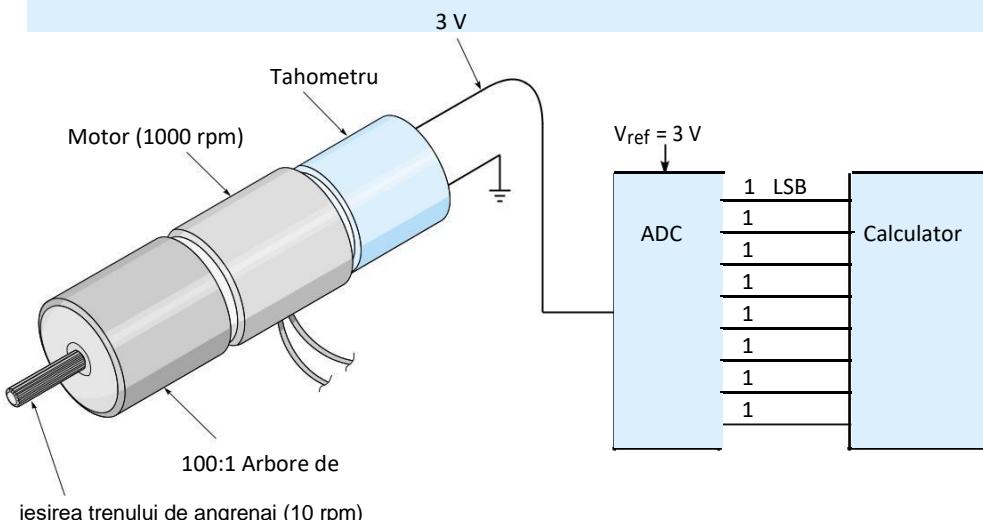
**EXEMPLUL 6.11**

După cum se arată în figura 6.27, un motor cu un tachometru piggyback are o cutie de vîze încorporată cu un raport de 100: 1 (adică arborele de ieșire se rotește de 100 de ori mai lent decât motorul). Tachometrul este un CK20-A care o putere de 3 V/Krpm. Această unitate conduce o mașină-unealtă cu o viteză maximă de rotație de 60°/s.

- Care este ieșirea preconizată a tachometrului?
- Găsiți rezoluția acestui sistem dacă datele tachometrului au fost convertite în digital cu un ADC pe 8 biți, așa cum este ilustrat în Figura 6.27.

**Figura 6.27**

Un circuit de interfață tachometru (exemplul 6.11).



### SOLUȚIE

- a. O viteza maximă a sistemului de  $60^\circ/\text{s}$  poate fi convertită în rpm după cum urmează:

$$\frac{60^\circ}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ rev}}{360^\circ} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 10 \text{ rpm}$$

Din cauza raportului de transmisie, tachometrul se rotește de 100 de ori mai rapid decât instrumentul. Calculând funcția generală de transfer a senzorului de viteză, găsim

$$\frac{3 \text{ V}}{1000 \text{ rpm}_{\text{motor}}} \times \frac{100 \text{ rpm}_{\text{motor}}}{1 \text{ rpm}_{\text{tool}}} = 0.3 \text{ V/rpm}_{\text{tool}}$$

Tachometer                      Gearbox

Acum, folosind această funcție de transfer, putem calcula care ar fi tensiunea tachometrului atunci când instrumentul se rotește la 10 rpm:

$$V_{\text{tach}} = \frac{0.3 \text{ V}}{\text{rpm}_{\text{tool}}} \times 10 \text{ rpm}_{\text{tool}} = 3 \text{ V}$$

- b. Pentru a obține cea mai bună rezoluție, ADC-ul va avea referința la 3 V, astfel încât  $3 \text{ V} = 1111111_2$  (255 zecimal). Pentru că stim că tachometrul produce 3 V atunci când arborele se rotește la 10 rpm și că 8 biți reprezintă 255 de niveluri, putem calcula rpm reprezentat de fiecare stare binară:

$$\text{Resolution (LSB)} = \frac{10 \text{ rpm}}{255 \text{ states}} = 0.04 \text{ rpm/state}$$

Acest lucru înseamnă că controlerul digital va cunoaște viteza arborelui în interiorul a 0.4 rpm. Prin urmare, rezoluția este de 0.04 rpm.

## 6.3 SENZORI DE PROXIMITATE

### Comutatoare de limitare

Un **senzor de proximitate** spune pur și simplu controlerului dacă o piesă în mișcare se află într-un anumit loc. Un **comutator de limită** este un exemplu de senzor de proximitate. Un comutator limită este un comutator mecanic prin apăsare de buton, care este montat în aşa fel încât să fie acționat atunci când o parte mecanică sau brațul pârghie ajunge la sfârșitul cursei sale. De exemplu, într-un deschizător automat de uși de garaj, tot ce trebuie să știe controlerul este dacă ușa este deschisă până la capăt sau ușa este închisă.

Comutatoarele de limitare pot detecta aceste două condiții. Comutatoarele sunt în regulă pentru multe aplicații, dar au cel puțin două dezavantaje: (1) Fiind un dispozitiv mecanic, în cele din urmă se uzează și (2) necesită o anumită cantitate de forță fizică pentru a acționa. (Capitolul 4 are mai multe despre comutatoarele de limită.) Alte două tipuri de senzori de proximitate, care folosesc fie fenomene optice, fie magnetice pentru a determina dacă un obiect este aproape, nu au aceste probleme. Prețul pe care îl plătim pentru aceste caracteristici îmbunătățite este că necesită circuite electronice.

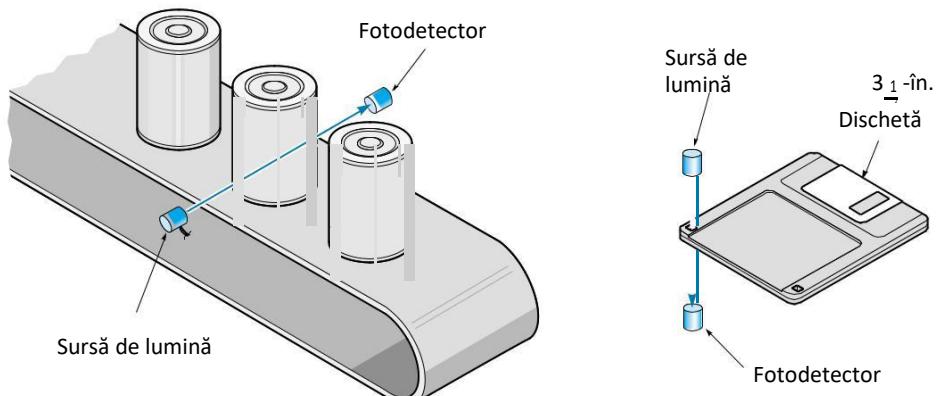
### Senzori optici de proximitate

*Senzorii optici de proximitate*, uneori numiți *întrerupători*, utilizează o sursă de lumină și un senzor foto care sunt montate astfel încât obiectul care urmează să fie detectat taie calea luminii. Figura 6.28 ilustrează două aplicații ale utilizării foto-detectoarelor. În figura 6.28 litera (a), un foto-detector contorizează numărul de cutii de pe o linie de asamblare; în figura 6.28 litera (b), un foto-detector determină dacă gaura doar în citire dintr-o dischetă este deschisă sau închisă. Senzorii optici de proximitate folosesc frecvent un reflector pe o parte, ceea ce permite montarea detectorului și a sursei de lumină în aceeași incintă. De asemenea, sursa de lumină poate fi modulată pentru a da fasciculului o "semnătură" unică, astfel încât detectorul să poată distinge între fascicul și lumina reflectată.

Patru tipuri de foto-detectoare sunt în uz general: foto-rezistoare, fotodiode, tranzistoare foto și celule fotovoltaice. Un **foto-rezistor**, este realizat dintr-un material, cum ar fi sulfura de cadmiu (CdS), și are proprietatea că rezistența sa scade atunci când nivelul luminii crește. Este ieftin și destul de sensibil - adică rezistența se poate schimba cu un factor de 100 sau mai mult atunci când este expusă la lumină și întuneric.

Figura 6.28

Două aplicații ale unui detector de fotografii.



(a) Numărarea cutiilor pe o bandă transportoare

(b) Detectarea "doar în citire"

**Figura 6.29**

Fotodectori.

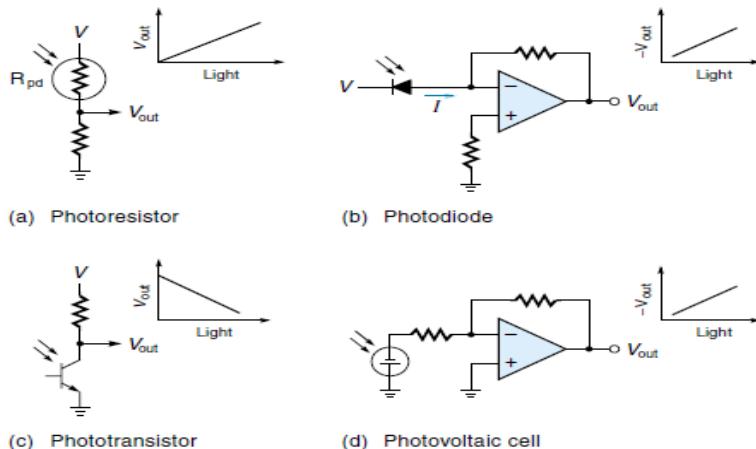


Figura 6.29(a) prezintă un circuit de interfață tipic — pe măsură ce lumina crește,  $R_{pd}$  scade, și  $V_{out}$  crește.

O **fotodiodă** este o diodă sensibilă la lumină. O fereastră mică permite luminii să cadă direct pe jonctiunea PN unde are ca efect creșterea curentului de scurgere inversă. Figura 6.29 litera (b) prezintă fotodioda cu circuitul său de interfață. Observați că foto-diodă este inversată față de curentul de scurgere și curentul mic de scurgere inversă este transformat într-o tensiune amplificată de un amplificator operațional.

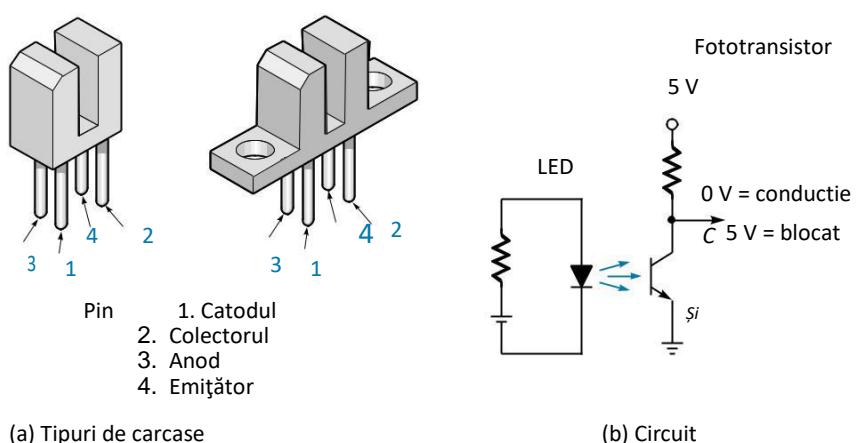
Un **tranzistor foto** [Figura 6.29 (c)] nu are derivație pe bază (circuit divizor). În schimb, lumina creează în mod eficient un curent de bază prin generarea de perechi electron-gaură în jonctiunea CB - cu cât mai multă lumină, cu atât tranzistorul se deschide mai mult.

**Celula fotovoltaică** este diferită de senzorii foto discutați până acum, deoarece creează de fapt energie electrică din lumină - cu cât mai multă lumină, cu atât tensiunea este mai mare. (O celulă solară este o celulă fotovoltaică.) Atunci când este utilizat ca senzor, tensiunea mică de ieșire trebuie, de obicei, să fie amplificată, așa cum se arată în figura 6.29 litera (d).

Unele aplicații folosesc un senzor optic de proximitate numit **cupluri cu fante**, numit și **opto-întrerupător** (Figura 6.30). Acest dispozitiv include sursa de lumină și detectorul într-un singur pachet. Când un obiect se deplasează în slot, calea luminii este întreruptă. Unitatea vine într-o mare varietate de carcase standard [Figura 6.30 (a)]. Pentru a opera, puterea trebuie să fie furnizată de un LED-ul, iar semnalul de ieșire trebuie luat de la foto-tranzistor. Acest lucru se face în circuitul din figura 6.30 (b), care oferă o ieșire de nivel TTL (5 V sau 0 V). Când fanta este deschisă, fasciculul de lumină lovește tranzistorul, pornindu-l, ceea ce activează colectorul. Când fasciculul este întrerupt, tranzistorul se oprește, iar colectorul este tras până la 5 V de rezistor.

**Figura 6.30**

Cuplaj optic cu fante.



Senzorii optici se bucură de avantajul că nici sursa de lumină, nici obiectul care urmează să fie detectat, nici detectorul nu trebuie să fie unul lângă celălalt. Un exemplu în acest sens este un sistem de alarmă antiefractie. Sursa de lumină este pe o parte a camerei, hoțul este în mijloc, iar detectorul se află pe cealaltă parte a camerei. Această proprietate poate fi importantă într-un caz în care nu există suprafete de montare convenabile în apropierea piesei care urmează să fie măsurată. Pe de altă parte, păstrarea lentilelor curate poate fi o problemă în unele situații industriale.

### Senzori de proximitate cu efect Hall

În 1879, E. H. Hall a observat pentru prima dată efectul care îi poartă numele. El a descoperit o proprietate specială a cuprului, iar mai târziu a semiconducțorilor: Ele produc o tensiune în prezența unui câmp magnetic. Acest lucru este valabil mai ales pentru germaniu și indiu. Efectul Hall, aşa cum se numește, a fost folosit inițial pentru wattmetre și gaussmetre; acum este utilizat pe scară largă pentru senzorii de proximitate. Figura 6.31 prezintă unele aplicații tipice. În toate cazurile, senzorul cu efect Hall generează o tensiune atunci când câmpul magnetic în care se află crește. Acest lucru se face fie prin mutarea unui magnet, fie prin schimbarea căii câmpului magnetic (dar valoarea tensiunii Hall nu depinde de câmpul "în mișcare", ci doar de câmpul care se află acolo).

Figura 6.32 arată cum funcționează efectul Hall. În primul rând, o sursă de tensiune externă este utilizată pentru a stabili un curent ( $I$ ) în cristalul semiconductoare. Tensiunea de ieșire ( $V_H$ ) este simțită pe părțiile laterale ale cristalului, perpendiculară pe direcția curentă. Când un câmp magnetic este adus aproape, sarcinile negative sunt deviate într-o parte producând o tensiune. Relația poate fi descrisă în următoarea ecuație:

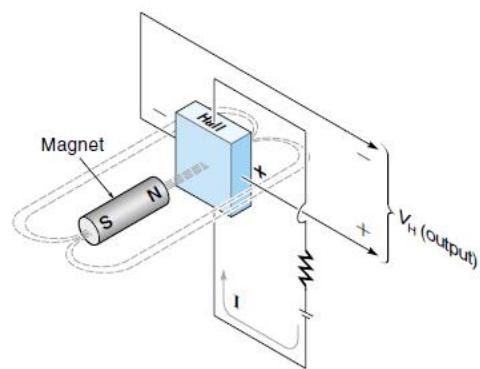
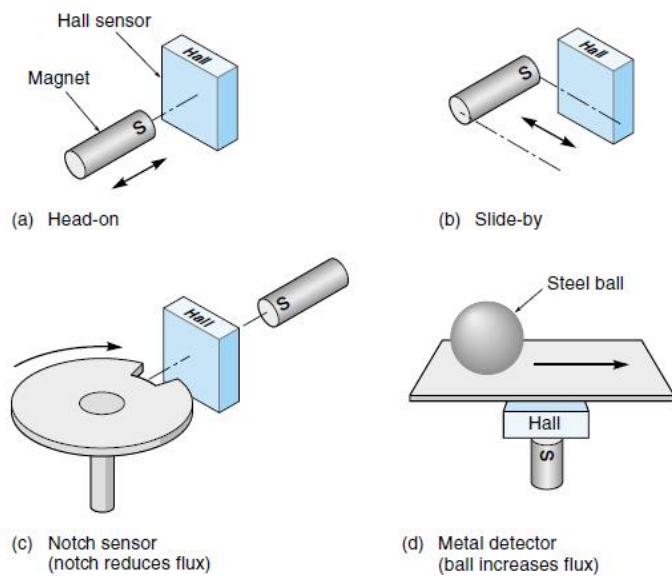
$$V_H = \frac{KIB}{D} \quad (6.4)$$

unde

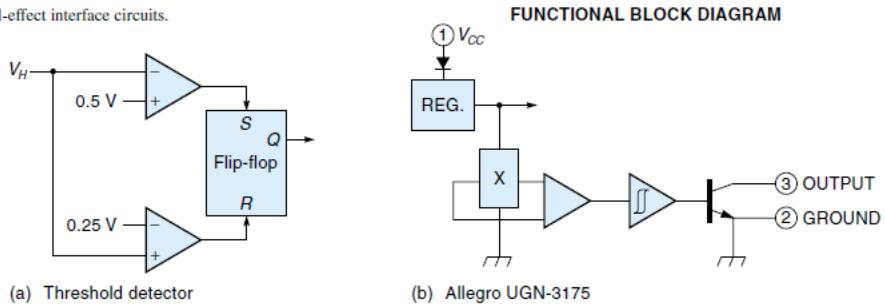
$V_H$  = Tensiune cu efect de hală

$K$  = constantă (dependentă de material)

Figura 6.31.  
Aplicații tipice cu  
Senzori Hall și modul de operare  
al acestora



**Figure 6.33**  
Hall-effect interface circuits.



$I$  = curent dintr-o sursă externă

$B$  = densitatea fluxului magnetic

$D$  = constanta grosimii

Ecuatia 6.4 afirmă că  $V_H$  este direct proporțional cu  $I$  și  $B$ . Dacă  $I$  este ținut constant, atunci  $V_H$  este direct proporțional cu  $B$  (densitatea fluxului magnetic). Prin urmare, ieșirea nu este într-adevăr pornit / oprit, ci (pe o distanță scurtă) oarecum liniară. Pentru a obține o acțiune de comutare, ieșirea trebuie să treacă printr-un **detector de prag** precum cel ilustrat în figura 6.33 literă (a). Acest circuit utilizează două amplificatoare comparatoare pentru a stabili tensiunile de comutare ridicate și scăzute. Când  $V_H$  depășește 0,5 V, amplificatorul de sus setează flip-flop-ul  $R-S$ . Când  $V_H$  coboară sub 0,25 V, amplificatorul inferior resetează flip-flop-ul. Pentru ca acest circuit să funcționeze, trebuie să ne asigurăm că magnetul se apropie suficient de mult de senzor pentru a face  $V_H$  să depășească 0,5 V și suficient de departe pentru ca  $V_H$  să scadă sub 0,25 V.

