1. NOTIUNI DE METROLOGIE

Metrologia este un domeniu al tehnicii, cu radacini în spatiul Fizicii si ramificatii în toate sectoarele activitatii practice omenesti (printre care si cel al Electronicii), care se ocupa cu **tehnica masurarilor**, adica cu mijloacele si metodele pentru determinarea cantitativa – valorica a marimilor fizice.

Metrologia – ca disciplina de sine statatoare – se refera la întregul ansamblu al fenomenelor fizice pe care le studiaza dintr-un punct de vedere propriu si anume acela al **masurarii**, care este – în esenta – *o comparare experimentala de marimi*, ea stabilind: standardele unitatilor de masura si ale etaloanelor de referinta pentru aceste unitati, procedeele de comparare a marimilor cu etaloanele si caracteristicile de performanta (ca: interval, game, rezolutie, sensibilitate, fidelitate, dinamica, mobilitate, precizie etc. care – în general – se numesc *caracteristici metrologice*).

Aplicatiile metrologiei, adica efectuarea practica a masurarii diverselor specii de marimi caracteristice unor anume domenii, constituie ramuri ale disciplinei acelor domenii; asa sunt: masurarile electrice, *masurarile electronice*, masurarile acustice, controlul dimensional, fotometria, sistemele pentru masurari automate, masurarile geometrice, masurarile hidraulice si multe altele.

Acest prim capitol al manualului “Masurari electronice” se limiteaza la prezentarea acelor *notiuni generale de metrologie* care trebuie cunoscute de catre oricare persoana pentru a putea realiza masurari “corecte”, indiferent de domeniu, si care – deci – sunt necesare ca elemente primordiale si în masurarile electronice. Astfel, în continuare, se va analiza **procesul de masurare** sub aspectele sale generale, presupunând ca cititorului îi sunt cunoscute notiunile fundamentale ca: sistem, proces, modelare, simulare, date, informatie etc. (a se vedea [1], [3] si [8]).

1.1. CONCEPTUL DE MASURARE

Masurarea este o activitate experimentala de tip informatic al carui scop este obtinerea unor *date cantitative* cu privire la proprietatile unui obiect sau – mai general – ale unui sistem si redarea lor într-o forma potrivita pentru observator (utilizator). Semnificatia (interpretarea) pe care observatorul-utilizator o atribuie acestor date cantitative, prin intermediul conventiilor folosite pentru reprezentarea lor, constituie *informatia* care este necesara în procesul continuu de *cunoastere, comunicare* si *conducere* (*decizie*).

Prin identificarea proceselor si modelarea lor (adica prin reprezentarea matematica a relatiilor din sistemul analizat) se stabilesc anumite proprietati (elemente specifice) *diferite calitativ*, pe care le putem denumi *marimi* (sau specii de marimi – pentru a le preciza natura lor diferita) si anumite *corelatii* între ele descrise matematic prin *legi* – daca sunt deduse experimental sau prin *teoreme*, formule etc. – daca sunt stabilite deductiv din legi. În acest sens, dupa cum se stie (v. [10]), marimile (speciile de marimi) se diferentiaza (clasifica) în *marimi primitive* si *marimi derivate*. Cunoasterea sistemului (starilor sistemului în evolutia lui), în vederea elaborarii deciziilor de conducere a sistemului pe o traiectorie optima sau una anume necesara, implica evaluarea cantitativa a marimilor specifice sistemului si interpretarea lor informationala. Acest lucru nu se poate realiza decât experimental ("pe viu" si în "timp real") prin masurari, ceea ce explica rolul cognitiv, de comunicare si decizional (mai cuprinzator informational) al masurarilor. În acest context, mai trebuie precizat ca utilizatorul (observatorul) – adica "beneficiarul" în activitatea de masurare – poate fi uman sau de tip masina (în cazul sistemelor automate).

Determinarea cantitativa, prin masurare, a speciilor de marimi diferite calitativ nu se poate realiza decât în raport cu marimi de aceeasi specie (aceeasi natura fizica) alese ca unitati cantitative, numite *unitati de masura*, fixate în mod conventional, dar în cadrul unui *sistem de unitati de masura* coerent.

Se poate, acum, defini mai bine conceptul de *masurare*. Astfel:

- din punctul de vedere metrologic [6], masurarea "… este operatia prin care se stabileste pe cale experimentala raportul numeric între marimea de masurat si o valoare ("cantitate") oarecare a acesteia, luata ca unitate de masura";
- din punctul de vedere tehnic [6], "masurarea este operatia experimentala prin care se determina, cu ajutorul unor *mijloace de masurat*, valoarea numerica a unei marimi (numita în [8] *masurand*) în raport cu o unitate de masura data" din aceeasi specie cu masurandul;
- din punctul de vedere al modelarii [9], masurarea este o operatie prin care se stabileste o aplicatie de la o specie de marimi X la multimea numerelor reale R sau – mai rar – R^2 (altfel spus, se stabileste o relatie între valoarea unei marimi X si un numar real $X_m \in R$).

Toate aceste definitii precizeaza ca, în esenta, masurarea: este un proces experimental, necesita definirea initiala a unei unitati de masura (sa o notam cu u_m), este un act de comparatie (referire) a marimii de masurat (masurand) X cu unitatea sa de masura u_m, are ca rezultat un numar real $X_m \in R$ care provine din aplicatia f: $X \rightarrow X_m$, unde $X \in \{X\}$ specia de marimi si f este functia X/u_m.

Aplicatia $X \rightarrow X_m$ consta deci în raportul adimensional:

$$X_m = X/u_m \,, \tag{1.1}$$

de unde rezulta ca:

$$X = X_m \, u_m \,, \tag{1.2}$$

masurarea având scopul ca – la un u_m dat – sa se determine pentru fiecare $X \in \{ X \}$ un numar $X_m \in R$. Daca se alege o alta unitate de masura u'_m pentru marimea de masurat va rezulta, conform relatiei (1.1), o alta valoare numerica reala X'_m diferita de X_m; conform relatiei (1.2), marimea fizica X este:

$$X_m = X/u_m \ , \ X'_m = X/u'_m \Rightarrow X = X_m u_m = X' u'_m \ ,$$

ceea ce arata faptul evident ca marimea fizica X este independenta de sistemul de unitati de masura adoptat. Mai reiese si faptul ca rezultatul masurarii X_m (adica valoarea numerica a marimii masurate) este un numar real adimensional, care variaza invers proportional cu unitatea de masura u_m adoptata.

Din definitiile anterioare rezulta ca pentru efectuarea unei masurari este necesar ca unitatea de masura sa poata fi realizata în mod concret ("materializata"). Realizarea materiala a unitatii de masura constituie ceea ce se numeste *masura* (un exemplu de masura, realizata cu o precizie ridicata, este *etalonul*), însa numai pentru anumite unitati este posibila concretizarea sub forma de masuri (etaloane).

În [8] se introduce notiunea de *proces de masurare* care defineste mai cuprinzator activitatea de masurare.

1.2. PROCESUL DE MASURARE

Ansamblul operatiilor experimentale care se executa în scopul obtinerii rezultatului masurarii, sub forma unei perceptii realizata de observatorul-utilizator (operatorul ce efectueaza masurarea), constituie **procesul de masurare** [8]. Orice proces de masurare are urmatoarele componente principale:

– marimea de masurat (masurandul – [8]),
– metoda de masurare,
– mijlocul (aparatul) de masurat,
– masura (etalonul),
– operatorul (observatorul) si
– prelucrarea – tratarea datelor,

care – în functie de domeniul, precizia si scopul masurarii – au o pondere si o importanta relativa diferita. Aceasta structura a procesului de masurare, diversitatea marimilor de masurat, multitudinea tehnicilor pentru masurare (mijloace si metode) care sa satisfaca exigentele operatorului – beneficiar al masurarii (exigente destul de nuantate, în functie de scopul masurarii, viteza de masurare, costul masurarii, conditiile ambientale etc.) conduc la o mare varietate a masurarilor în general. Un exemplu particular al acestei mari varietati o constituie însesi masurarile electronice (care au ca masurand specii diverse cum sunt: marimile de stare ale câmpului electric si magnetic, marimile electrice de circuit, parametrii de circuit, caracteristici de transfer, frecvente, timp, defazaje, forme de unda, neliniaritati, distorsiuni, zgomote, cu regimuri si o dinamica ample, cu influente de mediu si cuplaje adeseori aleatorii etc.).

1.2.1. Marimi, unitati de masura, sisteme de unitati

Proprietatile unui sistem nu sunt chiar toate masurabile (în sensul definit în subcapitolul 1.1.). Daca o proprietate este masurabila atunci ea este denumita – la modul general – *marime* (care, pentru particularizare, poate fi urmata de un atribut ca, de exemplu, marime fizica – pentru a se arata ca este vorba de o proprietate a unui sistem fizic, sau marime de circuit electric ori marime optica etc. – daca se merge mai departe, specificându-se si natura sistemului fizic s.a.m.d.). Marimea masurabila care este supusa procesului de masurare se mai numeste si **masurand**.

Din punctul de vedere al modelarii sistemelor, marimile susceptibile de a fi masurate, dintr-o specie de marimi $\{X\}$, sunt reprezentate prin asa-numitele *marimi matematice* $\{X_m\}$, care sunt asociate prin aplicatia: $\{X\} \to \{X_m\}$. Marimile matematice pot fi: scalari, vectori si tensori. De exemplu : tensiunea la bornele unui dipol U, rezistenta dinamica a unei diode cu jonctiune etc. sunt reprezentabile prin scalari ($X_m \in \boldsymbol{R}$), pozitivi sau negativi; intensitatea locala a câmpului electrostatic $\vec{E}$, densitatea de curent $\vec{J}$, viteza unui electron dintr-un fascicul al unui tub catodic $\vec{w}$ etc. sunt reprezentabile prin vectori $\vec{X}_m$ (cu modulul $|X_m| \in \boldsymbol{R}$), iar permeabilitatea magnetica absoluta μ dintr-un punct al unui material neuniform (neomogen si anizotrop) se reprezinta printr-un tensor, $\{X_m\} \in \boldsymbol{R^2}$. Dupa cum se stie (de la cursurile de Matematici), *tensorul* este o marime matematica prin care fiecarui punct dintr-un sistem de referinta n-dimensional i se asociaza o matrice n^m ordonata de valori reale, ce exprima *cantitativ* o marime fizica. Aici m este ordinul tensorului, astfel ca într-un sistem de referinta cartezian (triortonormal: Ox, Oy, Oz cu $n = 3$): $m = 0$ este tensorul de ordinul zero (adica scalarul), $m = 1$ este tensorul de ordinul unu (adica vectorul) si $m = 2$ este tensorul de ordinul doi (adica tensorul propriu-zis). Astfel, în tridimensional (cu $n = 3$), scalarul se reprezinta printr-o matrice cu un singur element ($3^0 = 1$) care este un numar real, vectorul prin matricea cu $3^1 = 3$ elemente (X_x, Y_y, Z_z – fiecare un numar real) si tensorul prin $3^2 = 9$ elemente (toate, de asemenea, numere reale). De aceea, prin masurare, vom determina pentru fiecare masurand una, trei sau noua valori scalare.

Conditiile de masurabilitate rezulta din definitiile masurarii (date în subcapitolul 1.1) si sunt:

– sa se poata defini o unitate de masura u_m (într-un sistem de unitati coerent si simetric), pentru marimea considerata;

– sa se poata realiza o masura sau un etalon, adica un element fizic “materializat”, care sa poata fi: pastrat (stocat), multiplicat (reprodus) si transmis (transportat), pentru unitatea de masura a marimii considerate;

– marimii sa i se poata asocia o marime matematica de tip multime ordonabila (pe care, deci, sa se poata defini relatiile de egal, mai mic si mai mare între elementele multimii);

– sa îndeplineasca *conventia de scara,* ceea ce înseamna posibilitatea de a se stabili conventional o corespondenta biunivoca între “cantitatile“ marimii $\{X\}$ si multimea numerelor reale $\boldsymbol{R}$**:** $\{X\} \longrightarrow \boldsymbol{R}$. În fapt, conventia de scara impune totodata si unitatea de masura.

Clasificarea marimilor fizice. Marimile pot fi clasificate dupa numeroase criterii. Pentru masurari prezinta importanta numai câteva.

Din punctul de vedere al modului cum sunt introduse într-o teorie (v.[10]), marimile fizice se clasifica în: marimi primitive si marimi derivate.

Marimile primitive sunt acele marimi care, într-o teorie data, se introduc în mod inductiv, pornind de la experiment; asa sunt, de exemplu, marimile: lungimea, durata, masa si forta (în mecanica clasica); intensitatea câmpului electrostatic în vid ($\vec{E}_0$), intensitatea curentului electric de conductie (i), inductia magnetica în vid ($\vec{B}_0$), sarcina electrica (q), momentul electric ($\vec{p}$) si momentul magnetic ($\vec{m}$) – în teoria macroscopica a câmpului electromagnetic.

Marimile derivate sunt acele marimi care, într-o teorie data, se introduc în functie de alte marimi considerate cunoscute, prin modelele teoriei, (legi, teoreme etc.); asa sunt, de exemplu, printre multe altele: viteza ($\vec{w} = \mathrm{d}\vec{l}/\mathrm{d}t$), acceleratia ($\vec{a} = \mathrm{d}\vec{w}/\mathrm{d}t$), lucrul mecanic ($L = \int_{c:A\to B} \vec{F}\mathrm{d}\vec{l}$) etc. – în mecanica clasica, sau: polarizatia electrica ($\vec{P} = \mathrm{d}\vec{p}/\mathrm{d}v$), densitatea curentului de conductie (div $\vec{J}$ = $\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}t$ sau $i = \int_{\Sigma} \vec{J}\cdot\mathrm{d}\vec{A}$) etc. – în teoria macroscopica a câmpului electromagnetic.

Din punctul de vedere al functiunii lor în sistemele de unitati, marimile fizice se împart în: marimi fundamentale si marimi secundare.

Se numesc *marimi fizice fundamentale* marimile ale caror unitati de masura au fost alese independent de altele pentru a “reprezenta”, în cadrul unui sistem de unitati, un anume domeniu al Fizicii. Numarul marimilor fundamentale este mai mic decât cel al marimilor primitive, sau cel mult egal. De exemplu, în Sistemul International, marimile fundamentale sunt: lungimea (cu unitatea de masura metrul, m), masa (cu unitatea kg), durata (cu secunda, ca unitate) – pentru domeniul mecanic; temperatura (cu unitatea de masura kelvinul, K) – pentru termodinamica; intensitatea luminoasa (cu unitatea candela, cd) – pentru domeniul opticii; intensitatea curentului de conductie (cu amperul, A, ca unitate) – pentru electromagnetism etc.

Se numesc *marimi fizice secundare* marimile ale caror unitati de masura rezulta în mod univoc, prin alegerea unitatilor de masura fundamentale, dintr-o relatie (model) luat ca expresie de definitie. De exemplu: acceleratia (cu unitatea m/s^2 dedusa din relatia $\vec{a} = \mathrm{d}\vec{w}/\mathrm{d}t$), intensitatea câmpului magnetic H (cu unitatea A/m, rezultata din legea circuitului magnetic $\oint_{\Gamma} \vec{H}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = \mathrm{S}\ i$) etc.

Din punctul de vedere al aditivitatii (sau însumarii) lor, marimile fizice pot fi: aditive, indirect aditive si neaditive.

Aditivitatea este proprietatea unei marimi de a fi evaluata prin însumarea directa a unor “portiuni” ale acelei marimi, masurate separat si direct; exemplu de *marimi direct aditive* sunt: lungimea, masa, valoarea instantanee a curentului electric de conductie, valoarea instantanee a tensiunii la borne, potentialul electrostatic s.m.a. La aceste marimi, conventia de scara se reduce la relatia de proportionalitate dintre marimea aditiva si unitatea sa de masura ($X = X_m\ u_m$), factorul de proportionalitate X_m reprezentând chiar valoarea marimii. De aceea, unitatea de masura u_m se stabileste conventional, prin *specificarea etalonului*, fiind suficient un singur etalon pentru construirea întregii scari (datorita proprietatii de aditivitate).

La *marimile neaditive*, întreaga scara trebuie stabilita conventional, prin fixarea unui numar suficient de repere si a modului de interpolare între ele (un exemplu este scara internationala practica de temperatura). Exista marimi care nu sunt direct aditive – numite *marimi indirect aditive*; acestea sunt cele care pot fi exprimate în functie de alte marimi aditive. Asa sunt marimile electromagnetice de material: rezistivitatea/conductivitatea, permitivitatea absoluta, permeabilitatea absoluta, factorul de calitate al bobinelor s.a. la care însumarea nu este realizabila (dar care pot fi masurate indirect; de exemplu rezistivitatea ? a unui conductor omogen, în forma filiforma, de lungime l, arie a sectiunii transversale A si rezistenta electrica R este ? = $R(A/l)$, unde R, A si l pot fi masurate direct). Existenta proprietatii de aditivitate are efecte directe asupra tehnicii de masurare a marimilor fizice, deoarece ea permite aplicarea unor metode de masurare avantajoase (de pilda: masurarea în intervale largi de valori, în raport cu un singur etalon). Totusi, în plus, mai trebuie avuta în vedere (în afara aditivitatii) si comoditatea realizarii practice a metodei. Astfel, desi lungimile sunt usor masurabile, suprafetele se pot masura prin însumare ceva mai greu. Tensiunile la borne în curent continuu se pot însuma foarte simplu; nu acelasi lucru se poate realiza în curent alternativ, unde însumarile se fac pentru valorile instantanee sau pentru cele maxime si defazaj, daca tensiunile sunt de forma sinusoidala (însumarea este de tip vectorial).

Din punctul de vedere al felului cum apar diferitele marimi fizice în modelele matematice (dupa asa-zisul grad – v. [8]), marimile pot fi:

– *marimi de grad 1* sunt marimile care în modelele unei teorii (legi si teoreme) figureaza ca termeni de gradul 1 (de exemplu marimile de tip intensitate din teoria macroscopica a câmpului electromagnetic: intensitatea câmpului electrostatic $\vec{E} = \mathrm{d}\vec{F}/\mathrm{d}q$, inductia electrica $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$, intensitatea câmpului magnetic $\vec{H}$ din $\oint_\Gamma \vec{H}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = \Sigma i$, tensiunea electrica $u = \int_{c:A\to B}\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}$ etc.);

– *marimi de grad 2* sunt acelea care în modelele teoriei apar prin produse sau sume de produse a câte doua marimi de grad 1 (de exemplu marimile care caracterizeaza schimbul de energie în câmpul electromagnetic: densitatea de volum a energiei din câmpul electric $w_e = \vec{E}\cdot\vec{D}/2$, densitatea de volum a energiei din câmpul magnetic $w_m = \vec{H}\cdot\vec{B}/2$, densitatea de suprafata a puterii transferate prin undele electromagnetice $\vec{S} = \vec{E}\times\vec{H}$ – adica vectorul Poynting, energia din dielectricul unui condensator $W_C = QU/2$, energia din miezul – câmpul unei bobine $W_L = \Phi \; I/2$, densitatea de volum a puterii disipate într-un conductor $p = \vec{E} \cdot \vec{j}$ – adica forma locala a legii lui Joule, puterea electrica $P = U\,I$ în curent continuu sau puterile active $P = UI \cos f$ si reactive $Q = UI \sin f$ din circuitele de curent alternativ etc.);

– *marimi de grad* 0 sunt acelea care în modele se definesc prin raportul dintre doua marimi de grad 1 sau grad 2 (de exemplu: rezistenta electrica a unui dipol pasiv $R = U/I$ în curent continuu sau impedanta $Z = U/I$ a unui dipol pasiv în curent alternativ, capacitatea electrica $C = Q/U$, inductivitatea unei bobine $L = \Phi / I$, factorul de putere $\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$, atenuarea unui cuadripol $|\,a\,| = U_2/U_1$, factorul de calitate al unei bobine $Q = ?L/R$ etc.).

Din punctul de vedere al felului în care se obtine energia necesara masurarii marimilor fizice cu un mijloc (aparat) de masurat, masuranzii se clasifica în: marimi active si marimi pasive. Aparatul de masurat, intercalat între masurand si destinatarul masurarii (observator uman sau de tip masina), este actionat ("activat") fie cu energia furnizata de obiectul supus masurarii (de unde este "prelevat" masurandul), fie cu o energie auxiliara (externa) de activare. Din punctul acesta de vedere, al aspectului energetic al masurarii, *marimile active* sunt cele care permit eliberarea energiei necesare la puterea solicitata de aparatul de masurat (se zice ca obiectul sau procesul asupra caruia se efectueaza masurarile pot furniza un *semnal metrologic)*, în timp ce *marimile pasive* nu poseda o energie proprie eliberabila si atunci pentru masurarea lor este necesara utilizarea unei surse de energie auxiliara, numita *energie de activare*. Pentru ca operatia de masurare sa nu afecteze valoarea marimii de determinat este necesar ca energia preluata pentru generarea semnalului metrologic sa fie mult mai mica decât energia totala a sistemului (de ordinul 10^{-4}, adica daca puterea la care functioneaza sistemul analizat este – sa zicem – de 10 kW, aparatul folosit pentru masurari asupra acestui sistem trebuie sa nu aiba o putere proprie mai mare decât 1 W). Exemple de marimi active sunt: tensiunea electrica la bornele unui termocuplu, temperatura apei dintr-un rezervor etc. (în general, asa sunt marimile de grad 1 si grad 2); exemple de marimi pasive sunt: rezistenta electrica, capacitatea electrica, inductivitatea etc. (în general, marimi de grad 0).

Din punctul de vedere al variatiei în timp, marimile pot fi: *marimi constante* (adica invariabile în timpul unei masurari) si *marimi variabile*, care pot fi stationare (adica de regim permanent) sau nestationare (cu o forma de unda oarecare, neexprimabila printr-un model). Marimile variabile stationare pot fi *periodice* (caracterizate de un anumit interval de repetitie, adica de o perioada *T*, sau de frecventa de repetitie $f = 1/T$ sau pulsatie $\omega = 2\pi f$) si *neperiodice* (care – astfel – variaza aleator în timp). La rândul lor, marimile periodice pot avea o variatie sinusoidala în timp (*marimi sinusoidale*, care prezinta un interes deosebit în tehnica si – în special – în electronica) sau o variatie periodica oarecare (*marimi nesinusoidale* sau deformate, distorsionate etc. fata de o sinusoida fundamentala).

În sfârsit, din punctul de vedere al numarului de masurari distincte ce trebuie efectuate pentru a putea afla (determina) valoarea unui masurand, marimile se clasifica în: directe si indirecte.

Marimile masurabile direct sunt acelea la care - prin tehnicile actuale existente (metode si mijloace) - valoarea lor poate fi determinata printr-o singura masurare, direct.

Marimile masurabile indirect sunt acelea a caror valoare nu se poate determina decât prin masurarea directa a mai multor alte marimi diferite, urmata de efectuarea unor calcule prin utilizarea modelelor de definitie. Exemple de marimi masurabile direct sunt: intensitatea curentului electric, tensiunea electrica la borne, rezistentele electrice, impedantele dipolilor etc. (în general marimile primitive fundamentale si cele mai uzuale marimi derivate si secundare). Marimile masurabile indirect sunt, în general, marimile de material, coeficientii de variatie a rezistivitatii cu temperatura si multi altii. Astfel, rezistivitatea unui conductor omogen este masurabila indirect, însa *în mod explicit* cu relatia: $\rho = RA/l$, care presupune masurarea directa a trei marimi (rezistenta R a unei epruvete, aria sectiunii ei transversale - care si ea se poate masura indirect - si lungimea epruvetei), urmate de calculele indicate de formula, ceea ce explica si unitatea de masura a rezistivitatii Ωm, provenita din Ωm^2/m); coeficientii de temperatura $(\alpha, \beta, \gamma, ...)$ ai rezistivitatii unui material conductor se masoara *indirect si implicit* cu ajutorul modelului $R_{?} = R_{?_0}[1+\alpha(\theta-\theta_0)+\beta(\theta-\theta_0)^2+\gamma(\theta-\theta_0)^3+...]$ unde θ si θ_0 sunt temperaturile mediului ambiant la un moment dat (θ) si de referinta (θ_0, de obicei 20…23^{o}C).

Importanta clasificarii marimilor fizice dupa criteriile aratate mai înainte este prezentata în [8] din care redam câteva idei.

Clasificarea dupa modul cum sunt introduse în teorii (în primitive si derivate, în fundamentale si secundare etc.) prezinta importanta pentru stabilirea sistemelor de unitati de masura, al numarului etaloanelor si al definirii unitatilor derivate.

