

9

MASURAREA TIMPULUI SI A FRECVENTEI

Desi, în mod paradoxal, notiunea de timp este cu usurinta “utilizata” si “masurarea timpului” pare a fi cea mai simpla operatie, totusi esenta notiunii de timp este mai subtila si are serioase conotatii filozofice.

Semnificatia notiunii de timp a cunoscut ample modificari. Fiind o notiune abstracta – introdusa de oameni pentru mai buna descriere si modelare (matematica) a proceselor naturale – evolutia modului în care s-a încercat sa se *defineasca* timpul (ca si spatiul si energia), în care s-a cautat sa se *interpreteze* si sa se *introduca* în analizele de sistem (rationamente, modelari, calcule etc.), aceasta marime (de o importanta evidenta pentru cunoastere în general si pentru fizica în special) reflecta însasi evolutia gândirii stiintifice si filozofice si – de aceea – chiar si într-un manual de masurari electronice, trebuie macar mentionata.

La început, odata cu mecanica rationala (descrisa de lucrarile lui Galileo Galilei si Isac Newton), timpul – *ca timp al stiintei prerelativiste* – este astfel conceput încât doua evenimente sunt simultane sau într-o anumita succesiune, indiferent de observator (oricare ar fi el), de pozitia sau de miscarea lui; deci, peste tot acelasi “prezent”, “trecut” si “viitor”. Progresul general si – în mod deosebit – progresul tehnicii de experimentare au impus aparitia *teoriei relativitatii*, teorie care modifica substantial conceptul de timp, ca si cel de spatiu. Interdependenta între timp si spatiu este redefinita prin intermediul miscarii, în afara careia timpul nu poate fii conceput; deci, nu se poate ajunge la notiunea de timp decât prin intermediul *transformarilor*. Astfel, timpul este conceput ca “masura si consecinta a transformarii”, o abstractizare a “miscarii generale”. Prin urmare, timpul este definit ca masura a transformarilor, iar variabila la care se face apel spre a-l reprezenta este numai o maniera de exprimare a acestei transformari; de aceea, pentru un observator ce nu constata nici un fel de transformare, notiunea de timp își pierde sensul (adica timpul dispare).

În acest context, timpul este o marime fizica prin care se pot descrie modificarile (transformarile) succesive pe care le au marimile de stare ale unui sistem fizic si prin care se pot determina (“marca” sau “data”) aparitia sau disparitia evenimentelor din sistem, diferenta dintre datele de disparitie si aparitie a evenimentelor reprezentând “*durata*” lor (durata definind un “*interval de timp*”). În modelarea transformarilor unui sistem fizic, timpul apare ca o marime matematica scalara pozitiva, un continuu unidimensional fara frontiere, etern si ireversibil, ale carui elemente sunt *momentele* asociate claselor de evenimente simultane, fiecare moment fiind complet determinat în raport cu un *moment origine* dat printr-o

singura coordonata scalara, numita de asemenea timp, formându-se ceea ce se numeste o *scara a timpului*.

Timpul este fara început si fara sfârșit, adica nu are momente-frontiera; procesele fizice (“obiective”) se desfasoara în timp dinspre anterior spre ulterior (“trecut”, “prezent” si “viitor”). Matricea timpului este bazata pe egalitatea duratelor. În fizica prerelativista, timpul este considerat un continuum unidimensional cu metrica absoluta, independenta de sistemele de referinta în raport cu care se efectueaza masurarea duratelor si independenta de procesele fizice care se desfasoara în timp. Transformarea timpului se face conform relatiei lui Galilei:

$$t' = t + t_0$$

si presupune cel mult o schimbare a originii.

În teoria relativitatii restrânse, timpul si spatiul formeaza un continuum cuadridimensional pseudoeuclidian (caci, alaturi de cei trei scalari ce definesc spatiul tridimensional, se mai adauga înca unul – cel al timpului) a carei metrica este determinata de invarianta intervalului de univers în raport cu schimbarea sistemelor de referinta inertiiale, relatiile de transformare fiind date de transformarea Lorentz:

$$t' = \left(t - \frac{\vec{v}}{c_0^2} \vec{r} \right) \left(1 - \frac{v^2}{c_0^2} \right)^{1/2} + t_0,$$

în care: t' este timpul într-un sistem de referinta inertial (S') în translatie uniforma cu viteza $\vec{v}$ fata de un alt sistem inertial (S); $\vec{r}$ – vectorul de pozitie a punctului în care a avut loc evenimentul la care se refera timpul; c_0 – viteza de propagare a luminii în vid. În aceasta teorie simultaneitatea evenimentelor din puncte diferite si durata dintre doua evenimente ce se produc succesiv în acelasi punct din spatiu sunt relative (în sensul ca ritmul de curgere a timpului este diferit de la un sistem de referinta la altul si este cu atât mai lent cu cât sistemul de referinta în care se produc evenimentele se misca mai repede fata de sistemul de referinta în care se masoara duratele).

În teoria relativitatii generale, timpul formeaza împreuna cu spatiul un continuum cuadridimensional pseudoriemannian a carui metrica este determinata de un tensor (ce depinde de proprietatile gravifice si inertiiale din univers).

Unitatea de timp este secunda, cu submultipli zecimali (ms, μ s, ns) si cu multipli ca: minutul (min), anul, secolul, mileniul.

Marimea primitiva asociata timpului este secunda – unitate de masura fundamentala S.I. –, ce s-a definit la a XIII-a Conferinta Generala de Masurari si Greutati din 1967, ca fiind egala cu 9 192 631 770 perioade ale emisiei corespunzatoare tranzitiei unui electron al atomului de cesiu 133 între doua nivele energetice hiperfine ale starii fundamentale.

Starea fundamentala a atomilor de cesiu 133 contine doua nivele energetice, hiperfine, degenerate, atomii structurii plasându-se în numar egal pe cele doua nivele energetice, în conditii normale. În cazul stimulării atomilor cu radiatie electromagnetica, o parte din atomi efectueaza tranzitii de pe nivelul energetic

superior W_{sup} pe nivelul energetic inferior W_{inf} , cu emiterea unei radiatii electromagnetice cu frecventa:

$$f = (W_{sup} - W_{inf})/h \quad (9.1)$$

unde h este diferenta celor doua niveluri hiperfine: $h = (4 \text{ sau } 3) J_s$, iar o alta parte efectueaza tranzitia de la W_{inf} la W_{sup} pe seama aportului energetic furnizat de radiatia stimulatora (motiv pentru care se impune ca radiatia stimulatora sa aiba frecventa stabilita de relatia de mai sus, altfel spus sa aiba perioada de tranzitie a atomilor dintre cele doua stari).

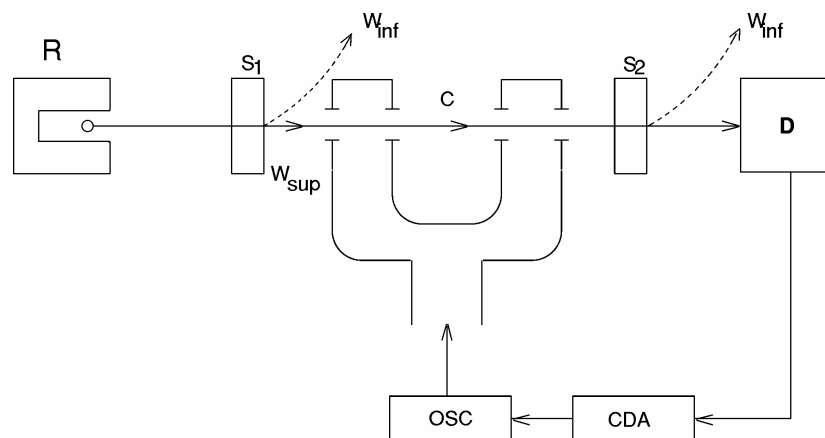


Fig. 9.1

Etalonul atomic de cesiu 133, reprezentat schematic în figura 9.1, are în componența următoarele blocuri funcționale:

R – rezervor de cesiu 133;

S – selectoare de stare energetică ce au rolul de a genera un câmp magnetic intens care să devieze de la traiectoria rectilinie atomii a căror nivel energetic este W_{inf} ;

C – cavitate de înaltă frecvență în care acced numai atomii situați pe nivelul energetic W_{sup} , permițând stimularea atomilor cu radiație electromagnetică;

D – detectorul de atomi ce are rolul de a furniza un semnal de comandă proporțional cu numărul de atomi;

CDA – circuit de comandă ce stabilește valoarea frecvenței pe care o va genera oscilatorul OSC în funcție de valoarea furnizată de detectorul D .

