

Marin Sărăcin
Traian Jurca
Ciprian Șorândaru

Sisteme de măsurare și achiziții de date



Editura Academiei Oamenilor de Știință din România

București

2011

PREFATĂ

Este de la sine înțeles că în prezent știința și tehnologia nu pot fi stăpânite fără mijloace de măsurare, metode de măsurare, sisteme de măsurare de la cele mai simple la cele mai complexe și sisteme de achiziții de date. În acest sens, ca o consecință, a apărut necesitatea obiectivă a elaborării unor lucrări având ca temă sistemele de măsurare și sistemele de achiziții de date.

În prezent, știința măsurărilor deschide drumul spre instrumentele cu interfață programabilă, plăci de achiziție de date, tehnică de calcul.

Astfel, la început de mileniu, tehnica măsurărilor a atins un nivel care poate peste câțiva ani, probabil vom putea spune “este de domeniul trecutului”, datorită progresului tehnic greu de stăpânit.

Nu se poate considera că această lucrare acoperă întregul domeniu al sistemelor de măsurare și al sistemelor de achiziții de date, scopul ei fiind acela al prezentării noțiunilor teoretice, a schemelor și a relațiilor matematice într-un mod cât mai simplu și concis, constituind punctul de dezvoltare al unor sisteme de măsurare și de achiziții de date care utilizează tehnica de calcul.

Această carte contribuie la formarea continuă a cadrelor didactice din învățământul preuniversitar profesional și tehnic și se adresează tuturor celor care utilizând în mod curent sistemele de măsurare și sistemele de achiziții de date au nevoie de informații și lămuriri noi în legătură cu un domeniu în plină accensiune.

Autorii

CUPRINS

1. PROCESUL DE MĂSURARE	
1.1. Noțiuni generale.....	9
1.2. Măsurandul (Ce măsurăm ?).....	9
1.3. Unități de măsură. Sistemul internațional de unități de măsură, S.I.....	10
1.4. Mijloacele de măsurare (Cu ce măsurăm?).....	12
1.4.1. Aparatele de măsurare, punți și compensatoare și etaloane.....	12
1.4.2. Caracteristicile statice ale mijloacelor de măsurare.....	14
1.4.3. Caracteristicile dinamice ale mijloacelor de măsurare	15
1.4.3.1. Caracteristicile metrologice ale mijloacelor de măsurare în regim dinamic în domeniul timp.....	15
1.4.3.2. Caracteristicile metrologice ale mijloacelor de măsurare în regim dinamic în domeniul frecvență.....	17
1.5. Metode de măsurare (Cum măsurăm?).....	19
1.6. Calitatea măsurării, erori și incertitudini de măsurare și evaluarea lor.....	20
1.6.1. Erori de măsurare	20
1.6.2. Evaluarea erorilor în măsurările electrice directe.....	21
1.6.3. Evaluarea erorilor în măsurările electrice indirecte.....	22
2. SISTEME DE MĂSURARE	
2.1. Conceptul de sistem automat de măsurare (SAM).....	23
2.1.1. Structura informațională principală a SAM.....	23
2.1.2. Variante structurale generale de SAM.....	24
2.1.2.1. SAM cu aparatură programabilă.....	24
2.1.2.2. SAM de tip instrument virtual.....	24
2.1.2.3. SAM de tip dedicat.....	25
2.1.3. Variante funcționale de SAM.....	25
2.2. Sisteme de măsurare și reglaj automat (SMRA).....	25
3. INTERFEȚE DE COMUNICAȚIE	
3.1. Caracteristici ale sistemelor de comunicație.....	31
3.2. Interfețe seriale	33
3.2.1. Modelul comunicației seriale.....	33
3.2.2 Parametrii comunicației seriale.....	34
3.2.3. Interfețe de comunicație seriale.....	34
3.2.4. Interfața serială RS-232C.....	37
3.2.4.1. Caracteristici electrice.....	38
3.2.4.2. Caracteristici mecanice.....	38
3.2.4.3. Transmisia datelor.....	39
3.3. Interfața paralelă.....	41
3.3.1. Magistrala de date.....	44

3.3.2. Magistrala de control al transferului cuvintelor de date.....	44
3.3.3. Magistrala de control al interfeței.....	47
3.3.4. Controlul traficului de mesaje pe magistrală.....	47
4. SISTEME DE ACHIZIȚII DE DATE	49
4.1. Generalități.....	49
4.1.1. Componentele unui sistem de achiziții de date.....	49
4.1.2. Intrările analogice.....	50
4.1.3. Circuite pentru condiționarea semnalelor.....	54
4.1.4. Eșantionarea semnalelor analogice.....	57
4.1.5. Reconstituirea semnalelor eșantionate.....	57
4.2. Arhitecturi ale SAD.....	58
4.2.1 Clasificarea SAD. Performanțe.	58
4.2.2. Sisteme de distribuție a datelor.....	60
5. ELEMENTE PRINCIPALE ALE SISTEMELOR DE ACHIZIȚII DE DATE	
5.1. Blocul de condiționare.....	61
5.2. Circuitul de eșantionare și memorare	62
5.3. Cuantizorul.....	64
5.4. Convertoare numeric-analogice (CNA)	65
5.5. Convertoare analog-numerice (CAN)	67
5.5.1. CAN paralel.....	68
5.5.2. CAN serie-paralel.....	69
5.5.3. CAN cu aproximații succesive.....	70
5.5.4. CAN cu dublă integrare.....	71
5.5.5. CAN Sigma-Delta.....	73
5.6. Procesorul de informație. Memoria încorporată.....	74
6. AUTOMATE PROGRAMABILE	
6.1. Noțiuni generale.....	75
6.2. Componentele automatelor programabile.....	76
6.3. Mediul de programare.....	77
6.4. Reguli de programare a rețelelor.....	81
6.5. Reguli de programare a blocurilor de funcții.....	81
6.6. Reguli de programare a blocurilor de operații.....	82
6.7. Componente de rețea.....	82
6.8. Adresare variabile.....	82
6.9. Mod de operare.....	83
6.10. Avantajele utilizării automatelor programabile.....	85
BIBLIOGRAFIE.....	87