Clasificarea marimilor dupa grad prezinta importanta în legatura cu aplicabilitatea unor categorii de metode de masurare prin [8]:

– marimile de grad 1 au valori pozitive sau negative (au o polaritate), iar cele de grad 0 sunt - în majoritatea cazurilor - numai pozitive (totusi, spre exemplu, rezistenta statica – de curent continuu a unei diode tunel $R = U/I$ este, în orice punct al caracteristicii curent-tensiune, pozitiva, în timp ce rezistenta dinamica $r_t = \Delta U/\Delta I$ are, pe o anumita portiune a caracteristicii, valori negative). Aceasta înseamna ca marimile de grad 1 pot fi masurate prin metode diferentiale sau metode de zero, prin simpla opozitie, pe cînd aplicarea acestor metode marimilor de grad zero necesita dispozitive suplimentare (de exemplu, rezistenta statica nu poate fi masurata direct prin metode diferentiale sau de zero, ci numai prin intermediul unei punti electrice);

– din punctul de vedere tehnic, marimile de grad 1 pot fi masurate direct cel mai simplu. Ele pot fi cu usurinta “transformate” în marimi mecanice (cuplu de forte), mai ales semnalele de tip tensiune sau curent (electrice) prin conversia magnetoelectrica bazata pe forta lui Laplace $\mathrm{d}\vec{F} = i\left(\mathrm{d}\vec{l} \cdot \vec{B}\right)$ realizata cu instrumente (magnetoelectrice cu magnet permanent fix $\rightarrow \vec{B}$ si cu bobina mobila $\rightarrow$ *i*) care asigura liniaritatea scarii si o buna sensibilitate. Aceasta în cazul aparatelor de tip analogic. Dar chiar si în cazul aparatelor numerice, marimile de grad 1 (aduse la natura unor tensiuni electrice) pot fi masurate cu mare usurinta prin operatii de amplificare, redresare, filtrare, modulare-demodulare si conversie analog-numerica (în special prin "lantul" conversie tensiune-frecventa sau timp, producere de pulsuri electrice de referinta si numararea lor proportional cu timpul sau frecventa, deci cu tensiunea creata de semnalul de masurat). Efectuarea unor astfel de operatii pentru masurarea marimilor de grad 2 si de grad 0 necesita etaje suplimentare de multiplicare sau/si divizare (de exemplu, un cosfimetru electronic necesita multiplicatoare $u \cdot i$, filtre "trece jos" si divizoare – vezi cap.2);

– marimile de grad 1 si 2 pot avea valori diferite de zero numai într-un sistem capabil sa cedeze energie. Ca urmare, aceste marimi pot fi masurate numai preluând de la obiectul supus analizei puterea necesara procesului de masurare (de exemplu cu aparate ca: voltmetre, ampermetre, wattmetre, contoare etc.). Marimile de grad 0 pot caracteriza atât sistemele active cât si cele pasive (caz în care masurarea marimilor de grad 0 se face cu aparate care au surse proprii de activare: ohmmetre, punti etc.);

– elementele de referinta si etaloanele marimilor de grad 1 sunt, obligatoriu, sisteme active (de exemplu etaloanele de tensiune electrica), în timp ce etaloanele marimilor de grad 0 sunt de obicei sisteme pasive – fara surse (etaloanele: de rezistenta, de capacitate, de inductivitate si factor de calitate etc.). Ca urmare, elementele de referinta si etaloanele marimilor de grad 0 sunt mai stabile în timp decât cele ale marimilor de grad 1 (fiind – în acelasi timp – mai simple ca structura si constructie). Din aceasta cauza, majoritate aparatelor de masurat folosesc cât mai putine elemente de referinta ale marimilor de grad 1 (de exemplu etaloanele de tensiune electrica) chiar daca – în schimb – va trebui marit numarul elementelor de referinta de grad 0 (de exemplu rezistoare);

– orice operatie (proces) de masurare se realizeaza în timp, durata unei masurari t_m fiind de la 0,1 s la 10 s (sau chiar mai mult). Durata t_m este timpul scurs de la conectarea aparatului (momentul aplicarii semnalului de masurat) pâna la valorificarea rezultatului masurarii (perceperea indicatiei aparatului de masurat de catre operatorul uman, înregistrarea sau transmiterea unui semnal ce reprezinta valoarea masurandului sau, înca, elaborarea unei comenzi de catre operatorul de tip masina). Durata t_m este determinata de: eventualele perturbatii tranzitorii ale sistemului cercetat produse de conectarea aparatului de masurat, timpul de raspuns al aparatului si durata necesara transmiterii datelor (durata indicarii, durata afisarii, durata înregistrarii, durata memorarii si a unor prelucrari atunci când se folosesc si microprocesoare pentru: esantionarea masurandului atunci când se determina valorile instantanee, calculul valorilor medii prin integrare pe un interval de timp $t_2 - t_1$, calculul unor valori efective prin integrare si extragere de radacina patrata, calcule de corelatii, functii de transfer s.a.m.d.).

Sisteme de unitati de masura. Acestea difera între ele atât prin alegerea conventionala a unitatilor fundamentale (mai precis a numarului lor), cât si prin definirea unitatilor derivate (din modelele teoriei alese), ceea ce fixeaza valoarea si pozitia factorilor numerici în modelele (formulele) considerate. Exista numeroase sisteme de unitati, majoritatea având patru unitati de masura fundamentale independente (asa-zisele sisteme simetrice – v. [9]).

Dintre sistemele de unitati patratice, unul – si anume: Sistemul International de unitati (S.I.) – a fost adoptat pe plan mondial, la el aderând oficial majoritatea tarilor lumii (chiar si tari mai conservatoare ca Marea Britanie si mai putin conformiste ca Statele Unite ale Americii). Sistemul International de unitati (S.I.), adoptat la Conferinta Generala de Masuri si Greutati din 1960 a statelor membre ale Conventiei Metrului (printre care si România unde, din 1961, S.I. a fost introdus ca singur sistem de unitati de masura legal si obligatoriu), desemneaza un ansamblu organizat sistemic de unitati de masura, de multipli si submultipli zecimali, precum si de reguli de formare si scriere a acestora. În prezent, acest sistem este "gestionat" si supervizat de ISO: International Organization for Standardization.

S.I. este sistemul de unitati de masura la baza caruia stau urmatoarele unitati fundamentale: *metru* – pentru lungime, *kilogram* – pentru masa, *secunda* – pentru timp, *amper* – pentru intensitatea curentului electric, *kelvin* – pentru temperatura termodinamica si *candela* – pentru intensitatea luminoasa, la care se mai adauga unitatile de masura suplimentare: *radian* – pentru unghiul plan si *steradian* – pentru unghiul solid. Nu se va insista asupra acestui sistem de unitati S.I., deoarece el este binecunoscut cititorului de la cursurile de Fizica, dar nu vom încheia înainte de a prezenta **cum se definesc exact unitatile de masura fundamentale din S.I.** si de a comenta alte marimi derivate din S.I.: *lungimea de unda* si *atenuarea* care – desi tot atât de bine cunoscute – sunt foarte mult implicate în masurarile electronice.

Unitatile fundamentale S.I. se definesc astfel:

– **metrul** (cu simbolul m) este lungimea egala cu 1 650 763,73 lungimii de unda în vid ale radiatiei care corespunde tranzitiei între nivele $2p_{10}$ si $2d_5$ ale atomului de kripton 86;

– **kilogramul** (simbol kg) este masa "kilogramului prototip international" adoptat ca unitate de masura a masei de catre Conferinta Generala de Masuri si Greutati din 1889 (etalonul international este "pastrat" la Sèvres lânga Paris);

– **secunda** (care are simbolul s) este durata a 9 192 631 770 perioade ale radiatiei corespunzatoare tranzitiei între cele doua nivele hiperfine ale starii fundamentale a atomului de cesiu 113;

– **amperul** (simbol A) este intensitatea unui curent electric constant care – mentinut în doua conductoare paralele, rectilinii, de lungime infinita si cu sectiune circulara de arie neglijabila, asezate în vid la o distanta de un metru unul de altul – ar produce între acestea, pe o lungime de un metru, o forta de $2 \cdot 10^{-7}$ newtoni;

– **kelvinul** (cu simbolul K) este fractiunea $1/273{,}16$ din temperatura termodinamica a punctului triplu al apei;

– **candela** (simbol cd) este intensitatea luminoasa, pe directia normalei, a unei suprafete de $1/600\,000$ metri la patrat a unui corp negru la temperatura de solidificare a platinei si la presiunea de $101\,325$ newton pe metru patrat.

Unitatile suplimentare (auxiliare) S.I. sunt:

– **radianul** (adimensional cu simbolul rad) este unghiul plan cu vârful în centrul unui cerc cuprins între doua raze care delimiteaza pe circumferinta cercului un arc a carui lungime este egala cu raza cercului;

– **steradianul** (adimensional cu simbolul sr) este unghiul solid cu vârful în centrul unei sfere cuprins de o suprafata conica ce delimiteaza pe suprafata sferei o arie egala cu aria unui patrat a carui latura este egala cu raza sferei.

În masurarile electronice din domeniul telecomunicatiei intervin foarte des urmatoarele marimi: lungimea de unda si atenuarea.

Lungimea de unda, care se utilizeaza des în radiocomunicatii legat de propagarea undelor electromagnetice plane (v. [10]), este cea mai mica distanta λ dintre doua puncte succesive pe directia de propagare y a unei unde periodice dupa care marimile de stare $E_z(y,t)$ si $H_x(y,t)$, adica intensitatile cîmpului electric si magnetic, ale cîmpului electromagnetic, reiau aceleasi valori si în aceeasi ordine $E_z(y+\lambda \pm c \cdot t)$ si $H_x(y+\lambda \pm c \cdot t)$, unde c este viteza de propagare a undei în mediul considerat. Derivând argumentele în raport cu timpul se obtine: $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(y+\lambda \pm c\cdot t) = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = c$ si daca $y = \lambda$ atunci $t = T$ (perioada de repetitie a câmpurilor $\overline{E}$ si $\overline{H}$) rezultînd: $\int_0^{\lambda} \mathrm{d}y = \int_0^{T} c\mathrm{d}t$, adica $\lambda = c\cdot T$ sau $\lambda = c/f$, unde $f = \frac{1}{T}$ este frecventa de oscilatie a marimilor de stare electrica si magnetica a câmpului. Deci, lungimea de unda se defineste prin expresia:

$$?[\mathrm{m}] = c[\mathrm{m/s}]\cdot T[\mathrm{s}] = c[\mathrm{m/s}]/f[\mathrm{Hz} = \mathrm{s}^{-1}] .$$

Daca propagarea undelor electromagnetice se face în vid, atunci $c = c_0 = 3\cdot 10^8$ m/s este viteza de propagare a luminii în vid, care este legata de permitivitatea absoluta a vidului $\varepsilon_0 = 1/4\Pi\cdot 9\cdot 10^9\,\mathrm{F/m}$ si de permeabilitatea absoluta a vidului $\mu_0 = 4\Pi\cdot 10^{-7}\,\mathrm{H/m}$ prin formula: $c_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_0\cdot\mu_0} = 3\cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$. De aceea, în radiocomunicatii lungimea de unda a propagarii câmpului electromagnetic se considera:

$$\lambda = 3\cdot 10^8/f .$$

Atenuarea este o marime adimensionala, notata cu a, ce caracterizeaza raportul între raspunsul y si semnalul x al unui cuadripol. Daca ne referim la figura 1.1,*a*, unde este indicat un diport (cuadripol) atacat cu semnalul $x \in \{ U_1, I_1, P_1 \}$ si citit în $y \in \{ U_2, I_2, P_2 \}$, atunci – daca semnalele electrice variaza oricum în timp, $x(t)$ si $y(t)$ – pentru diport se defineste, în scopul aprecierii efectului sau în tratarea semnalului de la intrare la iesire $x \to y$, marimea *functie de transfer* $K(p)$ care este o functie de variabila complexa $p = \alpha + j\omega$, prin raportul transformatelor Laplace ale raspunsului si semnalului:

$$K(p) \underline{\underline{D}} \frac{L[y(p)]}{L[x(p)]} . \tag{1.3}$$

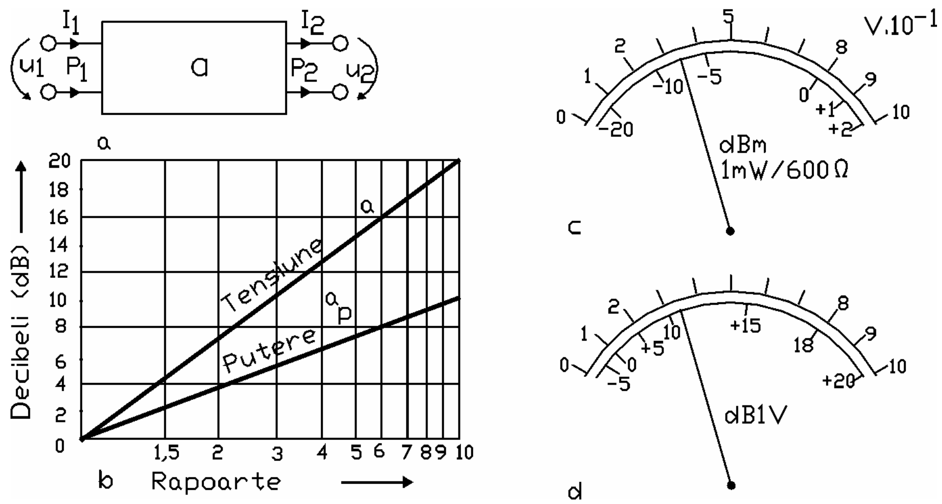


Fig. 1.1

Daca marimile sunt periodice $x(t + kT_1)$ si $y(t + kT_1)$, $k \in N$, atunci ele pot fi reprezentate prin seriile Fourier:

$$x\,(t + T_1) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k\cos(k?_1t + ß_k) \text{ si } y\,(t + T_1) =$$

$$= Y_0 + \sum_{k=1}^{n} Y_k\cos(k?_1t + a_k), \tag{1.4}$$

în care: T_1 semnifica perioada de repetitie a marimilor, X_0 si Y_o – componentele lor continue (valorile medii), $k = 1, 2, 3, \ldots$ – ordinul armonicelor, $?_1$ – pulsatia (frecventa $f_1 = ?_1/2p$) armonicei fundamentale (pentru $k = 1$), $?_k$ sau $f_k = ?_k/2\pi$ – pulsatia sau frecventa armonicelor superioare ($k = 2, 3, \ldots$), X_k si Y_k – amplitudinile armonicelor componente, iar a_k si $ß_k$ – fazele initiale ale armonicelor. În acest caz, pentru fiecare pulsatie $?_k$, k = 1, 2…, se defineste marimea numita **constanta de transfer** a diportului $K(?_k t)$ prin raportul adimensional:

$$K(?_k t) = \frac{Y(\omega_k t)}{X(\omega_k t)}, \quad k = 1, 2, \ldots, \tag{1.5}$$

care rezulta din (1.3) în care s-au introdus expresiile (1.4). În relatia (1.5), $K(?_k t)$, $Y(?_k t)$ si $X(?_k t)$ sunt reprezentarile în planul complex (1, j) cu 1 – unitatea reala si j (data de $j^2 = -1$) – unitatea imaginara, care au forma (pentru fiecare pulsatie $? = ?_k$):

$$K(?\,t) = e^{a + jf},\ X(?\,t) = Xe^{\,j?t + ß} \text{ si } Y(?\,t) = Ye^{\,j?t + a}\,. \tag{1.6}$$

Tinând seama de expresiile (1.6), pentru fiecare pulsatie $? = ?_k$, k = 1, 2, …, constanta de transfer (1.5) se scrie :

$$K(?\,t) = \frac{Y(\omega t)}{X(\omega t)} = \frac{Ye^{j(\omega t + \beta)}}{Xe^{j(\omega t + \alpha)}} = \frac{Y}{X}e^{\,j(\beta - \alpha)} = \frac{Y}{X}e^{j\varphi}\,, \tag{1.7}$$

unde φ = ß – a este defazajul raspunsului fata de semnal, zisa si *faza* φ (care este o functie de pulsatie redata prin cunoscuta caracteristica faza – frecventa a cuadripolului), iar raportul amplitudinilor raspuns/semnal este marimea *atenuare a* ($a = Y/X$, care este si ea o functie de frecventa, exprimabila prin binecunoscuta caracteristica amplitudine – frecventa a cuadripolului). Daca se logaritmeaza, membru cu membru, rezulta:

$$\ln K = \ln\frac{Y}{X} + j\,\varphi = \theta\,, \tag{1.8}$$

unde θ este denumita tot **constanta de transfer** a cuadripolului (însa lucrând pe impedanta sa caracteristica), $a = \ln \dfrac{Y}{X}$ este numita tot **atenuarea** diportului (însa exprimata în unitatea de masura **neper**, cu simbolul N), iar φ este defazajul raspuns-semnal introdus de cuadripol sau, pe scurt, **faza raspunsului** dat de cuadripol la atacarea lui cu un anume semnal sinusoidal.

În practica, având în vedere ca x si y pot fi marimile electrice tensiune, curent sau putere (activa), se defineste deci o atenuare de tensiune a_u, o atenuare de curent a_I si o atenuare de putere a_p, exprimate însa prin logaritmi zecimali (lg) – ca rezultat al aplicatiilor curente si deprinderilor din telofonie si electroacustica*:

– **atenuarea de putere** (a_p) se defineste prin (v. fig. 1.1,*a*):

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{a_p/10}\,,$$

* Exprimarea prin $\log_{10}$ – daca semnalul de raspuns este puterea sonora – se datoreste faptului ca urechea umana are o perceptie a sunetului cu o sensibilitate fiziologica logaritmica (zecimala).

de unde rezulta:

$$a_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}, \tag{1.9}$$

cu unitatea de masura adimensionala *decibel* (articulata *decibelul* si la plural *decibeli*) – denumita asa în memoria fizicianului american Graham Bell (1847-1922) care este considerat inventatorul telefoniei – unitate care are simbolul dB;

– **atenuarea de tensiune** (a_u) se refera la raportul dintre tensiunile electrice ale cuadripolului U_2/U_1 (v. fig. 1.1,*a*). În acest scop, se scriu puterile din (1.9) sub forma: $P_1 = U_1^2/R_1$ si $P_2 = U_2^2/R_2$, iar daca cuadripolul lucreaza în regim de adaptare (pe rezistente caracteristice) atunci $R_1 = R_2 = R$ si relatia (1.9) devine:

$$\frac{U_2^2}{U_1^2} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = 10^{a_u/10},$$

$$2 \lg \frac{U_2}{U_1} = \frac{a_u}{10} \therefore \; a_u = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ în dB.} \tag{1.10}$$

Daca $U_2 < U_1$ (la atenuatoare) atunci a_u (în dB) este întotdeauna negativa, iar daca $U_2 > U_1$ (la amplificatoare) atunci a_u este întotdeauna pozitiva (si *a* se numeste *câstig* sau amplificare).

Se considera necesare câteva precizari:

– valoarea atenuarii de – 3dB (care corespunde unui raport al tensiunilor $\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ si deci $20 \lg \frac{1}{\sqrt{2}} = 20 \lg 1 - 20 \lg \sqrt{2} = -20 \lg 1{,}4142 = -20 \cdot 0{,}15 = -3$ dB) este o valoare care pentru un cuadripol de tip amlificator, filtru, atenuator etc. delimiteaza asa-numita *largime de banda* sau *banda de trecere* etc. $2\Delta\omega$. Dupa cum s-a aratat – v. expresia (1.7) – atenuarea si câstigul, exprimate prin *a*, au valori care depind de pulsatia semnalului conform caracteristicii amplitudine – frecventa a cuadripolului considerat. În acest caz, banda de frecventa $2\Delta\omega$ este data de intervalul $2\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1 \cong \omega_2 - \omega_0$ (deci $\omega_2 - \omega_1 = 2\Delta\omega$) în interiorul caruia raportul $\frac{U_2}{U_{2max}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, adica în banda $2\Delta\omega$ raspunsul U_{2max} (care apare la ?$_0$) nu scade la mai mult de $U_2 = U_{2max}/\sqrt{2}$, U_2 fiind raspunsurile la pulsatiile ?$_1$ si ?$_2$ în jurul valorii ?$_0$. Acest raport s-a adoptat pentru definirea benzii de frecvente tot din motive care provin din domeniul electroacusticii, telefoniei si a sensibilitatii urechii umane la intensitatea sonora (cunoscuta lege din Acustica a lui Weber-Fechner, despre dependenta dintre intensitatea senzatiei si însasi excitatia sonora a unei surse externe). În Acustica, marimea asa-numita *taria sunetului* (masurata în foni), care de fapt reprezinta puterea sunetelor emise de o sursa sonora, poate fi perceputa ca atare daca – provenind de la doua surse ce emit simultan unde acustice cu puterile P_1 si P_0 – este dubla fata de cealalta (daca $P_1 \rangle\, 2P_0$ auzim numai sursa 1, iar daca $P_0 \rangle\, 2P_1$ auzim numai sursa 0), pragul de sensibilitate fiind deci $P_0/P_1 = \frac{1}{2}$, careia îi corespunde o atenuare în dB de $10 \lg \frac{1}{2} = -\ 10 \cdot 0{,}301$ dB = – 3 dB. Cum puterea este o marime de grad 2 ($P = UI = U^2/R = RI^2$), iar R este o marime de grad 0 si U sau I de grad 1, rezulta ca raportul limita $\frac{P_0}{P_1} = \frac{1}{2}$ între marimile de grad 2 devine raportul $\frac{U_0}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ sau $\frac{I_o}{I_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ între marimile de grad 1, ceea ce explica pragul de – 3 dB în definirea largimii de banda atât pentru tensiuni sau curenti, cât si pentru puteri;

– legatura între neper [N] definit anterior si decibel [dB] este: 1 N = 8,686 dB, deoarece din definitiile acestor doua unitati de atenuare rezulta:

$$\ln \frac{U_2}{U_1} = a\,[\mathrm{N}] \rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \mathrm{e}^{a\,[\mathrm{N}]}$$

si

$$20 \lg \frac{U_2}{U_1} = a\,[\mathrm{dB}] \rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{a\,[\mathrm{dB}]/20} \therefore \mathrm{e}^{a\,[\mathrm{N}]} = 10^{a\,[\mathrm{dB}]/20}$$

si deci:

$$a\,[\mathrm{N}] \lg \mathrm{e} = \frac{a\,[\mathrm{dB}]}{20} \therefore a\,[\mathrm{dB}] = 20 \lg \mathrm{e}\; a\,[\mathrm{N}] = 20 \cdot 0{,}4343\; a\,[\mathrm{N}] = 8{,}686\; a\,[\mathrm{N}];$$

– dintre cele trei atenuari: a_p, a_u si a_i, cea mai frecvent utilizata în practica este atenuarea de tensiune a_u, care – din aceasta cauza – se va nota, mai simplu, cu a. Corelatia dintre atenuarea de tensiune (a) si cea de putere (a_p) este aratata în figura 1.1,*b*;

– expresia (1.10) si graficele din figura 1.1,*b*) arata ca atenuarea de tensiune (a) este dubla fata de atenuarea de putere (a_p), dar aceasta numai în cazul în care rezistenta de intrare R_1 si cea de iesire R_2 ale cuadripolului (fig. 1.1,*a*) sunt egale între ele ($R_1 = R_2 = R$), situatie existenta (asa cum s-a mai spus) la toti cuadripolii ce lucreaza în regim de adaptare. Totusi, exprimarea în decibeli poate fi extinsa si în cazul $R_2 \neq R_1$, situatie aproape generala la amlificatoare unde (tipic) $R_1 >> R_2$, desi corelatia $a = 2a_p$ nu se mai pastreaza, prin aplicarea unor corectii care depind de cazul concret existent. De exemplu, daca la un amplificator de tip repetor de tensiune avem $R_1 = 10$ MΩ si $R_2 = 1000$ Ω, câstigurile de tensiune (A_u), de curent (A_i) si de putere (A_p) sunt (daca $U_2 \cong U_1 = U$):

$$A_u = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{U}{U} = 0 \text{ [dB]},$$

$$A_i = 20\,\lg\frac{I_2}{I_1} = 20\,\lg\frac{\frac{U_2}{R_2}}{\frac{U_1}{R_1}} = 20\,\lg\frac{\frac{U}{R_2}}{\frac{U}{R_2}} = 20\,\lg\frac{R_1}{R_2} =$$

$$= \frac{10\cdot 10^6}{1000} = 20\,\lg 10^4 = 80\ \text{dB}$$

$$A_p = 10\lg\frac{P_2}{P_1} = 10\lg\frac{\frac{U_2^2}{R_2}}{\frac{U_1^2}{R_1}} = 10\lg\frac{\frac{U_1^2}{R_2}}{\frac{U^2}{R_1}} = 10\lg\frac{R_1}{R_2} = 10\lg\frac{10\cdot 10^6}{1000} = 40\ \text{dB}$$

(aici exista deci relatia $A_i = 2A_p$);

– în unele aplicatii ale electronicii (în telecomunicatii, electroacustica s. a.) se utilizeaza mult o marime relativa (adimensionala) numita **nivel de transmisie** si notata cu simbolul q, care se masoara tot în decibeli (numit adesea si *decibel relativ*, deoarece la exprimarea în dB a nivelului de transmisie, a nivelului sonor etc. este necesar sa se aleaga si o *referinta* – termenul de la numitor). Luându-se ca referinte $P_1 = P_0$ si $U_1 = U_0$ si notând atunci $P_2 = P$ si $U_2 = U$, nivelul de transmisie (în dB) se defineste prin:

$$q_p = 10\,\lg\frac{P}{P_0}\ \text{[dB]} \quad \text{si} \quad q_u = 20\,\lg\frac{U}{U_0}\ \text{[dB]}, \tag{1.11}$$

ce reprezinta nivelul de putere (q_p) si de tensiune (q_u), iar unitatea de masura decibel relativ se numeste *unitate de transmisie*;

– în telefonie (deci în audiofrecventa AF) s-a generalizat ca referinta puterea P_0 = 1 mW disipata printr-un rezistor de 600 Ω (ceea ce, prescurtat, se scrie: 1 mW/600 Ω sau, mai scurt: dBm), careia îi corespunde tensiunea de referinta $U_0 = \sqrt{10^{-3}\cdot 600} = \sqrt{0{,}6} =$ 0,775 V. În domeniul radiocomunicatiilor (în RF) s-a generalizat referinta de 1 mW/50 Ω, adica U_0 = 0,224 V, fata de o alta referinta – înca utilizata, dar mai restrâns – de 1 mW/75 Ω, când U_0 = 0,274 V. Utilizarea puterilor de referinta în asociere cu impedantele standard: 600 Ω în AF si 50 Ω/75 Ω în RF, prezinta marele avantaj ca masurarea unei puteri se reduce la masurarea unei tensiuni (sau curent), operatie mult mai simpla si mai comoda. Aceste valori ale impedantelor asociate (600 Ω si 50 Ω sau 75 Ω) corespund valorilor standard ale impedantelor caracteristice ale cuadripolilor utilizati în AF si RF. Pentru a fi mai adecvate masurarilor în telecomunicatii, voltmetrele independente si cele de pe panoul generatoarelor de AF au – de regula – si o scara gradata în dB, asa cum se arta în figura 1.1,*c*, însa – pentru evitarea confuziilor – pe cadran se mentioneaza si referinta (de exemplu 1 mW/600 Ω sau 1 mW/50 Ω). Exista si voltmetre la care "zero" dB de pe scara atenuarii corespunde valorii de 0,3 V sau 1 V (v. fig. 1.1,*d*) notându-se acest fapt (de exemplu cu dB1V);

– în sfârsit, pentru ca mai înainte s-a amintit de legea lui Weber – Fechner din teoria acusticii, se va mai preciza ca în Acustica se utilizeaza o marime numita **nivel sonor** (notata cu q_s), adimensionala, care se masoara tot în dB (relativi), definita prin:

$$q_s = 10 \lg \frac{Y}{Y_0},$$

unde Y_0 reprezinta *intensitatea sonora de referinta* (egala cu 10^{-16} W/cm^2, care corespunde pragului de audibilitate al urechii umane în banda de sensibilitate maxima a ei de 1,5 Hz la 2,5 kHz).