Structura din figura 9.1 reprezintă un sistem automat de reglare după abatere a frecvenței oscilatorului OSC la valoarea frecvenței de tranziție a atomilor de cesiu 133 între cele două nivele degenerăte ale stării fundamentale. În condițiile în care cele două frecvențe sunt egale, radiația de stimulare determină tranziția tuturor atomilor la nivelul energetic W_{inf} (pentru că în cavitate, datorită selectorului $S1$, erau numai atomi având nivelul W_{sup} , neexistând tranziții de la W_{inf}) și detectorul nu primește nici un atom, deci nu modifică semnalul de comandă al oscilatorului,

iar frecventa acestuia ramâne la valoare constanta. Abaterea valorii frecventei oscilatorului de la valoarea frecventei de tranzitie lasa în cavitate atomii situati pe nivelul energetic W_{sup} ce ajung la detector, care la rândul sau va pune în functiune sistemul de reglare, având ca rezultat corectarea valorii frecventei generate de OSC.

Etalonul atomic de cesiu 133 determina Scara de Timp Atomic International (TAI). De notat ca exista înca multe alte scari de masurare a timpului, de cele mai multe ori în conexiune cu rotatia Pamântului: Timpul Universal Coordonat (TUC), Timpul Legal (TL), Timpul Sideral (TS), Timpul Efemeridelor (TE) s.a. – v. STAS 3331/74.

Frecventa este o marime derivata, asociata fenomenelor (semnalelor) cu variatie periodica în timp, definita prin intermediul relatiei:

$$f = \frac{1}{T} , \quad (9.2)$$

în care T este perioada semnalului.

Perioada T a unui semnal se defineste ca fiind intervalul de timp pentru care este îndeplinita egalitatea:

$$u(t) = u(t + kT) , \quad (9.3)$$

unde k este un întreg, oricare ar fi momentul de timp t , exprimând faptul ca dupa un numar întreg de timp T (oricare ar fi acesta) semnalul are aceeasi valoare ca la momentul de pornire.

Frecventa se exprima în Hz (hertz); semnalul cu frecventa de 1 Hz având perioada de repetitie de o secunda.

9.1. MASURAREA TIMPULUI

Masurarea timpului înseamna întotdeauna masurarea unui *interval de timp* dintre doua momente, doua repere – originea si momentul final – de pe scara timpului, adica a *duratei*.

Orice instrument de masurare a timpului are în componenta un etalon de timp (care este totodata si etalon de frecventa) pentru a genera unitatea de timp (secunda sau un submultiplu). Majoritatea instrumentelor de masurat a timpului utilizeaza etalonul cu cuart si în cazul în care se impune o precizie ridicata a cuantei de timp se folosesc etaloane atomice (cu cesiu 133, cu hidrogen sau cu rubidiu). Stabilitatea frecventei generate pe un interval de ordinul orelor este comparabila pentru cele doua etaloane, dar pe termen lung stabilitatea etalonului cu cristal de cuart este mai mica decât stabilitatea etalonului atomic. În cazul aparatelor la care precizia este un atribut secundar, etalonul poate fi un simplu oscilator electronic sau se recurge chiar la utilizarea tensiunii de alimentare alternativa pentru formarea unitatii elementare de timp.

9.1.1. Orologiul

Este un aparat cu functionare continua destinat sa indice timpul (mai corect sa dateze evenimentele) cu pasul de o secunda (uneori cu pasul de o zecime de secunda), conform unei scari de timp, de cele mai multe ori scara de timp fiind asociata unui loc geografic. Spre exemplu Scara de Timp Legal din România este data de Timpul Universal Coordonat majorat cu doua ore, unde prin Timpul Universal Coordonat se înțelege Timpul Atomic International la care, la 1 ianuarie a fiecarui an, se adauga un numar variabil de secunde, pentru a realiza corelarea acestuia cu rotatia Pamântului (reprezinta asa-numitul *timp al meridianului Greenwich*).

Generarea secunde se face mecanic sau cu ajutorul unui etalon de timp a carui frecventa este divizata pâna la valoarea de 1 Hz. În cele mai multe aplicatii se utilizeaza un etalon de timp cu quart. Uneori oscilatorul (etalonul de timp) nu este încorporat în aparat, acesta primind semnalul de sincronizare din exterior, spre exemplu de la rețeaua de tensiune alternativa de alimentare a aparatului (în Europa, unde frecventa tensiunii este de 50 Hz, aparatul primește o tensiune sinusoidală, din care se formeaza impulsuri cu perioada de 20 ms).

Etalonul cu quart se compune dintr-un oscilator electronic pilotat cu cristalul de quart functionând la frecvente de ordinul MHz-lor, în cascada cu un divizor al frecventei, numarator de impulsuri si un element de afisare. Pentru cresterea stabilitatii frecventei se recurge la termostatarea incintei oscilatorului si la stabilizarea atenta a tensiunii de alimentare a montajului, ceea ce conduce la o crestere a coeficientului de stabilitate cu 4 ordine de marime.

Orologiile din clasa bunurilor de larg consum, cu dimensiuni suficient de mici pentru a fi purtate, se întâlnesc sub numele de **ceas**. Considerând modul în care functioneaza etalonul de timp încorporat ceasului, acesta poate fi mecanic, electromecanic sau electronic.

Ceasul mecanic are în componenta un circuit astabil mecanic (realizat cu o roata dintata, un balansier si doua arcuri spiralate) si un sistem de transmisie cu doua roti dintate a miscarii la indicatoarele de secunda, minut si ora. Energia mecanica a arcului principal permite functionarea continua a mecanismului pentru un interval de 36 sau 48 de ore.

Ceasul electromagnetic are în componenta un electromagnet actionat cu o baterie (de regula cu tensiunea electromotoare de 1,5 V) care înlocuieste arcul principal al ceasului mecanic, indicarea timpului putând fi mecanica si numerica. Energia bateriei este suficienta pentru functionarea continua pe un interval de 1, ..., 2 ani.

Ceasul electronic are în componenta un oscilator pilotat cu cristal de quart, notat OSC în schema bloc din figura 9.2, care functioneaza pe frecventa de 1 MHz, 5 MHz sau 10 MHz. Frecventa oscilatorului este divizata, cu un circuit de numarare DIVIZARE, pâna la valoarea secunde.

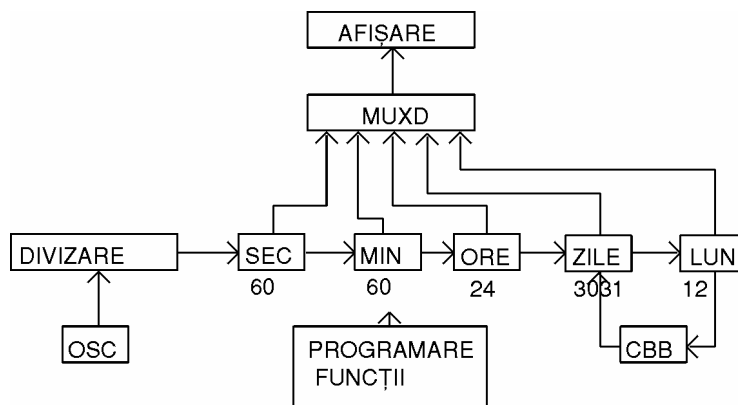


Fig. 9.2

De notat ca toate blocurile functionale din figura 9.2, mai puțin circuitul de afisare, sunt incluse într-un singur circuit integrat. Semnalul corespunzător secunde acționează un lanț de numărătoare cascade, notate *SEC*, *MIN*, *ORE*, *ZILE*, *LUNI* în figura 9.2, a căror capacitate este indicată dedesubtul blocului corespunzător. Numărătorul asociat determină limita de numărare pentru *ZILE*, stabilind-o la valoarea 31 și apoi la valoarea 30. Se remarcă faptul că nu se ia în considerare lungimea lunilor februarie și august, ceea ce impune efectuarea de corecții manuale.

