

5. Semnale

Obiective: cunoașterea tipurilor de semnale, a mărimilor caracteristice, măsurarea mediei și a defazajului semnalelor periodice, descompunerea armonică a semnalelor periodice.

Noțiuni noi: semnal, semnal analogic, semnal numeric (digital), semnal eșantionat, perioada de eșantionare, cuantizare, codare numerică, conversie AD și DA, semnal determinist, fază, media semnalului, armonice, descompunere armonică.

Noțiunea de semnal este o noțiune centrală în electronică și telecomunicații. Întrucât am arătat că electronica este o tehnologie a prelucrării informației, apare întrebarea: cine conține și transportă informația? Răspunsul electroniștilor: semnalele.

Un *semnal* este o mărime fizică purtătoare de informație. Cel mai adesea, este o funcție scalară de variabila timp, ca în exemplele uzuale următoare:

- Tensiunea sau curentul furnizate de un traductor de temperatură
- Tensiunea de la intrarea unui amplificator de putere
- Tensiunea de la ieșirea modului *tuner* radio
- Tensiunea de la bornele microfonului
- Câmpul electromagnetic produs în antena telefonului mobil (la emisie sau la recepție)
- Poziția acului la un aparat indicator cu ac
- Presiunea aerului în sistemele pneumatice de măsurare și comandă a proceselor (se folosește în mediile cu potențial de explozie)
- Poziția deschis-închis a releului electromagnetic cu care se comandă funcționarea centralei termice
- Succesiunea de valori afișate de ecranul unui voltmetru digital (numeric)
- Poziția pedalei de accelerație, transmisă către carburator

Uneori, folosim semnalul în varianta înregistrată (memorată), în scopul reconstituirii informației inițiale sau în scopul prelucrării. Exemple:

- Înregistrarea vocii pe bandă de magnetofon
- Înregistrarea vocii de pe un CD
- Înregistrarea numerică a tensiunii afișate pe ecranul osciloscopului
- Înregistrarea numerică a vitezei vântului într-un punct
- Înregistrarea cursului valutar pe un interval de timp

Există și alte variante de semnale, cu alte variabile sau altă dimensiune a funcției, cum ar fi:

- Denivelarea unui material aproape plan, măsurată în lungul unei axe (funcție scalară de variabilă spațială)
- Semnalul de temperatură, în grosimea unui perete (funcție scalară de timp și de spațiu)
- Imaginea dată de o cameră de luat vederi (funcție scalară de două variabile spațiale)
- Secvența de imagini date de aceeași cameră (funcție scalară, de timp și de două variabile spațiale)
- Semnalul vocal stereo (două funcții scalare de variabila timp, care formează o funcție vectorială de variabila timp)
- Semnalele de tensiune de la ieșirea unui traductor de înclinare față de verticală (funcție vectorială de variabila timp)

Proprietățile pe care trebuie să le îndeplinească o mărime fizică pentru a purta informația (implicit: pentru a fi folosită ca semnal) sînt:

- Să poată fi prelucrată (adică să poată fi depusă informație, să se poată extrage informație și să se poată aduce modificări informației purtate de acea mărime)

- Să poată fi transmisă la distanță
- Să fie puțin afectată de perturbații

Deși nu este necesară întotdeauna, este foarte utilă o altă proprietate: posibilitatea semnalului de a fi memorat (întregitrat). Tehnica numerică a simplificat enorm problema memorării.

Mărimile folosite ca semnale sînt:

- Tensiunea electrică (vezi semnalul de microfon etc.)
- Curentul electric (vezi ieșirea unor traductoare)
- Deplasarea mecanică (vezi pedala de accelerație)
- Presiunea aerului (vezi comanda pneumatică)

Semnalul în deplasare este folosit în unele sisteme mecanice simple.

Semnalul în presiune este folosit în automatizarea sistemelor cu pericol de explozie (ex: petroliere).

Semnalul în curent este folosit în transmiterea semnalelor de la traductoare, pe distanțe mari, în medii perturbate (este mai puțin afectat de perturbațiile prin inducție, decît semnalul în tensiune).

Semnalul în tensiune este folosit în tehnica audio, video, echipamente de automatizare, măsurări electronice, comunicații, radio etc. Este cel mai potrivit pentru prelucrarea analogică (dacă prelucrarea este numerică, nu mai are importanță mărimea fizică din care a provenit semnalul numeric suspus prelucrării).

