

3. CARACTERISTICILE ELEMENTELOR SENZORIALE

3.1. Introducere

Elementele senzoriale ocupă un loc principal în cadrul sistemelor de achiziție a datelor. Principiul de lucru, comportamentul la efectele perturbatoare și interferențe sunt esențiale pentru performanțele senzorilor. În același timp este important de cunoscut care sunt mărimile de ieșire și formele de reprezentare pentru a putea stabili măsurile ce se impun pentru condiționarea corectă a semnalului.

3.2. Performanțele elementelor senzoriale. Terminologie și caracteristici.

3.2.1. Introducere

Pe parcursul procesului de achiziție a informației se poate stabili o relație ideală / teoretică între informația primară *inf* și semnalul de ieșire *S*:

$$S = f(\text{inf}) \quad (3.1)$$

Funcția ideală poate fi enunțată sub forma unui tabel de valori, a unui grafic, sau o funcție matematică. În literatură de specialitate această dependență este utilizată, în regim static și dinamic, pentru analiza și proiectarea elementului senzorial.

Funcția de ideal poate fi enunțată sub forma unui tabel de valori, a unui grafic, sau o funcție matematică. Această dependență poate să fie una simplă liniară sau neliniară (de ex. logaritmică, exponențială sau polinomială):

- funcție liniară:

$$S = a + b \cdot \text{inf} \quad (3.2)$$

- funcție logaritmică:

$$S = a + b \cdot \ln(\text{inf}) \quad (3.3)$$

- funcție exponențială:

$$S = a \cdot e^{b \cdot \text{inf}} \quad (3.4)$$

- funcție polinomială:

$$S = a_0 + a_1 \cdot (\text{inf})^k \quad (3.5)$$

unde a , b , k , a_0 , a_1 sunt constante care se pot determina.

3.2.2. Definiții și termeni uzuali

O abordare coerentă, a problemei performanțelor elementelor senzoriale, necesită introducerea și definirea unor termeni uzuali utilizați în analiza și proiectarea sistemului de achiziție a datelor. O serie dintre aceste noțiuni sunt expuse pe larg în literatura de specialitate [], [], []. Reamintim câteva dintre acestea..

Sistemul de măsurare – measurement system – constă din totalitate elementelor de măsurare și auxiliare destinate unor măsurări specificate.

Lanțul de măsurare – measuring chain – se definește ca totalitatea de elemente ale unui sistem de măsurare care constituie traseul semnalului de măsurare de la intrare până la ieșire.

Sistemul de măsurare – lanțul de măsurare – poate fi modelat utilizând diverse modalități de abstractizare matematice, grafice, lingvistice etc. În figura 3.1 se prezintă un astfel de model ce permite punerea în evidență a funcției de bază a unui astfel de lanț de măsurare.

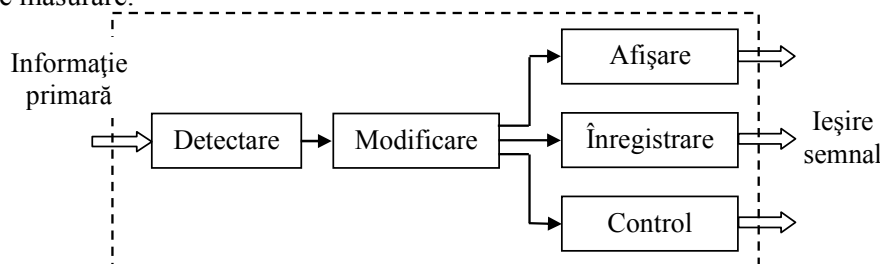


Fig. 3.1 Funcțiile lanțului de măsurare

În concluzie, lanțul de măsurare trebuie să asigure prin elementele sale următoarele funcții specifice procesului de măsurare: extragerea informației privind mărimea fizică supusă operației de măsurare, transformarea în semnal electric, prelucrarea semnalului electric, transmiterea la distanță a semnalului, afișarea / înregistrarea / utilizarea. Componenta principală a acestui lanț de măsurare este elemental sensorial.

Utilizând reprezentarea din teoria sistemelor, schema funcțională a unui Tr / S se poate prezenta conform figurii 3.2 unde:

- “y” este mărimea de ieșire și se identifică cu semnalul de ieșire S din modul de definire a funcției ideale (rel.3.1);
- “x” este mărimea de intrare și se identifică cu informația primară inf ;
- “ p_i ” și “ p_e ” sunt mărimi perturbatoare interne și externe. Mărimile perturbatoare externe sunt datorate mediului exterior: temperatura, presiunea, umiditatea, câmpurile magnetice și electrice parazite. Mărimile perturbatoare interne au ca și cauză: frecările în lagăre, modificarea proprietății materialelor prin îmbătrânire, variații ale parametrilor de alimentare.

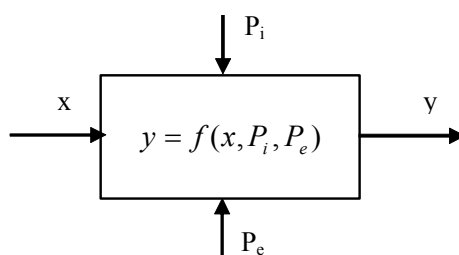


Fig. 3.2 Reprezentarea sistemică a unui senzor

În orice operație de măsurare, indiferent de atenția și eforturile depuse, între valoarea adevărată X a mărimii necunoscute (informația primară) și valoarea măsurată $X_{m\grave{a}s}$ va exista o diferență din cauza unor imperfecțiuni (la toate nivelurile), a mărimilor perturbatoare, etc.

Eroarea rezultatului măsurării este diferența dintre rezultatul măsurării (valoarea măsurată) și valoarea adevărată. Există o *incertitudine de măsurare*, definită ca intervalul $\pm u$ în care se estimează că se află, cu o anumită probabilitate, valoarea adevărată.

Referindu-ne la întregul lanț de măsurare se poate vorbi despre următoarele erori care pot apărea pentru o sarcină de măsurare generală [Hof]:

- erori de intrare;
- erori ale senzorului;
- erori de transmitere a semnalului;
- erori de conversie;
- erori de afișare / înregistrare etc.

Dezvoltările accelerate ale colaborărilor într-o economie care tinde să se globalizeze au condus la diverse documente care descriu termenii legați de erorile și incertitudinea de măsurare. Recentele dezvoltări se referă la:

- sistemul internațional de unități (SI);
- ghidul pentru exprimarea incertitudinea de măsurare - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM);
- vocabularul internațional al termenilor pentru metrologie - the International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM).

În figura 3.3 se prezintă principalele sarcini care sunt prevăzute în (GUM) referitor la exprimarea incertitudinii de măsurare [3.].

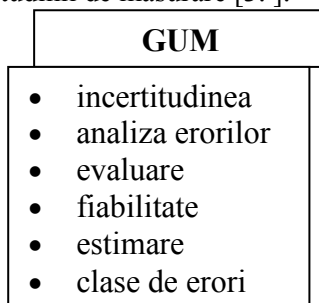


Fig. 3.3 Activități principale prevăzute în GUM

Incertitudinea de măsurare este un parametru asociat rezultatului unei măsurări, care caracterizează împrăștierea valorilor ce, în mod rezonabil, ar putea fi atribuite măsurandului (<http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/index.html>).

Dacă se efectuează N măsurători asupra aceluiași măsurand X , în aceleași condiții de lucru, se vor găsi n_i rezultate de valori x_i , existând condiția $\sum n_i = N$. Frecvența de apariția a unei valori este:

$$f_i = \frac{n_i}{N} \quad (3.6)$$

Rezultatele respective se pot prezenta tabelar sau sub forma unei histogramme care are în abscisă valorile x_i obținute iar în ordonată frecvența de apariție (fig.3.4).

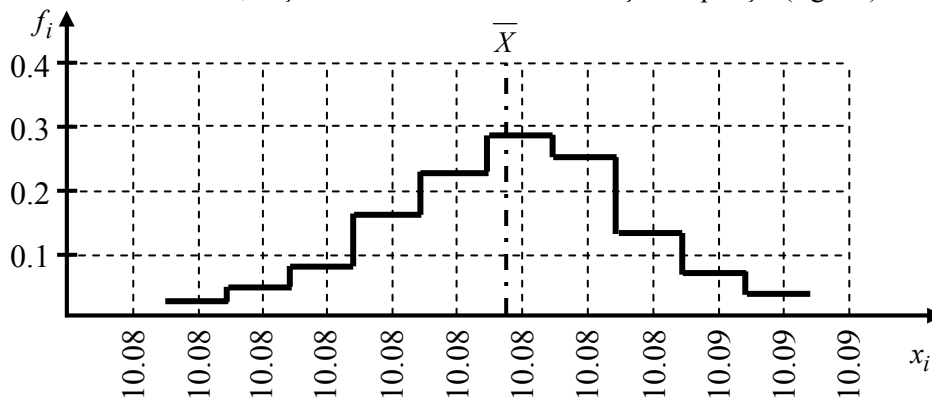


Fig. 3.4 Histogramă

În scopuri practice, se înlocuiește valoarea adevărată X cu o valoare convențional adevărată. Măsurată cu o incertitudine suficient de mică și care diferă neglijabil de prima această valoare convențională este cea mai bună aproximare a valorii adevărate a mărimii și se calculează ca media valorilor x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.7)$$

unde " N " este numărul de măsurători iar x_i este valoarea corespunzătoare din măsurătoarea " i ".

Se poate anticipa că valoarea măsurată se încadrează într-un interval:

$$\begin{aligned} \text{valoarea_medie} - \text{incertitudine} &\leq \text{valoarea_masurata} \leq \\ &\leq \text{valoarea_medie} + \text{incertitudine} \end{aligned} \quad (3.8)$$

unde *valoarea_medie* se obține în urma unui număr de măsurători.

Incertitudinea trebuie estimată pe baza unei analize a surselor potențiale de erori din procesul analizat. În aceste cazuri, se fac măsurări repetate, în condiții riguros identice, iar erorile se calculează pe baza statisticii matematice, alegând un model

probabilistic de repartiție a erorilor.

În calculele de incertitudine sunt utilizate în general trei funcții de densitate de probabilitate – distribuția *normală* (Gauss), distribuția *uniformă*, distribuția *triunghiulară* – prima fiind cea mai utilizată pentru mărimi de tip continuu [cepisca].

Pentru distribuția normală Gauss densitatea de probabilitate se exprimă printr-o relație de forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (3.9)$$

unde: μ și σ sunt parametrii repartiției (media și respectiv dispersia parametrului statistici), $e = 2.71828$, $\pi = 3.14159$.

Parametrii statistici de bază sunt:

- *valoarea medie:*

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3.10)$$

- *abaterea standard*

Abaterea standard – deviation standard – pentru un șir de măsurări ale aceluiași măsurand, este un parametru σ care caracterizează împrăștierea rezultatelor măsurătorilor:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n}} \quad (3.11)$$

Acest parametru este în general utilizat pentru a exprima valoarea incertitudinii de măsurare. Este definit în distribuția Gauss ca punctul de inflexiune pentru variabila aleatoare x (fig.3.5).

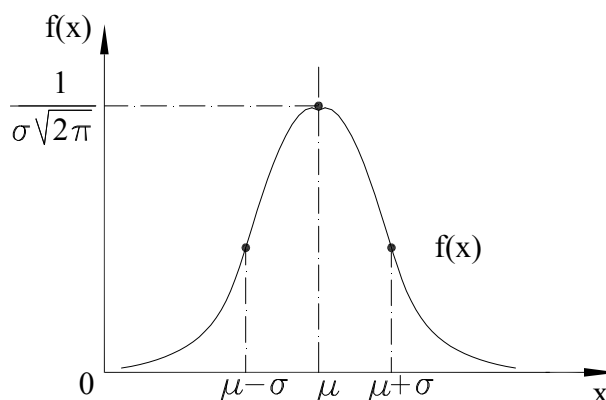


Fig. 3.5 Densitatea de probabilitate pentru o repartiție normală

Dependența densității de probabilitate de abaterea standard este ilustrată sugestiv în figura 3.6.

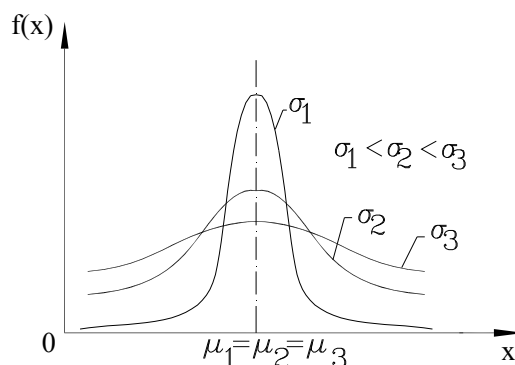


Fig. 3.6 Densitatea de probabilitate funcție de abatere

Distribuția Gauss este simplă și ușor de interpretat, dar necesită un număr mare de măsurări în condiții identice. În practică, pentru un număr mic de măsurători, se utilizează estimatori ai indicatorilor statistici μ și σ . Valoarea medie μ se aproximează prin media aritmetică \bar{x} (rel.3.7) iar abaterea standard σ prin abaterea standard experimentală:

$$\sigma = s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.12)$$

Noii estimatori \bar{x} și s nu se mai bucură de aceleași proprietăți ca indicatorii μ și σ . La un număr mic de măsurări (sub 10) repartiția Gauss duce la concluzii eronate.

Incertitudinea standard în rezultatul măsurătorilor este exprimată cu ajutorul abaterii standard (<http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/glossary.html>).

Valoarea incertitudinii în rezultatul măsurătorilor se poate calcula prin relația:

$$u = q\sigma \quad (3.13)$$

unde q este constantă care exprimă nivelul de încredere dorit.

Tabelul 3.1

Nivel de încredere	90 %	95 %	99 %	99.7 % *	99.9 %	99.99 %	99.999 %	99.9999 %
q	1.65	1.96	2.58	3	3.29	3.89	4.42	4.89

Incertitudinea standard combinată în rezultatul măsurătorilor trebuie calculată pe baza legii de propagare a erorilor [3.28].

Incertitudinea tip A în rezultatul măsurătorilor este exprimată prin abaterea evaluată prin metoda analizei statistice a unor serii de observații.

Valoarea incertitudinii se poate exprima în acest caz sub forma [3.28, pag.299]:

$$u = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (3.14)$$

Incertitudinea tip B în rezultatul măsurătorilor este exprimată prin abaterea evaluată prin alte metode decât analiza statistică a unor serii de observații.

Repartiția Student este tot o repartiție normală însă adaptată la calculul erorilor în cazul unui număr mic de măsurări când trebuie operat cu estimările \bar{x} și s [3.14], [dolga].

Pe baza celor expuse, în figura 3.7 se prezintă termenii de bază utilizați în exprimarea calității unei măsurări. Se poate sesiza diferența dintre diferitele noțiuni.

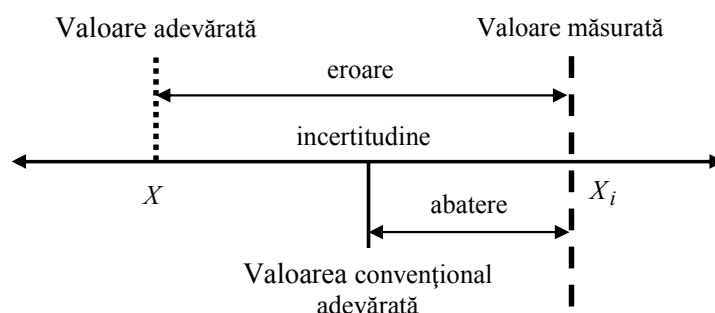


Fig. 3.7 Definierea conceptului de eroare și abatere

Eroarea rezultatului măsurării este diferența dintre valoarea măsurată și valoarea adevărată. Se definesc, funcție de modul de exprimare a acestora, următoarele erori:

- *eroarea absolută* – se definește ca diferența dintre valoarea măsurată X_i și valoarea adevărată X :

$$\Delta X = X_i - X \tag{3.15}$$

Eroarea absolută se exprimă în aceleași unități de măsură ca și mărimea măsurată și poate fi negativă sau pozitivă. Eroarea absolută cu semn schimbat $\varepsilon_c = -\Delta X$ se numește corecție.

- *eroarea relativă* – se definește ca raportul dintre eroarea absolută ΔX și valoarea adevărată a mărimii:

$$\varepsilon = \frac{X_i - X}{X} \tag{3.16}$$

Se utilizează și exprimarea relativă în procente:

$$\varepsilon[\%] = \frac{X_i - X}{X} \cdot 100 \tag{3.17}$$

Ca și eroarea absolută, eroarea relativă poate fi pozitivă sau negativă.