1. PROCESUL DE MĂSURARE

1.1. Noțiuni generale

În orice domeniu fizic există, în mod obiectiv, o mulțime de obiecte sau sisteme ce interacționează, determinând prezența anumitor fenomene sau procese. Obiectele și fenomenele au anumite caracteristici sau proprietăți comune, însă numai unele dintre acestea pot fi apreciate cantitativ. Această caracteristică comună exprimată printr-o mărime matematică poartă denumirea de mărime fizică sau, mai pe scurt mărime. A măsura, sau cu alte cuvinte măsurarea înseamnă obținerea experimentală a unei informații cantitative asupra anumitor proprietăți ale unui obiect sau sistem și exprimarea ei sub o formă adecvată pentru utilizator, care poate fi operatorul uman sau mașina. Ansamblul operațiilor experimentale care se execută în vederea obținerii rezultatului măsurării constituie *procesul de măsurare*.

Componentele procesului de măsurare sunt: mărimea de măsurat X (sau măsurandul): obiectul supus măsurării, mijloacele de măsurare (aparatele de măsurare și etaloanele sau măsurile); totalitatea mijloacelor tehnice cu ajutorul cărora se determină cantitativ mărimea de măsurat și metoda de măsurare: modul de comparare a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură.

1.2. Măsurandul (Ce măsurăm?)

Mărimile fizice ce pot fi măsurate se împart după mai multe criterii.

După schimbul de energie în câmpul electromagnetic mărimile se clasifică ca fiind mărimi de grad 1, 2 sau 0.

Mărimile de grad 1, (apar ca termeni de gradul 1 în legile generale ale electromagnetismului) sunt: E (intensitatea câmpului electric), B (inducția electrică), H (intensitatea câmpului magnetic), D (inducția magnetică), etc.

Mărimile de grad 2 sunt obținute ca produsul a două mărimi de grad 1 și reprezintă o putere sau o energie (ex. $DE/2$ densitatea de energie în câmp electric; $HB/2$ densitatea de energie în câmp magnetic; $QU/2$ energia unui condensator, UI puterea electrică ș.a.).

Mărimile de gradul 0 sau parametrice sunt obținute prin raportul a două mărimi de grad 1 sau 2, spre exemplu: rezistența electrică $R=U/I$; capacitatea electrică $C=Q/U$ etc.

1.3. Unități de măsură. Sistemul internațional de unități de măsură, S.I.

Unitățile de măsură se împart în două categorii: unități de măsură fundamentale și unități de măsură derivate (rezultă univoc din cele fundamentale).

Un sistem de unități de măsură reprezintă totalitatea unităților de măsură fundamentale și derivate.

Sistemul internațional de unități de măsură, S.I. cuprinde 7 unități fundamentale, 2 unități suplimentare și 35 unități derivate.

Unitățile fundamentale sunt definite după cum urmează.

Metrul - reprezintă distanța parcursă de lumină în vid, timp de $1/299\,792\,458$ dintr-o secundă.

Kilogramul - reprezintă masa prototipului din platină și iridium 10% adoptat în anul 1989 de către Conferința Generală de Măsuri și Greutăți și conservat la Biroul Internațional de Măsuri și Greutăți din Sevres.

Secunda - reprezintă durata a $9\,192\,631\,770$ perioade a radiației corespunzătoare tranziției între două nivele superfine ale stării fundamentale a atomului de cesiu 133.

Amperul - este intensitatea unui curent electric constant care menținut în două conductoare paralele, rectilinii, de lungime infinită și de secțiune circulară, așezate în vid la o distanță de 1m unul față de altul, produce între acestea pe o lungime de 1m o forță egală cu $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.

Kelvinul - este fracțiunea $1/273,16$ din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei.

Candela - este intensitatea luminoasă, într-o direcție dată, a unei surse, care emite o radiație monocromatică cu frecvența $5,4 \cdot 10^{14}$ Hz ($\lambda = 0,555 \mu\text{m}$) și a cărei intensitate energetică, în această direcție este de $1/683$ watt/steradian.

Molul - este cantitatea de substanță dintr-un sistem care conține atâtea entități elementare (atomi, molecule, ioni, electroni etc.) câți atomi există în $0,012$ kg de Carbon 12 ($6,02 \cdot 10^{23}$ atomi).

Unitățile suplimentare sunt *radianul* și *steradianul*.