Exemple de prelucrări ale semnalelor:

- Filtrare pentru eliminarea zgomotului
- Transmitere la distanță
- Extragerea semnalului util din transmisiunea radio
- Separarea a două surse de informație
- Compresia și criptarea transmisiunilor
- Afișarea și măsurare poziției obstacolelor cu sonar, radar, ecograf (imagine)
- Recunoașterea obiectelor din imagine
- Măsurare directă sau prin model

Semnale analogice și numerice (digitale)

Forma sub care se prezintă semnalele depinde de natura mărimii și de scopul în care folosim semnalul. Din punctul de vedere al continuității în timp și în valori, folosim două variante:

- *Semnal analogic* (continuu în timp și în valori)
- *Semnal numeric* (discontinuu în timp și în valori, se mai numește semnal în timp discret și cu valori discrete. Semnalul în timp discret se mai numește *semnal eșantionat*)

Modelul matematic al semnalului analogic este o aplicație pe mulțimea numerelor reale, cu valori în mulțimea numerelor reale (sau un interval de numere reale). În figura 1 apare înregistrarea fotografică a unui semnal de pe ecranul osciloscopului. Este un semnal analogic. Semnalul acustic care sosește la un microfon, semnalul electric pe care îl produce microfonul, poziția acului unui instrument de măsură cu ac, semnalul captat de antena unui receptor radio, semnalul electric produs de o cameră video analogică, semnalul afișat de tubul catodic al unui televizor, timpul indicat de un ceasornic mecanic – toate sînt semnale analogice, fiind continue în timp și în valori.

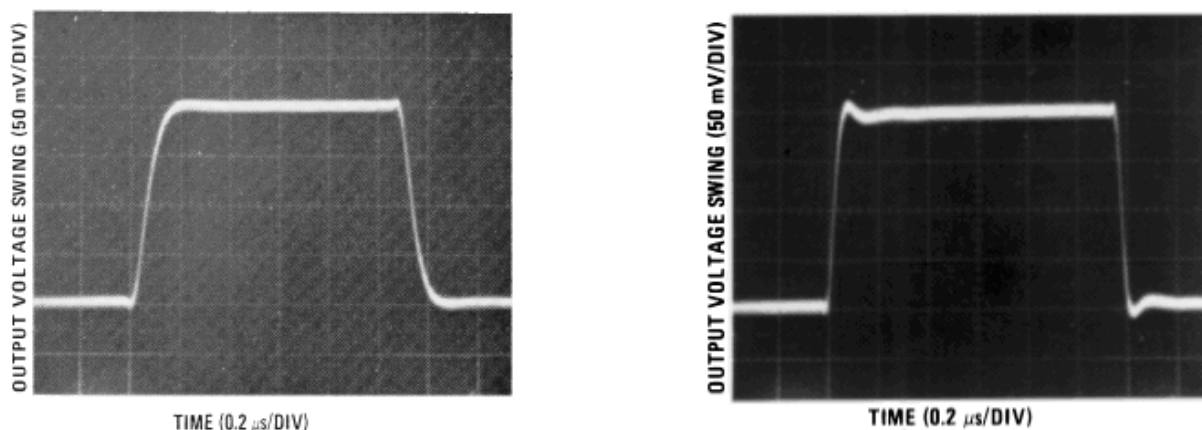


Figura 1: Semnal analogic, pe ecranul osciloscopului

Modelul matematic al unui semnal numeric este un șir de numere, deci o aplicație pe mulțime numărabilă (mulțimea numerelor întregi), cu valori în restricții ale mulțimii numerelor raționale sau mulțimii numerelor întregi. Numerele reprezintă valorile approximate ale eșantioanelor unui semnal analogic. Exemple: numerele succesive indicate de un voltmetru cu afișaj numeric, indicația de temperatură a unui termometru digital, timpul afișat de un ceas digital, semnalul muzical înregistrat pe CD, semnalul produs de o cameră video digitală. Chiar și indicația ceasului cu afișor cu cristale lichide (LCD = *Liquid Crystal Display*), care imită pozițiile limbilor unui ceas clasic, este tot semnal digital, întrucât ocupă un număr finit de poziții pe afișor, pe care le modifică la momente discrete.

Avantajele semnalelor numerice:

- Posibilitate nelimitată de memorare
- Posibilități mari de prelucrare
- Imunitate sporită la perturbații
- Versatilitatea circuitelor de prelucrare

Dezavantajele semnalelor numerice

- Circuite mai complicate pentru prelucrare (această particularitate dispăre, odată cu dezvoltarea tehnicii numerice)
- Prelucrare încă insuficient de rapidă, pentru frecvențele mari

Transmisia semnalelor va fi studiată la mai multe cursuri: Semnale și sisteme, Transmisia și codarea informației. Prelucrarea digitală a semnalelor va avea dedicat un curs, având chiar acest nume.