- *eroarea raportată* – este definită ca raportul dintre eroarea absolută ΔX și o valoarea convențională X_C indicată în specificația tehnică a elementului sistemului de măsurare:

$$\varepsilon[\%] = \frac{X_i - X}{X_C} \cdot 100 \tag{3.18}$$

Utilizând reprezentarea sistemică a sistemului de achiziție de date se poate face corelația pentru reprezentarea erorii de măsurare (fig.3.8):

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_i - X = \\ &= \text{OUTPUT} - \text{INPUT} = S - \text{inf} \end{aligned} \quad (3.19)$$

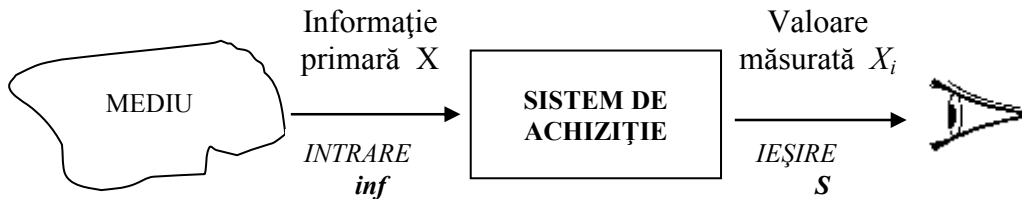


Fig. 3.8 Sistemul de măsurare și erorile

3.2.3. Caracteristica statică și performanțe adiacente

3.2.3.1. Caracteristica statică

Caracteristicile traductoarelor / senzorilor reprezintă în esență dependența funcțională intrare – ieșire $y = f(x, p_i, p_e)$. Aceste caracteristici se pot referi la regimul staționar - mărimile de intrare și ieșire nu variază în timp - sau la cel dinamic. În cazul regimului staționar caracteristicile mai poartă denumirea de caracteristici statice.

Pe baza acestei dependențe se pot analiza unele dintre performanțele elementelor senzoriale. De acestea trebuie să se țină cont la alegerea pentru o aplicație dată.

În figurile 3.9 și 3.10 se prezintă caracteristici statice (c.s.) care sunt specifice elementelor senzoriale și modul de exprimare matematică a dependenței.

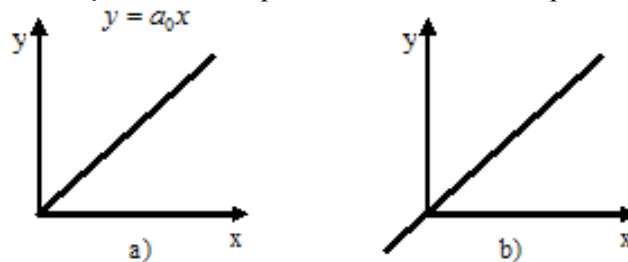


Fig. 3.9 Caracteristici statice: liniară unidirecțională (a) și liniară – bidirecțională (b)

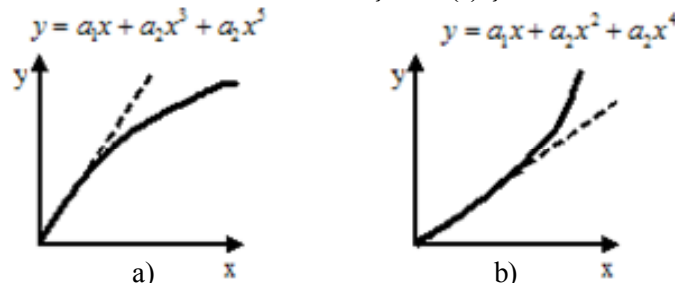


Fig. 3.10 Caracteristici neliniare

Caracteristica statică depinde de elementul senzorial analizat. O caracteristică statică tipică pentru un senzor de forță este ilustrată în figura 3.11. Caracteristica scoate în evidență aspecte legate de neliniarități ale elementului senzorial.

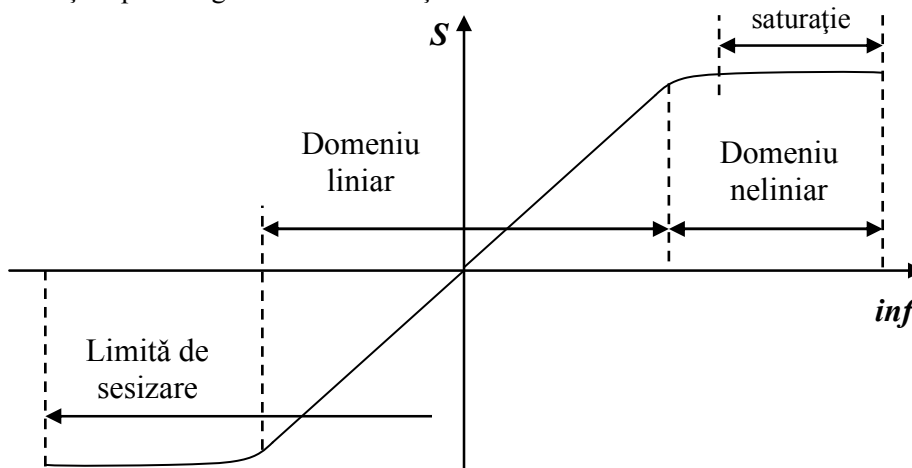


Fig. 3.11 Caracteristică statică și aspecte de neliniaritate

Caracteristica statică pentru un traductor de proximitate capacitiv este prezentată în figura 3.12.

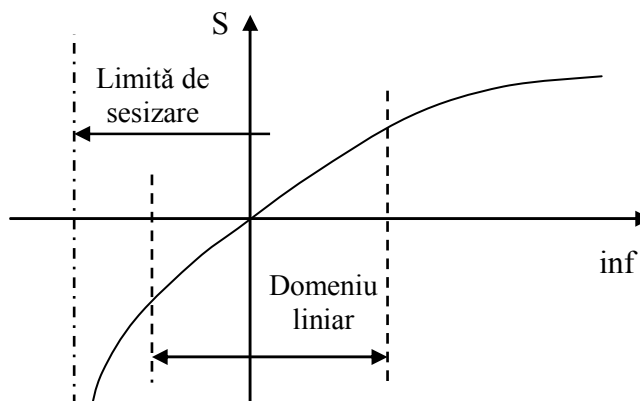


Fig. 3.12 caracteristică statică au traductor de proximitate

3.2.3.2. Domeniul de măsurare

Domeniul de măsurare se definește ca ansamblul de valori ale măsurandului pentru care eroarea de măsurare este presupusă că se află între limite prescise [3.4a].

Domeniul de măsurare se exprimă prin intervalul $[x_{\min}, x_{\max}]$ pentru care a fost proiectat să lucreze elementul senzorial și în interiorul căruia măsurătorile se realizează cu abaterea σ . Domeniul dinamic – *dynamic range* - DR se definește în aceste condiții sub forma [3.27]:

$$DR = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\sigma} \tag{3.20}$$

Pentru un domeniu extins prezentarea se poate realiza într-o scală logaritmică:

$$DR = 20^{10} \log \left[\frac{x_{\max} - x_{\min}}{\sigma} \right] [dB] \quad (3.21)$$

În [3.27a] domeniul dinamic DR se definește ca raportul dintre cea mai mare și cea mai mică valoare de intrare a măsurandului:

$$DR = 20 \log \left[\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right] \quad (3.22)$$

Se consideră “valoare nominală” – *input full scale* valoarea superioară a domeniului de măsurare. Dacă mărimea de măsurat are mai multe componente (de ex. forța generalizată cu cele 6 componente), este necesară precizarea domeniului de măsurare pentru fiecare componentă în parte.

Domeniul de măsurare este impus de aplicația căreia îi este destinat senzorul.

Valoarea maximă a semnalului de ieșire pe scală – *full scale output* se definește ca diferența algebrică a semnalului de ieșire obținut la valoarea maximă și respectiv minimă a informației primare.

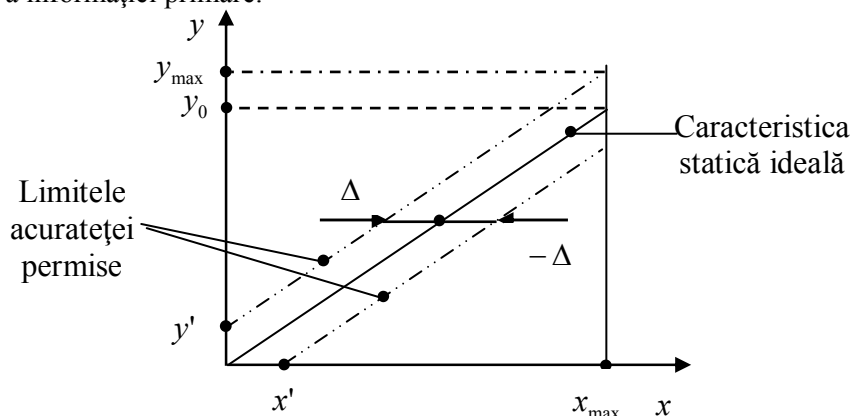


Fig. 3.13 Caracteristica statică și domeniul de măsurare

3.2.3.3. Erorile elementelor senzoriale

3.2.3.3.1. Introducere

Am arătat că între valoarea reală a mărimii de măsurat (măsurand) și valoarea obținută în urma procesului de măsurare există în general o diferență. Am putut defini astfel noțiunea de *eroare* și *abatere* pentru rezultatul măsurării în raport cu valoarea adevărată și respective valoarea convențională și valoarea măsurată. Asigurarea unor măsurări de succes impune cunoașterea erorilor din procesul de măsurare, a cauzelor care conduc la aceste erori.

Literatura de specialitate face distincție, în general, între *erorile sistematice* și *erorile aleatoare*. În unele lucrări se introduce și o a treia clasă a *erorilor grosiere* (clasa greșelilor) [3.12a].

Erorile sistematice – *bias* - caracterizează diferența dintre valoarea medie aritmetică și valoarea adevărată. Aceste erori conduc la noțiunea de *justețe* a lanțului de măsurare.

Erorile aleatoare sunt exprimabile prin diferența între rezultatul unei măsurări și media aritmetică a distribuției rezultatelor măsurărilor. Aceste erori conduc la noțiunea de fidelitate a măsură

Erorile grosiere (erori singulare [3.4a]) apar în general operatorului uman și apar ca și greșeli nerepetabile ale acestuia. Aceste erori sunt sesizabile prin compararea rezultatelor obținute anterior.

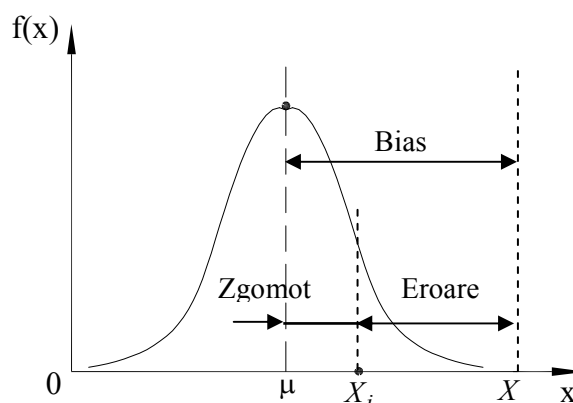


Fig. 3.14 Măsurare și terminologia erorilor

Luând în considerare etape ale procesului de măsurare în literatură de specialitate se realizează și alte clasificări ale erorilor de măsurare. O astfel de clasificare face distincție între:

1. erori de achiziție

A. *erori de acuratețe* – sunt erori sistematice constante și se pot elimina

- erori de calibrare ale instrumentelor de măsurare – eliminabile prin calibrare proprie pe bază de standarde corespunzătoare;
- erori de măsurare datorate senzorului – eliminabile prin calibrarea senzorului și ridicarea caracteristicii;
- erori de condiționarea semnalului – eliminabile prin calibrarea senzorului cu circuitele de condiționare conectate și ridicarea caracteristicii;
- erori de instalare a senzorului – eliminabile prin instruirea personalului și experiență;
- erori de aranjare spațială a senzorului;
- erori temporale – eliminabile prin controlul mediului;
- erori datorate temperaturii – eliminabile prin calibrare și măsurări la aceeași temperatură.

B. *erori de precizie* – sunt erori aleatoare (se estimează cu o incertitudine)

- erori de citire a instrumentelor de măsurare;
- erori datorate modificărilor în condițiile de experiment

C. *tehnici de măsurare mediocre* – erori de operator – informațiile obținute se

elimină

D. *erori grosolane* - informațiile obținute se elimină

2. erori de prelucrare a datelor

- acuratețea calculului valorilor din măsurători
- acuratețea modelului de măsurare instalat.

3.2.3.3.2. Erori sistematice

Erorile sistematice este prima categorie din sursele de erori și pot avea diverse cauze și moduri de manifestare. Acestea au drept caracteristică apariția – repetabilitatea – în condiții identice de lucru. Pentru a investiga sursa erorilor sistematice dintr-un proces de măsurare concret, se recomandă utilizarea unui *check-list* a surselor de erori din sistemele de măsurare prin apelarea unui număr de specialiști din domeniu.

Se consideră că erorile sistematice au următoarele surse mari de apariție [3.15°]:

- 1) *metoda de măsurare* – utilizarea unor metode de măsurare improprie procesului în cauză (de ex. măsurarea parametrilor elementelor din circuit fără a ține cont de rezistențele interne ale elementelor din schemă), aproximarea grosieră sau incorectă a unor constante (de ex.: $\pi = 3.141$ sau accelerația gravitațională g) în măsurări indirecte;
- 2) *elementele lanțului de măsurare* – reglaj de zero incorect, calibrare greșită, erori de retroacțiune;
- 3) *condiții de măsurare* – utilizarea unor componente ale lanțului de măsurare în condiții de lucru diferite de cele specificate în documentația tehnică a lor, diferențe de temperatură, presiune atmosferică;
- 4) *operatorul* – vizualizarea eronată a indicațiilor pe scală (utilizarea unei instrumentații digitale elimină această sursă), neglijarea reglajului de zero înainte de începerea măsurărilor.

Teoretic erorile sistematice se pot diviza în două categorii:

- A. *erori aditive* – eroare de offset;
- B. *erori multiplicative* – eroare de proporționalitate.

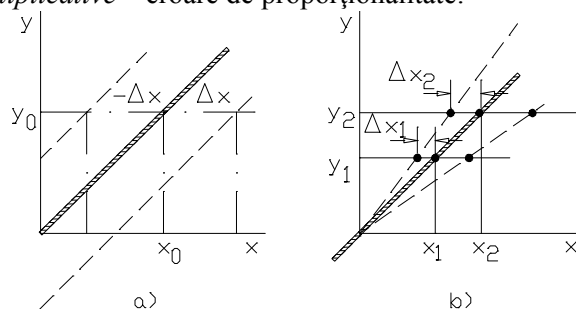


Fig. 3.15 Eroarea de zero și proporționalitate

Eroarea de zero (fig.3.15a) are un caracter aditiv și este constantă pe întreg domeniul de măsurare. Eroarea de proporționalitate este de natură multiplicativă și crește proporțional odată cu valoarea informației primare (fig.3.15b).

Elementele din sistemele de măsurare sunt afectate în general printr-o combinație a acestor două categorii de erori.

Fenomenele de *saturație*, *zonele de insensibilitate*, *histereza* sunt caracteristici reprezentării comportamentului static ale elementelor senzoriale.

Caracteristica din figura 3.16a prezintă un prag de insensibilitate pe porțiunea (AB) dar în același timp este liniară (în mod diferit !!!) pe porțiunile (OA) și (BC).

Caracteristica din figura 3.16b prezintă o zonă de insensibilitate pe porțiunea (OB) dar este liniară în rest. Un element senzorial cu o astfel de caracteristică poate fi utilizat pe un domeniu de măsurare $[x_B, x_C]$.

Caracteristica din figura 3.16c prezintă specificul de histereză. Creșterea valorii de măsurat (x) asigură o dependență (O1A) în timp ce scăderea valorii de măsurat se face pe ramura (A2O). Pentru o valoare oarecare x_0 vor exista astfel două posibile valori de ieșire y_1 și y_2 care definesc eroarea posibilă $\varepsilon = |y_2 - y_1|$.

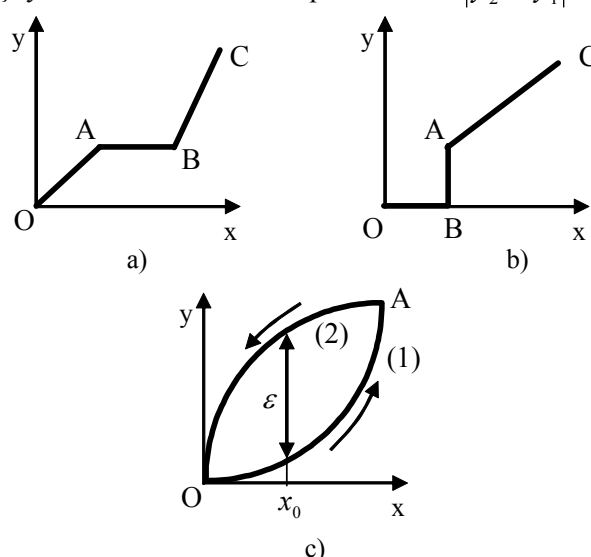


Fig. 3.16 Caracteristici cu componentă de insensibilitate, histereză

Eroarea de încărcare (retroacțiune) se datorează interacțiunii necompensate dintre procesul fizic și senzor. Măsurarea diferenței de potențial la bornele unui rezistor prin intermediul unui voltmetru sau influențele necompensate din măsurarea temperaturii sunt exemple clasice pentru acest tip de eroare.

Exemplu 3.1

Considerăm un senzor cu ieșirea în tensiune V_0 și rezistența internă R_i conectat la intrarea unui voltmetru (fig.3.17). Tensiunea de intrare aplicabilă la intrarea instrumentului este afectată de impedența de intrare R_V .