Radianul - este unghiul plan cu vârful în centrul unui cerc care delimitează pe circumferința cercului un arc de lungime egală cu raza cercului.

Steradianul - este unghiul solid cu vârful în centrul unei sfere care delimitează pe suprafața sferei o arie egală cu aria unui pătrat a cărui latură este egală cu raza sferei.

Unitățile derivate sunt prezentate în tab. 1.1.

Multiplii și submultiplii zecimali ai unităților S.I. se formează cu ajutorul prefixelor din tab. 1.2.

Tabelul 1. 1

Principalele unități de măsură derivate[1]

Mărimea		Unitatea de măsură		
Denumire	Simbol	Denumire	Simbol	Valori echivalente
Frecvență	f	hertz	Hz	1Hz=1s ⁻¹
Forță	F	newton	N	1N=1kg·m·s ⁻²
Presiune	p	pascal	Pa	1N·m ⁻²
Accelerație	a	metru pe secundă la pătrat	m/s ²	1m·s ⁻²
Viteză	v	metru pe secundă	m/s	1m·s ⁻¹
Energie, lucru mecanic, cantitate de căldură	W	Joule	J	1J=1N·m
Putere	P	Watt	W	1W=1J·s ⁻¹
Cantitate de electricitate, sarcină electrică	Q	Coulomb	C	1C=1A·s
Tensiunea electrică	U	Volt	V	1V=1W·A ⁻¹
Intensitatea câmpului electric	E	Volt pe metru	V/m	1V·m ⁻¹
Capacitatea electrică	C	Farad	F	1F=1C·V ⁻¹
Rezistența electrică	R	Ohm	Ω	1Ω=1V·A ⁻¹
Conductanță electrică	G	Siemens	S	1S=1·Ω ⁻¹
Flux magnetic	Φ	Weber	Wb	1Wb=1V·s
Inducție magnetică	B	Tesla	T	1T=1Wb·m ⁻²
Intensitatea câmpului magnetic	H	Amper pe metru	A/m	1A·m ⁻¹
Inductivitatea	L	Henry	H	1H=1Wb·A ⁻¹
Flux luminos	Φ _l	lumen	lm	1lm=1cd·Sr
Illuminare	El	lux	lx	1lx=1m·m ⁻²

Tabelul 1. 2

Multiplii și submultiplii zecimali ai unităților S.I.[1]

Factor de multiplicare	10 ⁻²⁴	10 ⁻²¹	10 ⁻¹⁸	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
Prefix	yocto	zepto	atto	femto	pico	nano	micro	mili	centi	deci
Simbol	y	z	a	f	p	n	μ	m	c	d
Factor de multiplicare	10	10 ²	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹⁵	10 ¹⁸	10 ²¹	10 ²⁴
Prefix	deca	hecto	kilo	mega	giga	tera	peta	exa	zetta	yotta
Simbol	da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y

1.4. Mijloacele de măsurare (Cu ce măsurăm?)

Mijloacele de măsurare, așa cum s-a arătat, reprezintă totalitatea mijloacelor tehnice cu ajutorul cărora se determină cantitativ mărimea de măsurat. Ele sunt constituite din aparate de măsurare, punți și compensatoare și etaloane.

1.4.1. Aparatele de măsurare, punți și compensatoare și etaloane

Aparatul de măsurare, sub forma cea mai simplă (fig. 1.1), furnizează o mărime de ieșire y , funcție de mărimea de intrare x :

$$y = f(x), \quad (1-8)$$

unde f este caracteristica statică de transfer.



Figura 1. 1: Reprezentarea sub forma cea mai simplă a aparatului de măsurare [1]

Funcția f poate fi liniară (în mod obișnuit) sau poate să aibă orice altă formă.

În general rezultatul măsurării y este influențat și de mărimile de influență (temperatura, presiunea, umiditatea) și mărimile perturbatoare electromagnetice (câmpuri electrice și magnetice variabile în timp, semnale perturbatoare transmise prin rețea).

Aparatul de măsurare poate fi reprezentat în mod general ca în fig. 1.2.

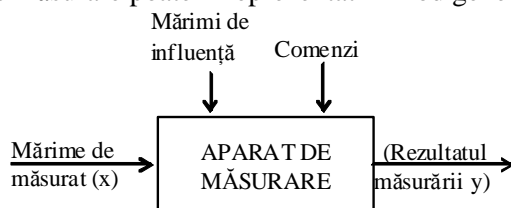


Figura 1. 2: Reprezentarea generală a aparatului de măsurare [1]

Comenzile aparatului de măsurare pot fi pentru introducerea de date și de manevrare a aparatului.

După modul de variație a funcției f , aparatele de măsurare se împart în: aparate analogice și aparate digitale (numerice).

Aparatele de măsurare analogice (cu ac indicator) sunt aparate la care caracteristica statică de transfer este o funcție continuă. Rezultatul măsurării poate fi orice valoare în cadrul intervalului de măsurare al aparatului (vezi fig. 1.3).