Circuitul de *PROGRAMARE FUNCȚII* permite înscrierea valorilor de pornire în numărătoare, programarea unor numărătoare (nefigurate în schema bloc) de alarmare, schimbarea indicației sonore de atenționare privind ora exactă ș.a.

Circuitul integrat din componenta ceasului îndeplinește și alte funcții legate de vandabilitatea produsului, spre exemplu are și funcția de calculator de buzunar. Pe schema din figura 9.2 *MUXD* reprezintă un multiplexor cu decodare, iar *CBB* un circuit basculant bistabil.

9.1.2. Cronometrul

Este un orologiu prevăzut cu un buton de *START* care porneste oscilatorul din condiții initiale nule și un buton de *STOP* care blochează funcționarea oscilatorului fără ca afișajul să fie afectat (memorează ultima indicație). Oscilatorul din componenta cronometrului utilizează un cristal de cuarț care asigură o stabilitate ridicată a frecvenței.

Cronometrele sunt, de fapt, aparate destinate măsurării intervalelor de timp (a duratelor). Cronometrele electronice digitale, cele mai utilizate, pot măsura intervale de timp cu eroare de ± 1 ns (adică $\pm 10^{-9}$ secunde!).

Schema de principiu a unui cronometru electronic digital este aratăată în figura 9.3, în care: *HQR* este un oscilator cu cuarț, *DIV* – un divizor și multiplicator

de frecventa, *AI* – doua amplificatoare formatoare de impulsuri, *CBB* – circuit basculant bistabil, *P* – poarta si *NUM* – numarator în decade si *EA* – ecran de afisare luminos (cu *LED*-uri sau cu cristale lichide).

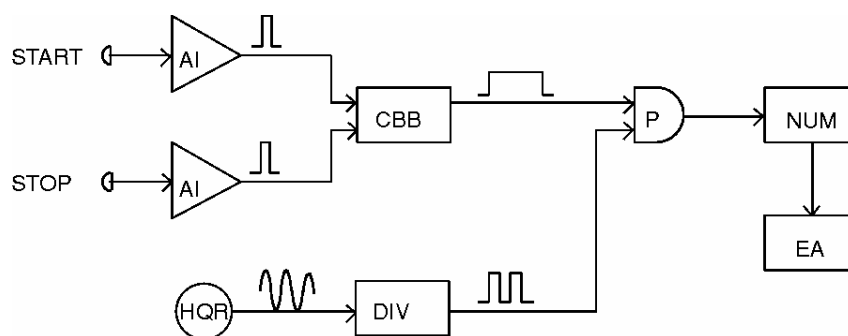


Fig. 9.3

Eroarea relativa de masurare de timp este data de relatia :

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} = \pm \frac{1}{tf} \pm A \pm e \quad (9.4)$$

si dupa cum se vede depinde de frecventa oscilatorului f , de eroarea A de declansare a circuitului basculant bistabil si amplificatoarelor asociate butoanelor de *START* / *STOP* si de eroarea relativa e a frecventei oscilatorului cu quart. Termenul tf reprezinta numarul afisat, iar inversul acestui termen este eroarea de afisare (de un digit).

În conditiile unei frecvente a oscilatorului de 500 MHz, cronometrul asigura o precizie de 2 ns, iar daca sistemul de masurat poate efectua interpolarea rezultatelor mai multor masurari eroarea scade de la 2 ns la 0,1 ns.

9.1.3. Cronograful

Este un aparat ce are în componenta un orologiu cuplat cu un sistem de înregistrare (sau de memorare) a indicatiilor orologiului si un circuit logic care comanda înregistrarea timpului. Circuitul logic primește la intrare informatii (sub forma unor stari de contact sau sub forma unor valori analogice) si decide înscrierea timpului, împreuna cu date de identificare a evenimentului conform unei logici cablate. Spre exemplu, cronograful poate supraveghea starea traductoarelor dintr-un proces tehnologic, înregistrând momentul de timp la care un parametru al instalatiei a intrat în avarie si momentul de timp la care parametru a revenit la starea normala, în scopul calculelor privind fiabilitatea sau în scopul determinarii elementului care scade fiabilitatea ansamblului etc.

9.2. MASURAREA FRECVENTEI

Aparatele destinate indicarii frecventei semnalelor periodice în timp pot fi încadrate, pe baza categoriei de prelucrare, fie în clasa aparatelor analogice, fie în clasa aparatelor numerice.

Masurarea numerica a frecventei consta în numararea, într-un interval de timp precizat, a perioadelor semnalului analogic prezent la intrare. Sunt prevazute, în acest scop, cu circuite electronice de adaptare a semnalelor analogice în gama de lucru a blocurilor de prelucrare, circuite de comanda a functiilor si circuite de interfata cu rolul de conversie a semnalului analogic în semnal numeric.

Aparatele analogice de masurat a frecventei semnalelor nu numara nimic (cu toate ca, uneori, sunt prevazute cu circuite de afisare numerica a valorii masurate), cel mult integreaza marimea prezenta la intrare. Au la baza fenomene fizice care sa determine un semnal analogic, care sa poata fi indicat continuu, proportional cu frecventa semnalului supus masurarii.

Se considera necesar a enunta principalele metode de masurare analogica a frecventei din doua motive. Mai întâi pentru ca s-ar putea întâlni aparate fabricate acum 20, ..., 30 de ani care înca sa functioneze si în al doilea rând pentru ca vechile principii de construire a aparatelor pot constitui sugestii pentru noi aparate, utilizând tehnologii electronice actuale, cu performante ridicate.

Metodele de masurare analogica a frecventei pot fi:

- directe, caz în care se utilizeaza proprietatea reactantei unui circuit de a se modifica cu valoarea frecventei semnalului de alimentare, aici încadrându-se metodele de încărcare / descarcare a condensatoarelor, metoda circuitelor aduse la rezonanta si metoda puntilor de curent alternativ;

- de comparatie, caz în care se recurge la compararea frecventei semnalului aplicat la intrarea aparatului cu frecventa unui semnal intern, aici încadrându-se metoda figurilor Lissajous, metoda heterodinarii si metoda oscilatorului de transfer.

În continuare sunt prezentate câteva din metodele de masurare analogica a frecventei cu cea mai mare posibilitate de a fi întâlnite în aparate înca în uz.

9.2.1. Masurarea frecventei cu circuit rezonant

Se bazeaza pe faptul ca un circuit LC (cu bobina si condensator) are frecventa oscilatiilor libere (de rezonanta) data de formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (9.5)$$

Aparatele indicatoare a frecventei care au în componenta circuite LC sunt prevazute cu sisteme care sa modifice parametrii L sau C (sau ambii) asa fel încât frecventa de rezonanta sa fie egala cu frecventa semnalului u_i supus masurarii. În conditii de rezonanta tensiunea u_c la bornele condensatorului din figura 9.4,a atinge valoarea maxima în raport cu frecventa semnalului din primarul transformatorului.