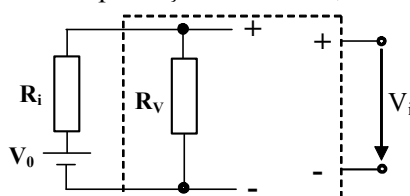


Fig. 3.17 Eroare de încărcare datorate rezistenței R_i

Tensiunea de intrare va avea valoarea:

$$V_i = \frac{R_V}{R_i + R_V} \cdot V_0 = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_V}} \approx \left(1 - \frac{R_i}{R_V}\right) \cdot V_0 \quad (3.23)$$

Dezvoltarea în serie și aproximarea aplicată este acceptată în condiția $R_i \ll R_V$. Rezultă astfel că elementul senzorial poate fi cauza unor erori sistematice.

3.2.3.3.3. Erorile aleatoare

Efectele aleatoare se constituie în cea de-a doua categorie de surse de eroare. Acestea se manifestă aleatoriu, rezultatele variind întâmplător, imprevizibil. Caracteristica principală a acestor erori o constituie faptul că, în condiții identice de lucru, acestea pot să apară sau nu. Din acest motiv aceste erori se pot estima doar pe baza unui număr mare de încercări și utilizarea metodelor statistice.

Sursele de erori aleatoare se pot analiza asemănător cu cazul erorilor sistematice, astfel că se pot aminti:

- *metoda de măsurare* – selectarea unei metode sau elemente senzoriale improprii pentru procesul de măsurare în cauză. De ex.: nivelul unui lichid spumant nu poate fi măsurat cu elemente senzoriale ultrasonice [3.15a];
- *elementele lanțului de măsurare* – componente defecte sau incomplete, contacte imperfecte cu măsurandul, zgomotul – zgomotul termic, zgomotul alb, etc.;
- *condițiile de măsurare* – elementele senzoriale pot fi afectate de modificări ale condițiilor de lucru – temperatură, umiditate, presiune atmosferică, interferență electromagnetică - între măsurări succesive. Sensorii ultrasonici se încadrează în elemente cu “sensibilitate” ridicată la această categorie;
- *operatorul* – vizualizarea în afara scalei, utilizarea în condiții diferite (poziție, forță de contact, etc.) a elementelor lanțului de măsurare

3.2.3.3.4. Comparație erori sistematice – erori aleatoare

Clasificarea erorilor, prezentate anterior, se bazează pe modul de manifestare a acestora pe parcursul repetării unor măsurări.

Erorile sistematice sunt cauzate de orice factori care în mod sistematic afectează procesul de măsurare în aceleași condiții de lucru. Valoarea lor rămâne aceeași, pozitivă sau negativă sau modificările pot fi estimate.

Pe de altă parte, erorile aleatoare sunt cauzate de orice factori care afectează în mod aleatoriu procesul de măsurare. Ele nu au nici un efect coerent privind grupul de date măsurate, determină variabilitate (estimată de abaterea standard σ), dar nu afectează performanța medie de grup (estimat de către media aritmetică μ).

Erorile sistematice care afectează două seturi de măsurări sunt aceleași și prin urmare, valoarea medie a ambelor seturi de date este aceeași. În cazul în care deviațiile lor standard diferă, acesta indică o prezență puternică a efectelor aleatoare cu generare de erori aleatoare figura 3.18.

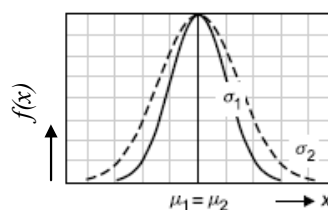


Fig. 3.18 Influența erorilor în rezultatul măsurării

Dacă realizarea a două seturi de măsurări este caracterizată de erorile sistematice diferite, valoarea medie a ambelor seturi de date diferă. Abaterile lor standard sunt însă aceleași adică erorile aleatoare coincid (figura 3.19).

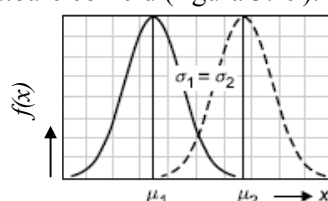


Fig. 3.19 Influența erorilor în rezultatul măsurării

Cazul cel general constă când ambele erori - sistematice și aleatoare – diferă și astfel valorile medii și abaterile standard ale ambelor seturi de date sunt diferite.

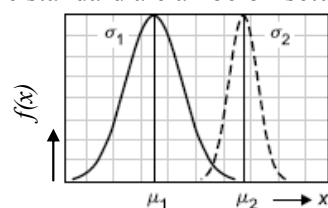


Fig. 3.20 Influența erorilor în rezultatul măsurării

3.2.3.4. Eroarea de neliniaritate

3.2.3.4.1. Aspecte teoretice ale neliniarității caracteristicii

Eroarea de neliniaritate – exprimă abaterea caracteristicii statice de la o dreaptă. Dreapta \overline{AB} reprezintă dreapta de cea mai bună aproximare a caracteristicii reale. Abaterile absolute de la neliniaritate $\Delta y'$ și $\Delta y''$ sunt definite prin poziția dreptelor $\overline{A'B'}$ și $\overline{A''B''}$ paralele cu dreapta \overline{AB} și tangente caracteristicii reale. Eroarea relativă de neliniaritate, raportată la domeniul de funcționare este (fig.3.21):

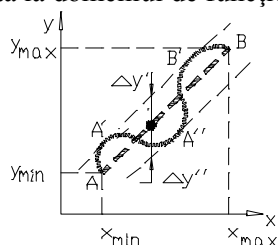


Fig. 3.21 Definierea erorii de neliniaritate

$$\varepsilon = \frac{\max\{\Delta y', \Delta y''\}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.24)$$

Linia de cea mai bună aproximație este descrisă matematic printr-o ecuație de forma:

$$y = A \cdot x + B \quad (3.25)$$

unde $y \equiv S$ și $x \equiv inf$ și aproximează setul de date:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), \dots, (x_n, y_n) \text{ pentru } n \geq 2 \quad (3.26)$$

Cei doi parametri A și B sunt de valoare constantă și se pot defini în diverse moduri:

- *metoda punctului fix* sau liniaritate bazată pe valorile terminale. Metoda este cea mai simplă din cele utilizate în general. Începutul domeniului de măsurare și sfârșitul domeniului de măsurare reprezintă punctele de trasare a liniei nominale. În acest caz, cele două valori se determină din condițiile:

$$\begin{aligned} y(x_{\min}) &= A \cdot x_{\min} + B \\ y(x_{\max}) &= A \cdot x_{\max} + B \end{aligned} \quad (3.27)$$

și astfel au valorile:

$$A = \frac{y(x_{\max}) - y(x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3.28)$$

$$B = y(x_{\min}) - \frac{y(x_{\max}) - y(x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot x_{\min} \quad (3.29)$$

Abaterea dintre caracteristica măsurată și cea nominală reprezintă eroarea de liniaritate.

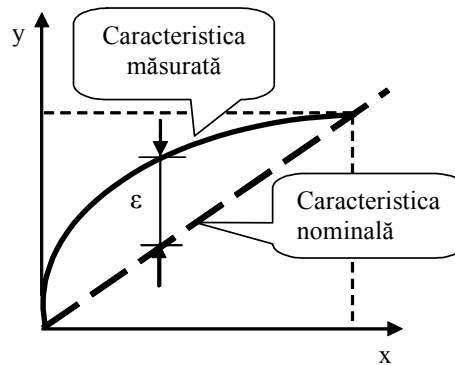


Fig. 3.22 Eroarea neliniaritate. Metoda punctului fix

- *metoda liniarității independente*. Linia dreaptă este definită pe baza criteriului celor mai mici pătrate. În cadrul acestei teorii eroarea pozitivă maximă și eroarea negativă minimă sunt egale în valoare absolută.

Linia de cea mai bună aproximație este descrisă matematic printr-o ecuație de forma (3.25). Valorile paramterilor A și B se pot determina pe baza relațiilor:

$$A = \frac{(\sum y) \cdot (\sum x^2) - (\sum x) \cdot (\sum xy)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.30)$$

$$B = \frac{n \cdot (\sum xy) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.31)$$

- *metoda liniarității bazată pe zero (origine)* (zero-based linearity). Referitor la această metodă există două abordări diferite în literatura de specialitate.

În [3.1] dreapta de cea mai bună aproximare se determină din condițiile:

- ❖ coeficientul unghiular al dreptei se determină pe baza criteriului celor mai mici pătrate (rel. 3.30);
- ❖ termenul $B = 0$ astfel ca dreapta să treacă prin origine.

În [3.5] se stabilește că linia de cea mai bună aproximare în acest caz interceptează ordonata în punctul corespunzător valorii minime a mărimii de ieșire:

$$B = y(x_{\min}) \quad (3.32)$$

Coeficientul unghiular al dreptei, valoarea parametrului A , se modifică astfel încât abaterile maxime, pozitive și negative, să fie egale în valoare absolută.

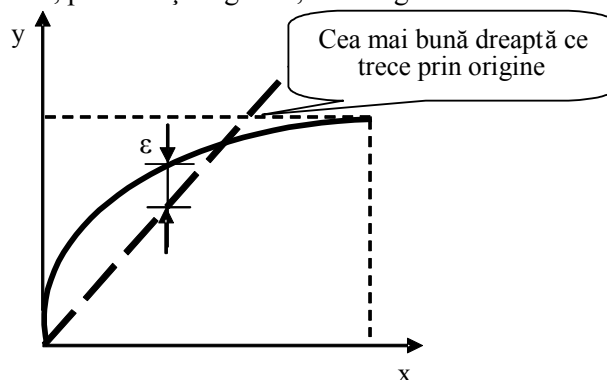


Fig. 3.23 Eroarea de neliniaritate în raport cu cea mai bună dreaptă ce trece prin origine

- *metoda liniarității terminale* (terminal-based linearity). În acest caz dreapta de cea mai bună aproximare este definită prin coordonatele a două punct M și N care se determină în baza următoarelor condiții (fig.3.24):

- ❖ un punct de definire a dreptei se admite prin coordonatele corespunzătoare valorii de ieșire pentru valoare minimă a măsurandului:

$$x_M = x_{\min} \quad (3.33)$$

$$y_M = y(x_{\min})$$

- ❖ cel de-al doilea punct al dreptei se consideră prin coordonatele egale cu valorile teoretice ale intrării maxime a măsurandului:

$$\begin{aligned} x_N &= x_{\max} \\ y_N &= Y(x_{\max}) \end{aligned} \quad (3.34)$$

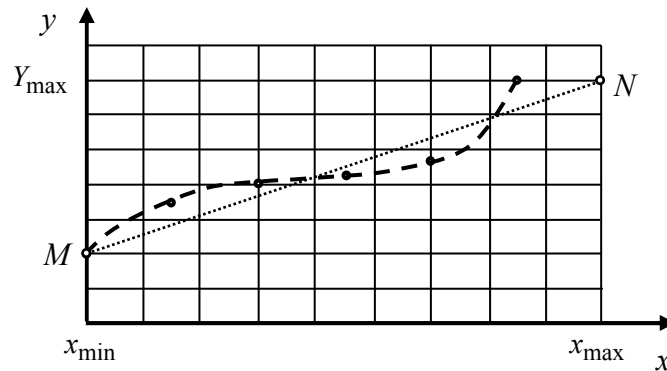


Fig. 3.24 Linie de cea mai bună aproximare

- metoda liniarității teoretice. Dreapta de referință este definită prin estimări teoretice pe parcursul proiectării elementului senzorial [3.1].

3.2.3.4.2. Exemplu de calcul

Setul de valori din procesul de măsurare a dependenței stării de încărcare a acumulatorului unui robot mobil și viteza de deplasare este prezentat în tabelul 3.2 iar caracteristica statică este prezentată în figura 3.25. Se cere determinarea dreptei de cea mai bună aproximare conform cu metoda liniarității independente.

Tabelul 3.2

$U[V]$	12.00	11.70	11.50	11.10	10.80	10.40
$v[cm/s]$	41	45	41	40	32	34

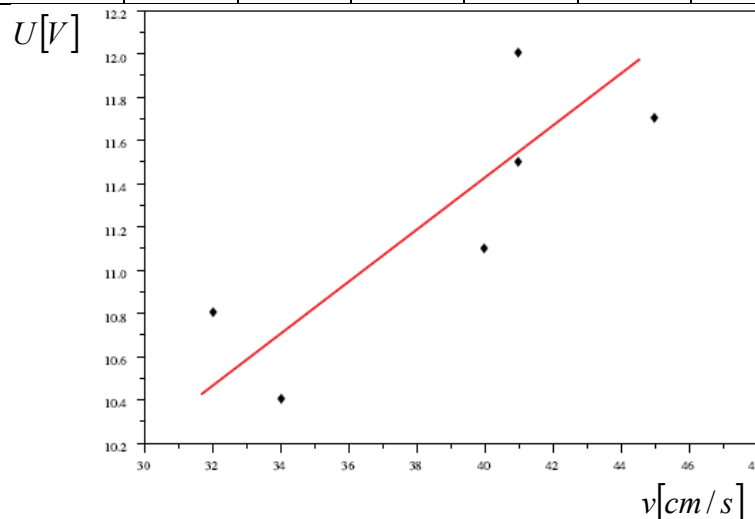


Fig. 3.25 Starea de încărcare a acumulatorului unui robot mobil și viteza de deplasare [3.22a]

Pe baza valorilor din tabelul 3.2 se poate obține valoarea parametrilor dreptei de cea mai bună aproximare. Fișierul *.m este prezentat în figura 3.25.

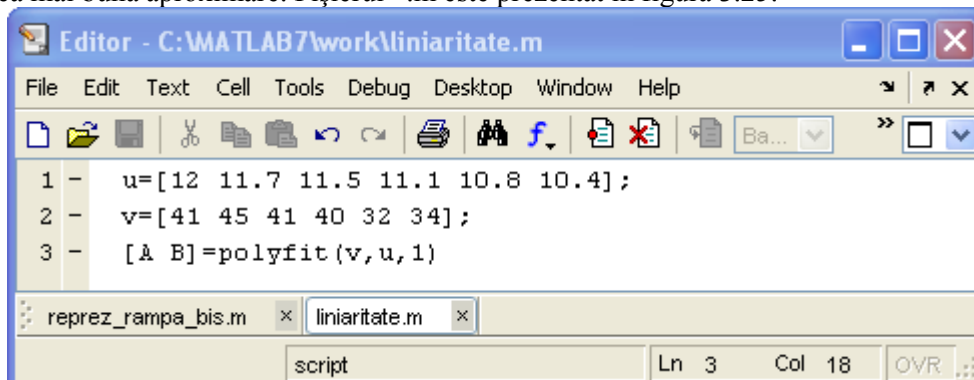


Fig. 3.26 Fișierul *.m pentru determinarea parametrilor A și B a dreptei de cea mai bună aproximare

Rularea programului permite obținerea următoarelor valori $A = 6.7$ și $B = -36.9$ iar ecuația dreptei de cea mai bună aproximare va fi [3.22a]:

$$v = 6.7 \times U - 36.9 \tag{3.35}$$

sau pentru dependența $U = U(v)$ se obține dreapta

$$U = 0.1 \times v + 7.345 \tag{3.36}$$

Soluția se poate obține și pe baza relațiilor (3.30) și (3.31) utilizând mediul de lucru Microsoft Excel. Valorile și modul de prelucrare precum și parametrii finali ai dreptei sunt prezentate în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3

v [cm/s]	U [mV]	x ²	xy		Y[mV]	ε[mV]
41	12.00	1681	492		11.45	0.55
45	11.70	2025	526.5		11.85	-0.15
41	11.50	1681	471.5		11.45	0.05
40	11.10	1600	444		11.35	-0.25
32	10.80	1024	345.6	B=rel(3.31)	10.55	0.25
34	10.40	1156	353.6	7.3449	10.75	-0.35
$\sum x$	$\sum y$	$\sum x^2$	$\sum xy$	$(\sum x)^2$	A=rel(3.30)	
233	67.50	9167	2633.2	54289	0.1006	

În tabelul 3.3 sunt prezentate și valorile $- Y[mV]$ - corespunzătoare dreptei de cea mai bună aproximare și erorile rezultate față de rezultatele măsurărilor. Se observă că nu este respectată condiția de egalitate în valoare absolută a erorilor maxime

maxime pozitive și negative. Modificând doar coeficientul corespunzător intersecției cu ordonata (coeficientul B) la o nouă valoare $B = 7.45$, se obține egalizarea erorilor maxime în valoare absolută (tabelul 3.4).

Tabelul 3.4

v [cm/s]	U [mV]	Y [mV]	ε [mV]
41	12.00	11.55	0.45
45	11.70	11.95	-0.25
41	11.50	11.55	-0.05
40	11.10	11.45	-0.35
32	10.80	10.65	0.15
34	10.40	10.85	-0.45

3.2.3.4.3. Exemplu de calcul

Setul de valori (x, y) ale unui process de măsurare este prezentat în tabelul 3.5. Se cere să se determine ecuația dreptei de cea mai bună aproximare în conformitate cu metoda liniarității de zero.