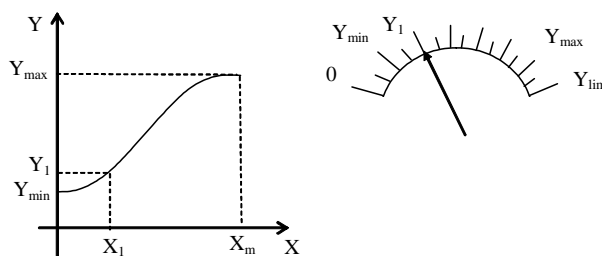


Figura 1. 3: Dependența $y=f(x)$ la un aparat de măsurare analogic [1]

Aparatele de măsurare digitale sunt aparate la care rezultatul măsurării este prezentat direct sub formă numerică, ca efect al evaluării directe a mărimii de măsurat, ca urmare a cuantificării, codificării și decodificării.

Prin *cuantificare*, domeniul continuu de variație al mărimii de măsurat este discretizat și împărțit într-un număr de subdomenii egale, numite *cuante*. Prin urmare, dependența între mărimea de măsurat și rezultatul măsurării va fi o funcție discontinuă, ca în fig. 1.4.

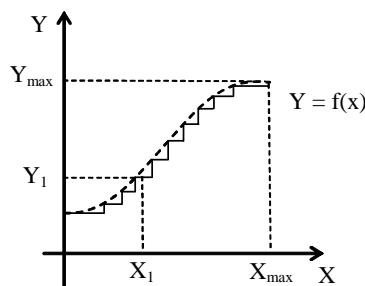


Figura 1. 4:Dependența $y=f(x)$ la un aparat de măsurare digital [1]

Codificarea are rol de a atribui numere mărimilor cuantificate, astfel încât rezultatul să apară afișat după decodificare, direct sub formă *cifrică* (accesibilă operatorului) prin intermediul afișajului optoelectronic sau sub formă *codificată* (pentru calculator sau un sistem automat de măsurare și control).

Aparatele digitale, deși sunt mai scumpe decât cele analogice, au o serie de avantaje cum ar fi: viteză mare de măsurare, eliminarea erorilor de citire, precizie ridicată, insensibile la perturbații.

Punțile și compensatoarele sunt aparate de măsurare complexe care utilizează pentru măsurare și un aparat analogic sau numeric, înglobat în cadrul lor sau racordabil la bornele lor.

Etaioanele reprezintă realizarea materială a unităților de măsură. Ele trebuie să asigure: *generarea principalelor unități de măsură* în conformitate cu definițiile lor, *menținerea și conservarea* acestor unități de măsură constante în timp în toate laboratoarele metrologice din lume, *corelarea* unităților de măsură, *derivarea* altor unități și *extinderea limitei de măsurare* cu precizia necesară printr-un sistem adecvat de etaloane.

1.4.2. Caracteristicile statice ale mijloacelor de măsurare

Domeniul nominal este domeniul de indicații care se pot obține într-o configurație dată a comenzilor unui mijloc de măsurare.

Domeniul nominal de utilizare este definit ca fiind domeniul specific, în care prezența unei mărimi de influență să nu producă o modificare a exactității date.

Domeniul de măsurare reprezintă intervalul definit prin două valori ale mărimii măsurate, în care sunt specificate erorile aparatului de măsurare. În domeniul de măsurare, măsurările sunt corecte, cu exactitatea garantată de constructor.

Intervalul de măsurare este dat de diferența algebrică dintre valorile limitei superioare și limitei inferioare ale domeniului de măsurare.

Intervalul de revenire reversibilă este limitat superior de limita de supraîncărcare sau capacitatea de supraîncărcare și reprezintă proprietatea aparatului de a suporta fără deteriorări, mărimi de măsurat care depășesc limitele intervalului de măsurare. Mijlocul de măsurare poate să funcționeze peste intervalul de revenire reversibilă, numit interval de siguranță. Funcționarea unui aparat timp îndelungat între limita de supraîncărcare și limita de siguranță conduce la deteriorări ce necesită reparații și o recalibrare ulterioară. Depășirea limitei de siguranță poate conduce la distrugerea mijlocului de măsurare.

Caracteristica statică de transfer reprezintă relația care exprimă analitic, grafic sau sub formă de tabel, cu o incertitudine dată, dependența funcțională dintre mărimea de ieșire y (analogică sau digitală) și mărimea de intrare x (mărimea de măsurat) în condiții definite (relația 1-8). Caracteristica statică de transfer poate să fie liniară sau neliniară.

Sensibilitatea este caracteristica metrologică a unui mijloc de măsurare de a determina o variație cât mai mare la ieșire, la o variație redusă a mărimii de intrare. Se definesc : sensibilitate absolută și sensibilitatea relativă.

Sensibilitatea absolută S reprezintă raportul dintre variația Δy a mărimii de ieșire și variația Δx corespunzătoare a mărimii de intrare:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (1-9)$$

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

$$S_r = \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x}{x}}, \quad (1-10)$$

Pragul de discriminare sau pragul de mobilitate se definește ca fiind cea mai mare variație, lentă și monotonă, a unui semnal de la intrare, care nu produce o modificare detectabilă a răspunsului unui mijloc de măsurare.

Rezoluția este cea mai mică variație a mărimii de intrare ce poate fi apreciată la ieșire pe afișajul aparatului (o unitate a ultimului rang zecimal).

Exactitatea reprezintă caracteristica metrologică a unui mijloc de măsurare de a furniza o valoare măsurată cât mai aproape de valoarea reală a măsurandului.