Conversia ADC și DAC

Majoritatea semnalelor pe care le folosim provin din „lumea” analogică. Există metode de conversie a semnalelor din analogic în numeric (analog-to-digital conversion) și din numeric în analogic (digital-to-analog conversion). Scopul conversiei A/N (sau ADC = *Analog-to-Digital Conversion*) este preluarea semnalului în formă numerică, pentru prelucrare sau pentru memorare (exemple: memorarea concertului pe CD, prelucrarea numerică a semnalului din imagine). Scopul conversiei N/A (sau DAC = *Digital-to-Analog Conversion*) este reconstituirea semnalului analogic, pentru transmisiune, afișare sau pentru scopuri audio-video.

Etapele conversiei AD și DA:

- Eșantionarea și reținerea eșantionului („sample and hold”)
- Cuantizarea eșantionului (reprezentarea printr-un nivel discret)
- Codarea numerică a nivelului cuantizat, prin care este reprezentat eșantionul

În figura 2 este reprezentată o scurtă secvență dintr-un semnal analogic, precum și eșantioanele obținute de la acest semnal. Semnalul a fost eșantionat la intervale egale (*perioada de eșantionare*). În figura 3 sînt reprezentate aproximările eșantioanelor, ca urmare a cuantizării. Se observă că fiecare eșantion ia doar valori discrete, dintr-o mulțime finită. În partea inferioară a figurii 2 sînt scrise codurile numerice ale nivelurilor rezultate prin cuantizare (numere în baza 2). Aceasta este forma în care sînt prelucrate în calculatorul numeric, sau sînt memorate, sau sînt transmise prin sisteme de comunicații numerice. Circuitele de conversie ADC și DAC, precum și introducerea datelor în calculator vor fi studiate la cursul de Bazele sistemelor de achiziție a datelor.