Tabelul 3.5

x [mm]	y [mV]	Varianta 1		Varianta 2	
		Y [mV]	ε [mV]	Y [mV]	ε [mV]
0	4.00	4.000	0.00	0.000	4.00
10	10.75	13.286	-2.54	9.286	1.46
20	18.50	22.572	-4.07	18.572	-0.07
30	26.75	31.858	-5.11	27.858	-1.11
40	35.50	41.144	-5.64	37.144	-1.64
50	45.00	50.430	-5.43	46.430	-1.43
60	55.00	59.716	-4.72	55.716	-0.72
70	66.00	69.002	-3.00	65.002	1.00
80	77.25	78.288	-1.04	74.288	2.96
90	89.50	87.574	1.93	83.574	5.93
100	102.50	96.860	5.64	92.860	9.64

Conform cu aspectele teoretice prezentate anterior, se pot obține două variante pentru dreapta de aproximare.

În prima variantă ecuația dreptei va fi:

$$y = 0.9286 \cdot x + 0.4 \quad (3.37)$$

iar eroarea absolută maximă în valoare absolută este $\varepsilon = 5.64[mV]$.

În cea de a doua variantă ecuația dreptei de cea mai bună aproximare va fi:

$$y = 0.9286 \cdot x \quad (3.38)$$

3.2.3.4.4. *Exemplu de calcul*

Setul de rezultate (perechile de valori (x, y)) dintr-un proces de măsurare este prezentat în tabelul 3.6. Se cere să se determine dreapta de cea mai bună aproximare în concordanță cu metoda liniarității independente.

Tabelul 3.6

x [mm]	y [mV]	Y[mV]	ϵ [mV]
0	2.00	-0.7	2.70
10	10.50	9.16909	1.33
20	18.50	19.0382	-0.54
30	27.10	28.9073	-1.81
40	36.20	38.7764	-2.58
50	46.50	48.6455	-2.15
60	55.00	58.5145	-3.51
70	65.00	68.3836	-3.38
80	78.20	78.2527	-0.05
90	89.10	88.1218	0.98
100	101.50	97.9909	3.51

Utilizând relațiile (3.30-3.31) se obține parametrii ecuației dreptei: $A = 0.98691$ și $B' = -1.2$. Asigurarea egalizării erorilor maxime în valoare absolută conduce la noua valoare $B' = -0.7$. Ecuația dreptei va fi:

$$y = 0.98691 \times x - 0.7 \tag{3.39}$$

3.2.3.5. **Sensibilitatea**

Sensibilitatea absolută S - a elementului senzorial sau a sistemului de măsurare se poate defini referitor la un punct de funcționare sau la întreg domeniul de măsurare. Dacă caracteristica sistemului analizat este $y = y(x)$, atunci sensibilitatea într-un punct al caracteristicii, se poate defini prin raportul:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{3.40}$$

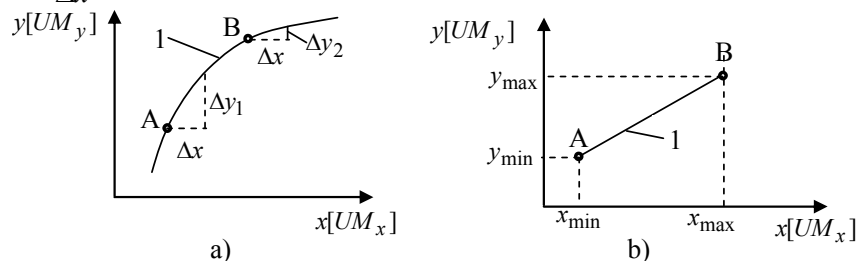


Fig. 3.27 Sensibilitatea pentru caracteristică neliniară (a) și liniară (b)

Din definiția anterioară se observă că sensibilitatea este reprezentată de panta caracteristicii statistice a elementului sensibil.

Dacă caracteristica este neliniară se pot defini sensibilități pentru diverse puncte ale caracteristicii (fig.3.27a).

Dacă caracteristica statică este liniară, sensibilitatea pe întreg domeniul de măsurare este constantă și se definește prin (fig.3.27b):

$$S = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \left[\frac{UM_y}{UM_x} \right] \quad (3.41)$$

În reprezentare analogică mărimea electrică de ieșire se exprimă în tensiune [V] sau curent [A] în timp ce mărimea de intrare se exprimă în unitatea de măsură a informației primare. În mod corespunzător sensibilitatea se va exprima în mV/mm, mA/N, V/rad/s etc. De ex. un senzor de temperatură are sensibilitatea egală cu $20 \mu V / ^\circ C$ ceea ce înseamnă că modificarea temperaturii cu un $1 ^\circ C$ determină modificarea tensiunii de ieșire cu $20 \mu V$.

Sensibilitatea relativă se definește ca raportul dintre variația relativă a mărimii de ieșire și variația relativă a mărimii de intrare:

$$S_r = \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x}{x}} [\%] \quad (3.42)$$

Se observă că sensibilitatea relativă se poate exprima în procente, putând servi unei comparații între două elemente construite pe principii diferite.

Fiecare element component a unui sistem de măsurare – senzor/traductor, circuit de condiționare a semnalului, etc.- stabilește o relație de forma:

$$y_n = S_n \cdot x + y_{0n} \quad (3.43)$$

denumită caracteristică de conversie nominală [3.4b]. Sensibilitatea nominală S_n și decalajul de zero nominal y_{0n} sunt parametric indicați de fabricantul elementului respective.

Aspecte legate de procesul de fabricație, fenomenele perturbatoare interne și externe sau derivate termice pot conduce la o caracteristică de conversie reală diferită de cea nominală:

$$y = S \cdot x + y_0 \quad (3.44)$$

Diferența $\Delta y = y - y_n$ reprezintă incertitudinea asupra mărimii de ieșire [3.4b].

Sensibilității S_n i se poate asocia eroarea ε_{S_n} definită prin relația:

$$\varepsilon_{S_n} = \frac{S - S_n}{S_n} \quad (3.45)$$

care conduce, pentru mărimea de ieșire y , la o incertitudine, a cărei valoare maximă este:

$$\Delta y|_{S_n} = \Delta S \cdot x_{\max} = \Delta S \cdot \frac{y_{\max}}{S_n} \quad (3.46)$$

Deriva termică a sensibilității

Pragul de sensibilitate este cea mai mică variație a mărimii de intrare care poate fi pusă în evidență. Principalii factori care determină pragul de sensibilitate sunt datorati perturbațiilor interne și externe.

3.2.3.6. Rezoluția traductoarelor

3.2.3.6.1. Definiții, elemente de evaluare

Rezoluția se definește teoretic ca intervalul maxim de variație a mărimii de intrare pentru a se asigura o variație sesizabilă a mărimii de ieșire. Dacă este legată de dispozitivul de afișare analogic al unei informații, noțiunea de rezoluție este de obicei considerată o diviziune sau uneori 1/2, 1/3 dintr-o diviziune. În cazul afișării numerice, rezoluția este egală cu o unitate a ultimului rang zecimal.

Această performanță este limitată de erorile care afectează funcționarea elementului senzorial (zone de insensibilitate, histereză etc.).

Modul de definire și implicit modul de calcul a rezoluției depinde de elementul analizat. Astfel pentru elementele senzoriale optice pentru achiziția imaginii se utilizează patru definiții a rezoluției [3.25bis]:

- *definiția 1* - rezoluția poate fi exprimată ca numărul de linii TV sau pixeli ale sensorului utilizat pentru a înregistra o imagine;
- *definiția 2* – rezoluția poate fi exprimată ca numărul total de pixeli. În cazul senzorilor video, rezoluția este, în general, numărul total de pixeli, împărțit la un milion, și rezultatul rotunjit;
- *definiția 3* – rezoluția senzorilor video poate fi exprimată ca numărul de perechi de linii raportat la un milimetru. Rezoluția în acest caz este definită ținând cont de nivelul de detaliu care trebuie înregistrat prin imaginea respectivă.
- *definiția 4* - rezoluția poate fi specificată în pixeli pe *picior sau metru* la un obiect dat.

Pentru o exemplificare suplimentară asupra precizărilor anterioare, se prezintă în figura 3.28-3.31 imagini achiziționate la diferite rezoluții și destinații ale aplicației în cauză [3.]. Nu există încă un standard industrial pentru nivelul de claritate necesar într-o imagine achiziționată. Sigur că un număr mai mare de pixeli pe un obiectiv, o mai mare rezoluție vor asigura recunoașterea și identificarea unor detalii în imaginea achiziționată. Trebuie avut în vedere însă faptul că acești parametri influențează procesul de selectare a elementului senzorial, a dispozitivelor de memorare etc. Nu în ultimul rând trebuie să se aibă în vedere un echilibru între cerințele tehnice minime și costurile economice.

3.2 - Performanțele elementelor senzoriale. Terminologie și caracteristici.

Nivelul rezoluției	Pixeli / ft	Pixeli /mm
Identificare obiect (detaliere înaltă)	60	200



Fig. 3.28 Rezoluția unei imagini achiziționate

Nivelul rezoluției	Pixeli / ft	Pixeli /mm
Recunoaștere obiect (detaliu legal)	40	130



Fig. 3.29 Imagine și rezoluție

Nivelul rezoluției	Pixeli / ft	Pixeli /mm
Detectare obiect (securitate generală)	20	70



Fig. 3.30 Rezoluția unei imagini achiziționate

Nivelul rezoluției	Pixeli / ft	Pixeli /mm
Vedere generală (mișcare, urmărire)	10	30



Fig. 3.31 Imagine achiziționată și modul de exprimare a rezoluției

Schema principală a unui traductor incremental pentru măsurarea deplasării unghiulare într-o singură direcție este prezentată în figura 3.32.

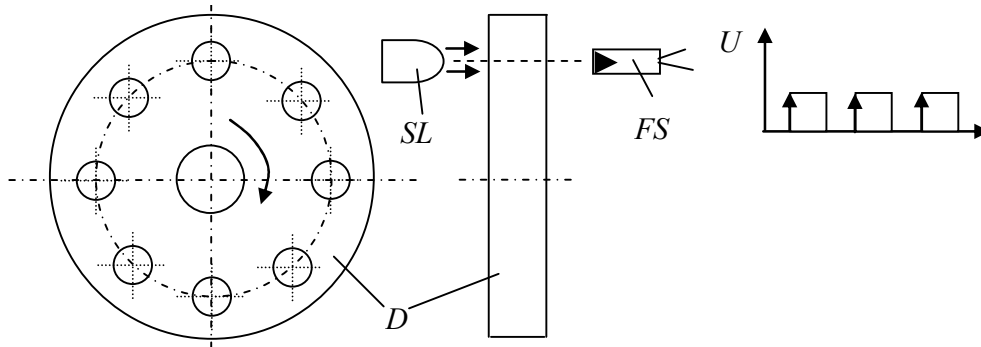


Fig.3.32 Traductor incremental

Un element fotosensibil (*FS*) asigură la ieșirea sa un semnal în tensiune la trecerea unui orificiu (practicat în discul *D*) prin dreptul sursei de lumină *SL*. Pentru un traductor cu *O* orificii pe circumferință, rezoluția fizică este:

$$R = \frac{360^0}{O} \tag{3.47}$$

Dacă se cuantifică atât creșterea cât și descreșterea semnalului de ieșire (fig.3.33) rezoluția digitală va fi:

$$R = \frac{360^0}{2 \cdot O} \tag{3.48}$$

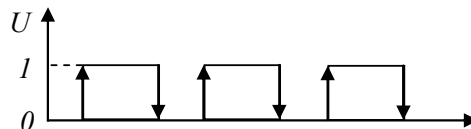


Fig. 3.33 Cuantificarea ambelor tranziții ale semnalului în tensiune

Dacă rezultatul procesului de măsurare a unei mișcări de rotație de 360^0 este reprezentat digital printr-un *cuvânt* de n -bit, rezoluția digitală va fi:

$$R = \frac{360^0}{2^n} \quad (3.49)$$

În acest caz, unghiurile 0^0 și 360^0 sunt cuantificate dublu. Excluzând memorarea valorii pentru 0^0 , rezoluția digitală va fi:

$$R = \frac{360^0}{2^{n-1}} \quad (3.50)$$

Multe aplicații necesită și determinarea sensului de rotație. Una din posibilități, în cazul traductoarelor incrementale optice, este introducerea unui al doilea element fotosensibil FS_2 la un sfert de pas unghiular (definit de orificiile practicate în discul D) față de cel anterior FS_1 (fig.3.34a). Semnalele obținute pentru o rotație în sens ora sunt prezentate în figura 3.34b iar pentru un sens antiorar în figura 3.43c. În cazul utilizării unei reprezentări a mișcării printr-un *cuvânt* pe n -bit, un bit este alocat coantificării sensului de mișcare și $n-1$ bit pentru cuantificarea valorii unghiulare a mișcării. În acest caz rezoluția digitală (cu excluderea poziției de 0^0) este:

$$R = \frac{360^0}{2^{n-1} - 1} \quad (3.51)$$

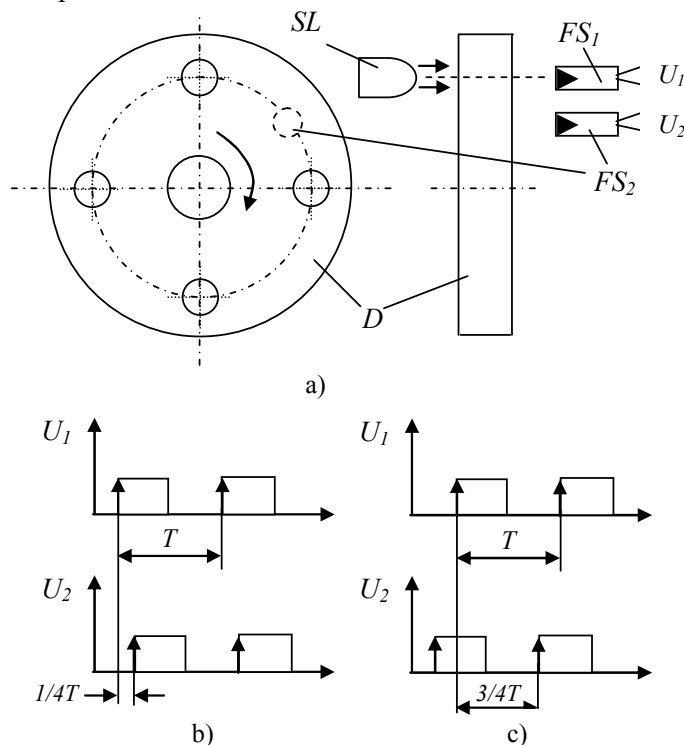


Fig. 3.34 Traductor incremental cu detectarea sensului rotației

Dacă se utilizează în procesul de măsurare ambele tranziții ale semnalului de la elementele fotosensibile rezoluția fizică va fi:

$$R = \frac{360^0}{4 \cdot O} \tag{3.52}$$

Traductoarele optice absolute au la bază discul mobil prevăzut cu o serie de zone circulare concentrice q și divizate într-un număr de sectoare circulare:

$$m = 2^q \tag{3.53}$$

În figura 3.35 se prezintă principiul de realizare a unui disc cu $q = 4$ zone circulare (piste circulare) și $m = 2^4 = 16$ sectoare circulare. Fiecare sector circular are o zonă opacă și o zonă transparentă în corespondență cu codul binar. Zona opacă este codificată în bina cu valoare $CB = 0$ iar zona transparentă cu valoarea $CB = 1$. Pista exterioară este corespunzătoare *bit-ului cel mai puțin semnificativ* (LSB) iar pista interioară *bit-ului cel mai semnificativ* (MSB).

De exemplu (fig.3.35):

- numărul zecimal $N_1 = 15$ are codificarea binară 1111 ;
- numărul zecimal $N_2 = 12$ are codificarea $\begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \uparrow & & & \uparrow \\ MSB & & & LSB \end{matrix}$
- numărul zecimal $N_3 = 5$ are codificarea $\begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \uparrow & & & \uparrow \\ MSB & & & LSB \end{matrix}$

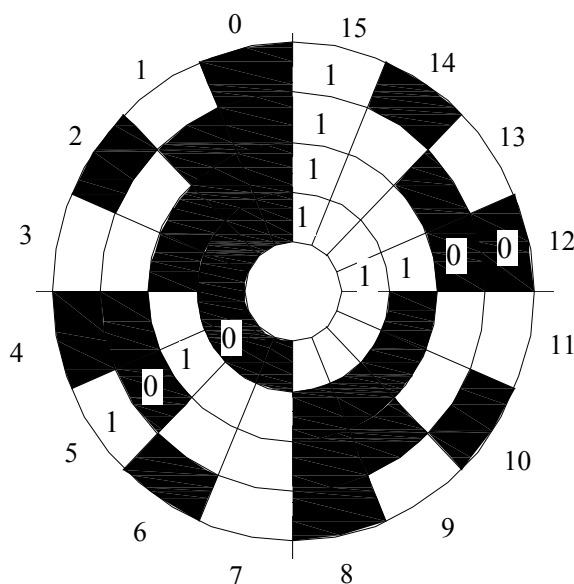


Fig. 3.35 Principiul discului absolut

Între un număr N în sistemul zecimal și codificarea în sistemul binar există corespondența:

$$N = 2^{q-1} \cdot CB_{MSB} + \dots + 2^0 \cdot CB_{LSB} \quad (3.54)$$

Se poate arăta în mod simplu echivalența pentru cele trei numere exemplificate anterior:

- $N_1 = 2^3 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 1 = 8 + 4 + 2 + 1 = 15$
- $N_2 = 2^3 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 0 = 8 + 4 + 0 + 0 = 12$
- $N_3 = 2^3 \cdot 0 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 1 = 0 + 4 + 0 + 1 = 5$

Rezoluția digitală pentru aceste traductoare absolute este:

$$R = \frac{360^0}{2^q} \quad (3.55)$$

Rezoluția se exprimă, de obicei, în unitatea mărimii de măsurat.

