

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI ÎNVĂȚĂMÎNTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

ING. CORNELIU RADULESCU

TEZA DE DOCTORAT

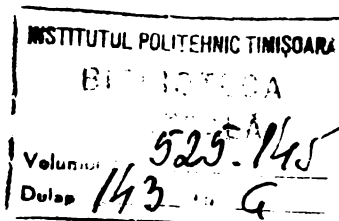
Contribuții la sinteza structurală și dimensională optimală a mecanismelor sferice și cvasi-sferice cu aplicații la roboți industriali.

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof.dr.ing.FRANCISC KOVÁCS

1987



INTRODUCERE

Directivile celui de al XIII-lea Congres al Partidului stabilesc orientări și sarcini de bază prioritare pentru dezvoltarea economico-socială a țării noastre în cincinalul 1985-1990 și perioada următoare, pînă în anul 2000.

Aceste orientări de bază se referă la ridicarea nivelului tehnic și calitativ al producției, creșterea în continuare a ponderii produselor cu performanțe de vîrf, la nivelul produselor similare de pe plan mondial, precum și de creștere a productivității muncii pe baza promovării progresului tehnic.

Principala cale pe care progresul tehnic contribuie la creșterea productivității muncii cu peste 60% [2] în cincinalul 1986-1990, îl constituie mecanizarea și automatizarea proceselor de producție.

Principalele documente programatice subliniază : „O atenție deosebită este necesar să se acorde realizării unor linii moderne automate, pe baza automatizării și robotizării, în primul rând în sectoarele unde se cer eforturi mari și sînt condiții grele de muncă” [1] indicînd că “Cercetarea științifică trebuie să contribuie la accelerarea procesului de automatizare, electro-nizare și robotizare a producției și altor activități economico-sociale, asigurînd astfel ca progresul tehnic să dețină principala pondere în creșterea productivității muncii” [2]

Intrucît în industria constructoare de mașini predomină fabricația în serii mici și mijlocii, respectiv pe loturi, creșterea productivității muncii impune o automatizare flexibilă.

Automatizarea flexibilă a fazei de manipulare a unui proces de fabricație este realizabilă numai cu ajutorul roboților industriali, cu funcționare reprogramabilă facilă după cerințe, prin reprogramarea sistemelor de comandă aferente [K14], [C4].

Documentele adoptate de Congresul al XIII-lea al P.C.R. reflectă măsurile ce se vor lua: “Se va pune accentul pe dezvoltarea industriei de mecanică fină, a producției de roboți și manipuloare, care vor incorpora echipamente și aparatură electronică de înaltă performanță”... “Se va trece la realizarea pe scară largă de linii, secții și sectoare complet automatizate și robotizate” [2].

Orientările de perspectivă, pînă în anul 2000, asigură o bază realistă și viabilă activității de cercetare științifică în domeniul roboticii, o continuitate a ei, cînd se afirmă că „... se va generaliza acțiunea de automatizare și robotizare a producției...” [2].

Importanța acțiunii de robotizare este pregnant reliefată de faptul că „... roboții industriali ridică cu un ordin de mărime nivelul productivității muncii în procesele de producție cu caracter discret.” [B3] .

Tovarășul Nicolae Ceaușescu, în cuvîntarea de la Marea Adunare populară din Timișoara, în 15 septembrie 1979, a definit clar și precis obiectivele în acest domeniu : „... Avem nevoie de roboți moderni, de o automatizare suplă, de roboți inteligenți, care să poată într-adevăr ridica la un nivel înalt productivitatea și asigura produse de înaltă tehnicitate” [3] .

Magistrala cuvîntare a tovarășului Nicolae Ceaușescu a condus la înființarea, în cadrul Institutului Politehnic "Traian Vuia" din Timișoara a unui colectiv multidisciplinar de cercetare-proiectare a roboților industriali, care în strînsă colaborare cu Întreprinderea "Electromotor" din Timișoara a omologat la 8 februarie 1982, celula de fabricație flexibilă deservită de un robot industrial, R.E.M.T.-1, destinată prelucrării arborilor rotoarelor motoarelor electrice pentru gabaritele 160-225.

Robotul industrial REMT-1 [K9], [K13], [G1] este primul robot industrial românesc operațional în mediu industrial. Acestuia i-au urmat robotul industrial REMT-2 [K16], [K20] utilizat de Întreprinderea de Scule din Rîșnov la automatizarea manipularilor în sectoarele de tratamente termice; robotul industrial REMT-2S [K37] destinat automatizării operațiilor de sudare ale șasiului de vagoane de la Întreprinderea MEVA Drobeta Turnu-Severin; robotul industrial REMT-3 [K19], [K26] destinat manipularii tubului cinescopic la Întreprinderea de cinescoape București.

Pentru I.C.S.I.T. Titan București, s-a elaborat documentația de execuție a unor mecanisme de orientare, dispozitive de prehensiune și senzori de forță-moment și tactili [M8], [C7].

La Întreprinderea de Aparate Electrice de Măsură din Timișoara este în probe tehnologice automatizarea deservirii unei

linii de prese cu ajutorul unui robot cu acționare pneumatică RP-1 [V2] și tot la întreprinderea "Electromotor" din Timișoara automatizarea "Liniei tehnologice flexibile de fabricație a rotoarelor motoarelor electrice" [M12].

În colaborare cu întreprinderea "Electrotimiș" din Timișoara [C11] s-au conceput, proiectat și realizat: micro-robotul $\mu R-2,5$ [K30], minirobotul cu acționare electrică MRE - 12,5 [K28], minirobotul cu acționare pneumatică MRP-12,5 [K31], manipulatorul cu acționare electrică MAE-100 [K36], manipulatorul cu acționare pneumatică MAP-100 [K32] și sînt în curs de omologare: robotul industrial cu acționare hidraulică RH-1kN [K29] lanțul cinematic de instruire a roboților de vopsire RIV [K35].

Pentru întreprinderea "Unio" din Satu Mare s-a conceput o familie de roboți industriali cu acționare electrică [C13], care sînt în curs de execuție roboții industriali RIE-50, variantele TTTR și RTTR.

Pentru a avea o imagine mai completă a activității desfășurate în cadrul acestui colectiv multidisciplinar de cercetare-proiectare a roboților industriali, se impun a se aminti și alte realizări, nu mai puțin importante și care au fost comunicate într-o serie de lucrări, dintre care amintim [K15], [K18], [K34], [K38], [K39], [K41], [K42], [G4], [G5], [P18], [R8].

Preocupări în acest domeniu sînt și în alte institute din țară. Astfel la Institutul Politehnic din București colectivul ME-RO (Mecanism-Robot), în colaborare cu întreprinderea "Semănătoarea" București a pus în funcțiune la 15 iulie 1983 [P12] o celulă de fabricație flexibilă pentru frezat și amboțat axe grele deservită de un robot industrial tip MERO-3B.

Întreprinderea "Automatica" București în colaborare cu I.P.A. București, a omologat în octombrie 1983, robotul industrial RIP 6,3 destinat executării operațiilor de sudare în puncte a caroseriilor fabricate la întreprinderea Autobuzul București.

La I.C.S.I.T. Titan București s-au realizat prototipurile roboților industriali R.I.C.25 și R.I.P.63.

Colective de cercetători de la Institutul Politehnic din Cluj-Napoca au realizat roboții industriali RBH-01 [A1], [A3],

REH-02 [A4] și VIPAS [I3] desfășurând ample cercetări în domeniul roboticii [A2], [A5], [A6], [A7]:

Institutul Politehnic din Iași a realizat ^{robotul} industrial ROBI-01, destinat alimentării preselor de brichetat deșeuri din tablă la I.M.A.I.A. Tecuci [Z1], la Universitatea din Brașov, robotul industrial de tip pistol [P13] destinat servirii de mașini unelte la Intreprinderea "Tractorul" din Brașov.

Chiar și numai aceste prime rezultate obținute demonstrează importanța acordată roboticii de cercetători din instituturile de învățământ superior, de cercetare sau din producție.

CAPITOLUL 1.

ROBOTUL INDUSTRIAL, FACTOR DETERMINANT IN CRESTEREA

PRODUCTIVITATII MUNCII

În imaginația noastră roboții sînt figuri destul de familiare luînd forma unor marionete acționate mecanic sau a unor eroi ai copilăriei care dispun de calități supraomenești.

Robotul industrial folosit în procesele de fabricație este foarte diferit de această imagine. Ca înlocuitor al omului industrial poate fi considerat ca o mașină automată dotată cu unele calități humanoide (braț, simț tactil, vedere artificială, inteligență infantilă).

Cuvîntul robot a apărut prima oară în piesa RUR (Rossum's Universal Robots) scrisă de dramaturgul ceh Karel Čapek, în anul 1921.

Etimologia cuvîntului "robot" devine incertă dacă avem în vedere că "rabota" în limba rusă înseamnă "muncă", iar în limba cehă "corvoadă", are un corespondent "rob" în limba română sau "rab" în limba rusă cu semnificația de "sclav".

Apanaj aproape exclusiv, pînă acum vreo două decenii, al literaturii științifico-fantastice [A13], roboții au devenit un simbol al etapei tehnotronice al revoluției tehnico-științifice contemporane.

Robotul industrial ca produs tipic "mecatronic" [C15], care îmbină tehnologia mecanică cu tehnologia electronică, este elementul principal al automatizării flexibile a proceselor de fabricație"... roboții pot asigura flexibilitatea necesară pentru ca fabricația pe loturi să poată fi automatizată complet"... [D12].

Lesne de înțeles importanța automatizării producției industriale de tip discret, dacă se are în vedere că ponderea ei într-o industrie modernă este de 50-70% [D10], sau chiar 76-80% [D1].

Definit ca "instalație pentru automatizarea operațiilor humanoide (IOH) cu program flexibil, executînd operații complicate, în unele cazuri în interacțiune cu mediul [K12], robotul a dat naștere unei noi ramuri de știință, robotica (robotronica).

Oricît de reușit ar fi însă, un robot industrial dacă nu se încadrează în contextul unei celule de fabricație, formînd un tot unitar cu utilajele deservite, el nu servește scopului principal urmărit: creșterea productivității muncii.

Eficiența economică a celulei de fabricație deservită de un robot industrial sporește dacă procesul tehnologic executat în cadrul ei este flexibil. Se remarcă în acest sens una din concluziile prezentate în [K21] privind "... caracterul unitar al metasistemului "fizic" robot industrial-celulă de fabricație flexibilă."

Realizarea unei eficiențe economice ridicate a producției industriale moderne, a unei productivități din ce în ce mai mari, în condițiile micșorării cheltuielilor de producție, este posibilă numai pe calea automatizării flexibile a proceselor de fabricație utilizînd roboți industriali.

Treptele procesului de automatizare au fost sintetic precizate în studiile întocmite de Stanford Research Institute (S.U.A) [K14], [C14], [C15], [I2].

Cele 10 trepte ale procesului de automatizare, prezentate în tabelul 1.1., încep cu munca manuală (treapta 1) și se încheie cu mașina care se autoperfecționează (treapta 10) comanda evoluînd de la acțiunea umană, prin programul rigid sau flexibil, la sisteme adaptive ce își reglează automat comportamentul în funcție de mediul în care acționează.

În acest context se impune amintită concluzia reieșită din [K17] "... oricît de perfecționată ar fi însă construcția robotului industrial, el nu are utilitate practică decît în contextul unui proces tehnologic, al unei celule de fabricație automatizate ..., celula sau linia tehnologică robotizată încadrată în sistemul organizatoric al unei întreprinderi, constituind de obicei "prima rîndunică" vestitoare a "primăverii" concrete a celei de-a doua revoluții tehnico-științifice în unitatea respectivă".

Germeii ideii completării primei revoluții industriale, bazată pe mașinism, printr-o revoluție industrială bazată pe automatizare pot fi găsiți încă la Marx, care a preconizat producția automatizată.

Preocupat de "sistemul automat de mașini". Marx considera

Tabelul 1.1.

Treptele procesului de automatizare			
Sursa de informații	Energia	Treapta	Descriere
Mediu exterior	Mecanică	10	Mașina care se autoperfecționează
		9	Mașina care își adaptează programul de operații
		8	Mașina care își corectează programul după condițiile exterioare (MU cu CA)
Program variabil (programabilitate)	Electrică	7	Mașină universală programabilă (MU cu CN, robot industrial nivelului II)
	Hidraulică	6	Mașină monooperație programabilă (MU cu CN, robot industrial nivelului I)
Program fix	Pneumatică	5	Mașină automată pentru operații multiple (strung automat, manipulator)
		4	Mașină automată monooperație (automat de montaj rigid, linie de transfer rigidă)
Om	Manuală	3	Școlă mecanizată sau mașină comandată manual
		2	Școlă de mână
		1	Mână

posibil ca printr-un "automat central prin intermediul mecanismelor de transmisie", un sistem de mașini să furnizeze "un singur automat" [M7].

Dacă prima revoluție a însemnat transferul îndemnării omului către mașină, a doua revoluție industrială implică transferul inteligenței omului către mașină [D11], dând naștere uneltelor mecano-informaționale (roboți industriali [D12]).

Esența uriașelor mutații pe care le generează a doua revoluție industrială, este bine sintetizată în afirmația: "...dacă prima revoluție industrială a dus la inversarea raportului dintre obiect și subiect (Marx), supunând subiectul obiectului, omul devenind un executant orb, un apendice al mașinii, a doua revoluție industrială va duce la o nouă inversare a raporturilor dintre subiect și obiect, restituind omului dimensiunea sa pierdută, în condițiile primei revoluții industriale el redevenind, pe un plan superior, stăpînul mașinilor moderne, stăpînul propriului destin ..." [R16].

Această esență a celei de-a doua revoluții industriale este determinată"... de robotizare, inteligență artificială și calculatoare microelectronice (microprocesoare) deci de cibernetizarea industriei..." [D13], avînd ca rezultat final creșterea eficienței economice și a productivității muncii"... roboții ca factori siguri ai creșterii productivității muncii, aduc după sine și civilizarea procesului de producție". [K12],[K22], [K33].

Ca un corolar al celor de mai sus se impune remarcă :

"... dacă prima revoluție industrială a accelerat progresul liniar, în progresie aritmetică, cea de-a doua revoluție industrială îl va accelera exponențial, în progresie geometrică..." [R15].

O confirmare a celor de mai sus o dau primele rezultate obținute de celule de fabricație flexibile, implementate la Intreprinderile "Electromotor" Timișoara și "Semănătoarea" București, rezultate ce evidențiază o creștere cu 250% [K13], respectiv 90% [P12].

Nu trebuie să ne temem de roboți sau de efectele robotizării proceselor de producție"... Trebuie să recunoaștem că sistemele tehnice, în general, și roboții în special, nu generează idei, chiar dacă manipulează informații cu semnificații bine determinate".

Ideea presupune, în afară de structura și semnificația informațională un sens pe care numai "...spiritul viu poate să-l dea..." [B2]. Mai mult chiar, se poate afirma că roboții și inteligența artificială sînt speranța noastră în a vedea realizat pe deplin comunismul, aceea societate eficientă din punct de vedere economic, "... societate în care sistemul social va avea ca suprastructură o civilizație bazată pe inteligență, autenticitate și creație" [D11].

1.1. Domenii de aplicare și dinamica producției de roboți industriali

Conceptul roboților industriali a fost stabilit prima oară prin "transferul de articole programate" și aplicat în 1954 de George C. Devol din Statele Unite. Acestuia i-a urmat un robot controlat digital, dezvoltat în 1958 de către firma americană Consolidated Control Inc.

În anul 1962 și-au făcut debutul primii roboți industriali produși de firmele americane Unimate Inc. și Versatran.

Acceptând clasificarea roboților industriali efectuată de J.I.S. (Standardul Industrial Japonez), în anul 1979, vom deosebi:

- manipulatorul manual acționat direct de operatorul uman, cel mai semnificativ exemplu constituindu-l lanțul cinematic "master-slave" utilizat în laboratoarele nucleare.
- robotul secvențial care efectuează un program de lucru în secvența prestabilite.
- robotul cu reacție (cu playback) instruit în prealabil, prin învățare, de către operatorul uman să efectueze un anumit program, este capabil să repete continuu programul memorat.
- robotul cu comandă numerică este comandat să execute diverse operații prin intermediul unor informații de lucru numerice livrate de comutatoare decadice digitale, cartele perforate sau benzi magnetice.
- robotul inteligent, înzestrat cu elemente de inteligență artificială, este capabil să ia singur anumite decizii în funcție de condițiile aleatoare concrete din mediul de lucru și să-și modifice comportamentul în funcție de deciziile luate.

În figura 1.1. se prezintă evoluția valorică a producției

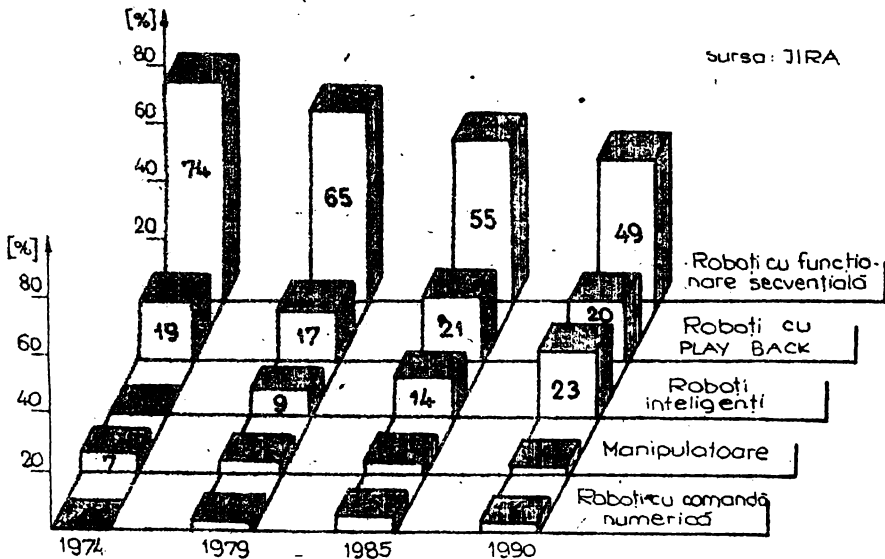


Fig. 1.1. Structura valorică a producției de roboți industriali

de manipolatoare și roboți industriali în Japonia, evidențiind, pe viitor, o continuare a scăderii cererii de roboți cu funcționare secvențială și o creștere continuă a cererii de roboți inteligenți.

Conform [P19] numărul roboților industriali cu un înalt grad de inteligență (senzori tactili, vizuali, nivel ridicat al limbajelor de programare) era, la finele anului 1983, în S.U.A. de 155 unități, în Japonia de 3000 de unități, cu perspective de creștere foarte mari, de 40-50% anual.

În etapa actuală roboții se folosesc în special în industrie.

După Kanji Yanemoto, director executiv la JIRA, exprimat în [R14], în Japonia anulului 1980 "populația de roboți" atingea în industria producătoare de echipament electric 36%, în industria automobilelor 29%, în industria constructoare de mașini 12%, în industria maselor plastice 10% și 1% în industria textilă, chimică, siderurgică și constructoare de vapoare. În figura 1.2. se prezintă procentual cererea de roboți industriali în 1980, 1985 și în perspectiva anului 1990 în diverse procese de producție.

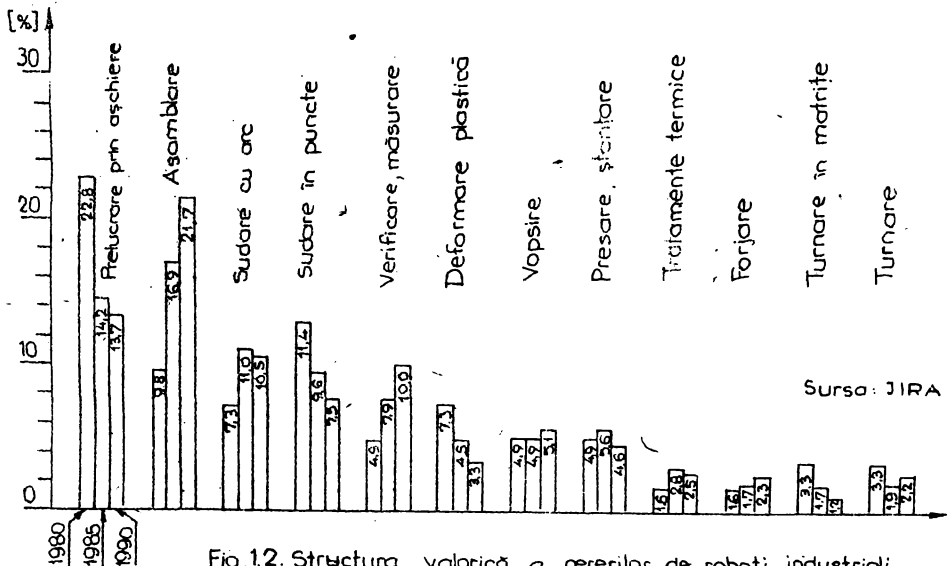


Fig.1.2. Structura valorică a cererilor de roboți industriali

În perioada 1980-1990 se remarcă o tendință de descreștere a utilizării roboților industriali în procesele de prelucrare prin așchiere cu 40%, de deformare plastică cu 56%, de sudare în puncte cu 34%, turnare în matrițe cu 36% și turnare cu 33%.

În paralel are loc o creștere a solicitărilor de roboți industriali în procesele de forjare cu 44%, de tratamente termice cu 56%, de sudare cu arc cu 50%, de verificare și măsurare cu 100% și de asamblare cu 120% (ultimele în special pe seama roboților inteligenți).

Producerea roboților multifuncționali și versatili va permite, în viitor, o extindere a ariei de aplicații.

Astfel se preconizează utilizarea roboților industriali și în :

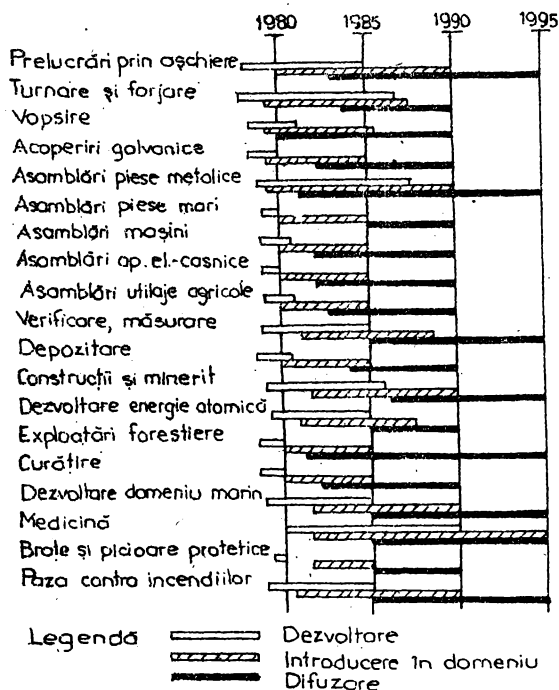


Fig. 1.3. Pătrunderea roboților în diverse aplicații

- a) agricultură: pulverizarea substanțelor chimice, recoltarea fructelor, întreținerea și mulsul animalelor, evacuarea gunoaielor animaliere.
- b) silvicultură: tăierea și doborârea, sortarea, colectarea și transportul cherestei, fertilizare și plantare.

- c) piscicultură: construcția de ferme piscicole.
- d) minierit: lucru în galerii subterane.
- e) construcții: perforare, exploatare și lucrări generale la mari înălțimi, croirea-~~osfaltului~~ în construcția de drumuri.
- f) transport: încărcare - descărcare.
- g) centrale electrice nucleare: inspectarea, repararea și reconstrucționarea lor, întreținerea reactorilor nucleari și evacuarea resturilor radioactive.
- h) tehnologii oceanice: explorarea resurselor de ape adânci, construcții de structuri.
- i) medicină și asistență socială : asistarea bolnavilor țintuți la pat, restabilirea handicapărilor fizici (proteze), asistență și ghidarea persoanelor nevăzătoare.
- j) servicii-publice : încărcare-descărcare, curățirea ferestrelor clădirilor publice, combaterea focului, lucrări de salvare și curățire.

Dezvoltarea, introducerea în domeniu și difuzarea roboților industriali în diverse domenii este sintetic prezentată de Yukio Hasegawa de la Universitatea Waseda [R14], prezentată în figura 1.3.

Pentru a face față unor asemenea cerințe se necesită o sporire a producției de roboți.

Producția de roboți industriali în principalele țări industrializate										
ANUL	JAPONIA	S.U.A.	R.F.G.	SUEDIA	ANGLIA	FRANTA	ITALIA	URSS și EUROPA de EST	ALTE ȚĂRI	TOTAL
1979	5450	3000	600	940	120	60	350			7.830 - 11.100
1980	8000	4.500	—	—	371	—				14.000 - 22.750
1981	10.000	5000	2.300	1.700	719	600	450	6.000	1.500	19.020 - 34.732
1982	13.000	6.456	3.500	1.800	1.152	950	700	8.000	2.000	26.352 - 41.000
1983	16.500	8000	4.800	2.150	1.753	2.150	1.800	10.000	2.000	35.882 - 61.884
1984	21.450	13.000	6.600	2.300	2.432	3.360	2.700	12.000	1.300	61.862 - 108.500
1985	50.000	28.000	12.620	4.100	5.000	5.000	—	21.000	4.000	86.615 - 127.000
1990	163.000	56.000	37.890	9.000	10.000	6.500	—		7.000	105.850 - 288.390

Statisticile referitoare la răspândirea roboților industriali pe plan mondial, cât și prognozele ce se referă la evoluția numărului lor sînt foarte diferite și contradictorii. Conform [C3],[J2],[M3] ce sintetizează informațiile furnizate de J.I.R.A.- Asociația Japoneză de Roboți Industriași,R.I.A.-

-Institutul de Roboți al Americii, B.R.A. - Asociația Britanică de Roboți și A.F.R.I.- Asociația Franceză de Roboți Industriali, producția de roboți industriali se prezintă ca în tabelul 1.2.

Dinamica producției de roboți pe plan mondial (nivel mediu) și în principalele țări producătoare de roboți este prezentată în figurile 1.4 și 1.5.

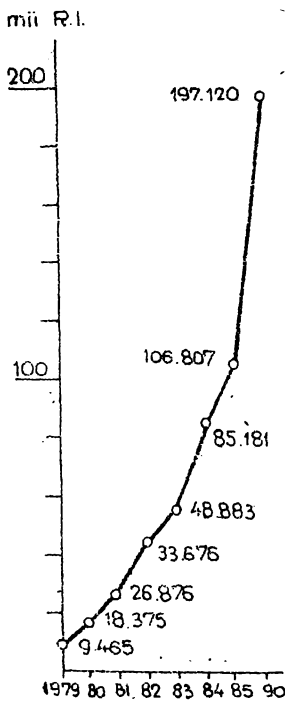


Fig.1.4. Producția de roboți

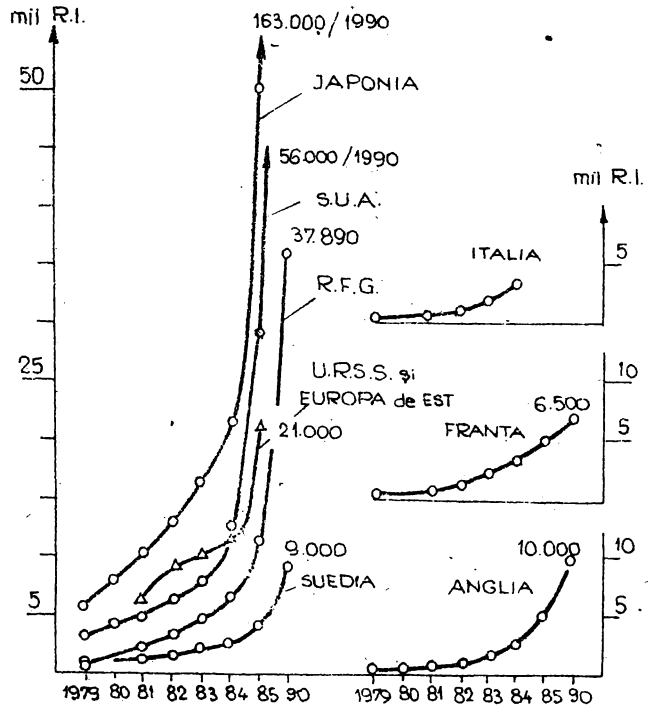


Fig.1.5. Producția de roboți în diferite țări

Din analiza celor două diagrame se poate concluziona, ca veridică prognoza făcută de J.I.R.A. privind o "populație" de 1 milion de roboți în Japonia, la sfârșitul acestui secol.

Pentru a ilustra și mai pregnant dinamica evoluției producției de roboți în Japonia, în figura 1.6 se prezintă numărul de roboți fabricați în fiecare an, începând cu anul 1968, când firma Kawasaki Heavy Industries s-a asociat cu firma Unimation Inc., și prognoza J.I.R.A. pînă în anul 1990, precum și evoluția "populației" de roboți în această perioadă [R14], [N1], [I1].

Studiul întocmit de I.C.S.I.T. Titan - București și publicat în anul 1985 [P19], relevă, în conformitate cu datele B.R.A.

o creștere a numărului de roboți industriali, la finele anului 1983, în Anglia cu 52%, în R.F.G. cu 37%, în S.U.A. cu 28%, în Suedia cu 27%, în Japonia cu 21%. Relevantă este și analiza

"populației" de roboți industriali: prezentată în tabelul 1.3. [Plg] ce situează Suedia în frunte, iar Belgia între primele țări din lume.

Tabelul 1.3.
Densitatea „populației” de R.I.

Tara	Număr R.I.	Nr. R.I./10.000 muncitori
Suedia	1.300	9,6
Japonia	13.600	6,6
R.F.G.	3.500	3,1
Belgia	361	2,7
Anglia	1.150	2,2
S.U.A.	6.250	2,1
Franta	950	1,25
Italia	700	0,9

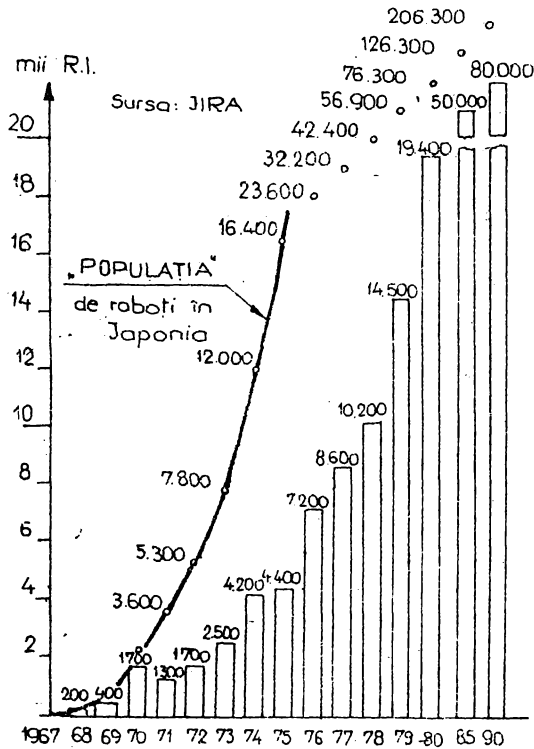


Fig.1.6. Producția de roboți în Japonia

CAPITOLUL 2

CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND ROBOTII INDUSTRIALI

2.1. Considerații cu privire la arhitectura generală a roboților industriali.

Conceptul de arhitectură aplicat sistemelor tehnice cuprinde în sfera sa semnificația reprezentării tuturor funcțiilor sale externe privite din afara sistemului.

Arhitectura robotului reflectă, deci, nu numai configurația geometrică a structurii mecanice, ci și structura de funcțiuni a acestora, văzute din afara sistemului.

În construcția roboților, în sensul larg al cuvântului, se observă că evoluția arhitecturii generale a acestora, din punct de vedere al imitării unor modele din natură, prezintă pe ansamblu tendința unui caracter antropomorf mai pronunțat decât al celorlalte sisteme tehnice create de om pînă în prezent. Justificat de altfel dacă avem în vedere că studiul analogiilor din lumea vie și nevie, în scopul preluării în construcția roboților a principiilor ce stau la baza organizării sistemelor biologice, readuce în actualitate "principiul convergenței formelor" din zoologie, conform căreia două ființe care trebuie să îndeplinească aceleași funcțiuni, în același mediu, tind să ia forme similare.

Robotul industrial definit în [K12] ca "instalație pentru automatizarea operațiilor humanoide cu program flexibil, care execută operații complexe, în unele cazuri în interacțiune cu mediul industrial", prezintă un caracter antropomorf redus, motiv pentru care analiza arhitecturii generale a acestora se face în raport cu soluțiile constructive adoptate și cu performanțele sale.

O clasificare a roboților industriali după caracterul lor arhitectural a fost prezentată pentru prima oară în lucrarea [K10], fiind acceptată și de alți autori [12], [13].

După caracterul lor arhitectural roboții industriali se clasifică în 7 tipuri fundamentale :

- roboți tip "braț articulată" (BA), cu o structură cōasti-

tuită dintr-un lanț cinematic deschis, avînd cu precădere cuple cinematice de rotație, ale căror elemente sînt acționate în mișcare relativă direct de grupuri de acționare (moto-reductoare), amplasate în apropierea zonelor de contact.

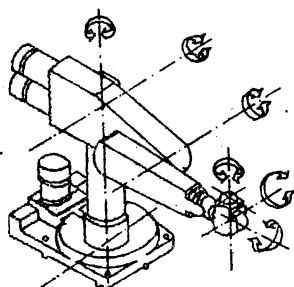


Fig. 2.1. Robotul „Puma”

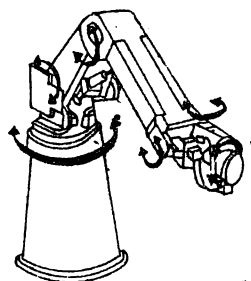


Fig. 2.2. Robotul „6CH Arm”

Ca exemple se pot da : robotul ASEA (ESAB - Suedia); robotul "Puma" (fig.2.1) - (Unimation Inc - SUA); robotul "6CH Arm" (fig.2.2.) - (Cincinnati Milacron - S.U.A.), robotul "Type 80 Vertical" (Regie Renault - Franța).

Rigiditatea structurii relativ redusă a roboților de tip BA este compensată printr-o mare suplețe și un acces relativ ușor al dispozitivului de prehensiune la obiectul de manipulat, ceea ce permite utilizarea lor în aplicații de sudare, vopsire, metalizare, montaj, etc.

- roboții de tip „pistol" (P) au o mare răspîndire. Se caracterizează printr-o structură mecanică compusă dintr-un corp central ce poartă un braț asemănător unei țevi de pistol, care poate să-și schimbe direcția și lungimea. Reprezentativi sînt roboții MHU Senior (fig.2.3), Junior și Minor (Electrolux - Suedia), robotul STAR-O-MAT (Star - R.F.G.), robotul UNIVERSAL 5 (OKBEK - URSS).

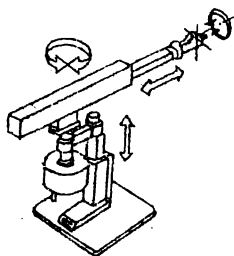


Fig. 2.3. Robotul „MHU Senior”

Principalul avantaj al roboților de tip P constă în simplitatea constructivă. Dezavantajul lor rezidă dintr-o suplețe și dexteritate mai redusă. Roboții de tip pistol P se utilizează în special pentru manipularea pieselor în vederea servirii mașinilor unelte și a preselor de

ștanțare - ambutisare.

- roboți de tip turelă (T)

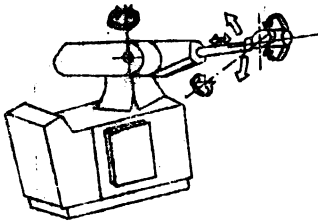


Fig.2.4. Robotul „Unimate 1000”

cu o construcție asemănătoare cu tipul P cu deosebirea că între corpul central și braț se întrepune un subansamblu de formă unei turele, care permite o rotație suplimentară în jurul unei axe orizontale. Cei mai semnificativi roboți de acest tip sînt cei din familia UNIMATE (fig.2.4) - (Unimation Inc.- S.U.A.) și variante fabricate

sub licență ca : robotul CR 2005 F (Carl Cloos - R.F.G.), sau Kawasaki (K.H.I.- Japonia) respectiv PRAB 4200 (Acheson-S.U.A.). Roboții de tip T se caracterizează printr-o robustețe mare, construcție compactă și o dexteritate foarte bună avînd o aplicabilitate universală.