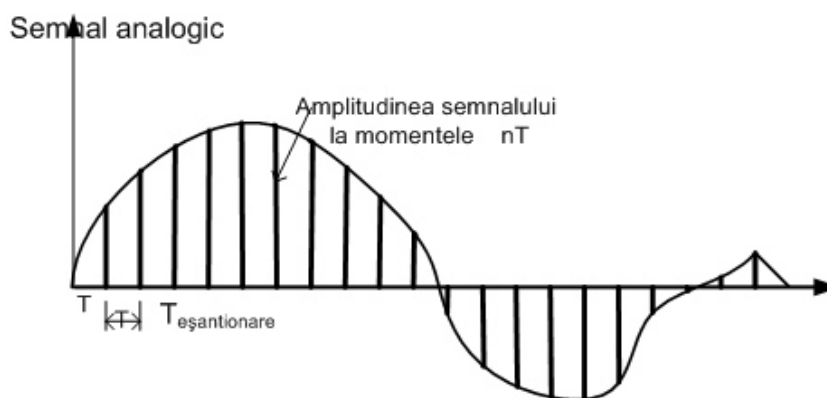


Figura 2: Semnalul analogic și semnalul eșantionat

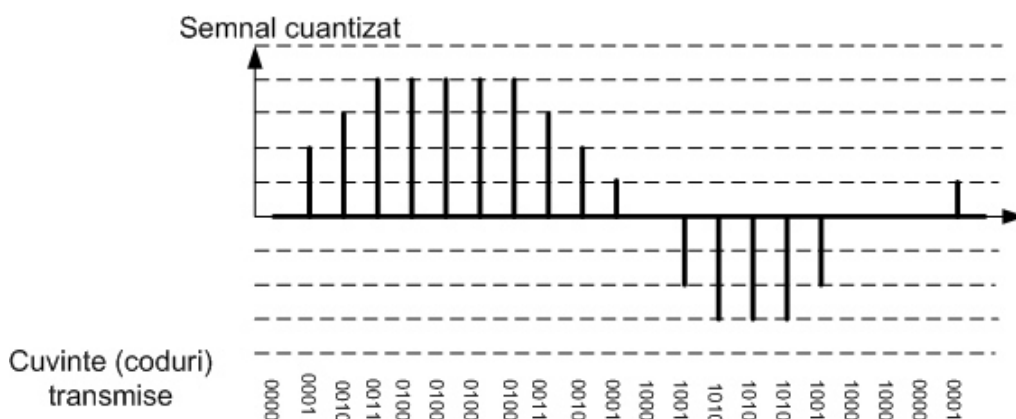


Figura 3: Semnalul eșantionat și cuantizat, semnalul codat numeric

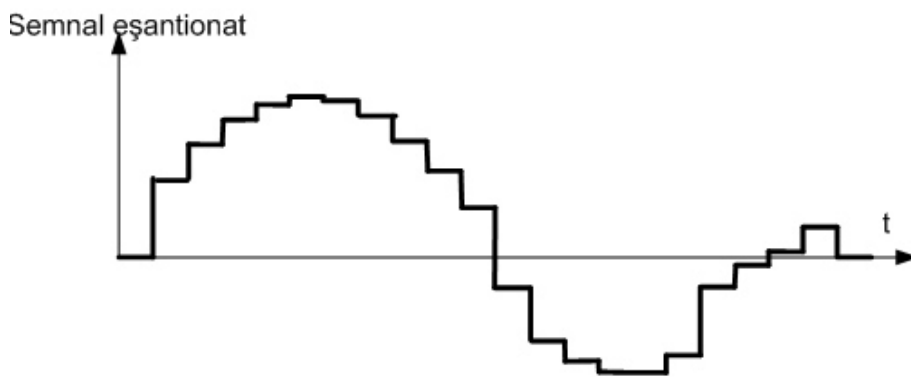


Figura 4: Reconstituirea semnalului analogic (conversie A/N)

În figura 4 apare semnalul analogic reconstituit din forma numerică (conversia N/A sau DAC). Se observă că el este similar cu semnalul original, dar nu este identic. Proprietatea caracteristică este aceea că el este reconstituit din aproximări ale eșantioanelor. Aspectul de funcție în scară provine din aproximarea semnalului doar prin valori discrete. Valorile funcției între momentele de eșantionare sînt approximate prin menținerea valorii de la ultimul moment de eșantionare.

Primele două întrebări care apar, la reconstituirea semnalului analogic, sînt:

- cît de fină trebuie să fie cuantizarea (adică cît de dese trebuie să fie nivelurile cu care aproximăm eșantionul)?
- cît de frecventă trebuie să fie eșantionarea (adică cît de mică să fie perioada de eșantionare)?

Răspunsul 1: atît de fină pe cît de mică este eroarea pe care sîntem dispuși să o acceptăm (să ne gîndim la rezoluția voltmetrului cu afișare numerică, la care este prezentă exact această problemă).

Răspunsul 2 este mai complicat, va fi tratat la cursul de Semnale și sisteme. Ca regulă generală: dacă componenta cu frecvența cea mai mare din semnalul analogic are frecvența f , atunci eșantionarea trebuie să se producă cu o frecvență mai mare decît $2f$.

Semnale deterministe. Mărimi caracteristice

Din punctul de vedere al conținutului informațional, semnalele se împart în două categorii: semnale deterministe și semnale întîmplătoare (altă denumire: aleatoare).

Semnale deterministe: cele la care evoluția semnalului este anterior cunoscută. Ele nu aduc nici o informație, sînt folosite doar pentru testarea circuitelor și echipamentelor, în laborator sau în exploatare. Cel mai adesea, semnalele folosite pentru testare sînt periodice. Forme uzuale: sinus, dreptunghi, triunghi, dinte de fierăstrău, impulsuri etc. Astfel de forme sînt reprezentate în figura 5.

