UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIŞOARA
FACULTATEA DE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII
ȘI TEHNOLOGII INFORMAȚIONALE
B-dul V. Pârvan, Nr. 2, 300223, TIMIŞOARA, ROMANIA
tel/fax: +40-(0)256-403291/5, e-mail: etc@upt.ro, http://www.etc.upt.ro

Noțiuni introductive - PTDM

1. Mărimi și unități de măsură

Metrologia este știința care „*studiază unitățile de măsură și metodele de măsurare a mărimilor fizice*". În acest sens, sistemul metrologic internațional distinge mărimi și unități de măsură fundamentale (Tabelul 1.1,a), suplimentare (Tabelul 1.1,b), respectiv mărimi și unități de măsură derivate (Tabelul 1.3). Pentru o exprimare compactă și ușor de interpretat, în funcție de rezultatul fiecărei măsurări concrete, se pot folosi multipli și submultipli ai unităților de măsură. Cei mai utilizați submultipli ai unităților de măsură sunt *pico, nano, micro* și *mili*, iar cei mai folosiți multipli sunt *kilo, mega* și *giga* (evidențiați cu caractere aldine în Tabelul 1.2). De exemplu, Farad-ul (F) fiind o unitate de măsură mare, este firesc să exprimăm valorile capacităților cu ajutorul submultiplilor (*μF, nF, pF*); din contră, Ohm-ul (Ω) fiind o unitate de măsură mică în raport cu valorile uzuale ale parametrului rezistență, este firesc să exprimăm rezistențele electrice folosind multipli ai unității de bază (*kΩ, MΩ*).

Tabelul 1.1,a Mărimi și unități de măsură fundamentale.

Mărimea	**Unitatea de măsură**	**Simbolul**
1. Lungimea	metru	m
2. Masa	kilogram	kg
3. Timpul	secunda	s
4. Intensitatea curentului electric	Amper	A
5. Temperatura	Kelvin	K
6. Intensitatea luminoasă	candela	cd
7. Materia	mol	mol

Tabelul 1.1,b Mărimi și unități de măsură suplimentare.

Mărimea	**Unitatea de măsură**	**Simbolul**
8. Unghiul plan	radian	rad
9. Unghiul solid	steradian	sr

Tabelul 1.2 Multipli și submultipli ai unităților de măsură

Submultipli

Prefix	ato	femto	**pico**	**nano**	**micro**	**mili**	centi	deci
Simbol	a	f	**p**	**n**	**μ**	**m**	c	d
Multiplicator	10^{-18}	10^{-15}	$\mathbf{10^{-12}}$	$\mathbf{10^{-9}}$	$\mathbf{10^{-6}}$	$\mathbf{10^{-3}}$	10^{-2}	10^{-1}

Multipli

Prefix	deca	hecto	**kilo**	**mega**	**giga**	tera	peta	exa
Simbol	da	h	**k**	**M**	**G**	T	P	E
Multiplicator	10	10^{2}	$\mathbf{10^{3}}$	$\mathbf{10^{6}}$	$\mathbf{10^{9}}$	10^{12}	10^{15}	10^{18}

Tabelul 1.3 Mărimi și unități de măsură derivate

Mărimea	*Unitatea de măsură*	*Simbolul (Expresia)*
1. Aria	metru pătrat	m^2
2. Volumul	metru cub	m^3
3. Viteza	metri pe secundă	m/s
4. Accelerația	metri pe secundă la pătrat	m/s^2
5. Viteza unghiulară	radiani pe secundă	rad/s
6. Accelerația unghiulară	radiani pe secundă la pătrat	rad/s^2
7. Densitatea	kilograme pe metru cub	kg/m^3
8. Volumul specific	metri cub pe kilogram	m^3/kg
9. Debit masic	kilograme pe secundă	kg/s
10. Debit volumic	metri cub pe secundă	m^3/s
11. Forța	Newton	N ($kg\ m/s^2$)

Tabelul 1.3 Mărimi și unități de măsură derivate (continuare)

