

Material 2

1. PROCESUL DE MĂSURARE - INTRODUCERE

Măsurarea este o operațiune experimentală, prin care o mărime fizică este comparată cu o unitate de măsură de aceeași natură, considerată mărime de referință. Pentru *mărimea fizică măsurată se folosește termenul de măsurand*, iar unitatea de măsură poate fi prezentată sub forma unui etalon. *Măsurandul* reprezintă o caracteristică definită clar a unui fenomen sau a unui material, ea putând fi constantă sau variabilă în timp. Spre exemplu, rezistența electrică reprezintă o caracteristică a unui segment de fir conductor. Mărimile fizice de aceeași natură, ca de exemplu lungimea, lățimea și înălțimea, sunt evaluate folosind aceeași unitate de măsură. Prin urmare, în exprimarea valorii unei caracteristici a unui fenomen sau a unui material, vom utiliza produsul între un număr și o unitate de măsură asociată (nu este cazul pentru caracteristici adimensionale, de exemplu torsiunea, coeficientul de frecare sau densitatea relativă). Iar această valoare reprezintă rezultatul procesului de măsurare. Prin urmare, operația de măsurare înseamnă prezentarea proprietăților de interes ale unui obiect/fenomen/material în format numeric și utilizând unitățile de măsură corespunzătoare. Apoi, operația de măsurare include tot timpul o procedură experimentală. În fine, operația de măsurare implică utilizarea unor instrumente de măsurare.

În general, procedurile de măsurare pot fi catalogate ca *directe*, *indirecte* sau *combinate* (nu fac obiectul prezentei publicații).

Măsurările directe presupun utilizarea unor instrumente de măsurare care interacționează cu măsurandul. Valoarea măsurandului este citită de pe indicația/panoul/ecranul instrumentului și, eventual, ajustată cu un factor de corecție.

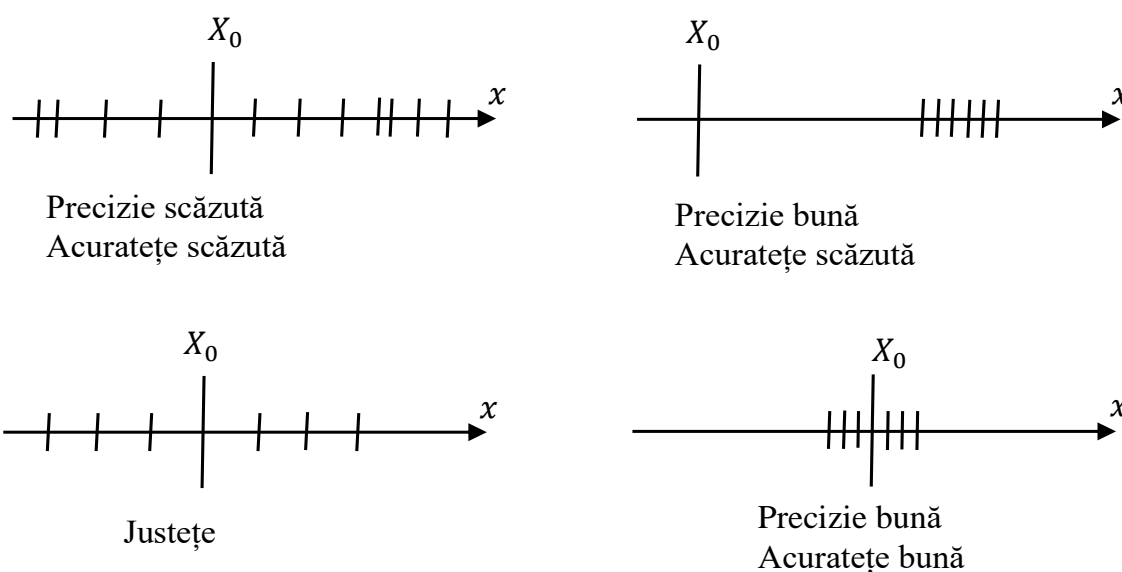
Măsurările indirecte presupun estimarea valorii măsurandului prin calcule în care intervin diferite argumente. Aceste argumente sunt determinate în mod direct sau indirect, iar cu ajutorul unei relații cunoscute putem determina valoarea măsurandului vizat. Spre exemplu, dorim să aflăm rezistivitatea unui cablu pentru care am măsurat lungimea L , aria secțiunii A și rezistența R . Astfel, rezistivitatea cablului $\rho = \frac{RA}{L}$ ($\Omega \cdot m$) se calculează în mod indirect pe baza argumentelor L , A și R .