Selectivitatea circuitului, exprimând variația u_c a tensiunii de pe condensator, atunci când frecvența semnalului de intrare este diferită de frecvența de rezonanță a circuitului, este cu atât mai mare cu cât factorul de calitate Q al circuitului, definit prin relația (9.6), are o valoare mai mare, conform figurii 9.4,b:

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{L}{R} \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}. \quad (9.6)$$

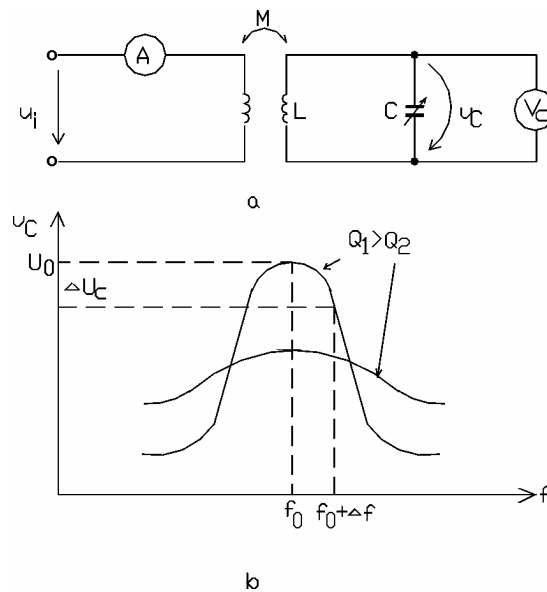


Fig. 9.4

Se impune creșterea selectivității circuitului pentru ca să poată fi stabilit cu precizie maximul tensiunii de pe condensator, ceea ce asigură micșorarea erorii determinării frecvenței tensiunii u_i . În acest scop, se recurge la micșorarea rezistenței circuitului (conexiuni cu conductor de lungime minimă și de secțiune mare), utilizarea de capacități de calitate și la cuplarea slabă a circuitului oscilator cu generatorul de semnal a cărui frecvență se determină (inductivitatea de cuplaj de valoare mică determină reflectarea în circuitul LC a unei rezistențe mici).

Pentru a aduce la rezonanță circuitul, se modifică valoarea capacității condensatorului variabil C până ce se obține un maxim al valorii tensiunii indicate de voltmetrul notat V_C în figura 9.4,a.

Axul condensatorului este cuplat mecanic cu acul indicator de pe scala de măsură a valorii frecvenței. Dacă funcția de variație a capacității este liniară, scala de măsură este neliniară (deoarece capacitatea este la numitorul expresiei frecvenței de rezonanță); liniarizarea scalei de indicare a frecvenței se face realizând constructiv condensatorul cu o variație a capacității care să compenseze neliniaritatea.

Creșterea clasei de precizie a aparatului, în condițiile scaderii impreciziei de stabilire a rezonanței circuitului LC (prin detectia indicației maxime a voltmetrului),

pe lângă măsurile enunțate anterior, impune utilizarea de voltmetre electronice (cu impedanță mare de intrare) pentru măsurarea tensiunii de pe condensator.

Uneori se recurge la notarea a două valori de frecvență pentru care voltmetrul indică aceeași tensiune (de-o parte și de alta a maximului) și se considera, ca frecvență a semnalului, media aritmetică a celor două determinări.

În aceste condiții clasa de precizie a aparatului este în domeniul 0,1...2.

Dacă scara instrumentului este gradată în unități ale lungimii de undă:

$$\lambda = c / f ,$$

aparatul se întâlnește sub numele de *undametrul*.

Există aparate de determinare a frecvenței la care rezonanța circuitului este indicată de un microampermetru (minimul curentului), plasat în circuitul primar al transformatorului. Frecvențmetrul cu această construcție este “cu absorbție” și se întâlnește sub numele de “*grip-dip-metru*”.

Realizarea bobinei și condensatorului cu elemente de circuit discrete determină frecvențe de oscilație reproductibile de până la 500 MHz. Pentru frecvențe mai mari, valorile capacității și inductivității sunt foarte mici, ceea ce face necesar să fie luate în calcul și valorile elementelor de circuit parazite (inductivitățile și capacitățile firelor de conexiune, capacitățile dintre terminalele elementelor) care sunt necontrolabile și variază cu temperatura și umiditatea imprevizibil, motiv pentru care se limitează domeniul de utilizare a circuitelor oscilante până la frecvența de 500 MHz.

În cazul frecvențelor mai mari se renunță la circuitele oscilante cu elemente de circuit discrete și se utilizează elemente de circuit distribuite (linii) sau cavități rezonante.

Frecvențmetrele realizate cu *linii coaxiale* (două circuite fiind prezentate în figura 9.5) asigură o clasă de precizie de 0,05 pentru frecvențe din domeniul 0,5 MHz, ..., 10 GHz.

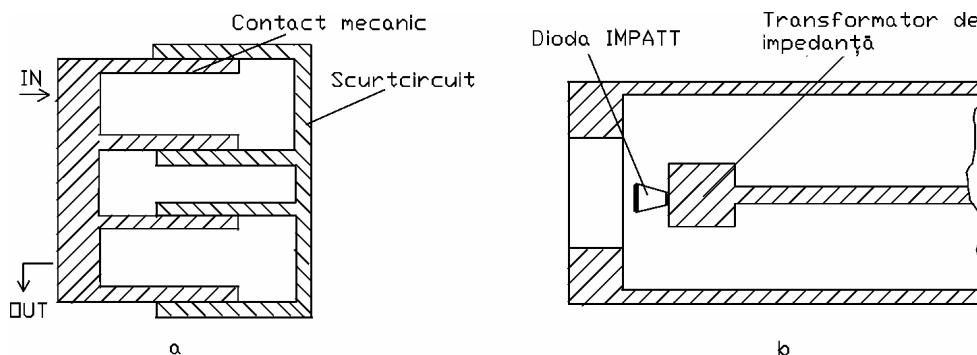


Fig. 9.5.

Elementele din figura 9.5 reprezintă: *a* – linie coaxială cu elemente de scurtcircuitare și *b* – linie coaxială cu dioda IMPATT.

Elementele active de circuit din componenta oscilatoarelor cu linii coaxiale sau cu cavități rezonante prezintă o caracteristică statică, având o zonă în care

rezistenta echivalenta a caracteristicii statice este negativa (dioda *IMPATT* si dioda *GUNN*), ceea ce înseamna ca pot fi caracterizate, pe acel domeniu, prin rezistenta negativa R_0 si prin inductivitatea X_0 .

Conditiiile de oscilatie se refera la anulara reactantei totale a circuitului ($X_1 + X_e = 0$, unde X_e contine reactantele exterioare dispozitivului) si la egalarea partii rezistive a circuitului R_e de rezistenta negativa R_0 .

Prima conditie determina frecventa de rezonanta, iar cea de-a doua impune restrictii privind componenta circuitului pentru ca acesta sa poata functiona în regim de generator de oscilatii.

În cazul frecventelor cu valori mai mari decât 10 GHz se utilizeaza aceleasi dispozitive semiconductoare dar se înlocuieste linia cu o cavitate rezonanta.

Cavitatea rezonanta, din figura 9.6,a, este de fapt un cilindru cu capac în interiorul caruia se gaseste un piston de acord actionat de un surub. Modificarea pozitiei pistonului determina modificarea frecventei de oscilatie a cavitatii rezonante. Într-o laterala a cilindrului este practicata o diafragma (de sectiune circulara sau dreptunghiulara) care asigura cuplarea la ghidul de unda în care se gaseste elementul activ de circuit (în cazul figurii 9.6,b – dioda *IMPATT*).

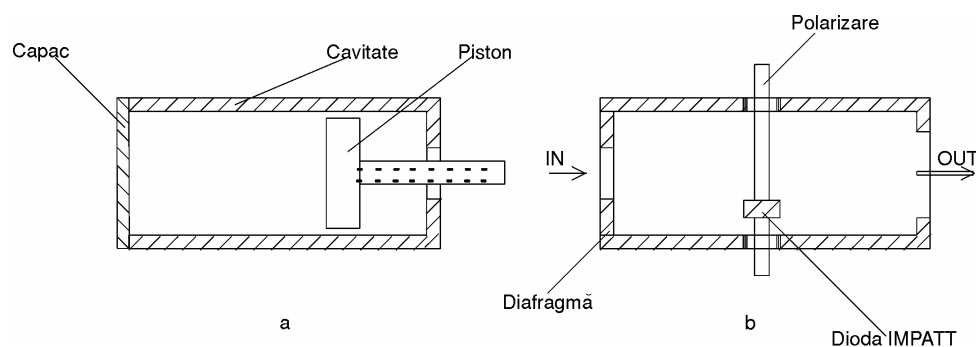


Fig. 9.6

Frecventa de oscilatie a cavitatii depinde de temperatura si umiditatea gazului cuprins în cavitate, motiv pentru care se recurge la etansarea si la termostatarea incintei. În aceste conditii se obtine o stabilitate relativa a frecventei de 10^{-5} .