Un traductor, cu largă aplicabilitate în măsurarea unei deplasări, este cel rezistiv în montaj potențiometric. Una din posibilitățile de realizare a rezistorului este cea de bobinare a firului rezistiv pe un suport liniar sau circular, funcție de deplasarea urmărită (fig.3.36a). Cursorul va palpa rezistorul trecând de la o spiră la alta și astfel caracteristica statică nu este liniară ci în trepte (fig.3.36b). Atunci când cursorul se deplasează de la o spiră la alta cu (cu valoarea ΔX), tensiunea la ieșire se modifică de asemenea în trepte de tensiune ΔU . Valoarea acestei trepte depinde de de tensiunea totală U și de numărul de spire N_{spire} ale conductorului rezistiv. Atunci când cursorul calcă doar pe o spiră rezoluția traductorului va fi :

$$R = \frac{\Delta U}{U} = \frac{U/N_{spire}}{U} = \frac{1}{N_{spire}} \quad (3.56)$$

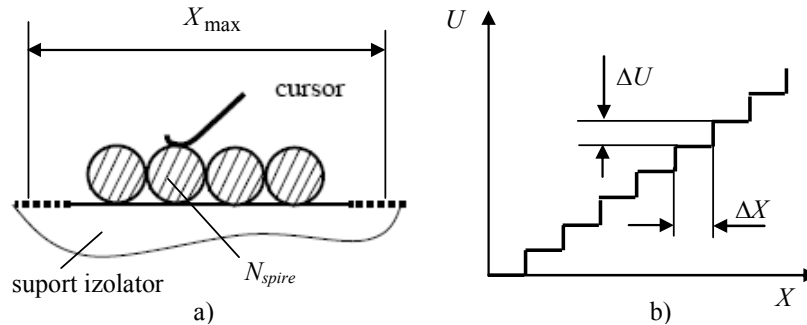


Fig. 3.36 Traductorul rezistiv de deplasare

Dacă se are în vedere influența numărului de spire asupra treptei de tensiune, rezoluția se poate exprima și funcție de cursa totală X_{max} și numărul de spire N_{spire} :

$$R = \frac{X_{max}}{N_{spire}} \quad (3.57)$$

Senzorul /traductorul este cu atât mai performant cu cât sensibilitatea este mai mare iar pragul de sensibilitate și rezoluția sunt mai reduse.

3.2.3.6.2. Exemple calcul

• *Exemplu 3.2*

Un traductor rezistiv de deplasare (rotație) este utilizat pentru măsurarea unei curse maxime $\alpha_{\max} = 270^0$. Rezistorul este realizat pe baza unui număr de spire $N_{\text{spire}} = 1000$ spire. Se cere să se determine rezoluția traductorului.

Pe baza relației (3.52) se poate determina valoarea numerică:

$$R = \frac{270^0}{1000} = 0.27^0 \quad (3.58)$$

• *Exemplu 3.3*

Un traductor incremental este realizat pe baza unui disc cu $O = 1000$ zone transparente și este utilizat pentru măsurarea unei deplasări într-un singur sens. Să se determine :

- rezoluția fizică în cazul utilizării unei singuri tranziții a semnalului de ieșire și a excluderii valorii de 0^0 ;
- lungimea cuvântului pentru reprezentarea acestei rezoluții ;
- Lungimea cuvântului pentru folosirea ambelor tranziții ale semnalului.

Rezoluția fizică se poate calcula pe baza rel.(3.42) :

$$R = \frac{360^0}{1000} = 0.36^0 \quad (3.59)$$

Considerând aceeași rezoluție, se poate scrie egalitatea (vezi și rel. 3.46):

$$R = \frac{360^0}{O} = \frac{360^0}{2^n - 1} \quad (3.60)$$

Din relația anterioară se poate determina ecuația în n :

$$O = 2^n - 1 \quad (3.61)$$

sau

$$n = \text{int} \left[\frac{\ln(O+1)}{\ln 2} + 0.5 \right] = \text{int} [1.44 \cdot \ln(O+1) + 0.5] \quad (3.62)$$

Pentru valoarea $O = 1000$, se poate determina :

$$n = \text{int} [1.44 \cdot \ln(1001) + 0.5] = \text{int} (9.948 + 0.5) = \text{int} (10.448) = 10 \text{ bit} \quad (3.63)$$

Dacă se utilizează ambele tranziții ale semnalului, relația de calcul devine :

$$R = \frac{360^0}{2 \cdot O} = \frac{360^0}{2^n - 1} \quad (3.64)$$

sau după prelucrări :

$$n = \text{int} \left[\frac{\ln(2 \cdot O + 1)}{\ln 2} + 0.5 \right] = \text{int} [1.44 \cdot \ln(2 \cdot O + 1) + 0.5] \quad (3.65)$$

Se poate determina lungimea cuvântului:

$$n = \text{int} [1.44 \cdot \ln(2001) + 0.5] = \text{int}(10.946 + 0.5) = \text{int}(11.446) = 11 \text{ bit} \quad (3.66)$$

• *Exemplu 3.4*

Un traductor fotoelectric incremental de rotație TIRO 2000 arăsigură un număr de $N_{imp} = 2000$ la o rotație completă. Care este rezoluția acestui traductor ?

Rezoluția traductorului va fi :

$$R = \frac{360^0}{N_{imp}} = \frac{360^0}{2000} = 0.18^0 \quad (3.67)$$

3.2.3.7. Exactitatea și indicatorii săi

Exactitatea/acuratețea – accuracy, exactité – reprezintă proprietatea elementului senzorial de a da răspunsuri apropiate de o valoare adevărată (fig.3.24c).

Am prezentat în paragrafele anterioare noțiunea de *justețe* ca fiind proprietatea unui mijloc de măsurare de a furniza indicații fără eroare sistematică (fig...).

Deasemenea, a fost prezentată și noțiunea de *fidelitate – precision, fidélité*- ca fiind proprietatea unui mijloc de măsurare de a furniza indicații foarte apropiate între ele la măsurarea aceluiași măsurand și în condiții prescrise. Repetabilitatea constituie calitatea unor măsurători repetate de a da rezultate apropiate între ele, cu erori aleatoare, în aceleleași condiții de lucru (fig.3.24a). Alături de repetabilitate în literatura de specialitate se utilizează un al doilea termen asociat fidelității, *reproductibilitatea* [3.12]. Acest termen se definește ca precizia unui set de măsurători în condițiile:

- unui interval lung de timp, sau...
- realizate de operatori diverși, sau...
- cu instrumente diferite, sau ...
- în laboratoare diferite.

Repetabilitatea se exprimă prin:

$$\text{repetabilitatea} = \frac{\text{val.maxima} - \text{val.minima}}{\text{domeniu}} \times 100 \quad (3.68)$$

Justețea constituie calitatea unor măsurători repetate de a da rezultate apropiate de valoarea adevărată (fig.3.37b). Acuratețea exprimă relația între rezultatul măsurătorilor și valoarea reală / adevărată (fig.3.37c).

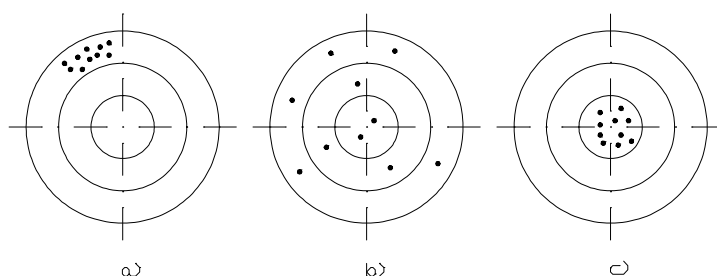


Fig. 3.37 Repetabilitate, justețe și exactitate/acuratețe

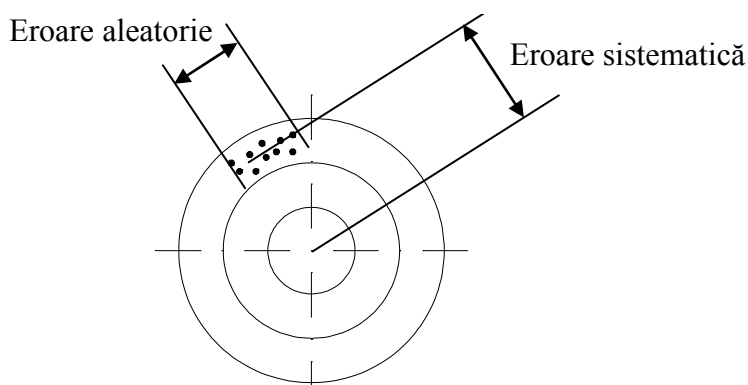


Fig. 3.38 Repetabilitatea, erorile sistematice și aleatoare

3.2.3.8. Caracteristica statică și erorile de caracteristică. Abordare matematică

Pe baza considerațiilor anterioare se poate exprima dependența matematică a semnalului de ieșire funcție de semnalul de intrare x și de efectele perturbatoare (în sens generalizat) P :

$$y = f(x, P) \tag{3.69}$$

Pentru un punct de funcționare inițial "0" dependența anterioară se poate defini prin:

$$y = f(x_0, P_0) \tag{3.70}$$

Pentru o variație a semnalelor considerate cu incrementele valorice Δx , ΔP ecuația (2.35) se poate scrie:

$$y = y_0 + \Delta y = f(x_0 + \Delta x, P_0 + \Delta P) \tag{3.71}$$

Dezvoltând în serie Taylor și ținând cont de relația (2.36) se obține:

$$\Delta y = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 \cdot \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial P} \right|_0 \cdot \Delta P + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_0 \cdot (\Delta x)^2 + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} \right|_0 \cdot (\Delta P)^2 + \dots \tag{3.72}$$

Interacțiunea dintre elementul senzorial și mediul investigat este descrisă de

ecuația (2.38) prin componentele sale din partea dreaptă.

Neglijând termenii de ordin superior din ecuația (3.72) se obține o primă aproximație a ecuației pentru o funcționare liniară:

$$\Delta y = \underbrace{\frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_0 \cdot \Delta x}_{\text{Informație primară}} + \underbrace{\frac{\partial f}{\partial P}\bigg|_0 \cdot \Delta P}_{\text{Zgomot}}$$

Semnal de ieșire
Informație primară
Zgomot

(3.73)

Semnalul de ieșire are două componente. De interes pentru operația de măsurare este prima parte dependentă de informația primară x . Componenta derivativă funcție de x definește sensibilitatea elementului senzorial.

A doua componentă, este atribuită zgomotului perturbator. Componenta derivativă este denumită sensibilitatea la zgomot a elementului senzorial.

O operație de măsurare de calitate impune un raport semnal / zgomot ridicat exprimabil printr-o dependență de forma:

$$\frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_0 \cdot \Delta x \gg \frac{\partial f}{\partial P}\bigg|_0 \cdot \Delta P \quad (3.74)$$

Inegalitatea anterioară este verificată dacă este îndeplinită una din condițiile:

1. Prima condiție impusă pentru un raport adecvat semnal util / zgomot înseamnă o sensibilitate mult mai mare a elementului senzorial pentru informația utilă decât față de zgomotul posibil. Metoda de compensare a influenței este una dintre cele mai utilizate.

$$\frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_0 \gg \frac{\partial f}{\partial P}\bigg|_0 \quad (3.75)$$

2. A doua condiție reprezintă sensibilitatea la zgomot a elementului senzorial în punctul de funcționare original "0". O alegere judicioasă a acestui punct pe caracteristică conduce la îndeplinirea condiției considerate (fig.3.39).

$$\frac{\partial f}{\partial P}\bigg|_0 = 0 \quad (3.76)$$

3. A treia condiție este posibil de pus în aplicare prin alegerea corectă a cablurilor de legătură și ecranare corespunzătoare.

$$\Delta P = 0 \quad (3.77)$$

4. A patra condiție este dependentă de elementul senzorial. În cazul elementelor senzoriale pasive metoda este aplicabilă prin creșterea nivelului tensiunii de alimentare a circuitului de măsurare. În cazul elementelor senzoriale de tip generator acest lucru nu este posibil.

$$\Delta x \gg \Delta P$$

(3.78)

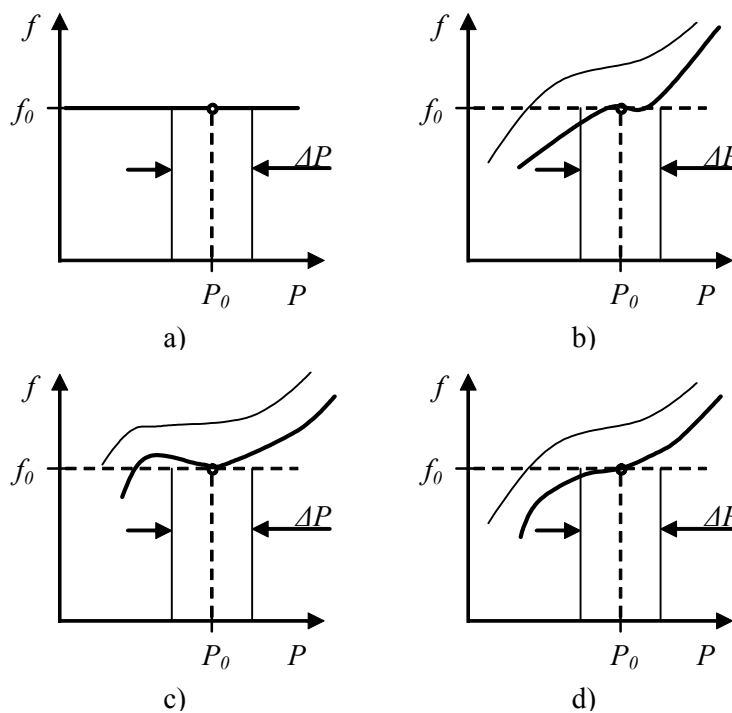


Fig. 3.39 Zgomot și punct de funcționare

Efectele interacțiunii senzor – mediu se pot analiza pe baza ecuației (3.72) considerând și termeni de ordinul “2” din dezvoltarea în serie. O astfel de formă, considerând doar componenta sensibilă la semnalul util, este prezentată prin ecuația:

$$\Delta y = \underbrace{\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_0 \cdot \Delta x}_{\text{Semnal util}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_0 \cdot (\Delta x)^2}_{\text{Neliniaritate datorită semnalului util}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial P} \Big|_0 \cdot (\Delta x \cdot \Delta P)}_{\text{Abatere a sensibilității datorită altor intrări}} \quad (3.79)$$

Efectele acestei interacțiuni pot fi ireversibile dacă elementul senzorial nu revine la starea inițială după dispariția tuturor intrărilor.

3.2.3.9. Propagarea erorilor de justețe

Acuratețea și precizia unui sistem complex de măsurare depind de procesul de proiectare și toleranțele părților interdependente. Similar, dacă un experiment are un număr de surse de componente, fiecare fiind măsurate independent, se impune să se definească o procedură de evaluare a acurateței.

Să considerăm problema de calcul a unei mărimi N care este definită ca o funcție

de n variabile independente, x_1, x_2, \dots, x_n rezultate dintr-un proces de măsurare:

$$N = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.80)$$

Fie $\pm \Delta x_1, \pm \Delta x_2, \dots, \pm \Delta x_n$ erorile individuale pentru fiecare dintre variabilele independente. Aceste erori determină o eroare de cunoaștere a cantității N :

$$N \pm \Delta N = f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) \quad (3.81)$$

Dezvoltând în serie Taylor funcția (3.81) se obține:

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N = & f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \Delta x_1 \cdot \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \cdot \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \cdot \frac{\partial f}{\partial x_n} \\ & + \frac{1}{2} (\Delta x_1)^2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} + \dots \end{aligned} \quad (3.82)$$

Având în vedere relația (3.80) și neglijând termenii de ordin superior, se obține eroare absolută de cunoaștere a mărimii N :

$$\Delta N = \Delta x_1 \cdot \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \cdot \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \cdot \frac{\partial f}{\partial x_n} \quad (3.83)$$

Această formă de evaluare este utilizată pentru că unele derivate parțiale pot fi negative astfel încât efectul total să se anuleze [shely]. În plus, relația (3.83) ilustrează influența puternică a unei componente în rezultatul final. Chiar la o valoare redusă a termenului Δx_i influența este puternică dacă termenul $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ este de valoare ridicată în comparație cu ceilalți termeni derivativi.