Un comutator complet cu efect Hall poate fi achiziționat sub formă de IC. Un exemplu este Allegro 3175 [Figura 6.32 (b)]; include senzorul (X), unitatea de curent încrucișat și detectorul de prag. Tranzistorul se aprinde atunci când câmpul magnetic depășește +100 gauss și se oprește atunci când câmpul scade sub -100 gauss. Tranzistorul poate furniza 15 mA, care poate conduce un releu mic direct sau un circuit digital TTL.

Senzorii cu efect Hall sunt utilizati în multe aplicații, de exemplu, comutatoarele de taste de pe computer și senzorii de proximitate din mașini. Ele sunt, de asemenea, utilizate ca senzori în tachometre cu roți dințate discutate mai devreme în acest capitol.

## 6.4 SENZORI DE SARCINĂ

**Senzorii de sarcină** măsoară forța mecanică. Forțele pot fi mari sau mici - de exemplu, cântărind obiecte grele sau detectând presiuni tactile de forță scăzută. În cele mai multe cazuri, este deformarea ușoară cauzată de forță pe care senzorul o măsoară, nu forța direct.

De obicei, această deformare este destul de mică. Odată ce cantitatea de deplasare a tensiunii (întinderea) sau de compresie (stoarcere) a fost măsurată, forța care trebuie să înceapă să poată fi calculată folosind parametrii mecanici ai sistemului. Raportul dintre forță și deformare este o constantă pentru fiecare material, aşa cum este definit de **legea lui Hooke**:

$$F = KX \quad (6.5)$$

unde

$K$  = constanta de elasticitate a materialului  
 $F$  = forța aplicată

$X$  = extensia sau compresia ca urmare a aplicării forței

De exemplu, dacă o parte mecanică are o constantă de arc de 1000 lb/in., și comprimă 0,5 in. sub sarcină, atunci sarcina trebuie să fie de 500 lb.

### Tensiometre cu fir

**Tensiometrul cu conductor lipit** poate fi folosit pentru a măsura o gamă largă de forțe, de la 10 lb la multe tone. Se compune dintr-un fir subțire (0.001 in.) buclat înainte și înapoi de câteva ori și cimentat într-un suport subțire de hârtie [Figura 6.34 (a)]. Versiunile mai recente folosesc tehnologia circuitelor imprimate pentru a crea modelul de conductor. Întregul tensiometru este strâns legat în siguranță de un obiect structural și va detecta orice deformare care poate avea loc. Gabaritul este orientat astfel încât firele să se afle în aceeași direcție ca deformarea așteptată. Principul de funcționare este după cum urmează: Dacă obiectul este pus sub tensiune, gabaritul se va întinde și va alungi firele. Firele nu numai că devin puțin mai lungi, ci și mai subțiri. Ambele acțiuni determină creșterea rezistenței totale a firului, după cum se poate observa din ecuația de rezistență de bază:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (6.6)$$

unde

$R$  = rezistența unei lungimi de conductor (la 20 °C)

$\rho$  = rezistivitate (o constantă dependentă de material)

$L$  = lungimea firului

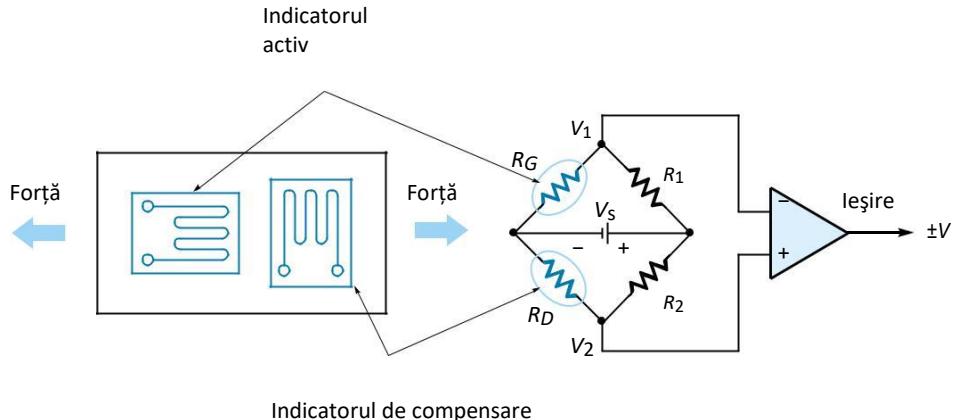
$A$  = zona secțiunii transversale a firului

Modificarea rezistenței firelor tensiometrului poate fi utilizată pentru a calcula elongația tensiometrului (și a obiectului la care este cimentat). Dacă cunoașteți elongația și constanta de elasticitate a membrului de sprijin, atunci principiile legii lui Hooke pot fi folosite pentru a calcula forța aplicată.

Schimbarea rezistenței într-un tensiometru este mică. De obicei, este doar câteva procente, care pot fi mai mici decât un ohm. Măsurarea unor astfel de rezistențe mici necesită, de obicei, un circuit de tip puncte [Figura 6.34 litera (b)]. Cu acest circuit, o mică schimbare într-un rezistor poate provoca o schimbare procentuală relativ mare în tensiunea din puncte. Inițial, punctea este echilibrat (sau "anulat") prin ajustarea rezistențelor astfel încât  $V_1 = V_2$ . Apoi, în cazul în care

**Figura 6.34**

Tensiometre.



(a) Plasarea tensiometrelor

apar modificări ale rezistenței indicatoarelor, diferența de tensiune ( $V_1 - V_2$ ) se schimbă. Puntea ne permite, de asemenea, să anulăm variațiile din cauza temperaturii, prin conectarea unui **element de compensare** la unul dintre rezistențele punctii. După cum se arată în figurile 6.34 și 6.35, elementul de compensare real este plasat fizic în apropierea ecartamentului activ, astfel încât să primească aceeași temperatură, dar este orientat perpendicular de la ecartamentul activ, astfel încât forță să nu-i alungească firele.

Analizând circuitul podului din Figura 6.34, calculăm mai întâi tensiunile individuale  $V_1$  și  $V_2$  folosind legea divisorului de tensiune:

$$V_1 = \frac{V_S R_G}{R_1 + R_G}$$

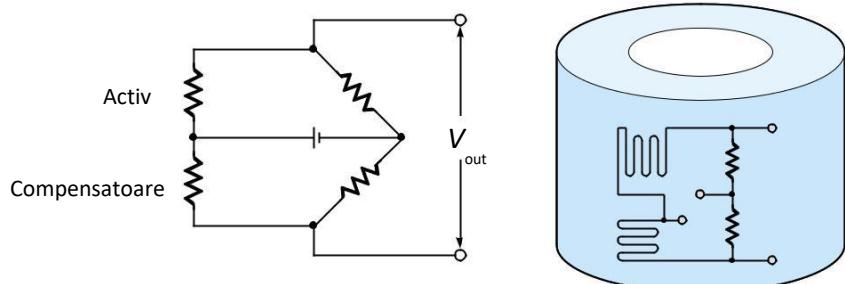
$$V_2 = \frac{V_S R_D}{R_2 + R_D}$$

Tensiunea peste puncte poate fi exprimată ca  $(V_1 - V_2)$

$$(V_1 - V_2) = \Delta V = V_S \left( \frac{R_G}{R_1 + R_G} - \frac{R_D}{R_2 + R_D} \right)$$

**Figura 6.35**

Configurații ale tensiometrului.



(a) Elemente de compensare  
și puntea sunt așezate împreună,  
astfel încât să aibă aceeași temperatură

(b) Celulă de încărcare cu indicator  
de tensiune și punte

Folosind algebra, putem converti această ecuație în

$$\Delta V = V_s \frac{(R_G R_2 - R_D R_1)}{(R_1 + R_G)(R_2 + R_D)}$$

Putem simplifica analiza specificând că toate rezistoarele din puncte (inclusiv  $R_G$  și  $R_D$ ) au aceeași valoare ( $R$ ) atunci când sunt echilibrate. Apoi, când ecartamentul este întins,  $R_G$  va crește puțin pentru a deveni  $R + \Delta R$  (unde  $\Delta R$  este câți ohmi  $R_G$  au crescut din cauza întinderii). Folosind aceste condiții, ecuația de mai sus simplifică la

$$\Delta V = V_s \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \quad (\text{when all resistors in bridge} = R \text{ at null})$$

Privind numitorul, vedem că este suma de  $4R$  și  $2\Delta R$ , dar în toate situațiile realiste  $4R$  va fi mult, mult mai mare decât  $2\Delta R$ , deci am putea spune că  $4R + 2\Delta R \approx 4R$ . Cu această ipoteză și o rearanjare algebrică, ajungem la Ecuația 6.7, pe care o putem folosi pentru a calcula schimbarea rezistenței tensiometrului pe baza schimbării de tensiune măsurată peste puncte.

$$\Delta R \approx \frac{4R \Delta V}{V_s} \quad (6.7)$$

unde:

- $\Delta R$  – variația rezistenței tensiometrului;
- $R$  – valoarea nominală a tuturor rezistențelor punții;
- $\Delta V$  – variația de tensiune detectată în puncte
- $V_s$  – tensiunea aplicată punții

Pe măsură ce tensiometrul este întins, rezistența sa crește. Relația precisă dintre alungire și rezistență poate fi calculată utilizând ecuația 6.8 și se bazează pe **factorul ecartament** (GF), care este furnizat de producătorul tensiometrului:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} \quad (6.8)$$

unde

$\varepsilon$  = alungirea obiectului pe unitatea de lungime ( $\Delta L/L$ ), numită *tulpina*  
 $R$  = rezistența tensiometrului

$\Delta R$  = modificarea rezistenței tensiometrului datorită forței

GF = factorul ecartament, o constantă furnizată de producător (GF este raportul  $(\Delta R/R)/(\Delta L/L)$ )

Este nevoie de încă o ecuație înainte de a putea rezolva o problemă de măsurare a tensiunii - o ecuație care se referă la *stres* și *fir* rezultată într-un obiect. **Stresul** este forța pe zona secțiunii transversale; de exemplu, dacă un picior de masă are o zonă transversală de  $2 \text{ in}^2$  și susține o sarcină de 100 lb, atunci stresul este de  $50 \text{ lb/in}^2$ . **Firul** este cantitatea de lungime (pe unitatea de lungime) pe care obiectul se întinde ca urmare a faptului că a fost supus unui stres; pentru

de exemplu, în cazul în care un obiect 10 inch lung se întinde 1 inch, apoi fiecare centimetru al obiectului întins 0.1 inch, și astfel tulpina ar fi 0.1 inch /in. Stresul și firul sunt legate de o constantă numită **modulul lui Young** (numit și modul de *elasticitate*), aşa cum se arată în ecuația 6.9. Modulul lui Young ( $E$ ) este o măsură a cât de rigid este un material și ar putea fi considerat ca un fel de constantă de elasticitate:

$$E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (6.9)$$

unde

$E$  = Modul young (o constantă pentru fiecare material)

$\rho$  = stres (forță pe zonă transversală)

$\epsilon$  = fir (alungire pe unitatea de lungime)

Tabelul 6.2 prezintă unele valori ale  $E$  pentru materialele comune.

### EXEMPLUL 6.12

Un tensiometru și un circuit puncte sunt utilizate pentru a măsura forța de tensiune într-o bară de oțel (Figura 6.36). Bara de oțel are o zonă transversală de  $2 \text{ in}^2$ . Tensiometrul are o rezistență nominală de  $120 \Omega$  și un GF de 2. Puntea este alimentată cu 10 V. Când bara este descărcată (netensionată), puntea este echilibrată, astfel încât ieșirea este de 0 V. Apoi forța este aplicată pe bară, iar tensiunea punții ajunge la 0,0005 V. Găsiți forța pe bară.

### SOLUȚIE

Mai întâi, utilizați ecuația 6.7 pentru a calcula modificarea rezistenței tensiometrului datorită forței aplicate:

$$\Delta R \approx \frac{4R\Delta V}{V_s} = \frac{4 \times 120 \Omega \times 0.0005 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 0.024 \Omega$$

### TABELUL 6.2

#### Young's Modulus ( $E$ ) pentru materiale comune

Substanță	lb / in	N/cm <sup>2</sup>
Oțel	$30 \times 10^6$	$2.07 \times 10^7$
Cupru	$15 \times 10^6$	$1.07 \times 10^7$
Aluminiu	$10 \times 10^6$	$6.9 \times 10^6$
Stâncă	$7.3 \times 10^6$	$5.0 \times 10^6$
Lemn dur	$1.5 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$

Apoi, utilizați ecuația 6.8 pentru a calcula alungarea (firului) tensiometrului (cât de mult a fost întins):

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} = \frac{0.024/120}{2} = 0.0001 \text{ in./in.}$$

În cele din urmă, utilizați ecuația 6.9

$$E = \frac{P}{\epsilon}$$

pentru a calcula forța de pe bară. Acest lucru va necesita căutarea în sus valoarea modulului Young. Din tabelul 6.2, considerăm că este de  $30.000.000 \text{ lb/in}^2$  pentru oțel. Rearanjarea Ecuației 6.9 oferă

$$P = E\epsilon = 30.000.000 \text{ lb/in}^2 \times 0.0001 \text{ in./in.} = 3000 \text{ lb/in}^2$$

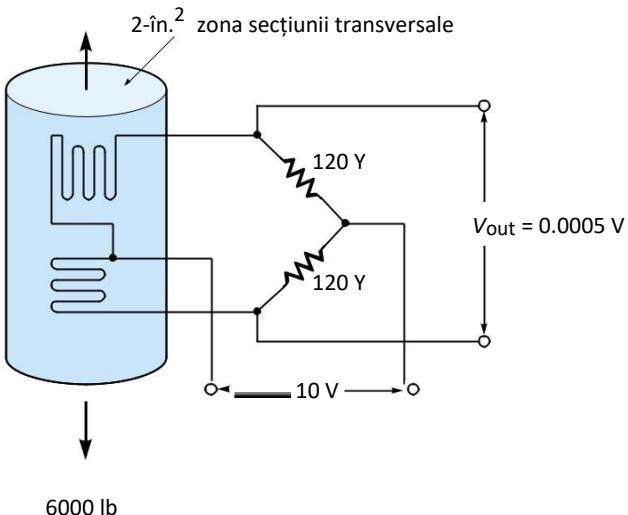
Acest rezultat ne spune că forța de tensiune pe bara de oțel este de 3000 lb / in<sup>2</sup>, și pentru că această bară are o zonă transversală de 2 in<sup>2</sup>, forța totală de tensiune în bară este de 6000 lb.

#### EXEMPLUL 6.12 (Repetat cu unități SI)

Un tensiometru și un circuit de pod sunt utilizate pentru a măsura forța de tensiune într-o bară de oțel care are o suprafață transversală de  $13 \text{ cm}^2$ . Tensiometrul are o rezistență nominală de  $120 \Omega$  și un GF de 2. Puntea este alimentată cu 10 V.

**Figura 6.36**

Tensiune măsurată de tensiometru în bara de oțel (exemplul 6.12).



Când bara este descărcată, puntea este echilibrat, astfel încât ieșirea este de 0 V. Apoi forța este aplicată pe bară, iar tensiunea punții ajunge la 0,0005 V. Găsiți forța pe bară.

### SOLUȚIE

În primul rând, se calculează modificarea rezistenței tensiometrului datorită forței aplicate:

$$\Delta R \approx \frac{4R\Delta V}{V_s} = \frac{4 \times 120 \Omega \times 0.0005 V}{10 V} = 0.024 \Omega$$

Apoi, se calculează alungirea (firului) indicatorului:

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} = \frac{0.024/120}{2} = 0.0001 \text{ cm/cm}$$

În cele din urmă, utilizați ecuația 6.9

$$E = \frac{\rho}{\epsilon}$$

pentru a calcula forța de pe bară. Acest lucru va necesita căutarea în sus valoarea modulului Young. Din tabelul 6.2, considerăm că este  $2.07 \times 10^7$  N/cm pentru oțel. Rearanjarea Ecuației 6.9 oferă

$$\rho = E\epsilon = 20.700.000 \text{ N/cm}^2 \times 0,0001 \text{ cm/cm} = 2070 \text{ N/cm}^2$$

Acest rezultat ne spune că forța de tensiune pe bara de oțel este de 2070 N / cm<sup>2</sup>, și pentru că această bară are o suprafață transversală de 13 cm<sup>2</sup>, forța totală de tensiune în bară este de 26,910 N.