- roboți de tip "coloană" (C)

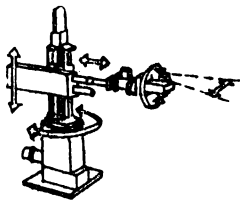


Fig.2.5. Robotul „Strobot”

se deosebește constructiv de tipurile P și T prin faptul că brațul este purtat de o coloană verticală care permite o deplasare de translație, după aceeași direcție. Din această categorie fac parte roboții: SIROBOT (fig.2.5) - (Siemens - R.F.G.), robotul Robolan V-50 (Languepin Franța), Construcții similare o au roboții Sciaky (Franța)(fig.2.6), Limat 2000

(Carl Cloos-R.F.G.) și Type 80 horizontale (Regie Renault -

Franța). Roboții de tip C cu o construcție simplă și robustă cu o dexteritate suficient de mare. Se folosesc cu precădere în aplicații de sudare.

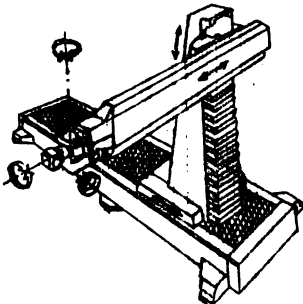


Fig.2.6. Robotul „Sciaky”

- roboți de tip cadru (CD) se construiesc cu un cadru, care conține coloana, ceea ce îi conferă o rigiditate mai mare coloanei verticale. Roboții de acest tip sînt :

925.145/143 G BUPT

robotul Fanuc (fig.2.7) - (Fujitsu - Japonia), robotul JOB'OP 10 (Jobs - Italia). Se utilizează pentru manipulări de piese relativ grele.

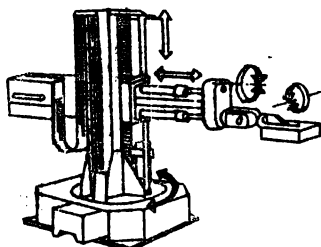


Fig.2.7. Robotul „Fanuc”

- robotul de tip "portal" (PO) permite manipularea unor piese grele într-un spațiu de lucru de dimensiuni mari.

Ca exemple se pot da roboți utilizați în construcția de autoturisme ca : robotul Type 80 Portique (fig.2.8) și Double Portique (Regie Renault - Franța).

- roboții de tip "cărucior" (CA), acoperă un spațiu mare de lucru, prin montarea unui robot industrial pe șasiu, sau cărucior, care se pot deplasa liber sau ghidate pe șine.

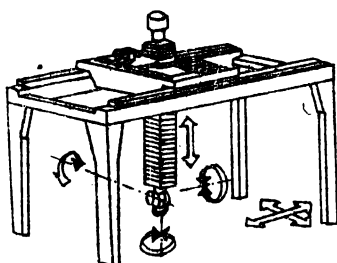


Fig.2.8. Robot „Type 80 Portique”

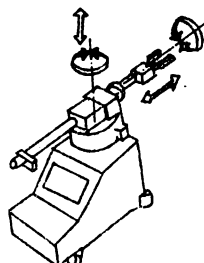


Fig.2.9. Robotul „MP9”

Robotul M.P.9 (fig.2.9) - (OKBTK - URSS) este un exemplu elocvent în acest sens.

2.2. Parametrii globali de analiză ai roboților industriali

Pe lângă aspectul general al roboților industriali, arhitectura influențează în mod direct numeroase performanțe ale acestuia.

Astfel arhitectura roboților industriali este strâns corelată cu forma geometrică a spațiului de lucru. Această corelație este prezentată în tabelul 2.1.

Corelația între tipul architectural de R.I. și forma geometrică a spațiului de lucru. Tabelul 2.1.				
Forma spațiului de lucru	Paralelipipedic	Cilindric	Sferic	Compus
Tipul R.I.	C; CD; PD	C; P; CD	BA; T	CA

Performanțele obținute de cele 7 tipuri constructive de roboți industriali pot fi apreciate prin valoarea următorilor parametri globali de analiză :

- parametrul privind suplețea și eficiența intervenției în mediul de lucru :

$$k_1 = \frac{V}{G} \quad (2.1)$$

unde V reprezintă volumul spațiului de lucru, iar G, greutatea de serviciu a robotului industrial.

- parametrul capacității gravitaționale specifice de manipulare :

$$k_2 = \frac{G_1}{G} \quad (2.2)$$

unde G_1 reprezintă greutatea obiectului manipulat.

- parametrul de apreciere globală a calităților tehnice :

$$k_3 = \frac{V \cdot G_1}{G \cdot P} \quad (2.3)$$

unde P reprezintă precizia de poziționare.

Din analiza comparativă a acestor parametri pentru un număr de 62 de tipuri de roboți industriali [K10-tab.2] s-a ajuns la următoarele concluzii :

- corelația dintre configurația architecturală și cei trei parametri globali menționați mai sus este orientativă, întrucât valorile obținute pentru aceștia nu permit o delimitare precisă.

- tipurile architecturale BA, T și P dau, în general, valori mai mari ale parametrului k_1 , iar tipul P valori maxime pentru parametrul k_2 .

- valorile cele mai mari ale parametrului k_3 se obțin pentru roboții firmei Unimation Inc. și ai celor care derivă din ei, fiind fabricați sub licență, fapt ce explică răspândirea largă a acestora. Se mai pot aprecia ca reușite, din acest punct de

vedere toboții industriali MHU - Electrolux, PAT. PM10, HIBOT-YASUI - SANGYO, Renault - Horizontal 30.

Dispersia largă a valorilor pentru parametrii globali analizați conduce la concluzia existenței unei mari posibilități de raționalizare a soluțiilor constructive.

2.3. Criterii de clasificare a roboților industriali.

Numărul mare de firme producătoare de roboți industriali au lansat pe piața mondială un număr foarte mare de tipuri de roboți. Consultând literatura de specialitate [B7], [G6], [I4], [J1], [K3], [K43], [K44], [L2], [M9], [M10], [R11], [R12], [R13], [S2], [V5], [V6], [W1], [W2], [W3], [W4], s-a făcut o analiză a caracteristicilor tehnice și funcționale a 493 de roboți industriali produși de 163 de firme din 23 de țări, rezultatele fiind comunicate în lucrările [K27], [R5], [R6].

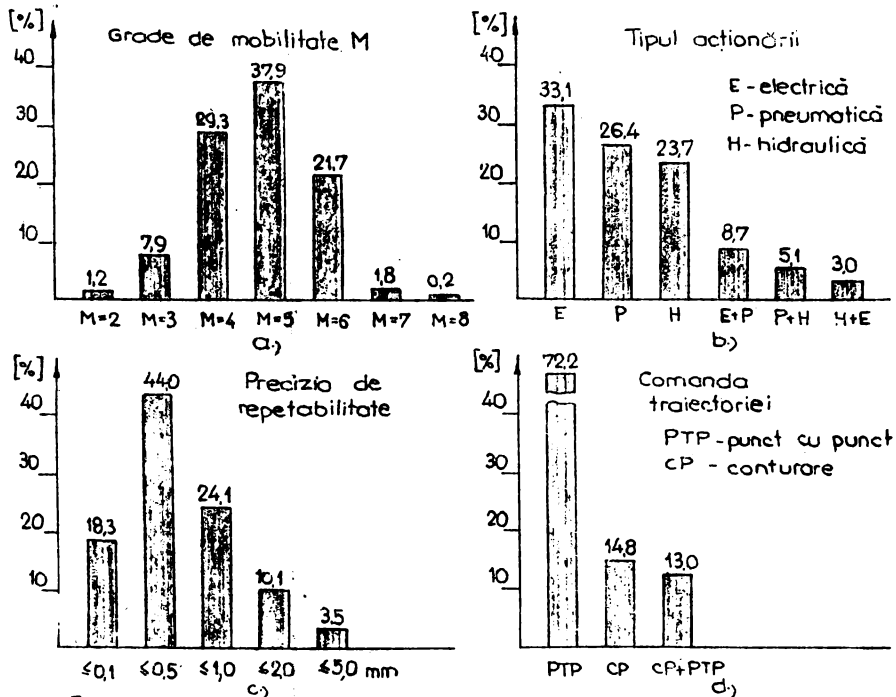


Fig.2.10. Criterii de analiză a roboților industriali

Pentru a caracteriza din punct de vedere constructiv și funcțional un robot industrial se recomandă următoarele caracteristici :

- numărul gradelor de mobilitate, ca un indiciu al complexității și flexibilității robotului industrial prin prisma capacității sale de a opera în spațiul de lucru. Din figura 2.10a, rezultă o cerere mai mare de roboți industriali cu 4,5 sau 6 grade de mobilitate (88,9%), un număr redus de roboți cu $M=3$ (7,9%) și un număr foarte redus de roboți cu 2,7 și 8 grade de mobilitate (3,2%).

- tipul acționării, prin prisma sursei/surselor de energie necesare acționării robotului industrial (fig.2.10 b).

- precizia de repetabilitate, indicînd "fereastra de eroare" în care se poziționează obiectul manipulat. Se observă că pentru etapa actuală, sînt considerate satisfăcătoare preciziile de repetabilitate cuprinse între 0,5-1 mm (68,1% conform tabelului 2.10 c.

- tipul programului pe care îl poate realiza un robot industrial, figura 2.10 d, preponderent fiind programul "punct cu punct" (point to point, PTP), cu 72,2%, cînd punctul caracteristic, respectiv dreapta caracteristică și cea auxiliară, ocupă poziții succesive denumite "poziții de precizie", fără precizarea traiectoriei, respectiv suprafeței riglate, prin parcurgerea căreia să se atingă poziția dorită și programul de traiectorie continuă (continuos path, C.P.) prevede parcurgerea de către punctul caracteristic, a unei traiectorii prescrise, respectiv riglarea de către dreapta caracteristică și cea auxiliară a unei suprafețe prescrise. De remarcat numărul mare de roboți industriali, 13%, prevăzuți cu ambele posibilități de comandă (PTP și CP).

- sarcina manipulată, nominală și maximă, oferind o informație utilă pentru stabilirea domeniului de aplicare al robotului industrial.

Din figura 2.11 a, rezultă că majoritatea roboților industriali, 89,3%, manipulează o sarcină nominală sub 63 kg.

Repartizarea roboților industriali după sarcina maximă manipulată este prezentată în figura 2.11.b.

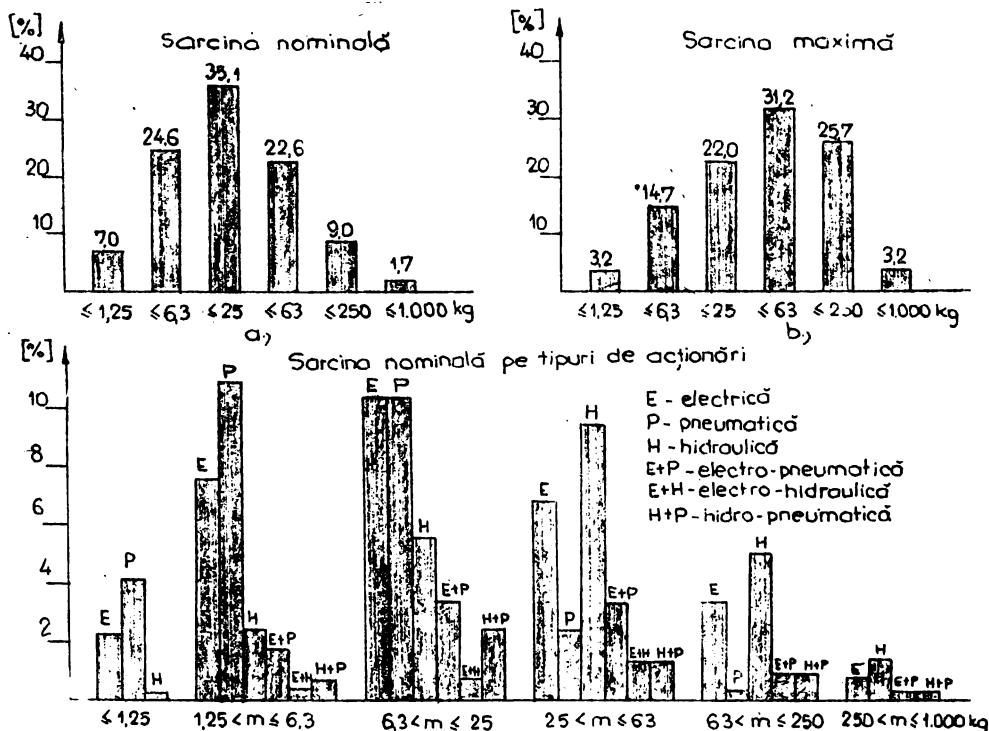


Fig. 2.11. Criterii de analiză a roboților industriali

Asociind sarcinii nominale manipulate și tipul acționării, se obține graficul din fig.2.11.c., din care rezultă că acționarea pneumatică este preferată pentru roboți industriali manipulând sarcini de maxim 25 kg (82,81% din totalul roboților cu acționare pneumatică), cea electrică pentru sarcini nominale pînă la 63 kg (87,23%) și acționarea hidraulică pentru sarcini nominale cuprinse între 25-250 kg (83,64%).

CAPITOLUL 3

MECANISMELE DE ORIENTARE, APLICAȚII ALE MECANISMELOR

SPERICE IN CONSTRUCTIA ROBOTILOR

INDUSTRIALI

3.1. Mecanism patrulater sferic

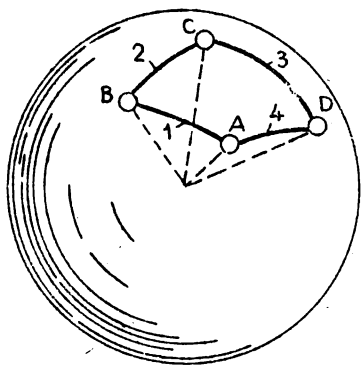


Fig. 3.1. Lanț cinematic sferic

Lanțul cinematic din figura 3.1. este format din patru elemente și patru cuple cinemactice de rotație cu axele concurente într-un punct O, centrul sferei.

Această particularitate constructivă, impune ca traiectoria tuturor punctelor elementelor să fie curbe descrise pe suprafețe sferice concentrice.

Îndeplinirea acestui deziderat echivalează cu suprimarea

mișcărilor de translație, a componentelor vectorului \vec{V} (V_x, V_y, V_z) pentru toate elementele lanțului cinematic, adică limitarea inițială a 3 grade de mobilitate. În consecință elementele situate pe o sferă sau sfere concentrice, au posibilitatea de a se deplasa folosind celelalte trei grade de libertate admise de vectorul $\vec{\omega}$ ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$).

Considerând formula structurală generalizată a mecanismelor, stabilită de V.V. Dobrovolski în 1943 [D7], pentru calculul gradului de mobilitate al unui mecanism de familia f :

$$M_f = (6-f) \cdot (n-1) - \sum_{i=f+1}^5 (i-f) c_i \quad (3.1)$$

unde f este numărul de grade de libertate comun împiedicate, se obține, în cazul mecanismelor sferice, pentru f=3 relația :

$$M = 3(n-1) - c_4 - 2c_5 \quad (3.2)$$

Tinând cont de $\sum L_p$ - suma gradelor de libertate ale legăturilor pasive și de $\sum L_{id}$ - suma gradelor de libertate de prisos, relația (3.2) i-a forma :

$$M = 3(n-1) - c_4 - 2c_5 - \sum L_p - \sum L_{id} \quad (3.3)$$

Din relația (3.2) rezultă că mecanismele sferice pot avea în componența lor cuple cinematice superioare c_4 și/sau cuple cinematice inferioare c_5 .

Cel mai simplu mecanism sferic îl reprezintă angrenajul conic, centrul sferei fiind punctul de concurență al axelor în jurul cărora se rotesc elementul conducător și condus (figura 3.2). Pentru $c_4=1(B)$, $c_5=2(A \text{ și } C)$ și $n=3$ se obține cu relația (3.2)

$$M=3 \cdot 2 - 1 - 2 \cdot 2=1 \quad (3.4)$$

Inscrierea a două angrenaje conice având axele cuplelor cinematice de rotație ortogonale (fig.

3.3.a) sau concurente sub un unghi $\Sigma \neq 90^\circ$ (fig.3.3.b) permite obținerea unui tren de angrenaje conice cicloidale.

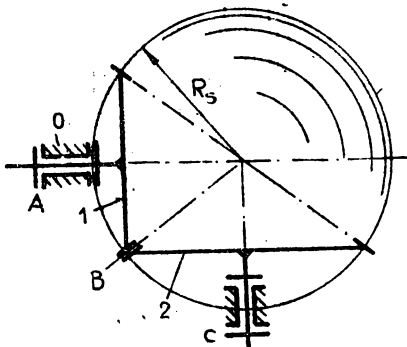


Fig.3.2. Angrenaj conic

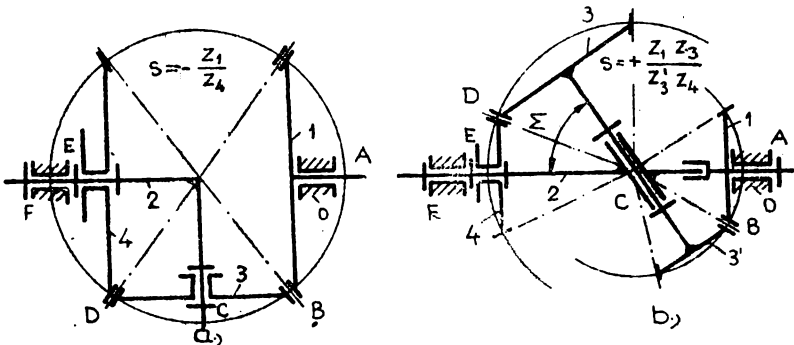


Fig. 3.3. Tren de angrenaje conice cicloidale

Ambelē cazuri $c_4 = 2(B \text{ și } D)$, $c_5 = 4(A, C, E, F)$ și $n = 5$

conduc la obținerea unor mecanisme sferice (mecanisme diferențiale) cu gradul de mobilitate :

$$M = 3 \cdot 4 - 2 - 2 \cdot 4 = 2 \quad (3.5)$$

In cazul mecanismelor sferice cu cuple cinematice de rotație relația (3.2) primește forma particulară :

$$M = 3(n-1) - 2c_5 \quad (3.6)$$

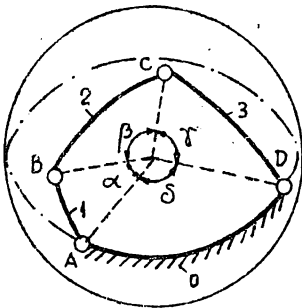


Fig.3.4. Mecanismul patrulater sferic

Pornind de la lanțul cinematic sferic cu patru elemente și patru cuple cinematice de rotație din figura 3.1, prin fixarea unuia din elemente se obține mecanismul patrulater sferic [D6], [D16], [H1], [K8], [M6]. din figura 3.4, având unghiurile la centru, formate de axele cuplelor cinematice de rotație, $\alpha + \delta$.

In construcția de mașini se utilizează diferitele variante ale

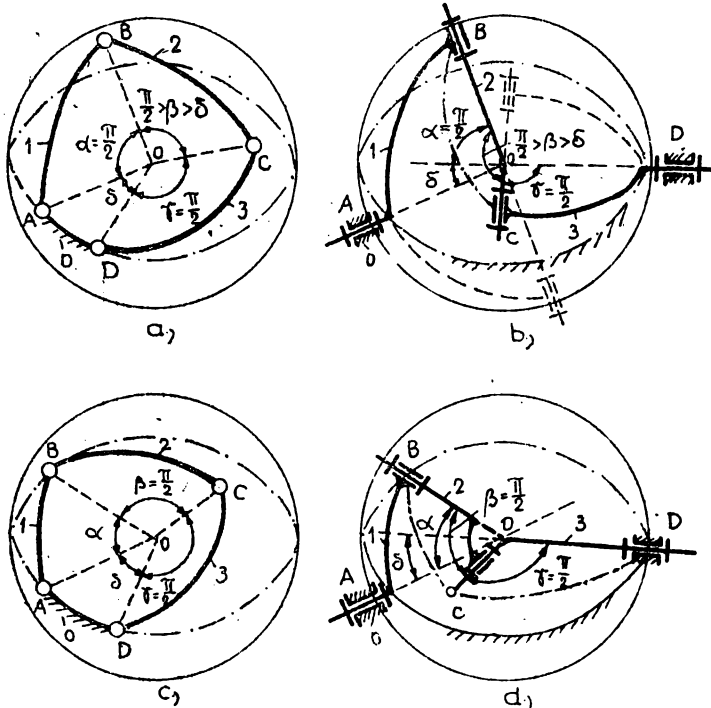


Fig.3.5. Mecanisme patrulatere sferice bivadrantice

mecanismului patrulater sferic bicvadrantic sau tricvadrantic.

Dintre mecanismele patrulatere sferice bicvadrantice sînt cunoscute articulațiile cardanice cu brațele crucii neperpendiculare și varianta generală a mecanismelor șaibă oscilantă [D16].

În figura 3.5.a se prezintă mecanismul patrulater sferic bicvadratic ($\alpha = \delta = \pi/2$), cu două manivele ($\beta > \delta$). Aplicația tehnică, articulația cardanică cu brațele crucii neperpendiculare ($\beta \neq \pi/2$), prezentată în figura 3.5.b. are baza hipercvadrantică ($\delta' = \pi - \delta > \pi/2$).

În figura 3.5.c. se prezintă mecanismul sferic patrulater ($\alpha < \delta$) [D15]. Aplicația tehnică o constituie varianta generală a mecanismului șaibă oscilantă ($\beta = \delta = \pi/2$) cu baza hipercvadrantică ($\delta' = \pi - \delta > \pi/2$), prezentată în figura 3.5.d.

Dintre mecanismele patrulatere sferice tricvadrantice sînt cunoscute articulația cardanică obișnuită (articulația universală [K8], cuplajul sferic heterocinetic [D17] și mecanismul șaibă oscilantă - cheia lui Hooke [D16]).

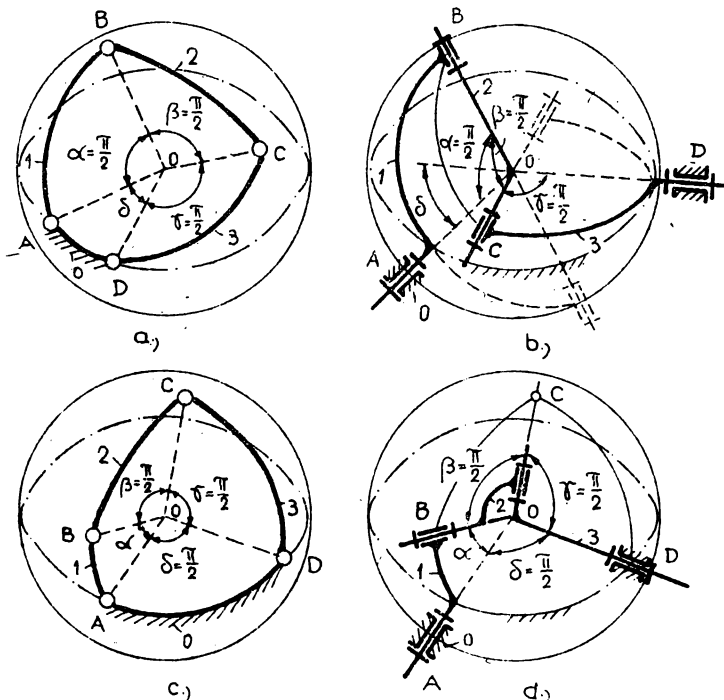


Fig 3.6. Mecanisme patrulatere sferice tricvadrantice

În figura 3.6.a. se prezintă mecanismul patrulater sferic tricvadrantic ($\alpha = \beta = \gamma = \pi/2$), a cărei aplicație tehnică o constituie articulația cardanică obișnuită (fig.3.5.b) cu baza hipercvadrantică ($\delta' = \pi - \delta > \pi/2$). Articulația cardanică obișnuită, avînd brațele crucii perpendiculare, constituie un caz particular al variantei prezentate în figura 3.5.b., avînd $\beta = \pi/2$.

În figura 3.5.c. se prezintă mecanismul sferic tricvadrantic avînd baza cvadrantică ($\delta = \pi/2$), a cărei aplicație tehnică, mecanismul cu șaibă-oscilantă (figura 3.6.d.) este un caz particular al variantei prezentate în figura 3.5.d. ($\delta = \pi/2$).

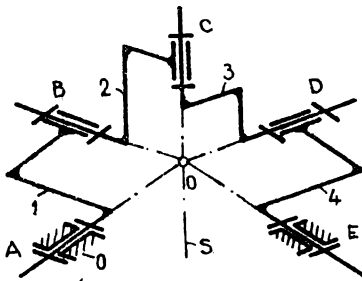


Fig.3.7. Mecanism sferic bimobil

Lanțul cinematic cu cinci elemente și cinci cuple cinematice de rotație, cu axele concurente într-un punct, dă naștere, prin fixarea unuia din elementele sale, mecanismului sferic bimobil ($M = 2$) din figura 3.7.

Pentru ca mecanismul sferic bimobil să devină desmodrom ($M=1$) se impun măsuri suplimentare care să asigure menținerea axei de rotație a cuplei cinematice C în planul de simetrie S.

ținerea axei de rotație a cuplei cinematice C în planul de simetrie S.

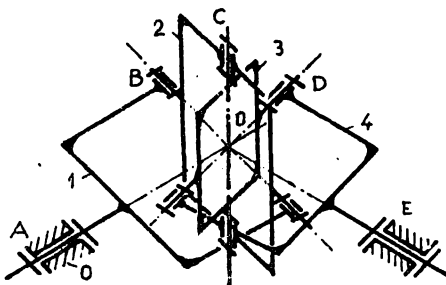


Fig.3.8. Mecanism bicardanic

Astfel mecanismul bicardanic (articulația bicardanică cu cruci), figura 3.8, este un mecanism sferic desmodrom, numai în prezența dispozitivului de simetrizare [D16], [D17].

Printre realizările tehnice ce au la bază mecanismul sferic bimobil, completat cu dispozitivul de simetrizare, se numără cupla-

jele sferice articulate homocinetice (Zeidler, Parvillè, Villard etc).

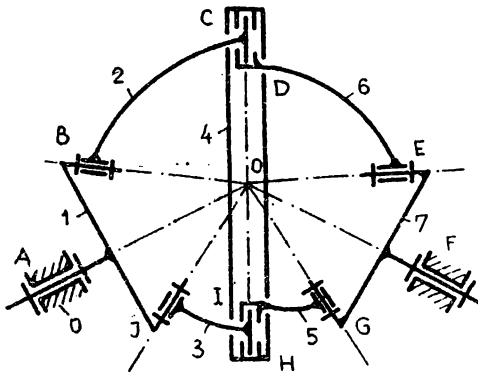


Fig.39 Mecanism sferic simetrizabil cu opt elemente

Lanțul cinematic sferic cu opt elemente și opt cuple cinematice de rotație cu axe concurente într-un punct, stă la baza mecanismului sferic simetrizabil cu opt elemente din figura 3.9, avînd ca realizări tehnice cuplajele sferice Zeidler și Schmidt [D17].

3.2. Sistemul mecanic al robotului industrial.

Roboții industriali de o mare varietate, atît din punct de vedere constructiv cît și al domeniilor de aplicație, prezintă o caracteristică generală comună referitor la sistemele componente, care este identică pentru toate categoriile : sistemul mecanic, sistemul de acționare și sistemul de comandă (fig.3.10).

Sistemul mecanic este cel care stabilește arhitectura robotului industrial. Este alcătuit din mai multe elemente legate între ele prin cuple cinematice, dintre care unele conducătoare.

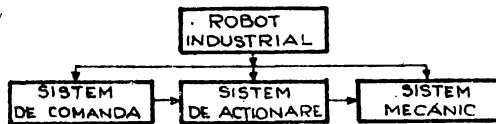


Fig.3.10. Componente robotului industrial

Are drept scop realizarea propriu-zisă a operației umane, mișcarea obiectului manipulat în spațiu tridimensional.

Sistemul de acționare al roboților industriali se compune din motoare rotative sau liniare (electrice, pneumatice sau hidraulice) și comanda aferentă acestora.

Sistemul de comandă prescrie succesiunea, parametrii și durata mișcărilor lanțului cinematic, corelat cu particularitățile operațiilor umane pe care trebuie să le execute robotul industrial.

3.2.1. Funcțiile sistemului mecanic al robotului industrial.

Sistemul mecanic al unui robot industrial are sarcina de a

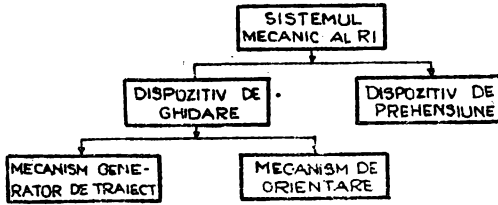


Fig. 3.11. Componenta sistemului mecanic al RI

deplasa obiectul manipulat, considerat solidarizat de un element al său, dintr-o poziție în alta a spațiului tridimensional, ambele bine determinate.

În general o asemenea deplasare se face printr-o mișcare elicoidală ^{finită}. Componenta sistemului mecanic care realizează această funcție este dispozitivul de ghidare [K14]. Întrucât mișcarea elicoidală finită poate fi descompusă în șase mișcări finite în jurul a șase axe distincte, dispozitivului de ghidare revenind două funcții :

- funcția de deplasare, care constă în deplasarea unui punct P din obiectul de manipulat, denumit punct caracteristic,

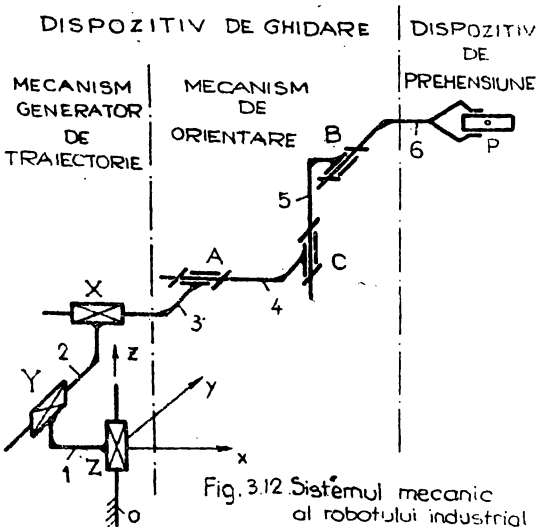


Fig. 3.12. Sistemul mecanic al robotului industrial

dintr-o poziție inițială într-alta finală a spațiului tridimensional, pe o traiectorie oarecare, ceea ce echivalează cu modificarea celor trei coordonate ale punctului caracteristic. Deci partea din dispozitivul de ghidare care efectuează funcția de deplasare, denumită mecanism generator de traiectorie, va trebui să aibe trei grade de mobilitate.

REPRODUCEREA

- funcția de orientare, care constă în orientarea unei drepte (δ) trecînd prin punctul caracteristic P și a uneia perpendiculară pe ea (δ') în acest punct, denumite dreaptă caracteristică, respectiv dreaptă auxiliară [K14], după direcții care să corespundă necesităților formulate de programul de manipulare, referitor la orientarea finală a obiectului manipulant. Aceasta echivalează cu modificarea celor trei unghiuri ale lui Euler. Partea din dispozitivul de ghidare, care efectuează funcția de orientare, denumită mecanism de orientare, va trebui să aibe trei grade de mobilitate.

Dispozitivul de ghidare al unui robot industrial este constituit dintr-un lanț cinematic deschis sau parțial deschis.

Dispozitivul de ghidare al roboților industriali tip BA, ASEA (Suedia), Puma (SUA) - fig.2.1., 6 CH Arm (SUA)-fig.2.2, Pope 80 vertical (Franța) au la bază un lanț cinematic deschis.

Dispozitivul de ghidare al roboților industriali Schlatter HDS 36 (R.F.G.), Trallfa (Norvegia), Andromat (Franța) au la bază un lanț cinematic care conține un patruleter articulată (deci o porțiune de lanț cinematic închis) și o porțiune de lanț cinematic deschis.

Lanțurile cinematice se caracterizează prin gradul lor de mobilitate, care indică numărul de posibilități de mișcare pe care le poate avea lanțul cinematic în raport cu un sistem de referință solidarizat cu unul din elementele sale. Gradul de mobilitate al unui lanț cinematic spațial cu n elemente și C_i cuple cinematice de clasa i se exprimă după Kutzbach sau Somov-Malfșev cu relația :

$$M = 6(n-1) - \sum_{i=1}^5 i c_i - \sum L_p - \sum L_{id}. \quad (3.7)$$

În construcția roboților industriali se folosesc în mod obișnuit cuple cinematice de clasa a V-a (de rotație sau de translație). Prin urmare dacă lanțul cinematic este deschis :

$$\sum L_p = \sum L_{id} = 0 \quad (3.8)$$

$$c_5 = n-1 \quad (3.9)$$

Cu aceste relații (6.7) devine :

$$M = c_c = c_5 = n-1 \quad (3.10)$$

gradul de mobilitate fiind egal cu numărul cuplelor cinematice conducătoare.

În cazul în care lanțul cinematic conține și un contur poligonal închis, gradul de mobilitate se determină cu relația :

$$M = M_p + M_d \quad (3.11)$$

unde: M_p - este gradul de mobilitate al conturului poligonal închis calculat cu relația (3.7).

M_d - este gradul de mobilitate al porțiunii deschise a lanțului cinematic, calculat cu relația (3.10)

Deci lanțul cinematic care răspunde cerințelor formulate de funcțiile dispozitivului de ghidare, va trebui să aibe gradul de mobilitate :

$$M \gg 6 \quad (3.12)$$

Ținând cont de relațiile (3.9) și (3.10) rezultă că acest lanț cinematic trebuie să fie constituit din : $n \geq 6$ elemente și $c_5 \geq 6$, cuple cinematice.

Manipulatoarele construite pentru operații specifice de complexitate redusă pot avea un număr de grade de mobilitate al dispozitivului de ghidare mai mic de șase.

Roboții industriali avînd o dexteritate medie au, în general, dispozitive de ghidare cu șase grade de mobilitate.

Roboții industriali capabili de manevre mai complexe (accesul dispozitivului de prehensiune în recipienti, ocolirea unui obstacol etc.), au dispozitivul de ghidare cu un număr mai mare de grade de mobilitate, decît șase.

După Kobrinskij [K2], gradul de manevrabilitate M_s , este numărul gradelor de mobilitate ale lanțului cinematic, care îi stă la bază, dacă se imobilizează ultimul element, cel cu care este solidarizat obiectul manipulat și are expresia :

$$M_s = M - 6 = n - 7 \quad (3.13)$$

3.2.2. Comparații între sistemul mecanic al unui robot industrial și membrul superior uman.

Prin prisma relațiilor (6.12) și (6.13) se impune o comparație cu membrul superior uman. Rolul dispozitivului de ghidare al roboților industriali îl joacă scheletul brațului și antebrațului uman, iar al dispozitivului de prehensiune, mîna umană.

Lanțul cinematic al brațului și antebrățului, conform figurii 3.13 a. este format din 13 elemente : sternul, coșul pieptului, côastele (0), omoplatul (1), clavicula (2), humerusul (3), radiusul (4), cubitusul (5) osul scafoid (6), osul semilunar (7), osul piramidal (8), osul trapez (9), osul trapezoid (10), osul mare (11) și osul cu cârlig (12). S-a omis osul pisiform (8') dispus înaintea osului piramidal (8), care nu ia parte la alcătuirea articulației radiocarpene.

