

Pentru roboții obișnuiți calculatorul trebuie să realizeze modelarea mediului și generarea traiectoriei (modelarea mediului înseamnă reprezentarea prin ecuații matematice a evenimentelor și obiectelor din proces).

Blocul generator de traiectorie transmite semnale de comandă (**mărimi de prescriere**): poziții, viteze, accelerații către sistemul de acționare.

Senzorii fac parte din sistemul de percepție și sunt amplasați în mediul în care lucrează robotul sau pe brațul mecanic.

Exemple: există senzori de proximitate, de gabarit, de contact și/sau forță/moment, senzori optici etc.

2.2.1. Sistemul de acționare

După cum s-a arătat și mai sus, la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare este amplasat câte un motor de acționare. Motorul poate fi electric, hidraulic sau pneumatic.

Observație: după tipul de motoare cu care este dotat și robotul primește denumirea de robot cu *acționare electrică, hidraulică, pneumatică sau mixtă*.

Motorul generează mișcarea elementelor mecanice. Mișcarea este transmisă (prin blocul **transmisie**) la elementele cuplelor cinematice conducătoare acționate.

Motorul este comandat de un circuit electronic și primește energie de la o sursă de alimentare.

Întregul ansamblu, compus din motor și circuitele electronice care îl comandă, constituie un *sistem de conducere locală (S.C.L.)*. Într-un robot există atâtea S.C.L.-uri câte cuple cinematice conducătoare trebuie comandate. S.C.L.-urile sunt realizate cu o structură de *sistem de reglare automată (S.R.A.)*.

Observație: S.R.A. este un sistem în care reglarea se face automat, adică fără intervenție din exterior, spre scopul final urmărit.

Sistemul de acționare se compune din mai multe S.C.L.-uri în funcție de numărul de grade de mobilitate ale sistemului mecanic.

Observație: În fig.3 s-a reprezentat un singur S.C.L. (S.R.A.) și s-a indicat cu "6x6" faptul că în sistemul de acționare există 6 astfel de S.C.L.-uri deoarece s-a presupus că robotul are 6 axe.

Întregul S.C.L. este condus de către un **controler** realizat cu microprocesor sau microcontroler. Acesta realizează funcția de regulator:

1. preia **mărimea de prescriere** (poziție, viteză, accelerație) de la generatorul de traiectorie;
2. preia informația cu privire la mișcarea executată în realitate de elementele mecanice (care este **mărimea de reacție**), de la traductorul aferent;
3. calculează **abaterea (eroarea)** dintre mărimea de prescriere și cea de reacție;
4. calculează **mărimea de comandă** cu care se corectează abaterea; calculul se efectuează cu o formulă numită **algoritm de reglare** (proiectat de inginerii automatiști) utilizând valoarea curentă a abaterii;
5. transmite mărimea de comandă electronicii de putere și prin aceasta motorului, pentru a imprimă elementelor cuplelor cinematice conducătoare o mișcare în sensul anulării abaterii.

Observații:

1. cele cinci puncte menționate anterior se constituie în **problema conducerii nemijlocite** a elementelor unei cuple cinematice conducătoare (în contextul de față **conducere nemijlocită** însemnând *conducere directă, fără intermediar*);
2. în unele cazuri intervine și blocul interpolator care generează puncte prescrise suplimentar;

3. o parte din transmisie și frână (electromecanică) se consideră incluse în sistemul de acționare. Astfel, prima roată dințată, prima față a unui ambreiaj, fulia conducătoare a unei curele etc. – după caz, se consideră că fac parte din sistemul de acționare.

Ideal ar fi ca un robot să poată fi condus folosind un **regulator global** care să controleze simultan toate mișcările de pe toate axele. Acest mod de conducere nu se implementează deocamdată deoarece:

- a) traductoarele carteziane care pot urmări mișcarea punctului caracteristic în spațiu sunt extrem de scumpe la preciziile pretinse de aplicațiile din robotică;
- b) legăturile dintre mișcările pe diferite axe se exprimă prin ecuații complicate (profund neliniare).
- c) volumul de calcule necesar pentru realizarea unei reglări globale este foarte mare și nu se poate realiza în timp real cu nici un calculator convenabil, ca și cost, la momentul actual.

Din aceste motive, indiferent de modul în care se realizează conducerea robotului, mișcarea propriu-zisă a sistemului mecanic se conduce cu S.C.L.-uri dispuse la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare. Este utilizată **metoda de conducere distribuită** a mișcărilor pe axe. Blocuri, de tip S.C.L., construite anume pentru conducerea unei singure axe mecanice sunt astăzi bine puse la punct. Sisteme de acest fel, precum și senzorii/traductoarele aferente se produc la prețuri accesibile.

2.3. Funcții ale sistemului de conducere al unui robot

Sistemul de conducere al unui robot a cărui schema bloc s-a prezentat în figura 2.1. are de efectuat mai multe seturi de calcule și de operații:

- calcule de cinematică prin care se determină elementele unei traiectorii: poziții, viteze accelerații (termenul „determină” are aici semnificația *se află* și acestea *impun*);
- calcule de dinamică;
- interpretarea informațiilor de la senzori și traductoare;
- calcule aferente reprezentării interne în calculator a lumii înconjurătoare;
- calcule aferente conducerii robotului, impuse de algoritmele de reglare, în care se ține seamă și de calculele de cinematică și dinamică;
- comanda sistemelor de acționare și realizarea conducerii nemijlocite a elementelor robotului;
- dialogul cu operatorul uman, realizat cu ajutorul unor dispozitive adecvate (display, tastatură, unitate de disc) și folosind programe corespunzătoare.

Operațiile și calculele mai sus enunțate sunt efectuate într-o anumită ordine și după anumite priorități, în funcție de condițiile unei aplicații concrete. Pentru fiecare grup de calcule pot exista calculatoare dedicate sau blocuri software (pachete de programe) specializate.

Grupele de calcule și comenzi enunțate anterior se pot împărți principial în **trei grupe mari de sarcini** ale unui sistem de conducere al robotului.

- A. Modelarea mediului.**
- B. Specificarea, Generarea și Controlul mișcărilor.**
- C. Dialogul cu operatorul uman.**

3. Problema conducerii unui robot. pp.83-85.

4.1. Problema conducerii unui robot

Conducerea unui robot presupune două aspecte aparent distincte dar aflate, în realitate, într-o interdependență numai principial divizibilă.

I) Parcurgerea etapelor unui proces tehnologic presupune deplasarea dispozitivului de ghidare, în raport cu obiectele din mediu, astfel încât punctul caracteristic să ocupe, în fiecare etapă, situații impuse sau determinate (acesta este **scopul** conducerii unui robot).

În fiecare etapă a procesului tehnologic punctul caracteristic trece prin anumite puncte din spațiul cartezian. Cele mai multe dintre aceste puncte sunt impuse de procesul tehnologic și reprezintă **puncte țintă** (*goal points*). La trecerea punctului caracteristic printr-un punct țintă sistemul de coordonate atașat acestuia are anumite poziții și orientări care se exprimă matricial (de exemplu cu matricea T_6).

Observație: la trecerea printr-un punct din spațiul cartezian contează nu numai atingerea punctului respectiv, ci și orientarea în spațiu a efectorului final. Contează **unde și cum** „pune mâna” robotul.

Orientările și pozițiile punctului caracteristic (exprimate cu T_6 , vezi subcapitolul 3.5) pot fi *calculate* (în blocul pentru modelarea mediului) sau pot fi *învățate*, înainte de efectuarea deplasării. Așadar punctele țintă sunt fie învățate, fie calculate.