Clasa de exactitate se definește ca ansamblul mijloacelor de măsurare care satisfac anumite prescripții metrologice destinate să mențină erorile intrinseci și variațiile tolerate în limite specificate. Aceasta este caracterizată printr-un număr denumit *indice de clasă c*, care pentru mijloacele de măsurare poate lua una din valorile:

$$1 \cdot 10^n; \quad 2 \cdot 10^n; \quad 5 \cdot 10^n \quad \text{cu } n = 0, -1, -2, -3, \dots, \quad (1-11)$$

Există excepții și anume indicii de clasă 1,5 și 2,5.

Puterea consumată reprezintă puterea absorbită de mijlocul de măsurare de la obiectul supus măsurării în procesul de măsurare.

Finețea este calitatea mijlocului de măsurare de a perturba cât mai puțin regimul de lucru al circuitului în care se face măsurarea.

1.4.3. Caracteristicile dinamice ale mijloacelor de măsurare

Regimul dinamic al unui mijloc de măsurare este caracterizat de mărimea de la intrare $x(t)$, respectiv de la ieșire $y(t)$, ambele fiind funcții de timp.

Pentru aprecierea comportării în regim dinamic al unui mijloc de măsurare caracteristica cea mai completă este ecuația diferențială a mărimilor de intrare și a mărimilor de ieșire ale mijlocului de măsurare:

$$a_0 y + \sum_{k=1}^n a_k \frac{d^k y}{dt^k} = b_0 x + \sum_{j=1}^m b_j \frac{d^j x}{dt^j}, \quad (1-12)$$

unde $x(t)$, $y(t)$ reprezintă mărimea de intrare respectiv mărimea de ieșire;

$a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ - constante;

n - ordinul mijlocului de măsurare.

În general mijloacele de măsurare sunt de ordinul 0, ordinul 1 și ordinul 2.

În mod frecvent pentru caracterizarea comportării în regim dinamic a mijloacelor de măsurare, se utilizează două categorii de caracteristici:

- în domeniul timp: timp de răspuns și timp de creștere;
- în domeniul frecvență: banda de frecvență.

1.4.3.1. Caracteristicile metrologice ale mijloacelor de măsurare în regim dinamic în domeniul timp

Pentru aprecierea comportării mijloacelor de măsurare în domeniul timp se aplică la intrare un semnal treaptă de forma:

$$x(t) = X \cdot 1(t) \quad \text{cu } 1(t) = \begin{cases} 1, & \text{pt. } t > 0 \\ 0, & \text{pt. } t \leq 0 \end{cases}, \quad X = \text{const.}, \quad (1-13)$$

Funcția treaptă și răspunsul mijlocului de măsurare de ordinul 1 la această excitație sunt reprezentate în fig. 1.5 și fig. 1.6.

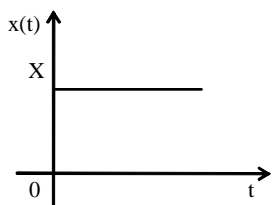


Figura 1. 5: Excitația treaptă [1]

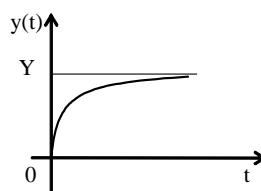


Figura 1. 6: Răspunsul mijlocului de măsurare de ordinul 1 la excitația treaptă [1]

În fig. 1.6, Y reprezintă valoarea de regim stabilizat a răspunsului.

În regim dinamic, în domeniul timp se utilizează următoarele noțiuni:

- factorul de amplificare (atenuare):

$$k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{Y}{X}, \quad (1-14)$$

- eroarea dinamică (abaterea dinamică):

$$\Delta y(t) = Y - y(t), \quad (1-15)$$

- răspunsul indicial sau funcția indicială:

$$f(t) = \frac{y(t)}{Y}, \quad (1-16)$$

Criteriile de apreciere a calității comportării unui mijloc de măsurare în regim dinamic în domeniul timp în momentul în care la intrarea sa se aplică excitația treaptă, sunt: criteriul timpului de răspuns și criteriul timpului de creștere.

Criteriul timpului de răspuns.

Timpul de răspuns T_r , se definește astfel:

$$T_r = \frac{1}{Y} \cdot \int_0^{\infty} \Delta y(t) dt, \quad (1-17)$$

Dacă se ține seama de relațiile (1-15) și (1-16), relația (1-17) devine:

$$T_r = \frac{1}{Y} \cdot \int_0^{\infty} [Y - y(t)] dt = \int_0^{\infty} [1 - f(t)] dt, \quad (1-18)$$

În fig. 1.7 este reprezentat răspunsul indicial pentru un mijloc de măsurare de ordinul întâi; timpul de răspuns îl reprezintă aria hașurată.