Cuplele cinematice din componența lanțului cinematic al brațului și antebrățului, în număr de 21, sînt reprezentate în schema cinematică din figura 3.13.b. și semnifică următoarele articulații [B1]:

- A, articulația scapulotoracică, care nu este o articulație în adevăratul sens al cuvîntului, dar se consideră ca atare încadrîndu-se în grupa articulațiilor denumite sissarcoză, datorită importanței funcționale a spațiului interseratotoracic, dintre marele dințat și grilajul costal, care conferă mobilitate așa zise articulației, oferind ansamblului patru grade de libertate.

B, articulația acromioclaviculară, fiind o artrodie, are un grad de libertate, mișcare ce oferă omoplatului posibilitatea de a face basculări de mare amplitudine.

- C, articulația sternoclaviculară, fiind o diatroză prin dublă îmbucare, deci o articulație șelură, permite claviculei două grade de libertate.

- D, articulația scapulohumerală, articulația propriu-zisă a umărului, fiind o enatroză, deci o articulație sferoidală, are trei grade de libertate.

- E și F, articulația humerocubitoradială este o cilindroidă de tip trohleartroză, cu un singur grad de libertate. Extremitatea superioară a radiusului, prin cupușoara radială, care corespunde codilului humeral, realizează o articulație, E, cu trei grade de libertate, iar extremitatea superioară a cubitusului prin marea cavitate sigmoidă, care corespunde trahleei humerale, realizează o articulație, F, cu un grad de libertate.

G și H, articulațiile radiocubitale, superioară și inferioară sînt cilindroide de (tip trohoidă) avînd fiecare, în ansamblu, cîte un grad de libertate. Întrucît radiusul este mai

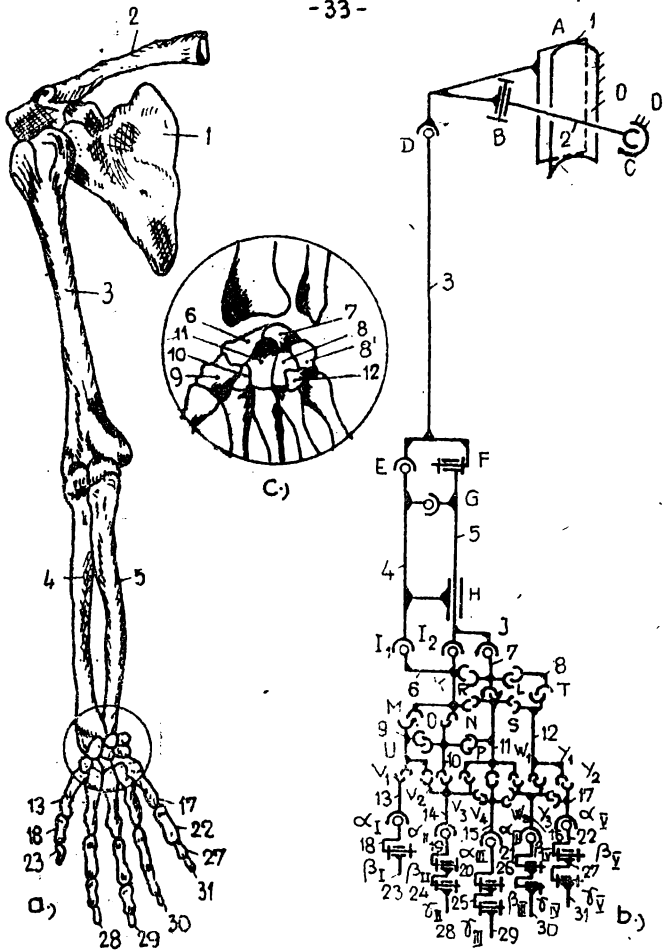


Fig. 3.13. Desenul și schema cinematică a scheletului braț-antebraț-mână umană

lung decât cubitusul și este bicudat, mișcarea se realizează prin rotația extremității superioare și prin rototranslația extremității inferioare a radiusului în jurul cubitusului, ceea ce reclamă necesitatea ca articulația radiocubitală superioară, G, să posede trei grade de libertate, iar articulația radiocubitală inferioară, H, două grade de libertate.

- I și J, articulația radiocarpiană, formată din cavitatea glenoidă antebranhială a antebrăului cu osul scafoid I_1 și I_2 și cu osul semilunar J (osul pisiform neliudn parte la alcătuirea articulației) se materializează prin trei articulații cu trei grade de libertate .

- K,L,N,P,S,U, articulațiile intercarpiene, între fețele laterale ale oaselor carpiene, formează șase articulații :

scafoidul cu semilunarul K, semilunarul cu piramidalul L, scafoidul cu osul mare N, trapezoidul cu osul mare P, osul mare cu osul cârlig S și trapezul cu trapezoidul U, având fiecare câte două grade de libertate.

- M, O, R, T, articulația mediocarpiană unește primul rând cu al doilea rând de baze carpiene. Astfel osul scafoid cu trapez M, scafoidul cu trapezoid O, semilunarul cu osul mare R, piramidalul cu osul cârlig T, formează patru articulații cu câte două grade de libertate fiecare.

Gradul de mobilitate al lanțului cinematic braț-antebraț este de $M = 13$ [K5], prezentînd deci un grad de manevrabilitate de $M_S = 7$, ceea ce explică deosebita dexteritate a omului în efectuarea "operațiilor humanoide",

Lanțul cinematic al mîinii umane conține 19 elemente : oasele metacarpiene (13...17), falangele proximale sau falangele (18...23), falangele mijlocii sau falangita (24...27) și falangele distale sau falangeta (28...31).

Cuplele cinematice din componența lanțului cinematic al mîinii umane, în număr de 24, semnifică următoarele articulații:

- $V_1, V_2, V_3, W_1, Y_1, Y_2$, articulațiile carpometacarpiene între oasele metacarpiene 13...17 și osul trapez V_1 și V_2 , osul trapezoid V_3 , osul mare W_1 , osul cu cârlig Y_1 și Y_2 , dau naștere la opt articulații cu două grade de libertate.

- V_4, W_2, Y_3 , articulațiile intermetacarpiene între oasele metacarpiene 14-15 (V_4), 15-16 (W_2), 16-17 (Y_3), dau naștere la trei articulații cu două grade de libertate.

- α_{I-V} , articulații metacarpofalangiene sînt articulații constituite între condilii capetelor metacarpiene și cavitățile glenoide ale bazelor primelor falange 18...23, avînd fiecare câte trei grade de libertate.

- β_{I-V} și δ_{II-V} , articulațiile interfalangiene sînt trohle artroze cu un singur grad de libertate.

Dacă se ține cont și de elasticitatea ligamentelor și de jocul dintre articulații, gradul de mobilitate al lanțului cinematic al membrului superior are valoarea $M=41$ [K5], ceea ce în ipoteza imobilizării mîinii umane, asigură în continuare un grad de mobilitate de $M=28$, oferindu-se o explicație a multiplelor posibilități de mișcare pe care le posedă mîna umană.

3.3. Mecanismul de orientare, componentă importantă a sistemului mecanic al robotului industrial.

Mecanismul de orientare, definit în [K12], este o componentă a dispozitivului de ghidare al robotului industrial, ce realizează funcția de orientare. Literatura de specialitate atribuie și alte denumiri acestei componente a dispozitivului de ghidare. Astfel în [P8], [P11] se utilizează denumirea de "mecanism carpian" sau "articulații tip încheietură" [P7], inspirate desigur din denumirile atribuite în medicină gâtului mîinii ("încheietura" mîinii), echivalentul funcțional din biomecanica membrului superior uman. De remarcat utilizarea denumirilor de "încheietură a mîinii", wrist [R17] și poignet [A8], în limbile engleză și franceză.

În [D14] aceluiși mecanism i se atribuie denumirea de "sistem de orientare".

Găsindu-și corespondent în limba engleză (orientation mechanism) și în limba germană (Orientierungsmechanismus) [K12], considerăm că denumirea de mecanism de orientare, corespunde definirii atât din punct de vedere al structurii mecanice (mechanism) cât și al funcției pe care o realizează (de orientare).

3.3.1. Clasificarea mecanismelor de orientare

În conformitate cu necesitățile reclamate de funcția de orientare mecanismele pot fi cu unul, două sau trei grade de mobilitate.

În figura 3.14 se prezintă schemele cinematice ale mecanismelor de orientare cu un grad de mobilitate, figura 3.14 a, cu două grade de mobilitate, figura 3.14 b și cu trei grade de mobilitate, figura 3.14 c.

Dependent de poziția relativă în spațiu al celor trei axe ale mișcărilor de rotație α , β și γ , considerate în raport cu cele trei axe ale sistemului triortogonal drept $O x y z$, mecanismele de orientare pot fi cu axele cuplelor cinematice concurente (fig. 3.14 b) sau încrucișate (fig. 3.14 c). Dacă cele trei axe sînt concurente într-un punct, figura 3.14.d. atunci mecanismul de orientare este un mecanism sferic.

Dependent de lanțul cinematic al mecanismului de orientare se deosebesc două cazuri :

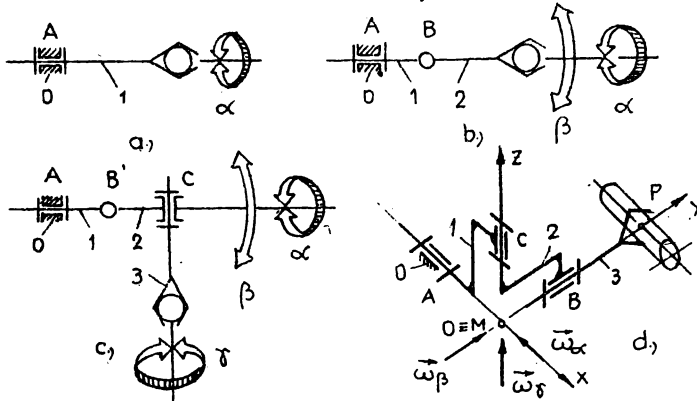


Fig. 3.14. Scheme cinematice de mecanisme de orientare

a) cînd lanțul cinematic este deschis, caz în care putem avea mecanisme de orientare cu mișcări independente și mecanisme de orientare tip "trompă de elefant".

b) cînd lanțul cinematic este închis, caz în care mecanismele de orientare sînt cu mișcări dependente.

Mecanismele de orientare cu mișcări independente, sînt concepute într-o structură modulară. Fiecare grad de mobilitate,

este constituit dintr-un grup de antrenare motor-transmisie mecanică reductoare.

Utilizînd elemente intermediare de legătură adecvate, modulele de rotație se pot asambla într-o succesiune dorită a mișcărilor.

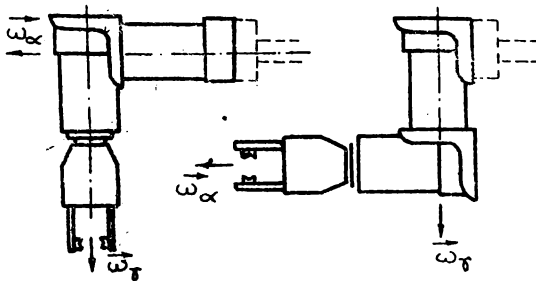


Fig. 3.15. Mecanism de orientare cu mișcări independente

În figura 3.15 se prezintă cele două combinații posibile ale modulelor de pronație-supinație (ω_α) și aducție-abducție (ω_γ).

Mecanismele de orientare cu mișcări dependente, se caracterizează printr-o interdependență cinematică între două mișcări de rotație. În figura 3.16 se exemplifică în acest sens, mecanis-

mul de orientare al robotului industrial Unimat - 2000.

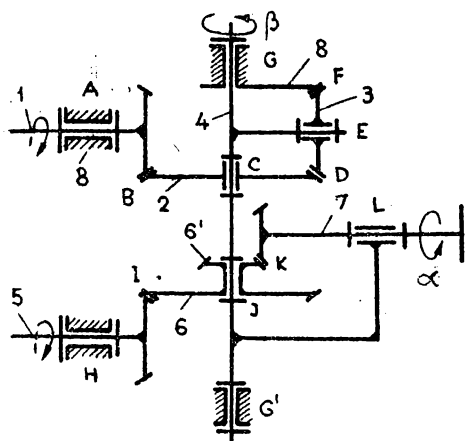


Fig. 3.16. Mecanism de orientare cu mișcări dependente.

Un hidromotor rotativ antrenează, prin intermediul unui arbore tubular, roata conică 1, care prin intermediul angrenajului conic 1-2, realizează mișcarea de flexie-extensie la nivelul arborelui 4. Al doilea hidromotor rotativ, antrenează, tot prin intermediul unui arbore tubular, roata conică 5, care prin angrenajele conice 5-6 și 6'-7, realizează mișcarea de supinație pron-

ție la nivelul arborelui 7. Intre cele două mișcări există corelația :

$$\varphi_{\beta} = \frac{z_{6'}}{z_7} \varphi_{\alpha} \quad (3.14)$$

de care trebuie să se țină seama la întocmirea programului de comandă.

Mecanismele de orientare tip "trompă de elefant", au construcția cea mai compactă (fig.3.17). Mecanismele de acest tip au la bază un lanț cinematic deschis având elemente legate între ele prin articulații sferice. Antrenarea este realizată prin intermediul unor transmisii cu cabluri.

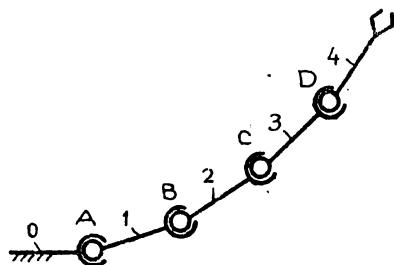


Fig. 3.17. Mecanism de orientare tip "trompă de elefant" (schematic)

Din punct de vedere al amplasării grupului de antrenare se deosebesc mecanisme de

orientare cu acționare locală sau la distanță (dispuse "umeral"). Disponerea locală a grupului de acționare este specifică mecanismelor de orientare cu mișcări independente. Disponerea la distanță a grupului de acționare, descarcă brațul robotului de o

încărcare suplimentară, în favoarea creșterii greutatei obiectului manipulat.

Calitățile funcționale ale oricărui mecanism de orientare se apreciază cu ajutorul unghiului de servicii [A12], [K14], [P2], [V7], [V8].

S-a definit unghi de servicii γ (notat cu S în [P2] și [V7]), unghiul solid care conține mulțimea pozițiilor dreptei caracteristice (δ) - figura 3.18, într-o anumită poziție a punctului

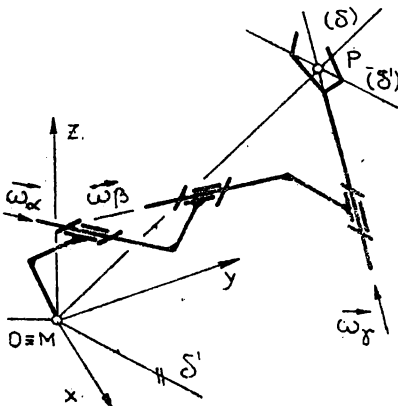


Fig.3.18.Dreapta caracteristică (δ) și dreapta auxiliară (δ') a unui mecanism de orientare

caracteristic M, deci într-un anumit punct al spațiului de lucru.

În cazul în care mecanismul de orientare are la bază un mecanism sferic (fig.3.14.d) valoarea unghiului solid γ se determină cu relația :

$$\gamma = \frac{Sp_1 p_2 p_3 p_4}{R^2} \quad [Sr] \quad (3.15)$$

unde $Sp_1 p_2 p_3 p_4$ reprezintă aria suprafeței sferice (fig.3.18) a sectorului sferic, iar R, raza

za sferei. Valoarea maximă a unghiului de servicii este :

$$\gamma = 4\pi \quad (3.16)$$

Raportul :
$$\theta = \frac{\gamma}{4\pi} \in [0 ; 1] \quad (3.17)$$

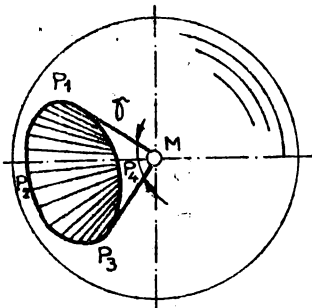


Fig.3.19.Unghi de servicii

reprezintă coeficientul de servicii într-un punct al spațiului de lucru. Mulțimea punctelor spațiului de lucru, are fiecare un corespondent într-un coeficient de servicii, valorile acestuia fiind cuprinse între 0 și 1.

Valoarea medie a coeficientului de servicii θ , în spațiul de lucru V, se determină cu relația:

$$\theta_{med} = \frac{1}{V} \int_V \theta dV \quad (3.18)$$

3.3.2. Biomecanica articulației carpiene.

Un mecanism de orientare cu trei-grade de mobilitate reproduce toate cele trei posibilități de mișcare ale gâtului mîinii.

Intr-o analiză anatomo-funcțională, mișcările gâtului mîinii se clasifică în raport cu planul anatomic în care este dispus axul mișcării [Bl]. Astfel mișcarea de flexie-extensie are loc în planul frontal, iar cea de adducție-abducție în planul sagital.

Mișcarea de supinație (rotație externă) și cea de pronatie (rotație internă) se efectuează în jurul axului lung al segmentului osos.

Complexul osteoarticular al gâtului mîinii (fig.3.13.c) este astfel structurat încît amplitudinea mișcărilor este o rezultată a amplitudinilor însumate ale tuturor articulațiilor regiunii, fiecare în parte permițînd mișcări de mică amplitudine. Rolul cel mai important îi revine articulației radiocarpiene și articulației mediocarpiene.

Toate mișcările gâtului mîinii se efectuează printr-o deplasare în "etaje" a segmentelor osoase, al doilea rînd carpian (oasele trapez 9, trapezoid 10, osul mare 11 și osul cu cîrlig 12) deplasîndu-se pe primul rînd carpian (oasele scafoid 6, semilunar 7, piramidal 8 și pisiform 8'), iar acestea la rîndul lor pe segmentul antebrahial (fig.3.13).

Mișcările gâtului mîinii se efectuează în jurul unui centru, care este socotit a fi osul mare, pivotul central, în jurul căruia se deplasează celelalte oase carpiene.

Amplitudinea mișcărilor de adducție - abducție, care se execută în jurul unui ax antero-posterior ce trece prin centrul osului mare, rezultă din însumarea amplitudinilor de mișcare ale articulațiilor radiocarpiene și mediocarpiene (tabelul 3.1)

Articulația	Adducție	Abducție	Flexie	Extensie
radiocarpienă	15°	5°	50°	35°
mediocarpienă	20°	10°	35°	50°

Amplitudinile mișcărilor de flexie-extensie, executate în jurul unui ax transversal ce trece prin osul mare, rezultă din măsurarea amplitudinilor de mișcare ale articulațiilor radio-carpene și mediocarpene (tabelul 3.1).

Amplitudinile medii normale ale mișcărilor gâtului mîinii sînt indicate în tabelul 3.2.

	Adducție	Abducție	Flexie	Extensie
Activ	15	40	75	75
Passiv	20	45	85	85

Amplitudinile mișcării de supinație este de 180° , iar amplitudinea mișcării de pronație de 90° .

În concluzie gâtul mîinii umane este capabilă să permită mișcarea aproximativ 70° în adducție-abducție, și aproximativ 170° în flexie-extensie. Mișcarea mîinii umane în supinație-pronație poate atinge aproximativ 270° [v1].

Curent mecanismul de orientare al unui robot industrial, poate efectua o cursă activă de 180° - 230° în mișcările de adducție-abducție și flexie-extensie și 240° - 360° în mișcarea de supinație-pronație.

CAPITOLUL 4.

CONSIDERATII CU PRIVIRE LA SINTEZA STRUCTURALA

A MECANISMELOR DE ORIENTARE

Prin sinteza mecanismelor se urmărește determinarea caracteristicilor principale ale mecanismelor și anume : numărul și clasa cuplelor cinematice, ordinea și modul de legare între ele a elementelor prin cuple cinematice, dimensiunile care definesc forma și poziția relativă a zonelor de contact ale cuplelor cinematice, astfel încât ele să corespundă cerințelor funcționale impuse [K4]; [K6]; [K7].

Rolul funcțional al mecanismelor de orientare este de a asigura orientarea, deci realizarea unei mișcări impuse a obiectului manipulat, în conformitate cu necesitățile reclamate de programul de manipulare.

Orientarea obiectului manipulat în spațiul de lucru se poate realiza prin modificarea celor trei unghiuri ale lui Euler, ceea ce impune ca natura mișcării de "ieșire" să fie mișcări de rotație continuă sau oscilantă.

Natura mișcării de "intrare" poate fi de rotație sau de translație, dependent de mașina motoare utilizată : motor rotativ (electric, pneumatic sau hidraulic) sau motor liniar (pneumatic sau hidraulic).

Asigurarea mișcării impuse obiectului manipulat se poate realiza și în cazul mecanismelor de orientare prin intermediul mai multor tipuri de mecanisme : cu elemente articulate (bare), cu roți dințate sau cu element intermediar flexibil.

4.1. Metode de sinteză structurală a mecanismelor.

Sinteza structurală are drept scop determinarea numărului de elemente și cuple cinematice, care compun schema cinematică a unui mecanism, astfel încât acesta să răspundă condițiilor de proiectare impuse.

A efectua sinteza structurală a unui mecanism-motor (mecanism cărui i se precizează și elementul/elementele conducătoare)

înseamnă a găsi un sistem desmodrom (un lanț cinematic cu un element fix și unul sau mai multe elemente motoare) capabil să vehiculeze energia mecanică, primită de la un sistem exterior și transmisă unui alt sistem exterior.

Condiția desmodromiei mecanismelor plane, stabilită de Cebîșev și Grubler se poate aplica și mecanismelor sferice, avînd în vedere că mecanismele plane sînt un caz particular al mecanismelor sferice cu raza infinită. Această condiție, a desmodromiei mecanismelor sferice, impune ca numărul gradelor de mobilitate M , determinat cu relația (3.2) sau (3.3) să coincidă cu numărul elementelor motoare (n_m) :

$$M = n_m \quad (4.1)$$

În această accepție a face sinteza unui mecanism motor înseamnă a găsi, pentru un n_m dat valori care să satisfacă relațiile gradului de mobilitate, precum și modul de legare a elementelor prin intermediul cuplelor cinematice.

Literatura de specialitate oferă patru căi fundamentale de sinteză structurală a mecanismelor :

- a) metoda bazată pe grupe cinematice (structurale, assurice)
- b) metoda bazată pe calculul numărului de elemente de diferite ranguri n_j ; $j \geq 2$.
- c) metoda bazată pe noțiunea de conexiune.
- d) metoda bazată pe noțiunea de curbă suport.

a) Metoda grupelor structurale, fundamentată de L.V. Assur [A14] și dezvoltată ulterior de I.I. Artobdevski [A11], efectuează sinteza structurală a unui mecanism plan desmodrom, prin atașarea succesivă, la lanțul cinematic format din elementul fix și elementele motoare (denumit convențional grupă structurală de clasa 1), a unor grupe assurice (structurale, cinematice) [A14], [D7], [K4], [P4], [P14], [M6]. Grupa cinematică, assurică, este un lanț cinematic deschis cu un grad de libertate nul, care adăugat sau scos dintr-un mecanism nu-i modifică gradul de mobilitate. În [M6] se precizează că după adăugarea sau scoaterea unei grupe cinematice, ceea ce rămîne trebuie să fie tot un lanț cinematic, fie închis cu un element fix, fie deschis (în care caz se ajunge la lanțul cinematic fundamental) cu un element fix, caz în care elementele articulate la elementul fix

determină numărul gradelor de mobilitate

$$M = 3n - 2c_5 \quad (4.2)$$

În [14] se specifică că grupa cinematică nu poate fi descompusă în lanțuri cinematice cu grade de libertate nule.

Gradul de libertate al grupeii assurice sferice și plane se determină cu formula structurală :

$$L = 3n' - c'_4 - 2c'_5 = 0 \quad (4.3)$$

În cazul cînd în care în structura grupeii assurice se află numai cuple cinematice inferioare, formula structurală (4.3) ia forma particulară [A14] :

$$L = 3n' - 2c'_5 = 0 \quad (4.4)$$

I.I.Artobolevski [A9], [A10], [A11] a clasificat grupele cinematice în clase, după clasa conturului poligonal cel mai complex conținut în grupă și ordine, după numărul cuplelor cinematice prin care grupa cinematică se leagă de alte elemente sau grupe cinematice.

N.I.Mandescu [M1] stabilește o metodă generală de alcătuire a lanțurilor cinematice și a mecanismelor plane articulate de diferite grade de libertate și mobilitate, folosind grupele cinematice. Alcătuirea mecanismelor prin această metodă se face în două etape :

- alcătuirea unui lanț cinematic $e = n-1$ elemente și Σc_i cuple cinematice.

- fixarea succesivă a unui element și stabilirea mecanismelor distincte ce rezultă.

Pentru a alcătui variante distincte de lanțuri cinematice și mecanisme cu acelaș număr de elemente și cuple cinematice se introduc noțiuni noi de grad de libertate sau mobilitate "total", "parțial" (lanțuri nedecompozabile - K.Hain) sau fracționat (lanțuri decompozabile), după cum, la un mecanism-motor cu $M \geq 2$, mișcările tuturor elementelor conduse depind simultan sau nu de toate mișcările elementelor conducătoare, respectiv nu depind de mișcările tuturor elementelor conducătoare.

Acelaș autor [M2] stabilește o metodă generală de alcătuire a grupelor cinematice, în funcție de numărul Z_g al contururilor închise deformabile și de rangul j al elementelor conținute.

În [M3] se fundamentează două metode de sinteză structurală a mecanismelor pe baza grupelor cinematice : "lungirea" mecanismului "de bază" prin legarea unei părți a cuplelor cinematice ale grupei la elementelor mobile și cel puțin a unuia la elementului fix și "amplificarea" mecanismului "de bază" prin legarea tuturor cuplelor cinematice ale grupei la elemente mobile.

G.G. Baranov [B4] fundamentează o metodă de sinteză structurală a mecanismelor plane, care constă în alcătuirea mecanismelor complexe, prin atașarea la mecanismele simple a unor ferme alcătuite din bare articulate, având grad de mobilitate nul, după care se îndepărtează câte o bară din fermă.

Formulele structurale ale grinzilor Baranov stabilesc corelația dintre numărul de elemente de diferite ranguri (n_j) și numărul cuplelor cinematice (c_5) ale grinzii :

$$e = n_2 + n_3 + \dots + n_j = \sum_{j=2}^j n_j \quad (4.5)$$

$$2c_5 = 2n_2 + 3n_3 + \dots + jn_j = \sum_{j=2}^j j \cdot n_j \quad (4.6)$$

relații cu care gradul de libertate al mecanismelor plane :

$$L = M + 3 = 3e - 2c_5 \quad (4.7)$$

aplicată grinzilor Baranov i-a forma :

$$L = 3e - 2c_5 = 3 \quad (4.8)$$

Rangul maxim al elementelor din structura unei grinzi Baranov este :

$$j_{\max} \leq \frac{1}{2} (e+4-L) \quad (4.9)$$

Conform [M6], [P4], metoda grinzilor Baranov se reduce tot la metoda sintezei structurale prin intermediul grupelor assurice. Astfel din grinda Baranov cu 3 elemente ($e=3$) prin extragerea unui element (fără articulațiile aferente) se obțin grupe assurice ($n'=2$; $c_5' = 3$) de clasa a II-a, ordinul 2 (fig.4.1a).

Grinda Baranov cu $e=5$ elemente, $5/B_2$ permite, prin extragerea unui element, obținerea a două grupe assurice cu $n'=4$ și $c_5' = 6$ (fig.4.1.b).

Grinzile Baranov cu $e=7$ elemente, fără diade, adică $7/B_{12}$, $7/B_{13}$, $7/B_{14}$, permit obținerea a 10 grupe assurice cu $n'=6$ și $c_5' = 9$ [M6].

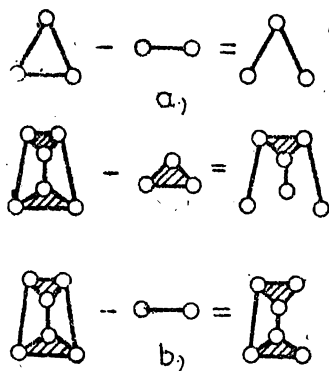


Fig. 4.1. Obținerea grupelor assurice din grinzile Baranov

Grinzile Baranov cu $e=9$ elemente în număr de 28 [M5], conduc, prin extragerea unuia din elementele de diferite ranguri j și ținând seama de simetrie, la 174 de grupe assurice cu $n'=8$ și $c'_5=12$ de diferite clase și ordine.

Pornind de la grinzile Baranov și aplicând operațiunea de grafizare Manolescu [M4], obține lanțuri cinemactice plane cu articulații simple și multiple și elemente simple (L C pams), ce se pot transforma în continuare în lanțuri cinemactice plane cu articulații simple (L C pa) prin simplificarea articulațiilor

(S.A.) sau prin amplificarea cu o diadă (A.D.) a (L C pams), urmată de operațiunea (S.A.). Această metodă permite obținerea tuturor (L C pa) și de aici a mecanismelor (Mpa) și a mecanismelor-motor (M mpa) plane articulate.

b) A doua cale fundamentală de sinteză structurală a mecanismelor plane se bazează pe formulele stabilite de M.Grubler, H.Alt, K.Hain, F.R.E.Crossley. În cazul mecanismelor sferice ($f=3$), avînd la bază lanțuri cinemactice fundamentale (lanțuri formate numai din cuple de clasa a 5-a) relațiile de calcul dintre numărul de cuple (c_5), de elemente (n); de contururi independente deformabile (N) și gradul de mobilitate (M) sînt [P6]:

$$N = c_5 - n + 1 \quad (4.10)$$

$$M = 3(n-1) - 2c_5$$

sau

$$n = 2N + M + 1, \quad (4.11)$$

$$c_5 = 3N + M$$

Fiind date două mărimi, de exemplu M și N , se obțin celălalte două (n și c_5), valorile fiind trecute în tabelul 4.1 [P4], [P5], [P6], unde cu k este notat clasa conturului exterior determinat cu relațiile :

$$k_{\min} \geq \frac{2c_5}{1+N} ; k_{\max} \leq \min [n, 2c_5 - 4N] \quad (4.12)$$

Mecanisme sferice

Tabelul 4.1.

N	M=1			M=2			M=3		
	n	c ₅	k min max	n	c ₅	k min max	n	c ₅	k min max
1	4	4	4	5	5	5	6	6	6
2	5	7	5 - 6	7	8	6 - 7	8	9	6 - 8
3	8	10	5 - 8	9	11	6 - 9	10	12	6 - 10
4	10	13	6 - 10	11	14	6 - 11	12	15	6 - 12
5	12	16	6 - 12	13	17	6 - 13	14	18	6 - 14
6	14	19	6 - 14	15	20	6 - 15	16	21	6 - 16

Metoda elementelor [P3], [P4], [P6] permite sinteza structurală a mecanismelor plane, pe baza relațiilor [G16] :

$$n = \sum_{i=2}^i n_i ; \quad c_5 = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^i i \cdot n_i \quad (4.13)$$

A doua relație permite soluții întregi numai dacă numărul total al elementelor de rang impar este par, adică :

$$\sum_{i=1}^i n_{2i+1} = 2p \quad \cup \quad p \in \mathbb{N}^* \quad (4.14)$$

Numărul conturilor deformabile independente este :

$$N = 1 + \frac{1}{2} \sum_{i=3}^i (i-2) \cdot n_i \quad (4.15)$$

iar gradul de libertate :

$$L = n_3 - \sum_{i=4}^i (i-3) n_i \quad (4.16)$$

este independent de numărul elementelor ternare.

Relațiile (4.11). (4.13) și (4.15) permit formarea sistemului:

$$\begin{cases} n = \sum_{i=2}^i n_i \\ N = 1 + \frac{1}{2} \sum_{i=3}^i (i-2) n_i \\ c_5 = 3N + M \end{cases} \quad (4.17)$$

le numărul maxim de elemente de rang i este dat de relația :

$$\max n_i < \min \left[\frac{2(N-1)}{i-2} ; \frac{2c}{i} ; n \right] \quad (4.18)$$

Rangul maxim al unui element conținut într-un lanț cinematic este egal cu numărul de contururi, inclusiv conturul exterior [P3] :

$$i_{\max} \leq 1 + N \quad (4.19)$$

O generalizare a relației (4.19), în care se ține cont și de M , conform relației (4.11), a permis obținerea expresiei [M1] :

$$i_{\max} \leq \frac{n - M + 1}{2} \quad (4.20)$$

Metoda elementelor, programată pe un calculator SPECTRUM ZX81, în limbaj BASIC [R9] - Anexa 1, a confirmat - Anexa 2 soluțiile prezentate în [P3], [P4] și [P6].

Metoda contururilor (independente) stabilită de Chr.Pelecudi, conduce la aceeași rezolvare structurală a mecanismelor, ca și metoda elementelor, pe baza numărului de contururi N_i , de clasă i și a cuplelor c_p . Ecuațiile acestei metode sînt :

$$\begin{cases} N = 1 + \sum_{j=4}^j N_j \\ c_5 = \frac{1}{2} \sum_{j=4}^j j \cdot N_j \\ n = 1 + \frac{1}{2} \sum_{j=4}^j (j-2)N_j \end{cases} \quad (4.21)$$

A doua relație permite soluții întregi dacă numărul total al contururilor de clasă impară este par, adică :

$$\sum_{j=1}^j N_{2j+1} = 2p \cup p \in N^* \quad (4.22)$$

Pornind de la observația că suma claselor, contururilor interioare independente și a conturului exterior neindependent, se poate calcula cu relația :

$$\sum^k j = 2(n+r) \quad (4.23)$$

unde clasa conturului exterior k i-a valori în intervalul dat de relațiile (4.12) :

$$k \in [k_{\min}; k_{\max}] \quad (4.24)$$

iar r este un număr natural, dat de relația :

$$r = N-1 ; \quad r \in N \quad (4.25)$$

și suplimentînd ecuațiile metodei conturilor cu relația (4.25) s-a întocmit un program în limbaj BASIC [R9] - Anexa 3 ce a confirmat - Anexa 4 soluțiile prezentate [P6].

Clasa conturilor aparține intervalului :

$$j \in [4; k] \quad (4.26)$$

și fixînd clasa conturului exterior :

$$j_{\max} = k \quad (4.27)$$

Suma claselor conturilor interioare independente, notate cu j_{Σ} este dată de relația :

$$j_{\Sigma} = \sum_{k=4}^k j-k \quad (4.28)$$

Astfel soluțiile metodei conturilor se regăsesc prin satisfacerea simultană a relațiilor (4.28) și (4.22).

c) Utilizarea noțiunii de conexiune, introdusă de Fr. Kovács, pentru prima oară în lucrarea [K4], oferă o metodă unitară de sinteză structurală în legătură directă cu sinteza dimensională, atât a mecanismelor plane, cât și a mecanismelor spațiale. Conexiunea este definită ca un lanț cinematic deschis introdus într-un sistem de elemente și cuple cinematice astfel încît să constituie o legătură între două elemente cu mișcare relativă cunoscută.

La un mecanism de familia f numărul gradelor de mobilitate ale sistemului format din n_m elemente motoare, n_c elemente conduse și un element fix, anulate de conexiuni este :

$$M_k = (6-f) (n_m + n_c) - \sum_{k=1}^{n_m} p_k \quad (4.29)$$

unde p_k este numărul parametrilor poziționali independenți ai elementului motor k .

Pentru ca un mecanism să fie desmodrom se impune ca :

$$M = \sum_{k=1}^{n_m} p_k \quad (4.30)$$

În cazul mecanismelor sferice, $f=3$, relația (4.30) conduce la o formă particulară a relației (4.29) :

$$M_k = 3(n_m + n_c) - M \quad (4.31)$$

Intrucît anularea celor M_k grade de mobilitate se realizează cu ajutorul conexiunilor :

$$M_k = - \sum L_k \quad (4.32)$$

unde suma gradelor de libertate ale conexiunilor, ce pot fi utilizate, în cazul mecanismelor sferice, este :

$$\sum L_k = - (2n_m + 3n_c) \quad (4.33)$$

Pentru o conexiune avînd n_k elemente c_{ik} cuple cinematice de clasa i , L_{pk} și L_{idk} grade de libertate ale legăturilor pasive, respectiv gradelor de libertate de prisos întroduse în mecanism prin intermediul conexiunii, gradul de libertate al conexiunii se determină cu relația :

$$L_k = (6-f)n_k - \sum_{i=f+1}^5 (i-f)c_{ik} - L_{pk} - L_{idk} \quad (4.34)$$

În cazul mecanismelor sferice pentru $L_{pk} = L_{idk} = 0$ relația (4.34) devine:

$$L_k = 3n_k - c_{4k} - 2c_{5k} \quad (4.35)$$

permițînd evidențierea a trei tipuri de conexiuni (tabelul 4.2).