Relația (3.83) permite și determinarea valorii maxime:

$$|\Delta N|_{\max} = \Delta x_1 \cdot \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \Delta x_2 \cdot \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| + \dots + \Delta x_n \cdot \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \quad (3.84)$$

În proiectarea sistemului de măsurare se admite deseori *metoda efectelor egale*:

$$\Delta x_1 \cdot \frac{\partial f}{\partial x_1} = \Delta x_2 \cdot \frac{\partial f}{\partial x_2} = \dots = \Delta x_n \cdot \frac{\partial f}{\partial x_n} = \frac{\Delta N}{n} \quad (3.85)$$

Eroarea admisibilă Δx_i pentru fiecare variabilă se poate determina ca fiind:

$$\Delta x_i = \frac{\Delta N}{n \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.86)$$

în considerentul admiterii erorii cumulate ΔN de valoare cunoscută.

O altă metodă este cea a compunerii pătratice a erorilor (*square root of of squares - RSS*):

$$\Delta N = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\Delta x_i \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} \quad (3.87)$$

Exemplul 3.5

Un sistem mecatronic de control utilizează relația de definiție a forței centrifuge pentru determinarea vitezei unghiulare a unui element. Se cere să se determine eroare de cunoștere a vitezei unghiulare dacă se cunosc:

- Masa elementului în mișcarea de rotație $m = 100 \pm 0.01 \text{ g}$;
- Raza de mișcare a masei "m": $R = 50 \pm 0.01 \text{ mm}$;
- Forța măsurată $F = 750 \pm 0.75 \text{ N}$

Expresia vitezei unghiulare dependente de forța centrifugă este:

$$\omega = \sqrt{\frac{F}{mR}} \quad (3.88)$$

Utilizând considerentele anterioare și valorile din ipoteza de lucru se poate determina cantitatea urmărită:

$$\omega = \sqrt{\frac{F}{mR}} = \sqrt{\frac{750}{(0.1) \cdot (0.05)}} = 387.3 \text{ rad / s} \quad (3.89)$$

Utilizând relația (3.84) de compunere a erorilor, se poate scrie:

$$|\Delta \omega|_{\max} = \Delta F \cdot \left| \frac{\partial \omega}{\partial F} \right| + \Delta m \cdot \left| \frac{\partial \omega}{\partial m} \right| + \Delta R \cdot \left| \frac{\partial \omega}{\partial R} \right| \quad (3.90)$$

Derivatele parțiale (rel.3.90) și valorile numerice corespunzătoare sunt:

$$\frac{\partial \omega}{\partial m} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{F}}{m\sqrt{mR}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{750}}{0.1 \cdot \sqrt{0.1 \cdot 0.05}} = -1936 \quad (3.91)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial F} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{FmR}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{750 \cdot 0.1 \cdot 0.05}} = 0.2581 \quad (3.92)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial R} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{F}}{R\sqrt{mR}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{750}}{0.05 \cdot \sqrt{0.1 \cdot 0.05}} = -3872.983 \quad (3.93)$$

În consecință, pe baza relației (3.90) și a relațiilor (3.91-3.93) se determină eroarea maximă de calcul pentru viteza unghiulară:

$$\begin{aligned} |\Delta \omega|_{\max} &= (0.75) \cdot |0.2581| + (1 \cdot 10^{-5}) \cdot |-1936| + (1 \cdot 10^{-5}) \cdot |-3872.983| = \\ &= 0.193575 + 0.01936 + 0.03873 \approx 0.2516 \end{aligned} \quad (3.94)$$

3.2.3.10. Caracteristicile dinamice

Regimul dinamic al elementului senzorial corespunde funcționării acestuia în situația în care mărimea de măsurat și ca urmare semnalul de ieșire, variază în timp. Variațiile mărimii de intrare nu pot fi urmărite, în general, instantaneu la ieșire. Datorită inerției – mecanice, termice, electromagnetice – și amortizărilor dependente de viteză, variația semnalului de intrare se transmite cu întârziere la ieșire și cu unele alterări în raport cu valorile corespunzătoare caracteristicii statice.

Fie sistemul prezentat în figura 3.40.



Fig. 3.40 Sistemul și mărimea de intrare și ieșire

Dinamica elementului senzorial este descrisă de o ecuație diferențială de un anumit ordin ca relație între mărimile de intrare $u(t)$ și de ieșire $y(t)$, unde $y^{(k)}(t)$ este derivata de ordinul k a mărimii de ieșire $y(t)$, iar $u^{(i)}(t)$ este derivata de ordinul i a mărimii de intrare, $u(t)$:

$$\begin{aligned} a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_0 y(t) = \\ = b_m u^{(m)}(t) + b_{m-1} u^{(m-1)}(t) + \dots + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (3.95)$$

$$y^{(k)}(t) = \frac{d^k y}{dt^k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.96)$$

$$u^{(i)}(t) = \frac{d^i u}{dt^i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.97)$$

Modul de răspuns al acestui sistem se obține prin considerarea semnalelor de intrare ca: un semnal impuls, treaptă, rampă, sinusoidal, zgomot alb etc. în conformitate cu teoria sistemelor.

În practică se întâlnesc în general sisteme de ordinul zero, unu, sau doi.

- **Element senzorial de ordinul zero**

$$y(t) = ax(t) \quad (3.98)$$

Un exemplu tipic de element de ordinul zero este traductorul rezistiv de deplasare lineară sau de rotație (fig.3.40).

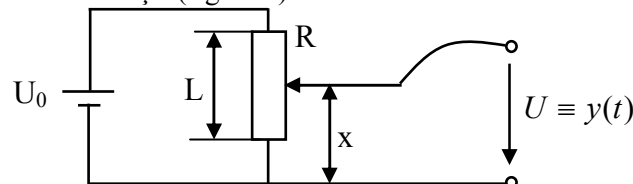


Fig. 3.41 Element de ordinul zero: traductorul rezistiv

Rezistența R se găsește sub tensiunea de alimentare U_0 și este palpată de un cursor pus în mișcare de obiectul a cărui mișcare este analizată. Neluând în considerare eventualele influențe ale inductanței și capacității parazite, forțele de inerție și frecare și considerând că rezistența este uniform distribuită pe lungimea “ L ”, atunci există relația:

$$U = \frac{U_0}{L} \cdot x = S \cdot x \tag{3.99}$$

unde $S[V/mm]$ este sensibilitatea traductorului.

Un alt exemplu caracteristic este cel al traductorului tensorezistiv (TER) (fig.3.42). Modul de răspuns al sistemului este practic instantaneu. Coeficientul de tensosensibilitate $K = (\Delta R/R)/(\Delta l/l)$ face legătura între semnalul de intrare și cel de ieșire.

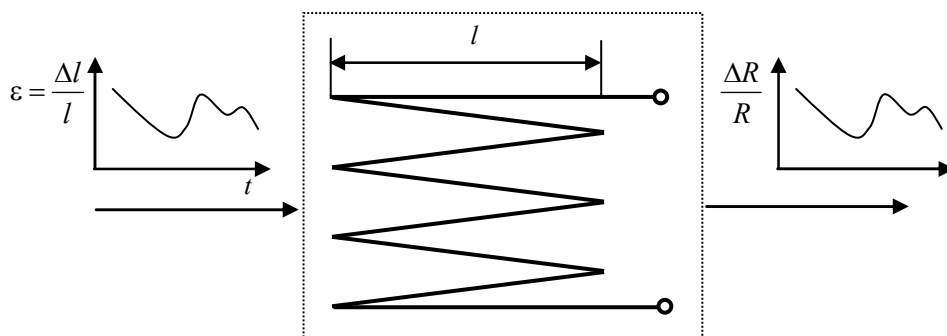


Fig. 3.42 Exemplu de element de ordinul zero – traductorul tensorezistiv

Elementele de ordinul zero nu introduc întârziere în transferul informației dar modifică amplitudinea semnalului de intrare.

• **Elemente de ordinul întâi**

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \tag{3.100}$$

Funcția de transfer al acestui element este:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} = \frac{S}{\tau \cdot s + 1} \tag{3.101}$$

unde: $S = 1/a_0 [UM_Y/UM_X]$ - este sensibilitatea elementului; $\tau = a_1/a_0 [s]$ este constanta de timp a elementului.

Răspunsurile elementului la un semnal treaptă unitar și respectiv rampă unitară sunt prezentate în figurile 3.43 și 3.44. Pe baza reprezentărilor grafice sunt evidențiate elementele caracteristice.

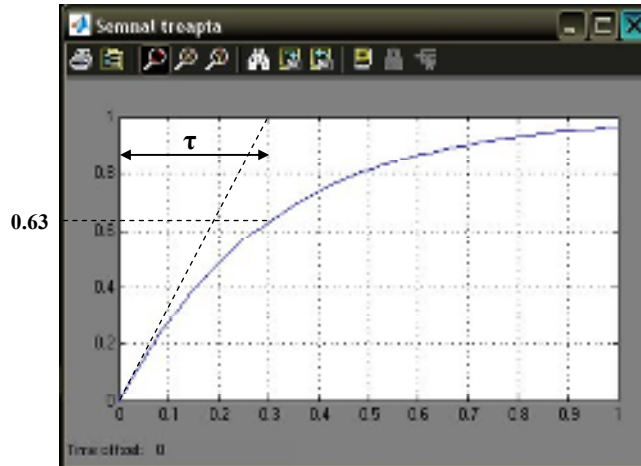


Fig. 3.43 Răspunsul sistemului la un semnal treaptă și constanta de timp

Performanțele elementului senzorial în timpul procesului tranzitoriu sunt:

1. *constantă de timp* – intervalul de timp după care valoarea de ieșire atinge 0.63 din valoarea de regim stabilizat;
2. *timpul de întârziere (delay time)* – timpul necesar semnalului de ieșire pentru a atinge 50 % din valoarea de regim stabilizat:

$$t_i = t_{50} = \tau \ln 2$$

(3.102)

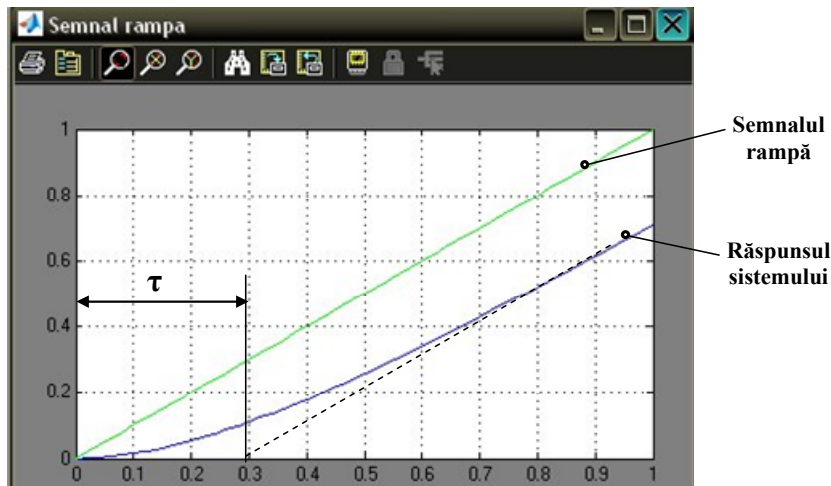


Fig. 3.44 Răspunsul sistemului la un semnal rampă

3. *timpul de creștere (rise time)* – timpul necesar semnalului de ieșire pentru a crește de la 10 % până la 90 % din valoarea de regim stabilizat:

$$t_c = t_{90} - t_{10} = \tau \ln 9 \quad (3.103)$$

Exemplul 3.6

Funcția de transfer al unui senzor de temperatură este dată de relația:

$$G(s) = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{20s + 1} [V / ^\circ C] \quad (3.104)$$

Se cere să se determine răspunsul elementului senzorial dacă este introdus într-un vas cu apă aflată la 100 °C.

Introducerea elementului senzorial în apa aflată la 100 °C echivalează cu aplicarea unui semnal de intrare de tip treaptă.

Semnalul de ieșire este definit pe baza funcției de transfer prin:

$$U(s) = G(s) \cdot INTRARE(s) = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{20s + 1} \cdot \frac{100}{s} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{s(s + 0.05)} \quad (3.105)$$

Pe principiul clasic se poate găsi semnalul în timp:

$$u(t) = 40 \cdot 10^{-4} (1 - e^{-0.05t}) \quad (3.106)$$

Traductoarele de temperatură, tahogeneratoarele (traductoare de viteză unghiulară) sunt elemente senzoriale de ordinul întâi.

• **Elemente de ordinul doi**

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (3.107)$$

Ecuția anterioară poate fi adusă la forma:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dy(t)}{dt} + \omega_0^2 y(t) = k\omega_0^2 x(t) \quad (3.108)$$

unde: $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ - este coeficientul de amortizare; $\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ - este pulsația de

rezonanță; $k = \frac{1}{a_0}$ este sensibilitatea sistemului.

Funcția de transfer a sistemului se poate determina prin metoda clasică:

$$G(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + 2\omega_0\xi s + \omega_0^2} \quad (3.109)$$

Răspunsul sistemului la diferite semnale de intrare se determină prin metoda clasică, specifică teoriei sistemelor. În figura 3.45 se prezintă răspunsul sistemului la un semnal treaptă unitară iar în figura 3.46 răspunsul la un semnal rampă unitară.

Forma de variație generală a semnalului de ieșire pentru sistemul de ordinul 2 este prezentată în figura 3.47 (y_s – valoarea de regim stabilizat; σ – supracreșterea; t_c – timpul de creștere; t_{sc} – timpul de supracreștere; t_s – timpul de stabilizare). Performanțele elementului senzorial în timpul regimului dinamic sunt (fig.3.48):



Fig. 3.45 Răspunsul sistemului de ordinul 2 la un semnal treaptă unitară
(1- $\xi = 0$; 2- $\xi = 0.1$; 3- $\xi = 1$; 4- $\xi = 2$; $\omega=1$)



Fig. 3.46 Răspunsul sistemului de ordinul 2 la un semnal rampă unitară
(1- $\xi = 0$; 2- $\xi = 0.1$; 3- $\xi = 1$; 4- $\xi = 2$; $\omega=1$)

1. *timpul de creștere (rise time)* – reprezintă durata necesară semnalului de

ieșire pentru a trece de la valoarea “0” la valoarea de regim stabilizat (prima oară):

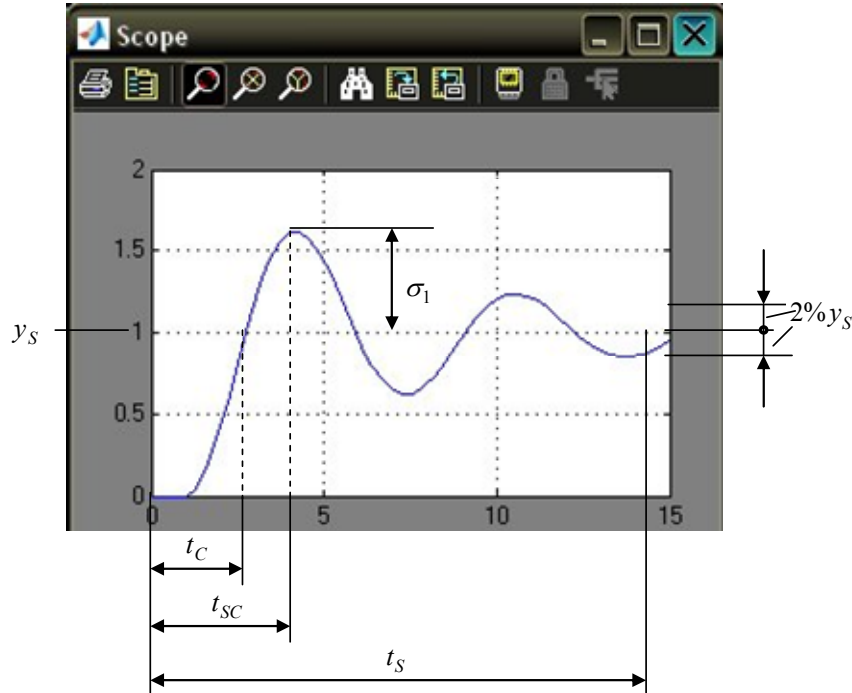


Fig. 3.47 Mărimi specifice regimului dinamic

$$t_c = \frac{\pi}{2\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.110)$$

2. *timpul de atingere a valorii maxime (peak time)* – reprezintă durata necesară a semnalului de ieșire de a atinge valoarea maximă:

$$t_{sc} = \frac{\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.111)$$

3. *supracreșterea (overshoot)* – eroarea dinamică la prima creștere a semnalului de ieșire peste valoarea de regim stabilizat:

$$\sigma_1 = y_s \cdot e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.112)$$

4. *raportul de amortizare* – reprezintă raportul dintre cea de a doua supracreștere și prima supracreștere:

$$\text{rap_amortizare} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{y_S \cdot e^{-\frac{3\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}}{y_S \cdot e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}} = e^{-\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.113)$$

5. *timpul de liniștire* – durata necesară semnalului de ieșire de a se stabili într-un interval $\pm 2\% y_S$:

$$t_S \approx \frac{4}{\xi\omega_0} \quad (3.114)$$

6. *numărul de oscilații până la liniștire*:

$$n = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1} \quad (3.115)$$

Exemplul 3.7

Accelerometrul se identifică cu elementul senzorial pentru măsurarea accelerației. În conformitate cu clasificarea elementelor senzoriale, senzorii de accelerație se pot clasifica în: senzori pasivi (de ex. capacitiv) și senzori activi (de ex. piezoelectric).