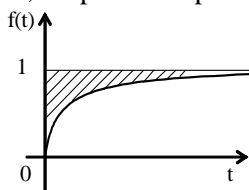


Figura 1. 7: Răspuns indicial aperiodic [1]

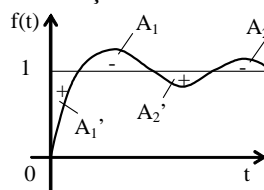


Figura 1. 8: Răspuns indicial periodic amortizat [1]

Dacă răspunsul indicial este de tip oscilant, ca în fig. 1.8, atunci criteriul timpului de răspuns dat de relația (1-18) duce la rezultate eronate pentru că ariile pozitive și cele negative se compensează obținându-se un timp de răspuns mic cu toate că sistemul are o comportare necorespunzătoare, fiind puternic oscilant. În această situație a sistemelor oscilante se folosește criteriul timpului de răspuns absolut. *Timpul de răspuns absolut* T_{ra} se definește astfel:

$$T_{ra} = \int_0^{\infty} |1 - f(t)| dt, \quad (1-19)$$

Ca atare se vor aduna toate ariile de tip A_k , cât și ariile A_k' , cu $k=1,2,\dots,n$, rezultând un timp de răspuns cu atât mai mare, cu cât sistemul are un număr mai mare de oscilații până la atingerea valorii de regim stabilizat.

Criteriul timpului de creștere

Timpul de creștere se definește ca fiind intervalul de timp în care semnalul crește de la valoarea de 10% până la valoarea de 90% din valoarea de regim stabilizat, sau răspunsul indicial crește de la valoarea 0,1 la valoarea 0,9. Se aplică atât pentru răspunsuri de tip aperiodic cât și pentru răspunsuri de tip oscilant amortizat (fig. 1.9).

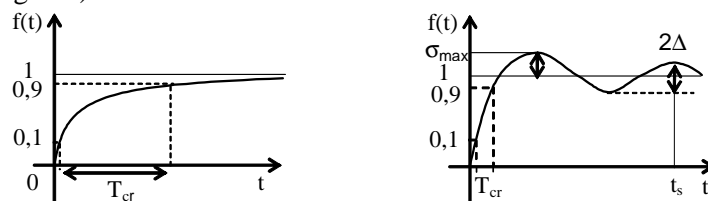


Figura 1. 9: Reprezentarea grafică a timpului de creștere, supracreșterii maxime și timpului de stabilizare [1]

Pentru răspunsul de tip oscilant se mai introduc, în plus, drept parametri de caracterizare, *supracreșterea maximă* σ_{max} , aceasta reprezentând depășirea maximă a valorii de regim stabilizat și *timpul de stabilizare* t_s , ce reprezintă timpul de la aplicarea mărimii de intrare până când mărimea de la ieșire atinge o valoare ce se abate față de valoarea de regim stabilizat cu mai puțin de o valoare prescrisă Δ . Un mijloc de măsurare este cu atât mai bun, cu cât timpul de răspuns, timpul de creștere, cât și supracreșterea lui maximă sunt mai mici.

1.4.3.2. Caracteristicile metrologice ale mijloacelor de măsurare în regim dinamic în domeniul frecvență

Pentru caracterizarea comportării în regim dinamic a mijloacelor de măsurare în domeniul frecvență, se aplică la intrarea mijlocului de măsurare o excitație sinusoidală de amplitudine constantă și frecvență variabilă:

$$x(t) = X\sqrt{2} \sin(\omega t), \quad (1-20)$$

unde X este valoarea efectivă și ω pulsația excitației.

Considerând mijlocul de măsurare liniar și pasiv, răspunsul lui la ieșire va fi tot o mărime sinusoidală:

$$y(t) = Y\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (1-20)$$

unde φ este defazajul între $x(t)$ și $y(t)$ și Y valoarea efectivă a răspunsului.

Pentru caracterizarea comportării în domeniul frecvență se utilizează caracteristica complexă de frecvență (raportul reprezentărilor în complex simplificat ale mărimilor de ieșire și de intrare):

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{y(t)}{x(t)}, \quad (1-21)$$

Relația (1-21) se mai poate scrie sub forma:

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{Y\sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}}{X\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}} = \frac{Y}{X} \cdot e^{j\varphi}, \quad (1-22)$$

Din caracteristica complexă de frecvență se deduc două componente:

- caracteristica de amplitudine:

$$|\underline{H}(j\omega)| = H(\omega) = \frac{Y}{X}, \quad (1-23)$$

- caracteristica de fază:

$$\rho(\omega) = \varphi(\omega), \quad (1-24)$$

Drept *criteriu de calitate* privind aprecierea comportării în domeniul frecvență a mijlocului de măsurare se introduce *banda de frecvență*, B .

Banda de frecvență reprezintă intervalul de frecvență cuprins între o frecvență limită inferioară f_m și o frecvență limită superioară f_M în interiorul căruia caracteristica de amplitudine nu scade sub valoarea de 0,707 din valoarea pe care o are la frecvența de referință f_0 (de exemplu, în curent continuu). Această scădere a amplitudinii de 0,707 echivalează cu o atenuare de -3dB :

$$20 \log \frac{H(\omega_k)}{H(\omega_0)} = 20 \log \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}}{1} = -3\text{dB}, \quad (1-25)$$

În fig. 1.10 este prezentată o bandă de frecvență unilaterală și o bandă de frecvență bilaterală pentru un mijloc de măsurare. .

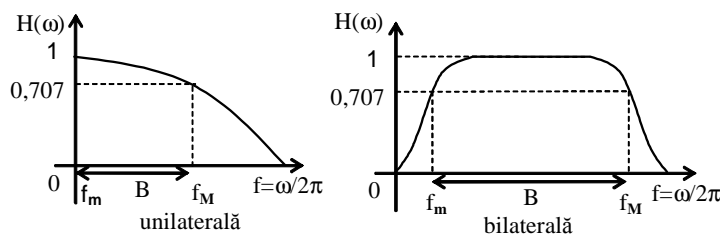


Figura 1. 10: Banda de frecvență [1]

Mijloacele de măsurare cu bandă de frecvență unilaterală pot fi utilizate și în curent continuu, în schimb, cele cu bandă de frecvență bilaterală nu poate funcționa în curent continuu ci doar în intervalul de frecvență ($f_m \dots f_M$).