În deplasarea punctului caracteristic de la un punct țintă la altul, el trece prin **puncte via** (puncte de trecere). Dintre aceste puncte via unele sunt *puncte via propriu-zise* (*through via points*), prin care trecerea este obligatorie, iar altele sunt *puncte pseudovia*, la care trecerea se face numai prin vecinătatea lor.

Observație: De obicei, în punctele țintă este obligatorie și oprirea, iar prin punctele via, de regulă, trecerea se face fără oprire, cu o anumită viteză impusă. Există însă și cazuri în care și în punctele via este obligatorie și oprirea.

Deoarece punctele definite mai sus se află în spațiul de lucru al robotului (impunându-se trecerea prin ele), este natural ca punctele țintă și via să fie exprimate în *coordonate operaționale* (coordonatele în care operează efectorul final al robotului). De cele mai multe ori se folosește exprimarea în coordonate carteziane.

Pornind de la coordonatele operaționale (carteziene) care corespund trecerii punctului caracteristic printr-un punct țintă sau via, cu analiza cinematică inversă se determină un set de **coordonate poziționale relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare** sau, pe scurt, **coordonate c.c.c.** numite și **coordonate articulare** sau **coordonate robot**.

Acestea pot fi unghiuri θ - pentru cuplele de rotație – dau distanțe d – pentru cuple cinematice de translație. Setul de valori obținut (cu analiza cinematică inversă) este tot un set de puncte țintă sau via, dar exprimate în coordonate c.c.c. (coordonate articulare, sau coordonate robot).

Conducerea unui robot poate fi realizată în coordonate operaționale (carteziene), când punctele țintă și via sunt exprimate cu valori numerice concrete pentru elementele matricii T_6 , sau în coordonate c.c.c., când punctele țintă și via sunt exprimate prin seturi de valori θ_i sau/și d_i de la nivelul c.c.c. Se utilizează curent terminologia “*conducerea unui robot în coordonate operaționale*” (carteziene), respectiv “*conducerea unui robot în coordonate c.c.c.*” (coordonate articulare).

II) În afară de trecerea prin punctele țintă și via, în conducerea unui robot interesează și evoluția în timp a mișcării acestuia. În desfășurarea unui proces tehnologic este necesar ca dispozitivul de ghidare să aibă o mișcare lină, fără smucituri, fără frânări și/sau accelerări bruște.

Acest deziderat este impus, de cele mai multe ori, de însuși procesul tehnologic (de exemplu paletizare, montaj etc.). Pe de altă parte, o mișcare fără smucituri este impusă și de necesitatea de a reduce la minimum uzurile din structura sistemului mecanic.

Evoluția lină în timp se asigură dacă pentru coordonata generalizată q se alege o variație în timp:

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}(t) \quad (4.1)$$

unde \mathbf{f} este o funcție lină, adică pentru \mathbf{q} se alege o lege de mișcare lină.

O funcție se numește *lină* dacă funcția și cel puțin primele sale două derivate sunt continue în timp (uneori se cere și ca și derivata a 3-a să fie continuă).

Notă: q este coordonata generalizată utilizată în conducere - poate fi operațională (carteziană) sau c.c.c.

Concluzie: problema conducerii unui robot constă din două aspecte între care există o strânsă legătură: impunerea trecerii prin punctele țintă sau via (exprimate în coordonate c.c.c. sau în coordonate operaționale) în condițiile asigurării unei evoluții line (în timp) a mișcării.

Observație: Această problemă este întâlnită și în viața cotidiană la conducerea automobilului:

În primul rând, interesează deplasarea automobilului pe drumul impus, cu evitarea obstacolelor. Pe de altă parte, interesează ca automobilul să aibă o evoluție lină, fără accelerări și/sau frânări bruște. Deosebirea între un șofer experimentat și unul începător se manifestă, mai ales, prin felul în care cei doi asigură o evoluție lină vehiculului.

4.2. Metode de conducere a roboților

Metodele de conducere a roboților se pot clasifica din trei puncte de vedere:

- în funcție de sursa pentru punctele țintă;
- după modul de execuție a deplasărilor;
- după coordonatele folosite în conducere.

4.4. Legătura spațiu-timp în mișcarea unui robot

În conducerea unui robot interesează:

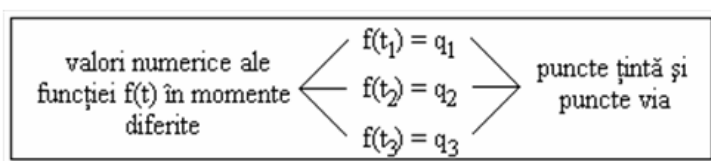
- trecerea prin anumite situații impuse sau calculate;
- evoluție lină în timp.

În conducere se procedează la comanda coordonatei generalizate către valori diferite, în momente diferite. În acest scop, pentru coordonata generalizată q se alege legea de mișcare

$$q = f(t) \tag{4.1}$$

unde $f(t)$ este o funcție de timp lină, ceea ce înseamnă că funcția și primele sale două derivate sunt continue.

Legătura între spațiu și timp se realizează prin aceea că, la anumite valori pentru timp, valorile numerice aferente ale lui $f(t)$ trebuie să fie egale cu valorile lui q corespunzătoare unor puncte țintă și via de pe traiectorie.



4.5. Legătura spațiu-timp în descrierea unei traiectorii

Fie un exemplu de traiectorie liniară într-un plan cartezian (fig.4.9):

Ecuția dreptei este $y = m \cdot x + n$ (4.2.)

unde: m este panta dreptei
 n este tăietura dreptei.

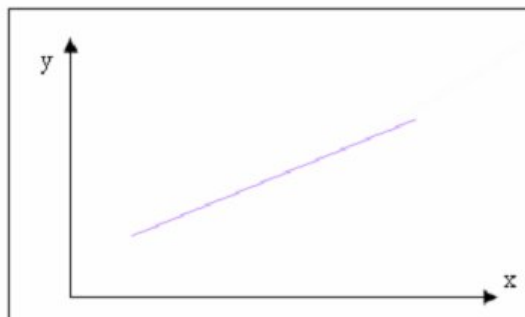


Fig.4.9. O dreaptă oarecare în plan

Prin derivare:

$$\frac{dy}{dx} = m \quad (4.3)$$

Procedând la împărțire cu dt atât la numitor cât și la numărător:

$$\Rightarrow \frac{dy}{dt} \frac{dt}{dx} = m \quad (4.4)$$

Presupunând că această dreaptă trebuie descrisă într-un plan de punctul caracteristic, iar acesta se mișcă cu viteză constantă după direcția axei coordonatei x și tot cu viteză constantă după direcția axei coordonatei y, iar raportul celor două viteze este m, punctul caracteristic va descrie în plan o dreaptă de pantă m.

Continuând raționamentul: $\frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{\ddot{y}t}{\ddot{x}t} = m \quad (4.5)$

Dacă cele două mișcări după direcția axelor de coordonate sunt uniform accelerate, iar raportul accelerațiilor este m, atunci în plan se descrie o dreaptă de pantă m.

Adică dacă pe fiecare dintre axele Ox și Oy se alege câte o lege de mișcare:

$$q = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (4.6)$$

și

$$\frac{\ddot{y}}{\ddot{x}} = \frac{a_{2y}}{a_{2x}} = m \quad (4.7)$$

atunci în plan este descrisă o dreaptă.

Observație: În exemplul considerat s-a constatat că urmărind o anumită evoluție în timp se obține o anumită formă a traiectoriei din spațiul cartezian.

Din punct de vedere practic, realizarea unei drepte în plan se obține alegând porțiuni cu mișcare uniform accelerată și porțiuni cu mișcare rectilinie uniformă.