Decibelul definit în referinta $Y_0 = 10^{-16}$ W/cm^2 se mai numeste si *fon*. Exemple de nivele sonore: vorbirea obisnuita 40 dB, sala de curs/amfiteatru (în pauze!) 50 dB, ciocane pneumatice 70-80 dB, avion turbopropulsor (la 2-3 m distanta) 90-100 dB, strada circulata din marile orase 60-80 dB, decolarea avioanelor supersonice cca. 120 dB (la peste 120 dB încep sa apara senzatiile de durere în urechi).

1.2.2. Metoda de masurare

Masurarile directe, care conduc la determinarea valorii X_m a marimii fizice X prin efectuarea unei singure operatii, sunt – asa cum am mai aratat – o *comparatie* a lui X cu o unitate de masura u_m a sa aleasa arbitrar (conventional), dar în cadrul coerent al unui sistem de unitati (în cazul nostru SI). Prin urmare, prezenta *marimii de referinta* (a etalonului), chiar daca uneori este mai putin evidenta, este indispensabila. Ca urmare a faptului ca masurarea este o comparatie a masurandului X cu unitatea sa de masura u_m, exista doua grupe de masurari: *masurarea directa prin comparatie simultana si masurarea directa prin compartie succesiva.*

Comparatia simultana consta în “raportarea” nemijlocita a marimii X la marimea de referinta u_m (de aceeasi speta cu X). De exemplu, o tensiune electrica U_x este comparata cu o tensiune de referinta U_{ref} cu ajutorul unui compensator de c.c.; o rezistenta R_x a unui rezistor este comparata cu rezistenta R_{et} a unui etalon de rezistenta cu ajutorul unei punti comparatoare etc. În cazul *comparatiei succesive*, marimea de referinta (sau etalonul care reproduce pe u_m) nu este prezenta la fiecare masurare: într-o prima etapa, u_m serveste la calibrarea initiala (de exemplu la “gradarea” unui cadran indicator), care se face o singura data la constructia aparatului de masurat sau – apoi (în timpul “exploatarii” aparatului) – la verificarile (reetalonarile sau recalibrarile) periodice ale unui anume aparat, care pastreaza în “memoria” sa (la figurat sau chiar la propriu, daca este vorba de aparatele numerice cu microprocesor) datele calibrarii; dupa construirea (sau reetalonarea) aparatului, la fiecare masurare la care este utilizat aparatul sunt folosite mereu datele transmise initial de la etalon.

În concluzie, în cazul comparatiei simultane transferul de date se face în acelasi timp de la etalon si de la masurand la operatorul uman, prin intermediul aparatului de comparatie (un exemplu, banal dar elocvent, este cântarirea masei unui corp cu o balanta cu doua talere si cu “greutati” ca etalon), în timp ce în cazul comparatiei succesive transferul de date se face în doua faze: odata pe calea etalon-aparat de masurat (în etapa de calibrare sau, periodic, în timpul recalibrarilor sau verificarii calibrarii) si apoi pe calea masurand-aparat de masurat-operator uman sau de tip masina (în timpul masurarilor efective). Pastrând exemplul determinarii masei unui corp, prin utilizarea unui cântar cu cadran etalonat si ac indicator se face o masurare prin comparatie succesiva. Aceste doua feluri de masurari sunt aratate schematic în figura 1.2.

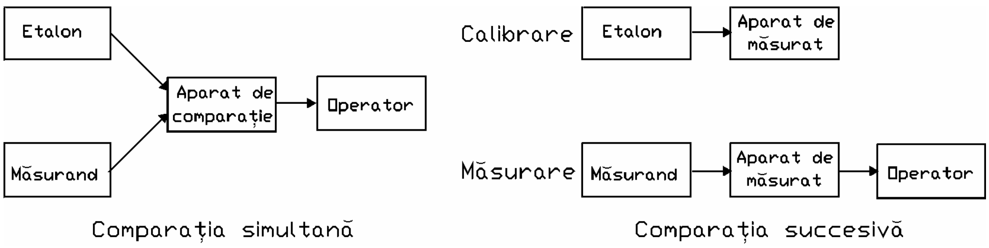


Fig. 1.2

Masurarile prin comparatie simultana. În cazul acestor masurari, masurandul poate fi comparat fie cu un etalon de valoare apropiata (asa-numita *comparatie 1:1*), fie cu un etalon de valoare diferita (denumita *comparatia 1:n*). Aceste doua categorii de comparatie se clasifica, în functie de metoda aplicata, în mai multe grupe, asa cum rezulta din urmatoarea schema sinoptica:

Comparatie simultana
- Comparatia 1:1
  - – directa
    - – diferentiala
    - – de zero
  - – indirecta
    - – simpla
    - – prin substitutie
    - – prin permutare
- Comparatia 1:*n*
  - – prin aditionare
  - – prin raport

În continuare se vor analiza, pe scurt, aceste metode ale masurarii prin comparatie simultana.

Comparatia 1:1 este directa atunci când masurandul este comparat cu marimea de referinta în mod nemijlocit si indirecta atunci când aceasta comparatie se face prin intermediul unui aparat numit *comparator*.

Metoda diferentiala de comparatie 1:1 directa consta în masurarea nemijlocita a diferentei X_d dintre valoarea masurandului X si o marime de referinta cunoscuta X_{ref} (cu valoarea apropiata de cea a masurandului), conform modelului:

$$X = X_{ref} + X_d \,. \tag{1.12}$$

Contributia erorii relative a aparatului de masurat (v. subcap. 1.3), adica $\Delta X_d/X_d$ (pentru ca numai pe X_d îl masuram) la eroarea totala a masurarii este neglijabila daca valorile X si X_{ref} sunt "destul" de apropiate, ceea ce rezulta din relatia (1.12) scriind erorile relative pentru fiecare termen în parte:

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta X_{ref}}{X} + \frac{\Delta X_d}{X},$$

de unde, prin multiplicarea ultimului termen cu $1 = \frac{X_d}{X_d}$, rezulta:

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta X_{ref}}{X} + \frac{\Delta X_d}{X_d}\frac{X_d}{X}. \tag{1.13}$$

Din relatia (1.13) reiese ca daca raportul X_d/X este suficient de mic (adica $X_d \langle\langle X$), atunci influenta erorii relative de masurare $\Delta X_d/X_d$ este neglijabila în cadrul erorii $\Delta X/X$ a întregii determinari, rezultatul aflându-se practic cu aceeasi eroare $\frac{\Delta X_{ref}}{X} \approx \frac{\Delta X_{ref}}{X_{ref}}$ cu care se cunoaste valoarea de referinta X_{ref}, caci conform relatiei (1.12) $X_d \langle\langle X_{ref} \Rightarrow X \approx X_{ref.}$.

Metoda de zero, a comparatiei 1:1 directa, este un caz particular al metodei diferentiale în care, prin aducerea la zero a unei prime diferente existente între masurand si valoarea de referinta, se obtine valoarea masurandului ca fiind egala cu valoarea etalonului, caci din relatia (1.12) rezulta $X_d = X - X_{ref}$ si când $X_d = 0 \Rightarrow$ $\Rightarrow X = X_{ref}$. Evident, în acest caz aparatul de masurat este folosit doar ca indicator de zero (si eroarea lui nu intervine în masurare), iar etalonul (referinta) folosit trebuie sa fie reglabil (pentru a "gasi" acea valoare X_{ref} care face $X_d = 0$).

Metoda diferentiala si metoda de zero sunt – în principiu – cele mai precise metode de masurare, deoarece în cazul lor influenta aparatului de masurat (si mai ales a indicatorului de zero) este minima. Aceste metode au însa dezavantajul ca necesita un etalon cu valoare apropiata de valoarea masurandului (în cazul metodei diferentiale) sau un etalon cu valoare variabila/reglabila (în cazul metodei de zero). Sa mai remarcam ca aceste doua metode pot fi usor aplicate nemijlocit la masurarea marimilor de grad 1, marimi ce se preteaza la compararea prin opozitie (de exemplu cazul tensiunilor electrice, forma în care – în electronica – sunt reprezentate majoritatea semnalelor).

Metoda comparatiei simple, a comparatiei 1:1 indirecte, consta în compararea marimilor: masurand si de referinta (data de etalon) cu ajutorul unui aparat (dispozitiv) de masurat numit *comparator* 1:1, care foloseste un procedeu de masurare diferential sau de zero. Metoda se aplica în special la masurarea parametrilor de circuit electric ca: rezistente, capacitati, inductivitati etc., caz în care comparatorul este o punte cu brate egale (v. cap. 12), care fie indica direct diferenta dintre marimile comparate (masurare diferentiala), fie se aduce la echilibru printr-o reglare a rezistorului etalon dintr-una din laturile puntii (masurare de zero).

Metoda prin substitutie (numita si *metoda efectelor egale*), a comparatiei 1:1 indirecte, consta în masurarea succesiva, cu acelasi aparat de masurat, în acelasi mod si în aceleasi conditii, întâi a masurandului si apoi a etalonului (referintei), care se regleaza astfel încât sa dea acelasi efect al aparatului ca si masurandul. În acest fel se elimina eroarea comparatorului (aparatului de masurat) printr-o masurare dubla efectuata în aceleasi conditii (eroarea comparatorului intervenind la fel în ambele masurari). Este posibila si o varianta în care etalonul X_{ref} sa aiba valoare fixa, caz în care egalarea efectelor se face printr-un raport al comparatorului K si folosirea unui etalon suplimentar (numit *tara*) cu valoare constanta (stabilita în timpul masurarii) X_t, care însa nu trebuie sa fie cunoscuta. La prima masurare se folosesc simultan etalonul de referinta (X_{ref}) si tara X_t, obtinându-se:

$$X_{ref} = (K + k_1)X_t \,, \tag{1.14}$$

unde K este raportul comparatorului si k_1 este o mica variatie data lui K pentru ca sa se obtina egalitatea (1.14). La a doua masurare, etalonul de referinta este substituit cu masurandul (cu valoarea necunoscuta X) si dându-se o noua variatie k_2 raportului K al comparatorului se obtine:

$$X = (K + k_2)X_t \,. \tag{1.15}$$

Raportându-se (1.15) la (1.14) , rezulta:

$$\frac{X}{X_{ref}} = \frac{K+k_2}{K+k_1} = \frac{K}{K+k_1} + \frac{k_2}{K+k_1} = \frac{K}{K} + \frac{k_2}{K+k_1} = 1 + \frac{k_2}{K+k_1} \Leftarrow k_1 << K \,,$$

din care (deoarece $k_1 << K$ si $k_2 << K$) reiese valoarea cautata a masurandului (neglijând pe k_1 fata de K si scazându-l din k_2 pentru ca aproximarea sa fie si mai mica):

$$X = \left(1 + \frac{k_2 - k_1}{K}\right) X_{ref} \,. \tag{1.16}$$

Daca valoarea X este mai apropiata de X_{ref}, marimea $(k_2 - k_1)/K$ este mica fata de 1, astfel ca eroarea introdusa de comparator este neglijabila.

Metoda prin permutare, a comparatiei 1:1 indirecte, recurge la o alta varianta de eliminare a erorii comparatorului si anume: daca raportul K al comparatorului este foarte apropiat de 1 (practic $K = 1$), atunci se fac doua masurari; la prima masurare se compara X cu X_{ref} si se regleaza raportul K cu o foarte mica valoare k_1, astfel încât sa rezulte:

$$X = (K + k_1)X_{ref}; \tag{1.17}$$

la a doua masurare se schimba între ei, pe "canalele" comparatorului, masurandul si etalonul, dându-se o mica variatie k_2 lui K astfel ca sa se obtina:

$$X_{ref} = (K + k_2)X; \tag{1.18}$$

Din egalitatile (1.17) si (1.18) rezulta, daca $k_1 << K$ si $k_2 << K$, ca si pentru expresia (1.16):

$$\left(\frac{X}{X_{ref}}\right)^2 = \frac{K + k_1}{K + k_2} = 1 + \frac{k_1 - k_2}{K}\ . \tag{1.19}$$

Aplicând formula binomului $(1 \pm x)^n = 1 \pm \binom{n}{1}x \pm \binom{n}{2}x^2 \pm \binom{n}{3}x^3 \pm \ldots$, în care: $x = \frac{k_1 - k_2}{K}$, $n = 1/2$, coeficientii binomului $\binom{n}{p} = C_n^p = \frac{n(n-1)\ldots(n-p+1)}{1 \cdot 2 \cdot p}$ si, neglijând termenii ca x^2, x^3,…, deoarece daca avem $(k_1 - k_2) <<< K$ atunci, cu atât mai mult $(k_1 - k_2)^2 <<< K^2$ etc. , expresia (1.19) se poate scrie cu o foarte buna aproximatie sub forma:

$$\frac{X}{X_{ref}} = \left(1 + \frac{k_1 - k_2}{K}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} - 1\right)}{1 \cdot \frac{1}{2}} \cdot \frac{k_1 - k_2}{K} = 1 - \frac{k_1 - k_2}{2K} = 1 + \frac{k_2 - k_1}{2K}$$

si, daca asa cum s-a presupus $K \tilde{}\ 1$, rezulta:

$$X = \left(1 + \frac{k_2 - k_1}{2}\right)X_{ref} \tag{1.20}$$

Termenul $(k_2 - k_1)/2$ fiind foarte mic fata de unu reiese, ca si la metoda substitutiei, ca eroarea indusa de comparator este neglijabila daca în loc de (1.20) se considera $X = X_{ref}$.

Metodele substitutiei si permutarii sunt folosite adesea pentru masurarea cu precizie ridicata a parametrilor de circuite electronice : rezistente, inductivitati, capacitati (v. cap. 12).

Metoda prin aditionare (însumare), a comparatiei 1: *n* care foloseste un etalon de valoare diferita, se bazeaza pe proprietatea de aditivitate (asociere prin însumare) a unora dintre etaloane. În cazul masurarilor electronice, aceasta proprietate o au în special etaloanele de tensiune, etaloanele de rezistenta si etaloanele de capacitate (astfel, etaloanele de tensiune conectate în serie într-o latura de circuit sunt perfect aditive, în sensul ca tensiunea la bornele laturii cu etaloanele legate în serie functionând în gol este egala cu suma tensiunilor la bornele fiecarui etalon de tensiune din grupul serie, daca sunt în gol, adica cu un curent neglijabil). De exemplu, o tensiune U_x = 10 V poate fi masurata prin comparatie simultana cu tensiunea a 10 etaloane de câte U_{ref} = 1 V fiecare. De asemenea, etaloanele de rezistenta legate în serie si capacitoarele etalon (etaloanele de capacitate) legate în paralel, în conditii de liniaritate si lipsa a unor cuplaje, sunt practic perfect aditive. Metodele prin aditionare sunt, în mai toate cazurile, greoaie si cer un timp de masurare îndelungat, dar fiind precise se folosesc în special în laboratoarele de metrologie (de exemplu, la compararea etaloanelor).

Metoda prin raport, a comparatiei 1: *n*, este o metoda de zero în care masurandul X este comparat cu o fractiune K a marimii de referinta X_{ref} (obtinuta cu ajutorul unui dispozitiv de raport, ca – de exemplu – divizoarele de tensiune sau de curent, rezistive, capacitive sau inductive), conform urmatorului model:

$$X = K\, X_{ref}\ ,$$

în care “raportul” K este un parametru specific dispozitivului de raport. Exemple de metoda prin raport sunt metoda compensarii (v. cap. 7) si metoda de punte (v. cap. 12).

În practica se folosesc dispozitive de raport cu parametrul K variabil în limite largi, ceea ce permite realizarea de masurari într-o gama mare de valori prin comparare cu un singur etalon (ce da marimea X_{ref}).

Masurarile prin comparatie succesiva. Aceste masurari se bazeaza pe compararea masurandului (ori de câte ori se face o masurare cu un aparat de masurat dat) cu o marime de calibrare a aparatului (de aceeasi specie cu masurandul) pe care aparatul o pastreaza (o poarta cu sine) într-un dispozitiv care – prin extensie – poate fi considerat o *memorie* a aparatului (realizata initial, în faza de calibrare a aparatului de masurat). În aceasta acceptiune (v. [8]), principalele variante ale comparatiei succesive sunt cele cu *memorie mecanica* (la aparatele electromecanice), cele cu *memorie electrica* (la aparatele electronice) si cele cu *memorie magnetica* (la aparatele de masurat dotate cu microprocesor sau la calculatoarele utilizate în regim de monitorizare – v. cap. 15).

Masurarile prin comparatie succesiva sunt specifice aparatelor de masurat indicatoare (cu ac sau cu afisaj numeric) în care au loc una sau mai multe conversiuni ale masurandului.

La un aparat de masurat electromecanic (de exemplu magnetoelectric, cu magnet permanent fix si bobina mobila – v. cap. 7), care are un cuplu rezistent M_r dat de un element elastic (un resort spiral plan, un fir de torsiune etc.), o comparatie propriu-zisa (în regim de lucru, de efectuare a unei masurari) se face între cuplul activ M_a (proportional cu I – curentul de masurat sau cel corespunzator unei tensiuni de masurat) si cuplul rezistent M_r (proportional cu unghiul de rotatie a al sistemului mobil). Cuplul rezistent este, pe de alta parte, proportional cu curentul de calibrare a aparatului (realizata la calibrarea initiala). În acest fel se poate considera ca elementul elastic împreuna cu acul indicator si scara gradata pastreaza datele de calibrare, îndeplinind functia de memorie a aparatului (o “memorie mecanica”). Ulterior, orice masurare realizata cu aparatul calibrat este o masurare de comparatie succesiva între masurand (orice curent de masurat) si curentul de calibrare, dar transformata (prin conversie) într-o comparatie simultana între doua marimi mecanice (cele doua momente M_a si M_r: primul creat prin conversia marimii de masurat si al doilea generat de elementul de memorie al aparatului). La aparatul luat ca exemplu (un ampermetru magnetoelectric): $M_a = k_a\ I$ (I fiind curentul “aplicat”, deci de masurat la un moment dat) si $M_r = k_r$ a (a fiind unghiul de deviatie produs de I, al indicatorului); la echilibru (când a = constant) rezulta $M_a = M_r$ (v. fig. 1.3) si deci $k_a\ I = k_r$ a , de unde rezulta $\alpha = \frac{k_a}{k_r} I$, în care k_a si k_r sunt constante constructive, iar raportul k_a/k_r definind asa-numita *sensibilitate* a aparatului (în diviziuni pe amper).

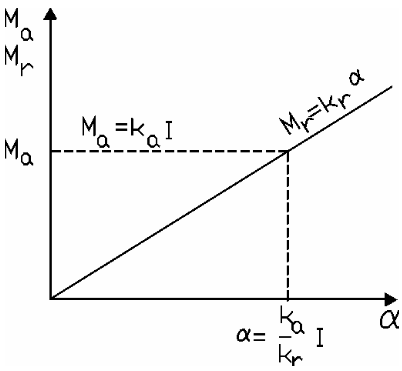


Fig. 1.3

La un aparat electronic (de exemplu un multimetru cu conversie tensiune – timp, v. cap. 7, cu care se pot face masurari de tensiuni electrice, în curent continuu sau alternativ, rezistente, capacitati etc.), marimea de masurat X este convertita (printr-un traductor) într-o tensiune continua proportionala (tensiunea intermediara $U_i = k_t\ X$, unde k_t este o constanta a conversiei X? U_i realizata de traductor), care este comparata cu o tensiune liniar crescatoare în timp, adica cu tensiunea de comparatie $U_c = k_a\ (nT - t)$ ce creste liniar în timp (t) în forma de dinte de fierastrau cu o perioada de repetitie T (n = 1, 2, …) si o panta k_a = tg a = $U_{c\ max}/T$, unde $U_{c\ max} = U_c(T)$, asa cum este aratat în figura 1.4. Panta de crestere în timp a tensiunii de comparatie (k_a) este proportionala cu tensiunea de calibrare a aparatului $U_{c\,max}$ si cu frecventa de repetitie a rampei $\left(f = \frac{1}{T} \right)$, de la calibrarea initiala. În acest fel, generatorul tensiunii liniar variabila U_c (pe care o putem numi si baza de timp) constituie o “memorie” (electrica) a aparatului, care pastreaza datele de calibrare din prima etapa a comparatiei succesive (adica pe k_α sau $U_{c\,max}$ si T).

În a doua etapa, adica la fiecare masurare, are loc o comparatie simultana între marimea X (convertita în tensiunea U_i) si tensiunea liniar variabila U_c;

durata t (de la fiecare "zero" al lui U_c pâna la coincidenta $U_c = U_i$) este o masura a marimii aplicate la intrarea traductorului aparatului, adica:

$$U_c = U_i \rightarrow k_\alpha t = k_t X \rightarrow t = \frac{k_t}{k_\alpha} X \text{ sau } X = \frac{k_t}{k_\alpha} t,$$

constantele k_t si k_α fiind cunoscute. Astfel s-a realizat conversiunea masurand (tensiunea U_i) $\rightarrow$ timp si prin masurarea numerica (digitala) a timpului (cu un numarator clasic, calibrat în unitatea de masura a masurandului) se obtine valoarea X. Pentru aceasta (v. fig. 1.4), aparatul mai are un generator de impulsuri (generator de tact), cu frecventa constanta f_t, caruia – printr-o poarta deschisa în intervalul t (de la $U_c = 0$ la $U_c = U_i$) – i se masoara ("numara") numarul N de impulsuri produse în acest interval (t), care sunt proportionale cu U_i (deci cu X), caci $N = tf_t = \frac{k_t}{k_\alpha} f_t X = kX.$

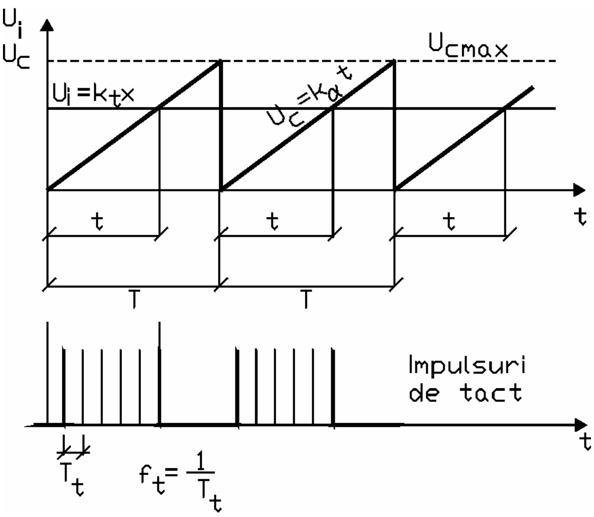


Fig. 1.4

1.2.3. Aparatul de masurat

Tehnica de masurare, cu ajutorul careia se efectueaza orice proces de masurare, contine pe lânga *metoda de masurare* (pe care am prezentat-o în paragraful precedent) si o a doua componenta : *mijlocul de masurare* – ca element "fizic" (de tip echipament) cu ajutorul caruia se aplica o metoda de masurare în scopul realizarii experimentului "masurare", care conduce la determinarea valorii masurandului analizat si "perceperea " (receptarea) ei de catre operator.

Mijlocul de masurare, pe care – indiferent de complexitatea lui – îl vom denumi la modul generic **aparat de masurat**, este “plasat” (în logica procesului de masurare) între obiectul sau procesul analizat (supus masurarii) si operatorul care executa masurarea în scopul cunoasterii valorilor unor anume marimi fizice, asa cum se arata în figura 1.5,*a*. Ca urmare, sub forma sa cea mai simpla (functional), un aparat de masurat poate fi considerat (mai ales în domeniul masurarilor electronice) ca un diport caruia la intrare i se aplica un semnal X (v. fig. 1.5,*b*) prelevat de la obiectul analizat si care reprezinta masurandul, iar la iesire furnizeaza un semnal Y (un raspuns) sub o forma ce poate fi perceputa de operator ca rezultat al masurarii.

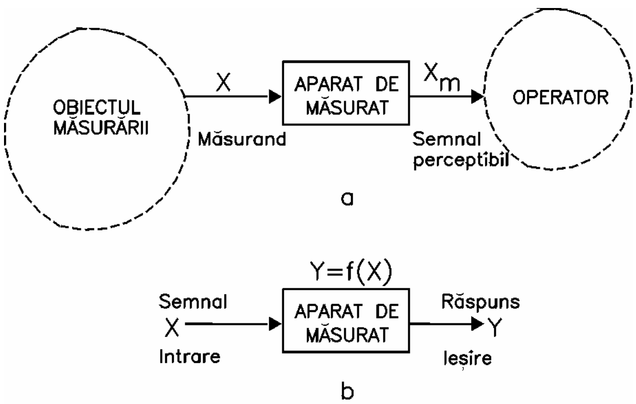


Fig. 1.5

În acest fel raspunsul Y (identic cu rezultatul masurarii – un real X_m – ce indica, cu o anumita unitate de masura u_m, masurandul) apare ca o functie de transfer a aparatului de masurat relativ la semnalul X:

$$Y = f(X) \text{ sau } X_m u_m = f(X)\,, \tag{1.21}$$

unde functia are o forma oarecare (de cele mai multe ori este însa liniara, acesta fiind cazul cel mai favorabil).