Mărimea	*Unitatea de măsură*	*Simbolul (Expresia)*
12. Presiunea	Newton pe metru pătrat	N/m^2
13. Moment de torsiune	Newton metru	Nm
14. Energie, căldură	Joule	J (Nm)
15. Energie specifică	Joule pe metru cub	J/m^3
16. Puterea	Watt	W (J/s)
17. Sarcina electrică	Coulomb	C (As)
18. Tensiunea electrică	Volt	V (W/A)
19. Intens. câmpului electric	Volt pe metru	V/m
20. Rezistența electrică	Ohm	Ω (V/A)
21. Capacitatea electrică	Farad	F (As/V)
22. Inductivitate	Henry	H (Vs/A)
23. Conductanță	Siemens	S (A/V)
24. Rezistivitate	Ohm metru	Ωm
25. Permitivitate	Farad pe metru	F/m
26. Permeabilitate	Henry pe metru	H/m
27. Dens. curentului electric	Amper pe metru pătrat	A/m^2
28. Fluxul magnetic	Weber	Wb (Vs)
29. Dens. fluxului magnetic	Tesla	T (Wb/m^2)
30. Intens. câmpului magnetic	Amper pe metru	A/m
31. Frecvența	Hertz	Hz (s^{-1})
32. Fluxul luminos	lumen	lm (cd sr)
33. Luminanță	candele pe metru pătrat	cd/m^2
34. Iluminarea	lux	lx (lm/m^2)

2. Instrumentație și măsurare. Generalități.

Sursele generatoare de erori sunt multiple. Astfel, *erorile instrumentale* sunt cauzate de performanţele limitate ale instrumentaţiei de măsurare; *eroarea de interacţiune* este cauzată de faptul că, prin conectarea instrumentului de măsurat, se modifică valoarea mărimii ce urmează a fi măsurată; *eroarea de model* intervine pentru că se idealizează modelul fizic al sistemului investigat, de exemplu prin neglijarea faptului că semnalele de măsurat sunt afectate de perturbaţii; *eroarea de metodă* apare atunci când aranjamentul experimental nu asigură măsurarea exclusivă a mărimii de interes, ci doar o valoare modificată a acesteia; *eroarea de influenţă* are drept cauză modificarea condiţiilor de mediu (temperatură, umiditate, presiune etc.) în care instrumentul de măsurare lucrează, comparate cu condiţiile în care instrumentul în cauză a fost calibrat. Nu neglijăm nici *erorile de operator*, care ţin de utilizarea incorectă a instrumentului de măsurat. De exemplu, prin efectuarea măsurării înainte ca aparatul să-şi fi atins regimul termic normal de funcţionare. În această ultimă categorie, în cazul instrumentelor analogice, intră şi aşa numita *eroare de paralaxă,* care intervine atunci când operatorul nu citește corect poziţia acului indicator, adică privind perpendicular pe ecran.

Ne referim în continuare la trei tipuri de erori, prin prisma relaţiilor matematice care la definesc, indiferent de sursa care generează aceste erori. Înainte, definim succint o serie de termeni importanți pentru înțelegerea noțiunilor descrise în acest capitol.

După cum precizam, metrologia este știința care *„studiază unitățile de măsură și metodele de măsurare a mărimilor fizice”.* Într-o altă accepțiune a termenului, *metrologia* cuprinde toate activitățile *„legate de mijloacele de măsurare, de păstrare și reproducere a etaloanelor etc.”* Conform aceluiași dicționar, etalonul este un *„model de mare precizie al unei unități de măsură”*.

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 $\boldsymbol{\rho} = \frac{\boldsymbol{R \cdot A}}{\boldsymbol{L}}\ (\Omega \cdot \boldsymbol{m})$ 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.

Instrumentul de măsurare reprezintă mijlocul tehnic prin care se stabilește raportul dintre valoarea măsurandului și unitatea de măsură. Astfel, procedura de măsurare nu se poate efectua decât prin utilizarea instrumentelor de măsurare. Pe lângă stabilirea acestui raport, instrumentul de măsurare poate asigura și stocarea, prelucrarea și/sau transmiterea unor informații privind rezultatul măsurării. Aceste informații privind măsurandul trebuie să aibă un caracter obiectiv, independent de investigator (experimentator). În funcție de *acuratețea de măsurare* specifică, vorbim despre două categorii de instrumente: *instrumente primare* (numite și instrumente de referință), respectiv *instrumente secundare* (desemnate ca instrumente de lucru, de laborator). Instrumentele din prima categorie asigură o foarte bună calitate a procesului de măsurare, astfel încât indicația lor reprezintă *valoarea convențională adevărată* a măsurandului în condițiile precizate, de temperatură, umiditate, zgomot etc. Chiar și aceste instrumente de mare acuratețe prezintă o anumită eroare de măsurare, așa încât indicația lor este doar o aproximare pentru *valoarea adevărată*, a mărimii de măsurat, în condițiile date.