Traductoarele de forță cu ecartament prin fir (numite *celule de sarcină*) sunt disponibile ca unități autonome care pot fi montate oriunde în sistem. O celulă de încărcare poate conține două tensiometre (active și compensatoare) și o punte [Figura 6.35]. O aplicație tipică pentru celulele de sarcină este monitorizarea greutății unui rezervor. Rezervorul poate fi așezat pe trei sau patru celule de sarcină, astfel încât greutatea rezervorului este suma ieșirilor celulelor de sarcină [a se vedea figura 6.60 litera (c)].

### Senzori de forță semiconductoare

Un alt tip de senzor de forță utilizează **efectul piezorezistiv al siliciului**. Acești senzori își schimbă rezistența atunci când se aplică forță și sunt de 25-100 de ori mai sensibili decât tensiometrul cu fir. Un tensiometru semiconductor are o singură bandă de material siliconic care este lipit de structură. Când structura se întinde, siliciul este alungit, iar rezistența de la un capăt la altul crește (cu toate acestea, schimbarea rezistenței este neliniară).

## Senzori cu forță redusă

Unele aplicații necesită senzori cu forță redusă. De exemplu, imaginați-vă sensibilitatea necesară pentru ca un robot de prindere să țină un pahar cu apă fără alunecare și fără a-l zdrobi. Tensiometrele pot măsura forțe scăzute dacă sunt montate pe un substrat elastic, cum ar fi cauciucul - atunci o forță mică va provoca o schimbare semnificativă a devierii și a rezistenței. O altă soluție ar fi construirea unui senzor de forță scăzută cu un arc și un potențiometru cu mișcare liniară (Figura 6.37). Arcul comprimă o distanță proporțională cu forța aplicată, iar această distanță este măsurată cu potențiometrul.

### EXEMPLUL 6.13

Construji un senzor de forță cu următoarele caracteristici;

Rază: 0-30 lb

Deformare: 0,5 in. (maxim)

Ieșire: 0.1 V/lb

Potențiometru cu mișcare liniară de 1 kΩ este disponibil cu o cursă de 1 in.

### SOLUȚIE

Folosind conceptul din Figura 6.37, trebuie mai întâi să specificăm elasticitatea.

Folosim specificațiile pentru un arc care deformează 0.5 inch cu 30 lb de forță.

Astfel

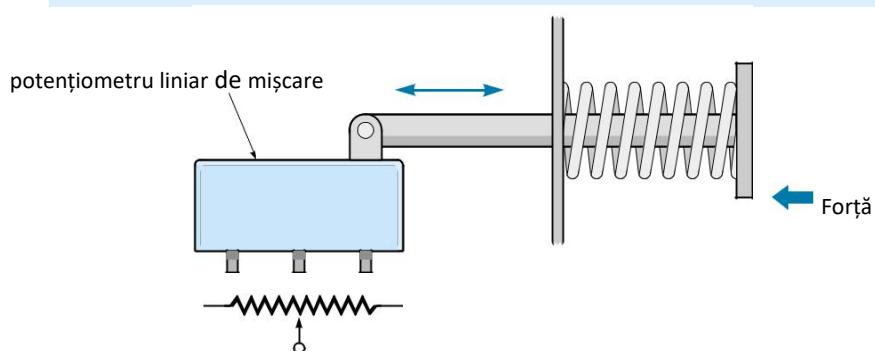
$$K \text{ (spring constant)} = \frac{30 \text{ lb}}{0.5 \text{ in.}} = 60 \text{ lb/in.}$$

Știind că avem nevoie de un arc cu un  $K$  de 60 lb / in., am putea alege o specificație din catalog și putem selecta unul.

Sensibilitatea dorită de 0,1 V/lb dictează că tensiunea de ieșire va fi de 3 V atunci când forță este de 30 lb: tensiune la sarcină maximă =  $30 \text{ lb} \times 0,1 \text{ V/lb} = 3 \text{ V}$ .

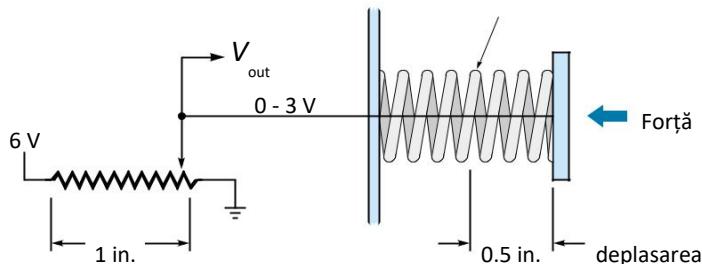
**Figura 6.37**

Un senzor de forță tactilă folosind un arc și un potențiometru linear.



**Figura 6.38**

O configurare a senzorului tactil (exemplul 6.13).



În cele din urmă, trebuie să determinăm tensiunea de alimentare peste potențiometrului. Din potențiometru ar trebui să iasă 3 V atunci când este mutată 0,5 in. (jumătate din cursa sa). Un raport poate fi folosit pentru a găsi tensiunea de alimentare a potențiometrului pentru 1 inch de mișcare:

$$\frac{3 \text{ V}}{0.5 \text{ in.}} = \frac{X}{1 \text{ in.}}$$

$$X = 6 \text{ V}$$

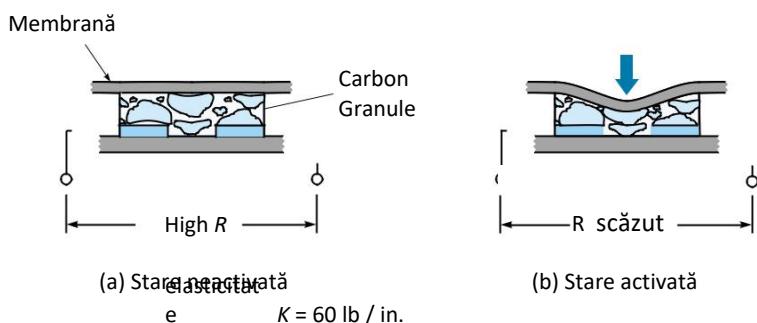
Prin urmare, tensiunea de alimentare ar trebui să fie de 6 V. Figura 6.38 arată configurația finală.

Un senzor tactil de forță mică poate fi realizat folosind spumă conductivă. Aceasta este principiul utilizat în tastaturile cu membrană ilustrat în figura 6.39. Spuma conductivă este un cauciuc spumat moale saturat cu particule de carbon foarte mici. Când spuma este apăsată, particulele de carbon sunt împins împreună, iar rezistența materialului scade. Prin urmare, într-un anumit mod, rezistența este proporțională cu forța. În prezent, acest concept a găsit o aplicare limitată în lucruri, cum ar fi tasturi calculator; datorită simplității sale și a costului redus, cu toate acestea, este o opțiune viabilă pentru alte aplicații, cum ar fi senzorii tactili robotici.

În cele din urmă, un senzor tactil foarte simplu poate fi realizat cu două sau mai multe comutatoare limită montate una lângă alta cu actuatori cu arcuri care sunt setate să comute la presiuni diferite.

**Figura 6.39**

Senzor tactil din spumă conductivă.



Pe măsură ce presiunea crește, primul comutator se închide, apoi, cu mai multă presiune, următorul comutator se închide și aşa mai departe.

## 6.5 SENZORI DE PRESIUNE

*Presiunea* este definită ca forța pe unitatea de suprafață pe care un material o exercită asupra altuia. De exemplu, luati în considerare un cub de 10 lb care se sprijină pe o masă. Dacă suprafața fiecărei fețe a cubului este de  $4 \text{ in}^2$ , atunci 10 lb este distribuit pe o suprafață de  $4 \text{ in}^2$ , astfel încât cubul exercită o presiune pe masa de  $2,5 \text{ lb / in}^2$  ( $10 \text{ lb} / 4 \text{ in}^2 = 2,5 \text{ lb / in}^2$  sau  $2,5 \text{ psi}$ ). În unitățile SI, presiunea este măsurată în Newtons pe metru pătrat ( $\text{N/m}^2$ ), și care se numește Pascal (Pa). Pentru un lichid, presiunea este exercitată asupra pereților laterali ai recipientului, precum și asupra fundului.

Senzorii de presiune constau, de obicei, din două părți: Prima transformă presiunea într-o forță sau deplasare, iar a doua transformă forța sau deplasarea într-un semnal electric. Măsurările de presiune se fac numai pentru gaze și lichide. Cea mai simplă măsurare a presiunii o face **manometrul**, care este diferența dintre presiunea măsurată și presiunea ambientală. La nivelul mării, presiunea ambientă este egală cu presiunea atmosferică și se presupune că este de 14,7 psi sau 101,3 kilo Pascali (kPa). Un senzor ceva mai complicat poate măsura **presiunea diferențială**, diferența de presiune dintre două locuri în care nici o presiune nu este neapărat atmosferică. Un al treilea tip de senzor de presiune măsoară **presiunea absolută**, care este măsurată cu un senzor de presiune diferențială în care o parte este menționată la 0 psi (aproape de un vid total).

### Tuburi Bourdon

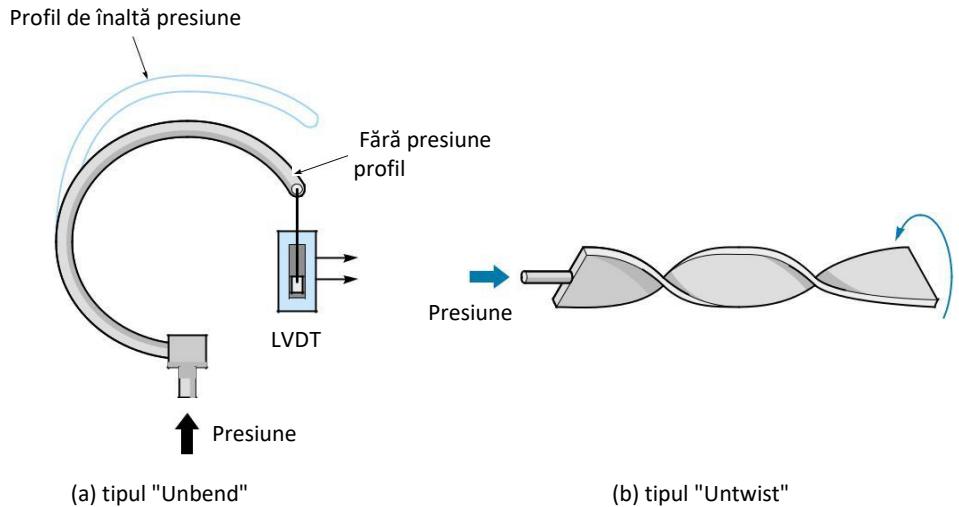
Un **tub Bourdon** este un tub scurt îndoit, închis la un capăt. Când tubul este presurizat, tinde să se îndrepte. Această mișcare este proporțională cu presiunea aplicată. Figura 6.40 prezintă unele configurații de tub Bourdon. Observați că deplasarea poate fi liniară sau unghiulară. Un senzor de poziție, cum ar fi un potențiometru sau LVDT, poate converti deplasarea într-un semnal electric. Senzorii de tip tub Bourdon sunt disponibili în intervale de presiune de la 30 la 100.000 psi. Utilizările tipice includ manometrele de presiune ale aburului și a apei.

### Senzori Burduf

Acest senzor utilizează un mic burduf metalic pentru a converti presiunea în mișcare liniară [Figura 6.41(a)]. Pe măsură ce presiunea din interior crește, burdufurile se extind împotriva rezistenței unui arc (care este adesea burduful însuși). Această mișcare este detectată cu un senzor de poziție, cum ar fi un potențiometru. Figura 6.41 litera (b) ilustrează un senzor de presiune diferențială, care poate fi realizat prin închiderea burdufului într-o canistră. Aici, presiunea din afara burdufului (presiunea 2) tinde să comprime burduful, în timp ce presiunea 1 tinde să producă extinderea burdufului. Poziția arborelui este în funcție de diferența de presiune din interiorul și exteriorul burdufului. Burdufurile sunt capabile de mai multă sensibilitate decât tubul Bourdon în intervalul de presiune inferioară de 0-30 psi.

**Figura 6.40**

Senzori Bourdon-tub.

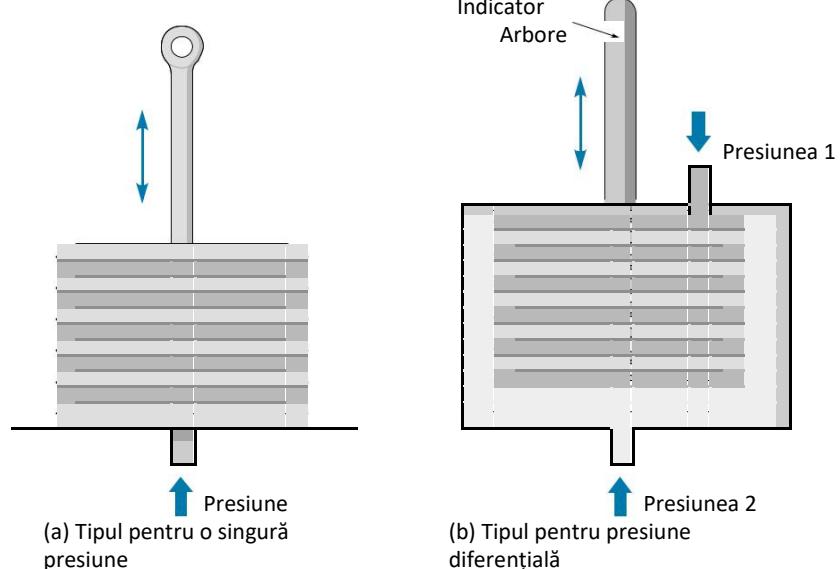


### Senzori de presiune semiconductori

Unii senzori de presiune disponibili în comerț utilizează proprietatea piezo-rezistivă a siliciumului (Figura 6.42). Elementul piezo-rezistiv transformă presiunea direct în rezistență, iar rezistența poate fi transformată în tensiune. Acești senzori au avantajul că sunt "fără piese în mișcare" și sunt disponibili în intervale de presiune de la 0-1,5 psi la 0-5000 psi. Un exemplu de senzor de presiune semiconductor comercial este seria ST2000 de la SenSym Inc. (Figura 6.43). Această unitate poate fi utilizată pentru fluide sau gaze, și are un amplificator intern și generează o tensiune care este direct proporțională cu presiunea absolută.

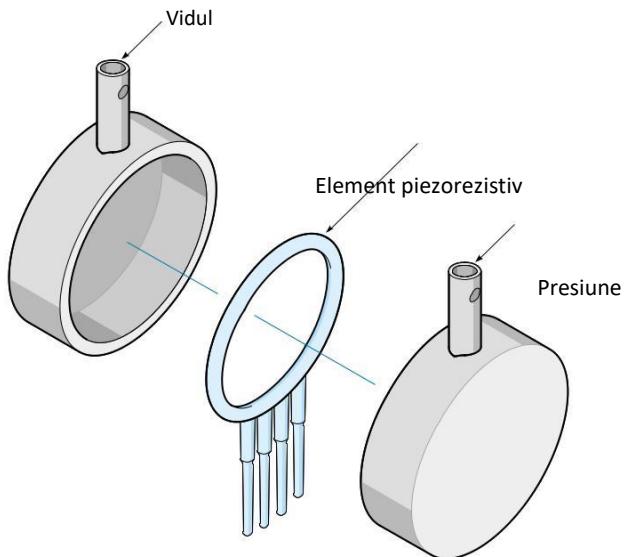
**Figura 6.41**

Senzori de presiune burduf.

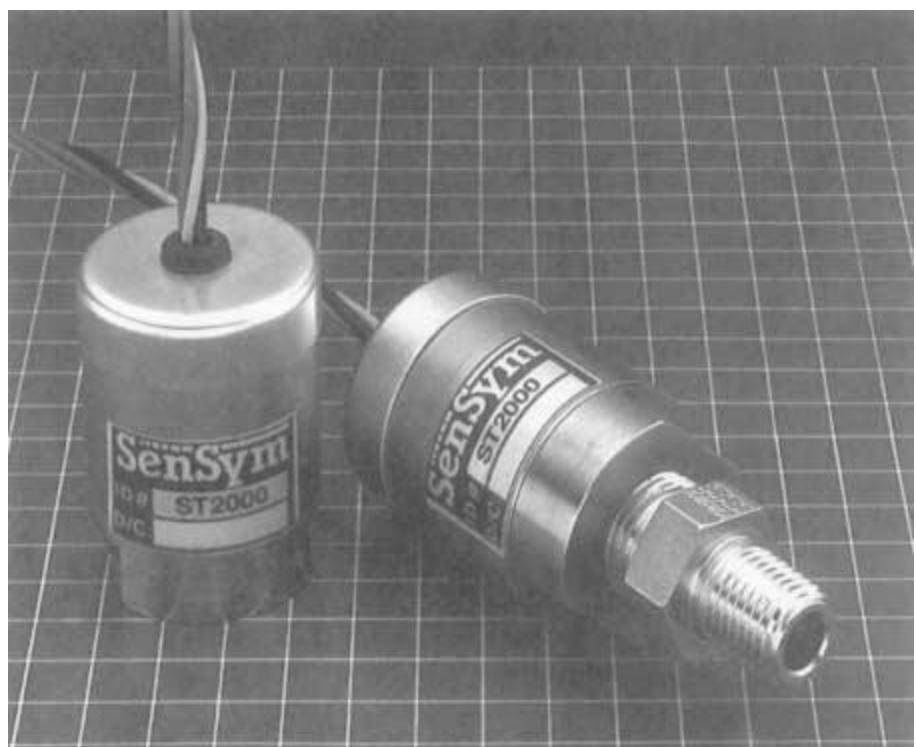


**Figura 6.42**

Un senzor de presiune semiconductoare.