În general, sau mai bine zis în cazurile reale, raspunsul Y nu depinde numai de marimea de intrare (semnalul X), asa cum arata (1.21), ci si de alte marimi care influenteaza aparatul, fara a fi “utile” (adica supuse masurarii). Aceste marimi “perturbatoare” sunt denumite *marimi de influenta*; asa sunt marimile ce reprezinta influenta mediului asupra aparatului de masurat (ca: temperatura, presiunea, umiditatea, vibratiile s.a.), marimi perturbatoare electromagnetice (determinate de: câmpurile electrice, câmpurile magnetice, undele electromagnetice, semnalele transmise prin reteaua comuna de alimentare cu energie electrica etc.), precum si marimi proprii obiectului supus masurarii dar neutile din punctul de vedere al masurarii efectuate (ca, de exemplu, tensiunea în cvadratura în cazul voltmetrului de faza, tensiunea de mod comun în cazul unui voltmetru cu borne de intrare izolate fata de masa – tensiune de mod comun ce poate fi însa rejectata printr-un amplificator de intrare de calitate – v. cap 2 – s.m.a.). În afara marimilor de influenta, raspunsul (marimea de iesire a) aparatului mai depinde si de *comenzile* care au fost date aparatului de masurat, prin elementele de comanda cu care marea majoritate a aparatelor sunt dotate.

De aceea, o reprezentare mai completa a aparatelor de masurat este data de schema din figura 1.6.

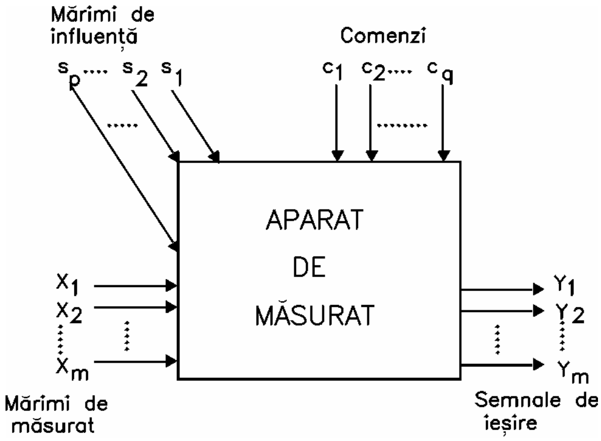


Fig. 1.6

În cazul unui aparat de masurat cu m marimi de iesire (v. fig. 1.6) si n marimi de masurare, supus unor p marimi de influenta ($s_1, s_2, ..., s_p$) si prevazut cu q comenzi ($c_1, c_2, ..., c_q$) diferite, pentru fiecare marime de iesire se poate scrie o expresie de forma:

$$Y_i = f(X_1, X_2, ..., X_n, s_1, s_2, ..., s_p, c_1.c_2, ..., c_q),\ i = 1,2,...,m.$$

Pentru anumite comenzi c_i, variatia marimii de iesire ΔY_i poate fi exprimata în functie de variatiile ΔX_i si Δs_i; astfel, daca aceste variatii sunt suficient de mici putem folosi regula diferentialei totale, rezultând:

$$\Delta Y_i = \frac{\partial f}{\partial X_1}\Delta X_1 + \frac{\partial f}{\partial X_2}\Delta X_2 + ... + \frac{\partial f}{\partial X_n}\Delta X_n + \frac{\partial f}{\partial s_1}\Delta s_1 + \frac{\partial f}{\partial s_2}\Delta s_2 + ... + \frac{\partial f}{\partial s_p}\Delta s_p,$$

$$i = 1,2,...,m$$

Aici derivatele partiale $\dfrac{\partial f}{\partial X_i}$, $i = 1,2,..,n$, reprezinta *sensibilitatile utile* ale aparatului de masurat, iar $\dfrac{\partial f}{\partial s_i}$, $i = 1,2,..., p$, sunt asa-numitele *sensibilitati parazite* ale aparatului. Sensibilitatile utile este bine sa fie cât mai mari, sa aiba valori precise si sa fie cât mai stabile în timp, deoarece ele determina în principal precizia aparatului si capacitatea lui de a masura fara alte influente valorile semnalelor de la intrare. Sensibilitatile parazite nu este necesar sa poata fi exact determinate, însa trebuie sa fie mici (sub anumite limite admise de clasa aparatului – v. subcap. 1.3), pentru ca rezultatul ΔY sa depinda practic numai de ΔX, fara a fi alterat de variatiile Δs ale marimilor de influenta.

Marimile de intrare ale aparatului de masurat sunt caracterizate de: natura fizica (specia) marimii (tensiuni electrice, curenti electrici, rezistente, capacitati, puteri, defazaje, frecvente etc.); intervalul de valori masurabile (valoarea minima, valoarea maxima – v. [8]) si variatia în timp (marimi constante, variabile periodic, forma de unda etc.). Mai ales în cazul masurarilor electronice, marimile de masurat sunt "aplicate" la **bornele de intrare** (bornele aparatului de masurat); un aparat – în functie de marimile pentru care este facut sa le masoare – are mai multe borne de intrare, fie datorita naturii marimii, fie datorita numarului de subdomenii (game) de valori masurabile. Astfel, pentru masurarea marimilor de grad 1 (tensiune, curent) aparatele sunt dotate cu doua borne de intrare; pentru masurarea marimilor de grad 2 (putere, energie, defazaje) aparatele au patru borne de intrare, iar pentru masurarea marimilor de grad 0 (rezistente, de exemplu) exista doua, trei sau patru borne de intrare (vezi subcap. 1.4, cap. 7, cap. 8 si cap. 12). Din punctul de vedere al izolatiei bornelor fata de masa (carcasa metalica) a aparatului de masurat, exista doua situatii: una din borne este conectata electric la masa aparatului, caz în care se zice ca aparatul are *intrare nesimetrica*; toate bornele de intrare sunt izolate fata de masa, caz în care ele se numesc *borne flotante* (aceasta este situatia cea mai frecvent întâlnita la aparatele electronice, deoarece intrarea simetrica face posibila diminuarea unor influente perturbatoare la interconectarea mai multor aparate). În foarte multe cazuri, la masurarile în înalta frecventa, este necesara ecranarea electrostatica completa a circuitelor de masurare, ceea ce se realizeaza prin conductoare si *borne coaxiale* (conectare coaxiala).

"Iesirile" Y ale aparatelor de masurat sunt semnale al caror "continut" este valoarea marimii masurate, dar care au diverse forme care depind de felul operatorului si modul cum acesta doreste sa interpreteze si sa "valorifice" rezultatele masurarii. În cazul unui **operator uman**, iesirile aparatului sunt semnale care sa poata fi percepute de simturile umane, deci semnale vizuale analogice (de tip ac indicator si scara gradata sau vizualizari luminoase pe ecranul unui tub catodic sau de tip indicator etc.) sau digitale (afisaj luminos alfanumeric) sau/si – mai rar – auditive. În cazul unui operator de tip masina (**sistem tehnic**) semnalele de iesire sunt de cele mai multe ori electrice (analogice sau digitale), capabile sa realizeze anumite comenzi sau prelucrari automate de date (vom reveni în paragraful urmator).

Comenzile (c – v. fig. 1.6) date aparatelor de masurat sunt de felul: alegerea functiunii în cazul aparatelor multiple (de exemplu: comutarea pe functia "frecventmetru" a unui numarator electronic universal); alegerea gamei de masurare (prin comutatoare de scara sau/si alegerea bornelor de intrare); calibrarea interna (la majoritatea ohmmetrelor); reglarea zeroului; echilibrarea (la compensatoare, punti etc.); repetarea masurarii s.a. Comenzile sunt, deci, de doua tipuri: pentru prelevarea ("introducerea") datelor si pentru manevrarea aparatelor (care, unele din ele, pot fi automatizate ca, de exemplu: echilibrarea puntilor automate – v. cap. 12 sau testarea echipamentelor electronice cu ajutorul calculatoarelor – v. cap. 15).

Structura aparatelor de masurat. Aparatul de masurat, conform celor aratate anterior (v. expresia 1.21 si figura 1.5), preleveaza masurandul (X) ce se aplica la intrare si îl transforma (eventual) într-un semnal care sa poata fi comparat cu marimea de calibrare de unde rezulta realul X_m, care – la rândul lui – este transformat într-un semnal Y, la iesirea aparatului, într-o forma perceptibila operatorului. Deci, trecerea de la masurandul (X), de la intrarea aparatului de masurat, la semnalul de iesire Y (care da valoarea masurandului) se realizeaza de obicei prin mai multe conversiuni succesive, în care intervin marimile intermediare $x_1, x_2,\ldots, x_n$:

$$x_1 = f_1(X),\ \ x_2 = f_2(x_1),\ldots,x_n = f_n(x_{n-1}) \text{ si } Y = f_{n+1}(x_n). \qquad (1.22)$$

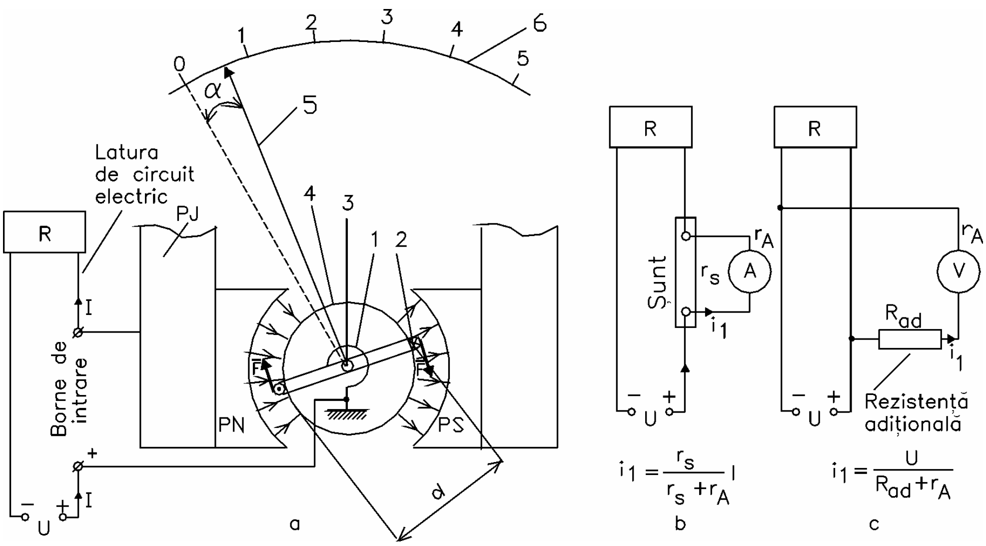


Fig. 1.7

Astfel, în cunoscutul aparat electric de masurat de tip magnetoelectric (redat schematic în figura 1.7,*a*), daca este folosit la masurarea intensitatii unui curent electric continuu (I) dintr-un circuit oarecare, curentul este “trecut” prin bornele ampermetrului legat în serie în latura de circuit în care vrem sa-l masuram pe I si de aici prin resorturile spirale plane *1* (v. fig. 1.7,*a*) este “introdus” în spirelele unei bobine mobile *2*. Aparatul are un prim convertor (electric-mecanic) format din bobina mobila *2* (cu N spire bobinate pe un cadru mobil, de lungime l si latime d, prins în doua lagare prin axele *3* exterioare cadrului) si un magnet permanent fix (format din potcoava – jug *PJ*, piesele polare *PN* si *PS* si miezul feromagnetic cilindric *4*), care – în întrefierul dintre piesele polare si miezul cilindric *4* – produce un câmp magnetic cu inductia magnetica B constanta în timp si situata pe directia radiara (normal pe piesele polare si suprafata miezului cilindric). Bobina mobila *2*, fiind montata în întrefier (în jurul piesei polare), are conductoarele, pe lungimea cadrului *l*, normale pe liniile de câmp magnetic ale lui *B*. Când bobina se afla sub curentul *I*, conductoarele ei vor fi supuse unei forte $F = N \cdot I \cdot l \cdot B$, deoarece conform expresiei fortei lui Laplace $\mathrm{d}\vec{F} = i(\mathrm{d}\vec{l} \times \vec{B})$ – care exprima efectul mecanic al câmpului electromagnetic – fiecare conductor al spirelor de pe cadru este supus unei forte $F = I \cdot l \cdot B$ (*B* fiind constant în lungul lui *l* si normal pe *l*) care actioneaza asupra cadrului perpendicular pe deschiderea lui *d*. Aceste forte produc un cuplu: $M = N \cdot B \cdot l \cdot I \cdot d = (NBld) \cdot I$ si cum *N, B, l, d* sunt niste constante constructive ($NBld = k_a$) rezulta ca echipajul mobil este supus unui cuplu direct proportional cu intensitatea *I* a curentului de masurat: $M = k_a \cdot I$. S-a realizat deci o prima conversie *I-M* (curent-cuplu) cu functia de conversie $M = k_a \cdot I$. Acest cuplu va determina rotirea bobinei cu un unghi α care, în acelasi timp, va "strânge" arcul elastic, spiral-plan *1*, determinând producerea de catre resort a unui cuplu rezistent $M_r = k_r \cdot \alpha$. La echilibru dinamic (a = constant) $M_r = M$, adica $k_r \alpha = k_a I$, ceea ce înseamna ca efectuarea comparatiei necesare în procesul masurarii nu se face între marimi de natura curent electric, ci între marimi mecanice (cupluri de forte). Cu ajutorul unui ac indicator 5 (fixat de axul cadrului mobil) si un cadran *6*, divizat în etapa de calibrare a aparatului în amperi, se face o a doua conversie marime mecanica-marime geometrica (cuplu-unghi): $\alpha = (k_a / k_r) I$ si, în final, printr-o noua conversie se obtine marimea de iesire *Y* sub forma *I* [în A] = a[în diviziuni] $\cdot (k_r / k_a)$[în A/div.], perceptibila vizual prin indicatia acului pe cadranul divizat în amperi (la calibrare) asa cum se arata în figura 1.7,*b*. Deoarece bobina mobila trebuie sa fie usoara si de mici dimensiuni (din motive constructive), firul conductor cu care se realizeaza bobina este foarte subtire si deci nu admite decât un curent mic (de ordinul mA). De aceea, în marea majoritate a cazurilor, bobina nu poate fi înseriata direct în latura curentului de masurat si se procedeaza la utilizarea unui sunt cu rezistenta foarte mica r_s prin care se face o conversie initiala: $i_1 = \frac{r_s}{r_s + r_A} I$ (r_A fiind rezistenta bobinei mobile) ce "reduce" curentul la i_1 admis de aparat.

Revenind la relatiile (1.22), marimile $x_1, x_2, \ldots, x_n$ pot fi marimi fizice de aceeasi natura sau de natura diferita, constante sau variabile în timp etc. Fiecare conversie are loc într-un dispozitiv aflat în structura aparatului numit – la modul generic – **convertor** (în particular, unele sunt *traductoare*, altele *transductoare*, precum si *operatori* etc.). La modul general, convertorul este un diport care atacat cu un semnal (o matrice de intrare **x**) da un raspuns (o matrice de iesire **y**) legate între ele printr-o functie de transfer $f: \mathbf{x} \to \mathbf{y}$ sau **y** = *f* (**x**), functie caracteristica unei anumite "transformari" $\mathbf{x} \to \mathbf{y}$ (astfel exista: convertoare de frecventa, convertoare de cod, connvertoare analog-digitale, convertoare digital-analoge, convertoare de adaptare, convertoare operationale sau operatori – de semn, proportionale, integratori, logaritmici etc., convertoare presiune-curent, convertoare mutator/c.c.-c.a. sau c.a.-c.c. etc.).

Convertoarele traductor sau **traductoarele** sunt convertoarele la care marimile de intrare si de iesire sunt de natura fizica diferita si au caracter de element sensibil (traductoare termoelectrice, traductoare piezoelectrice, traductoare magnetostrictive, traductoare tensometrice, traductoare parametrice la care intrarea este o marime neelectrica, iar iesirea un parametru de circuit: rezistenta, capacitate, inductivitate, etc.); traductoarele sunt – în general – convertoare de intrare (relativ la aparatele de masurat).

Transductoarele sunt convertoare de intrare de tip traductor cu element sensibil de prelevare si cu asigurarea puterii necesare efectuarii masurarii, adica niste traductoare active (de exemplu tahogeneratorul este un transductor de turatie).

În acest fel, un aparat de masurat poate fi privit ca un grup de convertoare (de intrare, intermediare si de iesire – v. fig. 1.7) cu diverse structuri. O structura frecvent întâlnita este *structura în cascada* (în *bucla deschisa*) aratata în figura 1.8; ea este întâlnita în special la aparatele de masurat ale marimilor de grad 1 (voltmetre, ampermetre). O alta structura este aceea cu *bucla închisa* cu un convertor cu functia de transfer $A = y/x_i$ (fig 1.9) "cuplat" cu un convertor de reactie având functia de transfer $\beta = x_r/y$. Aparatul va avea, atunci, functia de transfer:

$$\frac{y}{x} = \frac{y}{x_i - x_r} = \frac{y/x_i}{1 - x_r/x_i} = \frac{A}{1 - \frac{x_r}{x_i}\cdot\frac{y}{y}} = \frac{A}{1-\beta A} \text{ sau } y = \frac{1}{\frac{1}{A} - \beta}\cdot x .$$

Daca A este foarte mare, astfel ca $\beta >> \frac{1}{A}$, atunci $y = -\frac{1}{\beta}\cdot x$, caz în care functia de transfer a aparatului $\frac{y}{x} = -\frac{1}{\beta}$ depinde numai de proprietatile convertorului de reactie.

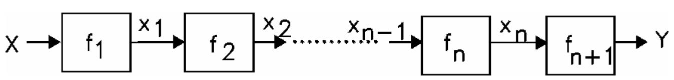


Fig. 1.8

Cele doua scheme structurale de baza, din figurile 1.8 si 1.9, sunt caracteristice aparatelor cu *conversie directa* (fig. 1.8) si *aparatelor cu compensare* sau aparatelor cu echilibrare (fig. 1.9) la care compensarea (echilibrarea) presupune si legatura inversa, de reglare a lui X_{ref} pentru obtinerea echilibrului.

La aparatele cu conversie directa fluxul informatic de masurare are un singur sens, de la intrare catre iesire. Sensibilitatea globala a aparatului este egala cu produsul sensibilitatilor elementelor componente, care "contribuie" însa fiecare si cu erorile lor proprii la eroarea aparatului. Spre exemplu, daca vom considera ampermetrul *A* cu suntul r_s din figura 1.7,*b*, care este un aparat cu conversie directa, în bucla deschisa de tipul reprezentat în figura 1.8, vom constata ca ampermetrul este format, în fond, din trei convertoare: unul de intrare (suntul) care este un convertor curent-curent de tip proportional, cu functia de transfer $i_1 = \frac{r_s}{r_s + r_A} \cdot I$ (v. fig. 1.7,*b*); un al doilea intermediar (bobina mobila cu magnetul permanent) care este un convertor curent-cuplu de forte cu functia de transfer $M = k_a \cdot i_1$; si un al treilea de iesire care este un convertor cuplu-unghi (indicatie perceptibila a acului pe cadran) cu functia de transfer $\alpha = \frac{1}{k_r} \cdot M$ (caci la a = const. exista echilibrul dinamic $M_r = M$). Rezulta ca functia de transfer a întregului lant $\alpha = f(I)$ este:

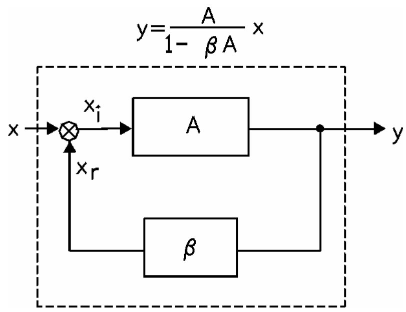


Fig. 1.9

$$\alpha = \frac{1}{k_r} \cdot M = \frac{1}{k_r} \cdot k_a \cdot i_1 = \frac{1}{k_r} \cdot k_a \cdot \frac{r_s}{r_s - r_A} \cdot I = \frac{k_a}{k_r} \cdot \frac{r_s}{r_s + r_A} \left[\frac{\text{diviziuni}}{A}\right] \cdot I \ [\text{în A}],$$

sensibilitatea $\frac{\alpha}{I}[\text{div./A}]$ fiind data deci de produsul $\frac{k_a r_s}{k_r(r_s + r_A)}$.

Daca aparatul magnetoelectric (v. fig. 1.7,*a*) este utilizat ca voltmetru, atunci la intrare se foloseste un convertor tensiune-curent sub forma unei rezistente aditionale R_{ad} (v. fig. 1.7,*c*) care introduce functia de transfer: $i_1 = \frac{1}{R_{ad} + r_A} \cdot U$, astfel ca sensibilitatea globala a voltmetrului va fi:

$$\frac{\alpha}{U} = \frac{k_a}{k_r(R_{ad} + r_A)} \left[\frac{\text{div}}{\text{V}}\right].$$

La aparatele cu compensare exista un dublu sens al informatiei, datorita conversiei directe prin elementul *A* (v. fig. 1.9) si conversiei inverse prin elementul β (pentru aceste aparate este caracteristica prezenta elementului β, care realizeaza o conversie a marimii de iesire din aparatul de masurat într-o marime de aceeasi natura cu marimea de intrare). Alte particularitati ale acestor aparate sunt: existenta în componenta lor a unei surse de referinta, consumul de putere redus la intrare s.a. Sensibilitatea si eroarea globale ale aparatului sunt determinate în principal de elementul de reactie β (practic nu depind de elementul *A*).

Categorii de aparate de masurat. Asa cum rezulta din modelul masurarii – v. expresiile (1.2) si (1.21) – rezultatul unei masurari este un **numar real** format, practic, dintr-un numar finit de cifre semnificative, numar ce este determinat de posibilitatile de prelucrare ale operatorului, de suportul tehnic de date, de precizia dorita (care este data de numarul de cifre de la partea fractionara), de unitatea de masura folosita si chiar de însusi masurandul. Oricum, un operator uman nu poate "lucra" eficient (fara erori suplimentare) cu valori exprimate cu mai mult de 7-12 cifre. Deci rezultatul masurarii variaza **discret**, din $k \cdot 10^{-n}$ (unde k = 0, 1, …, 9 si n este numarul de cifre zecimale de la partea fractionara a valorii masurate) în $k \cdot 10^{-n}$, ceea ce este în opozitie cu valoarea masurandului care – în cele mai multe cazuri – este de categorie analogica (cu variatie **continua**). Operatia aceasta de discretizare (de la X al masurandului la X_m al rezultatului masurarii) o face deci operatorul uman (în cazul aparatelor asa-zise analogice), dar o poate realiza aparatul însusi, prin modul de reprezentare a lui X_m (asa-zisele aparate digitale sau numerice).

Astfel, exista doua categorii de aparate de masurat (clasificate din punctul de vedere al felului cum este redata valoarea masurandului): analogice si digitale (numerice).

La aparatele analogice valoarea determinata prin masurare este redata sub forma unei marimi fizice variabile continuu (mai bine zis care poate lua orice valoare dintr-un interval – domeniu de masurare), ca – de exemplu – rotirea α a unui ac indicator în fata scarii gradate (v. fig. 1.7,*a*). Prin asa-zisa citire a aparatului analogic, operatorul uman apreciaza indicatia aparatului si o exprima sub forma unui numar, deci discret.

Aparatele digitale reprezinta valoarea masurata direct sub forma unui numar, printr-un disozitiv de afisare cu cifre zecimale (si eventual litere), de obicei un "display" (ecran luminos cu LED-uri, cristale lichide sau cu luminofor si spot de electroni baleiat) sau chiar – la aparatele mai vechi – cu un numarator mecanic cu transfer zecimal (ca la contoarele de energie electrica, debitmetre, indicatoare kilometrice de bord etc.).

Aparatele de masurat analogice au în structura lor numai elemente analogice, caracterizate prin variatia continua a marimilor de intrare si iesire. Ele sunt instrumente care realizeaza transferarea (conversia) masurandului într-o alta marime fizica, a carei valoare fizica sa poata fi perceputa de om (vizual sau – mai rar – sonor), dupa o functie de transfer ca aceea din figura 1.10,*a*. Aparatele de masurat digitale au în structura lor si elemente caracterizate prin variatia discontinua-discreta a marimilor.

Masurandul, dupa prelevare cu un element sensibil si convertire într-o marime fizica posibila de comparare, este *cuantificat* sau *esantionat*, adica "divizat" în trepte cu o anumita rezolutie (v. fig. 1.10,*b*). Numarul treptelor (obtinute prin cuantificare) sau impulsurilor (obtinute prin esantionare) da valoarea (numerica) a masurandului. Aceasta operatie este numita *conversia analog-digitala*. Semnalele digitale (trepte de tensiune si trenuri de impulsuri, zise si semnale de cod) sunt prelucrate (cu registre, decodoare, numaratoare etc. sau cu microprocesoare) pentru realizarea afisarii numerice a rezultatului obtinut prin masurare.