Fie o dreaptă în plan ce se presupune a deveni o traiectorie impusă (fig.4.10.):

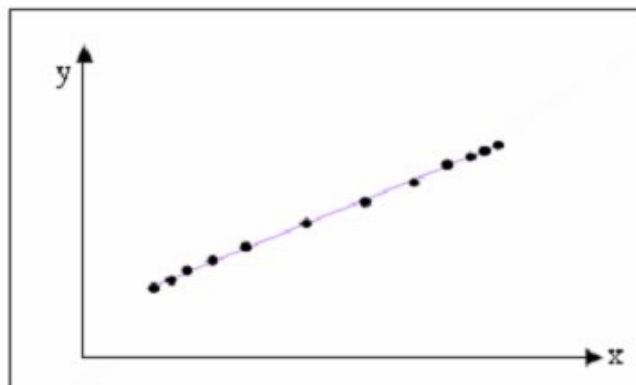


Fig.4.10. Puncte alese pe o traiectorie liniară

Pe această dreaptă se aleg mai multe puncte țintă și via. În mod intenționat la începutul și sfârșitul parcurgerii drepte se aleg puncte amplasate mai des, iar pe mijlocul liniei se aleg puncte amplasate mai rar. Pentru descrierea acestei drepte, în mișcare, este necesar ca la începutul și sfârșitul trasării ei mișcarea după x și y să se efectueze uniform accelerat cu:

$$\frac{a_y}{a_x} = m \quad (4.8)$$

unde m este panta dreptei.

Pe porțiunea din mijloc se impune ca mișcarea să se efectueze cu viteze constante:

$$\frac{v_y}{v_x} = m \quad (4.9)$$

iar la sfârșitul drepte mișcările se fac uniform încetinit cu:

$$\frac{|a_y|}{|a_x|} = m. \quad (4.10)$$

Deci, dacă se conduce robotul după un profil trapezoidal de viteză, după fiecare dintre axele x și y , atunci în plan punctul caracteristic descrie o dreaptă cu panta:

$$m = \frac{|a_y|}{|a_x|} = \frac{v_y}{v_x} \quad (4.11)$$

Observații:

- 1) Pe porțiunile de accelerare și decelerare punctele de pe dreaptă nu sunt echidistante în spațiu, dar sunt echidistante în timp. Adică spațiul parcurs între un punct și altul (pe porțiunile de accelerare) este diferit, dar intervalul de timp între ele este același.
- 2) Pe fiecare dintre coordonatele x și y se alege câte o lege de mișcare cu profil trapezoidal de viteză, cu:

$$m = \frac{|a_y|}{|a_x|} = \frac{v_y}{v_x},$$

iar în spațiu se trasează o dreaptă de pantă m .

- 3) Situația se poate generaliza și în spațiul tridimensional pentru trasarea unei drepte în spațiu.
- 4) O astfel de metodă de conducere este direct aplicabilă în cazul unui robot T.T.T.
- 5) Legile de mișcare rectilinie uniform accelerată:

$$q = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (4.6)$$

și rectilinie uniformă:

$$q = a_1 t + a_0 \quad (4.12)$$

sunt funcții line (funcția și primele sale două derivate sunt continue), deci mișcarea per ansamblu este lină.

6) În cazul unui robot diferit de configurația T.T.T. metoda se aplică mai greu deoarece:

- o deplasare cu $\dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}$ constante nu înseamnă implicit și o deplasare cu $v = ct.$ și $a = ct.$ la nivelul fiecărui motor amplasat la câte o cuplă cinematică conducătoare. În general vitezele și accelerațiile pe x și y și cele de la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare se stabilesc cu Jacobianul aferent.
- panta m a dreptei este impusă de traiectoria dorită și nu întotdeauna se pot sintetiza și practic viteze de valori astfel încât raportul lor să fie chiar m . De cele mai multe ori se admite deplasarea cu viteze aflate într-un raport cât mai apropiat de m și se acceptă o anumită abatere de la dreapta impusă.
- De multe ori, impunând anumite valori ale vitezei pe axele x și z și efectuând calculul cu Jacobianul pot rezulta viteze \dot{q}_i , la nivelul cuplelor cinematice conducătoare, nerealizabile fizic. În această situație se alege, la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare, cea mai apropiată valoare realizabilă fizic pentru viteză și se sintetizează deplasări cu aceste viteze rezultând o traiectorie numai aproximativ exactă.

Concluzii: metoda descrisă este direct aplicabilă pentru o structură de mecanism T.T.T., este deosebit de utilă pentru înțelegerea legăturii spațiu-timp în conducerea unui robot, dar se aplică mai greu în cazul altor tipuri de roboți.

4.6. Legătura spațiu-timp prin ecuații parametrice

Observație: pentru simplificare vom arăta această legătură în cazul unei traiectorii liniare plane.

Ecuția unei drepte în plan este:

$$y = mx + n \quad (4.2)$$

unde: m este panta dreptei, ar n este tăietura. Aceasta este forma explicită de scriere.

În geometria analitică se cunosc și alte forme de reprezentare a ecuației unei drepte. Dintre acestea ne interesează **ecuațiile parametrice** ale dreptei:

$$\begin{cases} y = a_1 t + a_0 \\ x = b_1 t + b_0 \end{cases} \quad (4.13)$$

unde t este un parametru arbitrar scalar.

Observație: eliminând t din sistemul (4.13) se ajunge la forma ecuației (4.2) pentru dreaptă.

La fel, se poate scrie și un sistem de ecuații de gradul 2:

$$\begin{cases} y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \\ x = b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \end{cases} \quad (4.14)$$

sau:

$$\begin{cases} y = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \\ x = b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \end{cases} \quad (4.15)$$

ș.a.m.d.

Observație: se pot scrie și forme cu ecuații de grad mai mare, singura condiție, în cazul drepte, fiind aceea că cele două ecuații trebuie să fie de același grad.

Astfel de ecuații parametrice există și pentru alte curbe din plan și spațiu (sinusoidă, curbă lănișor, cerc, elipsă, parabolă, hiperbolă, ...).

În general, o curbă în spațiu se exprimă prin sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} x = f(t) \\ y = g(t) \\ z = h(t) \end{cases} \quad (4.16)$$

unde f , g și h sunt funcțiile parametrice ale curbei, iar t este un parametru scalar arbitrar.

Sistemul (4.16) este **sistemul de ecuații parametrice ale curbei**.

Pentru o dreaptă funcțiile f , g și h sunt de același grad, iar pentru traiectorii de alte forme, au grade diferite.

Pornind de la aceste cunoștințe din geometria analitică, în robotică se alege ca parametru scalar t chiar timpul, pentru că în robotică interesează evoluția în timp a mișcării.

Observații:

- 1). Funcțiile parametrice sunt întotdeauna polinomiale și, astfel, sunt funcții line;
- 2). Dacă scalarul t este timpul, atunci funcțiile parametrice sunt și legi de mișcare după coordonatele carteziane.

4.7. Funcții conducere

Pornind de la ecuațiile parametrice ale unei curbe și de la faptul că se impune ca deplasarea să se efectueze lin, în robotică se folosesc ecuațiile parametrice ale unei curbe în care variabila scalară este timpul.