**Figura 6.43**

Senzorul de presiune semiconductoare ST2000.



## 6.6 SENZORI DE TEMPERATURĂ

*Senzorii de temperatură* dau o ieșire proporțională cu temperatura. Cei mai mulți senzori de temperatură au un coeficient de temperatură *pozitiv* (de dorit), ceea ce înseamnă că ieșirea senzorului crește atunci când temperatura crește, dar unei senzori au un coeficient de temperatură *negativ*, ceea ce înseamnă că ieșirea scade când temperatura crește.

### Senzori de temperatură bimetalici

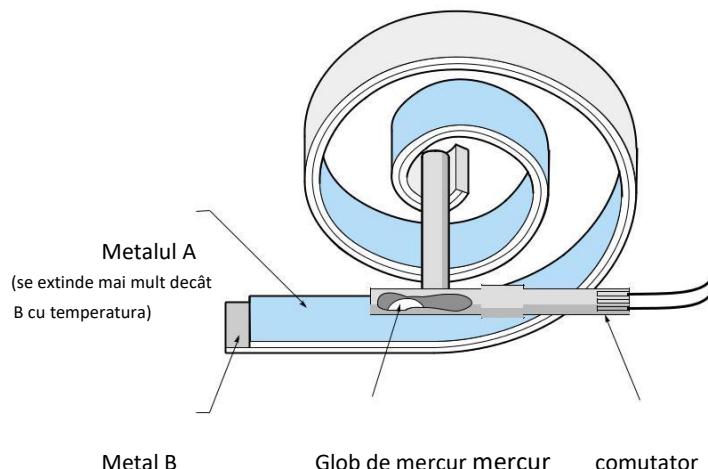
**Senzorul de temperatură bimetalic** constă dintr-o bandă bimetalică spiralată (Figura 6.44). Banda bimetalică laminată din două metale cu coeficienți diferenți de dilatare termică. Pe măsură ce temperatura crește, metalul din interior se extinde mai mult decât metalul de la exterior, iar spirala tinde să se îndrepte. Acești senzori sunt de obicei utilizați pentru controlul pornit într-un termostat de uz casnic în care un comutator de mercur este condus de la pornit la opriț. În figura 6.44, când temperatura crește, tubul care conține mercur lichid se rotește în sensul acelor de ceasornic. Când tubul se rotește dincolo de orizontală, mercurul coboară spre dreapta și realizează o conexiune electrică între electrozi. Un avantaj distinct al acestui sistem este că ieșirea din comutator poate fi utilizată direct fără condiționare suplimentară a semnalului. În prezent, comutatoarele de mercur sunt eliminate treptat din motive de mediu, dar comutatoarele de tip contact le iau locul.

### Termocopluri

**Termocuplul** a fost dezvoltat în urmă cu peste 100 de ani și încă se bucură de o utilizare largă, în special în situații de temperatură ridicată. Termocuplul se bazează pe **efectul Seebeck**.

**Figura 6.44**

Un senzor termic bimetalic de control un comutator de mercur (prezentat în stare "rece").

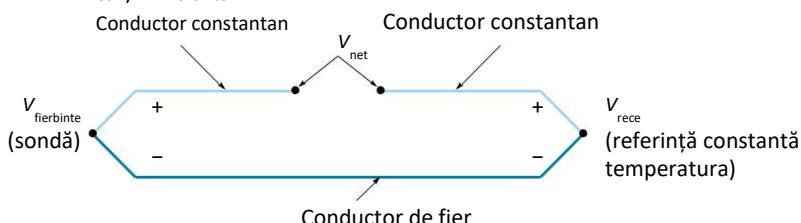


, un fenomen prin care o tensiune proporțională cu temperatura poate fi produsă dintr-un circuit format din două fire metalice diferite. De exemplu, un termocuplu realizat din fier și constantan (un aliaj) generează o tensiune de aproximativ  $35 \mu\text{V}/^\circ\text{F}$ . Figura 6.45 litera (a) ilustrează această situație. Ne putem gândi la joncțiunile de la fiecare capăt al firelor metalice diferite ca producând o tensiune, astfel încât tensiunea netă ( $V_{\text{net}}$ ) este de a furniza diferența dintre tensiunile joncțiunii. O joncțiune se află pe sondă și se numește **joncțiunea fierbinte**. Cealaltă joncțiune este păstrată la o temperatură de referință cunoscută și se numește **joncțiune rece** sau *joncțiune de referință*. Tensiunea de ieșire din acest sistem poate fi exprimată după cum urmează:

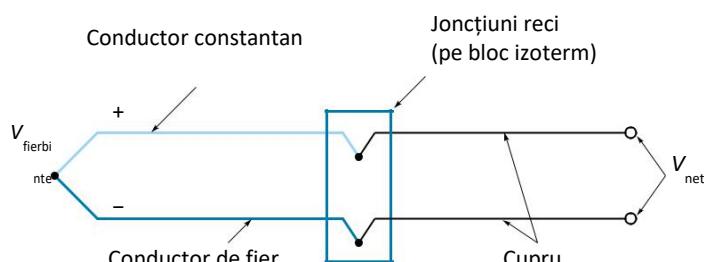
$$V_{\text{net}} = V_{\text{cald}} - V_{\text{frig}} \quad (6.10)$$

În practică, firele termocuplului trebuie să se conecteze la firele de cupru la un moment dat, aşa cum se arată în figura 6.45 (b), astfel încât există într-adevăr trei joncțiuni. Cu toate acestea, se pare că tensiunea totală din cele două joncțiuni de cupru va fi aceeași cu cea din joncțiunea rece tensiunea ( $V_{\text{rece}}$ ) din figura 6.45 litera (a) (presupunând că joncțiunile de cupru sunt la aceeași temperatură).

În mod tradițional, joncțiunea rece a fost păstrată la  $32 ^\circ\text{F}$  **într-o baie de apă cu gheătă**. Apa cu gheătă a fost folosită deoarece este o modalitate de a produce o temperatură cunoscută, și astfel  $V_{\text{frig}}$  devine o constantă în ecuația 6.10, lăsând o relație directă între  $V_{\text{net}}$  și  $V_{\text{fierbinte}}$ :



(a) Principiul de bază



(b) Termocuplu conectat la fire de cupru

**Figura 6.45**

Un circuit termocuplu (tip fier-constantan).

$$V_{\text{hot}} = V_{\text{net}} + \underbrace{\text{constant}}_{\substack{V_{\text{cold}} \text{ at } 32^{\circ}\text{F} \\ \text{or some other} \\ \text{reference temperature}}} \quad (6.10a)$$

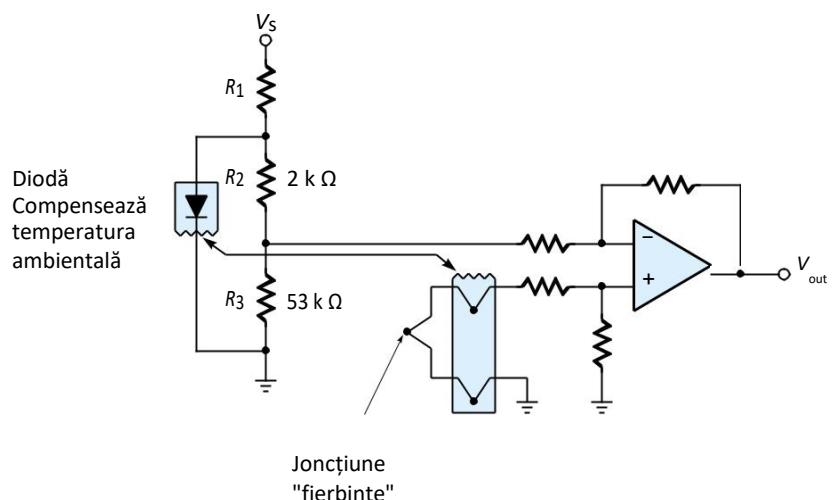
*V<sub>cold</sub> at 32°F  
or some other  
reference temperature*

Sistemele moderne elimină nevoie de apă cu gheăță. O metodă este de a menține joncțiunea rece la temperatură constantă cu un sistem de control. Acest lucru poate fi util dacă există mai multe termocopluri într-un sistem - toate pot fi referite la aceeași temperatură. O altă metodă (utilizată de un controler) este de a căuta pur și simplu într-un tabel valoarea  $V_{\text{rece}}$  pentru temperatură ambientă și se adauge această valoare la  $V_{\text{net}}$  pentru a produce  $V_{\text{fierbinte}}$ . O altă modalitate de a elimina baia de apă cu gheăță este de a utiliza o temperatură sensibilă la temperatură diodă (într-un circuit de interfață) care face ca ieșirea termocoplului să se comporte ca și cum joncțiunea rece ar fi încă la îngheț, chiar dacă nu este. Figura 6.46 arată un astfel de circuit pentru un termocoulu de fier-constantan. Joncțiunile reci sunt menținute la aceeași temperare ca dioda prin montarea lor pe toate pe un bloc *izoterm*. Pe măsură ce temperatura ambientă crește, dioda tensiunea diodei crește (aproximativ 0,6 V) și scade la o rată de aproximativ 1,1 mV / °F. Această tensiune este redusă (cu  $R_2$  și  $R_3$ ) la 28 µV/F, ceea ce reprezintă aceeași rată cu *carea tensiunea reală de joncțiune la rece crește cu temperatura ambientă*. Prin urmărirea (cu un amplificator operațional) a efectului schimbărilor de temperatură ambientă asupra joncțiunii reci, vom obține o singură tensiune termocoulu, care este direct proporțională cu temperatura.

Termocoplurile comerciale sunt disponibile cu diferite intervale de temperatură și sensibilități (sensibilitatea fiind o măsură a volților/gradului). Figura 6.47 prezintă volții versus curbele de temperatură ale claselor majore de termocopluri. După cum puteți vedea, tipul J (fier-constantan) are cea mai mare sensibilitate, dar cel mai scăzut interval de temperatură, tipul K (crom-aluminiu) are un interval de temperatură mai ridicat, dar o sensibilitate mai mică, iar tipul R (platină-rodiu) are o sensibilitate și mai mică, dar poate funcționa la temperaturi mai ridicate. Sunt disponibile tabele care oferă o antecuplă precisă a termocoplului tensiune-temperatură (âtât pentru °F, cât și pentru °C). A se vedea apendicele A pentru tabelele termocoplurilor de tip J.

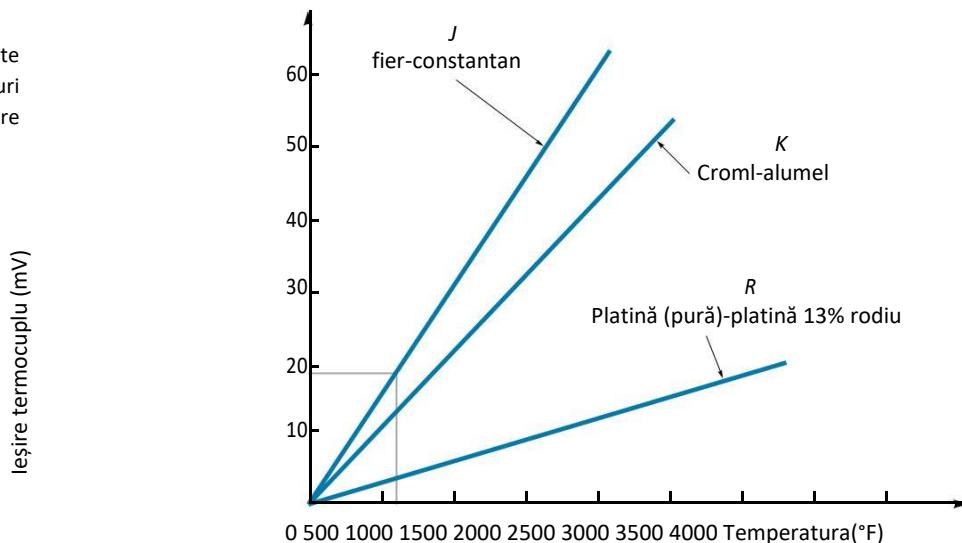
**Figura 6.46**

O diodă utilizată pentru a compensa tensiunea joncțiunii la rece.



**Figura 6.47**

Ieșirile pentru diferite tipuri de termocupluri (la care se face referire la  $32^{\circ}\text{F}$ ).



Termocuplurile sunt simple și robuste, dar necesită circuite electronice suplimentare pentru a face față problemelor inerente de sensibilitate scăzută și joncțiune la rece. Cu toate acestea, deoarece acestea sunt liniare (pe o gamă limitată), fiabile și stabile, se bucură de o utilizare largă în măsurarea temperaturilor înalte în cuptoare și cuptoare.

#### EXEMPLUL 6.14

Un cuptor ar trebui să fie menținut la  $1000^{\circ}\text{F}$  de un sistem de control, dar bănuiați că temperatura este mult mai rece. Ai la dispoziție un termocuplu de tip J și un voltmetru. Cum ați folosi acest echipament pentru a verifica temperatura cuptorului?

#### SOLUȚIE

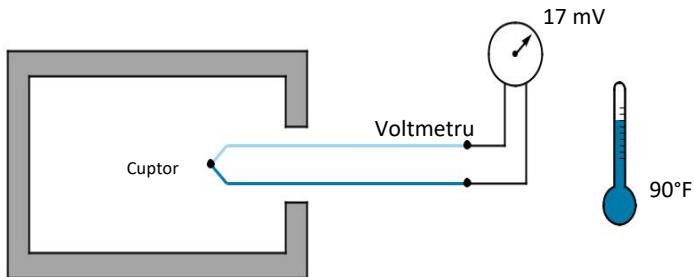
Mai întâi, puneți termocuplul în cuptor și conectați termocuplul la voltmetru (Figura 6.48). Încercați să faceți conexiunile de joncțiune la rece la sondele voltmetrului care sunt la temperatura ambientă, și care este de aproximativ  $90^{\circ}\text{F}$  (așa cum este raportată de un termometru pe perete).

Voltmetrul citește aproximativ 17 mV, care este  $V_{\text{net}}$  în ecuația 6.10:

$V_{\text{net}} = V_{\text{fierbinte}} - V_{\text{rece}}$ . Graficul din figura 6.47 (pentru tipul J) se bazează pe joncțiunea rece ca fiind la îngheț ( $32^{\circ}\text{F}$ ), ceea ce cu siguranță nu este în acest caz. Din grafic, putem vedea că  $90^{\circ}\text{F}$  ar crea aproximativ 2.0 mV. Puteți vedea

**Figura 6.48**

Măsurarea temperaturii cuporului cu un termocuplu (exemplul 6.14).



din ecuația 6.10 că, dacă  $V$  rece, și se va reduce  $V_{net}$ , deci dacă vom folosi graficul din Figura 6.47, trebuie să compensăm prin creștere valoarea citită de la 17 mV la 19 mV.

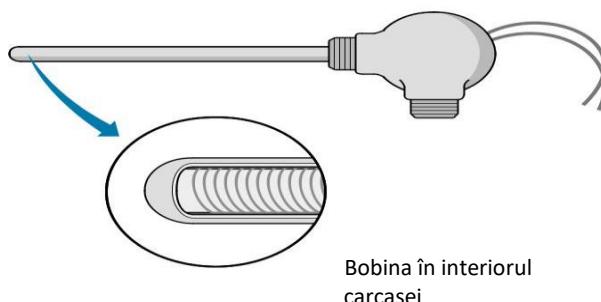
Acum, folosind graficul din Figura 6.47 pentru 19 mV, am determina că temperatura este de 660 °. Această temperatură este mult mai mică decât cea dorită de 1000 ° F, deci în mod clar este ceva în neregulă cu sistemul de control al temperaturii.

### Detectoare de temperatură cu rezistență

**Detectorul de temperatură cu rezistență (RTD)** este un senzor de temperatură bazat pe faptul că metalele își cresc rezistența pe măsură ce temperatura crește. Figura 6.49 prezintă un RTD tipic. Un fir, cum ar fi platina, este înfășurat în jurul unei tije ceramice sau de sticlă (uneori bobina este susținută între două tije ceramice). Sârma de platină are un coeficient de temperatură de  $0.0039 \Omega/\Omega/^\circ C$ , ceea ce înseamnă că rezistența merge până la  $0.0039 \Omega$  pentru fiecare grad Celsius de creștere a temperaturii. RTD-urile sunt disponibile în rezistențe diferite, o valoare comună fiind de  $100 \Omega$ . Astfel, un RTD de platină de  $100 \Omega$  are o rezistență de  $100 \Omega$  la  $0^\circ C$  și are un coeficient de temperatură pozitiv de  $0.39 \Omega/^\circ C$ .

**Figura 6.49**

Un detector de temperatură de rezistență (RTD).



### EXEMPLUL 6.15

Un RTD de platină de 100 de  $\Omega$  este utilizat într-un sistem. Citirea rezistenței actuale este de 110  $\Omega$ . Găsiți temperatura.