Măsurarea puterii cu ajutorul unui *wattmetru analogic* presupune utilizarea terminalelor pentru măsurarea tensiunii aplicate (în paralel cu sarcina) și a terminalelor utilizate pentru măsurarea curentului (în serie cu sarcina). Fără a insista asupra principiului de funcționare a acestui instrument, indicația cu privire la valoarea puterii consumate poate fi considerată ca fiind rezultat al unui calcul indirect. Pentru simplificarea înțelegerii clasificării celor două modalități de lucru, vom considera că citirea valorii măsurandului de pe indicația unui aparat înseamnă o măsurare directă, iar calculul valorii măsurandului cu ajutorul unor argumente diverse reprezintă măsurare indirectă. Cu alte cuvinte, vom ignora arhitectura și funcționalitatea internă ale dispozitivelor de măsurare, fiind interesați strict de funcționalitatea acestora.

Acuratețea de măsurare, uneori numită și *exactitate de măsurare*, reprezintă calitatea unui instrument de a indica o valoare cât mai apropiată de valoarea convențional adevărată a măsurandului. Pentru descrierea acestei caracteristici este posibil să întâlnim termenul de *inacuratețe* (sau *inaccuracy*). Cu alte cuvinte, acuratețea (inacuratețea) de măsurare reflectă imperfecțiunea inevitabilă a instrumentului cu privire la posibilitatea de a exprima valoarea adevărată a măsurandului. Putem spune că un instrument de măsură care indică valorile înregistrate cu acuratețe foarte bună prezintă erori de măsurare foarte mici. Prin urmare, cu ajutorul acurateței putem evalua un instrument de măsură din punct de vedere calitativ. În manualele de utilizare ale instrumentelor de măsurare vom identifica descrierea caracteristicilor de acuratețe (sau *Accuracy Specifications/Characteristics*) pentru fiecare funcție de măsurare disponibilă: tensiune continuă, tensiune alternativă, curent continuu, rezistență etc. Acuratețea de măsurare poate fi exprimată numeric, în mod indirect, prin eroarea de măsurare (ca deviație a rezultatului indicat față de valoarea adevărată) sau ca interval care include valoarea adevărată a măsurandului. Vom reveni asupra acestor detalii.

Precizia de măsurare reprezintă calitatea instrumentului de măsurare de a furniza rezultate apropiate valoric, în urma efectuării unor măsurări repetate, în aceleași condiții experimentale. Cu alte cuvinte, caracteristica de precizie se manifestă în situația în care, după un număr suficient de mare de citiri ale aceluiași măsurand, în aceleași condiții experimentale, obținem valori similare. O precizie foarte bună asigură o răspândire nesemnificativă numeric a valorilor indicate. Totodată, prin analiza acestei caracteristici în timp, putem evalua *stabilitatea instrumentală* (modificarea, cu trecerea timpului, a caracteristicilor metrologice ale instrumentului). Termenul de precizie de măsurare este asociat termenului de *repetabilitate de măsurare*.

Pe scurt, *acuratețea* și *precizia de măsurare* reprezintă indicații ale calității unui instrument. Iar un instrument performant trebuie să prezinte acuratețe și precizie foarte bune. Desigur, un instrument de măsurare poate prezenta precizie foarte bună, dar acuratețe scăzută. Dacă dispersia valorilor măsurate este ridicată (precizie scăzută), însă media aritmetică a acestor valori se află în vecinătatea valorii adevărate (acuratețe ridicată a valorii medii), discutăm despre *justețea măsurării*.



Explicativă privind acuratețea, precizia și justețea rezultatelor măsurărilor.

$$\Delta = x - X_a \cong x - X. \quad (1)$$

Caracterizarea procesului de măsurare: X_a reprezintă *valoarea adevărată*, în fapt necunoscută, a măsurandului; X este *valoarea convențional adevărată* a mărimii de măsurat, determinată cu ajutorul unui instrument primar (etalonat, de referință, având înaltă acuratețe), în condiții specificate; x este *valoarea măsurată* cu instrumentul de care dispunem (secundar, de laborator sau de uz comun) și care prezintă performanțe tehnice mai reduse decât cele ale instrumentului etalon.