Observația în legătură cu ecuațiile parametrice ale unei curbe poate fi generalizată. Cele trei forme de exprimare ale unei curbe în spațiu sunt:

- forma implicită:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (4.17)$$

- forma explicită:

$$\begin{cases} F_1(x, y) = 0 \\ F_2(y, z) = 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

- forma cu ecuații parametrice:

$$\begin{cases} x = f(t) \\ y = g(t) \\ z = h(t) \end{cases} \quad (4.16)$$

O curbă în spațiu poate fi însă exprimată și în alte coordonate decât cele carteziene x, y, z . Fie acestea coordonatele generalizate:

$$q_i = 1 \div n. \quad (4.19)$$

În acest caz ecuația curbei respective poate fi exprimată fie în forma implicită:

$$F(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0 \quad (4.20)$$

fie cu sistemul de ecuații parametrice:

$$q_i = f_i(t), i = 1 \div n. \quad (4.21)$$

Aplicând această observație la robotică, pentru o anumită traiectorie a punctului caracteristic, putem folosi exprimarea acesteia cu sistemul de ecuații parametrice:

$$q_i = f_i(t), i = 1 \div n,$$

dar cu particularitatea că:

- a) se alege ca parametru scalar t timpul;
- b) coordonatele generalizate q_i se aleg chiar coordonatele cuplelor cinematice conducătoare ale robotului (unghiuri θ_i sau deplasări d_i , după felul cuplelor cinematice);
- c) se aleg toate funcțiile $f_i(t)$ funcții line.

Aceste funcții $q_i = f_i(t)$ au fost numite în robotică **funcții conducere**.

Observații:

- 1) Funcțiile de conducere sunt de fapt:
 - a) funcțiile parametrice ale traiectoriei;
 - b) legile de mișcare de la nivelul cuplelor cinematice conducătoare.
- 2) Denumirile “funcțiile parametrice ale traiectoriei” sau “legile de mișcare de la nivelul cuplelor cinematice conducătoare” sau “funcțiile conducere de la nivelul cuplelor cinematice conducătoare” înseamnă același lucru.
- 3) Ca exemplu concret, nelegat de robotică, pentru înțelegerea conceptului teoretic mai sus detaliat, se poate da cazul acrobațiilor cu motocicletă: dacă un motociclist acrobat trebuie să realizeze o anumită traiectorie (de pildă, să facă un salt peste mai multe obstacole sau peste un curs de apă), el obține traiectul dorit controlând exclusiv accelerația și viteza motocicletei, adică legea de mișcare a acesteia.

5. Problema conducerii nemijlocite a elementelor c.c.c. Schema de conducere a unei axe. pp. 27 – 28; pp.99-101; pp.213 -218

2.2.1. Sistemul de acționare

După cum s-a arătat și mai sus, la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare este amplasat câte un motor de acționare. Motorul poate fi electric, hidraulic sau pneumatic.

Observație: după tipul de motoare cu care este dotat și robotul primește denumirea de robot cu *acționare electrică, hidraulică, pneumatică sau mixtă*.

Motorul generează mișcarea elementelor mecanice. Mișcarea este transmisă (prin blocul **transmisie**) la elementele cuplelor cinematice conducătoare acționate.

Motorul este comandat de un circuit electronic și primește energie de la o sursă de alimentare.

Întregul ansamblu, compus din motor și circuitele electronice care îl comandă, constituie un *sistem de conducere locală (S.C.L.)*. Într-un robot există atâtea S.C.L.-uri câte cuple cinematice conducătoare trebuie comandate. S.C.L.-urile sunt realizate cu o structură de *sistem de reglare automată (S.R.A.)*.

Observație: S.R.A. este un sistem în care reglarea se face automat, adică fără intervenție din exterior, spre scopul final urmărit.

Sistemul de acționare se compune din mai multe S.C.L.-uri în funcție de numărul de grade de mobilitate ale sistemului mecanic.

Observație: În fig.3 s-a reprezentat un singur S.C.L. (S.R.A.) și s-a indicat cu ”6×6” faptul că în sistemul de acționare există 6 astfel de S.C.L.-uri deoarece s-a presupus că robotul are 6 axe.

Întregul S.C.L. este condus de către un **controler** realizat cu microprocesor sau microcontroler. Acesta realizează funcția de regulator:

1. preia **mărimea de prescriere** (poziție, viteză, accelerație) de la generatorul de traiectorie;
2. preia informația cu privire la mișcarea executată în realitate de elementele mecanice (care este **mărimea de reacție**), de la traductorul aferent;
3. calculează **abaterea (eroarea)** dintre mărimea de prescriere și cea de reacție;
4. calculează **mărimea de comandă** cu care se corectează abaterea; calculul se efectuează cu o formulă numită **algoritm de reglare** (proiectat de inginerii automatiști) utilizând valoarea curentă a abaterii;
5. transmite mărimea de comandă electronicii de putere și prin aceasta motorului, pentru a imprima elementelor cuplelor cinematice conducătoare o mișcare în sensul anulării abaterii.

Observații:

1. cele cinci puncte menționate anterior se constituie în **problema conducerii nemijlocite** a elementelor unei cuple cinematice conducătoare (în contextul de față **conducere nemijlocită** însemnând *conducere directă, fără intermediar*);
2. în unele cazuri intervine și blocul interpolator care generează puncte prescrise suplimentar;

3. o parte din transmisie și frână (electromecanică) se consideră incluse în sistemul de acționare. Astfel, prima roată dințată, prima față a unui ambreiaj, fulia conducătoare a unei curele etc. – după caz, se consideră că fac parte din sistemul de acționare.

Ideal ar fi ca un robot să poată fi condus folosind un **regulator global** care să controleze simultan toate mișcările de pe toate axele. Acest mod de conducere nu se implementează deocamdată deoarece:

- a) traductoarele carteziane care pot urmări mișcarea punctului caracteristic în spațiu sunt extrem de scumpe la preciziile pretinse de aplicațiile din robotică;
- b) legăturile dintre mișcările pe diferite axe se exprimă prin ecuații complicate (profund neliniare).
- c) volumul de calcule necesar pentru realizarea unei reglări globale este foarte mare și nu se poate realiza în timp real cu nici un calculator convenabil, ca și cost, la momentul actual.

Din aceste motive, indiferent de modul în care se realizează conducerea robotului, mișcarea propriu-zisă a sistemului mecanic se conduce cu S.C.L.-uri dispuse la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare. Este utilizată **metoda de conducere distribuită** a mișcărilor pe axe. Blocuri, de tip S.C.L., construite anume pentru conducerea unei singure axe mecanice sunt astăzi bine puse la punct. Sisteme de acest fel, precum și senzorii/traductoarele aferente se produc la prețuri accesibile.

2.3. Funcții ale sistemului de conducere al unui robot

Sistemul de conducere al unui robot a cărui schema bloc s-a prezentat în figura 2.1. are de efectuat mai multe seturi de calcule și de operații:

- calcule de cinematică prin care se determină elementele unei traiectorii: poziții, viteze accelerații (termenul „determină” are aici semnificația *se află* și acestea *impun*);
- calcule de dinamică;
- interpretarea informațiilor de la senzori și traductoare;
- calcule aferente reprezentării interne în calculator a lumii înconjurătoare;
- calcule aferente conducerii robotului, impuse de algoritmele de reglare, în care se ține seamă și de calculele de cinematică și dinamică;
- comanda sistemelor de acționare și realizarea conducerii nemijlocite a elementelor robotului;
- dialogul cu operatorul uman, realizat cu ajutorul unor dispozitive adecvate (display, tastatură, unitate de disc) și folosind programe corespunzătoare.

Operațiile și calculele mai sus enunțate sunt efectuate într-o anumită ordine și după anumite priorități, în funcție de condițiile unei aplicații concrete. Pentru fiecare grup de calcule pot exista calculatoare dedicate sau blocuri software (pachete de programe) specializate.