### SOLUȚIE

O citire de 110  $\Omega$  înseamnă că rezistența a crescut cu 10  $\Omega$  față de ceea ce ar fi la 0 °C. Prin urmare, cunoscând coeficientul de temperatură al RTD la 0,39  $\Omega/^\circ\text{C}$ , putem calcula temperatura curentă:

$$10 \Omega \times \frac{^\circ\text{C}}{0,39 \Omega} = 25,6^\circ\text{C}$$

RTD-urile au avantajul de a fi foarte precise și stabile (caracteristicile nu se schimbă în timp). Dezavantajele sunt sensibilitatea scăzută (modificarea mică a rezistenței pe grad), timpul de răspuns relativ lent la schimbările de temperatură și costul ridicat.

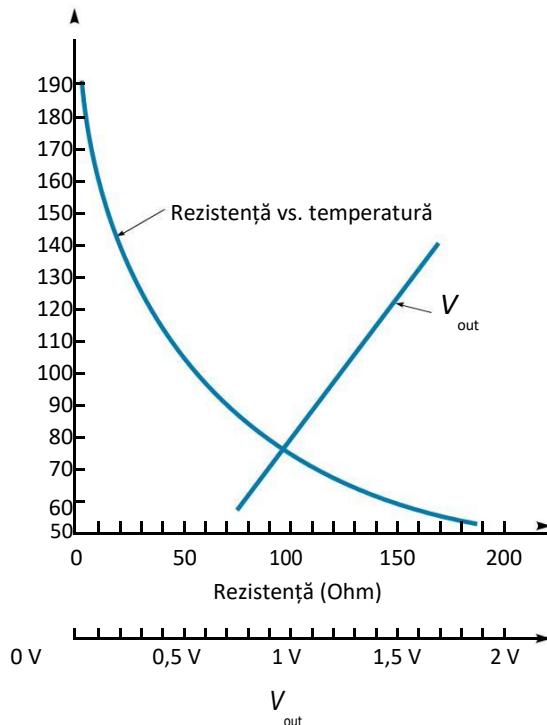
### Termistori

Un **termistor** este un dispozitiv cu două terminale care își schimbă rezistența cu temperatură. Termistoarele sunt realizate din materiale semiconductoare pe bază de oxid și vin într-o varietate de dimensiuni și forme. Termistorii sunt neliniari; prin urmare, ele *nu* sunt folosite pentru a obține o citire exactă a temperaturii, ci pentru a indica schimbările de temperatură, de exemplu, supraîncălzirea. De asemenea, majoritatea termistorilor au un coeficient de temperatură negativ, ceea ce înseamnă că rezistența scade pe măsură ce temperatura crește, așa cum este ilustrat cu linia solidă din graficul din figura 6.50 (a). O caracteristică foarte dorită a acestor dispozitive este sensibilitatea lor ridicată. O schimbare relativ mică a temperaturii poate produce o schimbare mare a rezistenței.

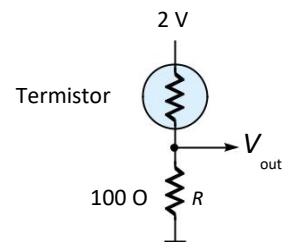
Figura 6.50 litera (b) prezintă un circuit simplu de interfață termistor. Prin plasarea termistorului în partea superioară a unui divizor de tensiune, tensiunea de ieșire rezultată este relativ liniară și are o pantă pozitivă [prezentată ca o linie întreruptă în figura 6.50(a)]. Valoarea rezistorului ( $R$ ) selectată trebuie să fie apropiată de valoarea nominală a termistorului.

Termistorii vin într-o gamă largă de rezistențe, de la câțiva ohmi la 1 M $\Omega$ , a căror selecție depinde de intervalul de temperatură de interes. Modelele cu rezistență mai mare sunt utilizate pentru temperaturi mai ridicate, pentru a crește sensibilitatea și pentru a împiedica senzorul să tragă prea mult curent. Luați în considerare, de exemplu, ce s-ar întâmpla dacă am folosi termistorul din figura 6.50 în intervalul de temperatură de 150-200 °F; sensibilitatea este de numai 0,1  $\Omega/^\circ\text{F}$ , iar rezistența nominală este foarte scăzută (15-20  $\Omega$ ). Dacă ar fi să folosim același termistor în intervalul de temperatură 50-100 °F, sensibilitatea este mult mai mare (2,6  $\Omega/^\circ\text{F}$ ), iar rezistența nominală este mai mare (între 50 și 180  $\Omega$ ).

**Figura 6.50**  
Un termistor.



(a) Temperatura termistorului vs. curba de rezistență



(b) Circuitul interfeței

### Senzori de temperatură cu circuit integrat

Senzorii de temperatură cu circuit integrat vin în diferite configurații. Un exemplu comun este seria LM34 și LM35. LM34 produce o tensiune de ieșire proporțională cu temperatura Fahrenheit, iar LM35 produce o ieșire proporțională cu temperatura Celsius. Figura 6.51 prezintă fișa de specificație (spec.) pentru LM35. Observați că are trei terminale active: tensiune de alimentare ( $V_S$ ), masă, și  $V_{out}$ .

Tensiunea de ieșire a LM35 este direct proporțională cu  $^{\circ}\text{C}$ , adică

$$V_{out} = 10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

Această ecuație afirmă că pentru fiecare creștere de  $1^{\circ}$  a temperaturii, tensiunea de ieșire crește cu 10 mV. Dacă trebuie măsurate numai temperaturile pozitive, atunci se poate folosi circuitul simplu prezentat în fișa de specificații (mijlocul inferior al figurii 6.51). Dacă trebuie măsurate temperaturi pozitive și negative, atunci se poate folosi circuitul din dreapta jos, care necesită o tensiune de alimentare pozitivă și negativă.

**Figura 6.51**

Senzorul de temperatură LM35 (prin amabilitatea National Semiconductor).


**National  
Semiconductor**

## LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D Precision Centigrade Temperature Sensors

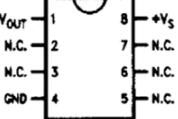
### General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of  $\pm \frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$  at room temperature and  $\pm \frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$  over a full  $-55$  to  $+150^{\circ}\text{C}$  temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only  $60\text{ }\mu\text{A}$  from its supply, it has very low self-heating, less than  $0.1^{\circ}\text{C}$  in still air. The LM35 is rated to operate over a  $-55$  to  $+150^{\circ}\text{C}$  temperature range, while the LM35C is rated for a  $-40$  to  $+110^{\circ}\text{C}$  range ( $-10^{\circ}$  with improved accuracy). The LM35 series is available packaged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-202 package.

### Features

- Calibrated directly in  $^{\circ}\text{C}$  (Centigrade)
- Linear  $+10.0\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  scale factor
- $0.5^{\circ}\text{C}$  accuracy guaranteed (at  $+25^{\circ}\text{C}$ )
- Rated for full  $-55$  to  $+150^{\circ}\text{C}$  range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than  $60\text{ }\mu\text{A}$  current drain
- Low self-heating,  $0.08^{\circ}\text{C}$  in still air
- Nonlinearity only  $\pm \frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$  typical
- Low impedance output,  $0.1\text{ }\Omega$  for 1 mA load

### Connection Diagrams

<p><b>TO-46 Metal Can Package*</b></p>  <p>BOTTOM VIEW</p> <p>TL/H/5516-1</p>	<p><b>TO-92 Plastic Package</b></p>  <p>BOTTOM VIEW</p> <p>TL/H/5516-2</p>	<p><b>SO-8 Small Outline Molded Package</b></p>  <p>TOP VIEW</p> <p>N.C. = No Connection</p> <p>TL/H/5516-21</p>
--	---	---

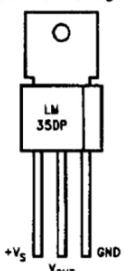
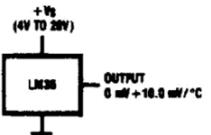
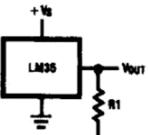
\*Case is connected to negative pin (GND)

**Order Number LM35H, LM35AH,  
LM35CH, LM35CAH or LM35DH  
See NS Package Number H03H**

**Order Number LM35CZ,  
LM35CAZ or LM35DZ  
See NS Package Number 203A**

**Order Number LM35DM  
See NS Package Number M08A**

### Typical Applications

<p><b>TO-202 Plastic Package</b></p>  <p>TL/H/5516-24</p> <p><b>Order Number LM35DP See NS Package Number P03A</b></p>	<p><b>FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)</b></p>  <p>TL/H/5516-3</p> <p><b>Choose R1 = -Vg/50 μA</b></p> <p><b>Vout = +1,500 mV at +150°C = +250 mV at +25°C = -550 mV at -55°C</b></p> <p><b>FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor</b></p>  <p>TL/H/5516-4</p>
---	--

**EXEMPLUL 6.16**

Construiți un senzor de temperatură utilizând LM35 care are următoarele specificații:

Domeniu de temperatură: 5-100°C

Tensiune de alimentare: 5 V

Ieșire: 0,1 V/°C

**SOLUȚIE**

Cerința de gamă nu este o problemă, deoarece LM35 are un interval de funcționare de la -55° la 150 °C. Sarcina se reduce la specificarea circuitului și amplificarea ieșirii pentru a îndeplini specificațiile.

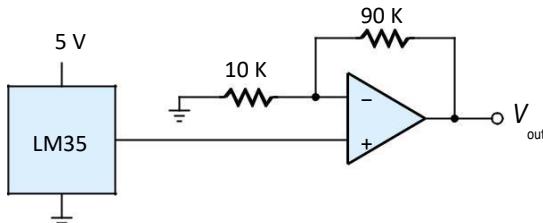
Deoarece intervalul de temperatură este pozitiv, putem folosi circuitul simplu desemnat ca "Figura 1" în fișa de specificații (Figura 6.51), folosind 5 V pentru tensiunea de alimentare.

Specificațiile necesită, de asemenea, 0,1 V = 1 °C, care este de zece ori mai mare decât ieșirea LM35. Această cerință poate fi îndeplinită cu un amplificator operațional prezentat în figura 6.52. (Amplificatoarele operaționale au fost discutate în capitolul 3.) Câstigul amplificatorului poate fi setat la 10 prin selectarea corectă a rezistențelor:

$$\text{Gain} = A = \frac{R_f}{R_a} + 1 = \frac{90 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} + 1 = 10$$

LM35 este un IC convenabil pentru utilizare, deoarece tensiunea de ieșire este în grade Celsius. Unele CIRCUITE, cum ar fi LM135, oferă o ieșire care este în grade kelvin. Un grad de kelvin sau Celsius reprezintă același interval de temperatură, dar **scara Kelvin** începe de la temperatura zero absolută, care este cu 273 °C sub îngheț. Există, de asemenea, o scară de temperatură zero absolută pentru grade fahrenheit, numită scara **Rankine**. Aceste patru scale de temperatură sunt comparate în figura 6.53.

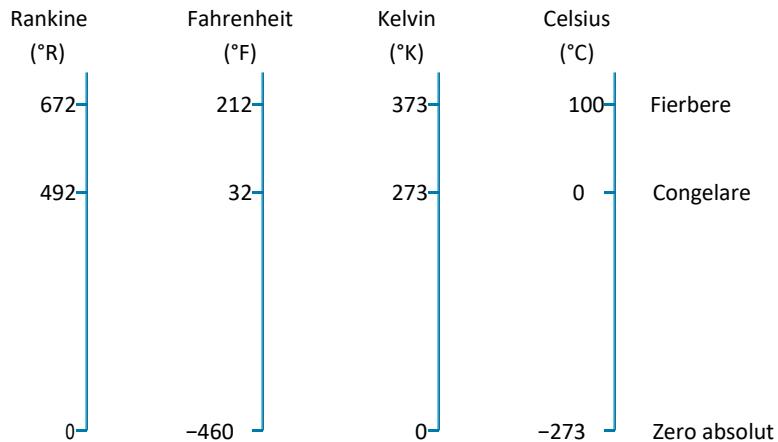
Un alt dispozitiv, AD7414 (Analog Devices), este un sistem digital complet de monitorizare a temperaturii. Într-un IC mic, cu 6 pini, are un senzor de temperatură, un ADC pe 10 biți și o interfață serială. De asemenea, poate fi programat cu limite de temperatură ridicată și scăzută; unul dintre pinii de ieșire indică momentul în care se depășește o limită programată.

**Figura 6.52**

Un circuit al senzorului de temperatură IC (exemplul 6.16).

**Figura 6.53**

Comparație între Rankine, Fahrenheit, Kelvin și Celsius  
Scări de temperatură.



Un alt dispozitiv, TMP01 (realizat de Analog Devices), a fost proiectat special pentru a fi un termostat cu un singur cip. Trei rezistoare externe pot stabili punctele de sus și de jos ale temperaturii. Ieșirile TMP01 pot conduce direct relee pentru a porni fie încălzirea, fie răcirea, după cum este necesar.

## 6.7 SENZORI DE DEBIT

**Senzorii de debit** măsoară cantitatea de material fluid care trece printr-un punct într-un anumit timp. De obicei, materialul este un gaz sau un lichid și curge într-o conductă sau un canal deschis. Curgerea de material solid, cum ar fi pietrișul care se deplasează pe o bandă transportoare, nu va fi luat în considerare în acest subcapitol. Traductoarele de debit vin în mai multe tipuri - cele care utilizează presiunea diferențială, cele în care fluxul rotește un dispozitiv mecanic și o clasă mai mică de senzori care utilizează tehnologii mai sofisticate.

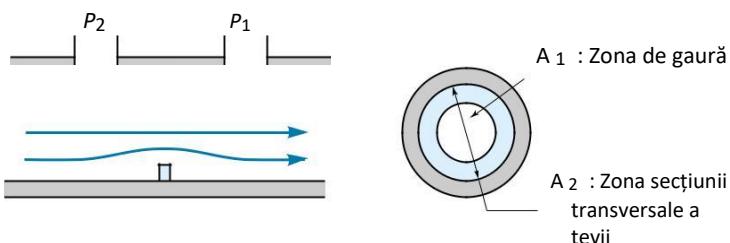
### Senzori de debit pe bază de presiune

Acest grup de senzori de debit se bazează pe faptul că presiunea într-un fluid în mișcare este proporțională cu fluxul. Presiunea este detectată cu un senzor de presiune; pe baza dimensiunilor fizice ale sistemului, debitul poate fi calculat. Cel mai simplu senzor de debit se numește **placa de orificiu** (Figura 6.54) și este pur și simplu o restricție în conductă care provoacă o scădere a presiunii în debit, la fel ca un rezistor care provoacă o scădere a tensiunii într-un circuit. Acest senzor necesită două porturi de presiune, unul în amonte și unul în aval de restricție. Debitul este proporțional cu diferența de presiune dintre aceste porturi și se calculează după cum urmează:

$$Q = CA \sqrt{\frac{2g}{d}(P_2 - P_1)} \quad (6.11)$$

**Figura 6.54**

O placă de orificiu.



unde

$$Q = \text{debit } (\text{in}^3)$$

$C$  = coeficientul de evacuare (aproximativ 0,63 pentru apă dacă orificiul plăcii este de cel puțin jumătate din dimensiunea conductei)

$$A = \text{suprafața orificiului } (\text{in}^2)$$

$$d = \text{densitatea de greutate a fluidului } (\text{lb/in}^3)$$

$$P_2 - P_1 = \text{diferența de presiune (psi)}$$

$$g = \text{gravitație (384 in./s}^2)$$

Ecuația fluxului (6.11) este o aproximare deoarece, pe lângă scăderea presiunii, debitul real depinde de efectele vitezei, raportul de suprafață  $A_1/A_2$  și starea suprafeței țevilor. Pentru a obține constanta corectă ( $C$  în ecuația 6.11) pentru o anumită aplicație, senzorul de debit ar trebui să fie calibrat.

### EXEMPLUL 6.17

Un debitmetru pentru apă este făcut pentru 3-in. - diametrul interior al unei țevi. Placa cu orificiu are o deschidere de 2 in. Care este debitul dacă scăderea presiunii pe placa de orificiu este de 0,2 psi?

#### SOLUȚIE

Vom folosi Ecuația 6.11 pentru a rezolva această problemă, dar mai întâi trebuie să ne dăm seama de valorile diferenților termeni:

$$C = 0.63 \text{ (we can start with this value because 2 in. is more than half of 3 in.)}$$

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times (1)^2 = 3.14 \text{ in}^2 \quad (\text{area of hole})$$

$$g = 32 \text{ ft/s}^2 = 384 \text{ in./s}^2 \quad (\text{gravity is a constant})$$

$$P_2 - P_1 = 0.2 \text{ psi} \quad (\text{a given})$$

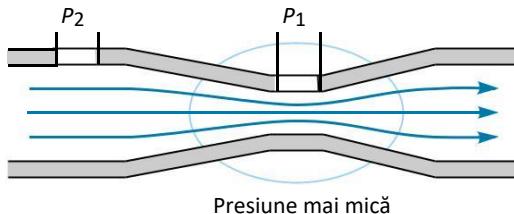
$$d = 64.4 \text{ lb/ft}^3 = 0.037 \text{ lb/in}^3 \quad (\text{weight density of water})$$

Acum putem pune acești termeni în ecuația 6.1 și obținem:

$$Q = CA \sqrt{\frac{2g}{d}(P_2 - P_1)}$$

**Figura 6.55**

Un senzor de debit pentru fluide.



$$= (0.63)(3.14 \text{ in}^2) \sqrt{\frac{2(384 \text{ in.})}{\text{s}^2} \frac{\text{in}^3}{0.037 \text{ lb}} \frac{(0.2 \text{ lb})}{\text{in}^2}} = 127 \text{ in}^3/\text{s}$$

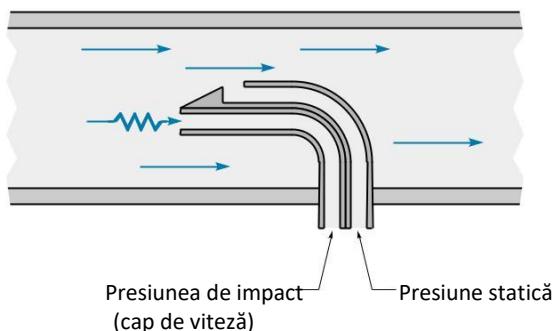
Prin urmare, vom avea  $127 \text{ in}^3/\text{s}$  de debit de apă în conductă. Pentru a face acest lucru cu un debitmetru mai precis, ar trebui să măsurăm debitul cu un alt debitmetru fiabil și apoi să ajustăm  $C$  în ecuația fluxului pentru a face citirile consistente cu ceea ce știm că sunt.