Rezultatele obținute cu ajutorul instrumentului etalonat ne asigură că valoarea convențional adevărată X este foarte apropiată de valoarea adevărată X_a . Ca urmare, valoarea convențional adevărată X va fi considerată drept valoarea adevărată X_a .

Eroarea absolută Δ (1) este o mărime cu semn, având aceeași unitate de măsură ca și valorile măsurată (x) și, respectiv, convențională (X). Utilizând discuția aferentă C1, exprimăm *acuratețea de măsurare* (sau, în sens negativ, *inacuratețea de măsurare*) prin *deviația rezultatului față de valoarea convențional adevărată*. Desigur, aceeași eroare absolută este mai semnificativă dacă măsurandul are o valoare convențională (adevărată) mai mică. Spre exemplu, dacă în urma măsurării a două lungimi, având

$X_1 = 10\text{m}$, respectiv $X_2 = 100\text{m}$, obținem aceeași eroare absolută $\Delta = 1\text{m}$, este clar că prima măsurare, $x_1 = 11\text{m}$ prezintă o eroare mai semnificativă decât cea de a doua, $x_2 = 101\text{m}$. Acuratețea de măsurare este mai bună în cazul celei de a doua măsurări. Sau, având conotație negativă, inacuratețea de măsurare este mai mare în cazul primei măsurări. Semnificația erorii de măsurare trebuie apreciată *relativ* la valoarea convențională a măsurandului.

$$\delta = \Delta/X \cong \Delta/x. \quad (2)$$

Eroarea relativă este o mărime cu semn, dar adimensională. Dacă $|\Delta| \ll |X|$, eroarea relativă conform relației de definiție (2) se exprimă printr-un număr cu multe zecimale. De aceea se preferă exprimarea erorii relative în procente (%), a se citi, „în părți la 100 de măsurări identice”) sau chiar în părți pe milion (ppm, a se citi „în părți la 1000000 de măsurări identice”). Relațiile de definiție pentru *eroarea relativă exprimată în procente*, respectiv *în părți pe milion*, sunt următoarele:

$$\delta_{\%} = \delta \cdot 100 = \delta \cdot 10^2 [\%], \quad (3)$$

$$\delta_{ppm} = \delta \cdot 1000000 = \delta \cdot 10^6 [ppm]. \quad (4)$$

În documentația fiecărui instrument, evaluarea caracteristicilor de acuratețe (uzual *Accuracy Characteristics/Specifications*) se prezintă sub forma unor tabele în care avem definite intervale asociate tipului măsurandului (tensiune continuă, curent continuu, frecvență etc.). Cu alte cuvinte, *valoarea măsurată x se prezintă întotdeauna împreună cu intervalul de inacuratețe asociat, calculat conform manualului*. Este de dorit ca valoarea convențional adevărată X să se regăsească în acest interval, cu o eroare absolută Δ cât mai redusă. Iar dacă repetăm procedura de măsurare, în aceleași condiții pentru fiecare valoare măsurată x , rezultatele obținute trebuie să prezinte o precizie ridicată. Astfel, putem spune că evaluăm măsurandul cu ajutorul valorilor convențional adevărată X și măsurată x . De reținut este că intervalul de inacuratețe pe care îl asociem fiecărui rezultat, în cazul în care nu a fost specificat cu o valoare de probabilitate, reprezintă așa numita *eroare absolut tolerată* sau *limitele de eroare*. Dacă intervalul de inacuratețe asociat valorii măsurate x prezintă specificația de probabilitate, atunci acesta reprezintă *incertitudinea de măsurare*.

Astfel, măsurările efectuate în mod uzual, pe lângă valoarea măsurată x , prezintă intervalul de *inacuratețe estimată universal valabil* specificat cu ajutorul *limitelor de eroare*. Dacă utilizăm un instrument de măsură care nu a fost calibrat, iar apoi utilizăm același tip de instrument, însă de data aceasta calibrat, vom preciza aceeași *eroare absolut tolerată* ca și în manualul de utilizare. Considerăm că estimarea inacurateții conform manualului este validă cât timp utilizăm aparatul de măsură urmând procedura corectă. Așadar, în mod uzual, alegem să ignorăm proprietățile funcționale ale instrumentelor (îmbătrânire, uzură, stabilitate, precizie etc.), la momentul efectuării măsurărilor.