Pentru generatorul de traiectorie se cunosc două moduri de operare:

- a) *fără sintetizarea unei traiectorii carteziene prescrise;*
- b) *cu sintetizarea unei traiectorii carteziene impuse de procesul tehnologic.*

În primul caz, pentru deplasarea elementelor mecanice, conform secvenței de parametri calculați de generatorul de traiectorie, punctul caracteristic descrie în spațiu o traiectorie obținută ca și rezultat al mișcărilor pe toate axele (o traiectorie greu de exprimat analitic și greu de urmărit vizual).

În modul a) de operare GT primește ca și condiții impuse punctele țintă și via și forma aleasă pentru funcțiile conducere. În etapa de specificare a mișcării generatorul de traiectorie calculează coeficienții variabilei timp, din condițiile impuse. În etapa de generare a mișcării GT generează, la intervale de timp constante, coordonate (c.c.c sau carteziene), viteze, accelerații, necesare pentru deplasarea robotului, conform condițiilor impuse și după funcțiile conducere alese.

În modul b) de operare generatorul de traiectorie primește la intrare și expresia analitică a unei traiectorii carteziene impuse de procesul tehnologic. Dacă traiectoria este complicată expresia ei se obține prin aproximarea acesteia pe porțiuni cu segmente de curbe simple (dreaptă, cerc, parabolă, ...).

Pozițiile obținute din funcțiile conducere trebuie să coincidă sau să aproximeze cât mai precis punctele traiectoriei carteziene impuse.

Indiferent de modul de operare adoptat, a sau b, pentru GT, mărimile de la ieșirea sa reprezintă mărimi de prescriere pentru regulatoarele automate din structura sistemelor de conducere locale ce compun sistemul de acționare al robotului. Sistemele de conducere locale asigură conducerea nemijlocită a elementelor cuplelor cinematice conducătoare.

4.8.3. Conducerea nemijlocită a elementelor cuplelor cinematice conducătoare

Observație: termenul *nemijlocit* are, în acest context, semnificația direct, fără intermediari.

Indiferent de modul de conducere al robotului, mișcările elementelor sistemului mecanic se provoacă la nivel articular. Analizând schema bloc a echipamentului de conducere a unui robot (fig.2.3) se constată că sistemul de acționare al acestuia se compune din mai multe **sisteme de conducere locală (SCL)**, construite cu o structură de *sistem cu reglare automată (SRA)* (vezi și fig.4.12)

Componenta principală a câte unui sistem de conducere locală este motorul de acționare care produce mișcările elementelor cuplelor cinematice conducătoare.

Observație: motorul poate fi electric, hidraulic, pneumatic sau mixt, după caz; în funcție de tipul motoarelor folosite și robotul este denumit cu acționare electrică, hidraulică, pneumatică sau mixtă.

Motorul este alimentat cu energie de la o sursă de alimentare (rețeaua de alimentare cu curent alternativ, un agregat hidraulic, rețeaua de aer comprimat).

Între sursa de alimentare și motor se află etajul electronică de putere, EP, cu rolul de a amplifica, până la nivelul de putere corespunzător, comenzile către motor.

Conducerea fiecărui sistem de conducere locală este asigurată de un microprocesor sau microcontroler numit *controler de ax* (care coordonează SCL).

Observație: în unele cazuri se utilizează microprocesoare sau microcontrolere mai performante și se folosește un singur microprocesor sau microcontroler pentru comanda mai multor SCL (de regulă, maxim trei).

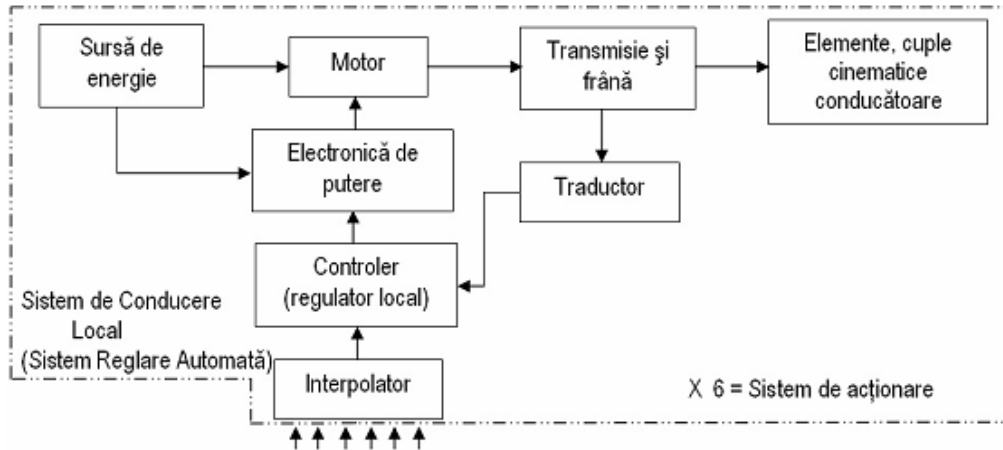


Fig.4.12. Schema bloc a unui sistem de conducere locală (SCL)

Fiecare cuplă cinematică conducătoare este condusă de către un SCL.

Mișcările elementelor cuplurilor cinematice conducătoare sunt urmărite de traductoare de poziție, viteză, accelerație, care fac parte din structura sistemelor de conducere locale, și furnizează fiecărui controler de ax informațiile cu privire la mișcarea efectuată în realitate de elementele mecanice.

4.8.3.1. Problema conducerii nemijlocite a elementelor cuplurilor cinematice conducătoare

Se definește ca și problemă a conducerii nemijlocite a unei axe mecanice următorul grup de 5 funcții și operații:

- 1) Generatorul de traiectorie furnizează (în unele cazuri prin intermediul interpolatorului) poziția impusă q^d (în unele cazuri și/sau viteza impusă și/sau accelerația impusă) numită *mărime de prescriere*.
- 2) Traductorul furnizează mărimile atinse în realitate de elementele mecanice: $q^r, \dot{q}^r, \ddot{q}^r$, numite *mărimi de reacție*.
- 3) Controlerul de ax calculează *abaterea* (denumită uneori și *eroare*).

$$\begin{aligned}
 a_p &= q^d - q^r \\
 a_v &= \dot{q}^d - \dot{q}^r \\
 a_a &= \ddot{q}^d - \ddot{q}^r
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

- 4) Abateră se introduce într-o formulă numită *algoritm de reglare (AR)*, proiectat de inginerii automatiști, care permite calcularea unei *mărimi de comandă y* cu care apoi se comandă electronica de putere și, în final, motorul. *y* rezultă din calcule astfel încât va comanda mișcarea în sensul anulării abaterii.

Observație: Operațiile 3 și 4 sunt efectuate tot de controlerul de ax.

Algoritm de reglare este proiectat astfel încât să implementeze o anumită *lege de reglare*. Principalele legi de reglare sunt:

- *reglarea de tip P (proporțională)* în care mărimea de comandă *y* este proporțională cu abaterea;
- *reglare de tip PI (proporțional integratoare)* în care *y* este proporțională cu abaterea și cu integrala ei;
- *reglarea de tip PID (proporțional integrator derivativă)* în care *y* e proporțională cu abaterea, integrala și derivata ei.

Fiecare dintre aceste legi de reglare prezintă avantaje și dezavantaje și se utilizează în funcție de performanțele urmărite în reglare.

Principalele performanțe pretinse de la un algoritm de reglare sunt:

- timp de răspuns cât mai scurt;
- eroare nulă în regim staționar;
- evitarea intrării în stare de oscilație.

La proiectarea algoritmului de reglare se ține seama de parametrii elementelor componente sistem (masele puse în mișcare, constantele motorului de acționare, parametrii etajului de electronică de putere, ș.a.).