Un alt senzor de debit bazat pe presiune utilizează restricții "venturi" pentru a crea diferență de presiune, așa cum este ilustrat în Figura 6.55. Un **venturi** este o restricție treptată în conductă care determină creșterea vitezei fluidului în zona restricționată. Această zonă de viteză mai mare are o presiune mai mică. Debitul este proporțional cu diferența de presiune dintre  $P_2$  și  $P_1$ . Senzorul de debit venturi倾de să mențină debitul mai constant (neted), dar atât placa de orificiu, cât și restricția venturii provoacă scăderi de presiune în conductă, ceea ce poate fi inacceptabil.

Un senzor de debit pe bază de presiune care provoacă o restricție minimă este **tubul pitot**. Tubul **pitot** este un tub mic deschis în care intră fluxul (Figura 6.56). Sonda de acționare constă din două tuburi: Unul intră în flux și raportează **presiunea de impact** (adesea numit cap de viteză), iar unul se deschide perpendicular pe flux și raportează presiunea **statică**. Presiunea de impact este întotdeauna mai mare decât presiunea statică și

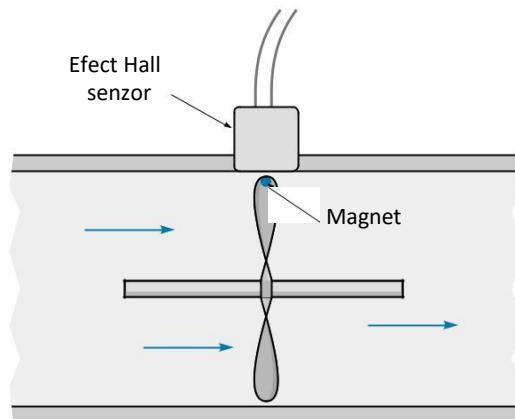
**Figura 6.56**

Un tub pitot.



**Figura 6.57**

Un senzor de debit al turbinei.



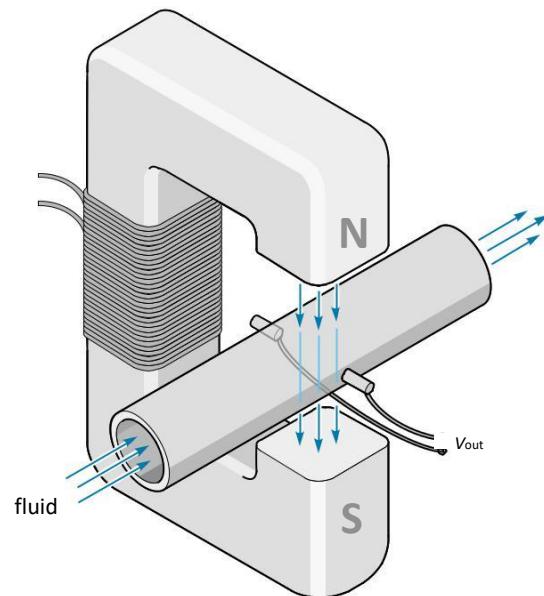
diferența dintre aceste două presiuni este proporțională cu viteza și, prin urmare, cu fluxul. Utilizările comune pentru tubul pitot sunt pentru aeronave și indicatori de viteză marină.

### Senzori de debit turbină

**Turbine**, sau de tip spin, senzori de debit (de asemenea, numit debitmetru), folosesc o roată cu zbaturi sau elice plasate în linia de curgere. Viteza de rotație a roții este direct proporțională cu viteza de curgere. Figura 6.57 oferă o ilustrare a acestui tip de senzor de flux. Un magnet mic este atașat la una dintre lame și este montat un senzor cu efect Hall

**Figura 6.58**

Un debitmetru magnetic.



. Senzorul Hall oferă un puls pentru fiecare revoluție a lamelor. Faptul că rulmenții se află în mediul de curgere poate elimina acest tip de senzor pentru unele aplicații, în special fluidele de înaltă temperatură sau de tip abraziv.

### Debitmetre magnetice

Dacă un lichid este chiar ușor conductiv (și multe sunt), se poate folosi un debitmetru magnetic. Prezentat în figura 6.58, debitmetrul magnetic nu are părți în mișcare și nu prezintă nicio obstrucție a fluxului. O secțiune neconductoare a țevii este plasată într-un câmp magnetic. Fluidul în mișcare din țeavă este ca și conductorul în mișcare într-un generator și produce o tensiune. Tensiunea, care este proporțională cu viteza fluidului, este detectată de electrozi plasați în părțile laterale ale țevii.

---

## 6.8 SENZORI LA NIVEL DE LICHID

*Senzorii de nivel lichid*, care măsoară înălțimea unui lichid într-un recipient, au două clasificări: discrete și continue. Detectoarele de nivel discret pot detecta doar dacă lichidul este la un anumit nivel. Detectorul de nivel continuu oferă un semnal analogic proporțional cu nivelul lichidului.

### Detectoare la nivel discret

**Detectoarele de nivel discret** determină când un lichid a atins un anumit nivel. O aplicație de acest tip ar fi determinarea momentului în care să se opreasă ciclul de umplere al unei mașini de spălat. Cel mai simplu tip de detector de nivel utilizează un flotor și un comutator de limită. Există multe configurații posibile ale unui detector de nivel plutitor - una este ilustrată în Figura 6.59 (a). În acest caz, flotorul este atașat la o tijă verticală. La un anumit nivel de lichid, cama, care este atașată la tijă, activează comutatorul limită. Nivelul de activare poate fi ajustat prin relocarea fie a camei, fie a comutatorului.

Un alt tip de detector de nivel se bazează pe o fotocelulă [Figura 6.59 (b)]. Când nivelul lichidului intrerupe calea luminii, semnalul fotodetector se schimbă, indicând astfel prezența lichidului.

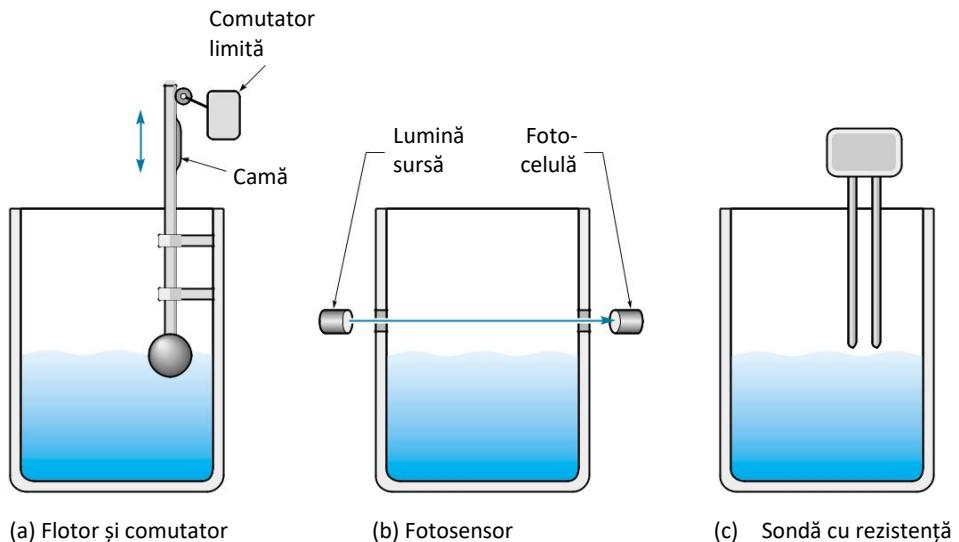
Multe lichide, cum ar fi apa de la robinet, acizii slabii, berea și cafeaua (pentru a numi câteva) - sunt ușor conductive, ceea ce oferă un alt mijloc de detectare. După cum se arată în figura 6.59 litera (c), o sondă electrică este suspendată peste lichid. Când lichidul ajunge la sondă, rezistența în circuit scade brusc. O utilizare obișnuită a acestui senzor este ca un senzor de răcire scăzută la automobile.

### Detectoare de nivel continuu

**Detectoarele de nivel continuu** oferă un semnal proporțional cu nivelul lichidului. Există o serie de moduri în care se poate face acest lucru. Una dintre cele mai directe metode

**Figura 6.59**

Detectoare de nivel.



(utilizat în rezervorul de gaz al mașinii) este un flotor conectat la un senzor de poziție. Figura 6.60 litera (a) ilustrează o punere în aplicare a acestei metode.

O altă modalitate de a măsura nivelul lichidului este măsurarea presiunii din partea inferioară a recipientului [Figura 6.60 (b)]. Această metodă se bazează pe faptul că presiunea la partea de jos a rezervorului (numit **cap**) este direct proporțională cu nivelul, exprimat în ecuația 6.12:

$$\text{Presiune} = P = dH \quad (6.12)$$

unde

$P$  = presiunea manometrului în partea de jos (cap)

$d$  = densitatea greutății (greutatea lichidului pe unitatea de volum)  $H$  = înălțimea lichidului din rezervor

### EXEMPLUL 6.18

Calculați care ar fi presiunea (capul) în partea de jos a unui rezervor de apă adâncă de 10 ft.

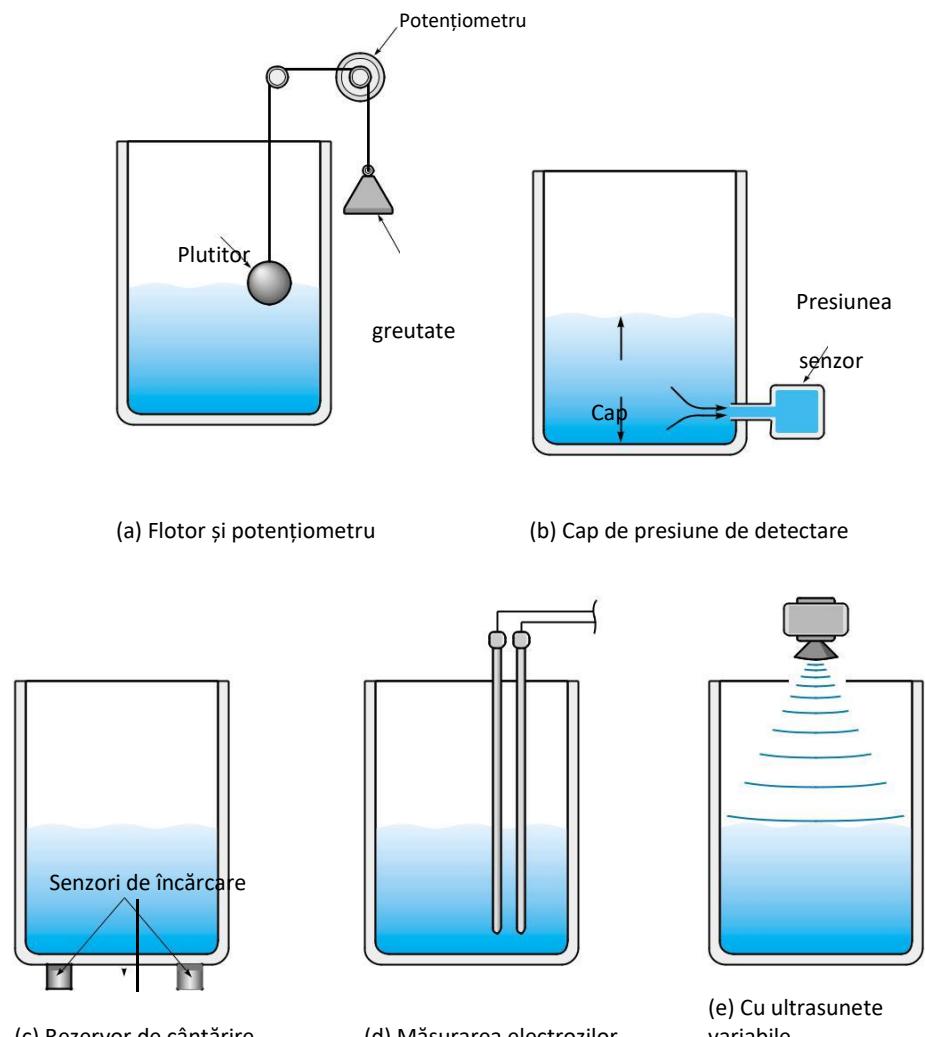
### SOLUȚIE

Pentru a utiliza ecuația 6.12, trebuie să cunoaștem densitatea în greutate a fluidului (care poate fi găsită de obicei într-o carte de date tehnice). Densitatea pentru apă este de aproximativ  $64 \text{ lb / ft}^3$ :

$$P = dH = 64 \text{ lb/ft}^3 \times 10 \text{ ft} = 640 \text{ lb/ft}^2$$

**Figura 6.60**

Metode de detectare continuă a nivelului.



(a) Flotor și potențiometru

(b) Cap de presiune de detectare

(c) Rezervor de înărcire

(d) Măsurarea electrozilor R sau C

(e) Cu ultrasunete variabile

Poate dorim să convertim acest rezultat în psi (lb/in<sup>2</sup>):

$$640 \text{ lb}/\text{ft}^2 \times \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} = 4.44 \text{ lb}/\text{in}^2$$

Amintiți-vă că 4.44 psi este presiunea manometrului, ceea ce înseamnă că presiunea la partea de jos a rezervorului este cu 4,44 psi mai mare decât este la suprafață. Presiunea absolută în partea de jos ar fi

$$4.44 \text{ psi} + 14.7 \text{ psi} = 19.1 \text{ psi}$$

Ecartament absolut ambiental

**EXEMPLUL 6.18 (Repetat cu unități SI)**

Calculați care ar fi presiunea (capul) în partea de jos a unui rezervor de apă adâncă de 3 m.

**SOLUȚIE**

Pentru a utiliza ecuația 6.12, trebuie să cunoaștem densitatea în greutate a fluidului (care poate fi găsită de obicei într-o carte de date). Densitatea de greutate pentru apă este de  $9800 \text{ N/m}^3$ :

$$P = dH = \frac{9800 \text{ N}}{\text{m}^3} \times 3 \text{ m} = 29,400 \text{ N/m}^2 = 29,400 \text{ Pa}$$

Presiunea manometrului din partea inferioară a rezervorului este de 29.400 Pa.

Monitorizarea greutății lichidului cu celule de sarcină este o altă tehnică care poate determina nivelul lichidului [Figura 6.60 (c)]. Nivelul poate fi apoi calculat cunoscând diametrul și greutatea rezervorului (gol) și densitatea fluidului. Rețineți că greutatea totală a rezervorului este *suma* greutăților raportate de cele trei celule de sarcină.

Unele dispozitive pot detecta direct nivelul lichidului. Dispozitivul prezentat în figura 6.60 litera (d) este pur și simplu doi electrozi verticali montați în interiorul rezervorului. Ieșirea dispozitivului, care trebuie amplificată sau prelucrată în alt mod, este fie rezistență, fie capacitate și este proporțională cu nivelul. Figura 6.60 litera (e) prezintă un alt sistem de detectare directă a nivelului. Acest sistem utilizează un detector cu ultrasunete-gama montat peste rezervor. Unitatea completă, care include traductorul și electronica, poate fi achiziționată ca modul și este destul de ieftină.

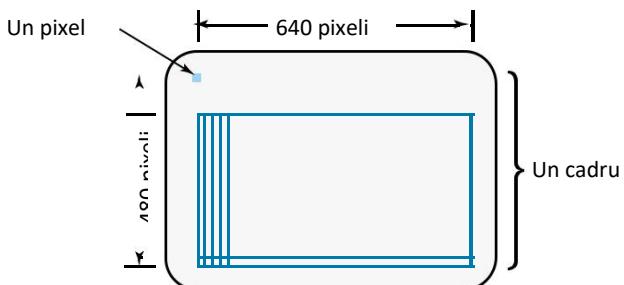
## 6.9 SENZORI DE VEDERE

Un **senzor de vedere** este o cameră TV conectată la un computer. "Vederea" mașinii este utilizată pentru a efectua inspecții și pentru a ghida operațiunile mașinii. De exemplu, un sistem ar putea utiliza viziunea mașinii pentru a determina dacă piesele au fost făcute sau asamblate în mod corespunzător sau dacă un sistem de vedere ar putea fi utilizat pentru a respinge portocalele pătate de pe o linie de prelucrare a fructelor. Alternativ, un sistem de vedere ar putea fi folosit pentru a oferi îndrumare unui robot pick-and-place pentru a face lucruri precum descărcarea cutiilor de pe un palet sau introducerea componentelor într-o placă de circuit.