Conexiunile de tip A au gradul de libertate egal cu clasa cuplei cinematice.

Conexiunile de tip B și C pot avea gradul de libertate pozitiv, negativ sau nul. Conexiunea de tip C avînd $L_k = 0$ constituie o grupă cinematică (structurală) generalizată [K4].

Conexiunile prezintă două proprietăți fundamentale :

- orice conexiune poate fi înlocuită cu alta avînd acelaș grad de libertate, fără ca gradul de libertate al mecanismului să se modifice. În baza acestei proprietăți o conexiune $K_{A(-1)}$ poate fi înlocuită cu o conexiune $K_{B(-1)}$.

- orice conexiune poate fi împărțită în alte conexiuni și elemente, cu condiția ca suma gradelor de libertate ale elementelor și conexiunilor înlocuitoare să fie egală cu gradul de libertate al conexiunii inițiale. În baza acestei proprietăți

o conexiune $K_C(0)$ se poate descompune în două conexiuni una $K_A(-2)$ și una $K_B(-1)$, și un element.

Conexiuni uzuale de mecanismelor sferice

Tabelul 4.2.

Tipul conex	Nr. elem.	Cuple cinematice		Schema cinematică a conexiunii	Grad de lib. al conex.	Notarea conexiunii
		Nr.	Clasa			
A	0		$C_{5k}=1$		$L_k = -2$	$K_A(-2)$
			$C_{4k}=1$		$L_k = -1$	$K_A(-1)$
B	1	2	$C_{5k}=2$		$L_k = -1$	$K_B(-1)$
			$C_{5k}=1$ $C_{4k}=1$		$L_k = 0$	$K_B(0)$
C	$n_k > 1$		C_{5k} C_{4k}		$L_k \leq 0$	$K_C(L_k)$
C exemplu	2	3	C_{4k} $C_{5k}=3$		$L_k = 0$	$K_C(0)$
	3	4	$C_{5k}=4$		$L_k = (+1)$	$K_C(+1)$
	3	5	$C_{5k}=5$		$L_k = (-1)$	$K_C(-1)$

Pentru a face sinteza structurală a unui mecanism la care se cunosc elementele motoare, conduse și elementul fix, cât și cerințele calitative impuse mișcării acestora, se stabilește suma gradelor de libertate a conexiunilor care trebuie introduse, cu relația (4.33). Conexiunile pot fi introduse în schema structurală a mecanismului simultan sau în mai multe etape :

- introducerea conexiunilor într-o singură etapă când se realizează toate limitările necesare ale mișcării relative ale elementelor conducătoare, conduse, respectiv fix. In acest caz se folosesc numai conexiuni cu $L_k < 0$.

- introducerea conexiunilor în două etape. In prima etapă se precizează conexiunile ce stabilesc legăturile între elementele conducătoare, conduse și fix, caz în care conexiunile pot avea $\sum L_k \geq 0$. In a doua etapă se introduc conexiuni între elementele conexiunilor din prima etapă sau între aceste elemente și cele conducătoare, conduse sau fix.

In acest mod sinteza structurală a mecanismelor cu ajutorul conexiunilor, permite stabilirea structurii mecanismului în funcție de numărul și mișcările de efectuat ale elementelor

motoare și conduse în mod direct și nu prin alegerea mecanismului, dintr-o totalitate anterior stabilită a mecanismelor potențiale, așa cum se procedează în metodele anterior prezentate.

d) Metoda a 4-a se bazează pe noțiunea de curbă suport introdusă de D.Perju prin lucrarea [P14].

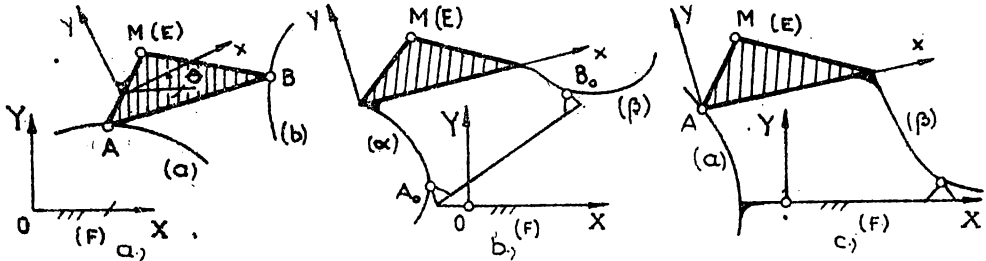


Fig. 4.2. Definirea pozițiilor relative a două elemente cu ajutorul curbelor suport

Starea de mișcare a planului (elementului) mobil E (fig.4.2). este univoc determinată în raport cu alt plan fix (F), dacă se respectă condiția ca două puncte să se sprijine pe două curbe. Punctul și curba pe care acesta se sprijină trebuie să aparțină fiecare altui plan. Cele trei cazuri posibile sînt :

a) se cunosc două curbe a și b conținute în planul (F) pe care se sprijină două puncte A și B aparținînd elementului E. În mișcarea relativă (E/F) elementul E are un grad de libertate, deoarece formează o conexiune $K_{B(-1)}$, avînd $L_E = -1$.

b) se cunosc curbele (α) și (β) aparținînd elementului (E), care se sprijină pe două puncte A_0 și B_0 din planul fix (F).

c) se cunoaște cîte o curbă, fiecare aparținînd altui element : $(\alpha) \in F$ și $(\beta) \in E$.

Toate cele trei cazuri au un punct comun și anume, respectarea condiției ca un punct al unui element să se afle pe o curbă de o structură dată a altui element. Determinarea structurii mecanismului se poate face pornind de la structura algebrică admisă pentru curbele suport. Dacă q este numărul de parametri independenți care definesc curbele suport [P15], [K6] atunci planului mobil, se pot impune :

$$p = q + 2 \quad (4.36)$$

poziții. Dacă cele două curbe, sînt de structuri algebrice diferite ($q_a \neq q_b$) atunci numărul de poziții ce pot fi impuse elementului mobil să fi :

$$p = \min(q_a, q_b) + 2 \quad (4.37)$$

Curbele suport de tipul celor din figura 4.2.a. urmează să fie reproduse fiecare de câte un mecanism parțial. Considerînd că aceste mecanisme parțiale care trasează curbele suport, sînt desmodrome, cu gradul de mobilitate M_a și M_b , mecanismul rezultat va avea gradul de mobilitate :

$$M = M_a + M_b + L_E = M_a + M_b - 1 \quad (4.38)$$

După R.Kraus [K45], [K46] numărul de parametri independenți care definesc o curbă, care reprezintă traiectoria unui punct dintr-un mecanism, egal cu numărul parametrilor dimensionali independenți care definesc mecanismul, este :

$$q = 2(c_5 + t) - M \quad (4.39)$$

unde t este numărul punctelor din mecanism care generează traiectorii, altele decît cuplele cinematice.

Intrucît mecanismul este desmodrom numărul cuplelor cinematice se determină cu formula structurală :

$$M = 3m - 2c_5 \quad (4.40)$$

unde m este numărul elementelor mobile.

Numărul total al elementelor mecanismului rezultat va fi [P14], [P15] :

$$n = m_a + m_b + 2 \quad (4.41)$$

unde m_a și m_b reprezintă numărul de elemente mobile ale mecanismelor parțiale care trasează curbele (a) și (b) la care se adaugă elementul fix (F) și cel mobil (E).

4.2. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu metoda conexiunilor.

Utilizarea metodei conexiunilor la sinteza structurală a mecanismelor de orientare prezintă avantajul că pînă și mecanismele cele mai complicate sînt rezultatul asamblării elementelor motoare, conduse și fix cu ajutorul unui număr limitat de conexiuni, de structură cunoscută.

Folosirea conexiunii conferă sintezei mecanismelor un caracter unitar și permite o corelare rațională a sintezei structurale cu cea dimensională, oferind totodată posibilitatea stabilirii

Văriantei optime de compunere a unui mecanism, în funcție de condițiile de proiectare impuse.

Gradul de mobilitate al unui mecanism de orientare, avînd la bază un lanț cinematic sferic, se calculează cu relația (4.31):

$$M = 3(n_m + n_c) - M_k \quad (4.31')$$

4.2.1. Clasificarea mecanismelor de orientare în funcție de numărul elementelor motoare și conduse.

Dependent de numărul elementelor motoare n_m și conduse n_c , mecanismele de orientare se clasifică în :

a) mecanisme de orientare avînd numai elemente motoare : $n_m = 1, 2$ sau 3 , elementul condus $n_c = 0$ fiind solidar cu ultimul element motor. În acest caz mecanismele de orientare sînt cu mișcări independente, fiind compuse din mecanisme etajate.

b) mecanisme de orientare cu un singur element condus : $n_c = 1$, avînd numărul elementelor motoare : $n_m = M = 1, 2$ sau 3 . În acest caz mecanismele de orientare sînt cu mișcări dependente.

c) mecanisme de orientare cu mai multe elemente conduse : $n_c > 1$, egal însă cu numărul elementelor motoare : $n_m = n_c = 1, 2$ sau 3 . În acest caz mecanismele de orientare sînt tot cu mișcări independente. Faptul că $n_c > 1$, atrage după sine existența unor elemente conduse intermediare n_{ci} și a unui element condus final $n_{cf} = 1$, astfel încît :

$$n_c = n_{ci} + n_{cg} > 1 \quad \cup \quad n_c = n_m \quad (4.42)$$

În ultimele două cazuri mecanismele de orientare pot fi segmentate în mecanisme parțiale, numărul lor fiind egal cu numărul contururilor independente deformabile, în cazul în care $M > 1$.

4.2.2. Gradul de libertate al conexiunii, sumă a gradelor de libertate ale conexiunilor motoare și conexiunilor geometrice.

Gradele de mobilitate anulate cu ajutorul conexiunilor este dată de suma gradelor de libertate ale conexiunilor relația (4.32):

$$M_k = - \sum L_k \quad (4.32)$$

Din relația (4.31') se obține suma gradelor de libertate ale conexiunilor ce se introduc între cele n_m elemente motoare, n_c elemente conduse și cel fix pentru a obține un mecanism cu M grade de mobilitate :

$$\sum L_k = M - 3(n_m + n_c) \quad (4.43)$$

Ținând cont de condiția desmodromiei mecanismelor, relația (4.1), se obține suma gradelor de libertate necesare a fi eliminate de conexiunile utilizate (tabelul 4.3).

Tabelul 4.3

Suma gradelor de libertate ale conexiunilor

Grad de mobilitate	Nr. elementelor		$\sum L_k$
	motoare	conduse	
M	n_m	n_c	
1	1	0	-2
2	2		-4
3	3		-6
1	1	1	-5
2	2		-7
3	3		-9
1	1	2	-8
2	2		-10
3	3		-12
1	1	3	-11
2	2		-13
3	3		-15

Conexiunile introduse între elementele motoare, conduse și fix pot fi :

- conexiuni motoare avînd $\sum L_{km}$, suma gradelor de libertate ale conexiunilor.

- conexiuni geometrice avînd $\sum L_{kg}$, suma gradelor de libertate ale conexiunilor.

Ou aceste precizări suma gradelor de libertate

ale conexiunilor necesare, se determină cu relația :

$$\sum L_k = \sum L_{km} + \sum L_{kg} \quad (4.44)$$

4.2.3. Determinarea gradelor de libertate eliminate de conexiunile motoare.

Stiut fiind că o cuplă cinematică conducătoare (motoare) este, de regulă, o cuplă cinematică inferioară c_5 (motor liniar sau rotativ), în cazul mecanismelor sferice o conexiune motoare va trebui să elimine două grade de libertate : $L_{km} = -2$, utilizînd conexiunea $K_{A(-2)}$. Pentru două sau trei cuple cinematice conducătoare, gradele de libertate ale conexiunilor motoare vor fi : $2 L_{km} = -4$ sau $3 L_{km} = -6$, utilizîndu-se în acest scop două respectiv trei conexiuni $K_{A(-2)}$.

Conexiunile motoare, introduse între elementele motoare (M) și elementul fix (F) vor elimina :

$$\sum L_{km} = n_m \cdot L_{km} \quad (4.45)$$

grade de libertate (tabelul 4.4), unde fiecare element motor necesită introducerea unei conexiuni motoare, avînd gradul de libertate :

$$L_{km} = -2 \quad (4.46)$$

uzual utilizîndu-se conexiunea $K_A(-2)$

4.2.4. Determinarea gradelor de libertate eliminate de conexiunile geometrice.

Fiecare element condus necesită introducerea unei conexiuni geometrice avînd gradul de libertate :

$$L_{kg} = -3 \quad (4.47)$$

Conexiunile geometrice introduse între elementele conduse (C) și motor (M) sau fix (F), respectiv între elementul condus final (C_f) și condus intermediar (C_i), vor elimina :

$$\sum L_{kg} = n_c \cdot L_{kg} \quad (4.48)$$

grade de libertate (tabelul 4.4).

Relațiile (4.43) - (4.48) au permis întocmirea tabelului 4.4.

Înlocuind relațiile (4.45) și (4.48) în relația (4.44) se obține :

$$\sum L_k = n_m \cdot L_{km} + n_c \cdot L_{kg} \quad (4.49)$$

O conexiune geometrică poate fi o conexiune K_A , K_B sau K_C . Deci gradul de libertate al conexiunii geometrice se determină ca o sumă a gradelor de libertate ale conexiunilor de tip A, B sau C :

$$L_{kg} = L_{K_A} + L_{K_B} + L_{K_C} = -3 \quad (4.50)$$

unde L_{K_A} , L_{K_B} și L_{K_C} se determină cu relația (4.35)

Conexiunile de tip A, K_A , avînd numărul de elemente : $n_{kg} = \rho$ și cuplele cinematice aferente : $c_k = 1$, vor putea limita numai unu sau două grade de libertate, după clasa cuplei cinematice, care le constituie :

a) $c_k = c_{4kg} \Rightarrow L_{K_A} = -c_{4kg} = -1$ (4.51)

b) $c_k = c_{5kg} \Rightarrow L_{K_A} = -c_{5kg} = -2$

Tabelul 4.4.

Gradele de libertate ale conexiunilor motoare și geometrice

Grad de mobilitate	Nr. elementelor		Grad lib. al conexi.	
	motoare	condușe	motoare	geometrice
M	n_m	n_c	$\sum L_{km}$	$\sum L_{kg}$
1	1	0	-2	0
2	2		-4	
3	3		-6	
1	1	1	-2	-3
2	2		-4	
3	3		-6	
1	1	2	-2	-6
2	2		-4	
3	3		-6	
1	1	3	-2	-9
2	2		-4	
3	3		-6	

Deci conexiunile K_A folosite în cazul mecanismelor sferice, vor avea gradele de libertate $L_{K_A} < 0$.

Conexiunile de tip B, avînd numărul de elemente: $n_{kg} = 1$, care poate fi un element binar, ternar, sau de rang j, adică:

$$n_{kg} = a_j \cdot U_{j \geq 2}; j \in N \quad (4.52)$$

vor avea cuplele cinematice aferente :

$$c_{kg} = \sum_{i=4}^5 c_{ikg} = j \quad (4.53)$$

Intrucît conexiunile de tip B diferă prin rangul elementului, clasa și forma constructivă a cuplelor cinematice, care intră în componența lor, gradul lor de libertate va fi determinat cu relația (4.35) :

$$L_{K_B} = 3n_{kg} - c_{4kg} - 2c_{5kg} \quad (4.54)$$

Notînd numărul cuplelor cinematice de clasa a IV-a :

$$c_{4kg} = q \quad (4.55)$$

conform relației (4.53), numărul cuplelor cinematice de clasa V-a, va fi :

$$c_{5kg} = j - q \quad q \leq j; \quad q \in N \quad (4.56)$$

Cu aceste precizări, gradul de libertate al unei conexiuni de tip B, devine :

$$L_{K_B} = 3 - 2j + q \quad (4.57)$$

care va lua valori pozitive :

$$L_{K_B} > 0 \quad \wedge \quad q > 2j - 3 \quad \cup \quad q \leq j \quad \text{și} \quad j \geq 2 \quad (4.58)$$

Relația (4.58) admite o singură soluție :

$$j = q = 2 \quad (4.59)$$

adică un element binar cu două cuple cinematice de clasa a IV-a, avînd $L_{K_B} = + 1$.

Gradul de libertate nul al conexiuni K_B :

$$L_{K_B} = 0 \quad \wedge \quad q = 2j - 3 \quad \cup \quad q \leq j \quad \text{și} \quad j \geq 2 \quad (4.60)$$

se obține numai în două cazuri, pentru :

$$j = 2 \quad \text{și} \quad q = 1 \quad (4.61)$$

cînd avem un element binar cu cîte o cuplă cinematică de clasa a IV-a și una de clasa a V-a și pentru :

$$j = q = 3 \quad (4.62)$$

cînd avem un element ternar cu trei cuple cinematice de clasa a IV-a.

Conexiunea K_B are grade de libertate negative :

$$L_{K_B} < 0 \quad \wedge \quad q < 2j - 3 \quad \cup \quad q \leq j \quad \text{și} \quad j \geq 2 \quad (4.63)$$

admițînd toate valorile, adică :

$$\begin{aligned} j \leq 3 \quad \text{și} \quad q \in [0 ; 2(j - 2)] \\ j > 3 \quad \text{și} \quad q \in [0 ; j] \end{aligned} \quad (4.64)$$

adică restul variantelor posibile indiferent de rangul elementelor și clasa cuplelor cinematice componente ale conexiunii.

De menționat că între soluțiile relațiilor (4.64) există una, conexiunea $K_{B(-1)}$ cu $n_{kg} = 1$ și $c_{5kg} = 2$ (cazul $j = 2$; $q = 0$), care este transformată instantanee izocinetică a conexiuni $K_{A(-1)}$ - relația (4.51) cazul $n_{kg} = 0$ și $c_{4kg} = 1$.

Conexiunile de tip C, K_C , vor avea numărul elementelor $n_{kg} > 1$ și numărul cuplelor cinematice aferente :

$$c_{kg} = \sum_{i=4}^5 c_{ikg} \quad (4.65)$$

Elementele componente ale conexiunilor de tip C, vor fi de diferite ranguri $j \geq 2$. Din acest punct de vedere se deosebesc trei cazuri :

a) conexiuni de tip C formate numai din elemente de diferite ranguri : binare, ternare, quaternare, de rang j , adică :

$$n_{kg} = x \cdot n_j ; \quad j \geq 2 \quad \wedge \quad x > 1 \quad \cup \quad x \in \mathbb{N} \quad (4.66)$$

Folosind aceeași notație din relația (4.55), numărul cuplelor cinematice de clasa a V-a se determină cu relația :

$$c_{5kg} = (j-1) x - q + 1 \quad (4.67)$$

iar numărul total de cuple cinematice al conexiunii :

$$c_{kg} = (j-1) x + 1. \quad (4.68)$$

Gradul de libertate al conexiunii de tip C format numai din elemente de același rang, se determină cu relația :

$$L_{K_C} = (5-2j) x + q - 2 \quad (4.69)$$

Valorile pozitive ale acestuia se obțin :

$$L_{K_C} > 0 \quad \text{pt. } j=2 \quad \begin{cases} x=2 ; & q \in [1 ; x+1] \\ x > 2 ; & q \in [0 ; x+1] \end{cases} \quad (4.70)$$

$$j=3 \quad x \geq 2 ; \quad q \in [x+3 ; 2x+1]$$

adică pentru conexiunea de tip C formată din elemente binare, respectiv numai din elemente ternare, avînd q cuple cinematice de clasa a IV-a.

Grupele cinematice se obțin în acest caz, cînd :

$$L_{K_C} = 0 \quad \text{pt. } j = 2 \quad x = 2 \quad \text{și} \quad q = 0$$

$$j = 3 \quad x \geq 3 \quad \text{și} \quad q = x+2. \quad (4.71)$$

adică pentru conexiunea de tip C, formată din elemente binare și trei cuple cinematice de clasa a V-a, care este de fapt transformata instantanee izocinetică a conexiunii $K_{B(0)}$, avînd $n_k = n_2$ și $c_{4k} = c_{5k} = 1$ (cazul $j=2, q=1$, relația (4.61)-), respectiv conexiunea de tip C formată din 2,3,4,... elemente ternare avînd 4,5,6,... cuple cinematice de clasa a IV-a, restul fiind de clasa a V-a.

Conexiunile K_C avînd gradul de libertate negativ se obțin, în acest caz, pentru :

$$L_{K_C} < 0 \quad \wedge \quad x \geq 2 \quad \begin{cases} j = 3 ; & q \in [0 ; x-1] \\ j > 3 ; & q \in [0 ; (j-1)x+1] \end{cases} \quad (4.72)$$

b) conexiuni de tip C formate din două categorii de elemente de rang diferit : binare și ternare, binare și quaternare ș.a.m.d., ternare și quaternare etc, avînd :

$$n_{kg} = xn_j + yn_l ; j \geq 2 \text{ și } l \geq j+1 \quad \forall \{x,y\} \in N^* \quad (4.73)$$

pentru notația : $c_{4kg} = q$ se obține :

$$c_{5kg} = (j-1)x + (l-1)y - q + 1 \quad (4.74)$$

respectiv :

$$c_{kg} = (j-1)x + (l-1)y + 1 \quad (4.75)$$

gradul de libertate fiind dat de relația :

$$L_{KC} = (5-2j)x + (5-2l)y + q - 2 \quad (4.76)$$

c) conexiuni de tip C formate din trei categorii de elemente de rang diferit : binare, ternare și quaternare ; binare ternare și de rang 5, ș.a.m.d., avînd :

$$n_{kg} = xn_j + yn_l + zn_r ; j \geq 2, l \geq j+1, r \geq l+1 \quad (4.77)$$

$$\forall \{x,y,z\} \in N^*$$

C. aceeași notație: $c_{4kg} = q$ se obține :

$$c_{5kg} = (j-1)x + (l-1)y + (r-1)z - q + 1 \quad (4.78)$$

respectiv:

$$c_{kg} = (j-1)x + (l-1)y + (r-1)z + 1 \quad (4.79)$$

relații ce permit calculul gradului de libertate al conexiunii:

$$L_{KC} = (5-2j)x + (5-2l)y + (5-2r)z + q - 2 \quad (4.80)$$

Din aproape în aproape, admitînd o notație adecvată și anume, notînd cu x_i numărul elementelor de diferite ranguri ($i \geq 2$) și cu j_i rangul acestor elemente, respectînd condiția ca:

$$j_2 \geq 1 \text{ și } j_{i+1} \geq j_i + 1 \quad (4.81)$$

se pot generaliza relațiile de calcul pentru conexiunile de tip A, B și C și anume :

$$n_{kg} = \sum_{i=2}^n x_i n_{j_i} \quad \forall x_i \in N \quad (4.82)$$

$$c_{kg} = 1 + \sum_{i=2}^n (j_i - 1)x_i \quad (4.83)$$

unde

$$c_{4kg} = q \quad \forall \quad q \in \mathbb{N}; \quad q_{\max} = c_{kg} \quad (4.84)$$

$$c_{5kg} = 1 - q + \sum_{i=2}^n (j_i - 1) x_i \quad (4.85)$$

și

$$L_{kg} = q - 2 + \sum_{i=2}^n (5 - 2j_i) x_i \quad (4.86)$$

Caracterul general al grupului de relații (4.82) - (4.86), respectînd condiția (4.81) se poate constata: prin particularizarea variabilelor x_i și q pentru diverse valori ale indicelui de sumare $i \geq 2$.

Astfel conexiunile de tip A se obțin pentru $i=2$ și $x_2=0$:

$$n_{kg} = 0; \quad c_{kg} = 1; \quad c_{4kg} = q \quad \forall \quad q \in [0; 1]; \quad c_{5kg} = 1 - q \quad (4.87)$$

$$L_{kg} = q - 2$$

relații ce au ca soluții poz.1 și 2 din tabelul 4.5.

Conexiunile de tip B se obțin pentru $i \geq 2$ și $x_i = 1$ și anume:

$$n_{kg} = 1; \quad c_{kg} = j; \quad c_{4kg} = q \quad \forall \quad q \in [0; j]; \quad c_{5kg} = j - q \quad (4.88)$$

$$L_{kg} = 3 + q - 2j$$

unde cu j s-a notat rangul elementului, adică :

$$j_i = j \quad \forall \quad i \geq 2 \quad (4.89)$$

Soluțiile relațiilor (4.88) - (4.89) sînt prezentate în tabelul 4.5, poz.3 ÷ 14, unde s-au luat în considerare numai elemente binare, ternare sau quaternare, adică $i = 2, 3$ sau 4.

Conexiunile de tip C se obțin în celelalte cazuri cînd nu se impun condițiile inițiale ce au condus la conexiunile de tip A sau B. Astfel dacă conexiunea de tip C este formată din

două elemente $\sum_{i=2}^4 x_i = 2$, de acelaș rang j_i sau de rang diferit $j_{i+1} \geq j_i + 1$ se obțin relațiile :

Soluții numerice pentru relațiile generale (4.82-4.86)

Tabelul 4.5.

Nr. crt.	Indice de sumare	Numărul elementelor de diferite ranguri n_{ji}				Numărul total de elemente al conexiunii n_{kg}	Rangul elementelor conexiunii			Numărul total al cuplelor cinematice al conexiunii c_{kg}	Numărul cuplelor cinematice de clasă a IV-a c_{4kg}	Numărul cuplelor cinematice de clasă a V-a c_{5kg}	Gradul de libertate al conexiunii L_k	Tipul conexiunii							
		i	x_2	x_3	x_4		j_2	j_3	j_4												
1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-2	A								
2										1	0	-1									
3		1	0	0	1	2	0	0	2	0	2	-1	B								
4																			1	0	0
5										2	1	+1									
6	≤ 3	0	1	0		0	3	0	3	0	3	-3									
7																					
8																					
9										3	0	0									
10	≤ 4	0	0	1		0	0	4	4	0	4	-5									
11																					
14										4	0	-1									
15	2	2	0	0	2	2	0	0	3	0	3	0	C								
16																					
18																			3	0	+3
19	≤ 3	0	2	0											0	3	0	5	0	5	-4
20																					
23																			4	1	0
24																			5	0	+1
25	≤ 4	0	0	2											0	0	4	7	0	7	-8
26																					
32																			7	0	-1
33	≤ 3	1	1	0		2	3	0	4	0	4	-2									
34										1	3	-1									
35										2	2	0									
36										3	1	+1									
37										4	0	+2									
38	≤ 4	1	0	1		2	0	4	5	0	5	-4									
39																					
42										4	1	0									
43										5	0	+1									
44		0	1	1		0	3	4	6	0	6	-6									
45																					
50										6	0	0									

continuare Tabelul 4.5.

51	2	3	0	0	3	2	0	0	4	0	4	+1	C
55										4	0	+5	
56	≤3	0	3	0		0	3	0	7	0	7	-5	
61										5	2	0	
62										6	1	+1	
63										7	0	+2	
64	≤4	0	0	3		0	0	4	10	0	10	-11	
74										10	0	-1	
75	≤3	2	1	0		2	3	0	5	0	5	-1	
76										1	4	0	
80										5	0	+4	
81	≤3	1	2	0		2	3	0	6	0	6	-3	
84										3	3	0	
87										6	0	+3	
88	≤4	2	0	1		2	0	4		0	6	-3	
91										3	3	0	
94										6	0	+3	
95		1	0	2		2	0	4		0	8	-7	
102										7	1	0	
103										8	0	+1	
104		0	2	1		0	3	4		0	8	-7	
111										7	1	0	
112										8	0	+1	
113		0	1	2		0	3	4		0	9	-9	
122										9	0	0	
123		1	1	1		2	3	4		0	7	-5	
126										5	2	0	
129										6	1	+1	
130										7	0	+2	

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{kg} = x_i n_{j_i} + x_{i+1} n_{j_{i+1}} \cup x_i \in \mathbb{N} \\ c_{kg} = 1 + (j_i - 1)x_i + (j_{i+1} - 1)x_{i+1} \\ c_{4kg} = q \quad \forall \quad q \in [0; c_{kg}] \\ c_{5kg} = 1 - q + (j_i - 1)x_i + (j_{i+1} - 1)x_{i+1} \\ L_{kg} = q - 2 + (5 - 2j_i)x_i + (5 - 2j_{i+1})x_{i+1} \end{array} \right. \quad (4.90)$$

care admit ca soluții pentru $i \leq 4$ valorile din tabelul 4.5., poz.15 ÷ 50.

In cazul conexiunilor de tip C formate din trei elemente.

$\sum_{i=2}^4 x_i = 3$ de acelaș rang j_i sau de rang diferit $j_{i=1} \geq j_{i+1}$ se obțin relațiile :

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{kg} = \sum_{i=2}^4 x_i n_{j_i} \cup x_i \in \mathbb{N} \\ c_{kg} = 1 + \sum_{i=2}^4 (j_i - 1)x_i \\ c_{4kg} = q \quad \forall \quad q \in [0; c_{kg}] \\ c_{5kg} = 1 - q + \sum_{i=2}^4 (j_i - 1)x_i \\ L_{kg} = q - 2 + \sum_{i=2}^4 (5 - 2j_i)x_i \end{array} \right. \quad (4.91)$$

care au ca soluții valorile din tabelul 4.5. poz. 51 ÷ 130.

Intrucît soluțiile de la poz. 51 ÷ 122 se pot obține și cu sistemul (4.90), deoarece avem de-a face cu conexiuni de tip C formate tot din două elemente de acelaș rang j_i sau de ranguri diferite, dar cu $j_{i+1} = j_i + \{1, 2\}$, în continuare se exemplifică numai cazul unei conexiuni tip C, avînd un element binar ($x_2=1$), unul ternar ($x_3=1$) și unul quaternar ($x_4=1$) prezentat în tabelul 4.5 la poz.123 + 130:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{kg} = x_2 n_2 + x_3 n_3 + x_4 n_4 = n_2 + n_3 + n_4 \\ c_{kg} = 1 + (j_2 - 1)x_2 + (j_3 - 1)x_3 + (j_4 - 1)x_4 = \\ = 1 + (2-1)1 + (3-1)1 + (4-1)1 = 7 \\ c_{4kg} = q \quad \forall \quad q \in [0, 7] \end{array} \right. \quad (4.92)$$

$$\left\{ \begin{aligned} c_{5kg} &= 1-q + (j_2-1)x_2 + (j_3-1)x_3 + (j_4-1)x_4 = \\ &= 1-q + (2-1)1 + (3-1)1 + (4-1)1 = 7-q \\ L_{kg} &= q-2 + (5-2j_2)x_2 + (5-2j_3)x_3 + (5-2j_4)x_4 = \\ &= q-2 + (5-2 \cdot 2)1 + (5-2 \cdot 3)1 + (5-2 \cdot 4)1 = q-5. \end{aligned} \right.$$

La fel se pune problema și în cazul conexiunilor de tip C avînd numărul de elemente $n_{kg} \geq 2$ și sînt compuse din elemente de diferite ranguri.

Se menționează că dacă este satisfăcută condiția :

$$\sum_{i=2}^n x_i \cdot j_i = \text{constant} \quad (4.93)$$

adică dacă produsele dintre numărul elementelor x_i de rang j_i și rangul lor, însumate este o constantă, soluțiile relațiilor (4.82) ÷ (4.86) sînt identice. Acest fapt reiese și din tabelul 4.5 cînd 1 element de rang 2 și două elemente de rang 3 :

$$\sum_{i=2}^3 x_i \cdot j_i = 1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 = 8 \quad (4.94)$$

respectiv două elemente de rang 2 și un element de rang 4 :

$$\sum_{i=2}^4 x_i \cdot j_i = 2 \cdot 2 + 1 \cdot 4 = 8 \quad (4.95)$$

admit aceleași soluții (poz. 81 ÷ 87 respectiv poz. 88 ÷ 94), sau în cazul unui element de rang 2 și două elemente de rang 4, ce admit aceleași soluții ca două elemente de rang 3 și un element de rang 4 (poz. 95 ÷ 103 și poz. 104 ÷ 112) :

$$\sum_{i=2}^4 x_i j_i = 1 \cdot 2 + 2 \cdot 4 = 2 \cdot 3 + 1 \cdot 4 = 10$$

4.2.5. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare folosind conexiuni cu $L_k < 0$

Folosind conexiuni avînd $L_k < 0$, le se introduc între elementele motoare, conduse și fix, realizîndu-se toate limitările necesare ale mișcărilor relative.

Ca și conexiuni motoare se vor utiliza conexiunile $K_{A(-2)}$.

Conexiunile geometrice se pot compune din conexiuni de tip A, B sau C, toate îndeplinind condiția ca $L_k < 0$. (vezi relațiile (4.51), (4.63), (4.72) -). Ținând cont de relația (4.47), în acest caz nu se vor putea folosi decât un număr limitat de conexiuni, deoarece se impune ca gradul de libertate să respecte condiția :

$$L_{kg} \in [-3; 0] \quad (4.96)$$

Se mai pot utiliza și grupe cinematice, care nu sînt altceva decît conexiuni $K_{C(0)}$ și în consecință ele nu modifică gradul de mobilitate al mecanismului în care se introduc.

Definind matricea conexiunilor, ca o matrice $\underline{K}_{6 \times 3}$ ce are ca elemente, conexiunile utilizabile în cazul mecanismelor sferice, avînd $L_k < 0$:

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} K_A(-1) & K_B(-1) & K_C(-1) \\ K_B(-1) & K_C(-1) & K_A(-1) \\ K_C(-1) & K_A(-1) & K_B(-1) \\ K_A(-2) & K_B(-2) & K_C(-2) \\ K_B(-2) & K_C(-2) & K_A(-2) \\ K_C(-2) & K_A(-2) & K_B(-2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K (L_k = -1) \\ K (L_k = -2) \end{bmatrix} \quad (4.97)$$

și matricea operator $\underline{Q}_{7 \times 6}$:

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.98)$$

Se determină matricea conexiunilor geometrice :

$$\underline{M}_{kg} = \underline{Q} \cdot \underline{K} \quad (4.99)$$

unde:

$$\underline{M}_{K_G} = \begin{bmatrix} 3K_A(-1) & 3K_B(-1) & 3K_C(-1) \\ 2K_A(-1) + K_B(-1) & 2K_B(-1) + K_C(-1) & 2K_C(-1) + K_A(-1) \\ K_A(-1) + 2K_B(-1) & K_B(-1) + 2K_C(-1) & K_C(-1) + 2K_A(-1) \\ K_A(-1) + K_B(-1) + K_C(-1) & K_B(-1) + K_C(-1) + K_A(-1) & K_C(-1) + K_A(-1) + K_B(-1) \\ K_A(-1) + K_A(-2) & K_B(-1) + K_B(-2) & K_C(-1) + K_C(-2) \\ K_A(-1) + K_B(-2) & K_B(-1) + K_C(-2) & K_C(-1) + K_A(-2) \\ K_A(-1) + K_C(-2) & K_B(-1) + K_A(-2) & K_C(-1) + K_B(-2) \end{bmatrix} \quad (4.100)$$

Fiecare element al matricii constituie o soluție a relației (4.50).

Uzînd de una din proprietățile conexiunilor :

$$K_A(-1) \iff K_B(-1) \iff K_C(-1) \quad (4.101)$$

elemente din coloana a doua și a treia, derivă din elementele coloanei întâi.

Intrucît mecanismele sferice sînt de familia a 3-a la definiția matricii conexiunilor (4.97) nu s-au folosit și conexiunile $K_A(-3)$, $K_B(-3)$ și $K_C(-3)$, acestea fiind grupe cinematice, ce nu modifică gradul de libertate al conexiunii geometrice, respectiv gradul de mobilitate al mecanismului care le conține.