În practică, *majoritatea măsurărilor sunt de tip singular*, așa încât se utilizează un anumit instrument pentru a măsura o singură dată valoarea unui măsurand. Apoi, rezultatului obținut i se asociază *eroarea absolut tolerată* estimată conform manualului. În acest caz ne bazăm pe faptul că am ales instrumentul care oferă caracteristicile de acuratețe potrivite și că am urmat procedura de măsurare corectă. Totuși, dacă aplicația de măsurare permite, este indicat *să măsurăm în mod repetat* același măsurand, deoarece setul de valori obținut va fi extrem de util. Repetarea unor măsurări, pentru același măsurand și în aceleași condiții, *ajută la minimizarea erorilor aleatorii*. Implementarea măsurărilor multiple nu reprezintă o piedică, în special dacă utilizăm instrumente digitale. Astfel, prin eșantionarea a zeci sau chiar sute de valori într-o perioadă scurtă de timp, iar apoi prin calculul mediei acestora, putem estima cât se poate de riguros valoarea măsurandului. Totuși, dacă o măsurare de tip singular este suficientă pentru cerințele noastre, nu este necesar să efectuăm multiple măsurări. Dacă aplicația noastră necesită măsurări multiple, atunci nu le vom înlocui cu o măsurare singulară.

Prin analiza statistică riguroasă a setului de valori măsurate și a intervalelor de eroare asociate, așa cum vom vedea mai târziu, putem determina *limitele de acceptanță generale* pentru procedura noastră de măsurare. În context industrial, deseori acestea sunt impuse conform cerințelor/specificațiilor de măsurare și testare. Sunt numite USL/LSL – Upper Specification Limit și Lower Specification Limit. Ideal, Li și Ls sunt incluse în intervalul $[USL \div LSL]$, deoarece astfel ne asigurăm că valorile măsurate, împreună cu incertitudinea asociată pe bază de probabilitate, se încadrează în cerințele de performanță impuse.

Vom utiliza termenul de *acuratețe* atunci când discutăm punctual despre performanțele unui instrument de măsurare, comparate cu cele ale unui alt instrument de măsurare de același tip. De exemplu, vom spune că am comparat, pe domeniul de măsurare de 20V, două voltmetre. Și că voltmetrul A prezintă acuratețe mai bună decât voltmetrul B. Discutăm despre eroare atunci când evaluăm o valoare măsurată prin intermediul unor relații de tipul (1) sau (2). Astfel, rezultatul unei măsurări prezintă acuratețe mai bună atunci când eroarea este mai mică. Sau când intervalul de incertitudine este mai îngust. Iar procesul de măsurare, incluzând aparatul de măsură, metoda, calculele aferente etc., este viabil dacă se încadrează în limitele de acceptanță agreeate.

În tot cazul, nu trebuie să confundăm *eroarea de măsurare* cu *incertitudinea de măsurare*. Putem caracteriza o singură procedură de măsurare cu ajutorul erorii. În practică, însă, validarea unei soluții presupune efectuarea a zeci (chiar sute) de măsurări ale aceluiași parametru în vederea analizei statistice. *Definirea incertitudinii de măsurare presupune efectuarea multiplelor prelevări de date cu privire la un anumit parametru testat și asocierea unui interval de probabilitate.* Îmbunătățirea acurateței de măsurare, susținută de creșterea preciziei de măsurare, determină scăderea incertitudinii de măsurare, precum și accentuarea caracteristicii de justete a procedurilor noastre.

2. APLICAȚII

Exemplu: Explicarea erorilor de măsurare cu ajutorul Δ și δ . Importanța alegerii unui instrument de măsură ale cărui caracteristici de acuratețe sunt definite relativ la valoarea măsurată comparativ cu un instrument de măsură ale cărui caracteristici de acuratețe sunt definite relativ la domeni.