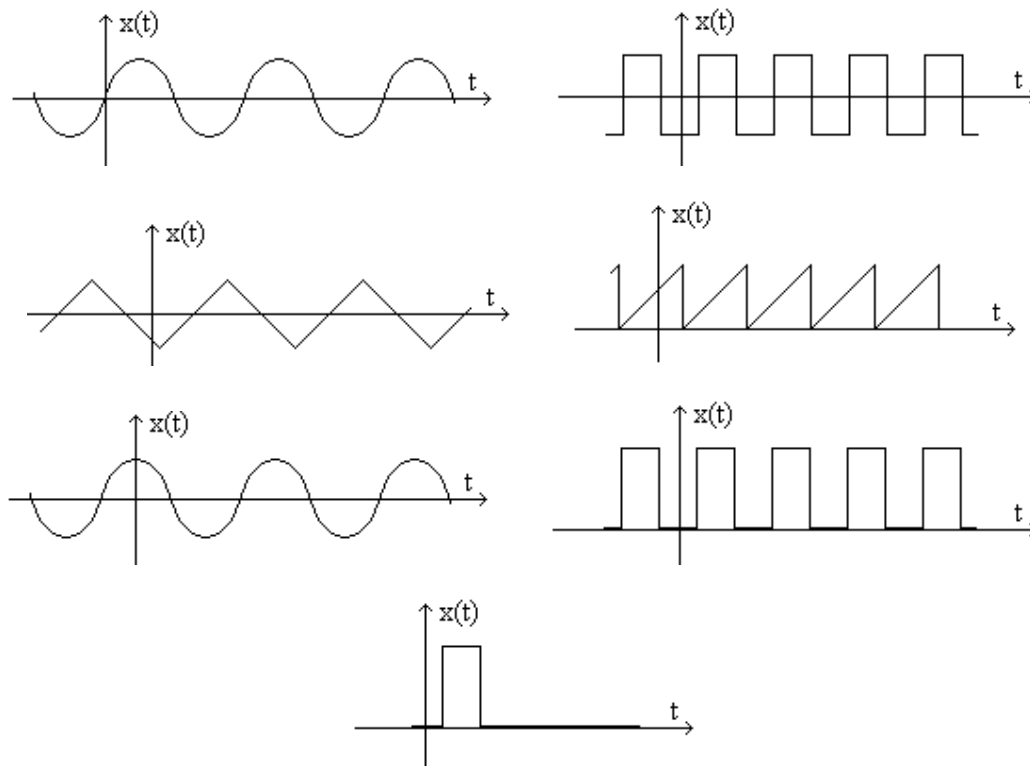


Figura 5: Semnale deterministe

Semnalele întîmplătoare sînt cele a căror evoluție nu poate fi prezisă, deci poartă cu ele informație (cu cît sînt mai puțin predictibile, cu atît aduc mai multă informație). Cel mult cunoaștem dinainte

proprietățile statistice ale semnalului întâmplător (domeniul valorilor, frecvența cea mai mare a componentelor sale etc.), dar nu evoluția particulară într-un anumit interval de timp. Exemple de semnale întâmplătoare: semnalul vocal cules de microfon, curentul absorbit de motorul electric, turația motorului, temperatura măsurată într-o încăpăre, viteza vântului, semnalul de date transmis între două calculatoare etc.

Modelul matematic al semnalului este util pentru a analiza transformările suferite de semnal la trecerea printr-un circuit. Semnalele deterministe folosite frecvent pot fi modelate matematic prin funcții relativ simple. Semnalele din figura 5a și 5e pot fi reprezentate astfel:

$$x(t) = A \sin(\omega t), \quad (1)$$

respectiv

$$x(t) = A \cos(\omega t). \quad (2)$$

În general, ambele semnale și altele asemănătoare pot fi exprimate prin:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

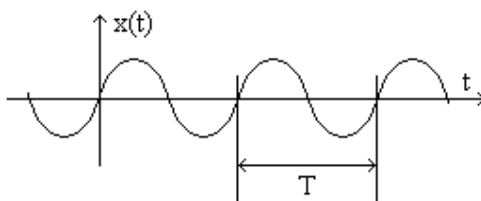


Figura 6: Perioada semnalului

În relațiile de mai sus:

A este amplitudinea oscilației (este număr pozitiv și are dimensiunea fizică a lui $x(t)$)

T este perioada semnalului periodic (se măsoară în secunde, vezi figura 6)

f este frecvența (se măsoară în Hz)

ω este pulsația (se măsoară în rad/s).

Relațiile dintre ele sînt:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

Argumentul funcției sinus se numește *fază*. Valoarea fazei la momentul 0, notată cu φ , se numește *fază inițială*. Dacă două semnale sînt riguros de aceeași frecvență, se numesc semnale *coerente*. Diferența dintre fazele lor se numește *defazaj*. Spre exemplu, considerăm două semnale sinusoidale, cu expresiile din (6) și (7).

$$x_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (6)$$

$$x_2(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (7)$$

Defazajul lui x_2 față de x_1 este:

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (8)$$

Defazajul a două semnale sinusoidale se măsoară ușor cu ajutorul osciloscopului. Se aplică cele două semnale pe două canale ale osciloscopului, ca în figura 7, și se notează linia de zero pentru fiecare dintre ele. Se determină perioada T . Nu se evaluează individual faza fiecărui semnal, ci se determină momentele cînd cele două semnale traversează linia de zero, în același sens. Spre exemplu, în figura 7, au fost considerate momentele cînd cele două semnale trec crescător prin zero. Pot fi alese și alte momente pentru determinarea defazajului, cum ar fi trecerea descrescătoare prin 0 sau momentul în care este atins maximul. Totuși, determinarea momentelor de maxim și de minim este imprecisă, așa încît se preferă varianta descrisă mai sus.

Pentru fiecare semnal, faza variază invers față de timpul măsurat al momentului intersecției. În consecință, defazajul semnalului de jos față de cel de sus (în această ordine) este o mărime cu semn, calculată astfel:

$$\Delta\varphi = \frac{t_1 - t_2}{T} \cdot 2\pi. \quad (9)$$

În mod evident, defazajul primului semnal față de al doilea va avea același modul, dar semn schimbat. În exemplul din figura 7, semnalul de jos trece prin zero mai târziu decât cel de sus, aproximativ cu 0,4 diviziuni, în timp ce perioada semnalelor ocupă 2 diviziuni. Rezultă că defazajul dintre al doilea semnal și primul are aproximativ valoarea $-0,4\pi$ radiani. Se spune că al doilea semnal este în întârziere de fază față de primul. Despre primul semnal se spune că este în avans de fază față de cel de-al doilea.