4.2.6. Sinteza structurală a mecanismului de orientare folosind și conexiuni avînd $L_k \geq 0$

Utilizarea conexiunilor se face în două etape. În prima etapă se introduc conexiunile care stabilesc legăturile dintre elementele motoare, conduse și fix. Printre conexiunile folosite în această etapă pot fi și unele cu $L_k \geq 0$. În cea de-a doua etapă se introduc conexiuni între elementele aparținînd conexiunilor din prima etapă sau între aceste elemente și cele motoare, conduse sau fix.

Si în acest caz conexiunile motoare și conexiunile geometrice vor satisface relațiile (4.46) + (4.50). Drept conexiuni avînd $L_k \geq 0$ se vor utiliza numai conexiuni tip B și C.

Conexiunile motoare utilizate vor fi conexiuni $K_{A(-2)}$.
 Conexiunile geometrice utilizate pot fi conexiuni de tip A, B sau C, respectînd condițiile relațiilor (4.49) și (4.50).

4.2.7. Determinarea structurii mecanismelor de orientare cu ajutorul conexiunilor.

Pornind de la relațiile fundamentale existente între numărul elementelor n ale unui mecanism, numărul cuplelor cinematice c_5 , gradul de mobilitate M și numărul conturilor deformabile N [D7], [P4], [P6]:

$$\begin{cases} n = 2N + M + 1 \\ c_5 = 3N + M \end{cases} \quad (4.102)$$

Numărul de elemente n ale unui mecanism se compune din :

$$n = n_m + n_c + n_f + n_k \quad (4.103)$$

n_m - numărul elementelor motoare, care conform relației (4.1) este egal cu numărul gradelor de mobilitate

n_c - numărul elementelor conduse.

n_f - numărul elementelor fixe : $n_f = 1$.

n_k - numărul de elemente ale conexiunilor :

$$n_k = n_{km} + n_{kg} \quad (4.104)$$

n_{km} - numărul de elemente ale conexiunilor motoare, ($n_{km} = 0$ pentru conexiunea $K_{A(-2)}$).

n_{kg} - numărul de elemente ale conexiunilor geometrice ce se determină cu una din relațiile (4.52), (4.66), (4.73), (4.77) sau cu relația generală (4.82).

Cu aceste precizări relația (4.104) devine :

$$n_k = n_{kg} \quad (4.104)$$

Numărul de cuple cinematice ale unui mecanism sferic, se compune din cuple cinematice ale conexiunilor motoare :

$$c_{km} = c_{5km} = M = n_m \quad (4.105)$$

și cuplele cinematice aferente conexiunilor geometrice :

$$c_{kg} = c_{5kg} \quad (4.106)$$

determinate cu relațiile (4.53), (4.68), (4.75), (4.79) sau cu relația generală (4.83), sau particularizînd pe $q=0$ din

relațiile (4.56), (4.67), (4.74), (4.78) sau cu relația generală (4.85), astfel încât :

$$c_5 = c_{km} + c_{kg} \quad (4.107)$$

Înlocuind relațiile (4.103) ÷ (4.107) în sistemul (4.102) se obține de fapt numărul de elemente și cuple cinematice ale conexiunilor geometrice :

$$\begin{cases} n_{kg} = 2N - n_c \\ c_{5kg} = 3N \end{cases} \quad (4.108)$$

Deci cunoscînd numărul de elemente conduse, care în cazul mecanismelor de orientare al roboților industriali este :
 $n_c = 1 \div 3$, relațiile (4.108) depînd direct de numărul de contururi independente deformabile.

Se impune observația că dacă numărul de elemente al conexiunilor geometrice n_{kg} și numărul de cuple cinematice aferente c_{5kg} nu satisfac relațiile (4.108), mecanismul respectiv are grade de libertate de prisos L_{id} și/sau legături pasive L_p .

Considerînd sistemul format din elementele motoare, conduse și fix, gradele de mobilitate anulate cu ajutorul conexiunilor M_k , relația (4.32) se compun din gradele de mobilitate anulate cu ajutorul conexiunilor motoare, M_{km} , de fapt gradele de mobilitate ale mecanismului motor :

$$M_{km} = - \sum L_{km} \quad (4.109)$$

și din gradele de mobilitate anulate cu ajutorul conexiunilor geometrice, M_{kg} :

$$M_{kg} = - \sum L_{kg} \quad (4.110)$$

unde gradele de libertate ale conexiunilor motoare $\sum L_{km}$ și ale conexiunilor geometrice $\sum L_{kg}$ sînt trecute în tabelul 4.4.

Asocierea relațiilor (4.109) și (4.110) cu relația (4.44), permite obținerea :

$$\sum L_k = - (M_{km} + M_{kg}) \quad (4.111)$$

impunîndu-se totodată egalitatea :

$$M_k = M_{km} + M_{kg} \quad (4.112)$$

Conform [K4], introducerea conexiunilor se poate face după trei metode :

a) Conexiunile se pot introduce direct între elementele motoare (M), conduse (C) și fix (F), în acest caz folosindu-se numai conexiuni avînd :

$$\sum L_k = -M_k < 0 \quad (4.113)$$

obținîndu-se astfel mecanismul desmodrom avînd gradul de mobilitate :

$$M = \sum_{k=1}^{n_m} p_k \quad (4.114)$$

care imprimă elementelor conduse mișcarea propusă.

b) Conexiunile cu $\sum L_k \leq 0$ se pot introduce atît între elementele motoare (M), conduse (C) și fix (F) cît și elementele altor conexiuni (K). În acest caz formarea mecanismelor se realizează în etape.

În prima etapă se introduc între elementele motoare, conduse și fix, conexiunile avînd suma gradelor de libertate :

$$-\sum L_{k_1} = +M_k \quad (4.115)$$

astfel încît :

$$M_k + \sum L_{k_1} \leq 3 n_c \quad (4.116)$$

și se obține un mecanism inițial avînd gradul de mobilitate :

$$M_1 = \sum_{k=1}^{n_m} p_k + M_k + \sum L_{k_1} \quad (4.117)$$

În a doua etapă se introduc între elementele mecanismului, inițial conexiuni avînd :

$$L_{k_2} = (-M_k + \sum L_{k_1}) \quad (4.118)$$

obținîndu-se un mecanism desmodrom cu :

$$M_k = \sum_{k=1}^{n_m} p_k \quad (4.119)$$

care imprimă elementului condus mișcarea propusă.

c) În cazul în care pe lângă conexiunile cu $L_k \leq 0$ între elementele motoare, conduse și fix se introduc și conexiuni avînd $L_k > 0$, formarea mecanismelor se face tot în etape.

În prima etapă, în sistemul format de elementele motoare, conduse și fix se introduc conexiuni avînd :

$$-\sum L_{k_1} < +M_k \quad (4.120)$$

Se formează mecanismul inițial avînd gradul de mobilitate:

$$M_1 = \sum_{k=1}^{n_m} P_k + M_k + \sum L_{k_1} \quad (4.121)$$

El devine desmodrom dacă elementelor conduse și unor elemente ale conexiunilor cu $L_k > 0$ li se comunică din exterior $M_k + \sum L_{k_1}$ parametrii poziționali independenți. Cei comunicați elementelor conduse trebuie să corespundă mișcării pe care aceste elemente urmează să le execute în cadrul mecanismului, iar cei comunicați conexiunilor cu $L_k > 0$ pot fi arbitrari. Cum mișcările relative ale elementelor mecanismului desmodrom sînt determinate, între aceste elemente se pot introduce conexiuni avînd :

$$L_{k_2} = - (M_k + \sum L_{k_1}) \quad (4.122)$$

Cele trei metode de formare a mecanismelor cu ajutorul conexiunilor [K4], utilizează conexiuni avînd $L_k \leq 0$ și $L_k > 0$ (tabelul 4.6)

Tabelul 4.6

Conexiuni utilizabile la sinteza structurală a mecanismelor de $f=3$

Grad de libertate al conexiunii	$L_k < 0$				$L_k = 0$	$L_k > 0$			
	$-L_k$	...	-2	-1	0	+1	+2	...	$+L_k$
A	-	-	$K_{A(-2)}$	$K_{A(-1)}$	-	-	-	-	-
B	$K_{B(-L_k)}$	...	$K_{B(-2)}$	$K_{B(-1)}$	$K_{B(0)}$	$K_{B(+1)}$	-	-	-
C	$K_{C(-L_k)}$	...	$K_{C(-2)}$	$K_{C(-1)}$	$K_{C(0)}$	$K_{C(+1)}$	$K_{C(+2)}$	...	$K_{C(+L_k)}$

Conform relațiilor (4.44) ÷ (4.50) suma gradelor de libertate ale tuturor conexiunilor utilizabile este :

$$\begin{aligned} \sum L_k &= \sum L_{km} + \sum L_{kg} = n_m L_{km} + n_c L_{kg} = \\ &= n_m L_{KA} + n_c (L_{KA} + L_{KB} + L_{KC}) \end{aligned} \quad (4.123)$$

4.2.8. Condiția de sinteză structurală a mecanismelor de orientare cu mișcări independente.

Mecanisme de orientare astfel formate pot avea unul sau mai multe contururi independente deformabile. Numărul lor se

determină cu relația generală :

$$N = 1 - n + \sum_{i=4}^5 c_i \quad (4.124)$$

Ca atare orice mecanism de orientare se poate segmenta în N submecanisme sau mecanisme parțiale.

Gradul de mobilitate al unui mecanism segmentat în mecanisme parțiale se determină cu relația [P15].

$$M = \sum_{j=1}^N M_j - \sum L_1 \quad (4.125)$$

unde M_j este gradul de mobilitate al submecanismului aferent conturului j.

$\sum L_1$ - suma gradelor de libertate ale legăturilor (cuple sau lanțuri cinematice) dintre submecanisme și care sînt comune conturilor **vecine**:

$$L_1 = 3(n-1) - c_4 - 2c_5 \quad (4.126)$$

Dacă suma gradelor de libertate ale legăturilor dintre submecanisme este nulă:

$$\sum L_1 = 0 \quad (4.127)$$

atunci mecanismul de orientare este cu mișcări independente. In caz contrar :

$$\sum L_1 \neq 0 \quad (4.128)$$

meccanismul de orientare este cu mișcări dependente.

Relației (4.127) i se asociază cîteva observații care deosebesc mecanismele de orientare cu mișcări independente de restul mecanismelor de orientare :

- numai unul din mecanismele parțiale are în componența sa elementul fix.

- în schema structurală aceste mecanisme au o singură latură (element) comun, denumit element condus intermediar (n_{ci}), care joacă rol de element fix pentru elementul motor al mecanismului parțial următor, ceea ce în final conduce la un mecanism etajat.

- structura optimă a unui mecanism de orientare cu mișcări independente, este un lanț cinematic deschis cu n_m elemente motoare, de fapt un mecanism etajat, cu un pseudo-element condus,

acesta fiind de fapt ultimul element motor. In acest caz relației (4.44) primește forma cea mai simplă :

$$\sum L_{k_m} = \sum L_{k_m} = n_m \cdot L_{k_m} \quad (4.129)$$

deoarece

$$\sum L_{k_g} = n_c \cdot L_{k_g} = 0 \quad (4.130)$$

4.2.9. Soluții structurale optime de mecanisme de orientare

Utilizarea metodei conexiunilor, cu precizările făcute în § 4.2.7 și § 4.2.8, permite optimizarea sintezei structurale ale mecanismelor de orientare.

Cunoscîndu-se numărul elementelor motoare (n_m), numărul elementelor conduse (n_c) și elementul fix ($n_f=1$) structura optimă a unui mecanism de orientare cu M grade de mobilitate se obține prin minimizarea numărului de grade de libertate ale conexiunilor geometrice ($\sum L_{k_g}$).

Conform acestui criteriu se obțin mecanisme de orientare avînd în structură un număr minim de elemente și cuple cinematice.

a) Mecanisme de orientare cu $n_c = 0$

Cel mai simplu mecanism de orientare cu $n_c = 0$, cu M grade de mobilitate este un mecanism etajat avînd :

$$n_m = M \quad (4.131)$$

elemente motoare și

$$c_5 = n-1 \quad (4.132)$$

cuple cinematice conducătoare, cu :

$$N = 0 \quad (4.133)$$

centururi independente deformabile, deoarece este un lanț cinematic deschis.

La aceste mecanisme (fig.4.3) se introduc între elementul fix (F), elementele motoare (M_i , $i = 1, 2, 3, \dots$) cuple cinematice conducătoare avînd, conform relațiilor (4.45) și (4.46) :

$$\sum L_{k_{cm}} = n_m \cdot L_{k_{cm}} = -2 n_m \quad (4.134)$$

grade de mobilitate ale conexiunilor motoare, $K_A(-2)$ și conform relațiilor (4.47) și (4.48).

$$\sum L_{k_{cg}} = n_c \cdot L_{k_{cg}} = 0 \quad (4.135)$$

grade de libertate ale conexiunilor geometrice, astfel încât relația generală (4.44) devine :

$$\sum L_k = - 2 n_m \quad \forall n_m = 1, 2, 3 \dots \quad (4.136)$$

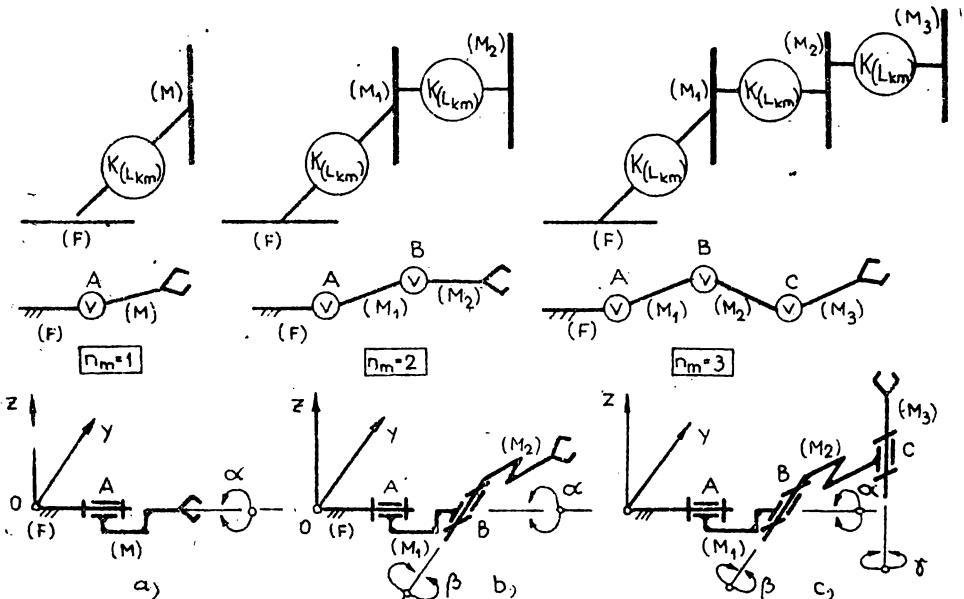


Fig. 4.3. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu $n_m=1+3$ și $n_c=0$

Intrucît suma gradelor de libertate ale legăturilor, satisface condiția (4.127) mecanismele de orientare din figura 4.3 sînt cu mișcări independente.

o) Mecanisme de orientare cu $n_c > 0$

Dacă suma gradelor de libertate ale conexiunilor geometrice introduse între elementele motoare (n_m), conduse (n_c) și fix ($n_f=1$), este diferită de zero :

$$\sum L_{kg} = n_c L_{kg} = n_c (L_{K_A} + L_{K_B} + L_{K_C}) \neq 0 \quad (4.137)$$

Se pot obține o infinitate de soluții structurale de mecanisme de orientare, toate însă avînd la bază un lanț cinematic închis, cu :

$$N = 1 - n + \sum_{i=4}^5 c_i \quad (4.124)$$

contururi independente deformabile și fiind compuse din N mecanisme parțiale. Între aceste mecanisme de orientare unele vor fi cu mișcări independente altele cu mișcări dependente, după cum se respectă una din condițiile (4.127) sau (4.128).

Soluțiile structurale optimale ale mecanismelor de orientare din această categorie, se obțin utilizând ca și conexiuni geometrice, elemente ale matricei conexiunilor geometrice \underline{M}_{kg} , relația (4.100), care să conțină n_{kg} elemente și c_{5kg} cuple cinematice de clasa a V-a, (cuplele cinematice de clasa a IV-a, conexiuni $K_{A(-1)}$, vor fi înlocuite cu conexiuni $K_{B(-1)}$ printr-o transformare instantanee izocinetică) stabilite cu relațiile (4.108).

O caracteristică comună a tuturor soluțiilor structurale o constituie valoarea gradului de libertate al conexiunilor geometrice, relațiile (4.48) și (4.50) și tabelul 4.4.

Gradele de libertate ale conexiunilor motoare se determină tot cu relația (4.134).

În figura 4.4. se exemplifică principiul sintezei structurale a mecanismelor de orientare cu $n_c > 0$ prin metoda conexiunilor.

În practica industrială mecanismele de orientare din componența roboților industriali au $n_m = 1 \div 3$ și $n_c = 1$, de elementul condus fiind solidarizat, dispozitivul de prehensiune.

bl. Mecanisme de orientare cu $M=1$, avînd un element motor ($n_m = 1$) și un element condus ($n_c = 1$), necesită introducerea între elementul motor, condus și fix ($n_f = 1$), a unor conexiuni avînd suma gradelor de libertate, conform relației (4.49):

$$\sum L_k = -2n_m - 3n_c = -5 \quad (4.138)$$

Conexiunea motoare introdusă între elementul motor (M) și cel fix (F) - figura 4.5 - :

$$\sum_{i=1}^{n_m} L_{kmi} = L_{kmi} = -2n_m = -2 \quad (4.139)$$

este o conexiune $K_{A(-2)}$.

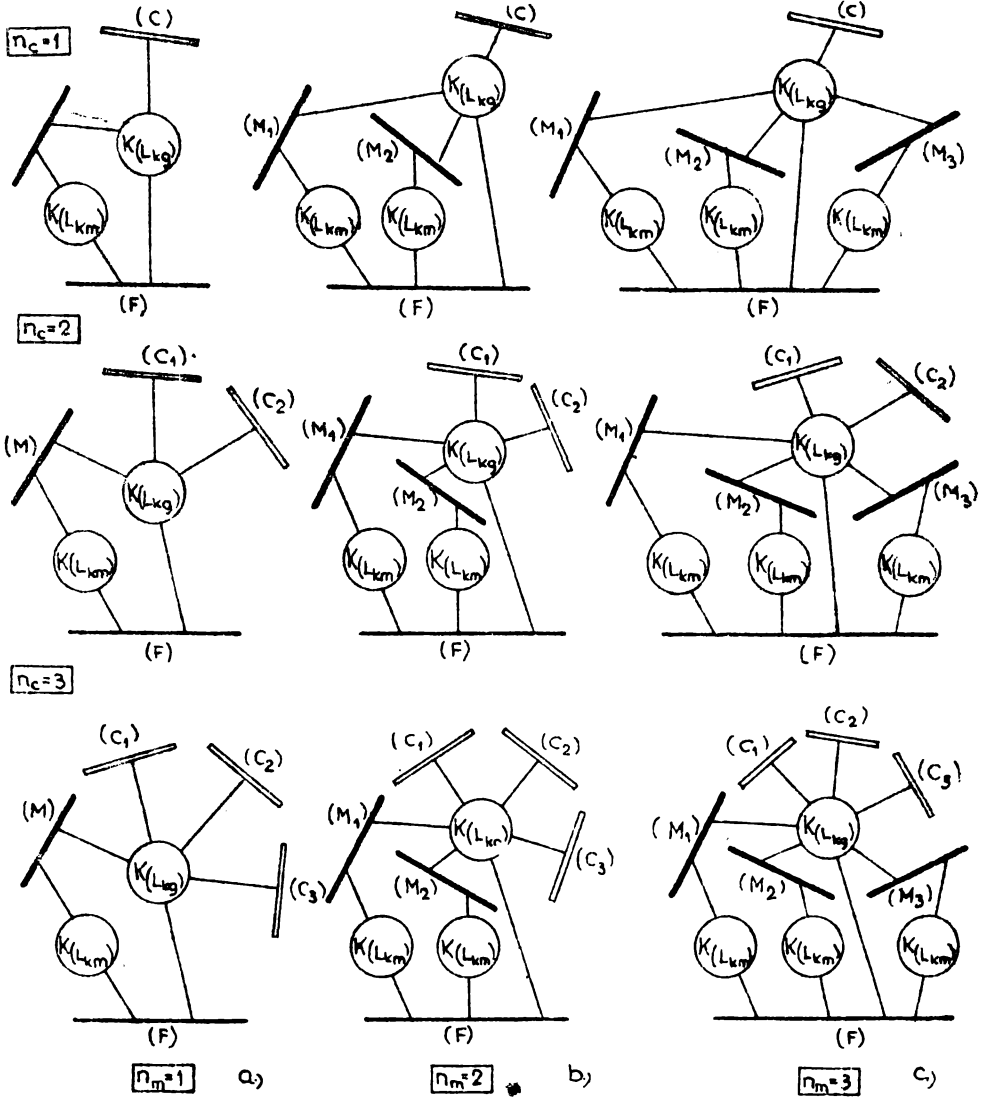


Fig. 4.4. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu $n_m=1+3$ și $n_c=1+3$
 Conexiunile geometrice introduse între elementul motor, condus (C), fix sau elemente ale altor conexiuni (K) și elementul fix vor avea gradul de libertate :

$$\sum_{i=1}^i L_{kgi} = L_{kg_1} + L_{kg_2} + \dots + L_{kg_i} = -3n_c = -3 \quad (4.14b)$$

fiind compuse din conexiuni de tip A, B sau C.

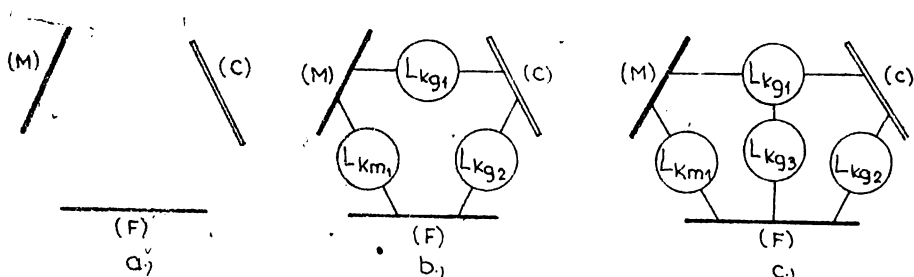


Fig. 4.5. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu $n_m=1$ și $n_c=1$

Schemele structurale din figura 4.6. s-au obținut aplicînd în sinteza structurală soluțiile matricei conexiunilor geometrice \underline{M}_{kR} , relația (4.100). Astfel elementul din coloana 1-linia 5, a generat fig.4.6.a, elementul din coloana 2 - linia 7, a generat fig.4.6.b și c, iar elementul din coloana 3 - linia 6, a generat fig.4.6. d ÷ g.

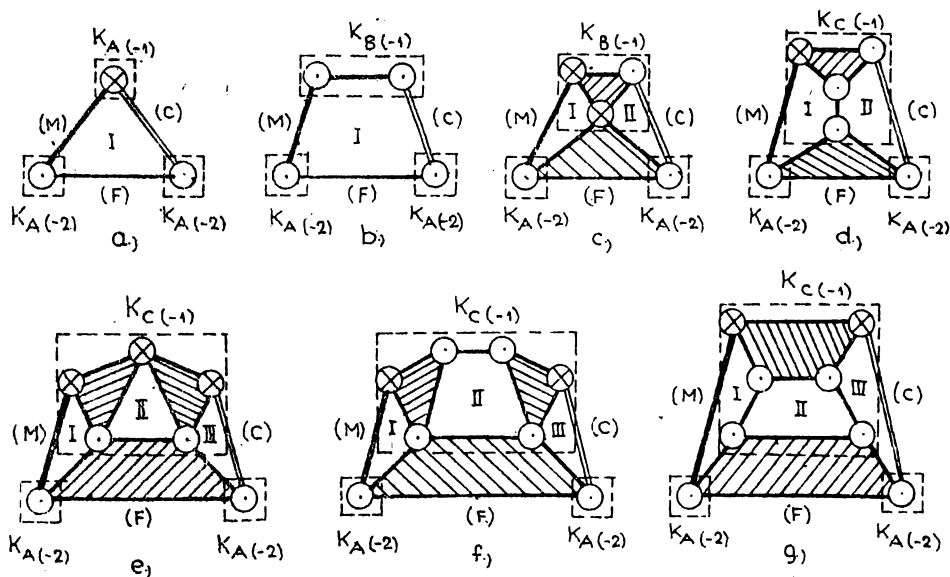


Fig. 4.6. Scheme structurale de mecanisme de orientare cu $n_m=1$ și $n_c=1$.

Faptul că o soluție a relației (4.50), concretizată într-un element al matricei conexiunilor geometrice, generează mai multe scheme structurale se datorează elementului (lor)

un componentă conexiunii, care poate fi de diferite ranguri. Astfel admitînd că în componentă conexiunilor de tip B și C sînt numai elemente binare, ternare sau quaternare (vezi tabelul 4.5), în figura 4.6 s-au reprezentat toate schemele structurale posibile de mecanisme de orientare cu $M = 1$.

Figurile 4.6.b și c au fost generate de conexiunea geometrică K_B , avînd acelaș grad de libertate $L_{KB} = -1$ (tabelul 4.6.nr. crt.3 și 8).

Figurile 4.6 d ÷ g. au fost generate de conexiunea geometrică K_C , avînd $L_{KC} = -1$ (tabelul 4.6.nr.crt.34,22,83,90).

Calculul gradului de mobilitate al mecanismelor avînd schemele structurale prezentate în figura 4.6, s-a efectuat prin metoda "segmentării" mecanismului în "mecanisme parțiale". (Tabelul 4.7).

Calculul gradului de mobilitate prin metoda segmentării în mecanisme parțiale Tabelul 4.7.
a mecanismelor de orientare cu $M=1$

Fig.4.6	Mecanism analizat		N-contururi independente deformabile												Grad mob.	Legături de mecanisme parțiale						Grad lib.	Grad mobil				
			I				II				III					I-II			II-III								
			n	C ₄	C ₅	M _I	n	C ₄	C ₅	M _{II}	n	C ₄	C ₅	M _{III}		ΣM_j	n	C ₄	C ₅	L _g	n			C ₄	C ₅	L _e	ΣL_e	M
a	3	3	1	2	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1		
b	4	4	-	4	4	-	4	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
c	4	5	2	3	3	2	1	2	3	1	2	1	-	-	-	3	2	1	-	2	-	-	-	-	2	1	
d	5	6	1	5	4	1	3	2	4	-	4	1	-	-	-	3	3	-	2	2	-	-	-	-	2	1	
e	5	7	3	4	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	3	2	-	1	1	2	-	1	1	2	1
f	6	8	2	6	3	1	1	1	4	-	4	1	3	1	1	1	3	2	-	1	1	2	-	1	1	2	1
g	6	8	2	6	4	1	3	2	4	-	4	1	4	1	3	2	5	3	-	2	2	3	-	2	2	4	1

Fiecare schemă structurală din figura 4.6. generează diferite scheme cinematice de mecanisme de orientare cu $M=1$.

Astfel schema structurală din figura 4.6.a. este comună mecanismelor de orientare al robotului industrial REMT-1 [C6], [K13]., REMT-2/IPT [C9],[K16], și a mecanismelor de orientare avînd la bază angrenajul conic [P9] sau angrenajul melcat [K1], [S3].

Schema structurală din figura 4.6.c este specifică mecanismului de orientare concepute pe baza unei transmisii planetare [R3 -fig.21].

La conceperea mecanismului de orientare al minirobotului cu acționare pneumatică [C10] [K31], utilizarea ca element motor a unui cilindru pneumatic și ca element condus a unei came

spațiale [R3 - fig.26 a și b], au impus două grade de libertate de prisos : $\sum L_{id} = 2$ (cuplele C și F din fig.4.7).

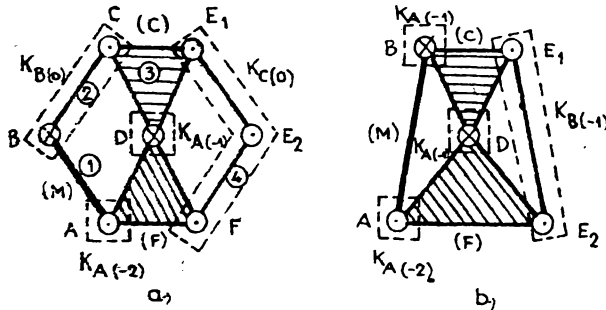


Fig. 4.7. Schema structurală a mecanismului de orientare a M.R.P.-125 [K31]

Intrădevar aplicând schemei structurale din figura 4.7.a, cu $n_{kg} = 5$ și $c_{5kg} = 8$, relațiile (4.103) :

$$\begin{cases} n_{kg} = 2N - n_c = 2 \cdot 2 - 1 = 3 \\ c_{5kg} = 3N = 3 \cdot 2 = 6 \end{cases} \quad (4.141)$$

se constată că numai după eliminarea gradelor de libertate de prisos (fig.4.7.b) sistemul (4.141) este satisfăcut.

Transformata instantanee izocinetică a figurii 4.7.a confirmă justetea relațiilor (4.106) și a concluziilor reieșite din analiza ei.

b.2. Mecanisme de orientare cu $M=2$, cu două elemente motoare ($n_m = 2$) și un element condus ($n_c = 1$). Ele necesită introducerea, între elementele motoare, condus și fix ($n_f = 1$) a unor conexiuni avînd suma gradelor de libertate conform relației (4.49):

$$\sum L_k = -2 \cdot n_m - 3 \cdot n_c = -7 \quad (4.142)$$

Conexiunile motoare introduse între elementele motoare (M_1) și (M_2) și cel fix (F) - figura 4.8 :

$$\sum_{i=1}^{n_m} L_{kmi} = L_{kml} + L_{km2} = -2n_m = -4 \quad (4.143)$$

adică două conexiuni $K_A(-2)$.

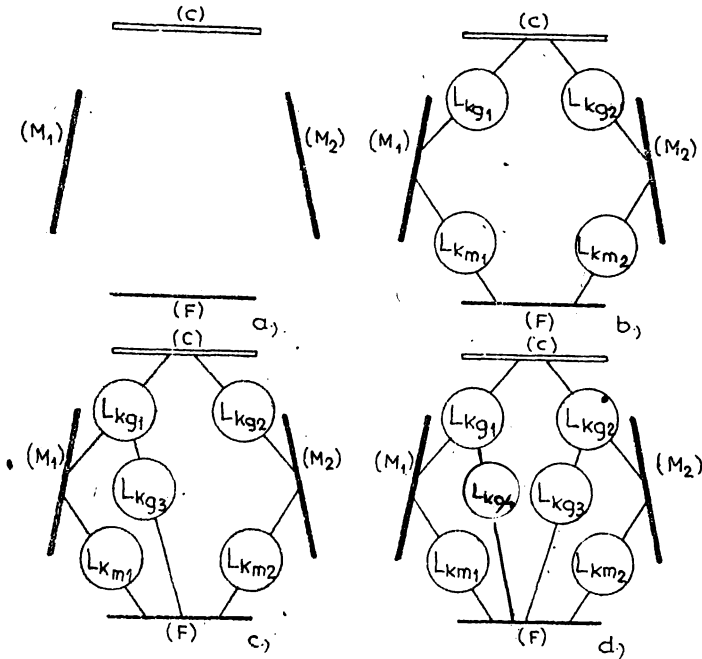


Fig. 4.8. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu $n_m=2$ și $n_c=1$

Conexiunile geometrice introduse între elementele motoare, condus (C) și fix sau elementele unor conexiuni (K) și cel fix, vor avea gradul de libertate, dat de relația (4.140), fiind compuse din conexiuni de tip A, B sau C.

Schemele structurale prezentate în fig.4.9 s-au obținut utilizând metodele de sinteză structurală prezentate în § 4.2.5 și § 4.2.6.

Astfel folosind numai conexiuni avînd $L_k < 0$, s-au obținut schemele structurale din figura 4.9.a ÷ h; j; m; n; p; t, restul obținîndu-se și prin utilizarea de conexiuni cu $L_k > 0$.

Ca și în cazul anterior tratat s-au utilizat conexiunile din tabelul 4.5.

Calculul gradului de mobilitate ale mecanismelor avînd schema structurală prezentată în figura 4.9, efectuată prin metoda "segmentării" în mecanisme parțiale este prezentată în tabelul 4.8.

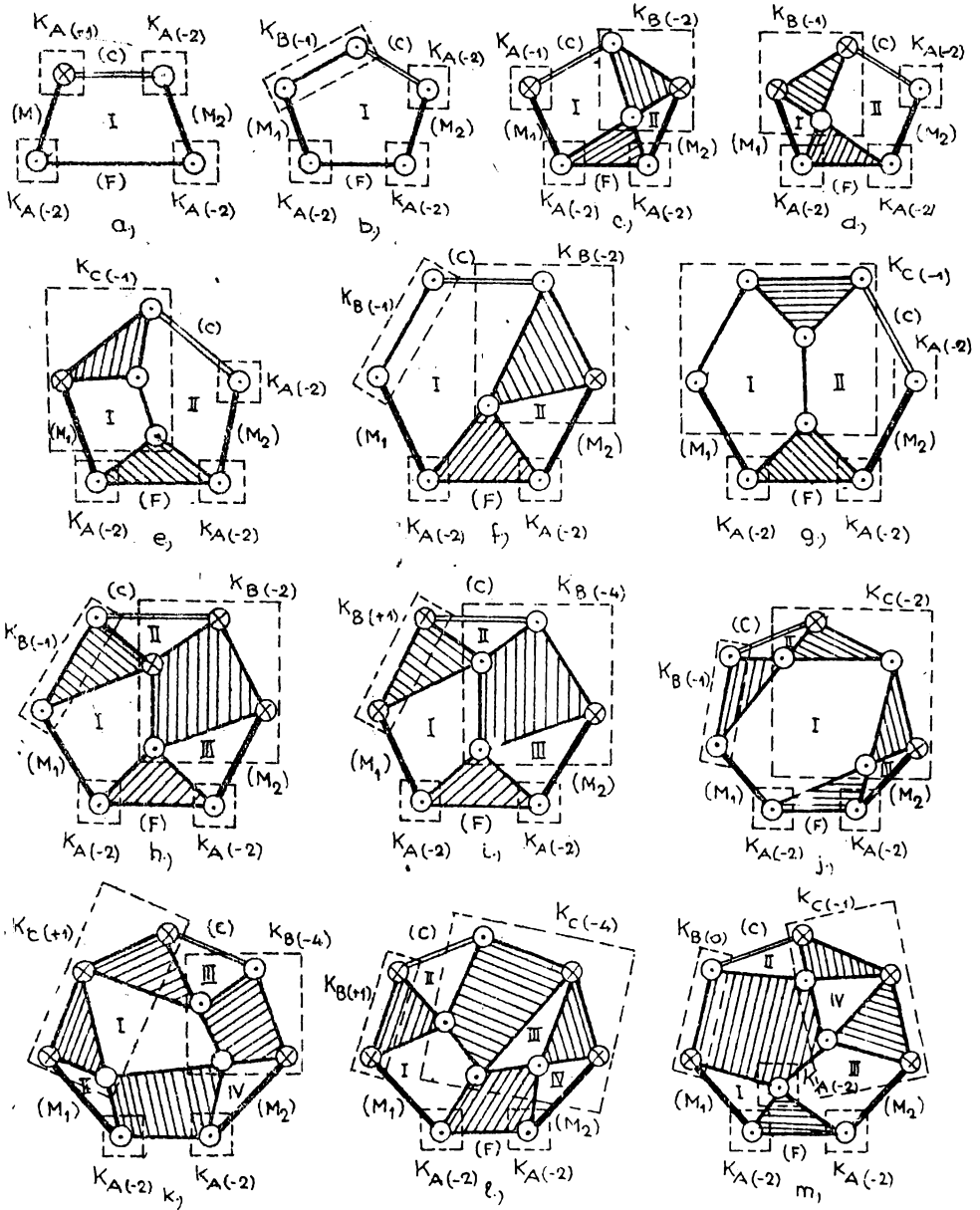


Fig. 4.9. Scheme structurale de meconisme de orientare cu $n_m=2$ și $n_c=1$

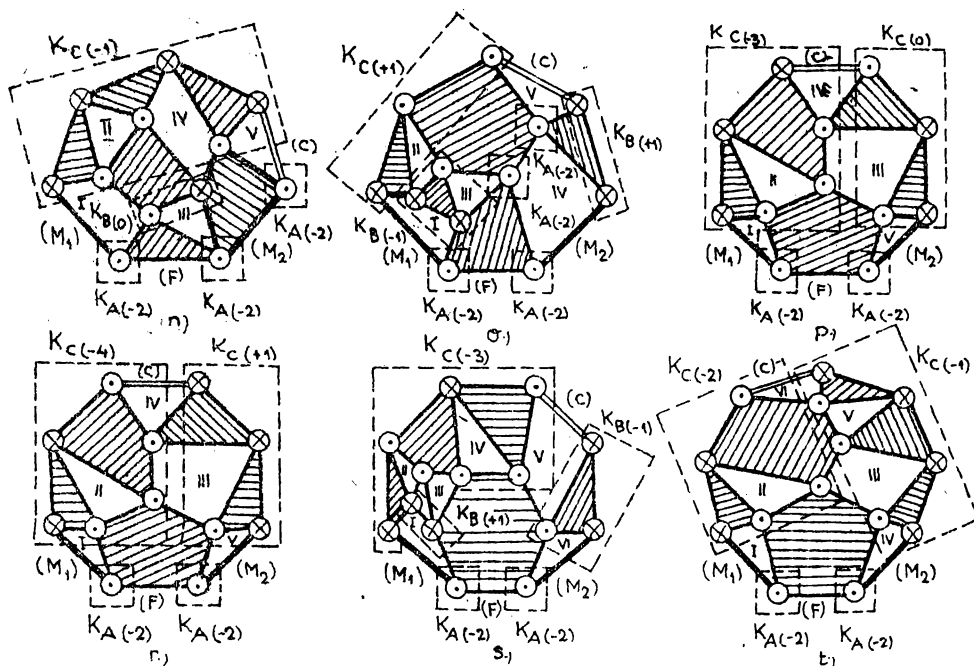


Fig. 4.9. Scheme structurale de mecanisme de orientare cu $n_m=2$ și $n_c=1$

Schemele structurale din figura 4.9. sînt ale unor mecanisme de orientare elaborate în cadrul activității de cercetare contractuală și unele dintre ele stau la baza analizei mecanismelor de orientare din literatura de specialitate.