Elementele sensibile (fig.2.29) sunt în general din categoria inerțială (cu masă seismică) constând dintr-un sistem oscilant cu un singur grad de libertate, y : o masă seismică M , un element elastic de constantă K și un amortizor cu coeficientul de amortizare vâscoasă C . Întregul sistem este montat într-o carcasă care va fi supusă oscilațiilor sistemului investigat descrise de parametrul $x(t)$.

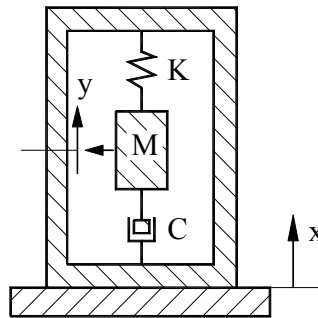


Fig. 3.48 Senzor pentru accelerație

Mișcarea masei M este descrisă de ecuația:

$$M \left(\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \right) = Ky + C \frac{dy}{dt} \quad (3.116)$$

Funcția de transfer al elementului senzorial este:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{s^2 X(s)} = \frac{M}{Ms^2 + Cs + K} = \frac{1}{s^2 + \frac{C}{M}s + \frac{K}{M}} \quad (3.117)$$

Funcția de transfer anterioară este similară cu (3.94). Conversia forței de inerție în semnal electric se realizează pe principii diverse rezultând o gamă variată de senzori de accelerație: accelerometru mecanic (inerțial); accelerometru electromecanic; accelerometru piezoelectric; accelerometru piezorezistiv; accelerometru tensorezistiv; accelerometru capacitiv, electrostatic; micro-accelerometru, nanoaccelerometru.

3.3. Propagarea erorilor

Eroarea de măsurare este definită ca diferența dintre valoarea măsurată x și valoarea adevărată x_0 și se poate exprima în funcție de timp sub forma:

$$\Delta x(t) = x(t) - x_0(t) \quad (3.118)$$

Aplicând transformata Laplace relației anterioare, se obține:

$$\Delta X(s) = X(s) - X_0(s) \quad (3.119)$$

Considerând sistemul de măsurare reprezentat prin funcția de transfer, putem scrie dependența (fig.3.49):

$$G(s) = \frac{X(s)}{X_0(s)} \quad (3.120)$$

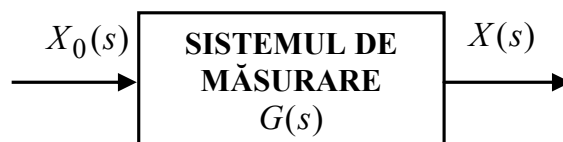


Fig. 3.49 Sistemul de măsurare și funcția de transfer

Din relațiile (3.119) și (3.120) se poate deduce expresia erorii absolute:

$$\Delta X(s) = \left(1 - \frac{1}{G(s)}\right) \cdot X(s) \quad (3.121)$$

Pornind de la expresia erorii relative în timp:

$$\Delta x_r(t) = \frac{x(t) - x_0(t)}{x_0(t)} = \frac{x(t)}{x_0(t)} - 1 \quad (3.122)$$

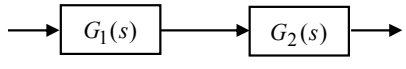
putem exprima forma laplaceană a erorii relative:

$$\Delta X_r(s) = \frac{X(s)}{X_0(s)} - 1 = G(s) - 1 = G_r(s) \quad (3.123)$$

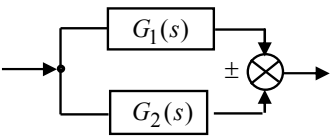
Funcția de transfer $G_r(s)$ caracterizează transferul erorii în sistemul de măsurare și nu depinde de valoarea de intrare în sistem.

Tabelul 3.7 și tabelul 3.8 prezintă modul de transfer a erorilor pentru două secvențe de construcție a sistemului de măsurare.

Tabelul 3.7

Elemente ale sistemului de măsurare conectate în serie	
Funcția de transfer a sistemului	$G_1(s)G_2(s)$
Eroarea relativă	$\frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2}$
Eroarea absolută	$G_2\Delta x_1 + G_1\Delta x_2$
Incertitudinea relativă	$\sqrt{u^2\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right) + u^2\left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right) + 2u\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}, \frac{\Delta x_2}{x_2}\right)}$
Incertitudinea absolută	$\sqrt{G_1^2 u^2(\Delta x_1) + G_2^2 u^2(\Delta x_2) \pm 2G_1 G_2 u(\Delta x_1, \Delta x_2)}$

Tabelul 3.8

Secvență paralelă a elementelor sistemului de măsurare	
Funcția de transfer	$G_1(s) \pm G_2(s)$
Eroare relativă	$\frac{G_1}{G_1 \pm G_2} \cdot \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{G_2}{G_1 \pm G_2} \cdot \frac{\Delta x_2}{x_2}$
Eroare absolută	$\Delta x_1 + \Delta x_2$
Incertitudinea relativă	$\sqrt{\frac{G_1^2}{(G_1 \pm G_2)^2} u^2\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right) + \frac{G_2^2}{(G_1 \pm G_2)^2} u^2\left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right) \pm 2 \frac{G_1 G_2}{(G_1 \pm G_2)^2} u\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}, \frac{\Delta x_2}{x_2}\right)}$
Incertitudinea absolută	$\sqrt{u^2(\Delta x_1) + u^2(\Delta x_2) \pm 2u(\Delta x_1, \Delta x_2)}$

3.4. Caracteristici de exploatare în sistemele de achiziție a datelor

3.4.1. Introducere

Realizarea unui sistem de achiziția datelor performant este un deziderat al oricărui proiectant sau utilizator de astfel de sisteme. Atingerea parametrilor calitativi doriți se bazează și pe luarea în condiderare a analizei factorilor perturbatori din mediul de lucru și luarea măsurilor ca influențele acestora asupra sistemului să fie minime.

În cazul semnalelor numerice influența semnalelor perturbatoare este practic zero datorită diferenței mari între valorile de tensiune corespunzătoare celor două nivele logice. În cazul semnalelor analogice influența se face însă simțită.

O sursă de semnale perturbatoare este un dispozitiv sau un echipament electric care, în funcționare, produce în mediul înconjurător un câmp electric și / sau un câmp magnetic, variabile în timp [3.4b]. Aceste câmpuri se propagă pornind de la sursă și provoacă, în circuitele din apropiere, tensiuni și curenți electrici a căror prezență nu este dorită.

În toate cazurile nivelul zgomotului este influențat de o serie de factori:

- impedanța de ieșire a sursei de semnal (sau de impedanța de intrare a sistemului);
- impedanța de sarcină a sursei de semnal;
- firul conductor prin lungime, ecranare și conectare la masă;
- apropierea de sursa de zgomot;
- amplitudinea semnalului și a zgomotului.

Cele mai multe probleme de zgomot pot fi rezolvate printr-o atenție mărită asupra unor principii de conectare la masă și ecranare.

Este necesară precizarea câtorva aspecte legate de noțiunea de *masă* pentru domeniul electric. În acest sens reamintim că *tensiunea electrică* reprezintă o diferență de potențiale electrice. În scopul stabilirii și menținerii reproductibile a tensiunilor din circuit, este necesar a se stabili un punct de referință față de care să fie măsurate toate tensiunile. Acest punct de referință unic este numit punct de masă. În același timp noțiunea poate primi și o a doua semnificație corelată cu cea de protecție a operatorului. Se vorbește în acest caz despre *masă de protecție*. În figura 3.50 se prezintă simbolurile grafice pentru *masa de protecție* și *masa de semnal, alimentare*.

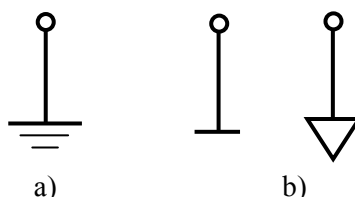


Fig. 3.50 Noțiunea de masă și simbolul aferent: a) de protecție; b) de semnal

Este necesar a nu se confunda noțiunea de “*masă de protecție*” cu cea a “*circuitului invers*” (*return paths*).

În figura 3.51 este ilustrată diferența între noțiunea de masă și cea de circuit invers.

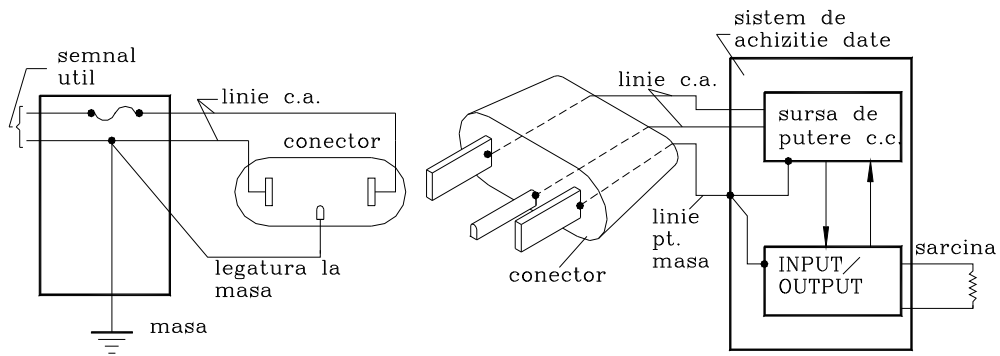


Fig. 3.51 Masă și circuit invers

Un senzor generator poate fi conectat în două variante: cu un punct conectat la masă sau fără conectare (flotant) (fig.3.52)

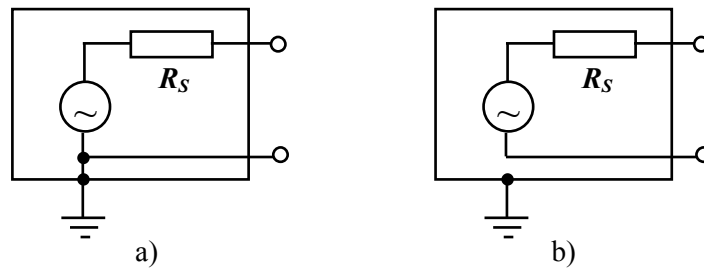


Fig. 3.52 Modalități de conectare a unui senzor: a) cu un punct la masă;

b) flotant

În concordanță cu cele prezentate anterior în figurile 3.51 – 3.53 sunt sugerate trei modalități de conectare și legare la masă [2.19].

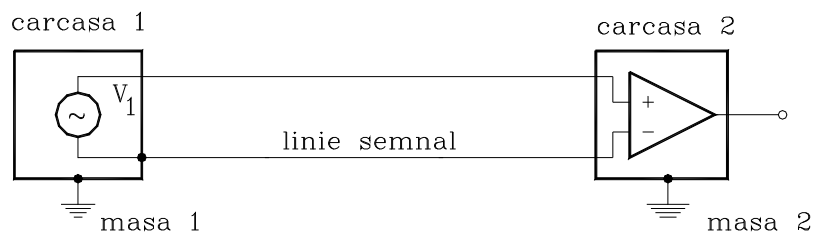


Fig. 3.53 Conectare diferențială

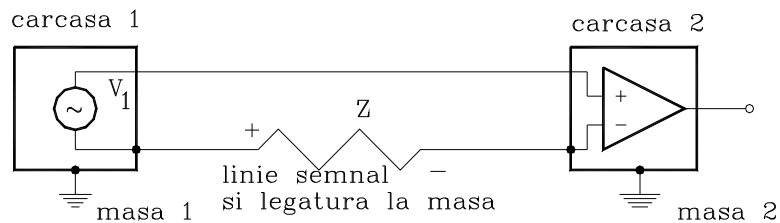


Fig. 3.54 Conectare "single-ended"

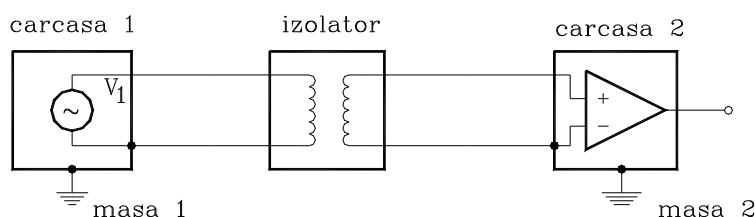


Fig. 3.55 Conectare cu izolare

Procesul de măsurare este afectat de prezența “zgomotului” ca rezultat a unor influențe externe (fig.2.142).

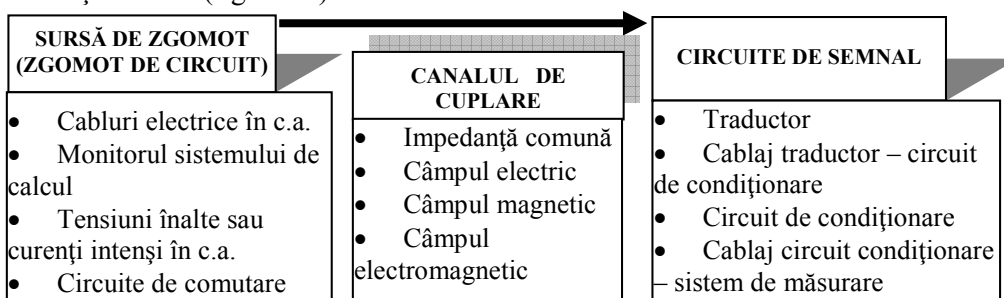


Fig. 3.56 Sursele de zgomot în achiziția semnalelor

Mecanismul de realizare a cuplajului între sursele de zgomot și receptorul sistemului de achiziție este comun și pentru cazul sistemelor de control. Cele patru forme de cuplaj sunt prin:

- impedanțe comune (*cuplajul conductiv*);
- câmpul electric (*cuplajul capacitiv*);
- câmpul magnetic (*cuplajul inductiv*);
- câmpul electromagnetic (*radiații*).

Semnalele perturbatoare rezultate prin *cuplaj inductiv* apar dacă sistemul informațional se găsește în apropierea unor circuite electrice care comută curenți intensi ceea ce denotă prezența unor fluxuri magnetice variabile în timp. Acest cuplaj inductiv se realizează practic între sursa de perturbații și firele de legătură. Semnalele perturbatoare datorate acestui cuplaj se pot echivala cu surse de tensiune parazite cuplate în serie cu sursa de semnal util (în tensiune). În cazul unor surse de semnal util în curent acest efect lipsește [2.5]. Tensiunea parazită indusă scade prin micșorarea câmpului magnetic sursă și prin protecția conductorului perturbat contra radiațiilor.

Dintre metodele de reducere a perturbațiilor datorate cuplajului inductiv, se pot aminti :

- mărirea distanței dintre sursa perturbatoare și circuitul perturbat ;
- utilizarea firelor torsadate ;
- utilizarea cablurilor coaxiale.

Printre metodele importante de prevenire a cuplajelor inductive este ecranarea magnetică. Această ecranare se poate realiza cu ecrane :

- din tablă magnetică (fier, oțel electrotehnic, permalloy) – care oferă o cale de

reluctanță minimă pentru câmpul magnetic incident. Aceste ecrane se folosesc pentru frecvențe joase de 100- 500 Hz.

- tablă nemagnetică. Fluxul magnetic perturbator induce curenți turbionari în tabla nemagnetică iar aceștia produc un flux magnetic de reacție, egal cu cel inițial și anulând efectul acestuia. Această metodă se utilizează la frecvențe de peste 1-10kHz.

Cuplajul capacitiv are ca origine capacitățile parazite dintre cablurile rețelei de alimentare (c.a., 50 Hz) și firele de legătură ale sistemului informațional.

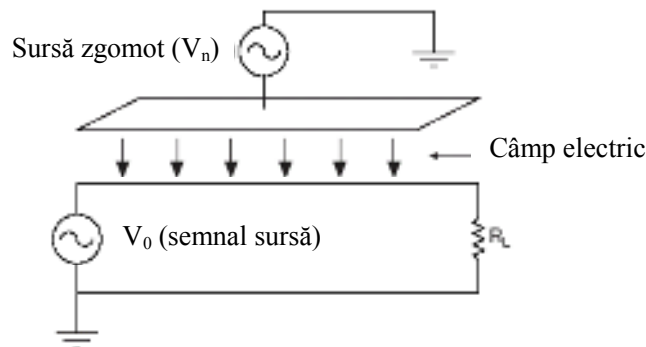


Fig. 3.57 Reprezentarea fizică a cuplajului capacitiv

Schema echivalentă a fenomenului de cuplaj este prezentată în figura 3.58. Semnalele perturbatoare rezultate prin acest cuplaj influențează semnalele utile generate atât de sursele de curent (fig.3.58a) cât și de cele de tensiune (fig.3.58b).

Amplitudinea semnalului perturbator este dată de divizorul format din capacitatea parazită C_p și impedanța față de masă a circuitului de măsurare în paralel cu rezistența internă a sursei de semnal util (R_p , respectiv R_s).