9.2.2. Masurarea frecventei cu puncti de curent alternativ

Masurarea frecventei cu ajutorul punctilor de curent alternativ este o metoda de zero, în sensul ca se modifica unul din elementele puntii pâna când curentul prin diagonala puntii se anuleaza. Conditia de echilibru a puntii (curentul prin diagonala nul) se exprima în functie de impedantele complexe ale bratelor prin relatia:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4, \quad (9.7)$$

în care impedantele din bratele opuse sunt notate unele cu indice par si celelalte cu indice impar. O conditie echivalenta a echilibrului puntii consta în anulara tensiunii

din diagonala puntii. Presupunând ca instrumentul de masurat are o impedanta foarte mare, tensiunea de dezechilibru a puntii poate fi calculata cu relatia:

$$\Delta U = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_4)(Z_2 + Z_3)} U, \quad (9.8)$$

care conduce la aceeasi conditie de echilibru privind impedantele ca si anularea curentului prin diagonala puntii, data de relatia (9.7).

Conditia de echilibru a puntii este o relatie în complex, ceea ce înseamna ca trebuie sa se anuleze atât partea reala cât si partea imaginara, motiv pentru care echilibrarea puntii de curent alternativ se face cu ajutorul a doua elemente de circuit variabile. În functie de tipul impedantelor din bratele puntii si de elementele utilizate pentru a aduce puntea la echilibru s-au conceput foarte multe scheme de punti de curent alternativ, dar în cadrul aparaturii pentru masurarea frecventei s-au impus numai câteva, doua dintre acestea fiind prezentate în figura 9.7 (*a* – schema de principiu si *b* – schema variantei Wien Robinson).

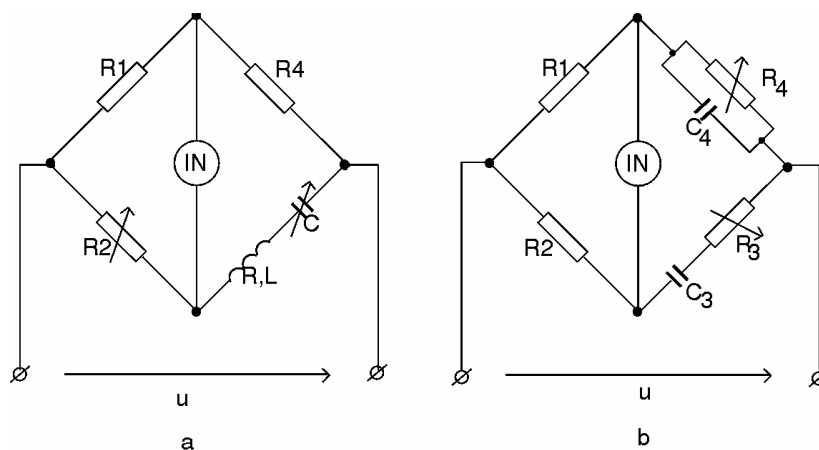


Fig. 9.7

În cazul puntii de rezonanta conditia de echilibru a puntii determina relatiile:

$$R_3 = \frac{R_2 R_4}{R_1} \quad \text{si} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Rezistenta R_3 nu este un rezistor ci este data de rezistenta conductorului cu care s-a realizat inductanta L . Valoarea acesteia este compensata cu ajutorul rezistorului R_2 . Practic se modifica valoarea rezistentei R_2 pâna la minimul tensiunii de dezechilibru, dupa care se ajusteaza valoarea capacitatii C . Procesul se reia pâna nu se mai sesizeaza scaderea valorii tensiunii din diagonala puntii.

Conditia de echilibru a puntii Wien Robinson, din figura 9.4,b, conduce la relatia:

$$\frac{R_3}{R_4} + \frac{C_4}{C_3} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Pentru comoditatea reglajelor si calculelor, puntea se construiesc în asa fel încât elementele de circuit sa îndeplineasca relatiile:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}},$$

$$R_2 = 2R_1, C_3 = C_4 = C, R_3 = R_4 = R,$$

când frecventa tensiunii de alimentare a puntii se calculeaza cu relatia:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Se remarca avantajul acestei puni fata de puntea de rezonanta prin faptul ca elementele de reglaj R_3, R_4 se pot modifica similar (cu conditia ca valorile celor doua rezistoare sa ramâna în permanenta egale). De fapt se utilizeaza un potentiometru care pe aceleasi ax are doua sectiuni separate, una pentru rezistorul R_3 si cealalta pentru rezistorul R_4 . Domeniul de frecventa se schimba decadic prin înlocuirea simultana a capacitatilor $C_3 = C_4$. Masurarea cu puni de curent alternativ a frecventei asigura o clasa de precizie a aparatului din domeniul 0,01...0,2 de la 10 Hz la 1 MHz.

9.2.3. Masurarea frecventei cu metode de comparatie

Metoda heterodinarii este o metoda de comparare a frecventei necunoscute f_x cu frecventa f_0 cunoscuta a unui oscilator intern. Compararea celor doua frecvente se face, de regula, prin scaderea din semnalul de frecventa necunoscuta a semnalului

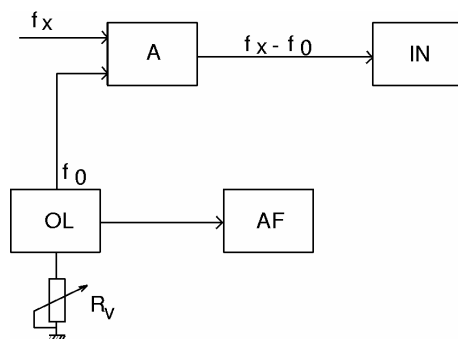


Fig. 9.8.

furnizat de un oscilator local OL (scaderea se face în etajul de amestec notat cu A în figura 9.8). Rezistorul R_v , din schema (fig. 9.8), indica faptul ca frecventa oscilatorului se modifica (manual sau automat) pâna când frecventa semnalului furnizat de oscilator devine egala cu frecventa semnalului supus masurarii. Se afiseaza în permanenta, cu circuitul AF , frecventa oscilatorului local.

Sesizarea egalitatii celor doua frecvente (f_x si f_0) se face cu ajutorul

indicatorului de nul IN care poate fi o casca, un aparat magnetoelectric sau un sistem electronic de modificare automata a frecventei oscilatorului intern. Metoda heterodinarii se numeste si a batailor pentru ca în casca se va percepe un semnal de joasa frecventa ($f_x - f_0$) a carui perioada creste (bate din ce în ce mai rar) pe masura ce f_0 se apropie tot mai mult de frecventa necunoscuta. Când cele doua frecvente sunt egale, avem “batai nule”.

În cazul aparatului magnetoelectric acul indicator al instrumentului va oscila la intervale din ce în ce mai mari. Avem indicatie a aparatului indicator IN pentru diferenta a frecventelor de 16 kHz în cazul utilizarii unei casti, iar daca se utilizeaza un aparat magnetoelectric acesta reactioneaza numai daca cele doua frecvente sunt foarte apropiate (la diferenta de maximum 4 Hz).