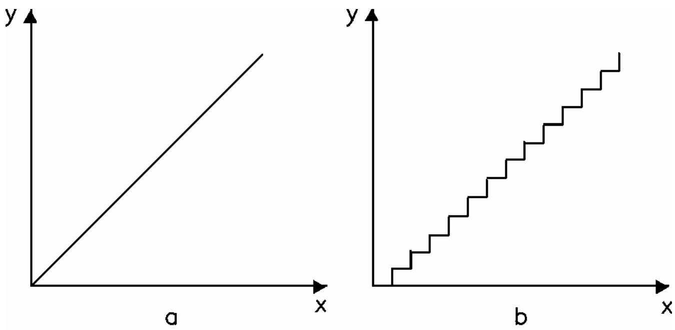


Fig.1.10

O comparatie în ceea ce priveste particularitatile aparatelor digitale si analogice si utilizarea lor de operatorul uman în procesul de masurare duce la urmatoarele concluzii:

– avantajele aparatelor de masurat digitale sunt date de proprietatile afisarii numerice a rezultatului si de performantele circuitelor electronice digitale, constând în: lipsa de ambiguitate a afisajului numeric (la indicatoarele analogice operatorul are, deseori, dificultati de apreciere a pozitiei acului indicator când acesta se afla între doua gradatii – diviziuni vecine), afisarea numerica este mai putin solicitanta (obositoare) pentru operator, permite cresterea rezolutiei (prin marirea numarului de cifre de la partea fractionara) si – astfel – are si o precizie ridicata;

– semnalele discrete pot fi “tratate” (transmise, modificate si prelucrate) cu precizie si siguranta mult mai mari decât semnalele analogice, au imunitate ridicata fata de perturbatii si pot fi accesate direct în calculatoarele automate (v. cap. 15);

– în cazul utilizarii lor în panouri de bord cu foarte multe aparate digitale, produc o oboseala accentuata a operatorului care este supus si unor radiatii termice suparatoare;

– aparatele analogice sunt net avantajoase în cazurile în care este necesara o evaluare rapida a valorii masurate si – în special – a tendintei de variatie a acesteia sau a “pozitiei” (situatiei) ei în anumite domenii de valori sau fata de anumite valori limita (de prag);

– indicatia analogica (chiar daca este sub forma luminoasa) este mult mai usor de utilizat în aparatele de echilibrare (de zero, de min/max etc.);

– aparatele digitale au nevoie, în plus, de o sursa proprie de alimentare, care – la aparatele portabile – este o pila electrica sau un acumulator electric (ce ridica unele probleme de stabilitate, exploatare si întretinere).

În ceea ce priveste structura acestor doua categorii de aparate de masurat (analogice si digitale) sunt de facut câteva remarci:

– în aparatele de masurat analogice, pentru tratarea semnalului de masurare se foloseste cel mai frecvent o *tensiune continua* ca marime fizica intermediara (fig. 1.11). Convertorul de intrare face conversia masurand$\rightarrow$tensiune continua, care apoi este amplificata (eventual atenuata), multiplicata, integrata sau supusa altor operatii diverse. Oricum, valoarea acestei tensiuni este proportionala cu masurandul;

– în aparatele de masurat digitale se foloseste ca marime fizica intermediara fie o *tensiune continua*, fie o *durata* (de timp) sau o *frecventa* (fig. 1.12). În cazul utilizarii tensiunii (fig 1.12,*a*), elementul intermediar este un asa-numit convertor de cod care genereaza un grup de impulsuri în corespondenta cu valoarea tensiunii continue, pe baza unui anumit cod. Datele pe care le reprezinta grupurile de impulsuri de cod sunt stocate într-un bloc de memorie cu registre si apoi convertite în cod zecimal pentru afisare. În cazul conversiei masurand-timp (fig. 1.12,*b*) sau masurand-frecventa (fig. 1.12,*c*), convertorul de intrare genereaza fie intervale de timp (durate) proportionale cu valoarea masurandului, fie un semnal periodic (cel mai adesea dreptunghiulare, impulsuri) cu frecventa proportionala cu masurandul. În ambele variante, un circuit poate permite trecerea unui numar de impulsuri proportional cu valoarea masurandului catre un numarator electronic si – mai departe – catre etajul de afisare.

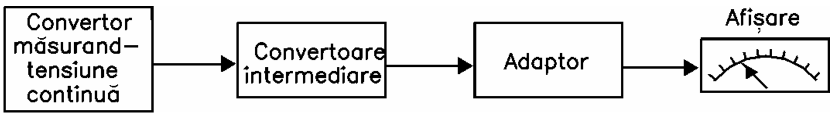


Fig. 1.11

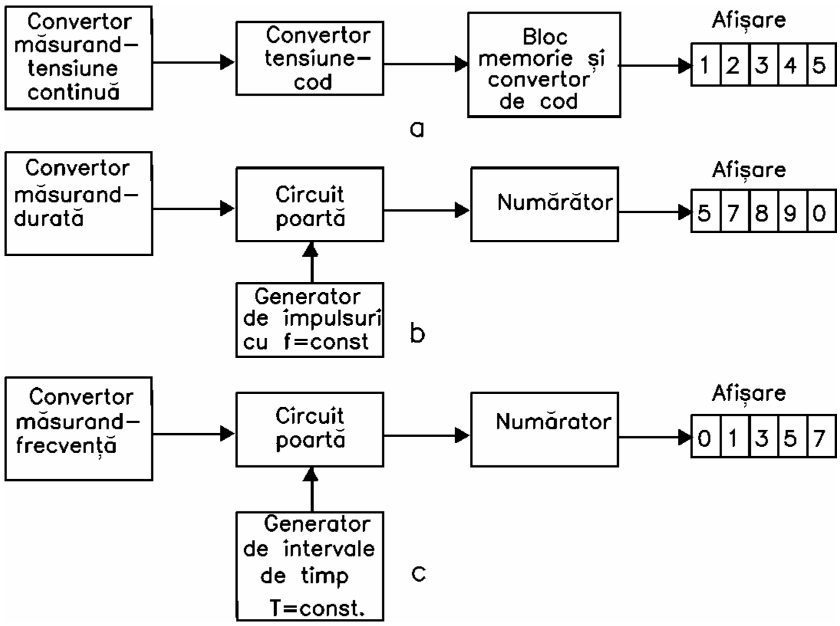


Fig. 1.12

În ceea ce priveste redarea (“afisarea”) rezultatului în cazul acestor doua categorii de aparate sunt de retinut urmatoarele:

– afisarea analogica este caracterizata prin lungimea scarii gradate (uneori unghiul de deviatie maxim α, care poate fi de la 30 la 300 de grade), finetea divizarii (numarul de diviziuni) si mobilitatea indicatorului, toate acestea determinând *rezolutia afisarii* (exprimata în numarul de pozitii distincte gradate ale indicatorului pe unitatea de lungime sau pe unitatea de unghi – de exemplu diviziuni/cm sau diviziuni/radian sau, înca, în puncte/trepte de masurare pentru întreg cadranul; astfel o rezolutie de 10^{-2} înseamna 100 puncte de masurare pe întreg cadranul);

– afisarea digitala este caracterizata prin numarul de cifre zecimale afisate si pozitia virgulei (acestea determinând magnitudinea sau valoarea maxima ce poate fi afisata, precizia rezultatului afisat sau rezolutia afisarii). Daca "display-ul" de fisare are *n* pozitii zecimale (în care se poate afisa una din cifrele 0, 1, …, 9) atunci magnitudinea este $10^n - 1$ si rezolutia este 10^{-n} (de exemplu, daca $n = 7$ si virgula este mobila, se pot afisa simultan 7 cifre zecimale, valoarea cea mai mare fiind 9 999 999 = $10^7 - 1$ sau cca. 10 milioane de unitati de masura adoptate (ceea ce se întâmpla când virgula este deplasata la extrema dreapta), iar precizia sau rezolutia maxima este atunci când virgula este la extrema stânga si are valoarea de 10^{-7} (adica 10 milioane de valori diferite afisate, deci 10 milioane de puncte de afisare). De aici rezulta si avantajul mare al aparatelor digitale fata de cele analogice în cazul în care sunt necesare masurari de mare precizie.

Caracteristicile metrologice ale aparatelor de masurat. Ele se refera la comportarea aparatelor de masurat în raport cu obiectul supus masurarii, cu mediul ambiant si cu operatorul uman si, cele mai importante, sunt:

- **intervalul de masurare** (sau *D* – domeniul de masurare) care se exprima prin limitele, minima si maxima, ale valorilor ce pot fi masurate cu un aparat dat. Deoarece valoarea minima masurabila este determinata de pragul de sensibilitate sau de rezolutia aparatului, atunci domeniul de masurare se împarte – la majoritatea aparatelor de laborator – în mai multe subdomenii, numite *game (scari) de masurare;*

- **rezolutia** reprezinta cea mai mica variatie a rezultatului masurarii care poate fi apreciata de operator pe dispozitivul de afisare de la iesirea aparatului de masurat si se exprima în diferenta δ dintre doua numere consecutive ce pot fi percepute la afisaj (daca aparatul este analogic cu afisaj cu ac si scara gradata, δ este diferenta dintre doua diviziuni vecine sau chiar o fractiune din aceasta, $\frac{1}{2}$ sau $\frac{1}{3}$, cât poate distinge operatorul; daca aparatul digital are afisaj numeric, δ este egal cu o cifra a rangului cel mai putin semnificativ). De cele mai multe ori rezolutia se exprima în unitati de masura ale masurandului (de exemplu: δ_v în μV sau δ_I în mA sau δ_R în mΩ etc.);

– **sensibilitatea** (*S*) este raportul dintre variatia ΔY a marimii de iesire si variatia corespunzatoare ΔX a marimii de intrare: $\Delta Y / \Delta X = S$ (sensibilitatea globala sau medie) sau local d*y*/d*x* = *S*. La aparatele analogice ΔY poate fi un unghi de rotatie α (afisaj cu ac) sau o deplasare *d* (deviatia spotului unui tub catodic) si atunci sensibilitatea se exprima (de exemplu la masurarea unei tensiuni) în: $S_u = \frac{\alpha}{U} \cdot \left[\frac{\text{grad}}{\text{V}}\right]$ sau $S_u = \frac{\alpha}{U}\left[\frac{\text{diviziuni}}{\text{V}}\right]$ sau $S_u = \frac{d}{U}\left[\frac{\text{m}}{\text{V}}\right]$ la un osciloscop etc. Daca aparatul de masurat are scara liniara pe întreg domeniul D (cazul aparatelor de tip magnetoelectric – v. fig. 1.7,*a*), sensibilitatea este constanta: $S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \frac{y}{x}$. În cazul aparatelor care masoara marimi variabile în timp (de exemplu: osciloscopul catodic), sensibilitatea este si ea o marime variabila în timp, se numeste *sensibilitatea dinamica* si se noteaza cu S_d (de exemplu, la un osciloscop catodic – vezi cap. 5 – pentru vizualizarea unui semnal sinusoidal cu pulsatia ω rezulta $S_d = \sin\frac{\omega\tau}{2} / \frac{\omega\tau}{2}$, unde τ este asa-numitul *timp de zbor*, adica timpul în care fasciculul de electroni parcurge lungimea placilor de deviatie);

– **sensibilitatea relativa** (S_r) se defineste numai pentru aparatele cu marimi de iesire electrica sau la convertoarele (traductoarele) utilizate la masurari: $S_r = \frac{\mathrm{d}y / y}{\mathrm{d}x / x}$;

– **constanta aparatului** (K) se defineste numai pentru aparatele de masurat la care sensibilitatea nu depinde de marimea de intrare X (de exemplu la aparatele analogice cu scara liniara de tip magnetoelectric). În acest caz $K = \frac{1}{S} = \frac{X}{Y}$ [în unitatea de masura pe unitate de indicatie, ca – de exemplu – V/diviziune sau V/m etc.];

– **prag de sensibilitate** (δS) prin care se întelege cea mai mica variatie a masurandului ce poate fi pusa în evidenta cu ajutorul aparatului de masurat, în conditii reale de functionare a lui. Acest parametru determina: precizia maxima pe care o poate avea un aparat de masurat si valoarea minima masurabila a masurandului. El depinde, în principal, de: rezolutia aparatului de masurat, de perturbatiile (proprii si exterioare aparatului) si de sensibilitatea indicatorului de nul (la aparatele care folosesc la masurare metodele de zero);

– **factorul de zgomot** (F) defineste influenta zgomotului (propriu interior) si se calculeaza cu relatia F = puterea totala de zgomot/puterea de zgomot propriu = $= \frac{P_{zg} + P_{zgi}}{P_{zg}} = 1 + \frac{P_{zgi}}{P_{zg}}$, în care P_{zg} este puterea de zgomot propriu (a aparatului) si P_{zgi} este puterea de zgomot instrumental (datorat unor perturbatii exterioare aparatului). Acest factor F este cel care limiteaza inferior pragul de sensibilitate al unui aparat (limita sub care nu poate scadea). De exemplu, zgomotul propriu cel mai frecvent (mai ales la aparatele electronice) este *zgomotul de agitatie termica* care se determina cu formula lui Nyquist:

$$U_{zg} = (4KTR\Delta f)^{1/2} \text{ sau } I_{zg} = (4K\frac{T}{R}\Delta f)^{1/2},$$

în care: U_{zg} este valoarea efectiva a tensiunii echivalente de zgomot; I_{zg} – valoarea efectiva a curentului echivalent de zgomot; $K = 1{,}38 \cdot 10^{-23} [\mathrm{J/K}]$ – constanta lui

Boltzman; T – temperatura absoluta [în K]; R – rezistenta sursei de zgomot si Δf – largimea benzii de frecventa în care se face masurarea. Din cele doua formule anterioare rezulta: $P_{zg} = U_{zg} \cdot I_{zg} = KT\Delta f = A \cdot \Delta f$, unde constanta A se calculeaza pentru T = 300 K si este $A = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 0{,}414 \cdot 10^{-20}$ [J]. Banda de frecventa a aparatului se considera a fi: $\Delta f \approx 0{,}35 / T_c$, unde T_c este durata de crestere a marimii de iesire a aparatului la aplicarea unui semnal treapta la intrare (de la 0,1 la 0,9 din valoarea finala) astfel ca, la un aparat cu regim dinamic optimizat (exponential) durata unei masurari este $t_m = 3T_c \approx \dfrac{1}{\Delta f}$. În acest fel, $P_{zg} = A \cdot \Delta f = \dfrac{A}{t_m}$. Factorul de zgomot este o caracteristica importanta a aparatelor de masurat la care se cauta realizarea unui prag de sensibilitate optim. El arata de câte ori este mai mare zgomotul aparatului real fata de zgomotul unui aparat ideal (la care $P_{zg} = 0$). Aparatele de calitate, apte sa masoare marimi mici, au un factor de zgomot $F \to 1$;

– **precizia instrumentala** este calitatea aparatului de a da rezultate cât mai apropiate de valoarea adevarata a masurandului si ea se exprima printr-un numar numit **clasa de precizie** a aparatului (sau, pe scurt, *clasa aparatului*) care se determina în functie de asa-numita *eroare tolerata*, asa cum se va arata în subcapitolul 1.3;

– **comportarea dinamica a aparatului** este o caracteristica ce intervine în cazul în care masurandul are variatii alternative cu frecvente mari sau când variaza rapid în timp. În domeniul frecventei, comportarea dinamica a aparatului este descrisa de asa-numita *caracteristica de frecventa complexa*, pentru masuranzii de forma sinusoidala (sau pentru armonicele componente), care reprezinta raspunsul y al aparatului la un semnal x sinusoidal:

$$A(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{Y_m e^{j\omega t} e^{j\varphi}}{X_m e^{j\omega t} e^{j\omega t}} = \frac{Y_m}{X_m} \cdot e^{j\omega}, \tag{1.23}$$

daca marimea de intrare în aparat (masurandul) este: $x = X_m \sin \omega t \triangleq X(j\omega) = X_m e^{j\omega}$ si marimea indicata de aparat (la iesire) este: $y = Y_m \sin(\omega t + \varphi) \triangleq Y(j\omega) = Y_m e^{j\omega t} e^{j\varphi}$, aparatul fiind deci liniar. Modulul functiei $A(j\omega)$, adica:

$$|A(j\omega)| = \frac{Y_m}{X_m}, \tag{1.24}$$

care – la un aparat ideal ar trebui sa fie constanta ($Y_m / X_m = \text{const.}$) – variaza totusi cu frecventa $Y_m / X_m = f(\omega)$, se numeste *caracteristica de amplitudine* si arata – în principiu – asa ca în figura 1.13,*a*, pe care se defineste si largimea de banda B la – 3 dB, iar argumentul functiei $A(j\omega)$, adica:

$$\arg[A(j\omega)] = \varphi,$$

care la un aparat ideal este constant (f = const.), variaza în functie de frecventa $\varphi = \varphi(\omega)$ si se numeste *caracteristica de faza a aparatului* (un exemplu este dat în figura 1.13,*b*.

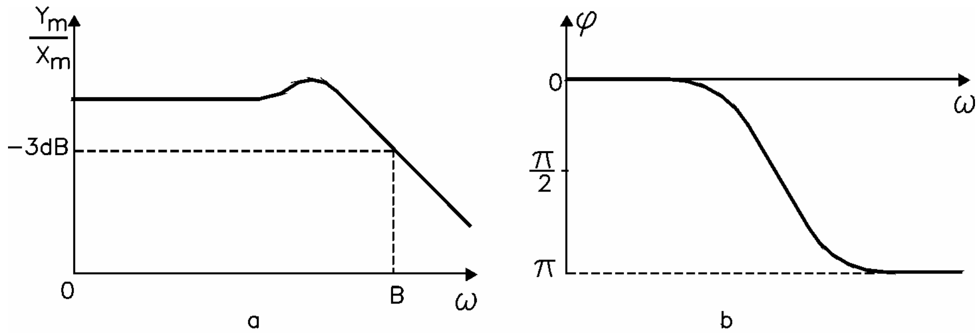


Fig. 1.13

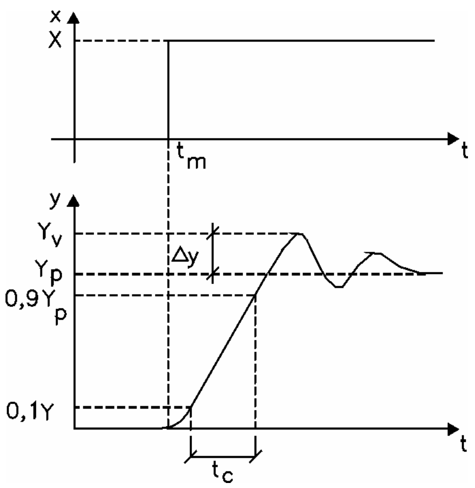


Fig. 1.14

În domeniul timp, comportarea aparatului se apreciaza prin *raspunsul* sau $y(t)$ *la un semnal de treapta* $x = X =$ = constant pentru $t \geq t_m$ si $x = 0$ pentru $t \leq t_m$ care – în general – arata asa ca în figura 1.14 si care permite determinarea urmatorilor parametri: timpul de crestere t_c, definit ca fiind intervalul de timp între punctele 0,1 si 0,9 din valoarea de regim permanent Y_p si *supracresterea* $\Delta y / y = (y_v - y_p)/y_p$. Daca se testeaza aparatul cu un semnal rampa: $x(t) = kt$, atunci se poate determina si un alt parametru: *timpul de întârziere* t_i (asa ca în figura 1.15);

– **puterea consumata de aparat** reprezinta puterea absorbita de instrument de la obiectul supus masurarii în cursul procesului de masurare. Notiunea de putere consumata de aparat are sens numai în cazurile în care masurandul este de grad 1 sau de grad 2 (tensiuni, curenti, puteri electrice, frecvente etc.), deoarece în cazul masurarii unei marimi de grad 0 (rezistenta, capacitate, inductivitate etc.) puterea necesara masurarii este furnizata de o sursa suplimentara (de activare). Pentru ca aparatul sa nu influenteze obiectul supus masurarii trebuie ca puterea consumata de aparat sa fie foarte mica (cam de ordinul 10^{-4} din puterea totala a sistemului);

– **supraîncarcabilitatea** reprezinta capacitatea aparatului de a suporta o valoare de intrare mai mare decât valoarea maxima de regim permanent, pe o anumita durata ("scurta" sau "lunga" – ce se precizeaza), fara ca parametrii de functionare ai instrumentului sa se modifice;

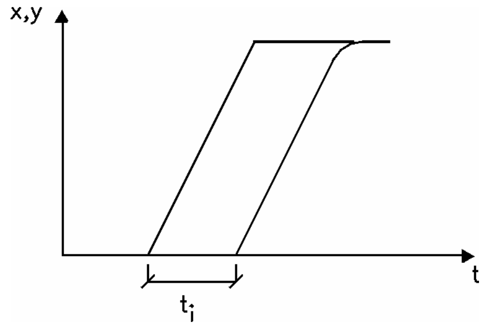


Fig. 1.15

– **fiabilitatea metrologica** este data de catre durata de timp (pe termen lung) în care aparatul functioneaza stabil (adica încadrat în limitele parametrilor de performanta, în special clasa de precizie).

1.2.4. Operatorul

Configuratia unui aparat de masurat , metoda de masurare adoptata si însasi modul cum se elaboreaza un proces de masurare mai depinde, în afara de natura marimii impuse masurarii, si de **destinatarul** procesului de masurare (care receptioneaza datele referitoare la valoarea marimii masurate *X*, adica marimea de iesire Y sau X_m – v. relatia 1.21).

Destinatarul masurarii poate fi:

– un **operator-om** (observator uman) care, prin organele sale de perceptie (vizuale sau/si auditive) preia valoarea Y (sau X_m) si o interpreteaza (o transforma în **informatie**), ceea ce îi permite apoi sa ia anumite decizii privind "conducerea" obiectului (echipament sau proces) asupra caruia s-au facut masurarile;

– un **operator-masina** ca, de exemplu: regulatorul unui dispozitiv de automatizare, microprocesorul unui sistem automat, calculatorul unui sistem de monitorizare, un sistem de tip inteligent etc.

Pe baza celor aratate pâna aici, se poate întelege de ce schema generala a procesului de masurare arata asa ca în figura 1.16.

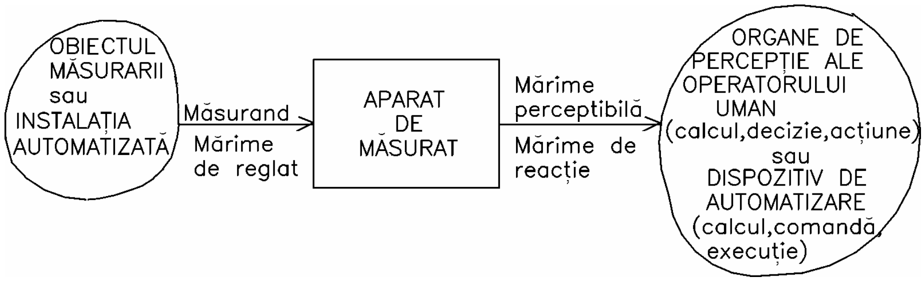


Fig. 1.16

În cazul în care procesul de masurare este supervizat de un operator uman, acesta trebuie sa îndeplineasca anumite conditii de pregatire în domeniul metrologiei si al ramurii tehnice (tehnologice) la care se refera masurarea, sa cunoasca perfect mijloacele si metodele de masurare pe care le manipuleaza si sa aiba si un anumit nivel (minim) de calitati fizice (de perceptie), psihice (de atentie) si de asiduitate.

În cazul operatorului-masina, aparatul de masurat trebuie (prin "iesirile" sale) sa fie adaptat intrarilor în sistemul care va prelua aceste iesiri (ca natura fizica, categorie a semnalelor/analogice sau numerice, cod, putere, nivel etc.), ceea ce se realizeaza cu o **interfata** (de tip logistic) corespunzatoare (v. cap. 15).

1.2.5. Prelucrarea datelor experimentale

Metrologia, urmarind determinarea cât mai exacta (precisa) a marimilor masurate, studiaza cauzele de aparitie a erorilor sistematice de masurare (v. subcap. 1.3), metodele de prevenire si reducere a erorilor la valorile minime acceptabile, evalueaza – prin calcule sau experimental – erorile sistematice inevitabile stabilind corectiile necesare (v. subcap. 1.3), analizeaza statistic rezultatele masurarilor în care apar erori aleatoare (v. [6] si [8]), indicând conditiile în care masurarile pot da cea mai mare precizie, urmareste modul cum se propaga erorile în cadrul unui lant de masurari si elaboreaza modele si algoritmii de prelucrare si interpretare a rezultatelor determinate experimental, prin masurari.

Nu se va insista aici asupra acestui segment important al procesului de masurare deoarece – pentru acest domeniu – este prevazut în programa specializarii "Electronica aplicata" (în anul IV de studii) un curs anume, intitulat chiar "Prelucrarea datelor experimentale".

1.3. ERORI DE MASURARE

Din numeroase cauze, dintre care unele vor fi aratate ceva mai încolo, rezultatul X_m al oricarei masurari, fara exceptie, difera de valoarea adevarata (care nu se cunoaste) X a marimii studiate. Diferenta aceasta dintre valoarea obtinuta prin masurare si valoarea sa adevarata poarta numele generic de **eroare de masurare** .

1.3.1. Câteva definitii

În studiile de metrologie se definesc mai multe tipuri de erori.