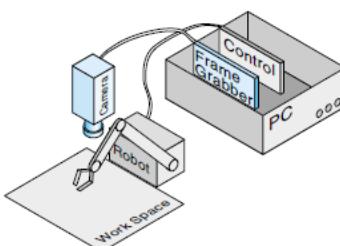
Sistemele Vision necesită putere de calcul pentru a procesa mii de pixeli de informații în mod continuu pentru a ajunge la o decizie de tipul *du-te / sau nu te duce cu privire la ceea ce este "văzut"* [a se vedea figura 6.61 (a)]. În trecut, acest lucru se putea face numai cu hardware dedicat, scump. Dar două evoluții în tehnologia PC-ului au schimbat această situație. Prima este noua generație de microprocesoare rapide și puternice, cum ar fi cele care folosesc Pentium cu tehnologie MMX. A doua evoluție este adoptarea PIC

Figura 6.61

Concepțe de sistem vision.



- (a) Un cadru este o "imagină statică" și este de obicei de 640 x 480 pixeli



(b) Componentele sistemului vision

magistrală de expansiune pentru PC-uri. Cardurile PCI pot comunica cu microprocesorul la o rată de date mult mai mare decât ar putea cardurile ISA mai vechi. Astfel, tehnologia a evoluat până în punctul în care PC-urile au devenit low-cost și au puterea de a procesa informațiile video în mod eficient, făcând sistemele de vedere practice. Sistemele ghidate de viziune efectuează acum operații care înainte trebuiau efectuate manual sau cu sisteme multi-senzori complicate, dar inflexibile.

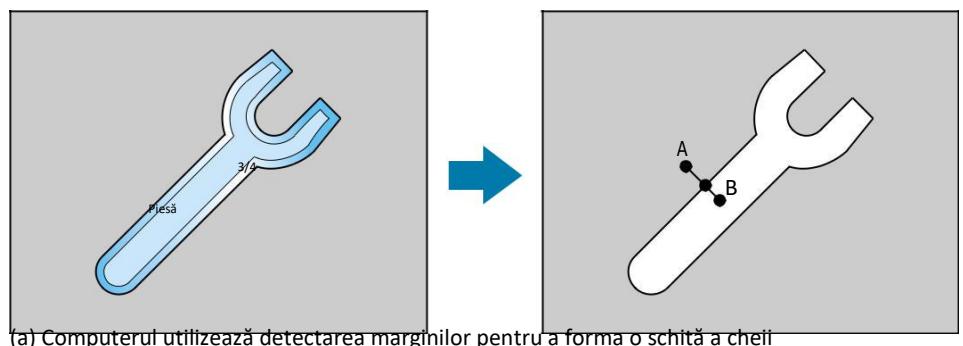
Hardware-ul pentru un sistem de vizibilitate este prezentat în Figura 6.61 (b) și constă dintr-o cameră electronică conectată la un card PCI special de procesare video (numit *frame grabber*). Cardul PCI este conectat la un PC bazat pe Pentium care rulează un software special de recunoaștere a imaginii. De obicei, camera este montată rigid, astfel încât să se uite în jos la zona de interes. Informațiile vizuale sunt transmise de la aparatul de fotografiat la cardul de prindere a cadrului. Cardul convertește informațiile vizuale în format digital, care este în mod tipic un cadru de 640 pe 480 de pixeli [a se vedea figura 6.61 litera (a)]. Fiecare pixel este reprezentat de un număr de 8 biți la scară gri numit *intensitate*, ceea ce înseamnă că fiecărui pixel i se atribuie una dintre cele 255 de nuanțe între alb și negru. Apoi, întregul cadru este transmis pe PC (prin magistrala PCI încorporată a PC-ului) de până la 30 de ori pe secundă. PC-ul se execută un software

care analizează continuu datele vizuale baza unor criterii și apoi trimite semnale înapoi în zona de lucru fie pentru a respinge o parte care a "eșuat" de inspecție sau pentru a direcționa un robot pick-and-place pentru a trece la un anumit loc pentru a ridica o cutie.

Există o serie de abordări diferite pentru prelucrarea datelor vizuale; care dintre ele utilizate depinde de aplicația particulară. Probabil cel mai comun sistem se bazează pe detectarea marginilor. În **detectarea muchiilor**, computerul încearcă să definească marginile obiectului. Figura 6. 62(a) prezintă rezultatele procesului de detectare a marginilor. Computerul scaneză întregul cadru în căutarea muchiilor - le detectează pe baza modificărilor intensității scării gri. O margine este în cazul în care există o discontinuitate de intensitate acută. Se detectează pe baza a trei parametri: *contrast*, *lățime* și *abruptitate*, așa cum se diagramă în figura 6.62b. Contrastul este diferența numerică de intensitate dintre două zone adiacente ale cadrului; abruptitatea este cât de repede se schimbă intensitatea între zone; iar lățimea este dimensiunea minimă a zonei de intensitate uniformă de pe fiecare parte a marginii. Marginea reală este definită ca fiind cel mai abrupt loc din curba intensității. Valorile de prag ale

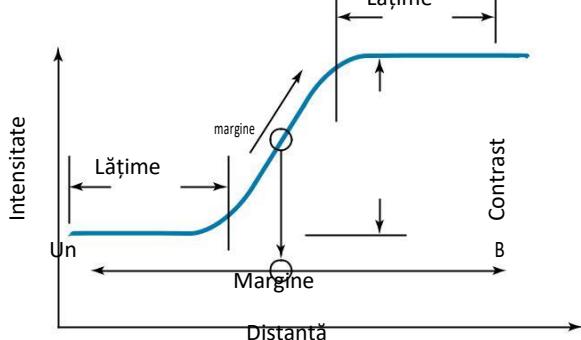
Imagine TV reală

Conturul detectat



(a) Computerul utilizează detectarea marginilor pentru a forma o schiță a cheii

(a) Computerul utilizează detectarea marginilor pentru a forma o schiță a cheii



(b) Computerul definește marginea pe baza contrastului, lățimii și lungimii

**Figura 6.62**

Vederea mașinii folosind detectarea marginilor.

încerca să identifice marginile pot fi optimizate pentru a obține cea mai bună performanță în fiecare aplicație în parte. De asemenea, iluminarea puternică și fundalurile contrastante pot fi folosite pentru a accentua marginile cât mai mult posibil.

Odată ce conturul unui obiect este creat în computer, dimensiunile pot fi verificate pe imaginea vizuală pentru a determina dacă piesa este acceptabilă. De exemplu, Figura 6.63 prezintă un sistem care inspectează piese turnate. Fiecare turnare în formă de hexagon poate fi verificată cu trei măsurători. De asemenea, observați că hexagoanele nu trebuie să fie în aceeași orientare pe linia de asamblare. Software-ul poate fi scris pentru a face măsurările în orice orientare.

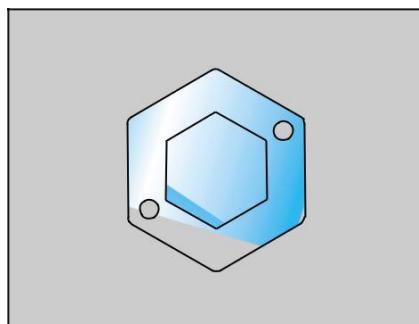
O altă utilizare a sistemelor de viziune este de a ghida roboții pick-and-place. Pentru această sarcină, sistemul de viziune îi spune robotului unde este piesa și în ce orientare, astfel încât robotul să o poată apuca. De exemplu, luați în considerare cazul în care un robot trebuie să ridice cheia din figura 6.62 litera (a) și să o pună într-o cutie. Odată ce computerul a generat imaginea pe baza detectării marginii, acesta poate procesa matematic forma pentru a ajunge la centru (mijloc) și la axa lungă. Folosind aceste informații, mânerul robotului se poate poziționa peste cheie pentru a-l ridica.

**Figura 6.63**

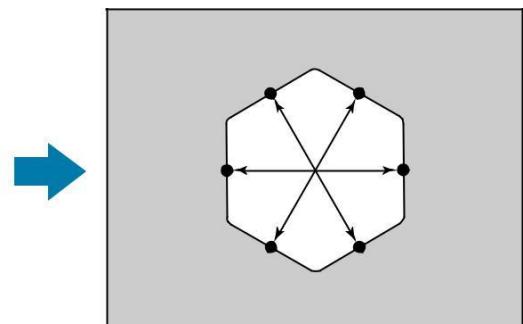
Folosind un sistem de viziune pentru a inspecta piese turnate hexagon.

contrastul,  
abruptitatea și  
lățimea pe care  
computerul le  
utilizează pentru a

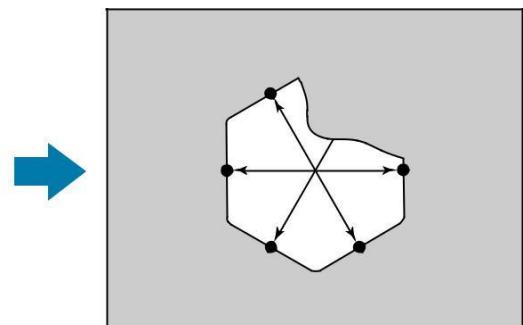
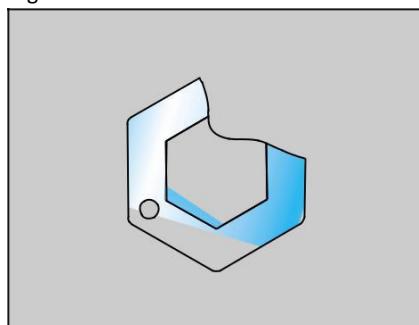
Imagine TV reală



Imagine detectată de Margine



(a) Computerul localizează şase puncte și efectuează verificări ale trei dimensiuni; partea este în regulă



(b) O verificare a dimensiunii nu reușește; partea este respinsă

Încă o altă tehnică se numește recunoașterea modelelor. *Recunoașterea tipelor* este utilizată atunci când un obiect trebuie identificat. De exemplu, într-un sistem utilizat pentru a sorta piese în coșuri diferite, computerul menține o bibliotecă a formelor de piese așteptate și, utilizând diverși algoritmi "cei mai potriviti", încearcă să găsească cea mai bună potrivire pentru fiecare formă de imagine particulară. Într-o altă aplicație, sarcina computerului ar putea fi scanarea întregului cadru vizual în căutarea unei anumite forme, cum ar fi un model de gaură, pentru a ghida un robot să monteze o componentă.

## REZUMAT

Senzorii, numiți și traductori, sunt dispozitive care măsoară parametrii fizici, cum ar fi poziția, temperatura sau presiunea. În cele mai multe cazuri, senzorul generează o tensiune analogică (sau o valoare digitală) care este proporțională cu parametrul măsurat.

Senzorii de poziție măsoară poziția fizică a unui obiect. Potențiometrele măsoară poziția unghiulară și dau o ieșire analogică. Codificatorul optic, un alt tip de senzor de poziție, folosește un disc cu fante și un senzor foto. Ieșirea codificatorului optic este în formă digitală. Mișcarea liniară poate fi detectată cu un potențiometru cu mișcare liniară sau cu un transformator diferențial variabil liniar (LVDT). LVDT utilizează o parte mobilă în interiorul unui transformator special. Faza și magnitudinea ieșirii de curent alternativ pot fi procesate pentru a furniza informații despre poziție.

Senzorii de poziție pot determina viteza prin procesarea datelor din două eșantioane de poziție secvențiale. Metoda mai directă de a măsura viteza este de a utiliza un tachometru. Un tachometru DC este de fapt un generator mic care oferă o tensiune DC proporțională cu viteza. Tachometrele optice dau un puls pentru fiecare rotație a unui arbore.

Senzorii de proximitate determină dacă un obiect a ajuns într-un anumit loc. Cel mai simplu mod de a face acest lucru este cu un comutator mecanic limitator. Alte metode ar include utilizarea unui senzor foto sau a unui comutator cu efect Hall. Comutatorul cu efect Hall oferă o ieșire dacă un magnet este adus lângă un semiconductor special configurat.

Senzorii de sarcină pot determina forța prin măsurarea deformării mici pe care o provoacă forța. Metoda tradițională de măsurare a forțelor mari este cu un tensiometru cu conductor (fir) lipit. Acest dispozitiv încorporează un model de fire subțiri. Când este întins, rezistența firelor se schimbă. O altă metodă de măsurare a forței utilizează efectul piezorezistiv al semiconducțorilor - adică rezistența se schimbă atunci când materialul este comprimat.

Senzorii de presiune măsoară presiunea lichidelor și a gazelor. O clasă de senzori de presiune, cum ar fi cu burduf, folosește presiunea pentru a provoca mișcare

mecanică. Senzorii de presiune semiconductori transformă presiunea direct în rezistență electrică.

O mare varietate de senzori de temperatură sunt în uz. Benzile bimetalice simple se vor îndoia atunci când sunt încălzite și pot activa apoi contactele comutatorului. Termocuplul este un dispozitiv tradițional de detectare a temperaturii ridicate care utilizează faptul că joncțiunea a două metale diferite va crea o tensiune mică atunci când este încălzită. Detectorul de temperatură cu rezistență (RTD) utilizează faptul că unui fir îi va crește rezistența atunci când este încălzit. Sunt disponibile numeroase dispozitive semiconductoare care "transformă" temperatură direct în rezistență sau tensiune.

Senzorii de debit măsoară fluxul unui fluid într-o conductă sau într-un canal deschis.. Diferența de presiune dintre cele două locuri este proporțională cu viteza fluidului. Senzorii de debit ai turbinei folosesc lichidul în mișcare pentru a roti o elice. Turația elicei este proporțională cu viteza.

Senzorii de nivel lichid determină nivelul lichidului dintr-un rezervor. Tipul discret poate simți numai dacă nivelul este la sau deasupra unui anumit punct. Exemple de detectoare de nivel discret sunt un flotor care activează un comutator limită sau un senzor foto. Detectorul de nivel continuu oferă o ieșire analogică proporțională cu nivelul fluidului. Există multe moduri diferite în care se poate face acest lucru - de exemplu, conectarea unui flotor la un potențiometru, monitorizarea presiunii din partea inferioară a rezervorului sau monitorizarea greutății rezervorului cu celule de sarcină.

Senzorii de vedere sunt utilizati din ce în ce mai mult pentru lucruri precum inspectarea pieselor și ghidarea roboților în operațiunile de asamblare. Un sistem de vizibilitate constă dintr-o cameră TV conectată la un computer, de obicei un PC. Software-ul special de vizionare analizează imaginea video și face recomandări specifice zonei de lucru.

---

## GLOSAR

**codificator optic absolut** Un codificator rotativ optic care generează un cuvânt binar care reprezintă poziția unghiulară.

**presiune absolută** Diferența de presiune dintre valoarea măsurată și vidul absolut.

**senzor de temperatură bimetalic** O bandă din două metale cu coeficienți diferenți de expansiune termică; ca banda se încălzește, se îndoiește.

**Tub Bourdon** Un tip de senzor de presiune format dintr-un tub scurt îndoit închis la un capăt; presiunea din interiorul tubului tinde să-l îndrepte.

**joncțiune rece** Una dintre cele două joncțiunile sensibile la temperatură ale senzorului cu termocuplu. Joncțiunea rece este de obicei păstrată la o temperatură de referință.

**gabarit de compensare** Un tensiometru neactiv care este utilizat exclusiv în scopul anulării efectelor de temperatură.

**detector de nivel continuu** Un senzor care poate determina nivelul fluidului dintr-un recipient.

**presiune diferențială** Diferența dintre două presiuni în cazul în care nici una nu poate fi ambientală.

**tahometru de curent continuu** În esență, un generator de curent continuu care oferă o tensiune de ieșire proporțională cu viteza unghiulară.

**detector de nivel discret** Un senzor care poate determina dacă lichidul dintr-un recipient a atins un anumit nivel.

**detectarea muchiilor** Utilizată în sistemele de vizualizare a mașinii; procesul prin care un computer creează o imagine vizuală a unui obiect prin localizarea marginilor acestuia.

**senzor de debit** Un senzor care măsoară cantitatea de lichid care curge într-o conductă sau canal.

**presiunea manometrului** Diferența dintre presiunea măsurată și cea ambientală (mediul ambiant este de 14,7 psi sau 101,3 kPa).

**Cod Gray** O secvență de stări digitale care a fost proiectată astfel încât doar 1 bit să se schimbe între oricare două stări adiacente.

**Efect Hall** Fenomen fizic al unui material semiconductor care generează o tensiune atunci când se află în prezența unui câmp magnetic; utilizat în principal ca senzor de proximitate.

**Legea lui Hooke** Deformarea într-un arc este direct proporțională cu forța asupra arcului (forța arcului = constantă × deformarea arcului).

**joncțiune caldă** Una dintre cele două joncțiuni sensibile la temperatură ale senzorului cu termocuplu. Joncțiunea caldă este utilizată pe sondă.

**baie de apă cu gheăță** O modalitate tradițională de a crea o temperatură de referință cunoscută pentru joncțiunea rece a unui termocuplu.

**presiunea de impact** Presiunea dintr-un tub deschis (pitot).

**codificator optic incremental** Un codificator rotativ optic care are o pistă de sloturi distanțate; poziția este determinată prin numărarea numărului de sloturi care trec pe lângă un senzor foto.

**Scara Kelvin** Scara de temperatură Kelvin începe de la zero absolut, dar un grad Kelvin are aceeași creștere a temperaturii ca un grad Celsius ( $0^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$ ).

**cel mai puțin semnificativ bit** Partea din dreapta a unui într-un număr binar, ce (LSB) cea mai mică cantitate reprezentă schimbarea care

**comutator limită** Un comutator folosit ca senzor de proximitate - adică un comutator montat astfel încât să fie activat de o parte în mișcare.