1.5. Metode de măsurare (Cum măsurăm?)

Metoda de măsurare reprezintă totalitatea principiilor și mijloacelor utilizate la efectuarea măsurării pentru obținerea rezultatului corect și adecvat scopului propus. *După modul de obținere a rezultatului măsurării* metodele de măsurare se clasifică conform cu tab. 1.3.:

Tabelul 1. 3

Metode de măsurare	directă		
	indirectă		
	prin comparație	de compensație	
		de substituție	
		de coincidență	
		de baleiaj	
diferențială			
	de punte		

Metoda directă este metoda în care valoarea mărimii de măsurat se citește direct la aparatul de măsurare.

Metoda indirectă este metoda la care rezultatul se obține prin calcul utilizând datele furnizate de alte măsurări.

Metoda de măsurare prin comparație se bazează pe utilizarea unor etaloane care furnizează mărimea de comparație. Aparatul de măsurare are rolul de a sesiza egalitatea dintre mărimea de măsurat și cea de comparație.

În cazul *metodei de măsurare prin compensație* mărimea de măsurat și cea de comparație exercită asupra aparatului de măsurare acțiuni contrarii încât efectul mărimii de măsurat este compensat (anulat) prin variația mărimii de comparație, mărime de aceeași natură cu ea, însă cunoscută cu exactitate. În momentul compensației se poate aprecia valoarea mărimii de măsurat.

La *metoda de substituție* mărimea de măsurat și mărimea de comparație se introduc pe rând în circuit, urmărindu-se obținerea aceluiași rezultat la aparatul de măsurare în ambele cazuri. Valoarea mărimii de măsurat va fi egală cu valoarea mărimii de comparație, în momentul când prin variația mărimii de comparație se obține aceeași indicație la aparatul de măsurare, ca în situația când în circuit era mărimea de măsurat.

În cazul *metodei de coincidență* mărimea de comparație este suprapusă peste mărimea de măsurat și variată până la apariția unui anumit fenomen care indică o coincidență, în acest moment la aparatul de măsurare putându-se aprecia valoarea mărimii de măsurat.

La *metoda de baleiaj* se face comparație între mărimea de măsurat constantă și mărimea de comparație variabilă după o lege cunoscută (de exemplu, liniar variabilă).

Metoda de punte este metoda de comparație în cadrul căreia mărimea de măsurat este comparată cu o mărime cunoscută și variabilă în cadrul unui montaj de punte. La echilibrarea punții se poate calcula valoarea mărimii de măsurat.

Metoda diferențială reprezintă o combinație de metode. Aparatul de măsurare măsoară diferența dintre mărimea de măsurat și mărimea de comparație etalon cunoscută cu exactitate.

Din punct de vedere al exactității de măsurare se disting: *metode de laborator* în cadrul cărora măsurările se execută în mod repetat, cu aparate de laborator cu exactitate ridicată, asupra rezultatului măsurării efectuându-se calculul erorilor și *metode industriale* care presupun măsurări executate cu aparate mai puțin sensibile, însă robuste de obicei integrate chiar în procesul tehnologic

După regimul de variație în timp a mărimii de măsurat se deosebesc: *metode de măsurare statice* care se aplică în măsurări efectuate asupra unor mărimi de valori constante în intervalul de timp în care se desfășoară măsurările și *metode de măsurare dinamice* utilizate în măsurările efectuate asupra unor mărimi variabile în timp.

1.6. Calitatea măsurării, erori și incertitudini de măsurare și evaluarea lor

Într-o măsurare, de orice natură și oricât de corect ar fi fost executată, chiar dacă au fost utilizate cele mai corecte metode și mijloace de măsurare, valoarea măsurată X_m diferă de valoarea reală (adevărată) X a mărimii de măsurat.

Calitatea fundamentală a unei măsurări o constituie *exactitatea* care se definește ca fiind gradul de concordanță dintre rezultatul unei măsurări și valoarea adevărată a mărimii măsurate sau a valorii de referință (etalon) adoptată.

Întrucât valoarea adevărată a măsurandului nu poate fi cunoscută, pentru caracterizarea calității măsurării se utilizează noțiunea de *incertitudinea de măsurare* care se definește ca un parametru asociat rezultatului unei măsurări, care caracterizează împrăștierea sau dispersia valorilor care pot fi atribuite mărimii măsurate. Rezultatul măsurării se exprimă prin valoarea măsurată (sau obținută prin calcul statistic) plus sau minus valoarea incertitudinii ce poate fi exprimată în unități absolute (incertitudinea absolută) sau procentual din valoarea măsurată (incertitudinea relativă).