Erori absolute. Se folosesc mai multe notiuni în legatura cu acest fel de eroare:

– **eroare reala** a unei masurari este definita prin diferenta ΔX_i dintre valorile X_{m_i} obtinute printr-un sir de n masurari efectuate cu aceeasi tehnica de masurare (mijloc, metoda si operator) si valoarea adevarata (necunoscuta) a marimii:

$$\Delta X_i = X_{m_i} - X,\ \ i = 1, 2, \dots, n; \tag{1.25}$$

– **corectia** unei masurari, dintr-un sir de n determinari a valorilor X_{m_i}, se defineste ca fiind valoarea C_i egala si de semn contrar cu eroarea reala ΔX_i, adica:

$$C_i = -\Delta X_i,\ \ i = 1, 2, \dots, n. \tag{1.26}$$

Daca în anumite cazuri (asa cum se va vedea într-un exemplu prezentat mai târziu) se poate determina aceasta corectie, atunci valoarea marimii masurate (într-o încercare oarecare) este – conform definitiilor (1.25) si (1.26): $X = X_m + C_i$;

– **eroarea conventionala** comisa într-o masurare (individuala) se defineste prin diferenta între valoarea masurata si o valoarea asa-zisa de referinta (sau etalon) X_e, admisa pentru marimea analizata:

$$(\Delta X)_{conv.} \overset{D}{=} X_m - X_e. \tag{1.27}$$

Deoarece eroarea reala nu poate fi determinata (pentru ca valoarea X este necunoscuta, caci altminteri nu am mai masura-o!), în calculele practice se utilizeaza ca eroare de masurare numai eroarea conventionala. În fapt, valoarea adevarata X a unei marimi nu poate fi deci cunoscuta si de aceea se adopta o alta valoare reprezentativa, numita de referinta X_e, care are – prin urmare – un caracter conventional. Valoarea de referinta X se deduce fie utilizând aparate si metode de masurat mai perfectionate decât în cazul masurarii considerate, fie utilizând (asa cum se va arata imediat) o valoare medie a mai multor determinari ale aceleiasi marimi;

– **eroarea medie aritmetica**, notata cu δX pentru un sir de n masurari efectuate cu utilizarea aceleiasi tehnici de masurat, se defineste prin media erorilor reale, adica:

$$\delta X \overset{D}{=} \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta X_i}{n}, \tag{1.28}$$

caci – daca se însumeaza egalitatile (1.25), privind erorile reale, se obtine:

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i = \sum_{i=1}^{n} \left(X_{m_i} - X\right) = \sum_{i=1}^{n} X_{m_i} - nX,$$

de unde:

$$X = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_{m_i}}{n} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i, \tag{1.29}$$

$\sum_{i=1}^{n} \frac{X_{m_i}}{n}$ reprezentând *media aritmetica* a valorilor X_{m_i} sau *valoarea medie a sirului* de n încercari. Aceasta înseamna ca valoarea de referinta X s-a convenit a fi valoarea medie a sirului. Din relatiile (1.28) si (1.29), rescrise sub forma :

$$X = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} X_{m_i} - \sum_{i=1}^{n} \Delta X_i\right) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i, \tag{1.30}$$

se vede ca valoarea medie a erorilor, adica ultimul membru al egalitatii (1.30), poate fi numita si *eroarea mediei aritmetice*, deoarece aceasta reprezinta diferenta dintre media aritmetica a celor n încercari X_{m_i} si valoarea adevarata:

$$\delta X = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta X_i}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_{m_i}}{n} - X ,$$

asa cum rezulta din (1.29). Reiese de aici ca atunci când n creste foarte mult, δX tinde spre zero, iar $\sum_{i=1}^{n} \frac{X_{m_i}}{n}$ spre valoarea adevarata X, ceea ce duce la concluzia practica : obtinerea unui rezultat al masurarii cât mai bun se face printr-un cât mai mare numar de determinari. În cazul erorilor accidentale independente, media aritmetica va fi foarte aproape de valoarea adevarata prin "jocul" compensarilor. De altfel, media aritmetica – asa cum arata calculul probabilitatilor (ca si experienta) – este cea mai buna valoare care poate fi considerata ca valoare adevarata si aceasta cu atât mai exact cu cât numarul determinarilor este mai mare. Astfel, se poate arata ca $\sum_{i=1}^{n} \frac{X_{m_i}}{n}$ reprezinta valoarea care face ca suma patratelor erorilor sa fie minima (conform metodei celor mai mici patrate din teoria matematica a aproximarii functiilor). Fie X_{m_i} valorile individuale a n masurari; se considera functia:

$$S(X) = \sum_{i=1}^{n} \left(X_{m_i} - X\right)^2,$$

care, prin derivari în raport cu variabila X, da:

$$\frac{\mathrm{d}S(X)}{\mathrm{d}X} = -2n\sum_{i=1}^{n} \left(X_{m_i} - X\right) \quad \text{si} \quad \frac{\mathrm{d}^2 S(X)}{\mathrm{d}X^2} = 2n^2 .$$

De aici rezulta ca functia $S(X)$ este minima pentru acel X_0 care face ca $\frac{\mathrm{d}S(X)}{\mathrm{d}X} = 0$; adica:

$$-2n\sum_{i=1}^{n} \left(X_{m_i} - X_0\right) = 0 ,$$

sau

$$\sum_{i=1}^{n}\left(X_{m_i}-X_0\right)=0\,,$$

sau

$$\left(\sum_{i=1}^{n}X_{m_i}\right)-nX_0=0\,,$$

care implica:

$$X_0=\sum_{i=1}^{n}\frac{X_{m_i}}{n}\ \text{ si }\ \delta x=0\,.$$

A rezultat ceea ce s-a afirmat anterior: cu cât numarul n al masurarilor aceleiasi valori necunoscute X, cu aceeasi tehnica de masurat, este mai mare cu atât $\delta X \to 0$ si $\sum\frac{X_m}{n}\to X$;

– **eroarea medie**, notata cu θX, se considera – prin definitie, ca fiind valoarea absoluta a erorii medii aritmetice :

$$\theta X \overset{D}{=} \left|\delta X\right| = \sum_{i=1}^{n}\frac{\left|\Delta X_i\right|}{n}\,,$$

care – datorita faptului ca într-un sir de n masurari este posibil ca sa fie si erori ΔX_i cu semnul minus – rezulta ca este mai mare decât eroarea medie aritmetica δX, mai precis:

$$\theta X \ge \delta X\,;$$

– **eroarea medie patratica**, notata cu σX, este o notiune introdusa prin aplicarea calculului probabilitatilor la modelarea erorilor de masurare, se defineste prin:

$$\sigma X = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta X^2{}_i}{n}} \tag{1.31}$$

si permite sa se aprecieze precizia fiecarei masurari i în parte din întregul sir de n masurari, prin diferenta $\sigma X-\Delta X_i$ $\left(i=1,2,\ldots,n\right)$. Pentru ca întregul sir de masurari sa duca la o precizie maxima, trebuie ca $\sum_{i=1}^{n}\left(\sigma X - X_i\right)=\min$. (conform metodei celor mai mici patrate). Între eroarea medie θX si eroarea medie patratica σX a unui sir de valori masurate $X_i\left(i=1,2,\ldots,n\right)$ exista legatura:

$$\theta X=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma X\approx 0{,}8\sigma X \quad \text{sau} \quad \sigma X=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\theta X\approx 1{,}25\theta X\,;$$

– **eroarea probabila** este tot o notiune folosita în analiza erorilor prin aplicarea statisticii matematice, cu ajutorul careia se determina o asa-zisa eroare accidentala ρX fata de care numarul erorilor de valoare mai mica este egal cu numarul erorilor de valoare mai mare. Se poate arata, prin metodele statisticii, ca:

$$\rho X = \frac{2}{3}\sigma X\ ;$$

– **pragul de siguranta** este un termen folosit tot în aplicarea calculului probabilitatilor pentru analiza erorilor. Astfel, din teoria erorilor rezulta ca eroarea întâmplatoare ΔX_i, a unei masurari individuale i, care nu depaseste triplul erorii medii patratice σX este o eroare limita superioara $\Delta X_{\lim} = 3\sigma X$ (v. fig. 1.18). Atunci, probabilitatea ca eroarea reala ΔX_i sa nu fie mai mare decât $\Delta X_{\lim}$ este de 0,9973; acestei valori i se da numele de *prag de siguranta*.

Erorile definite pâna aici sunt, toate, erori absolute în sensul ca sunt o simpla diferenta (neraportata) între o valoare X_{m_i}, determinata printr-o masurare individuala a masurandului, si valoarea sa adevarata X sau – mai adesea – o valoare de referinta aleasa conventional, în diverse moduri (ceea ce a determinat si diverse feluri de erori conventionale). Erorile absolute au dimensiunea marimii fizice la care se refera si se evalueaza în unitatea de masura a acelei marimi. Eroarea reala nu poate fi determinata exact, deoarece nu cunoastem valoarea adevarata a marimii X; ea poate fi numai apreciata prin modele probabilistice, în vederea analizarii calitative a unui procedeu sau aparat de masurat. Eroarea conventionala, care în fond aproximeaza eroarea reala, poate fi determinata cantitativ. În majoritatea cazurilor, calculele se efectueaza cu valorile conventional alese ale mediei aritmetice, deoarece ea reprezinta valoarea cea mai apropiata de valoarea adevarata (mai ales daca numarul n de determinari este mare).

Erori relative. Se definesc, prin raportarea erorilor absolute la valori ale marimii masurate, urmatoarele notiuni:

– **eroarea relativa reala**, notata cu ε_x, este raportul:

$$\varepsilon_{x_i} \overset{D}{=} \frac{\Delta X_i}{X} = \frac{X_{m_i} - X}{X},\ i = 1, 2, ..., n \tag{1.32}$$

dintre eroarea (absoluta) reala ΔX si valoarea adevarata X (necunoscuta) a marimii supuse masurarii;

– **eroarea relativa conventionala**, $(\varepsilon_x)_{conv.}$, este raportul:

$$(\varepsilon_x)_{conv.} \overset{D}{=} \frac{(\Delta X)_{conv.}}{X_e} = \frac{X_m - X_e}{X_e} \tag{1.33}$$

dintre eroarea absoluta conventionala $(\Delta X)_{conv.}$ si o valoare de referinta (etalon) X_e aleasa conventional pentru marimea care a fost masurata.

Erorile relative (numite asa pentru ca exprima cât este eroarea unei masurari în raport cu valoarea marimii masurate) sunt numere adimensionale subunitare, asa cum rezulta din definitiile (1.32) si (1.33). Daca aceste ultime doua relatii au membrul din dreapta înmultit cu 100, atunci eroarea relativa este exprimata în procente $(\%)$.

Eroarea relativa da indicatii mult mai relevante cu privire la *precizia* cu care s-a facut o masurare decât eroarea absoluta. De fapt, o eroare absoluta nici nu poate da indicatii cu privire la calitatea masurarii (adica a preciziei), ea indicând însa corectia C_i – v. (1.26) – pe care adaugând-o unui rezultat X_{m_i} al unei masurari îl facem sa reprezinte valoarea exacta X a masurandului. De exemplu, la masurarea unei rezistente, o eroare absoluta de 0,1 Ω nu “spune”, în sine, nimic despre calitatea masurarii (în afara de faptul ca valoarea corectiei este de – 0,1 Ω); daca rezistenta masurata este de ordinul a 10 kΩ, eroarea relativa este $\varepsilon_r = (0{,}1/10\,000)100 = 0{,}001\%$ (ceea ce înseamna o precizie extrem de buna), dar daca ea are 0,5 Ω, eroarea relativa este ε_R = (0,1/0,5)100 = 20% (ceea ce indica o precizie foarte slaba a masurarii efectuate).

Clasa de precizie. Este o notiune care exprima calitatea unei metode de masurare sau/si a unui aparat de masurat anume, utilizate în procesul de masurare. Clasa de precizie, care se noteaza uneori cu c, se defineste în special pentru mijloacele de masurat (masura, etalon, convertor, instrument, dispozitiv, aparat etc.).

Clasa de precizie, c, se defineste prin raportul dintre *eroarea maxima admisibila* – numita *eroarea limita de clasa*, $(\Delta X)_{max}$, si valoarea maxima care se poate masura cu aparatul (sau prin metoda) considerata, multiplicat cu 100 (în procente):

$$c = \frac{(\Delta X)_{max}}{X_{max}} \cdot 100\,. \tag{1.34}$$

Aici eroarea maxima admisibila (numita si eroare tolerata sau, mai bine, **eroare limitata de clasa**), $(\Delta X)_{max}$, este cea mai mare eroare absoluta ce poate fi produsa de acel aparat (sau cu acea metoda), o eroare mai mare nefiind posibil sa se produca cu aparatul sau metoda în cauza.

De aceea, cu ajutorul erorii limita de clasa, care – în fond – exprima **gradul de incertitudine al unei masurari**, se poate preciza asa-numitul *interval de încredere* al marimii fizice studiate X în functie de rezultatul masurarii X_m si a erorii limita de clasa $(\Delta X)_{max}$ a aparatului (metodei) utilizate:

$$X_m - (\Delta X)_{max} < X < X_m + (\Delta X)_{max}\,. \tag{1.35}$$

În functie de clasa de precizie c (indicata pe aparat) se poate determina valoarea erorii maxime admisibile (mai bine zis posibila a fi produsa cu aparatul considerat):

$$(\Delta X)_{max} = \frac{c}{100} \cdot X_{max}\,, \tag{1.36}$$

care , în clasa c data, nu poate fi depasita, adica orice masurare efectuata cu un aparat (metoda) de clasa c nu poate avea o eroare absoluta de masurare mai mare decât eroarea limita de clasa:

$$[\Delta X \cup (\Delta X)_{conv.}] \leq (\Delta X)_{max}.$$

Metrologia, pentru a impune încadrarea unei masurari în anumite limite de precizie corespunzator scopului efectuarii ei, standardizeaza clasele de precizie. Iata câteva exemple cu **clasele de precizie standardizate** ale unor mijloace de precizie:

– la aparatele analogice de masurat: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 si 5 (un aparat care da o eroare mai mare decât $5X_{max}/100$ nu mai poate fi considerat aparat de masurat). Eroarea limita de clasa (raportata tolerata) este deci: $\pm 0{,}1\%$, $\pm 0{,}2\%$, $\pm 0{,}5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 1{,}5\%$, $\pm 2{,}5\%$ sau – cel mult – $\pm 5\%$;

– la puntile de masurat (simple si duble): 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5 si 10;

– la compensatoarele de curent continuu: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05 si 0,1.

Deci clasa de precizie a unui aparat (metoda) de masurat se determina raportând eroarea de masurare absoluta cea mai mare produsa de aparat (metoda) la valoarea maxima a scalei, înmultita cu o suta si majorata, apoi, la valoarea cea mai mare imediat apropriata din lista cu clasele standardizate.

Eroarea relativa comisa la masurarea unei anumite marimi X diferita de X_{max} ($X < X_{max}$) rezulta din relatia:

$$\varepsilon_x \leq \frac{c}{100} \cdot \frac{X_{max}}{X} \tag{1.37}$$

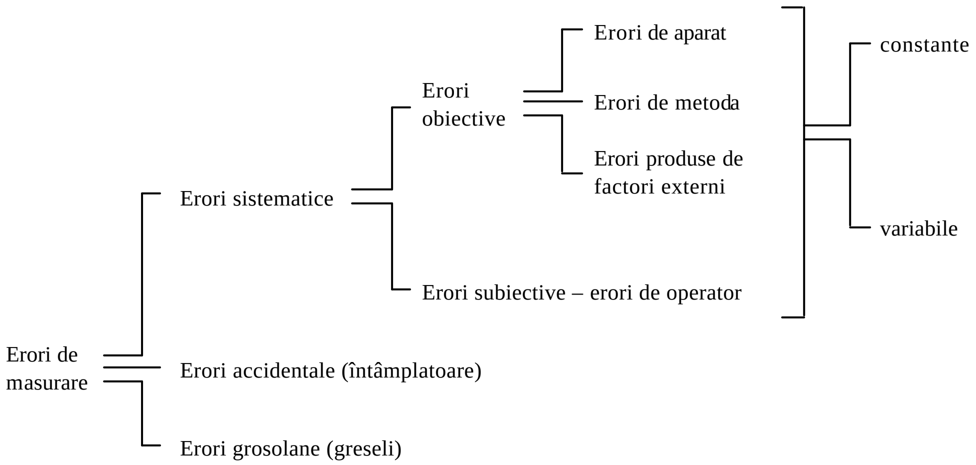
deoarece $\varepsilon_x = \Delta X / X$, $c = (\Delta X)_{max}$ si – conform relatiei (1.36) – $\Delta X \leq (\Delta x)_{max}$, ceea ce înseamna $\Delta X / X \leq (\Delta X)_{max} / X = \frac{c}{100} \cdot \frac{X_{max}}{X}$. Din relatia (1.37) rezulta: cu cât X este mai mic decât X_{max} cu atât eroarea ε_x comisa poate fi mai mare, desi clasa de precizie este aceeasi, caci:

$$\frac{1}{\varepsilon_x} \geq \frac{X}{X_{\max}} \cdot \frac{100}{c} \Leftarrow (1-37).$$

De aceea, aparatul de masurat utilizat trebuie sa fie în asa fel ales (sau domeniul lui de masurare sa fie în asa fel selectat prin comutatorul de scala) încât valoarea (prezumtiva) a lui X sa fie cât mai aproape de X_{max}; de regula este bine ca indicatiile aparatului sa se situeze în ultima treime a scalei aparatului. De pilda, tensiunea electrica cu o valoare prezumtiva de 4 V $\div$ 5 V, trebuie masurata cu un voltmetru care, dintre domeniile sale de masurare (sa zicem: $0 \div 1{,}5$ V; $0 \div 6$ V; $0 \div 30$ V; $0 \div 120$ V si $0 \div 600$ V) sa fie comutat pe scala 0 la 6 V.

1.3.2. Clasificarea erorilor de masurare

Deoarece cauzele erorilor de masurare sunt numeroase exista si multe criterii de clasificare a lor. Dupa caracterul lor, erorile de masurare pot fi grupate conform schemei urmatoare:



Erorile sistematice sunt cele care se produc întotdeauna (la orice determinare) si în acelasi sens, într-un sir de masurari efectuate riguros si în aceleasi conditii experimentale, putând avea o valoare constanta (*erori sistematice constante*) sau variabila dupa un model (lege) determinata (*erori sistematice variabile*). În functie de cauzele care le genereaza, erorile sistematice pot fi obiective sau subiective.

Erorile sistematice obiective, independente de operator, sunt cele datorate numai aparatelor (mijloacelor) de masurat si metodelor de masurare, precum si influentei controlabile ale mediului ambiant (prin: temperatura, umiditate, presiune, câmp magnetic, câmp electric etc.).

Erorile sistematice subiective sunt cele care depind exclusiv de operator si sunt determinate de capacitatea senzoriala a operatorului, de abilitatea (priceperea) lui, de starea sa psihica si fizica, de conditiile de mediu în care lucreaza s.a.

Fiind sistematice, adica producându-se întotdeauna, multe dintre aceste erori pot fi puse în evidenta sau chiar determinate cantitativ, ca de exemplu:

– **erorile de aparat**, care se datoreaza unor cauze constructive si unor imperfectiuni de etalonare. Evaluarea lor nu este posibila prin calcul, aceasta datorita diversitatii caracteristicilor functionale si constructive ale elementelor componente sau ireproductibilitatii lor, precum si datorita modificarii în timp – de pilda prin îmbatrânire – a acestor caracteristici. De aceea, pentru stabilirea erorilor sistematice de aparat se recurge la determinari experimentale, întocmindu-se diagrame sau tabele de corectie, care se vor utiliza împreuna cu aparatul respectiv în functie de domeniul de masurare, de conditiile de mediu etc. Pentru asigurarea clasei de precizie a aparatului, erorile sistematice de aparat trebuie sa fie limitate la

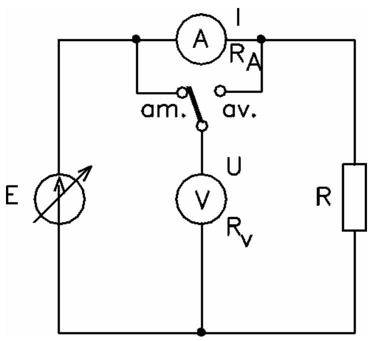


Fig. 1.17

valori foarte mici si pe cât posibil chiar evitate, atât prin proiectare (conceptie) si constructie (precizia fabricarii, alegerea materialelor si componentelor de cea mai buna calitate, corecta etalonare etc.), cât si prin exploatare (evitarea socurilor, depozitare si utilizare corecte, asigurarea conditiilor adecvate de mediu, efectuarea periodica de verificari si reetalonari etc.);

– **erori de metoda**, care se datoreaza principiului pe care se bazeaza metoda, modelului folosit, introducerii unor simplificari sau aproximari, utilizarii unor relatii empirice etc. Un exemplu simplu, devenit clasic, îl constituie erorile de metoda pe care le introduce metoda masurarii rezistentelor electrice cu ajutorul voltmetrului si ampermetrului, conform schemei din figura 1.17, care arata ca sunt posibile doua moduri de conectare a aparatelor: amonte (am.) si aval (av.). Daca $R_m = U/I$, unde U si I sunt indicatiile voltmetrului si – respectiv – ampermetrului, atunci relatia de calcul $(R_m = U/I)$ este aproximativa. Relatiile exacte de calcul sunt:

- pentru montajul <u>am</u>onte $R = (U - R_A I)/I = \frac{U}{I} - R_A$,
- pentru montajul <u>av</u>al $R = U/(I - U/R_V)$,

rezultând urmatoarele erori absolute sistematice de metoda:

- pentru montajul <u>am</u>onte $\Delta R_{am.} = R_m - R = \frac{U}{I} - \left(\frac{U}{I} - R_A\right) = R_A$,
- pentru montajul <u>av</u>al $\Delta R_{av.} = R_m - R = \frac{U}{I} - \frac{U}{I - U/R_V} = -\frac{U^2}{R_V I^2 - UI} =$

$$= -\frac{R^2{}_m}{R_V - R_m} .$$

Daca nu se fac corectiile, care sunt $C_{am.} = -\Delta R_{am.} = -R_A$ si $C_{av.} = -\Delta R_{av.} = = \frac{R^2{}_m}{R_V - R_m}$, atunci – pentru a obtine erori (relative) de metoda cât mai mici – erorile relative fiind: $\varepsilon_{am.} = \frac{\Delta R_{am.}}{R} = \frac{R_A}{R}$ si $\varepsilon_{av.} = \frac{\Delta R_{am}}{R} = -\frac{R}{R + R_V} = -\frac{1}{1 + (R_V/R)}$, trebuie ca aparatele de masurat (voltmetrul si ampermetrul) sa fie de cât mai buna calitate (adica cu R_V foarte mare si R_A foarte mic), iar legatura amonte se va folosi pentru masurarea rezistentelor mari (caz în care $\varepsilon_{am} \to 0$) si montajul aval pentru masurarea rezistentelor mici (caz în care $\frac{R_V}{R} \to \infty$ si $\varepsilon_{av} \to 0$);

– **erori produse de factori externi**, care apar datorita variatiei conditiilor de mediu (temperatura, presiune, umiditate, câmp electromagnetic etc.). Deoarece influenta mediului este dificil de modelat, nu se pot determina prin calcule aceste erori decât în foarte putine cazuri (de exemplu, se poate determina efectul variatiilor de temperatura asupra unui termocuplu sau asupra unui termistor s.a.). În unele situatii (dar nu multe!) aceste erori pot fi evaluate experimental;

– **erori conditionate de operator**, care sunt produse din diverse cauze (ca: oboseala, stari emotionale, deficiente ale organelor de perceptie, conditii de lucru, pozitia operatorului s.m.a.), nu pot fi – evident – determinate cantitativ; în schimb cele mai multe dintre ele pot fi evitate sau prevenite. Iata un exemplu: citirea indicatiilor aparatelor de masurat analogice cu ac poate fi influentata daca operatorul nu priveste indicatia exact perpendicular pe suprafata cadranului (este vorba de cunoscuta eroare de paralaxa, care poate fi înlaturata prin fixarea pe cadran a unei oglinzi în care se reflecta acul indicator; o citire este corecta atunci când, prin pozitia sa, operatorul nu vede imaginea acului în oglinda cadranului).

Erorile accidentale (întâmplatoare) sunt erorile care apar cu valori si semne diferite într-un sir de masurari succesive ale aceleiasi marimi, efectuate riguros în aceleasi conditii. Aceste erori nu sunt controlabile, fiind produse de fluctuatii accidentale ale influentei mediului ambiant, ale atentiei operatorului, precum si ale parametrilor mijloacelor de masurat. Datorita cauzelor multiple, variate si independente care produc erorile întâmplatoare, influenta acestor erori asupra rezultatelor masurarilor poate fi determinata numai prin metodele statisticii matematice (cu aplicarea teoriei probabilitatilor si utilizarea valorilor medie aritmetica ale rezultatelor obtinute prin efectuarea unui mare numar de masurari asupra aceleiasi marimi si în conditii riguros identice).

Erorile grosolane sunt, de fapt, greseli flagrante care se pot produce uneori în timpul efectuarii masurarilor, fiind caracterizate prin valori foarte mari, care denatureaza mult rezultatul masurarii. Ele sunt de tip accidental si au o probabilitate mica de aparitie. Aparitia lor este usor de detectat (prin “iesirea din comun” si lipsa de plauzibilitate) si, fiind neverosimile, se cerceteaza situatia în care s-a facut masurarea, se înlatura deficientele constatate si se refac masurarile în noile conditii corectate. Aceste erori se datoreaza unor greseli de manipulare si conectare a aparatelor, neatentiei de moment a operatorului, utilizarii inexacte a metodei adoptate pentru efectuarea masurarilor, omisiunilor în calcule etc. Erorile grosolane trebuie eliminate si masurarea refacuta.

1.3.3. Teoria erorilor de masurare

Se refera, în special, la studiul (modelarea) erorilor întâmplatoare, care sa conduca la gasirea unor reguli generale de efectuare a masurarilor astfel încât efectul imprevizibil al acestor erori aleatoare sa fie redus la minimum.

O prima regula, stabilita prin metodele statisticii matematice, consta în faptul ca efectuând un numar mare de masurari erorile cu valori opuse au aceeasi frecventa de aparitie si lucrând cu valorile medie aritmetica ele se elimina reciproc.

O alta constatare statistica este aceea ca frecventa erorilor care au modulul mic este mai mare decât frecventa celor ce au modulul mare.