Pentru clarificarea explicațiilor aferente Fig.1.1, introducem pe scurt două noțiuni (asupra cărora vom reveni) care descriu caracteristici statistice ale instrumentelor de măsurare. În practica inginerească, în majoritatea cazurilor, analiza valorilor obținute prin procedurile de măsurare se efectuează din perspectiva *acurateței* și *preciziei* de măsurare. În limbajul comun, cei doi termeni par interschimbabili. Din punct de vedere tehnic însă, semnificația lor este diferită.

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, termen pe care îl vom explica mai târziu.

În Fig.1.1, se arată poziţiile tipice ale trei valori legate de procesul de măsurare: $\boldsymbol{X_a}$ reprezintă *valoarea adevărată*, în fapt necunoscută, a măsurandului; $\boldsymbol{X}$ este *valoarea convenţional adevărată* a mărimii de măsurat, determinată cu ajutorul unui instrument primar (etalonat, de referinţă, având înaltă acuratețe), în condiţii specificate; $\boldsymbol{x}$ este *valoarea măsurată* cu instrumentul de care dispunem (secundar, de laborator sau de uz comun) şi care prezintă performanțe tehnice mai reduse decât cele ale instrumentului etalon.

Rezultatele obținute cu ajutorul instrumentului etalonat ne asigură că valoarea convenţional adevărată $\boldsymbol{X}$ este foarte apropiată de valoarea adevărată $\boldsymbol{X_a}$. Ca urmare, valoarea convenţional adevărată $\boldsymbol{X}$ va fi considerată drept valoarea adevărată $\boldsymbol{X_a}$.

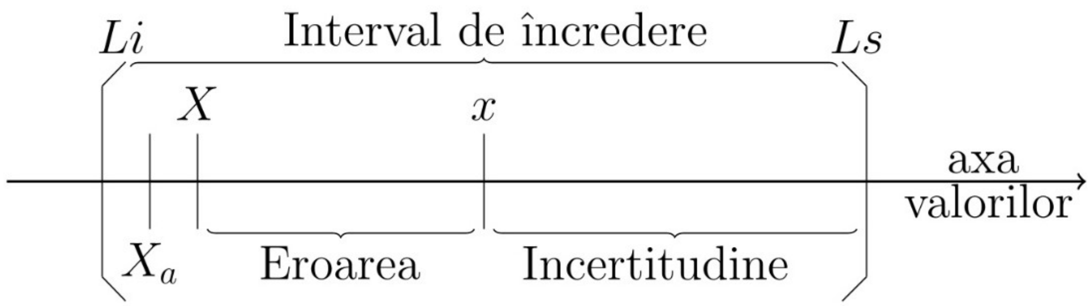

Fig.1.1. Explicativă privind noţiunile de eroare şi incertitudine.

Revenind la Fig.1.1, *eroarea absolută* sau *eroarea aferentă procesului de măsurare*, Δ, se defineşte ca diferenţa dintre valoarea măsurată şi valoarea (convenţional) adevărată:

$$\Delta = x - X_a \cong x - X. \tag{1.1}$$

Eroarea absolută Δ este o mărime cu semn, având aceeași unitate de măsură ca și valorile măsurată (x) și, respectiv, convențională (X). Utilizând relația (1.1) 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 = 10m, respectiv X_2 = 100m, obținem aceeași eroare absolută Δ = 1m, este clar că prima măsurare, x_1 = 11m prezintă o eroare mai semnificativă decât cea de a doua, x_2 = 101m. 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.

De aceea, *eroarea relativă* se defineşte ca raport dintre eroarea absolută şi valoarea convenţional adevărată a măsurandului:

$$\delta = {}^{\Delta}/_{X} \cong {}^{\Delta}/_{x}\,. \tag{1.2}$$

Eroarea relativă este o mărime cu semn, dar adimensională. Dacă $|\Delta| \ll |X|$, eroarea relativă conform relaţiei de definiţie (1.2) se exprimă printr-un număr cu multe zecimale. De aceea se preferă exprimarea erorii relative în procente (%, a se citi, „în părţi la 100 de măsurări identice") sau chiar în părţi pe milion (ppm, a se citi „în părţi la 1.000.000 de măsurări identice"). Relaţiile de definiţie pentru *eroarea relativă exprimată în procente*, respectiv *în părţi pe milion,* sunt următoarele:

$$\delta_{\%} = \delta \cdot 100 = \delta \cdot 10^2 [\%], \tag{1.3}$$

$$\delta_{ppm} = \delta \cdot 1000000 = \delta \cdot 10^6 [\%]. \tag{1.4}$$

Fig.1.1 mai evidenţiază şi noţiunile de *incertitudine de măsurare* şi interval de încredere, definite în raport cu valoarea măsurată, x. Aceste detalii sunt importante, deoarece, în cele mai multe cazuri din practica inginerească, acuratețea de măsurare se exprimă cu ajutorul unui interval care include valoarea (convenţional) adevărată. Dacă acest interval este construit pe baza unor analize statistice și oferă date cu privire la probabilitatea ca valoarea adevărată să se afle între limite sale, atunci el se numește interval de încredere. Jumatatea intervalului de încredere se numește incertitudine de măsurare. Din acest motiv o denumire comună a intervalului este interval de incertitudine. Dacă acest interval nu a fost construit pe baza unei analize statistice, el arată strict ceea ce numim limitele de eroare sau eroarea absolut tolerată.

*Intervalul de încredere (*sau *de incertitudine)* se întinde simetric în jurul valorii măsurate, x, de la *limita inferioară de încredere* (Li) până la *limita superioară de încredere* (Ls). După cum precizam, semnificaţia intervalului de încredere este că valoarea adevărată a măsurandului se află, *cu o anumită probabilitate* ($P \in [0 \div 1]$), în acest interval: $Li \leq X_a \leq Ls$. Această probabilitate exprimată în procente ($P \cdot 100\ [\%]$) *se numeşte nivel de încredere*. Cu cât intervalul de încredere este mai larg, cu atât este mai mare şi probabilitatea ca valoarea adevărată a măsurandului să se afle în acest interval, respectiv nivelul de încredere este mai mare. Însă, lărgirea intervalului de încredere înseamnă implicit creşterea incertitudinii asupra rezultatului măsurării, pentru că, aşa cum se vede în Fig.1.1, *incertitudinea corespunde jumătăţii intervalului de încredere*. După cum precizam, în practica inginerească, *intervalul de încredere* este numit *interval de incertitudine*. Iar limitele Li și Ls se numesc *limite de incertitudine.*

Pe scurt, *incertitudinea de măsurare* reprezintă un concept important, asociat dispersiei valorilor pe care le putem atribui în mod rezonabil unui măsurand. De reținut că valoarea măsurată *x* se poate modifica în funcție de condiții externe, chiar mijlocul nostru de măsurare este supus îmbătrânirii, uzurii, erorilor de zero, liniarității, erorilor de histerezis sau lipsei calibrării. Procesul de măsurare sau metoda prin care lucrăm pot fi supuse fie erorilor aleatorii, fie erorilor sistematice (despre care vom discuta ulterior). Totodată, pot apărea greșeli de citire a rezultatelor sau erori cauzate de necunoașterea influenței condițiilor de mediu asupra sistemului de măsurare. În fine, operatorul poate să nu prezinte consistență în execuția procedurilor aferente. Toate aceste chestiuni, dar și altele, conduc la concluzia că niciodată nu putem avea încredere totală în valoarea măsurată *x.* Intervalul de incertitudine*,* prin dispersia valorilor măsurate și analiza statistică, însumează toți acești factori. Cu alte cuvinte, *incertitudinea de măsurare reprezintă un cumul de factori care definesc limitele de acceptanță ale valorilor măsurate*.

Incertitudinea de măsurare se clasifică în două tipuri: *incertitudinea de tip A* și *incertiudinea de tip B*. Cele două categorii sunt clasificate în funcție de metoda de lucru pe care o abordăm pentru evaluarea rezultatelor.

Incertitudinea de tip A (și care este des întâlnită în context industrial) se determină pe baza analizei unui set de date prin intermediul unor metode statistice. Această analiză presupune existența unui set de date, obținute în condiții aparent similare, suficient de consistent încât să putem aprecia cu o rezoluție satisfăcătoare caracteristicile sistemului nostru de măsurare. Cu alte cuvinte, utilizăm termenul de *incertitudine de tip A* când evaluăm un set de zeci (sau chiar sute) de valori măsurate aparent în aceleași condiții de lucru. Cu ajutorul *incertitudinii de tip A*, vom caracteriza global acel set de valori.