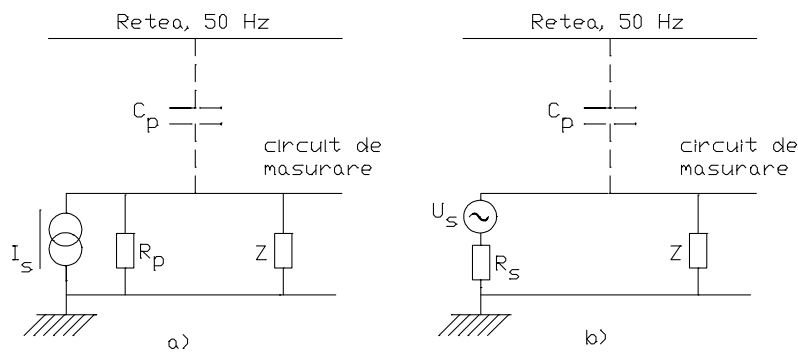


Fig. 3.58 Cuplaj capacitiv între rețeaua de alimentare și circuitul de măsurare

Tensiunea de zgomot perturbatoare U_z care apare la intrarea circuitului de măsurare are expresia [3.5]:

$$U_z = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_{C_p}^2}} \cdot U = 2\pi \cdot f \cdot C_p \cdot R \cdot U \quad (3.124)$$

Impedanța sursei de semnal are un rol hotărâtor în nivelul “zgomotului” capacitiv rezultat în sistemul de măsurare. În tabelul 2.7 se prezintă informativ valori ale impedanței pentru cele mai uzuale traductoare [3.20].

Tabelul 3.8

TRADUCTOR	IMPEDANȚĂ
Termocuplu	Scăzută $\leq 20 \Omega$
Termistor	Înaltă $> 1 k\Omega$
Traductor rezistiv de temperatură	Scăzută $< 1 k\Omega$
Traductor tensometric	Scăzută $< 1 k\Omega$
Electrod pH	Foarte înaltă $10^9 \Omega$
Potențiometru (traductor de deplasare)	Înaltă $500 \Omega \div 100 k\Omega$

Ecranarea conduce la reducerea semnalelor parazite prin cuplaj capacitiv (fig.3.59) datorită impedanței reduse Z_e de conectare la masă a ecranului. Prezența ecranului conduce și la reducerea zgomotelor prin absorbția câmpurilor magnetice și reflexia celor electromagnetice.

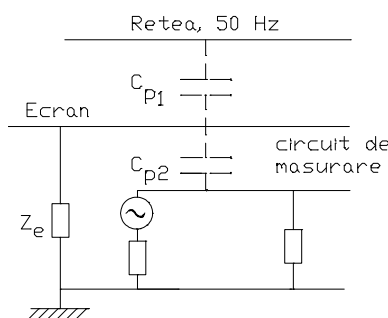


Fig. 3.59 Reducerea zgomotului prin ecranare

Cuplajul conductiv se datorează modul de proiectare și materializare a circuitului de măsurare. Există cuplaj conductiv dacă un conductor comun este la originea influenței exercitate de dispozitivul perturbator asupra circuitului perturbat. Se disting două cazuri [3.4a]:

- conductorul comun este suportul prin care se propagă perturbațiile create de dispozitivul perturbator;
- conductorul comun, fiind parcurs de curent electric, este cauza unor tensiuni parazite.

În cazul sistemelor de joasă frecvență (sub 1 MHz) structura cea mai utilizată este cea cu un singur punct de masă. În varianta din figura 3.60 masa locală a fiecărui element a sistemului de măsurare se află la un potențial diferit față de masa principală ($V_0 = 0 V$). În acest mod se introduc semnale parazite la etajele de nivel inferior. În cazul variantei din figura 3.61 fiecare element se conectează direct la masa principală și astfel nu mai are efecte parazite.

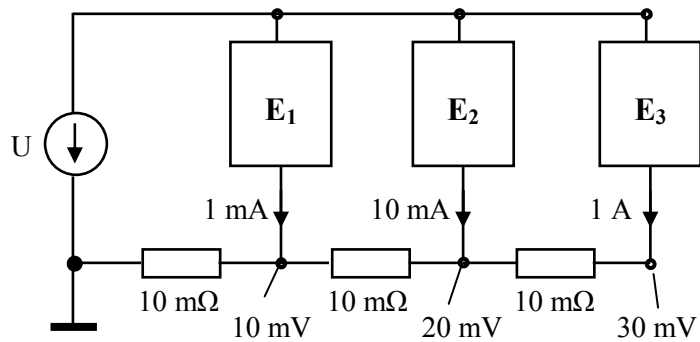


Fig. 3.60 Cuplaj prin conducție

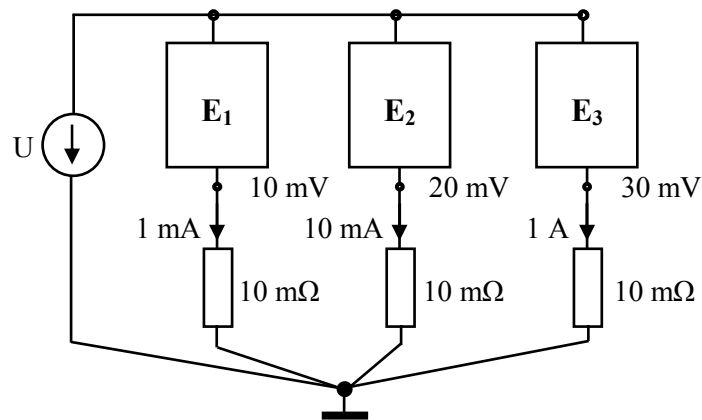


Fig. 3.61 Mod de conectare cu eliminarea cuplajului prin conducție

Varianta ideală ar consta din conectarea separată a fiecărui bloc din sistemul de măsurare la masa principală. Acest lucru nu este în general posibil. Din acest motiv se grupează circuitele după tipul și mărimea semnalului, sensibilitate.

Un exemplu edificator privind această influență este prezentat în figura 3.60.

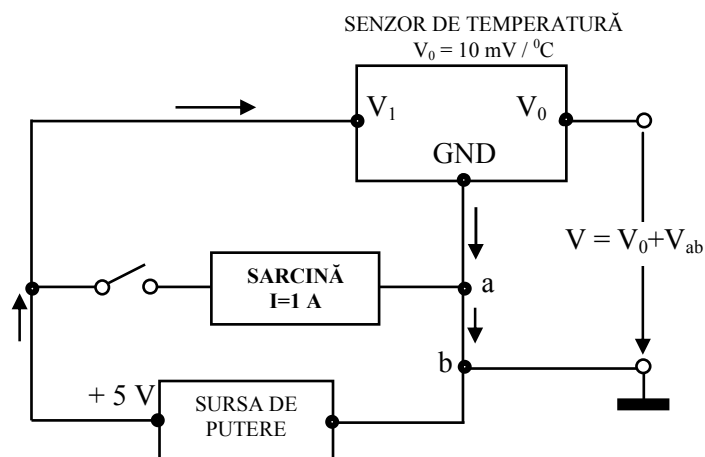


Fig. 3.62 Cuplaj inductiv

Varianta unui circuit serie pentru semnalul util și legătura la masă este prezentată în figura 3.60. O rezistență de 0.1Ω între punctele “a” și “b” la un curent de 1 A înseamnă o variație a semnalului măsurat cu până la 100 mV care poate defini o eroare de măsurare de $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Eliminarea acestei deficiențe se realizează prin separarea circuitelor (fig.3.61)[3.19].

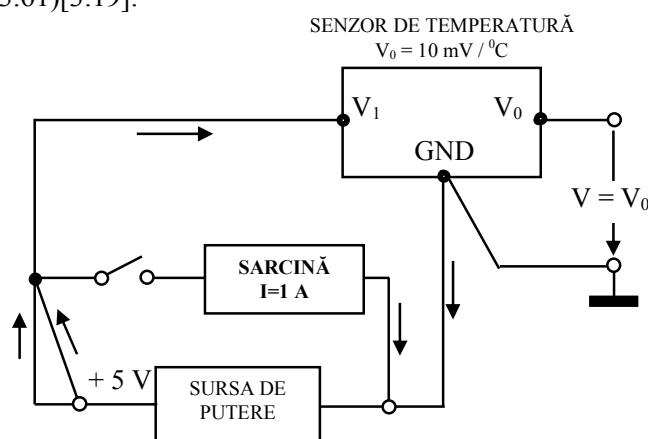


Fig. 3.63 Montaj cu eliminarea cuplajului conductiv

Un ghid referitor la cauze generatoare de zgomot și modul de tratare a problemei este prezentat în tabelul 3.9 [3.12].

Tabelul 3.9

OBSERVATIE	CAUZA	SOLUTIE POSIBILA	OBS.
Zgomot ca funcție de localizarea în cablu	Cuplaj capacitiv	Se utilizează cablu ecranat sau torsadat.	A
	Cuplaj inductiv	Se reduce aria buclei, se utilizează cablu torsadat sau ecran metalic	B
Valoarea medie a zgomotului: • nu este zero • este zero	Traseul conductiv sau legături la masă	Defecțiuni a cablului sau alte pierderi. Se elimină multiplele puneri la masă	C
	Cuplaj capacitiv	Se utilizează cablu ecranat sau torsadat	A
Ecran introdus • masă semnificativă • masă nesemnificativă	Cuplaj capacitiv	Se utilizează pereche de cablu ecranat sau torsadat	A
	Cuplaj inductiv	Se reduce aria buclei, se utilizează cablu torsadat sau ecran metalic	B
Sarcină mărită • reduce eroarea • mărește eroarea	Cuplaj capacitiv	Se utilizează cablu ecranat sau torsadat	A
	Cuplaj inductiv	Se reduce aria buclei, se utilizează cablu torsadat sau ecran metalic	B

(continuare Tabelul 3.9)

Caracteristică dominantă • frecvență joasă • frecvență înaltă	Linie de c.a. 50 Hz, motor, etc.	(1) Se utilizează cablu ecranat sau torsadat; (2) Se reduce aria buclei, se utilizează cablu torsadat sau ecran metalic; (3) Defecțiune a cablului sau alte pierderi. Se elimină multiplele puneri la masă	
	Radiații electromagnetice	Ecranare completă	D
Zgomot ca funcție de mișcarea cablurilor	Efect triboelectric	Se rigidizează cablurile sau se ung cu lubrifiant	
Zgomot "alb" sau 1/f	Amplificare electronică	Nu este problemă de cablu	

Semnificația notațiilor din tabelul 2.8 este următoarea:

- (A) - se conectează ecranul și se verifică dacă nu există ecrane neconectate;
- (B) - ecrane neferoase sunt bune numai la frecvențe ridicate. Utilizați ecrane din μ Metal la frecvențe joase;
- (C) - poate fi o cuplare capacitivă cu rectificare parazitică, de ex. efecte neliniare;
- (D) - căutați un element de circuit a cărui mărime este ca și ordin cât lungimea de undă a zgomotului (antena). Deschiderile sau crăpăturile în șasiu sau ecrane cu o dimensiune mai mare ca lungimea de undă a zgomotului / 20 trebuie să fie eliminate.

3.5. Concluzii

Procesul de achiziție a datelor este un proces complex care îmbină atât componentă hardware cât și componenta software. Au fost prezentate din acest vast domeniu doar aspectele principale necesare înțelegerii fenomenelor. Prin extinderea achiziției de date asistată de calculator și implicarea acestui aspect și în conducerea (controlul) unor sisteme domeniul abordat este de strict interes pentru specialiștii domeniului de mecatronică.

3.6. Bibliografia capitolului 2

- [3.1]Areny, R.P., Webster, J.G., Sensor and signal conditioning, John Wiley & Sons, Inc., 2001, ISBN 0-471-33232-1
- [3.2]Bentley, J.P., Principles of measurement systems, Pearson Prentice Hall, 2005, ISBN 0-13-043028-5
- [3.3]Bolton, W., Mechatronics. Electronic control systems in mmechanical and electrical engineering, Pearson Education Limited, Prentice Hall, 2003

- [3.4]C. Cepișcă, Semnale analogice în măsurări, Editura Electra, București, 2004, ISBN 973-7728-07-6
- [3.4a] Cepișcă, C., Instrumentație industrială,...
- [3.4b] Cepișcă, C., Interfațarea traductoarelor,...
- [3.5]Cheatle, K. R., Fundamentals of test measurement instrumentation, ISA, 2006, ISBN 978-1-55617-914-3
- [3.6]Chiciuc, A., Corjan, A., Metrologie, standardizare și măsurări, Chișinău, 2002, [http:// library.utm.md/ lucrari/ Tipografia/ Add/ MetrologieStandartizareMasurariCurs](http://library.utm.md/lucrari/Tipografia/Add/MetrologieStandartizareMasurariCurs), accesat 01.08.2010
- [3.7]Dodoc, P., Metrologie generală, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
- [3.8]Dolga, V., Construcția traductoarelor și senzorilor, Lito. UTT, Timișoara, 1993
- [3.9]Dolga, V., Traductoare și senzori, Litografia UPT, Timișoara, 1996
- [3.10]Dolga, V., Senzori și traductoare, Editura Eurobit, Timișoara, 1999, ISBN 973-99-227-9-1
- [3.11]Dolga, V., Proiectarea sistemelor mecatronice, Ed. "Politehnica", Timișoara, 2007
- [3.12] Dolga DAQ
- [3.13]Dumitriu, A., Mecatronică, vol.I, Ed. Universitatea "Transilvania" din Brașov, 2006
- [3.14]Fraden, J., Handbook of modern sensors. Physics, design and applications, Springer Verlag, 2004, ISBN 0-387-00750-4
- [3.15]Garrett, P.H., High performance instrumentation and automation, Taylor & Francis, 2005, ISBN 0-8493-3776-3
- [3.15a] Halaj, M., General characterization of systematic and stochastic errors, în Handbook of measuring system, vol.3, pag.295, editor Sydenham, P.H., Thorn, R., J. Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-470-02143-8
- [3.16]Hofmann, D., Common sources of errors in measurement systems, Handbook of measuring system, vol.3, editor Sydenham, P.H., Thorn, R., J. Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-470-02143-8
- [3.17]Igneș, A., Măsurări în procese industriale, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, 1995
- [3.18]Kevin, J., PC Interfacing and data Acquisition. Techniques for measurement, instrumentation and control, Newnes, Oxford, 2000, ISBN 0 7506 4624 1
- [3.19]Konovalov, L.I., Petelin, D.P., Elementî i sistemî elektroavtomatiki, Moskva, Vîșșaiia șkola, 1980
- [3.20]Mateescu, A., Dumitriu, N., Stanciu, L., Semnale și sisteme, Ed. Teora, București, 2001
- [3.21]Măgureanu, R., Mașini electrice speciale pentru sisteme automate, Editura tehnică, București, 1980
- [3.12a] McGhee, J., Calculation and treatment of errors, în Handbook of measuring system, vol.3,pag.328, editor Sydenham, P.H., Thorn, R., J. Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-470-02143-8
- [3.22]Nawrocki, W., Measurement Systems and Sensors, Artech House, Inc., 2005, ISBN 1-58053-945-9
- [3.22a] Nehmzow, U., Robot Behaviour. Design, description, analysis and modeling,

Springer Verlag, 2009, ISBN: 978-1-84800-396-5

[3.23] Osuna, R.G., Intelligent Sensor Systems, Wright State University, (-)

[3.24] Park, J., Mackay, S., Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems, Elsevier, Amsterdam, 2003, ISBN 0750657960

[3.25] Perju, D., Măsurări mecanice, Editura Politehnica, Timișoara, 2001

[3.25bis] Peterson, M., How to calculate image resolution, <http://www.theiatech.com/resolution.html>, Accesat la data de 19.09.2010

[3.26] Pop, E., Stoica, V., Principii și metode de măsurare numerică, Editura Facla, Timișoara, 1977

[3.27] Regtien, P.P.L., ș.a., Measurement Science for Engineers, Kogan Page Science, London, 2004

[3.27a] Stone, M., Instrumentation and control for process control systems, <http://shieldedpair.net/BAE5413Index.html>, Accesat la 09.09.2010

[3.28] Sydenham, P.H., Thorn, R., Handbook of measuring system, vol.3, J. Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-470-02143-8

[3.29] Tumanski, S., Principles of electrical measurement, Taylor & Francis, 2006, ISBN 0-7503-1038-3

[3.30] Vătășescu, A., ș.a., Dispozitive semiconductoare. Manual de utilizare, Editura Tehnică, București, 1975

[3.31] ***, ACL-8216 High Resolution Multi-function Data Acquisition Card, , ADLink Technology Inc.

[3.32] *** - The handbook of Personal Computer Instrumentation. Data Acquisition, Test, Measurement and Control, Intelligent Instrumentation (USA)

[3.33] ***, Data Acquisition Basics Manual, 320997C-01, National Instruments, Austin, Texas, 1999

[3.34] ***, Sensors, http://www.data-acquisition.us/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_transmitters_measurement/Applications_IC_Temperature_Sensors.html

[3.35] ***, Ground Loop and Returns, zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3394

[3.36] ***, SCM5B, Hardware Linearization of Non-Linear Signals, AN505, Datafort

[3.37] ***, RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC8xx MicroConverter, Application Note, AN-709, Analog Devices

[3.38] ***, Mărimă – definiții, <http://www.webdex.ro/online/dictionar/m%C4%83rime>, Accesat în 02.08.2010

[3.39] FlexiForce® Sensors - Specifications & Features, <http://www.tekscan.com/flexiforce/specs-flexiforce.html>, Accesat la 08.08.2010