În special, se cauta sa se stabileasca o **lege de distributie** a probabilitatii erorilor întâmplatoare, în cazul în care eroarea se datoreaza unor factori de eroare independenti. În acest scop se considera un numar mare de masurari de aceeasi precizie asupra unui masurand dat. Masurând de n ori (n fiind un întreg “mare”) o marime de valoare adevarata (necunoscuta) X, se obtin valorile X_{mi} , $i = 1, 2, \dots , n$, de fiecare data producându-se o eroare întâmplatoare (accidentala) ? $X_i = X_{mi} - X$, $i = 1, 2, \dots, n$, conform relatiei (1.25).

Fie x o variabila aleatoare ale carei valori sunt erorile întâmplatoare ? X_i, obtinute în diversele masurari i ($i = 1, 2, \dots, n$). Deoarece erorile întâmplatoare ? X_i pot lua orice valoare reala, atunci domeniul de luat valori al variabilei aleatoare este multimea numerelor reale : $x \in \boldsymbol{R}$. Admitând ca repartitia pe $\boldsymbol{R}$ a lui x, care se noteaza cu f (x), este continua, în teoria probabilitatilor se demonstreaza ca aceasta *functie de repartitie* f (x) poate avea expresia :

$$\varphi(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-hx^2} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} , \qquad (1.38)$$

în care s este s X, adica eroarea medie patratica definita prin (1.31), iar constanta $h = 1/\sigma\sqrt{2}$ poarta numele de *precizia masurarii*. Functia de repartitie $\varphi(x)$, exprimata prin expresia (1.38), poarta numele de *lege de probabilitate* sau *lege de distributie* a probabilitatii erorilor întâmplatoare f .

În legatura cu (1.38) se enunta urmatoarea teorema (numita teorema Laplace si Gauss): legea de probabilitate a erorilor întâmplatoare (1.38) este o *lege normala*, în sensul ca variabila aleatoare x (a erorilor întâmplatoare) are valoare medie nula, adica $\frac{1}{x}\int_{-x/2}^{x/2} \varphi(x)\mathrm{d}x = 0$, si o abatere medie patratica s, a carei reprezentare grafica (fig. 1.18) este simetrica în raport cu axa ordonatelor. Ea se mai numeste si *curba lui Gauss* sau “clopotul“ lui Gauss. Valoarea ei maxima este: $\varphi(0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{h}{\sqrt{x}}$, iar punctele de inflexiune au abscisele $\pm\sigma = \pm\frac{1}{h\sqrt{2}}$.

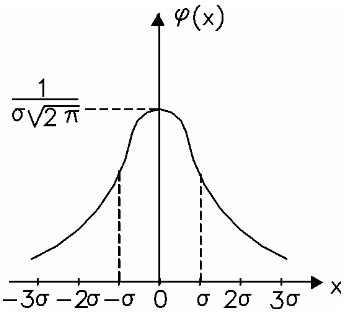


Fig. 1.18

În cazul distributiei normale, a lui Gauss, probabilitatea ca o eroare x sa fie cuprinsa între doua valori reale a si b este:

$$p(a > x > b) = \int_a^b \varphi(x)\mathrm{d}x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-x^2/2\sigma^2}\mathrm{d}x .$$

1.4. ETALOANE

Etalonul este un sistem fizic care constituie un mijloc de masurare (masura, instrument sau aparat de masurat) ce serveste la pastrarea si reproducerea unitatilor de masura, cu precizia metrologica corespunzatoare stadiului la care s-au dezvoltat tehnicile de masurare. În afara acestor doua roluri, prin care se "defineste" o unitate de masura, etaloanele mai sunt utilizate în operatiile de calibrare si în însusi procesul de masurare (de înalta precizie) ca elemente de referinta, precum si în constructia unor aparate (dispozitive) utilizate în alte scopuri decât masurarea propriu-zisa (ca, de exemplu, dispozitive de automatizare, stabilizatoare electronice, generatoare de semnal etc.).

Calibrarea înseamna – în metrologie – compararea unui aparat de masurat cu un etalon în scopul gradarii sau ajustarii, verificarii sau etalonarii aparatului de masurat. **Elementul de referinta** este un etalon care asigura ("furnizeaza") o marime fizica anume, cu o valoare bine cunoscuta (cu o precizie metrologica corespunzatoare scopului urmarit).

Un etalon trebuie sa fie *invariabil* în timp si în spatiu, sa poata fi folosit usor în tehnica si sa poata fi reconstituit oricând. Unicitatea si conformitatea masurarilor, în orice loc si la orice moment, impun realizarea unui **sistem de etaloane** care sa asigure :

- *generarea* principalelor unitati de masura, în conformitate cu definitiile lor din S.I. (adica "materializarea " definitiilor prin experimente adecvate);
- *mentinerea (conservarea)* acestor unitati de masura, constante în timp, în toate laboratoarele metrologice pe plan mondial;
- *corelarea* între ele a unitatilor de masura, trecerea la alte unitati derivate (etaloane de derivare) si extinderea limitelor de masurare cu precizia necesara, cum ar fi trecerea la multipli si submultipli ai unitatilor de masura (etaloane de raport).

Aceste trei operatii fundamentale în activitatea metrologica se efectueaza în mod corespunzator, cu urmatoarele trei categorii de etaloane:

- *etaloane de definitie* (adica etaloanele prin care se genereaza principalele unitati de masura si în principal cele fundamentale, asa cum este – de exemplu – determinarea absoluta a amperului cu ajutorul balantei de curent);
- *etaloane de conservare* (adica etaloanele de mentinere a unitatii de masura cu o mare stabilitate în timp si fata de influentele exterioare de mediu);
- *etaloanele de transfer* (adica cele care asigura etalonarea tuturor tipurilor de aparate de masurat, în intervale largi de valori ale masurandului, pentru marimi constante sau variabile în timp), asa cum sunt etaloanele de raport, etaloanele de derivare si etaloanele de transfer (curent continuu – curent alternativ), prin compararea efectelor (termice, electrodinamice etc.) ale semnalelor de curent sau tensiune produse asupra unui acelasi element sensibil.

Cele mai importante etaloane din categoria etaloanelor de conservare (din punctul de vedere al obiectivelor acestui manual de masurari electronice) sunt etaloanele: de tensiune, de rezistenta si de inductivitate, pe care le vom prezenta, pe scurt, în continuare.

1.4.1. Etaloane de tensiune

Etaloanele de tensiune cele mai raspândite sunt: *elementele normale* (un element galvanic cu electrozii mercur + si amalgam de cadmiu – si electrolitul sulfat de cadmiu – v. [8]), *etaloanele cu efect Josephson* (v. [8]) si *etaloanele cu diode Zener*.

Având în vedere larga utilizare a etaloanelor si caracterul aplicativ al acestei carti, în cele ce vor urma vom descrie numai câteva tipuri – mai des întâlnite în practica masurarilor electronice – de etaloane de tensiune cu diode Zener.

Diodele Zener, datorita caracteristicii lor curent – tensiune (fig. 1.19.) – care prezinta o portiune (*A-B* în figura 1.19) cu rezistenta dinamica relativ mica (cuprinsa între 2 O si 20 O) si pentru care tensiunea U_z = const. indiferent de marimea curentului (daca acesta este cuprins între valorile I_A si I_B) –, se utilizeaza ca etaloane de tensiune si ca elemente cu tensiune de referinta $U_{ref} = U_Z$ în circuitele stabilizatoarelor parametrice de tensiune. Aceste utilizari ale diodelor Zener se mai datoreaza si proprietatilor lor de stabilitate a tensiunii (cu ? $U_Z / U_Z = = 10^{-5} \Rightarrow i \in [I_A, I_B]$) si unor coeficienti de temperatura foarte buni $\frac{\Delta U_Z / U_Z}{T} 100 = 0{,}1\% / {}^0C$. Diodele stabilizatoare se construiesc cu o tensiune reversibila de strapungere relativ mica U_Z = 4, …, 60 V, majoritatea având U_Z = 6V.

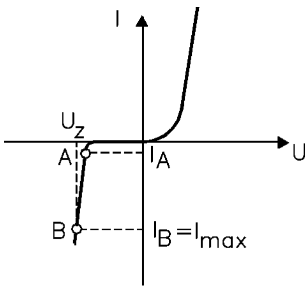


Fig. 1.19

Etalonul de tensiune (în c.c.) cu diode Zener, de tip stabilizator parametric, se realizeaza dupa mai multe scheme:

- *schema cu un singur etaj*, indicata în figura 1.20, este în forma de G si are o singura dioda Zener *D* conectata, în sens invers fata de tensiunea continua de alimentare $U_{11'}$, printr-un rezistor *R* care asigura functionarea diodei în zona *A-B* a caracteristicii sale curent – tensiune (v. fig. 1.19). Tensiunea de iesire $U_{22'}$, este tensiunea etalon, stabilizata în timp, fata de temperatura si indiferent de curentul de sarcina *I* (cu conditia ca I_Z sa fie cuprins între limitele I_A si I_B). Tensiunea stabilizata (etalon) este $U_{22'} = U_Z$;
- *schema cu doua etaje* (fig. 1.21) este un cuadripol format din doua stabilizatoare " G " în cascada. Primul etaj, care este atacat cu tensiunea de alimentare, aplicata la bornele de intrare *1*(+), *1'*(–), cu doua diode Zener, D_1' si D_1", alimentate prin rezistorul R_1, asigura o prima stabilizare a tensiunii ; ea este preluata, prin rezistorul R_2, de al doilea etaj, cu dioda D_2 . La bornele de iesire *2* (+) si *2'* (–) se obtine tensiunea stabilizata – etalon $U_2 = U_{ZD2}$;

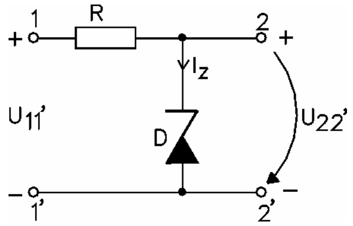


Fig. 1.20

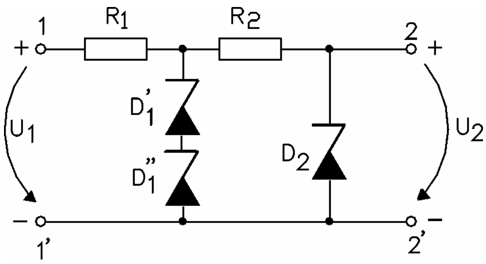


Fig. 1.21

- *scheme în punte*, pentru care se pot realiza mai multe variante: *punte cu o singura dioda D* (fig. 1.22,*a*) la care rezistoarele laturilor (R_1, R_2 R_3) sunt în asa fel alese încât rezistenta diferentiala r_Z a diodei Zener D sa fie compensata (în acest caz tensiunea stabila de iesire este: $U_2 = U_Z - R_3\dfrac{U_1}{3R_1 + R_2}$); *punte cu doua diode* D_1 si D_2 (fig. 1.22,*b*) la care tensiunea de iesire (stabila – etalon) este diferenta tensiunilor celor doua diode ($U_2 = U_{Z1} - U_{Z2}$); *punte cu doua diode* D_1 si D_2 (fig.1.22,*c*) la care tensiunea de iesire (stabila – etalon) este media aritmetica a tensiunilor celor doua diode ($U_2 = U_{Z1} - R_2 I_{Z2} = -R_1 I_{Z1} + U_{Z2}$ de unde, însumând membru cu membru cele doua egalitati, rezulta $U_2 = \dfrac{U_{Z1} + U_{Z2}}{2} - \dfrac{R_1 I_{Z1} + R_2 I_{Z2}}{2}$); si *punte cu laturi multiple* (fig. 1.23) la care tensiunea de iesire (stabila – etalon) este media aritmetica a tensiunilor celor n diode ($U_2 \approx \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_{Zi}$ daca se realizeaza conditia $\dfrac{R}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i << U_Z$).

Stabilizatoarele parametrice cu diode Zener folosite ca sursa de referinta pentru tensiune sunt prevazute si cu elemente pentru compensarea variatiei tensiunii Zener cu temperatura, ?U_Z(?), fie prin diode conectate în sens direct în serie cu dioda Zener, fie cu ajutorul unor termistoare. Se fabrica si diode Zener compensate termic (utilizate direct în scheme ca diode de referinta) care au coeficientii de temperatura ($\dfrac{\Delta U_{ZT}}{U_{ZT}}$ 100)/? foarte mici: 10^{-3} % / °C si chiar 10^{-4} % / °C.

În scopul obtinerii unor performante mai bune pentru etaloanele de tensiune sau pentru etajele ce asigura tensiuni de referinta, se realizeaza **stabilizatoare active**, care combina schemele parametrice (cu diode Zener), cu un amplificator operational (v. subcap. 2.2.) într-un montaj ca cel aratat în figura 1.24. Aici, amplificatorul stabilizeaza curentul prin dioda Zener D si asigura totodata o rezistenta de iesire (la bornele *2*-*2*') foarte mica.

Rezulta (v. fig. 1.24) ca:

- tensiunea de atac a amplificatorului operational este:

$$U_{-+} = U_Z - R_2 \frac{U_2}{R_1 + R_2},$$

cu conditia ca I_1 ?   0 ;

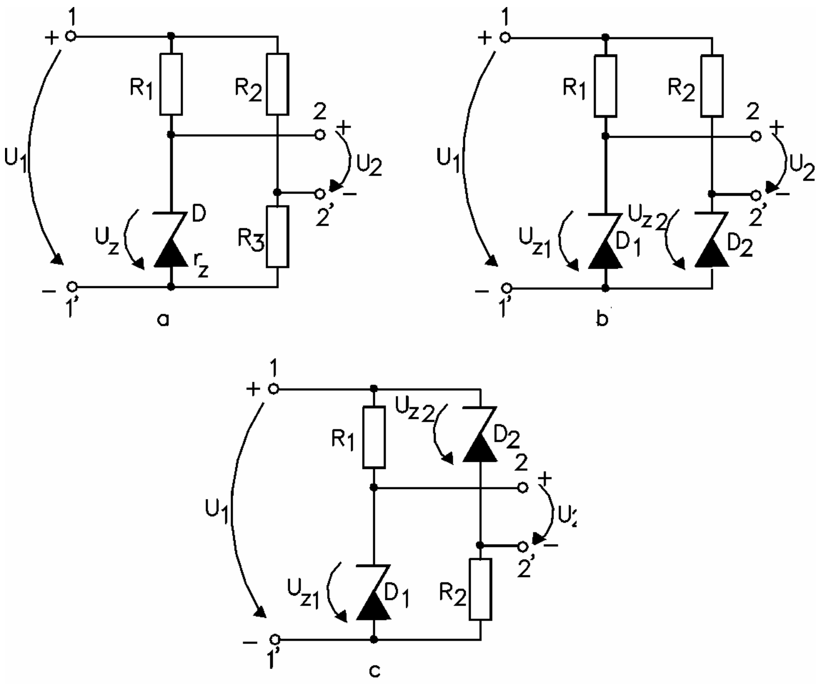


Fig. 1.22

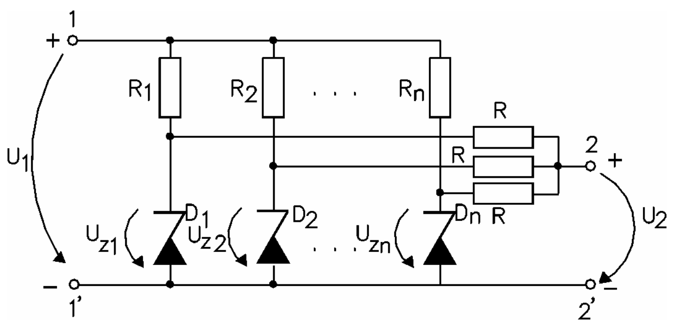


Fig. 1.23

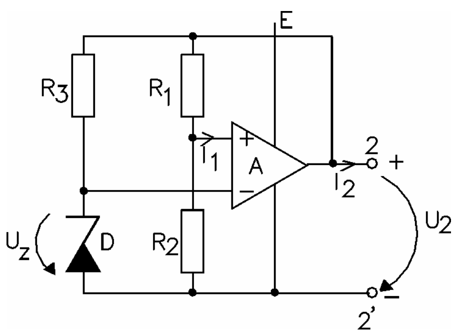


Fig. 1.24

- daca se noteaza $\frac{R_2}{R_1+R_2}=K$ atunci tensiunea de iesire este:

$$U_2 = a\,(U_Z - KU_2) \text{ sau } U_2=\frac{aU_Z}{(1+aK)}=\frac{U_Z}{K+\frac{1}{a}};$$

- deoarece un amplificator operational (v. subcap. 2.2.) are amplificarea foarte mare, astfel ca $(1/a) << K$, atunci: $U_2=\frac{1}{K}U_Z$, deci este o tensiune stabila – tensiunea U_Z a diodei Zener – divizata prin $K = R_2/(R_1 + R_2)$, unde R_1 si R_2 sunt rezistoarele de reactie ale amplificatorului operational A. Pe schema din figura 1.24, R_3 este rezistorul folosit pentru alimentarea diodei Zener D.

Cu stabilizatorul activ realizat conform schemei din figura 1.24 se obtin performante deosebit de bune ca: o stabilitate anuala de 0,001 %, coeficient de temperatura mai mic decât 0,0001 % / °C, abaterea tensiunii de iesire de la valoarea nominala $(U_2 - U_{ref}) / U_{ref} < 0{,}1$, curent debitat $I_2 = 0 \div 10$ mA si rezistenta de iesire sub 0,005 O.

În prezent, se fabrica asemenea surse de tensiune stabila (v. cap. 3.), sub forma de circuit integrat cu alimentare încorporata, prevazute cu protectie la scurtcircuit (la bornele de iesire).

Etaloane de tensiune reglabila în trepte. Se realizeaza dupa o schema de principiu ca aceea aratata în figura 1.25, în care A este un amplificator operational de înalta calitate, ceea ce înseamna ca are o amplificare foarte mare (cu un câstig $a > 10^5$) si o rezistenta de intrare de asemenea mare (de cel putin 10^{10} O), asa cum se va arata în subcapitolul 2.2. În aceste conditii, relatia între curentii indicati pe schema (v. fig. 1.25) si care este:

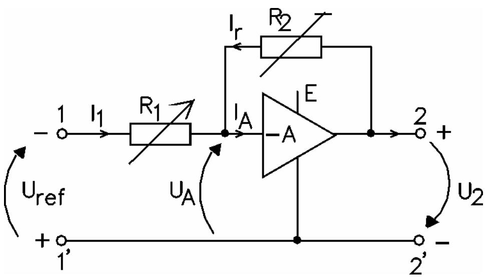


Fig. 1.25

$$I_1 + I_r = I_A \text{ sau } I_1 = I_A - I_r,$$

devine, în conditiile $I_A << I_r$, $I_1 = -I_r$ si utilizând expresiile acestor curenti (în functie de tensiunile si rezistentele indicate pe schema), se poate scrie:

$$I_1=\frac{-U_{ref}-U_A}{R_1}=\frac{-U_{ref}-\frac{U_2}{a}}{R_1},\quad I_r=\frac{U_2-U_A}{R_2}=\frac{U_2-\frac{U_2}{a}}{R_2}$$

si

$$I_1 = -I_r \rightarrow \frac{-U_{ref} - \dfrac{U_2}{a}}{R_1} = -\frac{U_2 - \dfrac{U_2}{a}}{R_2},$$

de unde rezulta:

$$-\frac{U_{ref}}{R_1} - \frac{U_2}{aR_1} = -\frac{U_2}{R_2} + \frac{U_2}{aR_2} \quad \text{adica} \quad \frac{U_2}{R_2} - \frac{U_2}{a}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{U_{ref}}{R_1}$$

si, deoarece a este foarte mare, atunci, cu aproximatia

$$\frac{U_2}{a}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) << \frac{U_2}{R_2},$$

rezulta în definitiv:

$$U_2 \approx \frac{R_2}{R_1} U_{ref} = R_2 \frac{U_{ref}}{R_1}, \tag{1.39}$$

cu sensurile tensiunilor din figura 1.25, în care R_1 si R_2 sunt rezistentele unor rezistoare reglabile de precizie. Cu R_1 de valoare fixa (sau comutabila) si R_2 variabil în decade, se poate acoperi un interval larg de tensiuni, de exemplu între 0 si 1000 V tensiune etalon de iesire (U_2), la intrare aplicându-se o tensiune de referinta U_{ref} = const. furnizata de o dioda Zener; U_2 = 0-1000 V se poate obtine cu o variatie oricât de fina, dar – de obicei – se folosesc 5, 6 sau 7 decade. Prin alegerea corespunzatoare a raportului U_{ref} / R_1 , valoarea tensiunii de iesire U_2 poate fi citita direct (în V, mV sau µV) pe indicatoarele decadice de calibrare a lui R_2. Se obtine astfel un foarte bun etalon de transfer – de raport pentru tensiunile electrice în curent continuu. Din relatia (1.39) rezulta ca stabilitatea tensiunii U_2 depinde de stabilitatea tensiunii de intrare (U_{ref}) si a rezistoarelor R_1 , R_2; de aceea, rezistoarele se aleg de cea mai buna calitate, iar U_{ref} poate fi preluata de la iesirea unui stabilizator ca cel din figura 1.24. În asemenea aparate etalon de tensiune (fig. 1.25), rezistorul R_2 are decadele alese în functie de aplicatia careia îi este destinata tensiunea U_2 (de exemplu decade din valori proportionale cu 1, 2, 4, 8 adica în cod binar-zecimal), cu mici rezistoare ajustabile în serie cu fiecare element decadic, ceea ce permite autocalibrarea sistemului, cu mare precizie si rapid.

Pe lânga elementele din figura 1.25, aceste aparate etalon mai sunt prevazute cu circuite de protectie (fata de suprasarcinile de curent la iesire), comutator de polaritate, circuite pentru autocalibrare si multe altele.

Performantele obisnuite ale acestui tip de etalon sunt: stabilitate în timp între 0,001 si 0,01 %/luna, coeficient de temperatura 0,0001 … 0,001 %/°C, variatia tensiunii cu sarcina $[U_2\ (I_2 = 0) - U_2\ (I = I_n)]100 / U_2\ (I_2 = 0) = 10^{-4} \ldots 10^{-3}$ %, curentul de sarcina (de iesire) maxim 10 … 50 mA, tensiunea de iesire U_2 = 0 … 1000 V, reglabila în trepte de 10 µV, 1 µV sau chiar 0,1 µV.

1.4.2. Etaloane de rezistenta

Etaloanele de rezistenta sunt rezistoare speciale ("cutii" cu rezistoare) construite astfel încât rezistenta lor electrica sa fie stabila: în timp, fata de variatiile de temperatura, în raport cu variatiile de umiditate si fata de frecventa (în cazul etaloanelor de rezistenta folosite în curent alternativ), precum si independente de modul de conectare al rezistorului în circuit.

Stabilitatea în timp $\left[\frac{\Delta R}{R_n}100\right]/\Delta t$ (în %/an, daca intervalul de timp ?t, în care s-a produs abaterea ?R a rezistentei de la valoarea nominala R_n , este un an), si fata de variatiile de temperatura (%/°C) depind – în primul rând – de materialul din care este realizat rezistorul (firul rezistiv), de obicei manganina – un aliaj cu 84% Cu, 12% Mn si 4% Ni, dar si de constructia etalonului de rezistenta. Stabilitatea fata de umiditate si independenta de frecventa depind numai de constructie.

Tipuri constructive. Exista trei tipuri de rezistoare etalon:

- dipolar (cu doua borne) care este caracterizat (fig. 1.26) de rezistenta definita ca fiind raportul dintre tensiunea la bornele *1-2* si curentul prin oricare din borne (se presupune ca, la cele doua borne, curentii sunt egali în valoare absoluta): $R = U/I$. Totusi, rezistorul dipolar este afectat de influenta unor elemente parazite (fig. 1.27) ca: rezistenta de izolatie între borne (R_{iz} în schema din figura 1.27), rezistentele de izolatie fata de masa (R_{iz1} si R_{iz2}) si rezistentele de contact la borne (r_1 si r_2).