Incertitudinea de tip B se determină pe baza analizei metodelor experimentale și de măsurare utilizate. Aici discutăm despre cumularea unor factori care țin de experiența inginerească, de cunoașterea comportamentului unui sistem de măsurare din perspectiva unor proiecte anterioare; trebuie să luăm în considerare datele de calibrare ale aparatului, precum și tot ceea ce înseamnă judecată critică a metodelor utilizate. Pentru analiza *incertitudinii de tip B*, vom utiliza valori singulare și metode care analizează incertitudinea propagată, prin calcule indirecte ale valorii unui anumit parametru, sau vom utiliza informații pe care le vom identifica în manualele tehnice.

După cum observăm, dacă în cazul *incertitudinii de tip A* lucrurile sunt relativ ușor de implementat, analiza *incertitudinii de tip B* depinde de complexitatea aplicației și de experiența inginerului. Nu vom insista asupra altor detalii. Pentru scopul acestui material, este suficient să cunoaștem cele două tipuri de incertitudine. Evident, trebuie să știm că rezultatele furnizate de un sistem de măsurare includ incertitudinea formată din contribuții din ambele clasificări.

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÷LSL], deoarece astfel ne asigurăm că valorile măsurate, impreună 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 (1.1) sau (1.2). 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 agreate.

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 paramentru 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 justețe a procedurilor noastre.

3. Semnale.

Câteva moduri, nu singurele, prin care putem descrie semnalele pe care le utilizăm în aplicațiile inginerești sunt următoarele:

- *Semnale periodice sau aleatoare* – semnalele periodice se mai numesc și semnale deterministe. Cele aleatoare se mai numesc și semnale nedeterministe. Câteva exemple de semnale periodice întâlnite în aplicații inginerești ar fi cele de tip sinusoidal, triunghiular, rectangular sau dinte de fierăstrău. Câteva exemple de semnale aleatoare ar fi sunetul creat de foșnetul frunzelor din copaci, sunetul vocii sau sunetul valurilor care lovesc stâncile;
- *Semnale analogice sau discrete* – semnalele analogice se mai numesc semnale continue. Cele discrete reprezintă replici ale unor semnale analogice și sunt obținute prin utilizarea procesului de *eșantionare.*

Semnalele periodice pot fi descrise (mai mult sau mai puțin) cu ajutorul unei relații matematice. Astfel, evoluția lor în timp este cunoscută. Acest tip de semnale va fi utilizat în cadrul multor aplicații inginerești. Spre exemplu, în aplicațiile industriale care aparțin domeniului testării sau achiziției de date, semnalele periodice sunt omniprezente. Prin urmare, cunoașterea minimă a unor parametrii ai acestora reprezintă o prioritate.

Semnalele aleatoare sunt mult mai dificil de caracterizat din cauza comportamentului lor nepredictibil. În practică, calcule matematice complexe și diferite metode statistice reprezintă unelte cu ajutorul cărora se prelucrează eșantioanele semnalelor aleatoare.

Totuși, măsurarea caracteristicilor acestor semnale presupune urmărirea evoluției acestora în domeniul timp. Osciloscopul reprezintă dispozitivul consacrat utilizat pentru vizualizarea și analiza complexă a *formelor de undă*. Este foarte posibil ca pentru anumite aplicații să avem nevoie de o caracterizare simlă a unui semnal periodic, prin evaluarea amplitudinii sale. În acest caz, determinarea *valorii efective* (sau valoarea *root mean square - rms*) este suficientă și poate fi rapid obținută cu ajutorul unui multimetru reglat pentru măsurarea semnalelor alternante.

Măsurarea semnalelor alternante trebuie să țină cont și de *banda de frecvențe* a dispozitivului de măsurare. Cu alte cuvinte, trebuie să ținem cont de faptul că *impedanța de intrare* a dispozitivelor este dependentă de frecvență. În plus, creșterea frecvenței semnalului de intrare determină apariția capacităților paralele parazite și a inductivităților serie parazite, specifice cablurilor sondelor de măsură. *Reținem că măsurarea semnalelor alternante, comparativ cu măsurarea semnalelor continue, implică o analiză mai atentă a condițiilor de lucru.*

În continuare vom discuta despre caracterizarea *semnalelor periodice* în domeniul timp. Relația (2.1) reprezintă descrierea generală a semnalelor sinusoidale, unde *x(t) este valoarea semnalului la momentul de timp t.* Parametrul *A reprezintă amplitudinea în alternanța pozitivă* și este utilizat pentru a caracteriza simetria semnalului față de axa timpului. *Pulsația semnalului (sau frecvența unghiulară)*, ω, este exprimată în $rad \cdot s^{-1}$. Defazajul semnalului față de origine, θ (uneori notat cu φ), este exprimat în rad și în cele mai multe aplicații este ignorat. *C* reprezintă componenta continuă a semnalului sinusoidal și poate avea valori pozitive sau negative. Dacă această componentă este nulă, semnalul este simetric față de axa timpului.