Observație: În capitolul 6 se va prezenta mai detaliat problematica reglării automate.

- 5) Comandă, cu semnalul *y*, blocul electronica de putere și, prin aceasta, motorul determinând, în final, mișcarea elementelor mecanice în sensul anulării abaterii.

Fiecare articulație este prevăzută cu câte un sistem de conducere local propriu și, deci, conducerea nemijlocită a axelor unui robot se efectuează într-un mod independent pentru fiecare cuplă cinematică conducătoare. Cu alte cuvinte, se procedează la **conducerea distribuită** a axelor mecanice.

Observație: ideal ar fi ca la nivelul întregului robot să se urmărească simultan toate mișcărilor de pe toate axele și să se înfăptuiască o conducere în ansamblu a robotului cu un, eventual, *regulator global*. Acest lucru nu se poate realiza momentan pentru că:

- nu există traductoare carteziane de mare precizie la prețuri convenabile (prețul unui astfel de traductor este comparabil cu cel al întregului echipament electronic al robotului);
- legăturile dintre mișcărilor pe diferite axe sunt exprimabile cu ecuații complicate (neliniare) și timpul de calcul necesar conducerii ar crește exagerat de mult (conducerea în timp real devine imposibilă).
- sisteme de conducere pentru câte o axă mecanică se folosesc de când se fabrică mașinile cu comandă numerică; astfel de echipamente sunt astăzi produse de firme specializate, la prețuri accesibile.

6.1. Sistem de conducere local pentru o axă mecanică

Sistemul de acționare al unui robot se compune din mai multe sisteme conducere locală (SCL), amplasate la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare (fig.4.12).

În contextul lucrării de față, prin conducere nemijlocită se înțelege conducere propriu-zisă, directă, fără intermediar.

Un sistem de conducere local este realizat cu o structură de sistem de reglare automată (SRA), construit în jurul câte unui motor ce produce mișcarea.

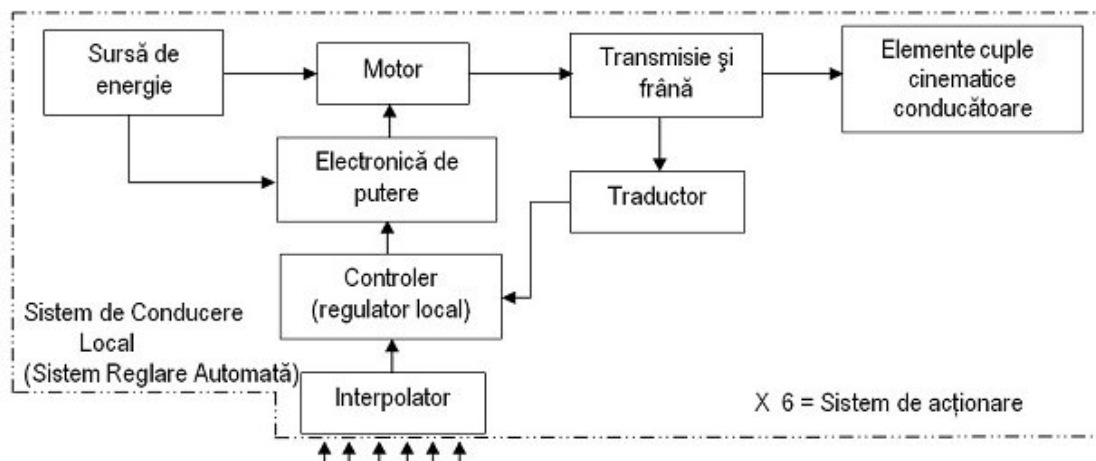


Fig.4.12. Schema bloc a unui sistem de conducere locală (SCL)

Definiție: elementul care transformă în energie cinetică orice altă formă de energie se numește **motor**.

În funcție de tipul motorului este denumit și sistemul de acționare: electrică, hidraulică, pneumatică,...

Sistemul de acționare electrică este cel mai răspândit în cazul roboților, circa 80% dintre roboți fiind cu acționare electrică. Acest lucru se datorează următoarelor argumente:

- 1) Disponibilitatea cvasigenerală a energiei electrice în mediile industriale;
- 2) Robuțea motoarelor electrice (motoarele de gabarit relativ mic permit dezvoltarea de cupluri relativ mari, admit supraîncărcări în limite destul de largi);
- 3) Posibilitatea de racordare simplă a motoarelor la sursa de energie;

- 4) Dinamică foarte bună(motoarele electrice au inerți mici și timp de răspuns scurt la comenzile aplicate);
- 5) Manoperă de întreținere mică;
- 6) Randament energetic ridicat;
- 7) Cost mai redus.

Sistemul de acționare hidraulică este folosit mai ales în aplicațiile cu sarcini mari. Sistemul de acționare pneumatică permite numai acționări simple (închis/ deschis înainte/înapoi) și se folosesc mai ales la manipuloare simple.

În cazul acționărilor electrice cel mai frecvent se utilizează motorul de curent continuu, deoarece acesta prezintă avantajul modificării turației sale la modificarea tensiunii aplicate la borne.

Indiferent de modul sau coordonatele folosite în conducerea unui robot, ori de tipul de acționare utilizat, conducerea nemijlocită a elementelor cuplurilor cinematice conducătoare se realizează, individual, la nivelul fiecăreia dintre ele. Se procedează, astfel, la o conducere descentralizată, distribuită la nivelul fiecărei axe în parte.

Principial, structura (bloc) după care se realizează conducerea nemijlocită este cea din fig.6.1.

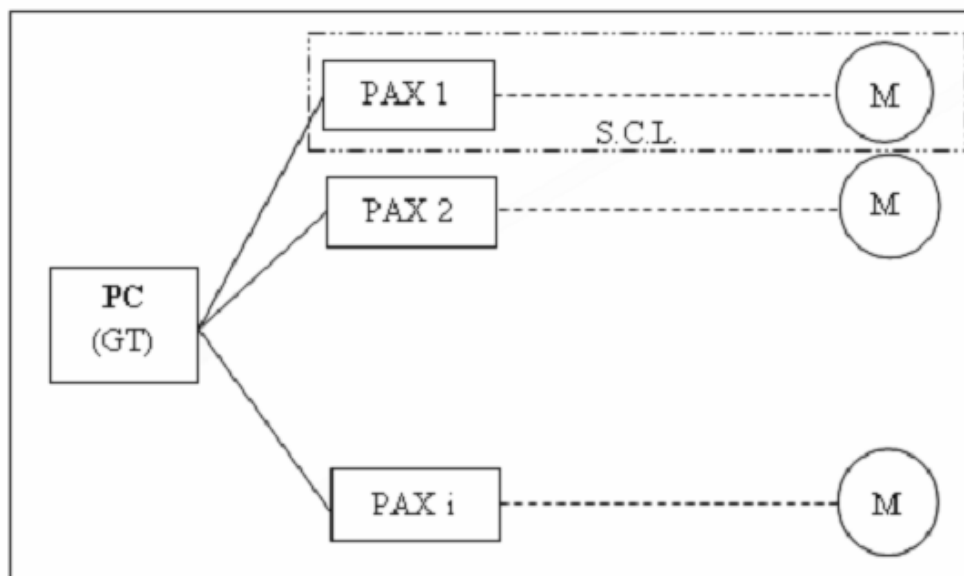


Fig.6.1. Conducerea distribuită a axelor unui robot

Fiecare axă este condusă cu câte un sistem de conducere local (SCL) construit în jurul motorului de acționare aferent. Fiecare SCL este coordonat de câte un procesor de ax (implementat cu microprocesor sau microcontroler). Calculatorul central al robotului (de tip PC) comandă, prin generatorul de traiectorie și, uneori, prin interpolator, procesoarele de ax PAX i (controlerele de ax din schema bloc a robotului). Numărul de microprocesoare/ microcontrolere de ax (PAX) este în funcție de numărul de grade de libertate ale robotului (tipic 6). Există însă și situații în care se folosește un singur microprocesor/ microcontroler pentru conducerea nemijlocită a mai multor

axe, caz în care structura ierarhică se schimbă(vezi fig.6.2). În acest caz sunt necesare microprocesoare/ microcontrolere performante (scumpe) și trebuie elaborat un software mai complicat pentru acestea (costuri suplimentare de manoperă).