Etajul de amestec A este realizat cu un element neliniar de circuit, a carui caracteristica statica curent-tensiune poate fi exprimata, de cele mai multe ori, printr-o ecuatie de forma:

$$I = a u^2.$$

La intrarea etajului de amestec se aplica suma celor doua tensiuni, de frecvente f_x si f_0 :

$$U = U_1 \sin(\omega_x t) + U_2 \sin(\omega_0 t),$$

care determina un curent conform caracteristicii statice, descris de ecuatie:

$$I = a[U_1^2 + U_2^2 - U_1^2 \cos(2 \omega_x t) + 2U_1 U_2 \cos(\omega_x t - \omega_0 t) + \\ + 2U_1 U_2 \cos(\omega_x t + \omega_0 t) - U_2^2 \cos(2 \omega_0 t)]/2.$$

Curentul I , pe lânga componenta de curent continuu, va contine semnale de frecventa înalta $2 f_x$, $2 f_0$, $f_x + f_0$ si de frecventa joasa $f_x - f_0$. În cazul în care IN este un circuit de acord a frecventei OL , acesta va fi precedat de un filtru trece jos care sa elimine componentele de frecventa înalta. Daca se utilizeaza casca sau aparatul neelectronice, nu mai este nevoie de filtre, pentru ca acestea elimina frecventele înalte prin intermediul caracteristicii proprii de frecventa. Exista variante ale schemei de principiu din figura 9.8, care sunt enuntate în continuare:

- în cazul frecventelor f_x de valoare mare se recurge la multiplicarea frecventei f_0 cu un factor N ;
- oscilatorul local genereaza frecventa variabila la care se adauga o frecventa constanta f_{01} (spre exemplu $f_{01} = 1$ MHz), ceea ce face ca indicatorul de nul IN sa fie proiectat pentru a furniza semnul de egalitate atunci când diferenta între f_x si f_0 este egala cu f_{01} ;
- etajul de amestec A nu este atacat direct de frecventa f_x ci de o frecventa translatata la valori mai mici. Practic, din f_x necunoscuta se scade o frecventa constanta f_1 , asa încât la intrarea etajului de amestec se aplica diferenta. Precizia masurarii creste dar se complica etajul de afisare care trebuie sa faca retranslatarea.

9.2.4. Masurarea numerica a frecventei

Aparatele destinate masurarii numerice a frecventei, a caror schema bloc este prezentata în figura 9.9, au în componenta un numarator universal *NR*, un generator de impulsuri numit “baza de timp” *BT*, circuite *CI* având rolul de adaptare a semnalelor analogice si de conversie în semnale cu doua stari (numerice), o poarta logica *P*, un circuit *CF* de selectare a functiilor si un circuit *AF* de afisare a rezultatului masurarii. Acelasi aparat (fig. 9.9) poate fi utilizat si la masurarea intervalelor de timp.

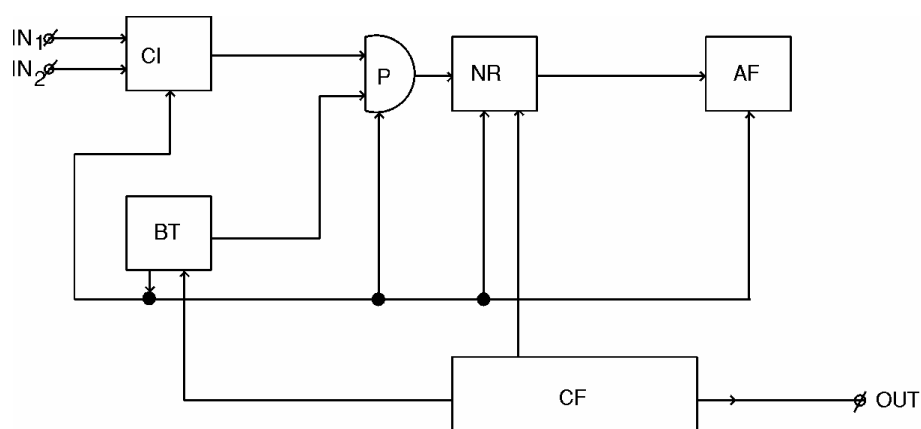


Fig. 9.9

Deoarece $fT = 1$, atunci atât aparatele destinate masurarii frecventei cât si aparatele pentru masurarea intervalelor de timp au aceeași schema structurală, motiv pentru care în schema din figura 9.9 este prezent un comutator al funcțiilor *CF*, având rolul de a acționa asupra circuitului poarta, de a modifica frecvența bazei de timp si de a comuta circuitele de intrare în funcție de mărimea prezentă la intrarea aparatului.

Aparatul numeric universal poate funcționa în următoarele regimuri:

- masurarea frecvenței semnalelor periodice în timp;
- indicarea raportului frecvențelor a doua semnale, aplicate la intrările IN_1 , IN_2 ;
- masurarea perioadei unui semnal;
- masurarea duratei de timp a unui impuls;
- indicarea intervalului de timp dintre prezenta unui impuls la intrarea IN_1 și apariția unui impuls la intrarea IN_2 (decalajul de timp între doua semnale);
- indicarea valorii medii a perioadei unui semnal;
- furnizarea la ieșirea *OUT* (v. fig. 9.9) a semnalului generat de baza de timp;
- furnizarea la ieșire a unui semnal cu frecvență divizată față de frecvența semnalului prezent la intrarea aparatului;
- furnizarea la ieșire a unui semnal numeric, într-un cod oarecare (de cele mai multe ori se utilizează codul binar), a rezultatului masurării.

De aceea, un astfel de aparat se întâlnește sub numele de **numarator universal**, iar în cazul în care îndeplinește numai funcții referitoare la frecvența semnalului se numește **frecventmetru**.

Circuitele de intrare ale numaratorului universal au ca funcție principală conversia semnalului analogic, aplicat la intrarea aparatului, în semnal digital care să poată fi prelucrat de lanțul de măsurare. În acest scop, au în componența circuite basculante în regim de trigger, care generează semnal logic atunci când tensiunea prezentă la intrare depășește valoarea pragului superior – semnal logic pe care îl păstrează la ieșirea circuitului până când tensiunea coboară sub valoarea pragului inferior. În cazul în care cele două praguri de basculare sunt egale, valoarea comună se numește prag de declanșare și pentru modificarea pragului (care, în fond, este un nivel de tensiune) se utilizează un potentiometru.

Așa cum se arată în figura 9.10, circuitul de intrare *CI* are – în principiu – schema: *A* – amplificatoare, *LIM* – limitator de nivel, *DEC* – circuit de modificare în decade a amplificării lui *A*, *TG* – trigger, *R_v* – potentiometru pentru reglarea tensiunii de ieșire din *A* și *P* – potentiometru pentru reglarea nivelelor impulsurilor *N* la nivelele *PJ*(jos) și *PS*(sus).

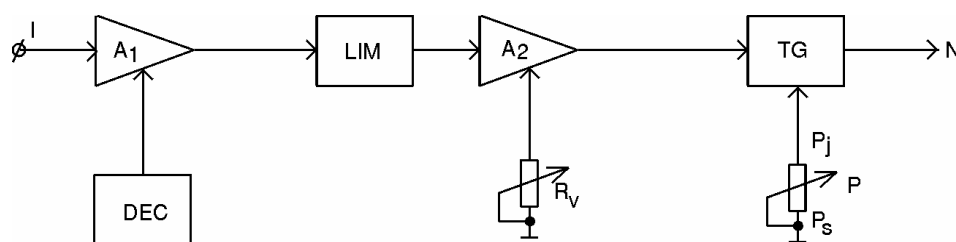


Fig. 9.10

În amonte ale circuitului basculant se găsește un circuit de amplificare a semnalului analogic pentru ca valorile de tensiune să se încadreze în domeniul tensiunilor permise de intrarea circuitului de conversie în semnal digital. Factorul de amplificare poate fi modificat în trepte putând lua și valori subunitare (funcționare în regim de atenuator). Amplificatorul este prevăzut cu un circuit de limitare a valorii semnalului, în scopul protecției celorlalte circuite.

Pentru exemplificarea modului de acțiune a comutatorului de funcții, în figura 9.11 este prezentată structura aparatului în cazul utilizării acestuia în regim de frecventmetru.

Pentru măsurarea frecvenței unui semnal comutatorul K_1 se stabilește pe poziția 1 iar semnalul se aplică la borna I_1 .

Frecvența furnizată de oscilatorul *OSC* este divizată de numaratorul *DIV*, așa încât la intrarea porții *P*, în funcție de poziția comutatorului K_D ($T_p = K_D T_0$, unde T_0 este perioada semnalului furnizat de oscilator), este prezent semnalul de intrare un timp $T_p = T_0$, $T_p = 10^3 T_0$, $T_p = 10^6 T_0$. În intervalul de timp T_p , impulsurile generate de CI_1 , sub comanda semnalului de la intrarea I_1 , trec prin poarta și sunt contorizate de numaratorul *NR*.