$$x(t) = C \; + A \cdot sin(\omega \cdot t + \theta). \tag{1.5}$$

În general, semnalul periodic *x(t)* respectă relația (2.2).

$$x(t) = x(t \pm n \cdot T). \tag{1.6}$$

Relația (1.6) prezintă repetiția ciclică a semnalului, unde *T* este perioada fundamentală, iar *n* este un număr întreg. Cu alte cuvinte, *T* reprezintă valoarea minimă (exprimată în unități de timp), pentru care semnalul poate fi deplasat la stânga sau la dreapta pe axa timpului astfel încât să producă o reprezentare identică. Sau $x(t_0) = x(t_0 \pm T) = x(t_0 \pm 2 \cdot T) = x(t_0 \pm 3 \cdot T)$ etc. Relația este valabilă pentru o valoare a lui t_0 aleatoare.

Perioada fundamentală $T = \frac{1}{f}$ s, unde *f* este *frecvența semnalului* exprimată în *Hz*. Relația între *f și* ω este: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ $rad \cdot s^{-1}$. În funcție de aplicația la care lucrăm, este important să știm că putem converti între ele cele două reprezentari.

Revenind la caracterizarea amplitudinii unui semnal, parametrul A_{PP} reprezintă amplitudinea vârf la vârf a semnalului sau diferența între valorile maximă și minimă. Putem face observația că discuția noastră are în vedere acele semnale care nu prezintă valori tranzitorii.

Valoarea medie a semnalelor periodice se poate calcula cu ajutorul relației (2.3). Valoarea medie X_m a unui semnal periodic simetric față de axa timpului este nulă. Totuși, în unele aplicații este util calculul acestei valori doar pentru alternanța pozitivă a semnalului.

$$X_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t)dt. \tag{1.7}$$

Valoarea efectivă a unui semnal se poate calcula cu ajutorul relației (1.8).

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t)^2 dt}. \tag{1.8}$$

Pentru a ne ușura modul în care obținem valorile efective ale unor semnale periodice des întâlnite, putem reține următoarele relații. Pentru un *semnal sinusoidal*, simetric față de axa timpului, valoarea $X_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0{,}354 \cdot A_{PP}$. Pentru un *semnal rectangular,* simetric față de axa timpului, valoarea $X_{rms} = A = 0{,}5 \cdot A_{PP}$. Pentru un *semnal triunghiular,* simetric față de axa timpului, valoarea $X_{rms} = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0{,}289 \cdot A_{PP}$.

Factorul de formă $K_f = \frac{X_{rms}}{X_m}$, arată deviația de la valoarea medie a evoluției semnalului și reprezintă o masură a calității semnalului. Există valori predefinite ale parametrului K_f astfel încât să evaluăm cu ușurință calitatea semnalului nostru comparativ cu o valoare nominală. De exemplu, pentru *semnalul sinusoidal bipolar*, K_f nominal este aproximativ 1,11. Pentru *semnalul rectangular bipolar*, K_f nominal este 1. Pentru *semnalul triunghiular bipolar*, K_f nominal este aproximativ 1,15. Pentru *semnalul de tip dinte de fierestrău (sau rampă) bipolar*, K_f nominal este aproximativ 1,15.

Factorul de creastă $K_{cr} = \frac{A_{max}}{X_{rms}}$, unde A_{max} este valoarea maximă din semnal (peak value). Parametrul K_{cr} poate fi utilizat ca indicație a unor *creșteri/impulsuri/tranziții (*sau *spike-uri)* nedorite. Există valori predefinite ale parametrului K_{cr}. Pentru un *semnal sinusoidal bipolar*, K_{cr} nominal este aproximativ 1,41. Pentru un *semnal rectangular bipolar* K_{cr} nominal este 1, în timp ce pentru *semnalul triunghiular bipolar*, K_{cr} nominal este aproximativ 1,73.

În Fig. 1.2 observăm câteva tipuri de semnale uzuale.