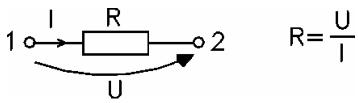


Fig. 1.26

Influenta rezistentelor de izolatie este semnificativa în special la etaloanele cu R mare, iar rezistentele de contact au influente evidente în special în cazul etaloanelor cu rezistenta R mica (de ordinul ohmilor);

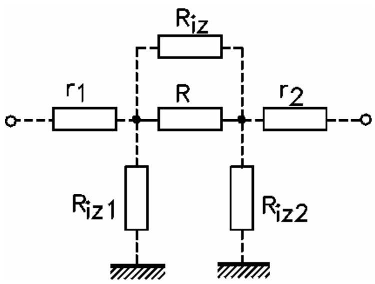


Fig. 1.27

- tripolar (cu trei borne), având schema din figura 1.28,*a*), elimina influenta parazita a elementelor de izolatie fata de masa prin faptul ca folosesc o a treia borna "O" (v. fig. 1.28), numita *borna neutra* sau *borna de masa* a carcasei. Parametrul ce caracterizeaza etalonul tripolar este rezistenta directa (rezistenta partiala) R_{12} dintre bornele "calde" (fig.1.28,*b*), definita ca fiind raportul dintre tensiunea U_{10}, aplicata între borna de intrare *1* si borna de masa *0*, si curentul de scurtcircuit la iesire I_{2sc} produs la iesire de tensiunea U_{10} atunci când bornele *2* si *0* sunt în scurtcircuit: $R_{12} = U_{10} / I_{2sc}$ (rezistorul tripolar este simetric deoarece $R_{12} = U_{20} / I_{1sc}$, cu alimentare la iesire *2-0* si scurtcircuit la intrare *1, 0*). În acest fel, orice rezistenta parazita de felul R_{10} sau R_{20} (indicate în circuitul echivalent din figura 1.28,*b*), între bornele "calde" si masa, nu influenteaza parametrul etalon R_{12};

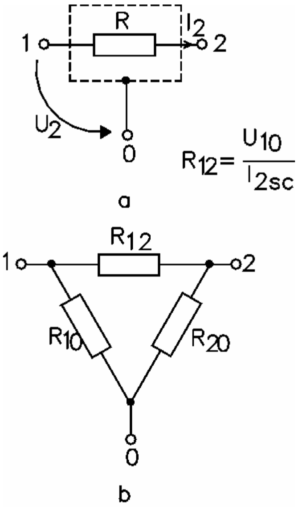


Fig. 1.28

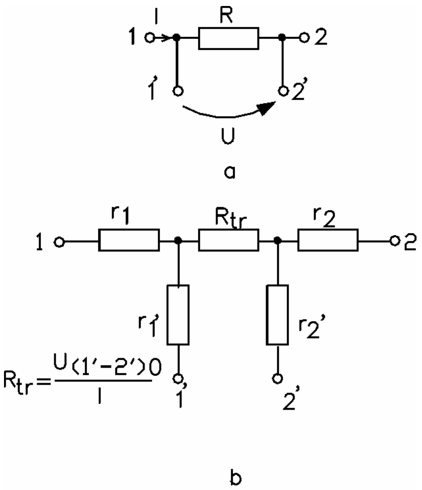


Fig. 1.29

– **cuadripolar** (cu patru borne), care are doua borne *1* si *2* asa-zise *de curent* si alte doua borne *1'* si *2'* numite *borne de tensiune* (fig 1.29,*a*). În acest fel se elimina influenta rezistentelor de contact la borne si a rezistentei conductoarelor de conexiuni. Pentru utilizarea etalonului cuadripolar, bornele *1-2* se conecteaza în circuit, iar la bornele *1'-2'* se preia tensiunea (caderea de tensiune) data de rezistor (ce se va masura cu un voltmetru sau va fi introdusa într-o punte de masurare etc.). Parametrul ce caracterizeaza rezistorul cuadripolar este rezistenta de transfer, $R_{tr} = U_{(1' - 2')0} / I$ (conform circuitului echivalent din figura 1.29,*b*), definita ca raport între tensiunea la bornele de tensiune *1'-2'* presupuse în gol (sau conectate la un voltmetru cu rezistenta de intrare foarte mare) si curentul prin bornele de curent *1-2* (cu conditia ca $I >> I_v$ sau I_v ? 0). În acest mod, orice rezistenta parazita (în serie, fie cu bornele de tensiune, fie cu cele de curent) nu influenteaza rezistenta de transfer R_{tr} definita ca în figura 1.29,*b*.

În practica, rezistoarele etalon cu R > 100 kO se construiesc ca rezistoare tripolare, iar etaloanele de rezistenta cu R < 1000 O se realizeaza ca rezistoare cuadripolare. Daca nu este necesara o precizie mai buna decât 1%, etalonul de rezistenta se utilizeaza ca rezistor dipolar.

Parametrii principali. Calitatea etaloanelor de rezistenta este definita prin urmatorii parametri:

- clasa de precizie care trebuie sa se înscrie în urmatorul standard: 0,001 0,002 0,005 0,01 0,02 sau 0,05;

- variatia anuala maxima a rezistentei nominale R_n, adica $\frac{R - R_n}{R_n} 100 / 1\text{an}$,

care conform clasei de precizie a etalonului nu poate fi mai mare decât ± 0,0002 %/an, ± 0,0005 %/an, ± 0,001 %/an, ± 0,002 %/an, ± 0,005 %/an sau ± 0,02 %/an (în ordinea clasei de precizie aratata anterior). Acest parametru reprezinta **stabilitatea în timp** a etalonului;

- **puterea admisibila maxima** ce se admite a fi disipata în timpul utilizarii etalonului de rezistenta (ea poate fi de 0,01 W pentru rezistoarele în aer si 0,1 W pentru cele în ulei);
- **coeficientii de temperatura** (a, ß, ?, …) ai rezistorului (nu sunt formulate prescriptii cu privire la valoarea lor, cerându-se numai ca pentru fiecare etalon de referinta în parte sa se indice valorile acestor coeficienti);
- **rezistenta de izolatie** (între bornele rezistorului si carcasa metalica) a carei valoare admisibila depinde de valoarea nominala R_n a rezistentei si de clasa de precizie a etalonului (astfel, pentru clasa de precizie 0,01, rezistenta de izolatie R_{iz} trebuie sa fie: $R_n = (10^{-2} \dots 10^3)$ O ? $R_{iz} = 10^{10}$ O, $R_n = 10^4$ O ? $R_{iz} = 10^{10}$ O etc.);
- **rezistenta în curent alternativ** R_{ca} = Real (U/I), unde U si I sunt valorile efective ale tensiunii sinusoidale aplicate la bornele rezistorului si – respectiv – ale curentului prin rezistor;
- **tangenta unghiului de faza** (pentru etaloanele de rezistenta utilizate în curent alternativ) $\mathrm{tg}\varphi = \mathrm{Imaginar}\frac{U}{I} \Big/ \mathrm{Real}\frac{U}{I}$, care variaza cu frecventa (la frecvente $f < 10$ kHz , tg f este aproximativ proportionala cu frecventa);
- **constanta de timp** a rezistorului etalon (t) se defineste prin: $\tau = |\mathrm{tg}\varphi| / \omega$, la frecventa $f = \frac{\omega}{2\pi} < 10\,000$ Hz);
- **variatia rezistentei R_{ca} cu frecventa**, adica $\frac{\Delta R|f}{R_0} = \frac{R_{ca}|f - R_0}{R_0}$, unde $R_{ca}\big|_f$ este rezistenta în curent alternativ la frecventa f si R_0 este rezistenta aceluiasi rezistor în curent continuu.

Etaloanele de rezistenta destinate utilizarii în curent continuu. Sunt rezistoare de constructie speciala, pentru a asigura o cât mai buna stabilitate. În acest scop, etaloanele de rezistenta mica ($R_n = R_0 < 1$ O) sunt confectionate din sârma groasa sau bara din manganina, bine rigidizata si fara carcasa izolanta; prin recoacere în mediu inert (la cca. 500°C) devin lipsite de tensiuni mecanice interioare si capata o foarte mare stabilitate în timp. Rezistoarele de la 10 O în sus au o constructie bobinata, din sârma rezistiva din manganina izolata (cu email, cu matase sau cu amândoua) înfasurata pe un suport mecanic sau ceramic. Dupa bobinare se executa un tratament termic si apoi o impregnare. În structura etalonului existând materiale mult diferite (sârma dintr-un material bobinata pe carcasa din alt material) este imposibil sa fie eliminate total eforturile interne, ceea ce face ca stabilitatea în timp sa fie ceva mai mica. Pentru marirea stabilitatii, se foloseste un suport cilindric sau plat, din material cu coeficient de dilatare egal cu materialul sârmei rezistive.

Exista doua variante de rezistoare etalon:

- *rezistoare închise*, care au un element rezistiv introdus într-o incinta etansa, sub forma unui cilindru metalic dublu;

- *rezistoare deschise*, care au elementul rezistiv aflat în contact direct cu mediul (aer sau ulei) si – din cauza influentei variatiei umiditatii – ele au o stabilitate mai mica.

Rezistoarele etalon au valori nominale ale rezistentei pâna la 1 MO, fiind în constructie obisnuita. Pentru valori R = (1 … 1000) MO, rezistoarele etalon se confectioneaza dintr-un fir de manganina extrem de subtire ("microsârma") izolat în sticla. Pentru valori R > 1 GO nu se mai pot realiza etaloane de rezistenta, deoarece ele nu mai au stabilitatea impusa etaloanelor. Exista, totusi, posibilitatea ca prin modul de conectare a unor etaloane de rezistenta tripolare de valori mai mici sa se obtina rezistente de referinta foarte mari; un exemplu – aratat în figura 1.30,*a* – consta în conectarea în stea a trei rezistoare de valori mai mici. Rezistenta directa între bornele *1-2* este rezistenta laturii triunghiului din figura 1.30,*b*, obtinut prin transfigurarea stea-triunghi, care are cunoscuta valoare $R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}$, astfel ca, luând $R_3 \ll \max\{R_1, R_2\}$, rezulta $R_{12} \approx \frac{R_1 R_2}{R_3}$. De exemplu, cu $R_1 = R_2 = 10$ MO si $R_3 = 10$ kO, se obtine o rezistenta de transfer $R_{12} \approx 10^{14}/10^{4} = 10^{10}$ O = 10 GO. În acest fel se pot obtine etaloane de rezistenta cu $R = 10^{16}$ O = 10^4 TO (!).

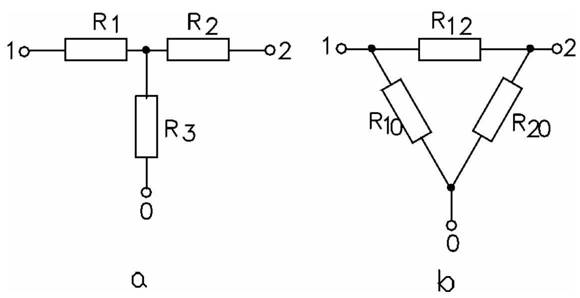


Fig. 1.30

Etaloane de rezistenta cu utilizare în curent alternativ. În curent alternativ, etalonul de rezistenta este afectat, mai ales la frecvente înalte, de parametri parazitari ca: rezistente (produse din variatia lui R_0 din curent continuu la R_{ca} determinata de frecventa), inductivitati L (mai ales la rezistoarele cu fir bobinat) si capacitati C, precum si rezistenta R_p echivalenta pierderilor din elementele reactive ce apar în curent alternativ. Astfel, schema echivalenta, în curent alternativ, a unui rezistor dipolar este cea din figura 1.31 – o schema binecunoscuta. Elementele parazite (L, C, R_p) fac ca variatia rezistentei cu frecventa, ? R/R_0, si constanta de timp t sa fie relativ mari; pentru micsorarea lor se realizeaza un bobinaj special (cu L si C mici), parti metalice cât mai subtiri si mai departate de firul rezistiv, cu ecrane si utilizarea unui dielectric cu pierderi cât mai mici.

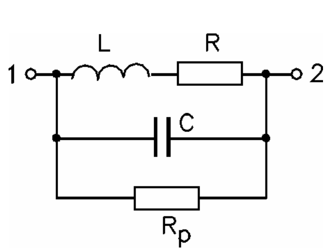


Fig. 1.31

Facând câteva simplificari (anularea unor termeni foarte mici) rezulta din schema indicata în figura 1.31:

- variatia cu frecventa:

$$\frac{\Delta R|f}{R_0} = \frac{R_{ca}|f - R}{R} = \frac{\mathrm{Real}\underline{Z} - R}{R} \approx \omega^2\left(2LC - C^2R^2\right) - \omega CR\mathrm{tg}\delta\,,$$

(deoarece $R_0 = R$, $R_{ca}/f = \mathrm{Real}\ \underline{Z}$) si

$$\underline{Z} = \frac{(R + j\omega L)R_p\dfrac{1}{j\omega C}}{(R + j\omega L)\dfrac{1}{j\omega C} + \dfrac{1}{j\omega C}R_p + (R + j\omega L)R_p}\ ;$$

- constanta de timp $\tau = \dfrac{|\mathrm{tg}\varphi|}{\omega} = |\mathrm{Imaginar}\underline{Z} - \mathrm{Real}\underline{Z}|/\omega \approx \left|\dfrac{L}{R} - CR\right|$;

– rezistenta echivalenta a pierderilor în dielectric: $R_p = \dfrac{1}{\omega C\mathrm{tg}\delta}$, unde tgd este tangenta unghiului de pierderi al dielectricului, adica $\mathrm{tg}\delta = \dfrac{X_c}{R} = \dfrac{1}{\omega CR}$ (o valoare medie pentru: materialul de impregnare a bobinajului, suport, izolatia bornelor etc.).

Se observa ca R_{ca} poate sa creasca sau sa scada cu frecventa, prin efectul termenului ?*CR*tgd (care este predominant în special la rezistoarele cu *R* > 1000 O, când R_{ca} scade cu frecventa). Constanta de timp t depinde de *L* si *C* astfel: la etaloanele cu *R* mic predomina efectul lui *L*, iar la *R* mare predomina efectul lui *C*, pe când la rezistente de ordinul zeci la sute de ohmi efectul lui *L* este acelasi ca efectul lui *C*. Sa remarcam ca efectele parazitare ale lui *L* si *C* actioneaza contrar asupra variatiei cu frecventa si a constantei de timp t.

1.4.3. Etaloane de capacitate

Etaloanele de capacitate sunt mult utilizate în masurarile electronice, ele putând fi realizate cu performante foarte bune mai ales în ceea ce priveste stabilitatea, comportarea la frecvente înalte, limitarea elementelor reziduale s.a.

Principalele exigente impuse condensatoarelor etalon sunt: stabilitatea în timp, variatii mici ale capacitatii cu temperatura si cu frecventa, independenta fata de modul de conectare în circuit.

Legat de aceasta ultima cerinta, orice condensator (ca de exemplu, condensatorul plan din figura 1.32,*a*) are o capacitate *C* care va fi influentata oricând de prezenta unui obiect conductor (carcasa unui aparat de masurat vecin, mâna operatorului s.a.), iar apropierea “pamântului” (fig 1.32,*b*) complica si mai mult lucrurile, în sensul ca – în afara capacitatii proprii a condensatorului – apar si capacitatile partiale C_1, C_2, … fata de obiectul conductor si C_{10}, C_{20}, C_0, … fata de pamânt, rezultând o schema echivalenta a etalonului de capacitate în regim de utilizare, asa ca în figura 1.32,*c*. Pentru eliminarea acestor capacitati partiale, ce “altereaza” capacitatea etalon C, se procedeaza la ecranarea condensatorului în asa fel încât ecranul sa “îmbrace” complet armaturile capacitorului (de exemplu asa cum se arata în figura 1.33, care reprezinta un etalon de capacitate ecranat).

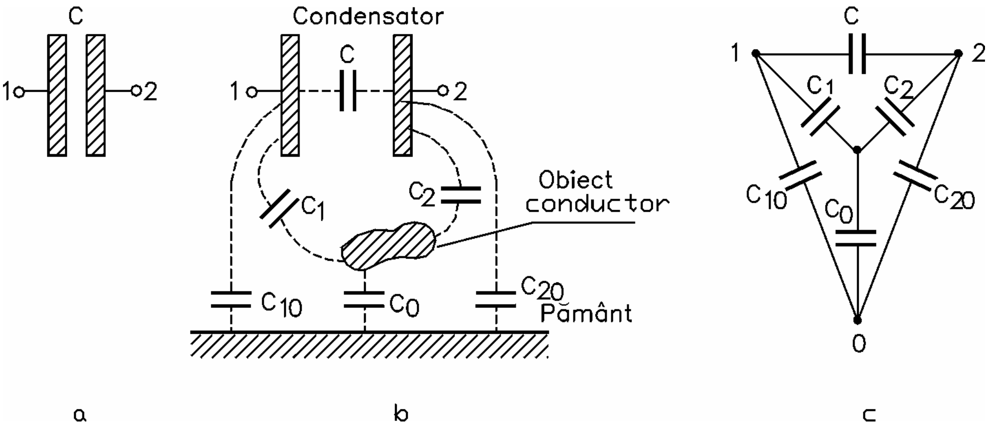


Fig. 1.32

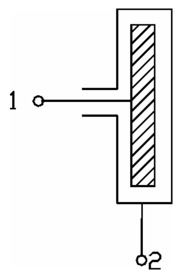


Fig. 1.33

La capacitatile suficient de mari (în general mai mari decât 10 nF), influenta capacitatii firelor de conexiune poate fi eliminata printr-o masurare dubla: cu si fara condensator (dar pastrând firele de legatura) sau folosind conectoare speciale (ecranate). În cazul condensatoarelor cu capacitati mai mici, solutia utilizata frecvent este aceea a capacitorului tripolar (cu trei borne: *1* si *2* – armaturile, *0* – ecranul), cu ecranul izolat de armaturi. În acest caz vor exista trei capacitati: C_{12} (capacitatea directa) si C_{10}, C_{20} (capacitatile între fiecare armatura si ecran). Aceste condensatoare tripolare sunt astfel construite încât $C_{10} = C_{20} << C_{12}$ (de exemplu, la C_{12} = 1000 pF se pot realiza valorile C_{10} = = C_{20} = 50 pF, adica de douazeci de ori mai mici decât capacitatea directa). Condensatoarele tripolare, cu conexiunile ecranate, permit realizarea unor capacitati directe C_{12} oricât de mici, univoc determinate si cu pierderi foarte mici; în plus, ele au avantajul ca sunt perfect aditive la conectarea în paralel.

Stabilitatea în timp, $\frac{\Delta C}{C}100 \Big/ \Delta t$ (unde intervalul de timp ?*t* este un an) si fata de variatiile de temperatura (??) , adica $\frac{\Delta C}{C}100 \Big/ \Delta\theta$ (în %/°C), se realizeaza printr-o constructie corespunzatoare (tipica etaloanelor de capacitate) si prin utilizarea unor materiale de calitate. Astfel:

- armaturile condensatorului etalon sunt realizate din placi metalice intercalate (confectionate din aliaj special, cu coeficient de dilatare foarte mic, asa cum este invarul), fixate de "masa" (adica ansamblul pieselor metalice în contact electric cu ecranul si carcasa) prin izolatoare din cuart sau alt material stabil din punct de vedere mecanic;

- pentru eliminarea deformarilor (care influenteaza direct stabilitatea în timp), etaloanele de capacitate sunt cu o constructie deosebit de îngrijita, cât mai rigida, cu piese lipsite complet de tensiuni (eforturi) mecanice interne;

- utilizarea unui dielectric gazos (un gaz inert, de obicei azot) uscat, condensatorul fiind închis în cutii ermetizate. Dielectricul gazos se foloseste în cazul etaloanelor cu capacitate mica (C = 1000 pF, 100 pF, 10 pF) si pot atinge performantele de stabilitate de 0,001 %/an, 0,0002 %/°C si tangenta unghiului de pierderi tgd < 510^{-6} (pierderile condensatoarelor cu dielectric gazos se datoresc în special peliculei imperfect conductoare de gaz de pe suprafata armaturilor metalice);

- utilizarea unui dielectric solid de tip mica pentru etaloanele cu capacitati mai mari (C = 1 nF, … 1 µF), cu armaturile intercalate sau cu armaturi în forma de pelicula metalica depusa pe foaia de mica. Condensatoarele etalon cu mica au performantele: 0,001 %/an, 0,003 %/°C, tg*d* = 0,0001;

- utilizarea dielectricului solid de tip stiroflex (polistiren plasticizat) pentru etaloanele cu C = 1 nF, … , 100 µF, care au însa performante ceva mai slabe decât etaloanele cu mica (de exemplu, stabilitatea în timp este de 0,01 , … 0,05 %/an);

- utilizarea unui dielectric solid din cuart topit. Etaloanele de capacitate cu placi de cuart topit, acoperite cu argint sau aur (ca armaturi) si introduse într-o atmosfera neutra (fara contact cu mediul exterior) au performante ridicate ale stabilitatii 10^{-5} %/an, cu clasa de precizie 0,01 si valori ale capacitatii de 10 pF la 100 pF.

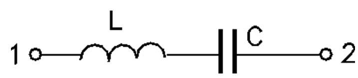


Fig. 1.34

Comportarea condensatoarelor etalon este influentata si de frecventa, datorita (aproape în exclusivitate) inductantei parazite L a sistemului, conform schemei echivalente a etalonului de capacitate la frecvente înalte (fig. 1.34). Daca în curent continuu etalonul are capacitatea C_0, atunci la frecventa f = ?/2p ea este: $C = C_0$ / (1 – ?$^2LC_0$), ceea ce înseamna ca, de la C_0, capacitatea creste cu frecventa, cresterea relativa fiind aproximativ ?$^2LC_0$, pentru frecvente nu prea mari, f = 10 kHz. Relatia precedenta a capacitatii la frecventa f = ?/2p rezulta din reactantele echivalente ale dipolului din figura 1.34: $\frac{1}{j\omega C} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C_0}$ si, înmultind cu j?, $\frac{1}{C} = -\omega^2 L + \frac{1}{C_0}$ si astfel: $C = C_0$ / (1 – ?$^2LC_0$). Pentru a putea fi utilizate la frecvente înalte (de exemplu între 1 MHz si 100 MHz) se realizeaza capacitoare etalon de constructie speciala, care reduce la minimum inductanta parazita (cu conductoare pentru conexiuni de grosime mare în constructie coaxiala) si care elimina capacitatile suplimentare din punctele de conexiune în circuit (cu conector coaxial de precizie, care asigura o repetabilitate a capacitatii conexiunii de 0,001 pF). Precizia acestor condensatoare se înscrie în clasa 0,1, cu o stabilitate în timp de 0,05 %/an si un coeficient de temperatura de 10^{-5} %/°C (deci foarte bun).

1.4.4. Etaloane de inductanta

Etaloanele de inductanta (L) sunt mai putin folosite în masurarile electronice decât etaloanele de capacitate, deoarece ele prezinta o reactanta mai putin pura prin faptul ca au o rezistenta reziduala mare si au o variatie accentuata în functie de frecventa. De aceea, se prefera – ca etalon de reactanta – condensatoarele etalon care, prin metode de rezonanta sau prin etaje de simulare a inductantei (v. subcap. 2.4), pot fi comparate cu orice reactanta inductiva si utilizate cu usurinta si ca etalon al factorului de calitate (Q = ?L/R = 1/?CR daca, la aceeasi rezistenta de pierderi, $|\omega_L| = |\omega_C|$ adica ?L = 1/?C).

Totusi, se realizeaza si bobine etalon sub forme cilindrice, cu înfasurare a firului conductor în straturi suprapuse, pe carcase de marmura, portelan, lemn sau material plastic. Stabilitatea lor în timp depinde de proprietatile mecanice ale carcasei (suportului) si de modul de bobinare ; astfel, bobinele pe carcase de marmura sau de portelan ajung la stabilitati anuale ?L·100 / L?t > 0,01 %/an, cu coeficienti de temperatura ?L·100 / L?? = 0,001%/°C si factor de calitate Q = ?L/R = 20 la frecvente pâna la 1 kHz. Daca în constructia bobinei nu exista vreun material magnetic (cu $\mu_r > 1$), atunci – practic – inductanta bobinei nu depinde de curentul prin bobina (adica este liniara fata de curent).

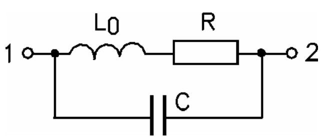


Fig. 1.35

Inductanta bobinei etalon depinde, însa, puternic de frecventa si aceasta din cauza capacitatii distribuite a bobinei, care poate fi echivalata cu o capacitate între borne (asa cum se arata în figura 1.35, unde este reprezentata schema echivalenta a unui inductor).

Inductanta (inductivitatea) L a bobinei la o frecventa oarecare f = ?/2p este data de :

$$L = \frac{L_0}{1-\omega^2 L_0 C}\,, \tag{1.40}$$

unde L_0 este inductanta în curent continuu (la ? = 0), iar C este capacitatea proprie echivalenta (parazita) a bobinei. Egalitatea (1.40) rezulta din expresia reactantei echivalente a circuitului din figura 1.35, în care consideram rezistenta de pierderi R neglijabila în raport cu reactanta ?L_0 (daca factorul de calitate Q = ?L_0/R > 20 atunci R < ?L_0/20); astfel :

$$\omega L = \operatorname{Im}\underline{Z}_{12} = \operatorname{Im}\frac{(R + j\omega L_0)\dfrac{1}{j\omega C}}{(R + j\omega L_0) + \dfrac{1}{j\omega C}}$$

si daca $R << ?L_0$ atunci :

$$\omega L = \mathrm{Im}\frac{j\omega L_0 \frac{1}{j\omega C}}{j\left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C}\right)} = \mathrm{Im}\frac{\frac{L_0}{C}}{j\left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C}\right)} = \mathrm{Im} - j\frac{L_0}{\frac{1}{\omega}\frac{1}{C}\left(\omega^2 L_0 - \frac{1}{C}\right)} \ ,$$

sau :

$$\omega L = -\frac{L_0}{\frac{1}{\omega}\left(\omega^2 L_0 C - 1\right)} \therefore \ L = \frac{L_0}{1 - \omega^2 L_0 C} \ ,$$

adica (1.40). Din (1.40) rezulta ca cresterea relativa a inductantei cu frecventa este aproximativ $?^2 L_0 C$ (deci depinde direct de capacitatea parazita C a bobinei). În practica, o bobina cu $L_0 = 1$ H si $C = 100$ pF are, la 1 kHz , o inductivitate $L = L_0 +$ $+ 0{,}4\ L_0/100$ (deci mai mare cu 0,4 % fata de L_0 în c.c.).

Etaloanele de inductanta cu precizie maxima sunt bobinate pe carcase (suporti) toroidali ; în acest fel, ele au un câmp magnetic exterior nul (deci nu se modifica L prin cuplaje magnetice care produc inductivitati mutuale parazite), în schimb rezistenta lor (R) este de câteva ori mai mare decât a bobinelor cilindrice cu aceeasi inductanta L_0.

La utilizarea etaloanelor de inductanta cu L_0 de valori mici trebuie acordata o atentie speciala conexiunilor care pot introduce o inductivitate parazita comparabila cu L_0; în acest caz este recomandat sa se faca masurari duble (cu si fara bobina, scazându-se inductanta bobinelor din rezultat).

Pentru inductante mai mari ($L > 10$ H) se folosesc bobine cu miez feromagnetic, însa ele au performante slabe: clasa de precizie 0,5 sau 2, cu variatii ale lui L_0 produse de curent de 2 %/A si factor de calitate $Q = 20, \ldots, 500$.