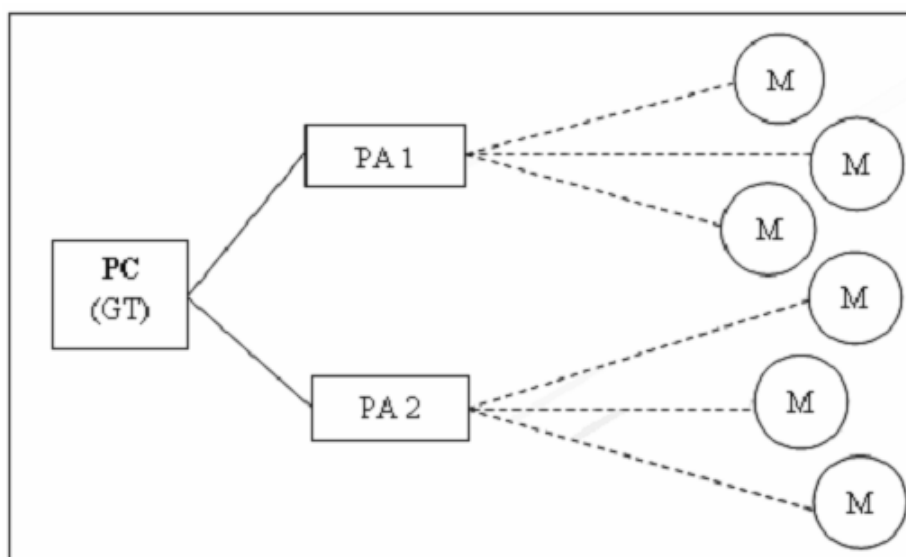


Fig.6.2. Conducerea a mai multe axe cu un același microprocesor

Un sistem de conducere locală (SCL) complet de la nivelul unei cuple cinematice conducătoare trebuie să conțină și transmisia mecanică și o frână (vezi fig.4.12).

Observație: din transmisie o parte se consideră inclusă în sistemul de acționare: rotorul motorului și

- roata dințată primară;
- fulia de la cureaua de transmisie;
- o față a ambreiajului;
- volanta.

De obicei de axul transmisiei este legat și traductorul de poziție, viteză, accelerație (uneori numai unul, uneori toate trei), care furnizează informații despre mișcarea realizată în realitate.

Există traductoare numerice (incrementale) care furnizează impulsuri electrice în timpul funcționării. Există și traductoare electrice care furnizează o tensiune sau un curent electric proporțional cu deplasarea efectuată sau cu viteza.

Motorul este comandat de blocul *electronică de putere*. Acest bloc este de fapt un convertor de formă de energie.

Exemplu: pentru cazul motorului de curent continuu blocul “electronică de putere” se alimentează de la rețeaua de curent alternativ monofazată sau trifazată pe care o transformă într-o formă de tensiune continuă cu valoare reglabilă.

Sursa de energie este rețeaua de curent alternativ monofazat sau trifazat (disponibilă în toate mediile industriale) și mai rar se folosesc surse autonome de energie. Forma tensiunii care alimentează motoarele este:

- pentru motoare de curent continuu, ca în fig.6.3. Tensiunea este continuă cu valoarea variabilă, reglabilă.

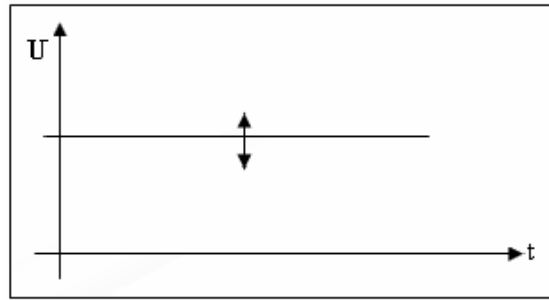


Fig.6.3. Tensiune continuă reglabilă

- pentru motoarele de curent alternativ asincrone la ieșirea electronicii de putere se obține un sistem de trei tensiuni alternative cu amplitudinea și frecvența variabile.
- pentru motorul pas cu pas se generează trenuri de impulsuri (vezi fig.6.4). La fiecare impuls electronic aplicat motorul pas cu pas execută un pas mecanic.

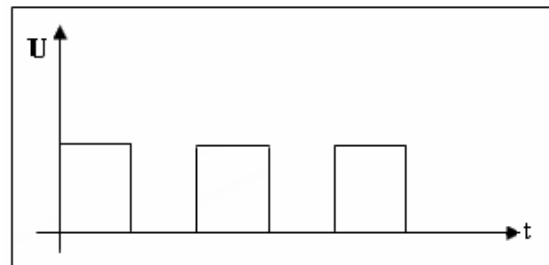


Fig.6.4. Impulsuri de tensiune

Coordonatorul întregului sistem de reglare automată este controlerul. Acesta este realizat cu un microprocesor sau microcontroler și este subordonat direct generatorului de traiectorie (din schema generală asistemului de conducere al robotului).

La conducerea nemijlocită a unei cuple cinematice conducătoare **scopul final** este de a dezvolta un cuplu activ în axul motorului de acționare, adică de a produce mișcarea.

Conducerea nemijlocită a unei cuple cinematice conducătoare constă din următoarele aspecte:

- I. Se cunoaște poziția relativă la care trebuie să ajungă elementele cuplelor cinematice conducătoare.(se notează cu q^d). Se obține de la generatorul de traiectorie și se numește **mărime de prescriere**.
- II. Se cunoaște permanent (de la traductorul aferent) poziția obținută în realitate. Se notează q^f și este numită **mărime de reacție**.
- III. Trebuie determinat cu cât trebuie comandat motorul pentru a ajunge din poziția curentă în cea prescrisă.

Observație: problematica enunțată mai sus reprezintă problema fundamentală a conducerii unei cuple cinematice conducătoare.

Suplimentar se mai pun câteva cerințe, numite de unii autori *indici de calitate a reglării* :

- trecerea de la q^d la q^r să se efectueze cât mai rapid (termenul aferent din automatică este *timp de răspuns mai scurt*);
- sosirea să fie cât mai precisă (cu *eroare nulă*).

Pentru realizarea dezideratului fundamental împreună cu cerințele impuse de indicatorii de calitate se include în sistemul de reglare automată local un **bloc regulator** (implementat cu controlerul).

Regulatorul local are rolul de a calcula cu cât trebuie comandată electronica de putere (cu care apoi se modifică tensiunea la bornele motorului) pentru a se asigura o deplasare până la anularea abaterii: $a = q^d - q^r$.

Un regulator execută **funcția de reglare** după un algoritm de reglare.

Observații:

- 1) Algoritmul este formula după care regulatorul calculează **mărimea de comandă** (către electronica de putere). Această formulă este proiectată de inginerii automatiști.
- 2) Formula poate fi executată cu circuite analogice. În acest caz se folosesc amplificatoare operaționale cu care se efectuează adunare, scădere, înmulțire, împărțire, integrală, derivată etc., operând cu tensiuni și/sau curenți, așadar cu mărimi analogice. Această variantă are folosită mai ales în anii '70 și se numește **regulator analogic**.