1.6.1. Erori de măsurare

Din punct de vedere *matematic* erorile de măsurare se clasifică în *erori absolute*, *erori relative* și *erori raportate*

Eroarea absolută de măsurare reprezintă diferența dintre valoarea măsurată X_m și valoarea reală X a mărimii de măsurat:

$$\Delta X = X_m - X \quad (1-26)$$

Eroarea relativă reprezintă raportul dintre eroarea absolută și valoarea adevărată sau de referință a mărimii măsurate:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta X}{X} = \frac{X_m - X}{X} \quad (1-27)$$

Se exprimă adimensional, în procente sau în părți pe milion.

Eroarea raportată este raportul dintre eroarea absolută și o valoare convențională a mărimii de măsurat X_c ; se poate exprima la fel cu eroarea relativă.

$$\varepsilon_{ra} = \frac{\Delta X}{X_c} = \frac{X_m - X}{X_c} \quad (1-28)$$

1.6.2. Evaluarea erorilor în măsurările electrice directe

a) La măsurarea cu aparate analogice

Orice aparat analogic este caracterizat prin clasa de exactitate „c” care dă informații asupra erorii tolerate admisibile care se face la măsurarea unei mărimi în condiții de referință cu respectivul aparat. Erorile tolerate limită ale aparatelor de măsurare analogice se exprimă în una din cele două forme: *eroarea absolută tolerată limită*: $\pm(\Delta X)_{\max}$ și *eroarea raportată tolerată limită* ε_{rt} , în procente dintr-o *valoare convențională* X_c , care poate fi: limita superioară a intervalului de măsurare, valoarea nominală a mărimii de măsurat, cea mai mare dintre limitele de măsurare, sau suma modulelor limitelor de măsurare, la aparatele cu interval de măsurare finit:

$$\varepsilon_{rt} = \pm \frac{|\Delta_{\max}|}{X_c} \cdot 100\% \quad (1-29)$$

În acest caz indicele clasei de exactitate este egal cu eroare raportată tolerată:

$$c = \varepsilon_{rt} \quad (1-30)$$

La aparatele cu interval de măsurare infinit (exemplu ohmmetrele) mărimea convențională este egală cu lungimea scării gradate.

Când raportarea se face la limita superioară a intervalului de măsurare, cu relațiile (1-29) și (1-30) se calculează *eroarea absolută tolerată limită*:

$$(\Delta X)_{\max} = \pm \frac{c \cdot X_{\max}}{100} \quad (1-31)$$

Dacă rezultatul măsurării cu un aparat analogic de clasă de exactitate „c” este „ X_m ”, atunci se poate afirma că valoarea reală „ X ” a mărimii de măsurat este cuprinsă în intervalul:

$$X_m - (\Delta X)_{\max} < X < X_m + (\Delta X)_{\max} \quad (1-32)$$

Eroarea relativă cu care se face o măsurare X_1 , este:

$$\varepsilon_{r1} = \pm \frac{\Delta X_1}{X_1} \cdot 100 \leq \pm \frac{(\Delta X)_{\max}}{X_1} \cdot 100 = \pm c \frac{X_{\max}}{X_1} \cdot 100 = \pm c \frac{X_{\lim}}{X_1} \cdot 100 \quad (1-33)$$

b) La măsurarea cu aparate numerice

Eroarea absolută tolerată limită cu care se face măsurarea, în condiții de referință stabilite, se calculează în general cu relația:

$$(\Delta X)_{\max} = \pm a \cdot (\%) X_{\lim} \pm b(\%) X_m \pm 1digit \quad (1-34)$$

unde: a, b sunt numere pozitive exprimate în procente;
 $\pm 1digit$ - incertitudinea cifrei ultimului rang zecimal al afișajului.

Unele firme constructoare exprimă această eroare, cu o relație de forma:

$$(\Delta X)_{\max} = \pm b(\%) X_m \pm ndigiti \quad (1-35)$$

unde: b este un număr pozitiv exprimat în procente;
 n - incertitudinea afișajului numeric, cumulată cu eroarea constantă independentă de mărimea de măsurat.

1.6.3. Evaluarea erorilor în măsurările electrice indirecte

În cazul măsurărilor indirecte, valoarea X este funcție de valorile M_1, M_2, \dots, M_m ale mărimilor măsurabile direct:

$$X = f(M_1, M_2, \dots, M_m) \quad (1-36)$$

Utilizând ca metodă de calcul metoda derivatei logaritmice se obține expresia *erorii absolute maximă posibilă* de forma:

$$(\Delta X)_{\max p} = \pm \sum_{k=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial M_k} \right| \cdot |\Delta M_k| \quad (1-37)$$

unde ΔM_k este eroarea absolută cu care s-a măsurat independent mărimea M_k , în mod direct.

Eroarea relativă maximă posibilă este:

$$\varepsilon_{rl} = \frac{(\Delta X)_{\max p}}{X} = \pm \sum_{k=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial M_k} \right| \cdot \left| \frac{\Delta M_k}{f} \right| \quad (1-38)$$

Exprimarea erorii relative limită cu relația (1-38) este o estimare pesimistă deoarece șansele ca toate condițiile cele mai defavorizate să fie simultan îndeplinite sunt foarte mici. Ca atare se utilizează *eroarea absolută și eroarea relativă maximă probabilă*:

$$(\Delta X)_{mp} = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial M_k} \cdot \Delta M_k \right)^2} \text{ respectiv } \varepsilon_{rlp} = \frac{(\Delta X)_{mp}}{X} \quad (1-39)$$