În relația (9), defazajul este exprimat în radiani. Pentru exprimarea în grade, se înlocuiește factorul 2π cu 360 grade. În exemplul din figura 7, defazajul semnalului de jos față de cel de sus are aproximativ valoarea -72 grade, iar defazajul celui de sus față de cel de jos este de 72 grade.

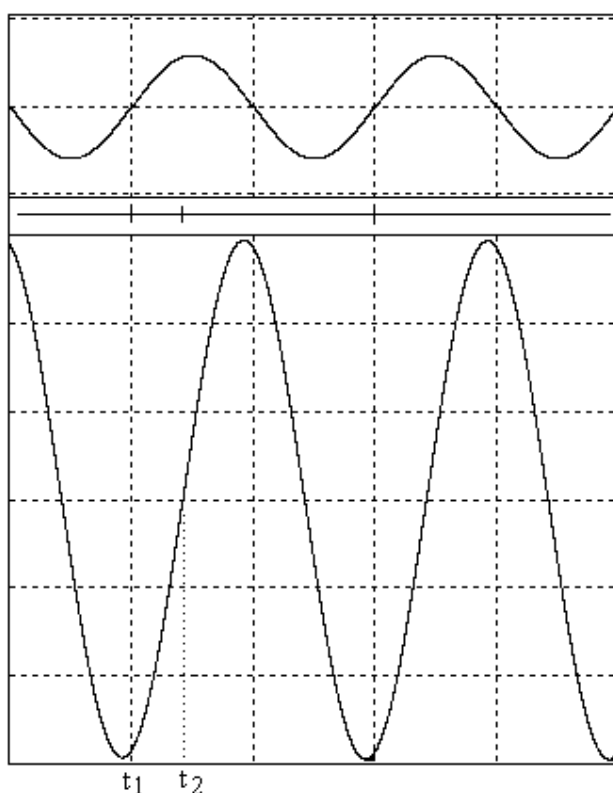


Figura 7: Măsurarea defazajului dintre două semnale sinusoidale

O mențiune privitoare la semnalele periodice coerente. Acestea sînt riguros de aceeași frecvență, adică defazajul dintre ele este constant sau are mici variații în jurul unei valori constante, variațiile avînd medie nulă. Dacă le observăm pe două canale ale osciloscopului, două semnale despărțite de un defazaj constant vor fi amîndouă stabile pe ecran. Dimpotrivă, două semnale necoerente, dar de frecvențe foarte apropiate, vor fi observate astfel pe ecran: unul este fix, în timp ce al doilea se deplasează ușor spre stînga sau dreapta, după cum frecvența sa este mai mare sau mai mică decât a primului. Viteza de deplasare relativă este cu atît mai mică, cu cît frecvențele sînt mai apropiate. Observația privitoare la semnale coerente este valabilă indiferent de forma semnalelor (nu se aplică doar semnalelor sinusoidale sau perechilor de semnale de aceeași formă).

O noțiune utilă în analiza semnalelor (va fi folosită la proiectarea circuitelor) este valoarea *medie a semnalului*. Media este calculată pe un număr întreg de perioade, așa cum a fost definită la analiza matematică:

$$x_m = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt . \quad (10)$$

Spre exemplu, semnalele din figura 5a, 5b, 5c, 5e, sînt semnale de medie nulă. Folosind semnificația geometrică a integralei definite, cum a fost introdusă la analiză, observăm că graficele semnalelor menționate mai sus au următoarea proprietate: aria închisă între alternanța pozitivă a semnalului și axa absciselor este egală cu aria închisă de alternanța negativă și aceeași axă.

Prin opoziție față de cazul precedent, semnalele din figura 5d și 5f au medie nenulă. Interpretarea grafică a mediei: ordonata acelei drepte orizontale care separă o perioadă a semnalului în două zone cu arii egale. O astfel de interpretare este utilizată în figura 8: aria zonei roșii este egală cu aria zonei galbene, iar ordonata dreptei care separă cele două zone este media semnalului.

Măsurarea componentei medii cu ajutorul voltmetrului cu ac este posibilă, dar nu la orice frecvență a semnalului. În principiu, instrumentul cu ac indică media semnalului de la borne, deci îl putem folosi pentru măsurarea mediei. Totuși, dacă frecvența semnalului este foarte mare (sute de kHz, MHz), astfel încît să devină predominantă comportarea reactivă a componentelor din interiorul voltmetrului, indicația devine imprecisă.