Astăzi nu se mai întâlnesc decât rar regulatoare analogice, deoarece reglarea se face cu microprocesoare și microcontrolere, adică **regulatorul este numeric**. Regulatorul are ca mărimi de intrare q^d și q^r și parametrii de proces (constantele motorului, mase și momente de inerție ale obiectelor puse în mișcare, cupluri rezistente etc.). Ținând cont de mărimile de intrare (și cu ajutorul formulei de reglare a algoritmului) regulatorul calculează **mărimea de comandă** pentru electronica de putere (cu care se comandă motorul), necesară pentru anularea abaterilor.

Din punctul de vedere al conducerii întregului robot, ar fi mai de dorit să se procedeze la o reglare globală (cu un regulator global) pe ansamblul întregului robot și nu o reglare distribuită local (descentralizată) realizată cu PAX i. *Motivele* pentru care *se procedează la o conducere distribuită* sunt:

- 1). Tructoarele care ar trebui să urmărească situarea punctului caracteristic în spațiul cartezian, la preciziile pretinse în diferite procese tehnologice, sunt prohibitiv de scumpe;
- 2). Realizarea unor regulatoare globale cu acțiune pe ansamblul întregului robot este foarte dificilă pentru că:
 - mișcările de la nivelul axelor nu sunt independente una de alta. Aceste legături se exprimă matematic cu ecuații foarte complicate și profund neliniare. De aici

rezultă necesitatea unor calcule extrem de numeroase ce trebuie efectuate în timp real (ceea ce se face dificil);

- trebuie folosit modelul matematic (dinamic) al întregului robot. Acesta este complicat și nici un model matematic nu este perfect.
- 3). La nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare se pot amplasa traductoare (de viteză, poziție, accelerație, forță) care sunt produse la prețuri accesibile;
 - 4). Sistemele de reglare automată pentru mișcărilor elementelor unei axe (SCL) sunt astăzi produse în mod curent la prețuri extrem de avantajoase (există o veche tradiție de la mașinile unelte cu comandă clasice);
 - 5). Elaborarea unui software pentru reglare globală este amplă, complexă (costisitoare).

Observație: motivele expuse mai sus limitează posibilitățile de a se realiza reglarea globală (a acțiunilor unui robot) folosind calculatoarele existente astăzi. În ultimul timp au apărut calculatoarele *CNN* (*Neural Network Computer* – calculatoare cu rețele neuronale), cu viteze de calcul mult superioare calculatoarelor numerice.

Rețelele neuronale sunt niște circuite analogice înlănțuite care “învață” din propria lor experiență. Sunt compuse din „celule” de calcul analogice performante, legate între ele cu „neuroni”. Rețelele sunt programate (cu un calculator obișnuit) să se comporte într-un anumit fel, în situații ce sunt presupuse ca fiind cele mai probabile.

Se creează pentru circuitele (programele) situațiile respective și se urmărește rezultatul acțiunilor. În funcție de rezultat, circuitele își corectează funcționarea (se autoreglează) până ajung cât mai aproape de funcționarea dorită.

Astfel de circuite sunt supuse unui “antrenament” cu situații cât mai multe dintre cele posibile, astfel încât să se ajungă la o comportare optimă. „Antrenamentul” poate fi efectuat fie prin simularea comportării rețelei (modelate) pe un calculator tradițional, fie prin conectarea propriu-zisă a rețelei într-o schemă anume de antrenare a ei. Cu astfel de circuite s-au realizat calculatoare “autoprogramabile” care “învață din propria lor experiență” diferite situații și își adaptează comportarea situațiilor noi ivite.

Calculatoarele CNN, datorită proprietăților structurilor analogice, au o viteză de calcul cu cel puțin un ordin de mărime mai mare decât cele obișnuite.

Astfel de calculatoare se folosesc deja (cu succes) în prelucrări de imagini. Cu astfel de calculatoare se va rezolva probabil conducerea globală și adaptivă a roboților (împreună cu calculatoarele clasice). Deocamdată persistă dezavantajul că circuitele integrate care implementează rețele neuronale nu au fost tipizate, fiecare producător oferind variante proprii și diferite de ale altora.

La intrarea fiecărui sistem de conducere local (SCL, SRA) se aplică **mărimi de prescriere**, care sunt parametrii cinematici ai mișcării calculați de către generatorul de traiectorie (poziție, viteză, accelerație). În structura sistemelor de conducere locale sunt incluse traductoare cu care se urmărește mișcarea obținută în realitate. Rolul sistemului de reglare automată este de a conduce elementele mecanice spre abatere (eroare) nulă între mărimile de prescriere și **mărimile de reacție** (cele citite de la traductoare).

6. Cum se realizează conducerea unui robot în cazul conducerii distribuite. pp.27 – 28; pp.99-101; pp.214-215 ----
IDEM 5
7. Specificarea mișcării în coordonate c.c.c. pp.102-107

4.9. Conducerea unui robot în coordonate c.c.c.

Această metodă de conducere este frecvent utilizată în conducerea unui robot. Mișcarea elementelor mecanice este urmărită numai la nivel articular, adică la nivelul fiecărei cuple cinematice conducătoare individuale. Denumirile utilizate de diferiți autori pentru această metodă sunt: *conducerea în coordonate c.c.c.*, *conducerea în coordonate robot*, respectiv *conducerea în coordonate articulare*.

În literatura de limbă engleză terminologia folosită este **joint motion** (*joint* înseamnă articulație).

Și în acest caz punctul caracteristic în mișcare descrie o traiectorie. Aceasta este însă obținută ca rezultat al mișcării simultane pe toate axele (uneori nu pe toate axele). De cele mai multe ori traiectoria rezultată este complicată, greu de urmărit vizual și are o expresie analitică sofisticată.

4.9.1. Specificarea mișcării în coordonate c.c.c.

În cazul acestei metode specificarea mișcării presupune parcurgerea mai multor etape:

a) Determinarea punctelor țintă și via în coordonate c.c.c.

- în cazul în care robotul a fost învățat prin instruire (programat prin învățare), cazul roboților simpli, punctele țintă și via sunt memorate direct în coordonate c.c.c. De aceea această etapă, în acest caz, nu presupune decât preluarea din memorie a punctelor învățate;
- pentru roboții evoluți, la care modelarea mediului se face prin calcul, se calculează matricile T_6 pentru fiecare etapă a procesului tehnologic și, cu analiza cinematică inversă, se determină punctele țintă în coordonate c.c.c. care sunt memorate.

b) Determinarea timpilor de deplasare

După ce punctele țintă pentru elementele cuplelor cinematice conducătoare se cunosc, se observă că vitezele maxime realizabile la nivelul fiecărei axe sunt, de asemenea, cunoscute: masele care trebuie mișcate și rezistențele ce trebuiesc învinse se știu, iar puterea P se cunoaște pentru fiecare motor. ($P = \sum F \times v$)

Într-o primă etapă, se consideră că elementele fiecărei articulații se deplasează cu viteza maxim posibilă. Cu aceste viteze se calculează timpul minim pentru deplasare:

$$t_i = \frac{q_{fi} - q_{0i}}{v_i}, \quad \text{unde } i = 1 \div 6 \quad (4.25)$$

- și:
- q_{0i} este punctul inițial;
 - q_{fi} este punctul țintă final;
 - v_i este viteza maxim realizabilă;
 - i este cupla cinematică numărul i .