Astfel mecanismul de orientare al robotului industrial MEFO-6 [Pl0] are schema structurală din fig.4.9.a.

La întocmirea schemei cinematice a mecanismului de orientare al minirobotului cu acționare electrică, [Cl0], [K29], [R3-fig.30] s-a obținut schema structurală din figura 4.9.c.

Mecanismul de orientare din [Pl1] are schema structurală din figura 4.9.d.

Robotul industrial REMT-25 [Cl2], [K37], [K40], [R3-fig.31], are un mecanism de orientare la carei schemă structurală este prezentată în figura 4.9.i.

Schema structurală din figura 4.9.l permite elaborarea unei soluții constructive compacte (R3 - fig.54).

Schemele structurale din fig.4.9.m,s și t își au corespondențul în schemele cinematice din [R3-fig.37,27 și 33].

Schema structurală din figura 4.9.n este comună la cinci mecanisme de orientare a căror schemă cinematică este prezentată în [P11].

Mecanismul de orientare al robotului Unimate 2000 [C1] are schema structurală din figura 4.9.o.

Robotul industrial R.I.V.-1 [K35], a cărei schemă cinematică este prezentat în [R3 - fig.55], are schema structurală din figura 4.9.p.

Conceperea și proiectarea unui robot hidraulic RH - 1kN. [C1o],[K29],[R3-fig.32] a necesitat echiparea cu un mecanism de orientare, a cărei schemă structurală este prezentată în figura 4.9.r.

Soluția constructivă prezentată în [A12] are schema structurală din figura 4.10.a. Analiza structurală ($\sum L_{kg} = -2 \neq -3$) evidențiază existența unui grad de libertate de prisos: $L_{id} = 1$, cupla G [R3-fig.47].

Calculul gradului de mobilitate prin metoda segmentării în mecanisme parțiale a mecanismelor de orientare cu $M=2$ Tabelul 4.8.

Fig. 4.9.	Mecanism analizat		N - contururi independente deformabile																								Grad mobil		
			I				II				III				IV				V				VI						
			n	C ₄	C ₅	M _I	n	C ₄	C ₅	M _{II}	n	C ₄	C ₅	M _{III}	n	C ₄	C ₅	M _{IV}	n	C ₄	C ₅	M _V	n	C ₄	C ₅	M _{VI}		$\sum M_v$	
a	4	4	1	3	4	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
b	5	5	-	5	5	-	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
c	5	6	2	4	4	1	3	2	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
d	5	6	2	4	3	1	2	1	4	1	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
e	6	7	1	6	4	1	3	2	5	-	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
f	6	7	1	6	5	-	5	2	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
g	7	8	-	8	5	-	5	2	5	-	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
h	6	8	3	5	4	1	3	2	3	2	1	2	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
i	6	8	3	5	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
j	7	9	2	7	5	-	5	2	3	1	2	1	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
k	7	10	4	6	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	5
l	7	10	4	6	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	5
m	7	10	4	6	3	1	2	1	3	1	2	1	4	1	3	2	3	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	5
n	8	12	5	7	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	4	2	2	3	3	1	2	1	-	-	-	-	8
o	8	12	5	7	4	3	1	4	3	1	2	1	3	1	2	1	4	1	3	2	3	1	2	1	-	-	-	-	9
p	8	12	5	7	3	1	2	1	3	1	2	1	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	-	-	-	-	6
r	8	12	5	7	3	1	2	1	3	1	2	1	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	-	-	-	-	6
s	9	14	6	8	4	3	1	4	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	4	1	3	2	3	1	2	1	10
t	9	14	6	8	3	1	2	1	3	1	2	1	4	1	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	7

continuare Tabelul 4.8.

Gr	Le g ă t u r i												m e c o n i s m e l e												p a r t i c i e l e			G r a d	
	I - II		I - III		I - IV		II - III		II - IV		III - IV		III - V		IV - V		V - VI		L ₂	Σ L _e	M	libert	mobil						
	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e	n	C ₄ C ₅ L _e											
a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
c	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1							
d	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1							
e	3	-2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2							
f	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2							
g	3	-2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2							
h	2	1	-2	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3							
i	2	-1	1	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2							
j	2	-1	1	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2							
k	2	-1	1	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2							
l	2	-1	1	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3							
m	-	-	-	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3							
n	2	-1	1	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3							
o	2	1	-2	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6							
p	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7							
r	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4							
s	2	1	-2	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8							
t	2	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5							

Solidarizarea elementului (5) cu elementul (3), conduce la schema structurală optimă (fig.4.9.c.). Transformata instanțanee izocinetică confirmă relațiile (4.108) ($n_{kg} = 4 \neq 3$; $c_{5kg} = 7 \neq 6$).

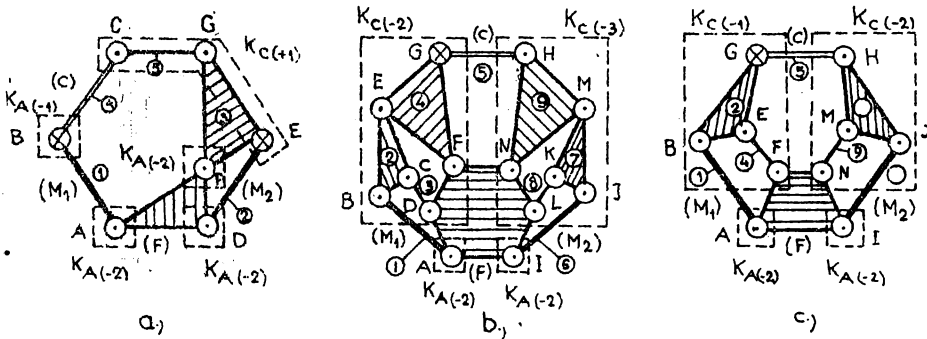


Fig. 4.10. Schema structurală a mecanismelor de orientare din [A 12] și [V9]

În cazul mecanismului de orientare ce echipează robotul IR_b-6-ASEA [V9], [V10] se evidențiază două legături pasive: $\Sigma L_p = -2$, elementul 3 cu cuplele C și D și elementul B cu cuplele K și L [R3-fig.56]. Prezența lor conduce la o fermă, $M=0$ (fig.4.10.b). Întrucât atât sistemul (4.108) nu este satisfăcut, cât și relația (4.50): $\Sigma L_{kg} = -5 \neq -3$, se impune reconsiderarea schemei structurale prin eliminarea legăturilor pasive, obținându-se astfel un mecanism desmodrom cu $M=2$, avînd de data aceasta $\Sigma L_{kg} = -3$ (fig.4.10.c).

Mecanismul de orientare din [K1], este un mecanism de orientare cu mișcări independente.

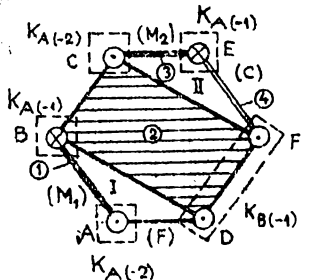


Fig. 4.11. Schema structurală a mecanismului de orientare din [K1]

Intrădevar din schema structurală (fig.4.11), rezultă două contururi independente deformabile:

$$N = \Sigma c_i - n + 1 = 6 - 5 + 1 = 2$$

și este compus din două mecanisme parțiale avînd gradul de mobilitate: $M_I = M_{II} = 1$ și gradul de libertate al legăturilor dintre ele fiind nul: $\Sigma L_l = 0$, conform relației

b.3. Mecanisme de orientare cu $M=3$, au trei elemente motoare ($n_m = 3$) și un element condus ($n_c = 1$). Ele necesită introducerea între elementele motoare, condus și fix ($n_f = 1$) a unor conexiuni avînd suma gradelor de libertate conform relației (4.49):

$$\sum L_k = -2n_m - 3n_c = -9 \quad (4.144)$$

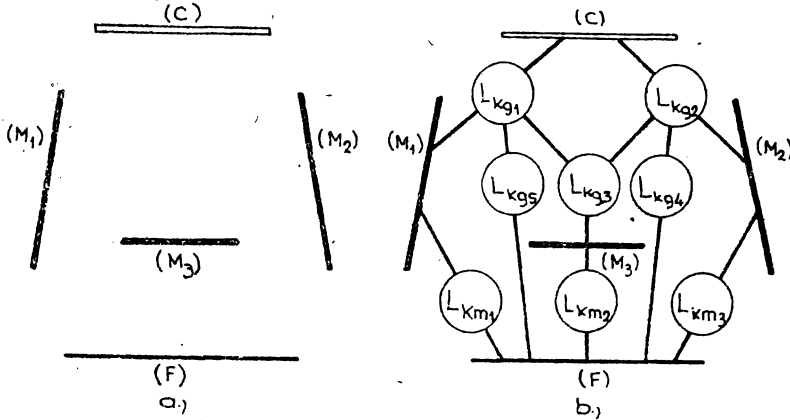


Fig. 4.12. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu $n_m=3$ și $n_c=1$.

Conexiunile motoare introduse între elementele motoare ($M_i, i=1,2,3$) și elementul fix (F) -figura 4.12:

Tabelul 4.9.

Calculul gradului de mobilitate prin metoda segmentării în mecanisme parțiale, a mecanismelor de orientare cu $M=3$

$$\sum_{i=1}^{n_m} L_{kmi} = L_{km1} + L_{km2} + L_{km3} = -2n_m = -6 \quad (4.145)$$

sînt trei conexiuni $K_A(-2)$.

Conexiunile geometrice introduse între elementele motoare, conduse (C) și fix sau elementele unor conexiuni (K) și cel fix vor avea gradul de libertate conform relației (4.140), fiind compuse din conexiuni de tip A, B sau C.

Schemele structurale pre-

Fig. Nr.	Mecanism analizat				Nr. cant. independ.	Grad de mobilit.	Grad de libertate	Grad de mobilit.
	C_4	C_3	N	$\sum M_j$				
a	6	7	2	5	2	4	1	3
b	7	9	2	7	3	6	3	3
c	9	13	5	8	5	12	9	3
d	11	17	7	10	7	18	15	3
e	8	11	4	7	4	7	4	3
f	8	11	4	7	4	8	5	3
g	9	13	5	8	5	10	7	3
h	10	15	6	9	6	11	8	3
i	10	15	6	9	6	12	9	3
j	16	27	12	15	12	19	16	3

obținut utilizând conexiunile din tabelul 4.5.

-Calculul gradului de mobilitate ale mecanismelor având schemele structurale prezentate în figura 4.13, s-a efectuat prin metoda "segmentării" în "mecanisme parțiale", rezultatele fiind trecute în tabelul 4.9.

Schema structurală din figura 4.13.a este a mecanismului de orientare din [E1].

Schemele structurale din figurile 4.13.c,d și e sînt ale mecanismelor de orientare din [K31], [P9].

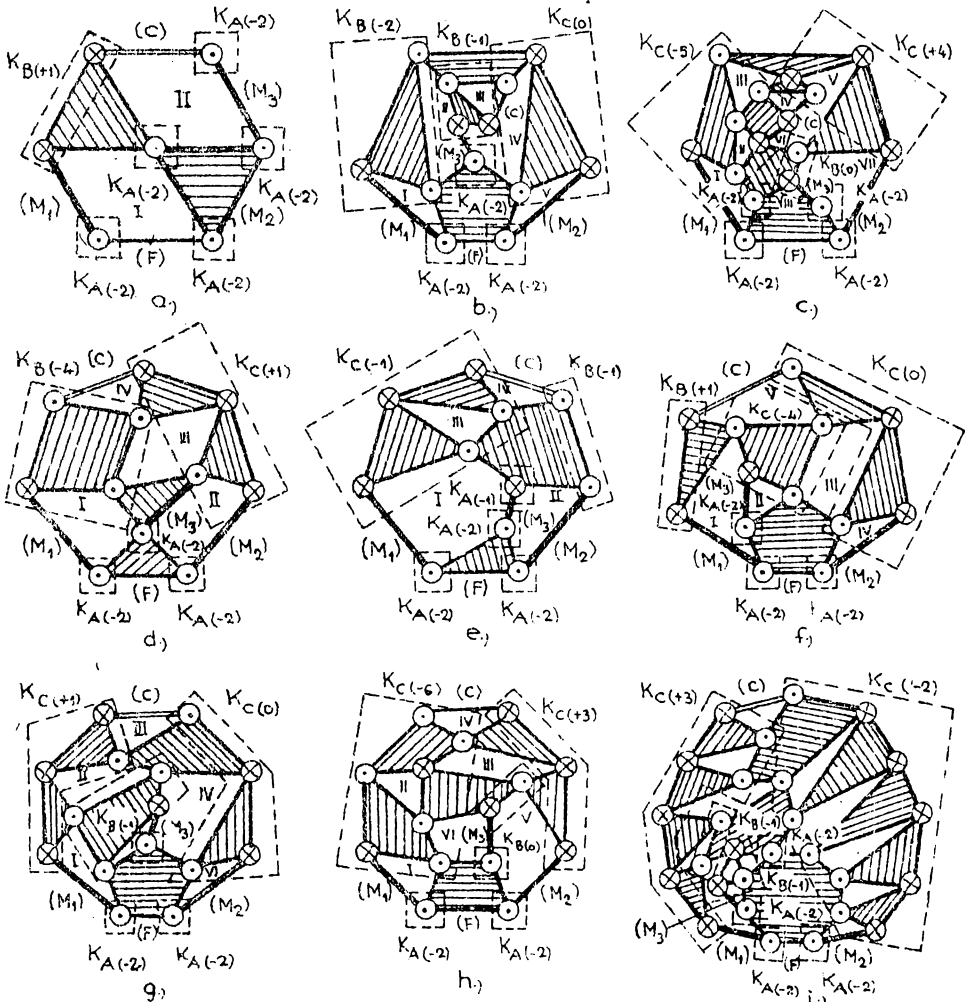


Fig. 4.13. Scheme structurale de mecanisme de orientare cu $n_m=3$ și $n_c=1$

În [V9] se prezintă un mecanism de orientare a cărui schemă structurală este figura 4.13.b.

Contractul de cercetare științifică [C7] a necesitat elaborarea documentației de execuție pentru mecanismele de orientare [R3 - fig.60] și a unui studiu de variante, rezultând schemele structurale din figura 4.13.g și 4.13.f.

În figura 4.13.h se prezintă schema structurală a mecanismului de orientare din [C2], iar în figura 4.13 i schema structurală a mecanismului de orientare din [R17].

Se impune menționarea că toate mecanismele de orientare prezentate în literatura de specialitate au confirmat principiile sintezei structurale prezentate în § 4.2.7 - § 4.2.9.

CAPITOLUL 5.

CONSIDERATIILE CU PRIVIRE LA ANALIZA SI SINTEZA
DIMENSIONALA A MECANISMELOR DE ORIENTARE.

Sinteza dimensională a mecanismelor de orientare urmărește determinarea unghiului de servici și/sau cursele unghiulare ale elementelor cuplelor cinematice [K14].

Mecanismul de orientare, ca și parte componentă a dispozitivului de ghidare al unui robot industrial are funcția de a modifica orientarea obiectului manipulat.

Orientarea obiectului manipulat se studiază prin intermediul dreptei caracteristice (δ) și a dreptei auxiliare (δ'),

figura 5.1, concurențe în punctul caracteristic M .

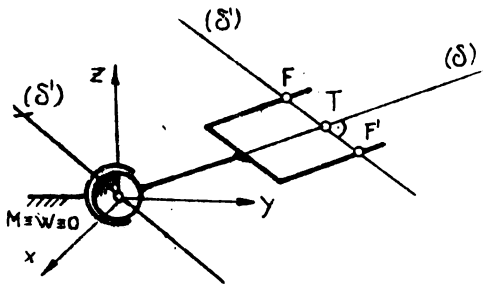


Fig. 5.1. Alegerea punctului caracteristic, a dreptei caracteristice și auxiliare

Ca dreaptă caracteristică (δ) se alege dreapta ce unește punctele W și T , iar ca dreaptă auxiliară (δ') dreapta perpendiculară pe dreapta caracteristică în T , ce trece și printr-un punct de contact

al obiectului manipulat cu bacurile dispozitivului de prehensiune, F (finger point). Punctul caracteristic M poate fi ales :

a) un punct aparținând obiectului manipulat : $M = T$ (tool point) [C4], [C5], caz în care forma spațiului de lucru depinde de forma obiectului manipulat.

b) un punct în afara obiectului manipulat, dar legat de aceasta, de regulă chiar punctul de intersecție al axelor cuplelor cinematice, în cazul mecanismului sferic de orientare : $M = W$ ("wirst point") [C5]. În acest caz forma spațiului de lucru nu mai este dependentă de forma obiectului manipulat.

Spațiul de lucru definit în [K14] ca spațiul descris de

mecanismul generator de traiectorie, se conține mulțimea pozițiilor pe care le poate ocupa punctul caracteristic. În această accepțiune studiul spațiului de lucru a făcut obiectul multor lucrări de specialitate [B6], [D18], [K3], [L1], [P1], [R1], [R5], [S1], [W1].

Mecanismul de orientare al roboților industriali poate fi cu unu ÷ trei grade de mobilitate, dependent de numărul cuplelor cinematice conducătoare.

Studiul numărului maxim de variante constructive de mecanisme de orientare a fost analizat în [D5], [R2], [R3].

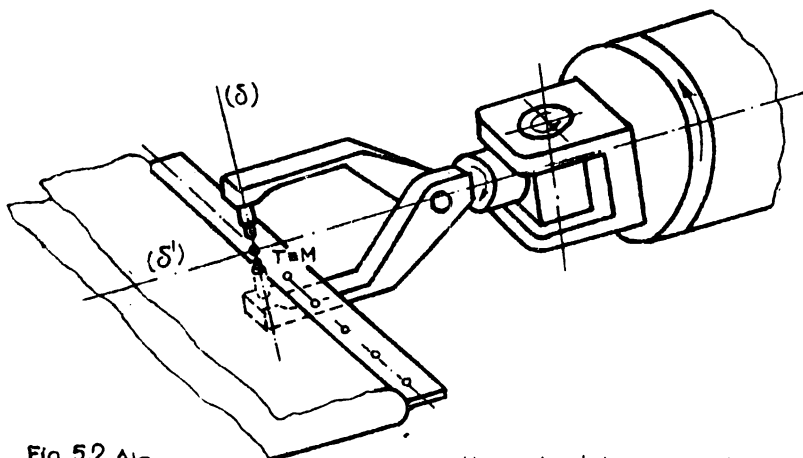


Fig. 5.2. Alegerea punctului caracteristic, a dreptei caracteristice și auxiliare la operația de sudare în puncte.

Concluziile desprinse din lucrările amintite evidențiază ca și caz general al mecanismului de orientare, mecanismul spațial cu patru elemente și trei cuple cinematice avînd axele ortogonale și încrucișate în spațiu, denumit mecanism cvasi-sferic [R2], [R3], mecanismul sferic constituindu-se în caz particular.

Alegerea punctului caracteristic este dependent și de procesul tehnologic servit [C4]. Astfel în cazul sudării în puncte (fig.5.2), punctul caracteristic se alege în punctul de intersecție dintre axa unui electrod și suprafața de contact a acestuia, iar dreapta caracteristică, axa electrodului.

În cazul sudării cu arc, punctul caracteristic se alege în punctul de intersecție al axei pistolului de sudare cu axa rostului de

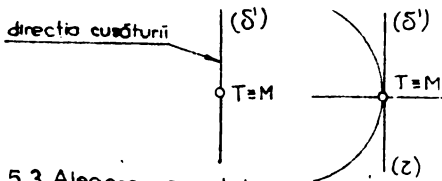
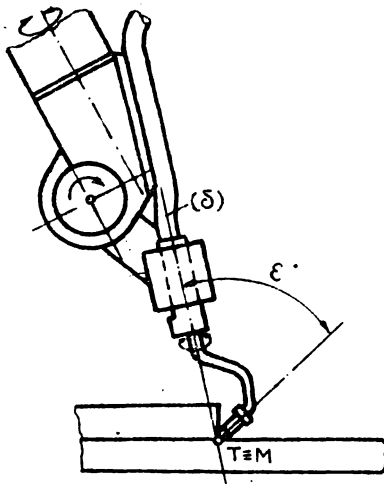


Fig. 5.3. Alegerea punctului caracteristic și a dreptei caracteristice și auxiliare la operația de sudare cu arc

sudare, iar dreapta caracteristică (δ), axa pistolului de sudare. Dreapta auxiliară (δ') se alege pe direcție (sau tangentă) la direcția cusăturii (fig. 5.3)

În cazul operației de vopsire, curățire sau metalizare, punctul caracteristic se alege în punctul de intersecție al axei pistolului de vopsit cu suprafața frontală a duzei, iar ca dreaptă caracteristică (δ) însăși axa pistolului, care va fi normală la suprafața de vopsit. (Figura 5.4)

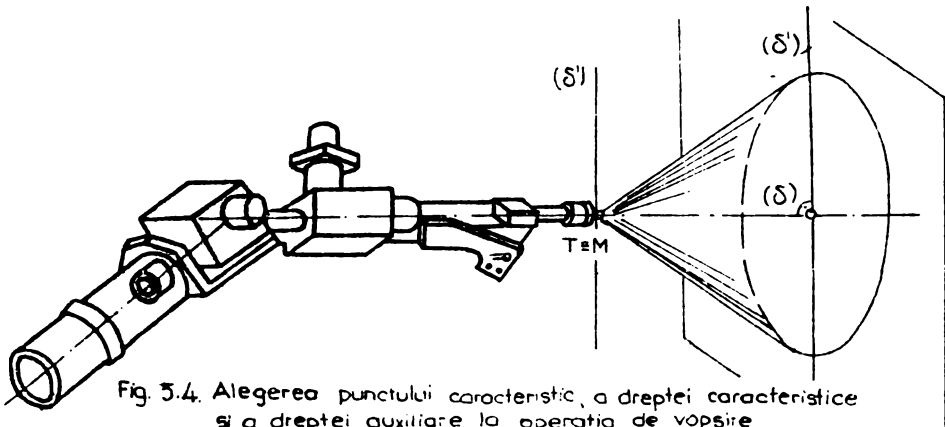


Fig. 5.4. Alegerea punctului caracteristic, a dreptei caracteristice și a dreptei auxiliare la operația de vopsire

5.1. Analiza pozițională a mecanismului de orientare.

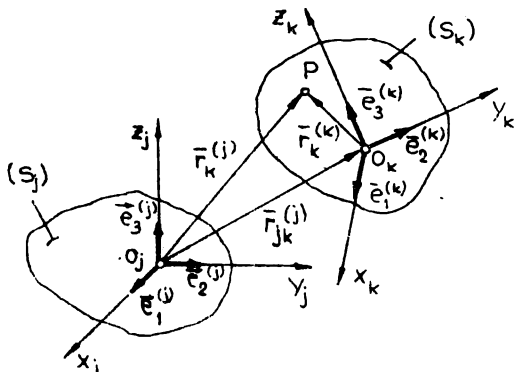


Fig.5.5. Mișcarea absolută a rigidului

Parametrii de poziție ai rigidului (S_k) sînt aceiași cu parametrii care fixează poziția reperului mobil $O_k X_k Y_k Z_k$ notat cu R_k , în raport cu reperul cartezian $O_j x_j y_j z_j$, notat cu R_j .

Pentru studiul mișcării absolute a rigidului (S_k) se consideră un punct $P \in (S_k)$ a cărei poziție în raport cu originile O_j , respectiv O_k , este

dată de vectori $\vec{r}_k^{(j)} = \{x_j \ y_j \ z_j\}^T$, respectiv $\vec{r}_k^{(k)} = \{x_k \ y_k \ z_k\}^T$ localizați în reperele R_j respectiv R_k (fig.5.5); vectorul

$\vec{r}_{jk}^{(j)} = \{x_{jk} \ y_{jk} \ z_{jk}\}^T$ fiind vectorul de poziție al originii mobile O_k în raport cu originea fixă O_j , înregistrat în reperul R_j :

$$\vec{r}_k^{(j)} = \vec{r}_{jk}^{(j)} + \underline{B}_{jk} \vec{r}_k^{(k)} \quad (5.1)$$

unde \underline{B}_{jk} este matricea pătrată atașată bazei ortonormate a reperului mobil R_k :

$$\underline{B}_{jk} = \begin{bmatrix} \vec{e}_1^{(k)} & \vec{e}_2^{(k)} & \vec{e}_3^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

elementele matricei \underline{B}_{jk} reprezentînd cosinusurile directe ale suportului versorilor $\vec{e}_i^{(k)}$ ($i = 1, 2, 3$). Notînd cu $\alpha_i, \beta_i, \delta_i$ unghiurile pe care le face axa Ox_k, Oy_k și Oz_k cu axele reperului $O_j x_j y_j z_j$, expresiile versorilor bazei ($\vec{e}_1^{(k)}, \vec{e}_2^{(k)}, \vec{e}_3^{(k)}$), în baza ($\vec{e}_1^{(j)}, \vec{e}_2^{(j)}, \vec{e}_3^{(j)}$) sînt:

$$\vec{e}_i^{(k)} = \begin{Bmatrix} \cos \alpha_i \\ \cos \beta_i \\ \cos \delta_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_{1i} \\ B_{2i} \\ B_{3i} \end{Bmatrix} \quad (i=1, 2, 3) \quad (5.3)$$

Dacă atașăm vectorilor $\bar{r}_k^{(j)}$ și $\bar{r}_k^{(k)}$ cvadrivectori :

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_k^{(j)} &= \{x_j \ y_j \ z_j \ 1\} = \left\{ \bar{r}_k^{(j)T} \mid 1 \right\} \\ \bar{\varphi}_k^{(k)} &= \{x_k \ y_k \ z_k \ 1\} = \left\{ \bar{r}_k^{(k)T} \mid 1 \right\} \end{aligned} \quad (5.4)$$

și considerăm matricea \underline{D} , definită în [48], prin :

$$\underline{D}_{jk} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & x_{jk} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & y_{jk} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & z_{jk} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{B}_{jk} & -\bar{r}_k^{(j)} \\ \bar{O}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

relației (5.1) îi va corespunde relația :

$$\bar{\varphi}_k^{(j)} = \underline{D}_{jk} \bar{\varphi}_k^{(k)} \quad (5.6)$$

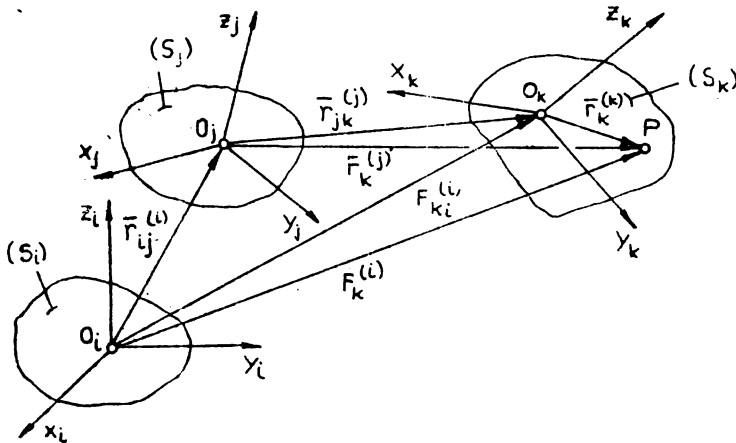


Fig. 5.6. Mișcarea compusă a solidului rigid

În studiul mișcării compuse a solidului rigid s-au considerat : sistemul de referință fix $O_i x_i y_i z_i$, notat cu R_i , sistemul de referință mobil, independent de solidul (S_k) , legat de un alt solid (S_j) , $O_j x_j y_j z_j$, notat cu R_j și sistemul de referință mobil legat invariabil de solidul (S_k) , $O_k x_k y_k z_k$, notat cu R_k .

Se obține astfel mișcarea relativă a solidului (S_k) în raport cu reperul R_j , mișcarea absolută în raport cu reperul R_i și mișcarea de transport, împreună cu reperul R_j , în raport cu reperul R_i . (fig. 5.6). Pentru studiul mișcării compuse a solidului rigid se studiază poziția punctului $P \in (S_k)$, a cărui vector

de poziție în raport cu R_j este exprimat cu relația (5.1), iar vectorul de poziție în raport cu reperul R_i , cu o relație similară:

$$\bar{r}_k^{(i)} = \bar{r}_{ij}^{(i)} + \underline{B}_{ij} \bar{r}_k^{(j)} \quad (5.7)$$

Înlocuind relația (5.1) în relația (5.7) se obține :

$$\begin{aligned} \bar{r}_k^{(i)} &= \bar{r}_{ij}^{(i)} + \underline{B}_{ij} (\bar{r}_{jk}^{(j)} + \underline{B}_{jk} \bar{r}_k^{(k)}) = \\ &= \bar{r}_{ij}^{(i)} + \underline{B}_{ij} \bar{r}_{jk}^{(j)} + \underline{B}_{ij} \underline{B}_{jk} \bar{r}_k^{(k)}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Din figura 5.6 rezultă și următoarele relații :

$$\bar{r}_k^{(i)} = \bar{r}_{ik}^{(i)} + \underline{B}_{ik} \bar{r}_k^{(k)} \quad (5.9)$$

$$\bar{r}_{ik}^{(i)} = \bar{r}_{ij}^{(i)} + \underline{B}_{ij} \bar{r}_{jk}^{(j)} \quad (5.10)$$

din compunerea cărora rezultă :

$$\bar{r}_{ik}^{(i)} = \bar{r}_{ij}^{(i)} + \underline{B}_{ij} \bar{r}_{jk}^{(j)} + \underline{B}_{ik} \bar{r}_k^{(k)} \quad (5.11)$$

Compararea relațiilor (5.8) și (5.11) evidențiază egalitatea :

$$\underline{B}_{ik} = \underline{B}_{ij} \cdot \underline{B}_{jk} \quad (5.12)$$

Utilizând cvașivectorul $\bar{\varphi} = \{ \bar{r}^T \mid 1 \}$ relația vectorială dintre originile reperelor atașate celor trei solide :

$$\bar{r}_{ik}^{(i)} = \bar{r}_{ij}^{(i)} + \underline{B}_{ij} \bar{r}_{jk}^{(j)} \quad (5.13)$$

primește forma :

$$\bar{\varphi}_{ik}^{(i)} = \underline{D}_{ij} \bar{\varphi}_{jk}^{(j)} \quad (5.14)$$

unde :

$$\underline{D}_{ij} = \begin{bmatrix} \underline{B}_{ij} & \bar{r}_{ij}^{(i)} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Parametri de poziție ai reperului R_j în raport cu elementul fix (S_0) se determină cu relația :

$$\bar{\varphi}_{ok}^{(0)} = \underline{D}_{oi} \bar{\varphi}_{ik}^{(i)} = \underline{D}_{oi} \cdot \underline{D}_{ij} \bar{\varphi}_{jk}^{(j)} \quad (5.16)$$

de unde rezultă relația iterativă :

$$\underline{D}_{0j} = \underline{D}_{0i} \cdot \underline{D}_{ij} \quad (5.17)$$

Matricea \underline{D}_{ij} din relația (5.15) conține parametri care definesc poziția și orientarea reperului R_j în raport cu reperul R_i , prin vectorul de poziție $\bar{r}_{ij}^{(i)}$, al originii O_j , corespunzător translației și matricea de rotație \underline{B}_{ij} .

Intrucât mișcarea de translație se caracterizează prin păstrarea axelor triedrului mobil, în tot decursul mișcării, paralele cu axele triedrului fix :

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \underline{E}_3 \quad (5.18)$$

relația (5.1) ia forma particulară :

$$\bar{r}_k^{(j)} = \bar{r}_{jk}^{(j)} + \bar{r}_k^{(k)} \quad (5.19)$$

iar matricea \underline{D} corespunzătoare mișcării de translație :

$$\underline{D}_t = \left[\begin{array}{c|c} \underline{E}_3 & \bar{r}_{jk}^{(j)} \\ \hline \underline{0}^T & 1 \end{array} \right] \quad (5.20)$$

În mișcarea de rotație, când originile O_j și O_k ale celor două repere R_j și R_k , coincid, adică :

$$\bar{r}_{jk}^{(j)} = \underline{0} \implies \bar{r}_k^{(j)} = \underline{B}_{jk} \bar{r}_k^{(k)} \quad (5.21)$$

se schimbă numai cosinusurile directoare, deci matricea \underline{D} ia forma :

$$\underline{D}_r = \left[\begin{array}{c|c} \underline{B}_{jk} & \underline{0} \\ \hline \underline{0}^T & 1 \end{array} \right] \quad (5.22)$$

Cu relația (5.20) și (5.22) se poate exprima matricea \underline{D} ca un produs al matricei de translație și de rotație :

$$\underline{D}_{jk} = \underline{D}_t \cdot \underline{D}_r = \left[\begin{array}{c|c} \underline{E}_3 & \bar{r}_{jk}^{(j)} \\ \hline \underline{0}^T & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c|c} \underline{B}_{jk} & \underline{0} \\ \hline \underline{0}^T & 1 \end{array} \right] \quad (5.23)$$

5.1.1. Aplicarea teoremei lui Euler la analiza pozițională a mecanismelor de orientare.

a) Rotația în jurul unei axe (Δ) cu un unghi α .