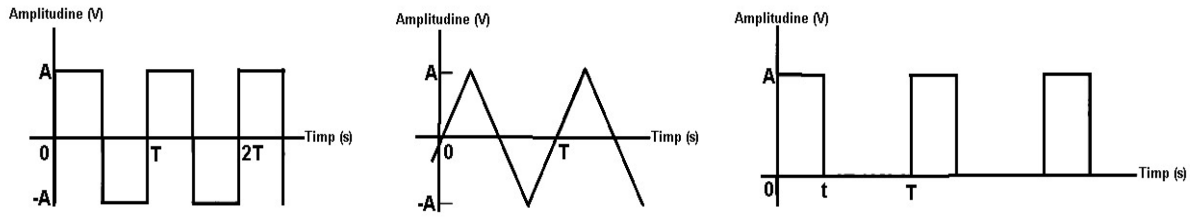

Fig.1.2. Reprezentarea unor semnale periodice uzuale *x(t)*:
rectangular (stânga), triunghiular (centru), impuls (dreapta).

Factorul de umplere δ (sau *Duty Cycle*) apare în discuție dacă lucrăm cu semnale de tip impuls periodic. Nu faceți confuzia între un *semnal rectangular* și un *semnal de tip impuls*. În aplicațiile inginerești, semnalul de tip impuls apare des sub denumirea *PWM* sau *Pulse Width Modulated*. Pentru acest semnal parametrul δ este ajustabil. Un semnal rectangular reprezintă un semnal de tip impuls având $\delta = 50\%$.

Cu referire la semnalul de tip impuls, intervalul *0 – t* desemnează factorul de umplere δ. Relația $\delta = \frac{t}{T}$ reprezintă un procentaj. De exemplu: 33%, 40% etc. La unele dispozitive de tip generator de semnal, setarea factorului de umplere nu se specifică în procente, ci în unități de timp. Spre exemplu, setăm perioada *T* = 2 s, iar factorul de umplere δ = 500 ms (25%, adică exprimat ca procent).

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIŞOARA
FACULTATEA DE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII
ȘI TEHNOLOGII INFORMAȚIONALE
B-dul V. Pârvan, Nr. 2, 300223, TIMIŞOARA, ROMANIA
tel/fax: +40-(0)256-403291/5, e-mail: etc@upt.ro, http://www.etc.upt.ro

O procedură importantă pe care o vom întâlni în discuțiile inginerești este eșantionarea semnalelor. Prin *procesul de eșantionare*, cu ajutorul unor echipamente care permit conversia din reprezentarea analogică în reprezentarea digitală, obținem o colecție finită de valori extrase din semnalele reale. Acest set de valori poate fi procesat ulterior cu ajutorul calculatorului. Trebuie să fim foarte atenți, astfel încât extragerea valorilor din semnalul analogic să respecte reguli care permit păstrarea intactă a caracteristicilor de formă și frecvență. Evident, depindem și de calitatea echipamentelor de conversie însă această discuție nu face parte din scopul prezentului material.

Teorema eșantionării (*Nyquist–Shannon sampling theorem*) precizează că *pentru a păstra intactă informația de formă și frecvență din semnalul inițial, rata de conversie la care lucrăm trebuie să fie de cel puțin două ori mai mare decât frecvența maximă din semnalul analogic*. Cu alte cuvinte, criteriul impus asupra frecvenței de eșantionare reprezintă o condiție suficientă pentru ca semnalul nostru discret să conțină toată informația utilă din semnalul analogic inițial (acesta având bandă de frecvențe finită). În practică, frecvența de eșantionare este setată la valori de cinci, până la zece ori mai mari decât frecvența maximă din semnal. În general, trebuie avut în vedere un compromis între frecvența de eșantionare la care lucrăm și numărul de eșantioane pe care le prelucrăm. Nu are sens să achiziționăm un număr prea mare de eșantioane dacă nu avem nevoie (apare fenomenul de supra-eșantionare sau oversampling). În Fig. 1.3 observăm un semnal sinusoidal clasic reprezentat pentru setările *1 V/div* și *1 ms/div*. Pe baza acestui semnal ne propunem să explicăm câteva detalii legate de procedura eșantionării.