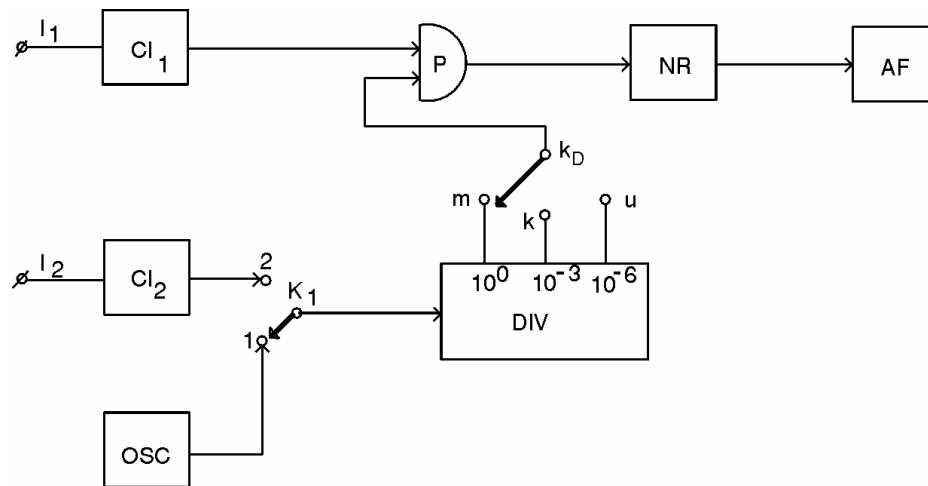


Fig. 9.11

Circuitul *AF* afiseaza numarul de impulsuri provenite de la semnalul supus masurarii, care au trecut prin poarta în intervalul de timp T_p , adica afiseaza numarul:

$$N = \frac{T_p}{T} = T_p f = K_D T_0 f, \quad (9.9)$$

f fiind frecventa semnalului.

Presupunând ca oscilatorul furnizeaza impulsuri cu perioada $T_0 = 1 \mu s$, la cele trei iesiri ale circuitului de divizare *DIV* avem $T_{p1} = T_0 = 1 \mu s$, $T_{p2} = 1 \mu s 10^3 = 1 ms$, $T_{p3} = T_0 10^6 = 1 s$. Daca afisarea se face cu trei cifre zecimale, valoarea maxima este $N = 1000$. Pentru cele trei intervale de numarare T_{p1} , T_{p2} , T_{p3} frecventa semnalului va fi afisata respectiv în MHz (pentru ca $N_1 = T_{p1}f = 10^{-6}f$), în kHz si în Hz.

În cazul masurarii raportului frecventelor a doua semnale, semnalul cu frecventa mai mare se conecteaza la borna I_1 iar celalalt la borna I_2 , ceea ce face ca numaratorul *NR* sa numere impulsurile provenite de la semnalul de frecventa mare într-un interval de timp:

$$N = \frac{T_2}{T_1} = \frac{f_1}{f_2},$$

stabilit de semnalul de frecventa mai mica. În figura 9.11, pentru claritatea expunerii, s-a considerat comutatorul K_D numai cu 3 pozitii, limitând afisajul la 3 cifre; în realitate se utilizeaza mai multe pozitii intermediare pentru K_D , iar afisarea se face cu mai multe cifre cu punct zecimal.

Schema structurala din figura 9.11 permite pe lânga masurarea frecventei si masurarea perioadei semnalului aplicat la intrarea I_1 , daca se stabileste o perioada a semnalului furnizat de baza de timp mai mica decât perioada semnalului supus masurarii. În aceste conditii, numaratorul *NR* contorizeaza de câte ori se cuprinde

cuanta de timp (corespunzatoare pozitiei comutatorului K_D) furnizata de baza de timp în perioada semnalului.

Daca perioada semnalului este mica, comparabila cu cuanta bazei de timp, se intercaleaza între CI_1 si poarta P un circuit de divizare, spre exemplu cu 10, ceea ce determina cresterea perioadei semnalului de masurat (în cazul exemplului cresterea este de 10 ori, iar daca factorul de divizare este k atunci cresterea este de k ori). Numaratorul contorizeaza impulsurile provenite de la baza de timp pe un interval de k perioade, ceea ce înseamna ca se va afisa o **valoare medie pentru k perioade** ale semnalului supus masurarii.

Exista situatii în care se impune masurarea **intervalului de timp** în care semnalul de la intrarea I_1 creste de la valoarea U_1 la valoarea U_2 .

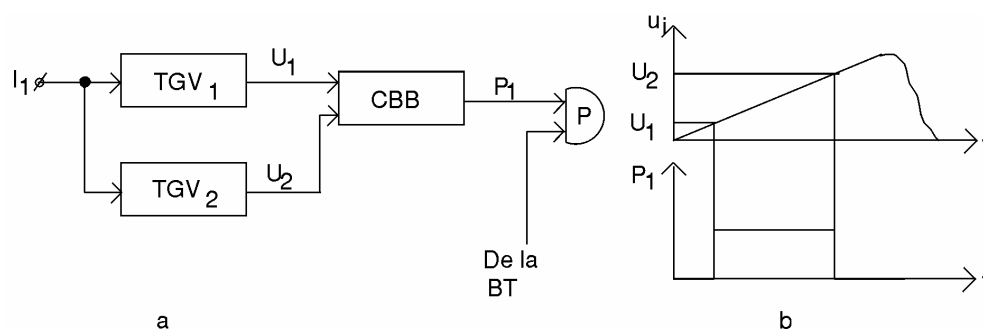


Fig. 9.12

În figura 9.12,a este aratat modul de configurare, de catre comutatorul de functii, a circuitului de intrare pentru masurarea intervalului de timp în care tensiunea de la borna de intrare I_1 creste de la valoarea U_1 la valoarea U_2 . Blocurile notate cu TGV sunt circuite basculante în regim de trigger care efectueaza tranzitia iesirii (din nivelul L în nivelul H atunci când intrarea atinge valoarea pragului inferior $VPJ = U_1$ pentru circuitul TGV_1 si respectiv $VPS = U_2$ pentru circuitul TGV_2). Circuitul basculant bistabil CBB genereaza la iesire un semnal de forma celui din figura 9.12,b, care constituie semnal de autorizare pentru poarta P , aceasta permitând trecerea catre numarator a impulsurilor furnizate de baza de timp BT (numai în intervalul de timp cât tensiunea de la intrarea I_1 se afla între limitele $U_1, \dots, U_2$).

În continuare se prezinta aparatul denumit **Numarator universal E-0202**, aflat în productie de serie la Intreprinderea de Aparare Electronice de Masura si Industriale. Toate datele privind performantele cât si descrierea constructiva sunt conform cartii tehnice a aparatului "Numarator universal cu 7 cifre tip E-0202", carte al carui an de aparitie nu rezulta din documentatie.

Aparatul poate fi utilizat la masurarea:

- frecventelor din domeniul 0,1 Hz, ..., 20 MHz;
- perioadei de la valoarea minima de 1 μ s pâna la 10^7 s;

- raportului a doua frecvente, pâna la valoarea de 10^7 ;
- intervalului de timp dintre doua impulsuri, pentru acelasi domeniu ca cel al perioadei;
- durata de conectare la borna de masa a intrarii, pentru intervalul de timp $100 \mu\text{s}$ la 10^7s ;

Perioada semnalului cât si raportul a doua frecvente pot fi divizate cu un factor de 10, ceea ce conduce la extinderea domeniului de masurare cu acelasi factor.

Domeniul de masurare al frecventelor poate fi extins pâna la 100 MHz prin includerea în componenta aparatului a unui sertar (la cerere) denumit “Convertor de frecventa E-0202C”.

Optional aparatul poate fi dotat si cu sertarul “Convertor de tensiune E0202B”, care permite utilizarea aparatului la masurarea valorilor de tensiune continua din domeniul $100 \mu\text{V}$, ..., 1000 V pentru 4 scari de masurare, 1 V, 10 V, 100 V si 1000 V. Impedanta de intrare este de 10 MO, cu exceptia scarii de 1 V pentru care impedanta este de numai 1 MO.