Domeniul de măsură – reprezintă acel interval de valori pentru care dispozitivul de măsurare este capabil să furnizeze informații cu privire la valoarea măsurandului. Limita maximă a domeniului poartă denumirea internațională de *full scale range*. Valoarea minimă a domeniului poartă denumirea internațională de *threshold* (sau prag). Există situații în care un dispozitiv de măsurare nu oferă indicații (sau răspunsul este nul) într-o zonă a domeniului în care valorile măsurandului ar trebui să poată fi evaluate. În acest caz discutăm despre *zonă/bandă moartă a domeniului* sau *dead space/band*. Instrumentele de măsură care prezintă erori de histeresis sunt afectate de fenomenul *dead space*. Un bun exemplu în acest caz este un contor de măsurare a debitului apei prin intermediul unui rotor. Însă mecanismul intern al contorului este afectat de uzură. În situația în care apa curge foarte încet, este posibil ca rotorul să nu reacționeze, iar astfel să nu fie măsurat debitul. Măsurarea se declanșează doar atunci când debitul apei atinge un prag minim. Pentru toate valorile de debit existente anterior, indicația aparatului fiind nulă.

Pentru a reduce cât mai mult eroarea de măsurare, instrumentul și domeniul de măsură trebuie astfel alese încât valoarea măsurată să fie cât mai aproape de valoarea maximă a domeniului instrumentului. O altă soluție este utilizarea unui instrument de măsură pentru care caracteristicile de acuratețe sunt specificate în funcție de valoarea măsurată, nu în funcție de domeniul de măsură utilizat.

Exemplu: Estimarea erorilor cumulate în cazul determinării valorii unei mărimi pe baza unor măsurări indirecte. Prin urmare, erorile sistematice și aleatorii care se manifestă la nivelul fiecărui parametru măsurat au un efect cumulat în calculul parametrului final. Astfel, ne propunem să discutăm câteva modalități des întâlnite (nu sunt singurele) de estimare a cumulului de erori de măsurare în situația determinării indirecte a valorii unui măsurand. Condiția importantă este ca

aceste componente de eroare să fie independente, fără o corelație între ele și fără să își schimbe valoarea prin modificarea altor variabile din circuit.

Specificul *erorilor sistematice* este că rezultatele măsurărilor repetate se situează sistematic de aceeași parte în raport cu valoarea adevărată a măsurandului. Aceasta înseamnă că valorile obținute după măsurări repetate sunt fie toate mai mici, fie toate mai mari decât valoarea adevărată a mărimii investigate. Altfel spus, în acest caz erorile absolute sunt sistematic fie toate negative, fie toate pozitive. În cazul erorilor sistematice, cauzele sunt deseori cunoscute. Se poate proceda la corecții sau calibrări care să diminueze efectele acestor erori. Câteva exemple de surse de apariție ale acestor tipuri de erori sunt: conexiuni de măsurare afectate de interferențe/zgomote, utilizarea unor instrumente necalibrate sau îmbătrânite, efecte ale instrumentului de măsurare asupra sistemului asupra căruia se intervine, efecte ale modificării condițiilor de mediu, erorile de histerezis, erorile de zero ș.a.m.d.

Pe de altă parte, specificul *erorilor aleatorii* (uneori numite erori de precizie) este că rezultatele măsurărilor repetate, în condiții practic identice, sunt în mod aleatoriu fie mai mici, fie mai mari decât valoarea adevărată a măsurandului. Erorile de acest tip pot fi parțial (nu total!) eliminate prin metode statistice de prelucrare a datelor, sau prin utilizarea unor măsurări repetate. În acest caz, putem discuta despre efectul benefic al ceea ce am definit ca măsurări multiple ale aceluiași parametru, în aceleași condiții.

Dacă într-un proces de măsurare cele două tipuri de erori (sistematice și aleatorii) coexistă, mai întâi trebuie încercată reducerea erorilor sistematice și apoi aplicate metode statistice pentru reducerea erorilor aleatorii. Cauzele care determină apariția erorilor aleatorii au un caracter imprevizibil. De exemplu, perturbațiile (zgomotele) de natură electrică pot fi induse fie direct la nivelul instrumentelor de măsură, fie pe parcursul transmiterii la distanță a semnalelor captate de senzori. Liniile electrice de putere pot perturba prin cuplaje inductive sau capacitive cablurile de semnal care trec prin apropiere. Efect perturbator au și regimurile tranzitorii ale diferitelor echipamente electrice sau circuite de radiofrecvență din proximitatea sistemului de măsură. Schimbările imprevizibile ale condițiilor de mediu pot cauza de asemenea erori aleatorii. În cazul instrumentelor analogice, chiar și aprecierea poziției acului indicator între două gradații ale scalei este o sursă de erori aleatorii.