Conform teoremei lui Euler, pentru un solid rigid avînd un punct fix O , se poate găsi o axă, care trece prin acest punct, astfel încît trecerea de la o poziție inițială oarecare într-o poziție finală oarecare, să se facă printr-o rotație în jurul acestei axe (Δ - fig.5.7). Printr-o rotație finită în jurul

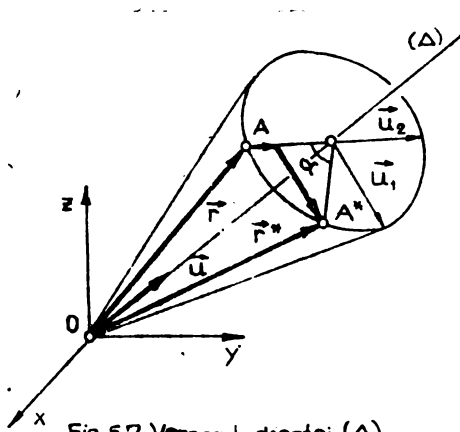


Fig.5.7. Versorul dreptei (Δ)

punctului O , vectorul $\overline{OA} = \vec{r}$ se transformă în \vec{r}^* , ambii vectori fiind situați pe un con circular drept cu vârful în O .

Considerînd vectorul \vec{u}_1 :

$$\vec{u}_1 = \langle \vec{u}, \vec{r} \rangle = \tilde{u} \vec{r} \quad (5.24)$$

și vectorul \vec{u}_2 :

$$\vec{u}_2 = \langle \vec{u}, \vec{u}_1 \rangle = \tilde{u} \cdot \vec{u}_1 = \tilde{u} \tilde{u} \vec{r} \quad (5.25)$$

unde versorul $\vec{u} = \{u_x, u_y, u_z\}^T$ i se asociază operatorul matriceal :

$$\tilde{u} = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

unde :

$$u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1$$

rezultă:

$$\begin{aligned} \vec{r}^* &= \vec{r} + (1 - \cos \alpha) \vec{u}_2 + \sin \alpha \vec{u}_1 = \\ &= \vec{r} + (1 - \cos \alpha) \tilde{u} \tilde{u} \vec{r} + \sin \alpha \tilde{u} \vec{r} = \\ &= [\underline{E}_3 + (1 - \cos \alpha) \tilde{u} \tilde{u} + \sin \alpha \tilde{u}] \vec{r} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Transformarea vectorului \vec{r} în \vec{r}^* exprimată cu ajutorul matricei de rotație \underline{B} :

$$\vec{r}^* = \underline{B} \vec{r} \quad (5.29)$$

conduce prin relație (5.28), la egalitatea :

$$\underline{B} = \underline{E}_3 + (1 - \cos \alpha) \tilde{u} \tilde{u} + \sin \alpha \tilde{u} \quad (5.30)$$

sau :

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} u_x^2 (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & u_y u_x (1 - \cos \alpha) - u_z \sin \alpha \\ u_x u_y (1 - \cos \alpha) + u_z \sin \alpha & u_y^2 (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha \\ u_x u_z (1 - \cos \alpha) - u_y \sin \alpha & u_y u_z (1 - \cos \alpha) + u_x \sin \alpha \\ u_z u_x (1 - \cos \alpha) + u_y \sin \alpha \\ u_z u_y (1 - \cos \alpha) - u_x \sin \alpha \\ u_z^2 (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Prin particularizarea relației (5.31) se obțin matricile de transformare corespunzătoare unei rotații în jurul uneia din axele sistemului de referință Oxyz.

Astfel matricea de rotație în jurul axei Ox se obține pentru $u_x=1$; $u_y=u_z=0$:

$$\underline{B}^{(x)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

cea în jurul axei O_y , pentru $u_y=1$; $u_x=u_z=0$:

$$\underline{B}^{(y)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

și în jurul axei O_z , pentru $u_z=1$; $u_x=u_y=0$:

$$\underline{B}^{(z)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

Pentru calculul valorii unghiului de rotație α și a componentelor versorului $\bar{u} = \{u_x \ u_y \ u_z\}^T$ se admite matricea de rotație [Rlo] :

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} n_x & \sigma_x & a_x \\ n_y & \sigma_y & a_y \\ n_z & \sigma_z & a_z \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

unde $\bar{a} = \{a_x \ a_y \ a_z\}^T$ este versorul vectorului de apropiere,

$\bar{\sigma} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z\}^T$ este versorul vectorului de orientare,

$\bar{n} = \{n_x \ n_y \ n_z\}^T$ definește o bază ortonormată (fig.5.8)

$$\bar{n} = \bar{\sigma} \times \bar{a} \quad (5.36)$$

întrucît versorii $\vec{\sigma}$ și \vec{a} sînt legați de aceeași origine și perpendicularari între ei rezultă că :

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{\sigma} = 1 \quad \vec{a} \cdot \vec{a} = 1 \quad \vec{\sigma} \cdot \vec{a} = 0 \quad (5.37)$$

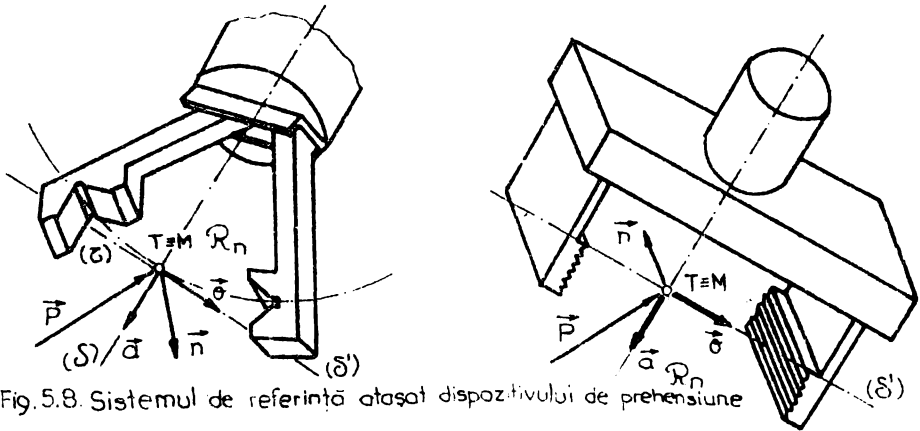


Fig.5.8. Sistemul de referință atașat dispozitivului de prehensiune

Din egalarea relațiilor (5.31) și (5.35) :

$$\underline{R} = \underline{B} \quad (5.38)$$

urmele celor două matrici conduc la egalitatea :

$$n_x + \sigma_y + a_z = 1 + 2 \cos \alpha \quad (5.39)$$

de unde :

$$\cos \alpha = \frac{1}{2} (n_x + \sigma_y + a_z - 1) \quad (5.40)$$

Operînd în relația (5.38) scăderea termenilor simetrici față de diagonala principală, se obține :

$$\begin{aligned} \sigma_z - a_y &= 2u_x \sin \alpha \\ a_x - n_z &= 2u_y \sin \alpha \\ n_y - \sigma_x &= 2u_z \sin \alpha \end{aligned} \quad (5.41)$$

respectiv

$$(\sigma_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - \sigma_x)^2 = 4 \sin^2 \alpha \quad (5.42)$$

de unde :

$$\sin \alpha = \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - \sigma_x)^2} \quad (5.43)$$

Soluția pozitivă corespunde unui unghi de rotație $\alpha \in [0, \pi/2]$, valoarea sa fiind unic definită de :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{(\sigma_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - \sigma_x)^2}}{n_x + \sigma_y + a_z - 1} \quad (5.44)$$

valoarea unghiului α fiind :

$$\alpha = \begin{cases} \alpha, & \text{pentru } \cos \alpha > 0 \\ \pi + \alpha, & \text{pentru } \cos \alpha < 0 \\ \pi/2, & \text{pentru } \cos \alpha = 0 \\ 0, & \text{pentru } \cos \alpha = 1 \end{cases} \quad (5.45)$$

Soluția negativă, $\sin \alpha < 0$, corespunzătoare unghiului $\alpha \in [180^\circ; 360^\circ]$, conduce la următoarele valori ale unghiului α :

$$\alpha = \begin{cases} 2\pi + \alpha, & \text{pentru } \cos \alpha > 0 \\ \pi + \alpha, & \text{pentru } \cos \alpha < 0 \\ -\pi/2, & \text{pentru } \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (5.46)$$

Egalînd termenii de pe diagonala principală se obține :

$$\begin{aligned} u_x &= \pm \sqrt{\frac{n_x - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}} \\ u_y &= \pm \sqrt{\frac{\sigma_y - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}} \\ u_z &= \pm \sqrt{\frac{a_z - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}} \end{aligned} \quad (5.47)$$

Semnul componentelor u_x, u_y și u_z , fiind dat de membrul stîng al relațiilor (5.41) și al funcției sinus.

Pentru o precizie mai bună în [R10], [D2] se recomandă determinarea componentei, versorului \bar{u} , celei mai mari în valoare absolută, celelalte două determinîndu-se în funcție de acesta.

Adunînd termenii simetrici față de diagonale principale:

$$\begin{aligned} n_y + \sigma_x &= 2 u_x u_y (1 - \cos \alpha) \\ \sigma_z + a_y &= 2 u_y u_z (1 - \cos \alpha) \\ n_z + a_x &= 2 u_z u_x (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (5.48)$$

dacă u_x este în valoare absolută mai mare :

$$u_y = \frac{n_y + \sigma_x}{2u_x(1 - \cos \alpha)} \quad u_z = \frac{n_z + a_x}{2u_x(1 - \cos \alpha)} \quad (5.49)$$

dacă u_y este în valoare absolută mai mare :

$$u_y = \frac{n_y + \sigma_x}{2u_y(1-\cos\alpha)} \quad u_z = \frac{\sigma_z + a_y}{2u_y(1-\cos\alpha)} \quad (5.50)$$

dacă u_z este în valoare absolută mai mare

$$u_x = \frac{n_z + a_x}{2u_z(1-\cos\alpha)} \quad u_y = \frac{\sigma_z + a_y}{2u_z(1-\cos\alpha)} \quad (5.51)$$

Utilizînd soluțiile aferente unghiurilor lui Euler, matricile de rotație finită în jurul axelor O_{z_1} , O_{x_1} și $O_{z_1''}$ (fig.5.9), se obțin prin particularizarea relațiilor generale (5.32)-(5.34) și anume :

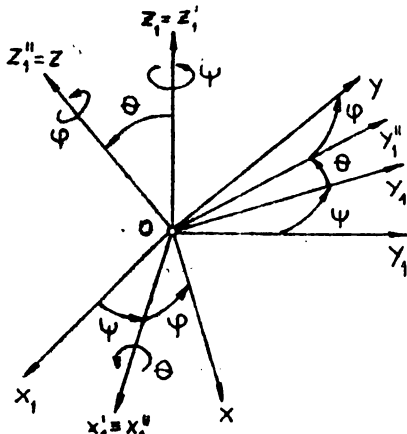


Fig.5.9. Unghiurile lui EULER

$$\underline{B}(z) = \underline{\Psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B}(x) = \underline{\Theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\underline{B}(z) = \underline{\Phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \underline{\Psi} \cdot \underline{\Theta} \cdot \underline{\Phi} \quad (5.52)$$

respectiv:

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\phi - \sin\psi \cos\theta \sin\phi & -\cos\psi \sin\phi - \sin\psi \cos\theta \cos\phi & \sin\psi \sin\theta \\ \sin\psi \cos\phi + \cos\psi \cos\theta \sin\phi & -\cos\psi \sin\phi + \cos\psi \cos\theta \cos\phi & -\cos\psi \cos\theta \\ \sin\theta \sin\phi & \sin\theta \cos\phi & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

Matricea de rotație \underline{B} se poate determina și cu ajutorul parametrilor lui Euler, q_i ($i=1,2,3,4$)

$$\bar{q} = \{q_1 \ q_2 \ q_3\}^T = \bar{u} \sin \frac{\alpha}{2} \quad ; \quad q_4 = \cos \frac{\alpha}{2} \quad (5.54)$$

echivalentă trigonometrică a relației (5.30):

$$\underline{B} = \underline{E}_3 + 2\sin^2 \frac{\alpha}{2} \bar{u} \bar{u}^T + 2\sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \bar{u} \quad (5.55)$$

conduce la matricea \underline{B} exprimată cu ajutorul parametrilor lui Euler:

$$\underline{B} = \underline{E}_3 + 2 \bar{q} \bar{q}^T + 2 q_4 \bar{q} \quad (5.56)$$

unde pentru matricea antisimetrică, atașată vectorului \bar{q} :

$$\tilde{q} = \begin{bmatrix} 0 & q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

se obține:

$$r = \begin{bmatrix} 2(q_1^2 + q_4^2) - 1 & 2(q_1q_2 - q_3q_4) & 2(q_1q_3 + q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_2^2 + q_4^2) - 1 & 2(q_2q_3 - q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_4) & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & 2(q_3^2 + q_4^2) - 1 \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

Elementele matricei \underline{B} se determină cu ajutorul relațiilor (5.40), (5.43), (5.47) sau (5.49) ÷ (5.51).

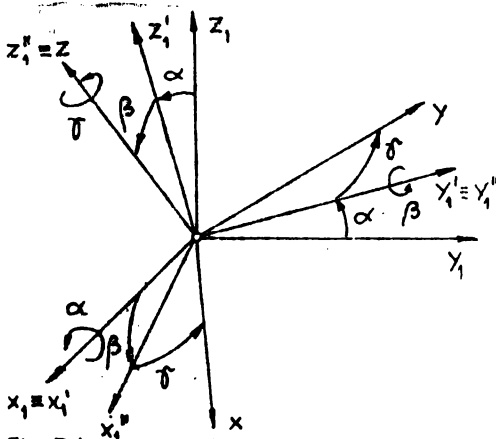


Fig. 5.10. Unghiurile lui BRYANT

Unghiurile lui Bryant [68], evidențiate în figura 5.10, reprezintă tot trei rotații finite.

În literatura de specialitate poartă denumiri diferite : unghiuri cardanice [D2]; roll (γ) - pitch (β)-yaw (α) [R10], pronație - supinație (α)-flexie - extensie (β)-adducție - abducție (γ) [K14].

Matricile de rotație finită se obțin :

- printr-o rotație finită, cu unghiul α , în jurul axei Ox_1 , din relația (5.32)

$$\underline{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

- printr-o rotație finită, cu unghiul β , în jurul axei Oy_1 , din relația (5.33):

$$\underline{\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

- printr-o rotație finită, cu unghiul γ , în jurul axei Oz_1 , din relația (5.34) :

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} \cos \tau & -\sin \tau & 0 \\ \sin \tau & \cos \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

În mod similar matricea de transformare \underline{B} rezultă din produsul celor trei matrici ale rotațiilor finite :

$$\underline{B} = \underline{\alpha} \underline{\beta} \underline{D} \quad (5.62)$$

respectiv :

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \tau & -\cos \beta \sin \tau & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \tau + \sin \alpha \sin \beta \cos \tau & \cos \alpha \cos \tau - \sin \alpha \sin \beta \sin \tau & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \tau - \cos \alpha \sin \beta \cos \tau & \sin \alpha \cos \tau + \cos \alpha \sin \beta \sin \tau & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

5.1.2. Utilizarea coordonatelor omogene la analiza pozițională a mecanismelor de orientare.

Matricea 4x4, \underline{D}_{ij} din relația (5.11) :

$$\underline{D}_{ij} = \begin{bmatrix} \underline{B}_{ij} & \underline{r}_{ij}^{(i)} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

conține parametri care definesc poziția și orientarea reperului R_j în raport cu reperul R_i , prin vectorul de poziție $\underline{r}_{ij}^{(i)}$ al originii O_j , respectiv matricea de rotație \underline{B}_{ij} exprimabilă prin una din relațiile (5.32) ÷ (5.34); (5.53); (5.58); (5.63).

Inversa matricii \underline{D}_{ij} este :

$$\underline{D}_{ij}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{B}_{ij}^T & -\underline{B}_{ij}^T \underline{r}_{ij}^{(i)} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

Poziția și orientarea reperului final, legat de obiectul manipulat, este definită, conform relațiilor (5.35) și (5.38) și a figurii 5.8 tot de o matrice de tip \underline{D} :

$$\underline{D}_{on} = \begin{bmatrix} \underline{R} & \underline{p} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & \sigma_x & a_x & p_x \\ n_y & \sigma_y & a_y & p_y \\ n_z & \sigma_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

unde vectorul $\underline{p} = \{p_x \ p_y \ p_z\}^T$ este vectorul de poziție al obiectului manipulat în raport cu sistemul de referință fix, localizînd de fapt originea reperului atașat obiectului manipulat, în reperul R_o .

Ovadrivectorul $\bar{Q} = \{ \bar{p}^T \mid 1 \}$ atașat vectorului \bar{p} , poartă denumirea de vectorul coordonatelor omogene, iar matricea \underline{D} este o transformare omogenă $[D2]$, $[R30]$.

Matricea de transformare omogenă inversă este :

$$\underline{D}_{on}^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -\bar{p} \cdot \bar{n} \\ \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & -\bar{p} \cdot \bar{\sigma} \\ a_x & a_y & a_z & -\bar{p} \cdot \bar{a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.66)$$

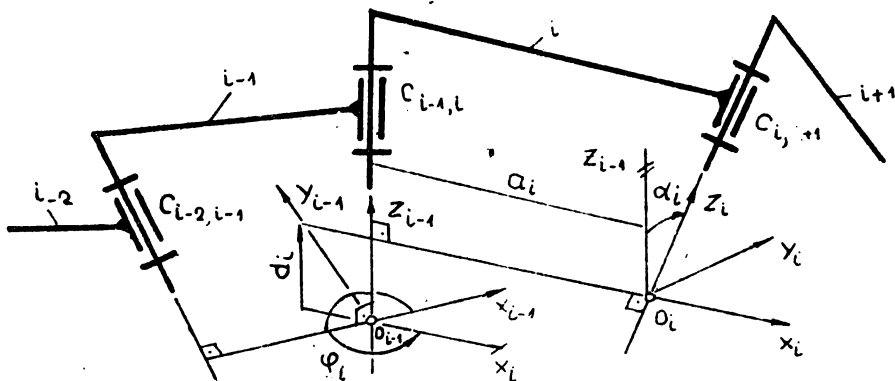


Fig. 5.11. Coordonatele Hartenberg-Denavit

Utilizînd notațiile Hartenberg-Denavit $[C4]$; $[D3]$; $[D4]$; $[D14]$; $[r2]$, se aleg axele sistemelor de referință, câte unul pentru fiecare element component al lanțului cinematic deschis (fig.5.11), elementul i fiind cuprins între cuple cinematice de rotație $i-1, i$ și $i, i+1$:

- axa Z_i , de orientare arbitrară coincide cu axa de rotație a cuplei cinematice $i, i+1$.

axa X_i , are direcția perpendiculară comună a a_i dintre axele Z_{i-1} și Z_i , orientată de la intersecția cu Z_{i-1} , la intersecția cu Z_i .

- axa y_i , formează un sistem triortogonal drept cu axele X_i și Z_i , ceea ce permite exprimarea poziției elementului i în raport cu elementul $i-1$, cu ajutorul a numai patru parametri de poziție: a_i , d_i , φ_i și α_i :

- a_i , este perpendiculara comună între axele z_{i-1} și Z_i , măsurată de-a lungul axei X_i , pozitivă sau negativă dependent de orientarea pozitivă a axei x_i .

- d_i , este distanța măsurată de-a lungul axei Z_{i-1} , de la X_{i-1} la X_i , pozitivă sau negativă dependent de orientarea pozitivă a axei Z_{i-1} .

- φ_i , este unghiul axelor pozitive X_{i-1} și X_i , fiind pozitiv dacă privind în sensul pozitiv al axei Z_{i-1} , axa X_{i-1} se rotește spre axa x_i în sens trigonometric.

- α_i , este unghiul axelor Z_{i-1} și Z_i , fiind pozitiv dacă privind în sensul pozitiv al axei X_i , axa Z_{i-1} se rotește spre axa Z_i în sens trigonometric.

Intrucît cupla cinematică $i-1$, i este o cuplă de rotație, parametrul variabil este unghiul φ_i , iar d_i este o mărime constantă. Particularizînd matricile corespunzătoare mișcării de translație \underline{D}_t , relația (5.20) și cea corespunzătoare mișcării de rotație \underline{D}_r , relația (5.22), cu notațiile de mai sus se obține matricea de transformare \underline{A} :

$$\underline{A} = \overset{(\varphi)}{\underline{D}_r} \cdot \overset{(z)}{\underline{D}_t} \cdot \overset{(x)}{\underline{D}_t} \cdot \overset{(\alpha)}{\underline{D}_r} \quad (5.67)$$

ca un produs al matricii de rotație finită cu unghiul φ_i în jurul axei Z_{i-1} :

$$\overset{(\varphi)}{\underline{D}_r} = \overset{Z_{i-1}}{\begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 & 0 \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}} \quad (5.68)$$

cu matricea de translație cu d_i , de-a lungul axei Z_{i-1} :

$$\overset{(z)}{\underline{D}_t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.69)$$

cea de translație cu a_i , de-a lungul axei X_i :

$$\overset{(x)}{\underline{D}_t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.70)$$

și cu matricea de rotație finită, cu unghiul α_i , în jurul axei X_i :

$$\underline{D}_r(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.71)$$

Conform relației (5.67)) transformarea liniară, între cele două sisteme de referință adiacente se exprimă cu matricea :

$$A_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i \cos \alpha_i & \sin \varphi_i \sin \alpha_i & a_i \cos \varphi_i \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \cos \alpha_i & -\cos \varphi_i \sin \alpha_i & a_i \sin \varphi_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

Poziția reperului R_n în raport cu reperul R_0 se determină cu ajutorul matricei de transformare :

$$\underline{T}_{0n} = \prod_{i=1}^n A_{i-1,i} \quad n \leq 6 \quad (5.73)$$

Poziția reperului R_n în raport cu reperul R_{i-1} , se determină cu ajutorul matricei de transformare :

$$\underline{T}_{i-1,n} = A_{i-1,i} A_{i,i+1} A_{i+1,i+2} \dots A_{n-1,n} \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.74)$$

Transformările omogene oferă o descriere compactă a structurii unui robot. Prin treceri succesive de la sistemul de referință fix, reperul R_0 , la reperul R_i și în final la obiectul manipulat, de care este solidarizat reperul R_n , cu ajutorul matricei A_i , relația (5.73) de transformare liniară este :

$$\underline{T}_{0n} = A_{01} A_{12} A_{23} \dots A_{i-1,i} \dots A_{n-1,n} \quad (5.75)$$

Pentru valori impuse ale parametrilor de poziție și cuplelor cinematice conducătoare, coordonate generalizate $q_i = q_i(t)$, $i=1,2,\dots,n$, ca funcții de timp, matricea \underline{T}_{0n} :

$$\underline{T}_{0n} = \begin{bmatrix} f_{11}^{on} & f_{12}^{on} & f_{13}^{on} & f_{14}^{on} \\ f_{21}^{on} & f_{22}^{on} & f_{23}^{on} & f_{24}^{on} \\ f_{31}^{on} & f_{32}^{on} & f_{33}^{on} & f_{34}^{on} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.76)$$

are elementele :

$$f_{ij}^{on} = f_{ij}^{on}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n), \quad i=1,2,3; \quad j=1,2,3,4 \quad (5.76')$$

Rezolvarea modelului geometric direct impune determinarea poziției și orientării reperului final R_n , atașat obiectului manipulat (fig.5.8) ca funcții de timp, în raport cu reperul R_0 , atașat bazei robotului.

Soluția problemei geometrice directe este dată de matricea de transformare omogenă \underline{D} , relația (5.65).

$$\underline{D}_{on} = \underline{T}_{on} \quad (5.77)$$

sau :

$$\begin{bmatrix} n_x & \bar{\sigma}_x & a_x & p_x \\ n_y & \bar{\sigma}_y & a_y & p_y \\ n_z & \bar{\sigma}_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}^{on} & f_{12}^{on} & f_{13}^{on} & f_{14}^{on} \\ f_{21}^{on} & f_{22}^{on} & f_{23}^{on} & f_{24}^{on} \\ f_{31}^{on} & f_{32}^{on} & f_{33}^{on} & f_{34}^{on} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.78)$$

unde orientarea obiectului manipulat este dată de versorii $\bar{n}, \bar{\sigma}$ și \bar{a} ai axelor reperului final, propriu obiectului manipulat exprimați în reperul fix, iar poziția obiectului manipulat este dată de vectorul \bar{p} , vectorul de poziție al originii O_n al reperului final în raport cu originea reperului fix.

Rezolvarea modelului geometric invers impune determinarea parametrilor de poziție al cuplelor cinematice conducătoare q_i , $i=1,2,\dots,n$, în funcție de poziția și orientarea impusă reperului final R_n , atașat obiectului manipulat, în raport cu reperul fix R_0 , atașat bazei robotului.

Pornind de la soluția modelului geometric direct, relația (5.77) și înmulțind succesiv, la stînga cu inversa matricei $\underline{A}_{i-1,i}$, respectiv $\underline{A}_{i-1,i}^{-1}$; ($i=1,2,\dots,n-1$) se obțin succesiv relațiile :

$$\underline{A}_{01}^{-1} \cdot \underline{D}_{on} = \underline{T}_{1n} \quad (5.79)$$

$$\underline{A}_{12}^{-1} \underline{A}_{01}^{-1} \cdot \underline{D}_{on} = \underline{T}_{2n} \quad (5.80)$$

$$\underline{A}_{23}^{-1} \underline{A}_{12}^{-1} \underline{A}_{01}^{-1} \cdot \underline{D}_{on} = \underline{T}_{3n} \quad (5.81)$$

⋮

unde matricea din membrul drept se determină cu relația de recurență (5.74). Cunoscînd matricea de transformare omogenă \underline{D}_{on} , relația (5.65), ce definește poziția și orientarea R_n , în raport cu R_0 , matricile $\underline{A}_{i-1,i}$ și inversele lor $\underline{A}_{i-1,i}^{-1}$, precum și matricea $\underline{T}_{1-1,n}$ ($i=1,2,\dots,n$), relațiile (5.79) - (5.81) conduc, în final, la egalități de forma :

$$\begin{bmatrix} f_{i1}(\bar{n}) & f_{i1}(\bar{\theta}) & f_{i1}(\bar{a}) & f_{i1}(\bar{p}) \\ f_{i2}(\bar{n}) & f_{i2}(\bar{\theta}) & f_{i2}(\bar{a}) & f_{i2}(\bar{p}) \\ f_{i3}(\bar{n}) & f_{i3}(\bar{\theta}) & f_{i3}(\bar{a}) & f_{i3}(\bar{p}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^{i+1,n} & h_{12}^{i+1,n} & h_{13}^{i+1,n} & h_{14}^{i+1,n} \\ h_{21}^{i+1,n} & h_{22}^{i+1,n} & h_{23}^{i+1,n} & h_{24}^{i+1,n} \\ h_{31}^{i+1,n} & h_{32}^{i+1,n} & h_{33}^{i+1,n} & h_{34}^{i+1,n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.82)$$

Prin egalarea elementelor celor două matrici, rezultă ecuațiile de determinare a parametrilor de poziție q_i ; ($i=1, 2, \dots, n$)

Elementele matricii din membrul stîng sînt dependente numai de parametrul de poziție q_i :

$$f_{ij} = f_{ij}(q_i) \quad j = 1, 2, 3 \quad (5.83)$$

Elementele matricii din membrul drept sînt independente sau dependente de parametrii de poziție: $q_{i+1}, q_{i+2}, \dots, q_n$:

$$h_{kl}^{i+1,n} = h_{kl}^{i+1,n}(q_{i+1}, q_{i+2}, \dots, q_n) \quad (5.84)$$

$$k = 1, 2, 3; \quad l = 1, 2, 3, 4; \quad n \leq 6.$$

5.1.3. Analiza pozițională a mecanismelor de orientare cu $M = 1 \div 3$.

Pentru valori impuse ale parametrilor de poziție ai cuplelor cinematice conductoare : $\varphi_i = \varphi_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, se determină matricea (5.76), ce definește poziția și orientarea reperului final. R_n , în raport cu reperul fix R_0 .

a) Pentru mecanismele de orientare cu $M=1$, relația (5.75), este :

$$\underline{T}_{01} = \underline{A}_{01} \quad (5.85)$$

Conform figurii (5.12) matricea \underline{A}_{01} este :

$$\underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.86)$$

unde : $C_1 = \cos \varphi_1$,

$S_1 = \sin \varphi_1$;

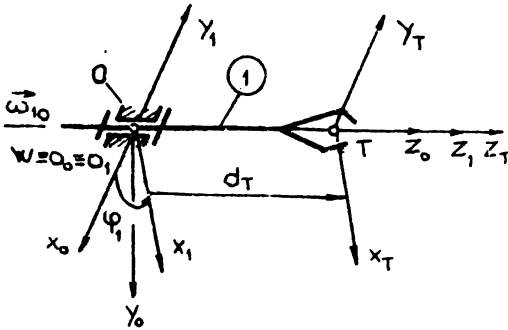


Fig. 5.12. Mecanism de orientare cu $M=1$

Pentru un punct T al dispozitivului de prehensiune, definit în raport cu reperul R_1 prin matricea:

$$\underline{A}_{1T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.89)$$

se obține:

$$\underline{A}_{0T} = \underline{A}_{01} \cdot \underline{A}_{1T} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.90)$$

unde se modifică numai componenta $p_z = d_T$, din relațiile (5.38).

b) În cazul mecanismelor de orientare cu $M = 2$:

$$\underline{A}_{02} = \underline{A}_{01} \cdot \underline{A}_{12} \quad (5.91)$$

unde matricile \underline{A}_{01} și \underline{A}_{12} au expresia, conform figuri 5.13 :

$$\underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & C_1 & a_1 S_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.92)$$

$$\underline{A}_{12} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.93)$$

Intrucât matricea :

$$\underline{T}_{01} = \underline{D}_{01} \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{e} & \bar{a} & \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.87)$$

definește orientarea reperului final, prin versorii \bar{n} , \bar{e} și \bar{a} și poziția sa în raport cu reperul fix, prin vectorul \bar{p} , conform relațiilor (5.78) și (5.85) se obțin componentele acestora exprimați în reperul fix :

$$\begin{aligned} n_x &= \cos \varphi_1 & e_x &= -\sin \varphi_1 \\ n_y &= \sin \varphi_1 & e_y &= \cos \varphi_1 \\ n_z &= 0 & e_z &= 0 \end{aligned} \quad (5.88)$$

$$\begin{aligned} a_x &= 0 & p_x &= 0 \\ a_y &= 0 & p_y &= 0 \\ a_z &= 1 & p_z &= 0 \end{aligned}$$

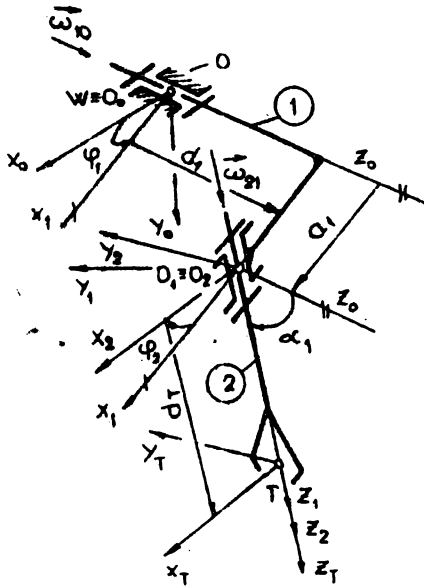


Fig 5.13 Mecanism de orientare cu $M=2$

și rezultă :

$$\underline{T}_{02} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & -S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & C_1 & a_1 S_1 \\ -S_2 & -C_2 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.94)$$

Conform relației (5.87) se obțin :

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 & e_x &= -\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \\ n_y &= \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 & e_y &= -\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 \\ n_z &= -\sin\varphi_2 & e_z &= -\cos\varphi_2 \end{aligned} \quad (5.95)$$

$$\begin{aligned} a_x &= -\sin\varphi_1 & p_x &= a_1 \cos\varphi_1 \\ a_y &= \cos\varphi_1 & p_y &= a_1 \sin\varphi_1 \\ a_z &= 0 & p_z &= d_1 \end{aligned}$$

Pentru un punct T al dispozitivului de prehensiune,

definit tot prin aceiași matrice, relația (5.99), rezultă :

$$\underline{T}_{0T} = \underline{A}_{01} \cdot \underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{2T} \quad (5.96)$$

relațiile (5.95) rămânând valabile cu modificarea componentelor:

$$\begin{aligned} p_x &= a_1 \cos\varphi_1 - d_T \sin\varphi_1 \\ p_y &= a_1 \sin\varphi_1 + d_T \cos\varphi_1 \end{aligned} \quad (5.97)$$

c) Mecanismele de orientare cu $M=3$, figura 5.14, vor avea :

$$\underline{T}_{03} = \underline{A}_{01} \cdot \underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{23} \quad (5.98)$$

unde pentru:

$$\underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & C_1 & a_1 S_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{A}_{12} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 & a_2 C_2 \\ S_2 & 0 & -C_2 & a_2 S_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.99)$$

$$\underline{A}_{23} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.100)$$

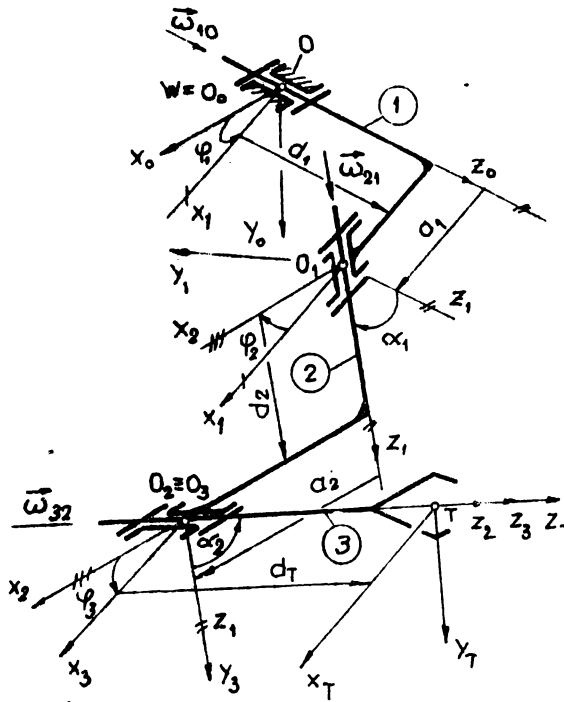


Fig.5.14. Mecanism de orientare cu $M=3$

se obține :

$$T_{03} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3 & -C_1 C_2 S_3 - S_1 C_3 & C_1 S_2 & a_2 C_1 C_2 - d_2 S_1 + a_1 C_1 \\ S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3 & -S_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 & S_1 S_2 & a_2 S_1 C_2 + d_2 C_1 + a_1 S_1 \\ -S_2 C_3 & S_2 S_3 & C_2 & -a_2 S_2 + d_1 \\ 0 & 0 & C_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.101)$$

Conform relației (5.87) se obțin:

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\varphi_3 - \sin\varphi_1 \sin\varphi_3 & e_x &= -\cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\varphi_3 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_3 \\ n_y &= \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\varphi_3 + \cos\varphi_1 \sin\varphi_3 & e_y &= -\sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\varphi_3 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \\ n_z &= -\sin\varphi_2 \cos\varphi_3 & e_z &= \sin\varphi_2 \sin\varphi_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_x &= \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 & f_x &= a_2 \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 - d_1 \sin\varphi_1 + a_1 \cos\varphi_1 \\ a_y &= \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 & f_y &= a_2 \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 + d_2 \cos\varphi_1 + a_1 \sin\varphi_1 \\ a_z &= \cos\varphi_2 & f_z &= -a_2 \sin\varphi_2 + d_1 \end{aligned} \quad (5.102)$$

Pentru un punct T al dispozitivului de prehensiune, definit tot de matricea (5.89) rezultă :

$$\underline{T}_{0T} = \underline{A}_{01} \underline{A}_{12} \underline{A}_{23} \underline{A}_{3T} \quad (5.103)$$

relațiile (5.102) rămânând aceleași cu modificarea lui :

$$\begin{aligned} p_x &= a_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - d_2 \sin \varphi_1 + a_1 \cos \varphi_1 + d_T \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ p_y &= a_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + d_2 \cos \varphi_1 + a_1 \sin \varphi_1 + d_T \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ p_z &= -a_2 \sin \varphi_2 + d_1 + d_T \cos \varphi_2 \end{aligned} \quad (5.104)$$