Pe lângă indicatia vizuala (cu 7 cifre) aparatul dispune de o iesire numerica (în cod binar) care permite conectarea unui înregistrator. Exista si o iesire analogica la care pot fi preluate impulsurile generate de baza de timp a aparatului.

Schema de principiu a aparatului este, cu mici modificari, schema din figura 9.9. Realizarea fizica este cu componente discrete de circuit, blocurile functionale fiind plasate în asa-numite “sertare” – de fapt placi de circuit imprimat prevazute cu ghidaje si conectori pentru a putea fi introduse în rakul aparatului.

Figura 9.13 permite evidentierea elementelor care trebuie folosite pentru a comuta aparatul în regim de masurare a marimii dorite.

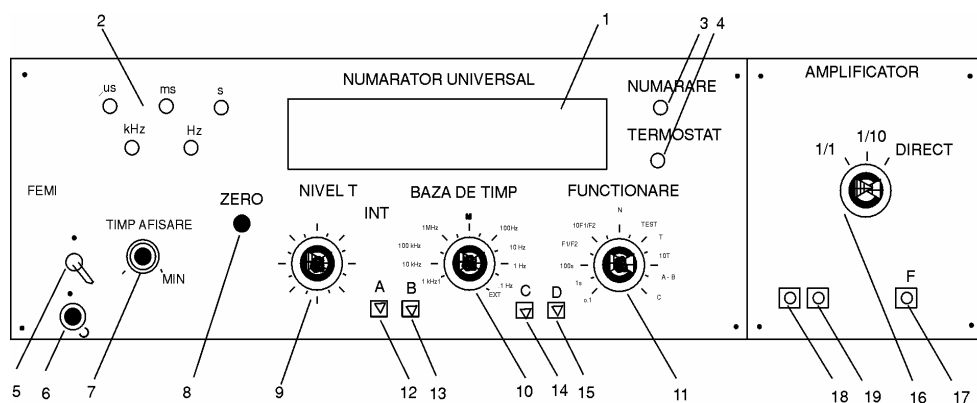


Fig. 9.13

S-a notat cu 1 ecranul de afisare a marimii masurate. Butonul notat cu 8 sterge valoarea afisata, iar potentiometrul notat cu 7 stabileste valoarea timpului de afisare.

Unitatea de masura a marimii afisate este indicata, în blocul notat cu 2, prin aprinderea unuia din ledurile înscrise cu ns, μs , s, Hz, kHz.

Bornele pentru conectarea semnalului asupra caruia se efectueaza masurarea sunt diferite în functie de scopul masurarii (în comun fiind numai borna de masa notata cu 6), astfel:

- borna 17 pentru masurarea frecventei;
- borna 15 pentru masurarea perioadei;
- bornele 15 si 17 se utilizeaza la masurarea raportului dintre frecventa semnalului conectat la borna 17 si frecventa semnalului conectat la borna 15;
- borna 14 pentru determinarea timpului cât aceasta borna este conectata la borna 6 (de masa);
- bornele 12 si 13 se utilizeaza pentru masurarea intervalului de timp dintre aparitia unui semnal la borna 12 si aparitia unui alt semnal la borna 13.

Modul de prelucrare a semnalului de catre circuitul de intrare este stabilit de pozitia comutatorului 16. În pozitia *DIRECT* se preia si componenta de curent continuu a semnalului, iar în pozitile 1/1 si 1/10 se preia numai componenta variabila (în pozitia 1/10 se conecteaza si un atenuator cu acesta valoare a atenuarii).

Baza de timp interna poate fi înlocuita de un semnal extern conectat la borna 13, cu conditia ca comutatorul notat cu 10 sa fie în pozitile *EXT* (în pozitile *INT* ale comutatorului 10 aparatul utilizeaza baza de timp interna, indiferent de prezenta sau absenta semnalului la borna 13).

Marimea ce va fi masurata si bornele de intrare active sunt stabilite de pozitia comutatorului de functii notat cu 11, indicatiile inscriptionate pe comutator având semnificatiile:

- F 0,1 s, F 1 s, F 10 s – se masoara frecventa semnalului pentru un timp de masurare de respectiv 0,1 s, 1 s, 10 s;
- $F1/F2$ si $10 \times F1/F2$ – se masoara raportul a doua frecvente;
- T si $10 \times T$ – se masoara perioada semnalului;
- $(A - B)$ – se masoara intervalul de timp;
- C – se masoara durata de conectare la masa;
- N – numara impulsurile (regim de functionare indicat de ledul 3);
- *TEST* – pozitie în care se verifica baza de timp interna.

Potentiometrul notat cu 9 se utilizeaza în cazul masurarii perioadei pentru ajustarea pragului de declansare.

Modificarea cuantei generate de baza de timp se face cu comutatorul notat cu 10, pozitia acestuia stabilind scara de timp indicata de grupul de leduri notat cu 2.

Iesirile aparatului sunt notate cu 18 pentru semnalul generat de baza de timp si cu 19 pentru semnalul care poate fi utilizat de un înregistrator.

Circuitele de intrare sunt comutate în functie de scopul masurarii asa încât, în functie de marimea de la intrare, avem diferite domenii permise pentru amplitudinea semnalului.

În cazul masurarii frecventei sunt permise valori efective ale tensiunii din domeniile 1 V, ..., 10 V, 100 mV, ..., 35 V, 1 V, ..., 100 V pentru o impedanta de intrare a aparatului de respectiv 5 k Ω , 100 k Ω , 1 M Ω iar daca aparatul are în componenta sertarul de extindere a domeniului de frecventa pentru frecvente mai mari decât 20 MHz, impedanta de intrare este de 50 Ω pentru un domeniu permis

50 mV, ..., 10 V. Pentru regimul de semnal în impulsuri pozitive domeniul este 2 V, ..., 15 V pentru o impedanta de intrare de 5 k Ω .

Domeniul de tensiuni, exprimate în valori efective, în cazul masurarii perioadei este 1 V, ..., 35 V pentru o impedanta de intrare de 100 k Ω , iar în cazul masurarii intervalelor de timp domeniul de tensiuni, exprimate în valori vârf-vârf, este 6 V, ..., 12 V, acceptând numai polaritatea negativa a semnalului.

Indicarea corectei functionari a sistemului de termostatare se face prin aprinderea ledului notat cu 4. S-a mai notat cu 5 întreruptorul de retea.

Aparatul a fost prevazut cu un sistem de termostatare a incintei oscilatorului în scopul cresterii stabilitatii (frecventei generate) la modificarea temperaturii mediului ambiant, cartea tehnica indicând o functionare în parametri pentru temperaturi ale mediului din domeniul 5°C,...,40°C. Temperatura de termostatare este de 75°C, cu o variatie de maximum 0,4°C pentru variatia temperaturii mediului de la - 20°C la 65°C.

Stabilitatea frecventei oscilatorului bazei de timp este de $2 \cdot 10^{-7}$ în 24 ore si de $2 \cdot 10^{-8}$ pentru intervale de o secunda.

Eroarea maxima de masurare a aparatului depinde de marimea masurata dar poate fi exprimata prin intermediul relatiei:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{1}{N} + \frac{d}{n} + e , \quad (9.10)$$

în care: N este numarul afisat (cu 7 cifre), n – un factor dependent de divizarea semnalului de intrare, având valoarea 10 daca semnalul este divizat si valoarea 1 în caz contrar, d – eroarea de declansare a triggerului de intrare ($d < 3 \cdot 10^{-3}$), iar e – eroarea etalonului de frecventa (precizata mai sus). De notat ca în relatie (9.10) unii dintre termeni pot fi negativi si în relatie pot lipsi unul sau mai multi termeni corespunzator marimii care se afiseaza (spre exemplu la masurarea raportului a doua frecvente eroarea se exprima numai cu primii doi termeni). Pentru relatii particulare se poate consulta cartea tehnica a aparatului.

Încadrarea aparatului în clasa de precizie declarata de producator este garantata daca se respecta conditiile de mediu si daca se efectueaza la timpul prescris reglajele impuse de cartea tehnica (verificarea la 6 luni a frecventei oscilatorului bazei de timp si la fiecare 12 luni a sursei de alimentare si a factorilor de amplificare/divizare).