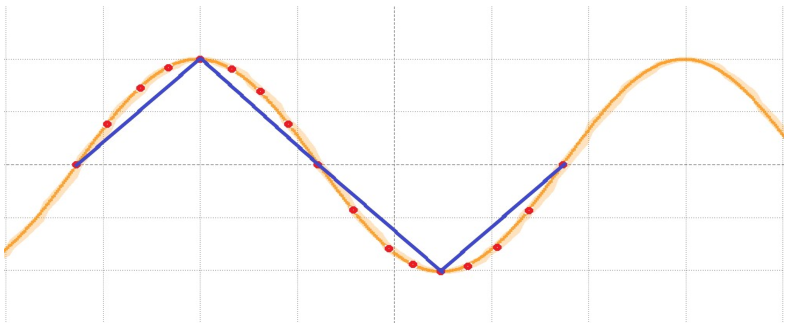

Fig.1.3 Reprezentarea semnalului sinusoidal *x(t)* eșantionat la diferite frecvențe.

Perioada semnalului sinusoidal $T \cong 5\,div \cdot 1\,\frac{ms}{div} \cong 5\,ms$. Astfel $f = \frac{1}{T} \cong 200\,Hz$, ceea ce reprezintă valoarea frecvenței maximă din acest semnal. Conform teoremei eșantionării, perioada de timp minimă pe care ar trebui să o utilizăm pentru conversia analog-digitală este $T_e \cong \frac{1}{400\,Hz} \cong 2{,}5\,ms$. Cu alte cuvinte, dacă la minim fiecare 2,5 ms realizăm o conversie analog-digitală, vom obține un set de date care păstra intactă informația de formă și frecvență din semnalul sinusoidal inițial. Observând Fig. 1.3, constatăm că nu este suficient să asigurăm înregistrarea a două valori pentru fiecare perioadă a semnalului. Nici dacă eșantionăm cu pasul $T_e = \frac{T}{4} \cong 1{,}25\,ms$ (4 eșantioane/perioadă) nu obținem o reprezentare suficient de clară a semnalului inițial. Totuși, dacă asigurăm eșantionarea cu pasul $T_e = \frac{T}{16} \cong 0{,}3\,ms$ putem înregistra 16 valori ale semnalului pentru fiecare perioadă. În Fig. 1.3 aceste valori sunt marcate orientativ cu semnul unui cerc. Ne imaginăm că unim aceste valori și astfel devine foarte clară replica digitală a semnalului analogic inițial. Evident, dacă asigurăm $T_e = \frac{T}{32} \cong 0{,}16\,ms$ vom reuși să dublăm numărul eșantioanelor achiziționate pentru fiecare perioadă. *Frecvența de eșantionare* se calculează ca raport invers al perioadei de eșantionare. În cazul nostru, pentru $T_e \cong 0{,}3\,ms$, frecvența de eșantionare $f_e \cong 3{,}3\,kHz$ (de aproximativ 16 ori mai mare decât frecvența maximă), în timp ce pentru $T_e \cong 0{,}16\ ms$, frecvența de eșantionare $f_e \cong 6{,}3\ kHz$ (de aproximativ 32 de ori mai mare decât frecvența maximă). Ambele frecvențe de eșantionare propuse sunt mult mai mari comparativ cu frecvența maximă f. Astfel avem posibilitatea de a obține o replică cât mai exactă a semnalului analogic inițial iar prelucrările numerice care permit analiza datelor colectate asigură rezultate de acuratețe sporită. Evident am fi putut selecta $f_e \cong 2\ kHz$ (de 10 ori mai mare decât frecvența maximă), caz în care $T_e \cong 0{,}5\ ms$. Numărul de eșantioane înregistrat pentru fiecare perioadă ar fi fost de 10, ceea ce reprezintă, pentru semnalul în cauza, un număr rezonabil.

Deseori, în specificațiile dispozitivelor pentru achiziția semnalelor (sau eșantionarea semnalelor), valoarea maximă a parametrului f_e apare sub acronimele kS/s sau MS/s. Cu alte cuvinte disputăm despre *kiloSamples/second* sau *număr de eșantioane pe secundă*. Această notație este preferată pentru a face distincție între frecvența semnalului analogic (f cu exprimare în *Hz, kHz, MHz etc.*) și frecvența sau rata de eșantionare a dispozitivului în cauză (f_e cu exprimare în *S/s, kS/s, MS/s etc.*). Exact cum ne arată denumirea, ne referim la capabilitatea dispozitivului de a înregistra un anumit număr de eșantioane în fiecare secundă. Dacă am presupune că un dispozitiv de achiziție a datelor este poate eșantiona un semnal cu o rată de 2 kS/s, asta înseamnă că la fiecare secundă dispozitivul generează 2500 de eșantioane. Prin urmare perioada de eșantionare este $T_e = 0{,}4\ ms$ și $f_e = 2{,}5\ kHz$.