La măsurarea componentei medii cu ajutorul osciloscopului, precizia măsurării este limitată de precizia de afișare scăzută a osciloscopului, dar nu este afectată de frecvență (în limitele benzii indicate de fabricant). Pentru măsurare, se folosește comutatorul care elimină componenta medie (de obicei, are trei poziții, notate AC, GND, DC). Cu comutatorul pe poziția AC este eliminată componenta medie. Se memorează poziția semnalului pe ecran, apoi se comută pe DC (afișare cu componentă medie). Poziția afișată a semnalului suferă o deplasare (în sus sau în jos), egală cu valoarea componentei medii.

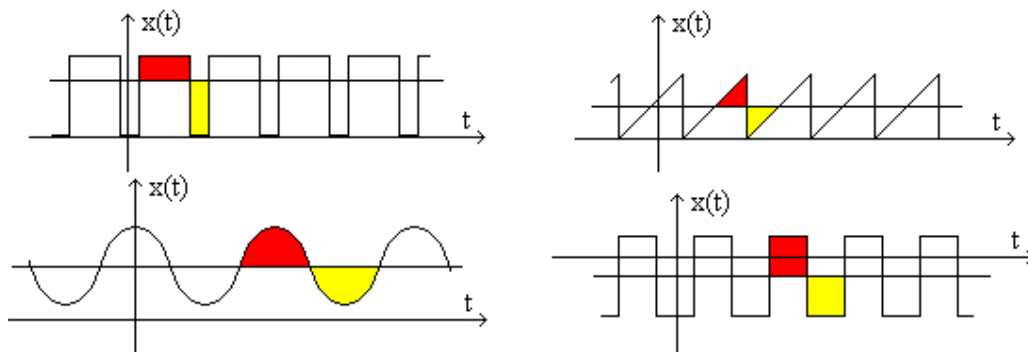


Figura 8: Media semnalului

Semnalele deterministe prezentate mai sus sînt periodice. Totuși, pentru teste se folosesc și semnale neperiodice, de tip impuls, cum este cel din figura 5g. Pentru observarea unui astfel de semnal este nevoie de osciloscop cu memorie sau de înregistrarea numerică a semnalului, într-un dispozitiv de memorare (de regulă, un calculator).

Pentru semnalul sinusoidal eșantionat, obținut prin eșantionarea semnalului descris în (3), exprimarea analitică se face după modelul:

$$x(k) = A \sin(\omega k T_s + \varphi) , \quad (11)$$

unde T_s este perioada de eșantionare, iar k este număr întreg. Timpul fizic (momentul la care a fost luat un eșantion) este produsul dintre numărul eșantionului și perioada de eșantionare. Toate semnalele generate sau memorate într-un sistem numeric (în general, un calculator), sînt exprimate ca în relația de mai sus. În figura 9a apare o secvență scurtă dintr-un semnal eșantionat, așa cum a fost el memorat, iar în figura 9b apare semnalul reconstituit din eșantioane, așa cum a fost prezentat în subcapitolul precedent. Se observă că pe abscisă a fost reprezentat timpul discret, în perioade de eșantionare.

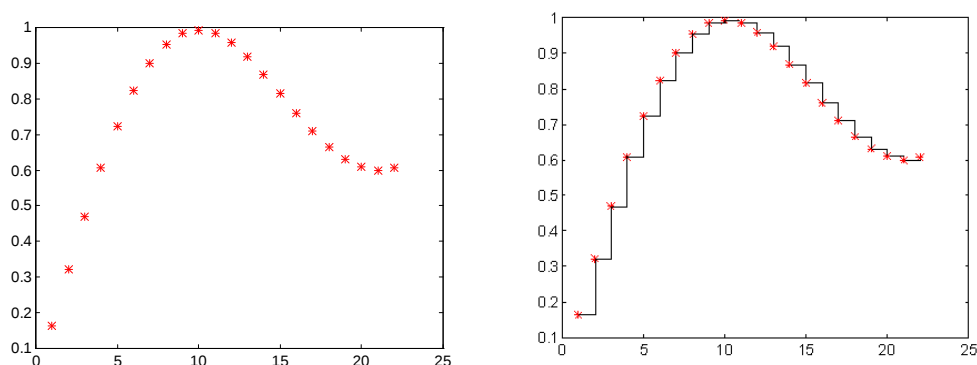


Figura 9: Semnal eșantionat și semnal analogic, reconstituit din semnalul eșantionat