**eroare de liniaritate** O eroare de măsurare indusă în sistem de senzorul însuși, este diferența dintre cantitatea reală și ceea ce senzorul raportează că este.

**transformator diferențial variabil liniar (LVDT)** Un tip de senzor de poziție cu mișcare liniară. Mișcarea unui miez magnetic, cărui îi este permis să alunece în interiorul unui transformator, este proporțională cu faza și magnitudinea tensiunii de ieșire.

**eroare de încărcare** O eroare care poate apărea într-un semnal de tensiune analogic atunci când circuitul condus atrage prea mult curent, producând astfel "încărcarea" tensiunii.

**LSB** A se vedea cel mai puțin semnificative **pic**.

**LVDT** A se vedea **transformator diferențial variabil liniar**.

**codificator rotativ optic** Un senzor rotativ de poziție rotativă care funcționează prin rotirea unui disc cu fante în fața unui senzor foto.

**tahometru optic** Montat pe un arbore rotativ, și un senzor foto care dă un puls pentru fiecare rotație (o bandă este vopsită sau fixată pe arbore).

**plăcă de orificiu** Un tip de senzor de debit prin care o restricție este plasată într-o conductă care provoacă o diferență de presiune (între fiecare parte a restricției) proporțională cu debitul.

**fotodiодă** Un tip de senzor optic, care crește curentul de scurgere inversă atunci când este expus la lumină.

**rezistor foto** Un tip de senzor optic; rezistența sa scade atunci când este expus la lumină.

**tranzistor foto** Un tip de senzor optic; lumina acționează ca un curent de bază și pornește tranzistorul.

**celulă fotovoltaică** Un dispozitiv care transformă lumina în energie electrică; folosit ca senzor optic sau ca celulă solară.

**efect piezorezistiv** O proprietate a semiconductorilor în care rezistența se schimbă atunci când este supusă unei forțe.

**potențiometru** Un rezistor variabil care poate fi utilizat ca senzor de poziție.

**senzor de proximitate** Un senzor care detectează prezența fizică a unui obiect.

**PSI** Greutatea pe un inch pătrat, o unitate de presiune.

**tub pitot** Un senzor de viteza pentru fluide prin care un mic tub deschis este plasat direct în flux; presiunea din tub este proporțională cu viteza fluidului.

**Scara Rankine** Scala de temperatură Rankine începe de la zero absolut, dar un grad Rankine are aceeași creștere de temperatură ca un grad Fahrenheit ( $0^{\circ}\text{F} = 460^{\circ}\text{R}$ ).

**detector de temperatură de rezistență (RTD)** Un senzor de temperatură bazat pe faptul că rezistența unui fir metalic va crește atunci când temperatura crește.

**rezoluție** Cea mai mică creștere a datelor care pot fi detectate sau raportate. Pentru un sistem digital, rezoluția este, de obicei, valoarea bitului cel mai puțin semnificativ.

**RTD** A se vedea **detectorul de temperatură de rezistență**.

**Efect seebeck** Proprietatea folosita de un termocuplu, în care o tensiune proporțională cu temperatura este dezvoltata într-un circuit format din joncțiuni de fire metalice diferite.

**senzor** Un dispozitiv care măsoară un parametru fizic, cum ar fi temperatura, presiunea sau poziția.

**slider (cursor)** Contactul în mișcare al unui potențiometru, de obicei centrul a trei terminale.

**cuplaj cu fante** Un senzor optic de proximitate care este activat atunci când un obiect "taie" un fascicul de lumină.

**presiune statică** Presiunea măsurată atunci când tubul de măsurare deschis este direcționat perpendicular către debit.

**stres** Supunerea unui obiect la tensiuni sau forțe de compresie. Stresul este forța pe unitatea de suprafață din interiorul obiectului.

**termistor** Un senzor de temperatură bazat pe faptul că rezistența unor semiconductori va scădea pe măsură ce temperatura crește.

**termocuplu** Un senzor de măsurare a temperaturii realizat din joncțiunea a două fire metalice diferite; atunci când joncțiunea este încălzită, se generează o tensiune mică.

**detector de prag** Un circuit care oferă un semnal clar de oprire atunci când o tensiune analogică se ridică peste un anumit nivel.

**tahometru cu rotor dințat** Un tahometru care constă din două părți: o roată dințată, pe bază de fier, atașată la membrul rotativ și un senzor staționar. Senzorul dă un puls de fiecare dată când un dintă trece.

**traductor** Un termen folosit alternativ cu *senzorul*. Literalmente înseamnă că energia este convertită, ceea ce face un senzor.

**turbină** Un senzor de debit bazat pe faptul că fluidul rotește o elice.

**senzor de retință variabilă** Un magnet cu o bobină în jurul său. Poate detecta mișcarea fierului în vecinătate. Utilizat de obicei cu tahometrul cu rotor dințat.

**venturi** Un tip de senzor de debit prin care fluidul este forțat într-un canal mai mic, ceea ce îi crește viteza; fluidul cu viteză mai mare are o presiune mai mică (decât fluidul din canalul principal), iar diferența de presiune este proporțională cu viteza.

**senzor de vedere** Un sistem prin care un computer analizează o imagine video în scopul inspectării pieselor sau ghidării unui robot sau a unei mașini.

**ștergător** Vezi **glisorul**.

**Reostatul** Un rezistor variabil care utilizează o bobină de rezistență pentru elementul rezistiv; poate fi folosit ca un senzor de poziție.

**Modul young** O constantă care se referă la stres și presiune pentru un anumit material (modulul lui Young = stres / tulpină).

## EXERCIȚII

### Secțiunea 6.1

1. Un potențiometru cu o gamă totală de  $350^\circ$  este alimentat cu o tensiune de 12 Vdc. Găsiți tensiunea de ieșire pentru un unghi de  $135^\circ$ .
2. Un potențiometru cu o gamă totală de  $350^\circ$  este alimentat cu o tensiune de 8 Vdc. Tensiunea la cursor este de 3,7 Vdc. Care este unghiul actual al potențiometrului?
3. Un potențiometru de  $10\text{ k}\Omega$  este folosită ca senzor de poziție cu o sursă de alimentare de 10 V. Rezistența la intrare la circuitul de interfață este de  $50\text{ k}\Omega$ . Găsiți eroarea de încărcare atunci când cursorul se află în mijlocul gamei sale.
4. Un potențiometru de  $5\text{ k}\Omega$  este folosită ca senzor de poziție cu o sursă de alimentare de 10 V. Rezistența la intrare la circuitul de interfață este de  $40\text{ k}\Omega$ . Găsiți eroarea de încărcare atunci când potențiometrul este setat la trei sferturi din gama sa.
5. Un potențiometru cu o gamă totală de  $350^\circ$  are o liniaritate de 0,25% și este conectat la o sursă de 10 V. Dacă potențiometrul este folosită ca senzor de poziție, găsiți eroarea maximă posibilă în grade.
6. Un potențiometru cu spire de  $350^\circ$  are 300 de spire și o rezistență totală de  $1\text{ k}\Omega$ . Care este rezoluția în ohmi? În grade?
7. Un potențiometru de  $350^\circ$  este conectat la un arbore printr-un raport de transmisie de 3: 1 (potențiometrul se rotește de trei ori mai repede decât arborele). Potențiometrul are o liniaritate de 0,2%.
  - a. Care este unghiul maxim pe care arborele îl poate roti?
  - b. Care este diferența maximă în grade față de locul în care se află arborele și unde potențiometrul raportează că este?
8. Un potențiometru cu o gamă totală de  $350^\circ$  este furnizată cu 5 Vdc. Ieșirea potențiometrului este convertită în binar cu un ADC pe 8 biți (care este, de asemenea, alimentat la 5 Vdc). Găsiți ieșirea binară pe 8 biți a ADC pentru un unghi de potențiometru de  $60^\circ$ .
9. Un potențiometru de  $350^\circ$  este conectat printr-un raport de transmisie de 4: 1 la un arbore care se rotește la  $80^\circ$  (potențiometrul se rotește de patru ori mai repede decât arborele). Potențiometrul are o tensiune de alimentare de 5 V și se couplează cu un convertor ADC pe 8 biți. ADC are o tensiune de referință de 5 V. LSB-ul ADC trebuie să fie de  $0,4^\circ$  sau mai mic. Acest sistem va îndeplini cerințele?
10. Un codificator rotativ optic absolut are cinci biți. Câți biți este ieșirea și care este rezoluția în grade pe stare (adică grade pe LSB)?
11. Un codificator rotativ optic absolut într-o anumită aplicație trebuie să aibă o rezoluție de  $3^\circ$ . Câți biți trebuie să aibă?
12. Un codificator rotativ optic incremental are 720 de sloturi. Pornind de la punctul de referință, discul transformă 200 de sloturi CW, apoi 80 sloturi CCW, apoi 400 sloturi CW. Care este unghiul final al arborelui?

- 13.** Contorul pentru un codificator rotativ optic incremental cu 500 de sloturi și are o valoare de 101100011.  
a. Care este rezoluția în grade - adică care este valoarea LSB-ului?  
b. Care este unghiul actual al arborelui codificatorului?

- 14.** Comparați un LVDT cu un potențiometru ca senzor de poziție. Care sunt avantajele și dezavantajele utilizării unui LVDT?

### Secțiunea 6.2

- 15.** Explicați principiul de bază al extragerii datelor de viteză de la senzorii de poziție.
- 16.** Datele de poziție dintr-un potențiometru sunt prelucrate pentru a genera date despre viteză. Perioada de luare a unei probe este de 0,5 s. Poziția este de  $68^\circ$  la prima probă și de  $73^\circ$  pentru a doua probă. Calculați viteza.
- 17.** Datele de la un codificator de arbore optic furnizează informații despre viteză. Perioada probelor este de 0,25 s. Datele actuale sunt 10000111, iar datele anterioare au fost 10000101. Găsiți viteza prezentă ( $LSB = 1^\circ$ ).
- 18.** Un senzor cu rotor dințat are 30 de dinți. Găsiți rpm dacă senzorul dă la ieșire impulsuri la 100 Hz.
- 19.** Un senzor cu rotor dințat are 18 dinți. Găsiți rpm dacă senzorul dă impulsuri la 140 Hz.
- 20.** Tahometrul CK20-B este utilizat într-un sistem. Ieșirea este de 0,85 V. Care este viteza în rpm?
- 21.** Un tahometru CK20-B este utilizat într-un sistem. Ieșirea este de 1,5 V. Care este viteza în rpm?
- 22.** Un tahometru CK20-B este montat pe un motor cu o cutie de viteze încorporată 10:1 (similar cu figura 6.27). Găsiți viteza arborelui de ieșire atunci când tahometrul produce 2 V.

### Secțiunea 6.3

- 23.** Descrieți o aplicație de utilizare a unui comutator de limită ca senzor de proximitate.
- 24.** Atât senzorii optici, cât și cei cu efect Hall pot fi utilizați ca comutatoare de proximitate. Denumiți o aplicație posibilă pentru fiecare.
- 25.** Explicați funcționarea unui senzor optic de cuplaj cu fante. Utilizați o aplicație în explicația dvs.

### Secțiunea 6.4

- 26.** Când un om de 200 lb se urcă în mașina lui, caroseria mașinii se lasă cu 1 inch. Care este constanta arcului pentru sistemul de suspensie al mașinii?
- 27.** Când un om de 180 lb se urcă în mașina lui, caroseria auto se lasă cu 1.25 inch. Care este constanta arcului pentru sistemul de suspensie al mașinii?
- 28.** Când un bărbat de 80 kg se urcă în mașină, caroseria mașinii se lasă 2 cm. Care este constanta arcului pentru sistemul de suspensie al mașinii? [Sugestie: Amintiți-vă pentru a converti masa de 80 kg într-o greutate folosind  $W = mg$ .]
- 29.** Cum funcționează un tensiometru cu conductor lipit ca senzor de forță?

---

30. Care este scopul utilizării unui circuit de punte cu un tensiometru și care este scopul gabaritului compensatoriu?

31. Un tensiometru este utilizat pentru a măsura forța de tensiune într-o bară de oțel cu diametrul de 1 in. Tensiometrul are o rezistență nominală de  $140\ \Omega$  și un factor ecartament (GF) de 4. Tensiometrul este conectat la o punte (care este alimentată cu 10 Vdc). Puntea a fost inițial echilibrată. După ce bara este pusă sub tensiune, tensiunea de ieșire a punții merge la 0.0008 Vdc. Desenați o schemă a configurației și calculați forța de pe bară.
32. Un tensiometru este utilizat pentru a măsura forța de tensiune într-o bară de oțel cu diametrul de 0,75 in. Tensiometrul are o rezistență nominală de  $180\ \Omega$  și un GF de 4. Tensiometrul este conectat la o punte (care este alimentată cu 10 Vdc). Puntea a fost inițial echilibrată. După ce bara este pusă sub tensiune, tensiunea de ieșire a punții merge la 0.0006 Vdc. Desenați o schemă a configurației și calculați forța de pe bară.
33. Un tensiometru este utilizat pentru a măsura forța de tensiune într-o bară de oțel cu diametrul de 2 cm. Tensiometrul are o rezistență nominală de  $160\ \Omega$  și un GF de 5. Tensiometrul este conectat la o punte (care este alimentată cu 10 Vdc). Puntea a fost inițial echilibrată. După ce bara este pusă sub tensiune, tensiunea de ieșire a punții merge la 0.0008 Vdc. Desenați o schemă a configurației și calculați forța de pe bară.
34. Un senzor de forță mică folosește un arc și un potențiometru liniar de  $1\ k\ \Omega$ . Potențiometrul are un coeficient de 1-in. și o tensiune de alimentare de 10 Vdc. Dacă senzorul trebuie să aibă o ieșire de 1 V pe 10 lb de sarcină, care este constanta arcului necesară?

### Secțiunea 6.5

35. Cum funcționează un tub Bourdon ca senzor de presiune?
36. Care este diferența dintre *presiunea manometrului*, *presiunea diferențială* și *presiunea absolută*?
37. Un senzor de presiune diferențială de burduf primește 4 psi (ecartament) pe o parte și 12 psi (absolut) pe cealaltă. Ce presiune raportează senzorul?
38. Un senzor de burduf de presiune diferențială primește 5 psi (ecartament) pe o parte și 16,2 psi (absolut) pe cealaltă. Ce presiune raportează senzorul?
39. Un senzor de burduf de presiune diferențială primește 20 kPa (ecartament) pe o parte și 90 kPa (absolut) pe cealaltă. Ce presiune raportează senzorul?

### Secțiunea 6.6

40. Cum funcționează un senzor de temperatură bimetalic?
41. Enumerați cele trei moduri în care joncțiunea rece a unui termocuplu este manipulată în sistemele moderne.
42. Un termocuplu de fier-constantan are referința la  $32\ ^\circ F$  și are o tensiune de ieșire de 45 mV. Care este temperatura la joncțiunea fierbinde?
43. Un termocuplu de fier-constantan este utilizat pentru a măsura temperatură într-un cuptor. Joncțiunea rece este la temperatura ambientă de  $80\ ^\circ F$ , iar termocuplul volt-age este de 12 mV. Care este temperatura aproximativă a cupitorului?

- 44.** Un RTD de platină de  $100\Omega$  este utilizat pentru a măsura temperatura într-un cuptor. Rezistența măsurată este de  $122\Omega$ . Găsiți temperatura.
- 45.** Un RTD de platină de  $100\Omega$  este utilizat pentru a măsura temperatura într-un cuptor. Rezistența măsurată este de  $130\Omega$ . Găsiți temperatura.
- 46.** Construiți un senzor de temperatură utilizând LM35 cu următoarele specificații: Tensiune de alimentare =  $12V$  și ieșire =  $0,5V/\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Secțiunea 6.7

- 47.** Descrieți principiile de funcționare ale următorilor senzori de debit:
- a. Placă orificiu
  - b. Venturi
  - c. Tub pitot
  - d. Turbină
  - e. Magnetic
- 48.** Un senzor de debit al plăcii de orificiu este utilizat pentru a măsura debitul de apă într-un 2-in. țeavă. Placa de orificiu are o gaură cu diametrul de 1,5 in. Diferența de presiune pe placă este de 0,3 psi. Găsiți debitul aproximativ de apă în conductă.

### Secțiunea 6.8

- 49.** Cum ați folosi două detectoare discrete pentru a menține nivelul lichidului într-un rezervor între 3 și 4 ft?
- 50.** Un senzor de presiune este utilizat pentru a măsura nivelul apei dintr-un rezervor. Ce presiune v-ați aștepta pentru 5 ft de apă?
- 51.** Un senzor de presiune este utilizat pentru a măsura nivelul apei dintr-un rezervor. La ce presiune v-ați aștepta pentru 2 m de apă?
- 52.** Un senzor de presiune este utilizat pentru a măsura nivelul unui lichid dintr-un rezervor. Densitatea lichidului este de  $52 \text{ lb/ft}^3$ . Dacă presiunea manometrului (de la senzor) este de 5,7 psi, care este înălțimea lichidului?
- 53.** Un senzor de presiune este utilizat pentru a măsura nivelul unui lichid dintr-un rezervor. Greutatea lichidului este de  $6000 \text{ N/m}^3$ . Dacă presiunea manometrului (de la senzor) este de 12.000 Pa, care este înălțimea lichidului?

### Secțiunea 6.9

- 54.** Descrieți componentele de bază ale unui sistem de vedere a mașinii.
- 55.** Prin ce proces ar trece un sistem de vizuire a mașinii pentru a determina dacă o piesă a fost făcută sau asamblată incorect?