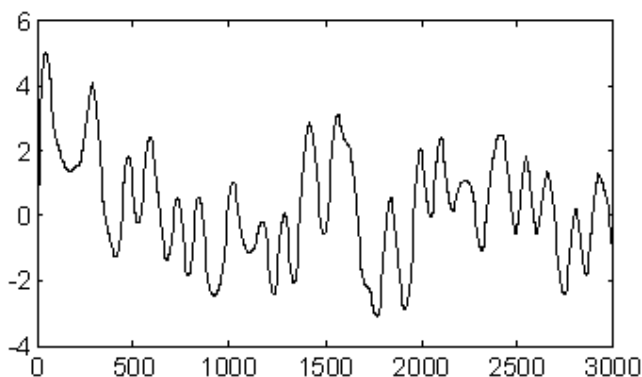


Figura 10: Exemplu de semnal întâmplător

Descompunerea semnalelor periodice în componente sinusoidale

Unul dintre motivele pentru care semnalul sinusoidal este folosit foarte frecvent ca semnal de test este proprietatea sa de a-și păstra forma, la trecerea prin orice circuit liniar. De fapt, este sigura formă de semnal, care are această proprietate. Pentru a exploata proprietatea menționată, în cazul semnalelor periodice nesinusoidale, este utilizată o altă proprietate a semnalelor periodice: orice semnal periodic poate fi descompus într-o sumă de componente sinusoidale (se numește *seria Fourier* și va fi analizată la cursul de Analiză matematică și la cursul de Semnale și sisteme). Componentele se numesc *armonice*, iar descompunerea este unică, în sensul că amplitudinea și defazajul fiecărei componente armonice sînt unic determinate, pentru un anumit semnal periodic. Dacă frecvența semnalului periodic este f_0 , atunci componentele seriei au frecvențele: $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0$ etc. Componenta de frecvență f_0 se numește fundamentală (sau prima armonică), componenta de frecvență $2f_0$ se numește armonică a doua ș.a.m.d. Modelul matematic al semnalului periodic, descompus în componentele armonice, are forma:

$$x(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cdot \sin(k\omega_0 t + \varphi_k), \quad (11)$$

în care:

ω_0 este pulsația semnalului periodic (și pulsația fundamentalei)

c_0 este media semnalului (determinată în secțiunea anterioară, relația (10))

c_k este amplitudinea componentei armonice de ordin k

φ_k este faza componentei armonice de ordin k .

În figura 11 apare un exemplu de semnal periodic, care poate fi descompus în două componente armonice: $x(t) = 1,2 \sin(\omega t) + 0,6 \sin(3\omega t)$. Fundamentală și armonica a treia sînt reprezentate în primele două diagrame, în timp ce suma lor (semnalul periodic descompus) este reprezentată în ultima diagramă.

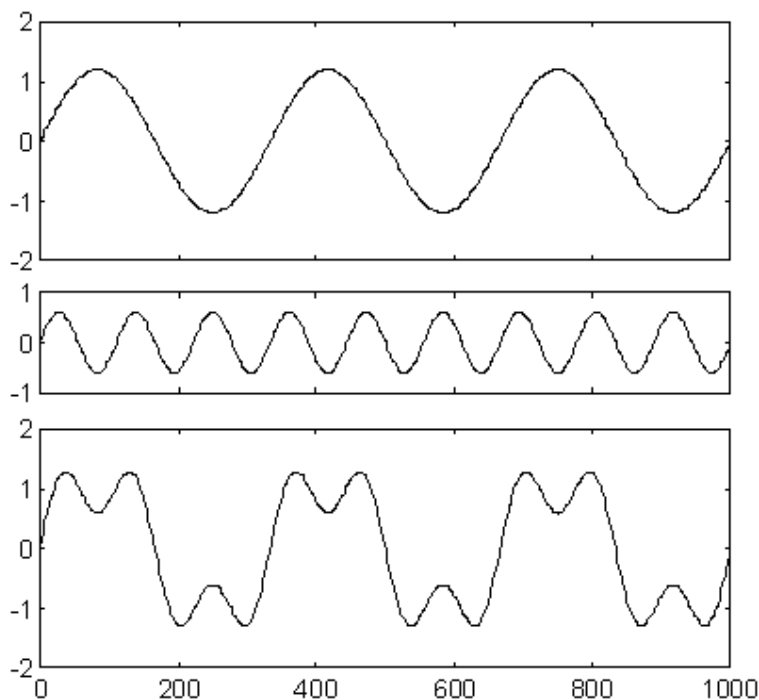


Figura 11: Semnal periodic, compus din fundamentală și armonica a treia

Descompunerea în componente armonice a semnalelor periodice este utilă pentru analiza funcționării circuitelor liniare, în sensul următor: dacă semnalul periodic de la intrarea unui circuit liniar este $x(t)$, semnalul de ieșire este suma semnalelor pe care le-ar produce circuitul ca răspuns la componentele armonice ale lui $x(t)$. De obicei, se cunoaște modul în care circuitul reacționează la fiecare componentă armonică, deci se poate anticipa cum va reacționa la întregul semnal prezent la intrare.