Problema geometrică inversă permite determinarea parametrilor de poziție $\varphi_i = \varphi_i(t)$ ai cuplelor cinematice conducătoare în funcție de poziția și orientarea impusă reperului final R_n prin matricea \underline{T}_{0n} , relația (5.65).

a) Pentru mecanismele de orientare cu $M=1$ soluția este directă din relațiile (5.88) obținându-se :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{n_y}{n_x} ; \quad \varphi_1 = \varphi_1 + k\pi \quad (5.105)$$

b) În cazul mecanismelor de orientare cu $M=2$ se aplică relația (5.79) pt. $n=2$

$$\underline{A}_{01}^{-1} \underline{D}_{02} = \underline{T}_{12} \quad (5.106)$$

unde \underline{A}_{01}^{-1} este inversa matricii \underline{A}_{01} , relația (5.92):

$$\underline{A}_{01}^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.107)$$

Inlocuind pe $\underline{T}_{12} = \underline{A}_{12}$, relația (5.93) și \underline{D}_{02} , relația (5.65), în relația (5.106) se obține :

$$\begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & \sigma_x & a_x & p_x \\ n_y & \sigma_y & a_y & p_y \\ n_z & \sigma_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.108)$$

Efectuând produsul matriceal din membrul stîng, rezultă relații de forma (5.82) și anume :

$$\begin{aligned} f_{11}(\bar{n}) &= n_x \cos \varphi_1 + n_y \sin \varphi_1 = \cos \varphi_2 \\ f_{12}(\bar{n}) &= -n_z = \sin \varphi_2 \\ f_{13}(\bar{n}) &= -n_x \sin \varphi_1 + n_y \cos \varphi_1 = 0 \end{aligned} \quad (5.109)$$

$$f_{11}(\bar{\sigma}) = \sigma_z \cos \varphi_1 + \sigma_y \sin \varphi_1 = -\sin \varphi_2$$

$$f_{12}(\bar{\sigma}) = -\sigma_z = \cos \varphi_2$$

$$f_{13}(\bar{\sigma}) = -\sigma_x \sin \varphi_2 + \sigma_y \cos \varphi_2 = 0$$

$$f_{11}(\bar{a}) = a_x \cos \varphi_1 + a_y \sin \varphi_1 = 0$$

$$f_{12}(\bar{a}) = -a_z = 0$$

$$f_{13}(\bar{a}) = -a_x \sin \varphi_1 + a_y \cos \varphi_1 = 1 \quad (5.110)$$

$$f_{11}(\bar{p}) = p_x \cos \varphi_1 + p_y \sin \varphi_1 - a_1 = 0 \quad f_{12}(\bar{p}) = -p_z + d_1 = 0$$

$$f_{13}(\bar{p}) = -p_x \sin \varphi_1 + p_y \cos \varphi_1 = 0$$

Selectînd relațiile ce permit calculul parametrilor poziționali rezultă :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{n_y}{n_x} ; \quad \varphi_1 = \varphi_1 + k\pi \quad (5.111)$$

și

$$\varphi_2 = \arctg \frac{\sigma_y}{\sigma_x} ; \quad \varphi_2 = \varphi_2 + k\pi \quad (5.112)$$

c) În cazul mecanismelor de orientare cu $M = 3$, aplicînd tot relația (5.79), se obține, pînă $n = 3$,

$$\underline{A}_{01}^{-1} \underline{D}_{03} = \underline{T}_{13} \quad (5.113)$$

unde \underline{A}_{01}^{-1} are aceeași expresie (5.107), iar $\underline{T}_{13} = \underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{13}$ se determină cu matricile din relațiile (5.99) și (5.100):

$$\underline{T}_{13} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 & a_2 \cdot C_2 \\ S_2 & 0 & -C_2 & a_2 \cdot S_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.114)$$

Înlocuind în relația (5.113) se obține :

$$\begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & \sigma_x & a_x & p_x \\ n_y & \sigma_y & a_y & p_y \\ n_z & \sigma_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 C_3 & -C_2 S_3 & S_2 & a_2 C_2 \\ S_2 C_3 & -S_2 S_3 & -C_2 & a_2 S_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.115)$$

Pentru calculul parametrului pozițional φ_1 se reține relația:

$$f_{13}(\bar{\sigma}) = -a_x \sin\varphi_1 + a_y \cos\varphi_1 = 0$$

de unde :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{a_y}{a_x} ; \varphi_1 = \varphi_1 + k\pi \quad (5.116)$$

iar pentru parametrul pozițional φ_2 , relațiile :

$$\begin{aligned} f_{11}(\bar{a}) &= a_x \cos\varphi_1 + a_y \sin\varphi_1 = \sin\varphi_2 \\ f_{12}(\bar{a}) &= -a_z = -\cos\varphi_2 \end{aligned} \quad (5.117)$$

de unde :

$$\varphi_2 = \arctg \frac{a_x \cos\varphi_1 + a_y \sin\varphi_1}{a_z} ; \varphi_2 = \varphi_2 + k\pi \quad (5.118)$$

Pentru a determina și parametrul pozițional $\varphi_3 = \varphi_3(t)$ se pornește de la relația (5.80)

$$\begin{matrix} -1 & -1 \\ \underline{A}_{12} & \underline{A}_{01} & \underline{D}_{03} \end{matrix} = \underline{T}_{23} \quad (5.119)$$

unde \underline{A}_{12} este inversa matricii \underline{A}_{12} din relația (4.99)

$$\underline{A}_{12}^{-1} = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.120)$$

se obține :

$$\underline{A}_{12}^{-1} \cdot \underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.121)$$

$$\text{și: } \begin{bmatrix} C_1 C_2 & S_1 C_2 & -S_2 & -a_1 C_2 + d_1 S_2 - a_2 \\ -S_1 & C_1 & 0 & d_2 \\ C_1 S_2 & S_1 S_2 & C_2 & -a_1 S_2 + d_1 C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x & e_x & a_x & p_x \\ n_y & e_y & a_y & p_y \\ n_z & e_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.122)$$

Din relațiile :

$$\begin{aligned} f_{22}(\bar{n}) &= -n_x \sin\varphi_1 + n_y \cos\varphi_1 = \sin\varphi_3 \\ f_{22}(\bar{\sigma}) &= -e_x \sin\varphi_1 + e_y \cos\varphi_1 = \cos\varphi_3 \end{aligned} \quad (5.123)$$

se obține :

$$\varphi_3 = \arctg \frac{-n_x \sin \varphi_1 + n_y \cos \varphi_1}{-e_x \sin \varphi_1 + e_y \cos \varphi_1}; \quad \varphi_3 = \varphi_3 + k\pi \quad (5.124)$$

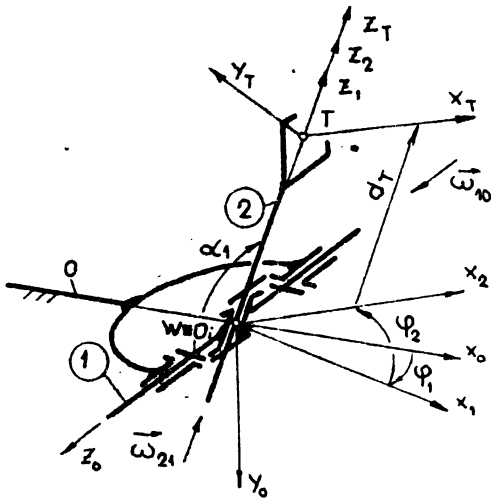


Fig.5.15. Mecanism sferic cu $M=2$

coincidenței originilor $O_0 = O_1 = O_2$ (fig.5.15), devine un vector nul:

$$\bar{p} = \{0 \quad 0 \quad 0\}^T \quad (5.126)$$

Pentru mecanismele de orientare avînd la bază un mecanism sferic, relațiile stabilite mai sus se particularizează.

Astfel pentru mecanismul sferic cu două grade de mobilitate, $M=2$, în baza aceleiași relații (5.91), particularizînd în matricea \underline{A}_{01} :

$$a_1 = d_1 = 0 \quad (5.125)$$

se obțin aceleiași expresii (5.95) ale versorilor \bar{n} , \bar{e} și \bar{a} ce definesc orientarea reperului R_2 în reperul fix, iar vectorul \bar{p} , datorită

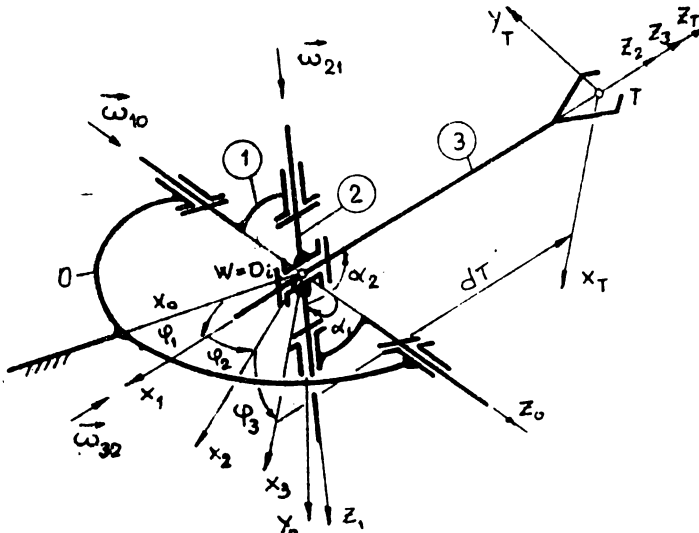


Fig.5.16. Mecanism sferic cu $M=3$.

Problema geometrică inversă formulată identic, cu particularizarea impusă de relația (5.125) conduce la aceleași relații (5.111) ; (5.112) de determinare a parametrilor poziționali $\varphi_i = \varphi_i(t)$, ($i=1,2$)

În cazul mecanismelor sferice cu $M = 3$, originea O_i ale reperelor R_i ($i=0,1,2,3$) fiind aceeași (fig.5.16), în relațiile (5.102) se operează :

$$a_1 = a_2 = d_1 = d_2 = 0 \quad (5.127)$$

ceea ce conduce la $\bar{p} = \{0 \ 0 \ 0\}^T$.

Problema geometrică inversă formulată identic, permite determinarea parametrilor poziționali $\varphi_i = \varphi_i(t)$ ($i=1,2,3$) cu relațiile (5.116), (5.118) și (5.124).

5.2. Considerații privind analiza cinematică a mecanismelor de orientare.

Calculul componentelor vectorului diferențial de mișcare $d\bar{z}$:

$$d\bar{z} = \{\bar{d} \ ; \ \bar{\delta}\}^T \quad (5.128)$$

unde vectorul translației elementare, exprimat în reperul fix :

$$\bar{d} = \{d_x \ d_y \ d_z\}^T \quad (5.129)$$

iar vectorul rotației elementare, exprimat în reperul fix :

$$\bar{\delta} = \{\delta_x \ \delta_y \ \delta_z\}^T \quad (5.130)$$

se determină pe baza variațiilor $d\bar{q}$ impune coordonatelor generalizate :

$$\bar{q} = \{q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_n\}^T \quad (5.131)$$

Conform relației (5.15) se poate scrie o matrice $d\bar{D}$ corespunzătoare deplasărilor elementare :

$$d\bar{D} = \left[\begin{array}{c|c} d\bar{B} & \bar{d} \\ \hline \bar{\delta}^T & 1 \end{array} \right] \quad (5.132)$$

unde matricea $d\bar{B}$ se obține din relațiile (5.32) ÷ (5.34), pentru:

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} \sin \alpha &\rightarrow d\alpha \\ \lim_{\alpha \rightarrow 0} \cos \alpha &\rightarrow 1 \end{aligned} \quad (5.133)$$

corespunzător rotirii cu unghiul $d\alpha = \delta x$ în jurul axei Ox_0 (fig.5.17).

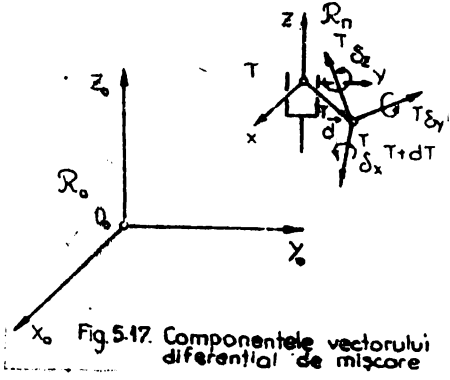


Fig.5.17. Componentele vectorului diferential de mișcare

$$d\underline{B}^{(x_0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\delta x \\ 0 & \delta x & 1 \end{bmatrix} \quad (5.134)$$

rotirii cu unghiul $d\alpha = \delta y$ în jurul axei Oy_0 :

$$d\underline{B}^{(y_0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\delta y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.135)$$

și rotirii cu unghiul $d\alpha = \delta z$ în jurul axei Oz_0 .

$$d\underline{B}^{(z_0)} = \begin{bmatrix} 1 & -\delta z & 0 \\ \delta z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.136)$$

Intrucît :

$$d\underline{B} = d\underline{B}^{(x_0)} \cdot d\underline{B}^{(y_0)} \cdot d\underline{B}^{(z_0)} \quad (5.137)$$

neglijînd infiniții mici de ordinul doi ($\delta x \delta y = 0$) se obține matricea rotațiilor elementare în jurul axelor reperului fix :

$$d\underline{B} = \begin{bmatrix} 1 & -\delta z & \delta y \\ \delta z & 1 & -\delta x \\ -\delta y & \delta x & 1 \end{bmatrix} \quad (5.138)$$

de fapt matricea antisimetrică atașată vectorului $\tilde{\delta}$:

$$d\underline{B} = \tilde{\delta} \quad (5.139)$$

Cu aceste precizări relație (5.133) ia forma particulară dependentă de vectorii deplasărilor elementare (\underline{d}) și ($\tilde{\delta}$) :

$$d\underline{D} = \begin{bmatrix} \tilde{\delta} & \underline{d} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.140)$$

Considerînd reperul R_n , a cărui poziție în raport cu reperul fix R_0 , a fost definită prin matricea \underline{T}_{on} , se exprimă matricea $\underline{T}_{on} - d\underline{T}_{on}$, în momentul $t + dt$, ca fiind :

$$\underline{T}_{on} + d\underline{T}_{on} = d\underline{D} \underline{T}_{on} \quad (5.141)$$

de unde $d\underline{T}_{on}$ este :

$$d \underline{T}_{on} = (d \underline{D} - \underline{E}_4) \underline{T}_{on} \quad (5.142)$$

Admițînd notația :

$$\underline{\Delta} = d \underline{D} - \underline{E}_4 \quad (5.143)$$

și ținând cont de relația (5.140) :

$$\underline{\underline{\Delta}} = \begin{bmatrix} 1 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 1 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 0 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.144)$$

sau:

$$\underline{\underline{\Delta}} = \left[\begin{array}{c|c} \tilde{\delta} & \bar{d} \\ \hline \bar{\delta}^T & 0 \end{array} \right] \quad (5.145)$$

relația (5.142) devine :

$$d\underline{\underline{T}}_{on} = \underline{\underline{\Delta}} \underline{\underline{T}}_{on} \quad (5.146)$$

Exprimînd vectorul diferențial de mișcare în reperul R_n :

$$d_z^{(n)} = \left\{ \bar{d}^{(n)} \mid \bar{\delta}^{(n)} \right\}^T \quad (5.147)$$

unde vectorul translației elementare, exprimat în reperul R_n este :

$$\bar{d}^{(n)} = \left\{ dx^{(n)} \quad dy^{(n)} \quad dz^{(n)} \right\}^T \quad (5.148)$$

iar vectorul relației elementare, exprimat în acelaș reper :

$$\bar{\delta}^{(n)} = \left\{ \delta_x^{(n)} \quad \delta_y^{(n)} \quad \delta_z^{(n)} \right\}^T \quad (5.149)$$

și introducînd matricea :

$$\underline{\underline{\Delta}}^{(n)} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z^{(n)} & \delta_y^{(n)} & d_x^{(n)} \\ \delta_z^{(n)} & 0 & -\delta_x^{(n)} & d_y^{(n)} \\ -\delta_y^{(n)} & \delta_x^{(n)} & 0 & d_z^{(n)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.150)$$

sau:

$$\underline{\underline{\Delta}}^{(n)} = \left[\begin{array}{c|c} \tilde{\delta}^{(n)} & \bar{d}^{(n)} \\ \hline \bar{\delta}^{(n)T} & 0 \end{array} \right] \quad (5.151)$$

se poate scrie relația:

$$d\underline{\underline{T}}_{on} = \underline{\underline{T}}_{on} \cdot \underline{\underline{\Delta}}^{(n)} \quad (5.152)$$

Din relațiile (5.146) și (5.152) rezultă :

$$\underline{\underline{\Delta}} \underline{\underline{T}}_{on} = \underline{\underline{T}}_{on} \cdot \underline{\underline{\Delta}}^{(n)} \quad (5.153)$$

sau:

$$\underline{\underline{\Delta}}^{(n)} = \underline{\underline{T}}_{on}^{-1} \underline{\underline{\Delta}} \underline{\underline{T}}_{on} \quad (5.154)$$

Intrucât matricile \underline{T}_{on} și \underline{T}_{on}^{-1} sînt definite prin relațiile (5.65), (5.66), (5.77):

$$\underline{T}_{on} = \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{\sigma} & \bar{a} & \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{T}_{on}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{n}^T & -\bar{p} \cdot \bar{n} \\ \bar{\sigma}^T & -\bar{p} \cdot \bar{\sigma} \\ \bar{a}^T & -\bar{p} \cdot \bar{a} \\ \bar{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.155)$$

rezolvînd ecuația (5.154), de forma :

$$\begin{bmatrix} \tilde{\delta}^{(n)} & \bar{d}^{(n)} \\ \bar{0}^T & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{\sigma} & \bar{a} & \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\delta} & \bar{d} \\ \bar{0}^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}^T & -\bar{p} \cdot \bar{n} \\ \bar{\sigma}^T & -\bar{p} \cdot \bar{\sigma} \\ \bar{a}^T & -\bar{p} \cdot \bar{a} \\ \bar{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.156)$$

se obțin următoarele rezultate :

$$d_x^{(n)} = \bar{n} \cdot [(\bar{\delta} \times \bar{p}) + \bar{d}] \quad \delta_x^{(n)} = \bar{n} \cdot \bar{\delta} \quad (5.157)$$

$$d_y^{(n)} = \bar{\sigma} \cdot [(\bar{\delta} \times \bar{p}) + \bar{d}] \quad \delta_y^{(n)} = \bar{\sigma} \cdot \bar{\delta} \quad (5.157)$$

$$d_z^{(n)} = \bar{a} \cdot [(\bar{\delta} \times \bar{p}) + \bar{d}] \quad \delta_z^{(n)} = \bar{a} \cdot \bar{\delta}$$

Matricea Jacobi asigură legătura dintre vectorul diferențial de mișcare $d\bar{z}^{(n)}$ și vectorul coordonatelor generalizate:

$$d\bar{z}^{(n)} = \underline{J}(\bar{q}) d\bar{q} \quad (5.158)$$

Exprimarea vectorului diferențial de mișcare $d\bar{z}^{(n)}$ în reperul R_n , atașat obiectului manipulat, permite scrierea ecuației :

$$d\underline{T}_{on} = \underline{T}_{on} \underline{\Delta}_i^{(n)} dq_i \quad (5.159)$$

de variație a matricei \underline{T}_{on} corespunzătoare unei variații dq_i în cupla cinematică conducătoare $i-1, i$.

Tinînd cont de relația (5.154), transformarea diferențială $\underline{\Delta}_i^{(i-1)}$ [R10] ce corespunde unei rotații unitate în jurul axei Oz_{i-1} cu unghiul $d\varphi_i$, în cazul unei cuple de rotație, sau unei translații unitare dd_i în lungul axei Oz_{i-1} , în cazul cuplei de translație :

$$\underline{\Delta}_i^{(n)} = (\underline{T}_{i-1, n})^{-1} \underline{\Delta}_i^{(i-1)} \underline{T}_{i-1, n} \quad (5.160)$$

unde scriind matricea $\underline{T}_{i-1, n}$ conform relației (5.74), se obține:

$$\underline{\Delta}_i^{(n)} = (\underline{A}_{i-1, i} \underline{A}_{i, i+1} \dots \underline{A}_{n-1, n})^{-1} \underline{\Delta}_i^{(i-1)} (\underline{A}_{i-1, i} \underline{A}_{i, i+1} \dots \underline{A}_{n-1, n}) \quad (5.161)$$

Derivata parțială a matricei \underline{T}_{on} în raport cu coordonata generalizată q_i se obține din (5.159):

$$\frac{\partial \underline{T}_{on}}{\partial q_i} = \underline{T}_{on} \underline{\Delta}_i^{(n)} \quad (5.162)$$

Pentru o cuplă cinematică de rotație în jurul axei Oz_{i-1} , relațiile (5.129) și (5.130), ca vectori unitari, iau forma :

$$\bar{d}_i = \{0 \ 0 \ 0\}^T \quad \text{și} \quad \bar{\delta}_i = \{0 \ 0 \ 1\}^T \quad (5.163)$$

ceea ce conduce la valori particulare ale deplasărilor elementare înregistrate în reperul R_n , relațiile (5.157):

$$\begin{aligned} dx_1^{(n)} &= \bar{n} \cdot (\bar{\delta}_i + \bar{e}) = -n_x p_y + n_y p_x & \delta_{x_i}^{(n)} &= \bar{n} \cdot \bar{\delta}_i = n_z \\ dy_1^{(n)} &= \bar{\sigma} \cdot (\bar{\delta}_i + \bar{e}) = -\sigma_x p_y + \sigma_y p_x & \delta_{y_i}^{(n)} &= \bar{\sigma} \cdot \bar{\delta}_i = \sigma_z \\ dz_1^{(n)} &= \bar{a} \cdot (\bar{\delta}_i + \bar{e}) = -a_x p_y + a_y p_x & \delta_{z_i}^{(n)} &= \bar{a} \cdot \bar{\delta}_i = a_z \end{aligned} \quad (5.164)$$

mărimi cu care vectori deplasărilor elementare, relația (5.129) și (5.130) iau forma :

$$\begin{aligned} \bar{d}_i^{(n)} &= \{-n_x p_y + n_y p_x \mid -\sigma_x p_y + \sigma_y p_x \mid -a_x p_y + a_y p_x\} \\ \bar{\delta}_i^{(n)} &= \{n_z \ \sigma_z \ a_z\} \end{aligned} \quad (5.165)$$

Pentru o cuplă cinematică de translație în lungul axei Oz_{i-1} , relațiile (5.129) și (5.130), ca vectori unitari, conduc la :

$$\bar{d}_i = \{0 \ 0 \ 1\}^T \quad \text{și} \quad \bar{\delta}_i = \{0 \ 0 \ 0\}^T \quad (5.166)$$

ceea ce conduce la valori particulare ale deplasărilor elementare înregistrate, în reperul R_n , relațiile (5.157):

$$\begin{aligned} dx_i^{(n)} &= \bar{n} \cdot \bar{d}_i = n_z & \delta_{x_i}^{(n)} &= 0 \\ dy_i^{(n)} &= \bar{\sigma} \cdot \bar{d}_i = \sigma_z & \delta_{y_i}^{(n)} &= 0 \\ dz_i^{(n)} &= \bar{a} \cdot \bar{d}_i = a_z & \delta_{z_i}^{(n)} &= 0 \end{aligned} \quad (5.167)$$

mărimi cu care vectorul deplasărilor elementare, relațiile (5.129) și (5.130) i-au forma:

$$\begin{aligned} \bar{d}_i^{(n)} &= \{n_z \ \sigma_z \ a_z\}^T \\ \bar{\delta}_i^{(n)} &= \{0 \ 0 \ 0\}^T \end{aligned} \quad (5.168)$$

Determinarea coloanelor matricii Jacobi necesită următoarea succesiune de operații :

- se determină matricile $\underline{T}_{i-1,n}$ cu ajutorul relației (5.74) obținându-se matricile: $\underline{T}_{0n}, \underline{T}_{1n}, \underline{T}_{2n}, \dots, \underline{T}_{n-1,n}$ de forma :

$$\underline{T}_{i-1,n} = \begin{bmatrix} f_{11}^{i-1,n} & f_{12}^{i-1,n} & f_{13}^{i-1,n} & f_{14}^{i-1,n} \\ f_{21}^{i-1,n} & f_{22}^{i-1,n} & f_{23}^{i-1,n} & f_{24}^{i-1,n} \\ f_{31}^{i-1,n} & f_{32}^{i-1,n} & f_{33}^{i-1,n} & f_{34}^{i-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.169)$$

- se scriu relații de forma (5.78), identificându-se elementele componente ale matricii de transformare omogenă \underline{D}_n , după cum urmează :

$$\begin{aligned} n_x &= f_{11}^{i-1,n} & e_x &= f_{12}^{i-1,n} & a_x &= f_{13}^{i-1,n} & p_x &= f_{14}^{i-1,n} \\ n_y &= f_{21}^{i-1,n} & e_y &= f_{22}^{i-1,n} & a_y &= f_{23}^{i-1,n} & p_y &= f_{24}^{i-1,n} \\ n_z &= f_{31}^{i-1,n} & e_z &= f_{32}^{i-1,n} & a_z &= f_{33}^{i-1,n} & p_z &= f_{34}^{i-1,n} \end{aligned} \quad (5.170)$$

- dependent de tipul cuplei cinematice $i-1, i$ (rotație sau translație) ce determină componentele vectorului diferențial de mișcare :

$$d\bar{z}_i^{(n)} = \left\{ \bar{d}_i^{(n)} \mid \bar{\delta}_i^{(n)} \right\}^T \quad (5.171)$$

cu relațiile (5.164) respectiv (5.167), obținându-se în final relații de forma :

$$\begin{aligned} \bar{d}_i^{(n)} &= \left\{ dx_i^{(n)} \mid dy_i^{(n)} \mid dz_i^{(n)} \right\}^T \\ \bar{\delta}_i^{(n)} &= \left\{ \delta x_i^{(n)} \mid \delta y_i^{(n)} \mid \delta z_i^{(n)} \right\}^T \end{aligned} \quad (5.172)$$

- coloana i a matricii Jacobi se obține cu relația :

$$\frac{\partial \underline{T}_{i-1,n}}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial q_i} \begin{bmatrix} \bar{d}_i^{(n)} \\ \bar{\delta}_i^{(n)} \end{bmatrix} \quad (5.173)$$

- se scrie matricia Jacobi și conform relației (5.158)

se obține :

$$\begin{bmatrix} dx^{(n)} \\ dy^{(n)} \\ dz^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_1^{(n)} & dx_2^{(n)} & dx_3^{(n)} & \dots & dx_i^{(n)} & \dots & dx_n^{(n)} \\ dy_1^{(n)} & dy_2^{(n)} & dy_3^{(n)} & \dots & dy_i^{(n)} & \dots & dy_n^{(n)} \\ dz_1^{(n)} & dz_2^{(n)} & dz_3^{(n)} & \dots & dz_i^{(n)} & \dots & dz_n^{(n)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} dq_1 \\ dq_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_x(n) \\ \delta_y(n) \\ \delta_z(n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{x_1}(n) & \delta_{x_2}(n) & \delta_{x_3}(n) & \dots & \delta_{x_i}(n) & \dots & \delta_{x_n}(n) \\ \delta_{y_1}(n) & \delta_{y_2}(n) & \delta_{y_3}(n) & \dots & \delta_{y_i}(n) & \dots & \delta_{y_n}(n) \\ \delta_{z_1}(n) & \delta_{z_2}(n) & \delta_{z_3}(n) & \dots & \delta_{z_i}(n) & \dots & \delta_{z_n}(n) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} dq_1 \\ \vdots \\ dq_n \end{bmatrix} \quad (5.174)$$

6×1
 $6 \times n$
 $n \times 1$

Membrul stîng al relației (5.174) definește elementele componente ale matricii $\underline{\Delta}^{(n)}$, relația (5.151)

$$\underline{\Delta}^{(n)} = \begin{bmatrix} \bar{\delta}^{(n)} & \bar{\sigma}^{(n)} \\ \bar{\sigma}^T & 0 \end{bmatrix}$$

Inmulțind la stînga cu matricia \underline{T}_{on} :

$$\underline{T}_{on} = \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{\sigma} & \bar{a} & \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

conform relației (5.151) ce obține matricia deplasărilor elementare, exprimate în R_n :

$$d \underline{T}_{on} = \begin{bmatrix} dn_x & d\sigma_x & da_x & dp_x \\ dn_y & d\sigma_y & da_y & dp_y \\ dn_z & d\sigma_z & da_z & dp_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.175)$$

care poate servi și la calculul preciziei unui mecanism de orientare.

Inversa matricii Jacobi, permite calculul variațiilor coordonatelor generalizate $d\bar{q}$ în funcție de variația vectorului diferențial de mișcare $d\bar{z}^{(n)}$:

$$d\bar{q} = J(\bar{q})^{-1} \cdot d\bar{z}^{(n)} \quad (5.176)$$

sau

$$\begin{bmatrix} dq_1 \\ dq_2 \\ \vdots \\ dq_i \\ \vdots \\ dq_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \bar{d}_i^{(n)} \\ \bar{\delta}_i^{(n)} \end{bmatrix}_{n \times 6} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\sigma}^{(n)} \\ \bar{\delta}^{(n)} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (5.177)$$

Existența matricii inverse este condiționată de nesingularitatea matricii Jacobi.

Matricia $\underline{A}_{i-1,i}$ de transformare lumară, relația (5.72),

permite calculul matricilor de transformare pentru viteze și accelerații utilizând operatori matriceali de derivare, \underline{Q} .

Astfel :

$$\dot{\underline{A}}_{i-1,i} = \frac{\partial \underline{A}_{i-1,i}}{\partial q_i} \cdot \dot{q}_i \quad (5.178)$$

unde :

$$\frac{\partial \underline{A}_{i-1,i}}{\partial q_i} = \underline{Q}_q \cdot \underline{A}_{i-1,i} \quad (5.179)$$

în care operatorul \underline{Q}_q este dependent de tipul mișcării relative din cupla cinematică: [B5]; [P4]; [P6]; [M11]; [U1].

Pentru cupla cinematică de rotație: $q_i = \varphi_i(t)$:

$$\underline{Q}_\varphi = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.180)$$

Pentru cupla cinematică de translație: $q_i = d_i(t)$:

$$\underline{Q}_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.181)$$

Poziția elementului i în raport cu elementul fix se determină cu ajutorul matricei de transformare :

$$\underline{T}_{0i} = \underline{A}_{01} \underline{A}_{12} \underline{A}_{23} \dots \underline{A}_{i-1,i} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (5.182)$$

Din însumarea mișcării relative cu cea de transport.

$$\underline{T}_{0i} = \underline{T}_{0,i-1} \underline{A}_{i-1,i} \quad (5.183)$$

se obține matricea de transformare pentru viteze, exprimată față de elementul fix :

$$\dot{\underline{T}}_{0i} = (\dot{\underline{T}}_{0i})_t + (\dot{\underline{T}}_{0i})_r \quad (5.184)$$

$$(\dot{\underline{T}}_{0i})_t = \dot{\underline{T}}_{0,i-1} \underline{A}_{i-1,i} \quad (5.185)$$

$$(\dot{\underline{T}}_{0i})_r = \underline{T}_{0,i-1} \underline{Q}_q \underline{A}_{i-1,i} \dot{q}_i \quad (5.186)$$

unde:

$$\dot{\underline{T}}_{0,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \underline{A}_{01} \underline{A}_{12} \dots \underline{A}_{j-2,j-1} \underline{Q}_q \underline{A}_{j-1,j} \dot{q}_j \quad (5.187)$$

sau

$$\ddot{T}_{0,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial T_{0,i-1}}{\partial q_j} \dot{q}_j \quad (5.187')$$

Matricea de transformare pentru accelerații exprimată față de elementul fix, se obține prin derivarea relației (5.184) :

$$\begin{aligned} \ddot{T}_{0i} = \ddot{T}_{0,i-1} A_i + T_{0,i-1} Q_q (A_{i-1,i} \ddot{q}_i + Q_{qA_{i-1,i}} \dot{q}_i^2) + \\ + 2\dot{T}_{0,i-1} Q_{qA_{i-1,i}} \dot{q}_i \end{aligned} \quad (5.188)$$

unde :

$$\ddot{T}_{0,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial}{\partial q_j} \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial T_{0,i-1}}{\partial q_k} \dot{q}_k \quad (5.189)$$

5.3. Considerații privind analiza dinamică a mecanismelor de orientare

O analiză dinamică completă conține o analiză dinamică a structurii de manipulare (lanțul cinematic al mecanismului de orientare) și o analiză dinamică a sistemului de acționare (a motoarelor).

Utilizînd formalismul Lagrange, adaptat calculului automat, potențialul cinetic este definit [69], ca diferența dintre energia cinetică E_c și cea potențială E_p a sistemului :

$$\mathcal{L} = E_c - E_p \quad (5.190)$$

Ecuațiile dinamice clasice pentru sisteme olonome :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.191)$$

se exprimă funcție de coordonata q , viteza \dot{q}_i și forța Q_i generalizată.

Un punct material aparținînd elementului i , definit în sistemul propriu R_i prin vectorul de poziție $\bar{\rho}_i^{(i)} = \{ \bar{r}_i^{(i)} \mid 1 \}^T$, se exprimă în sistemul fix prin vectorul de poziție

$$\bar{\rho}_i^{(0)} = \{ \bar{r}_i^{(0)} \mid 1 \}^T, \text{ conform relațiilor (5.6) și (5.77), cu :}$$

$$\bar{\rho}_i^{(0)} = \underline{T}_{oi} \bar{\rho}_i^{(i)} \quad (5.192)$$

iar viteza, conform relației (5.187') are expresia :

$$\dot{\bar{\rho}}_i^{(0)} = \left(\sum_{j=1}^i \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) \bar{\rho}_i^{(i)} \quad (5.193)$$

Pătratul vitezei exprimat prin produsul scalar :

$$(\dot{\bar{\rho}}_i^{(0)})^2 = \dot{\bar{\rho}}_i^{(0)} \cdot \dot{\bar{\rho}}_i^{(0)} \quad (5.194)$$

sau în exprimare matriceală operatorul TRACE, prin care se determină urma matricii, cu relația :

$$(\dot{\bar{\rho}}_i^{(0)})^2 = \text{TR} (\dot{\bar{\rho}}_i^{(0)} \cdot \dot{\bar{\rho}}_i^{(0)T}) \quad (5.195)$$

și înlocuind în relația (5.193) se obține :

$$(\dot{\bar{\rho}}_i^{(0)})^2 = \text{TR} \left[\sum_{j=1}^i \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_j} \dot{q}_j \bar{\rho}_i^{(i)} \left(\sum_{k=1}^i \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_k} \dot{q}_k \bar{\rho}_i^{(i)} \right)^T \right] \quad (5.196)$$

$$= \text{TR} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_j} \bar{\rho}_i^{(i)} \bar{\rho}_i^{(i)T} \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_k} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (5.197)$$

Energia cinetică a unui punct material de masă dm , localizat în reperul R_i , al elementului i , prin vectorul $\bar{\rho}_i^{(i)}$, se determină cu relația :

$$dE_{c_i} = \frac{1}{2} \text{TR} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_j} \bar{\rho}_i^{(i)} \bar{\rho}_i^{(i)T} \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] dm \quad (5.198)$$

iar energia cinetică a elementului i , exprimată ca suma energiilor cinetice ale tuturor punctelor materiale ale elementului i , prin relația :

$$E_{c_i} = \int_{(M_i)} dE_{c_i} = \frac{1}{2} \text{TR} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_j} \left(\int_{(M_i)} \bar{\rho}_i^{(i)} \bar{\rho}_i^{(i)T} dm \right) \frac{\partial \underline{T}_{oi}}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \quad (5.199)$$

Integrala extinsă pe toate punctele materiale ale elementului i , constituie de fapt matricea de inerție J_i :

$$J_i = \int \bar{\rho}_i^{(i)} \bar{\rho}_i^{(i)T} dm =$$

$$\begin{bmatrix} \int_{(M_i)} x_i^2 dm & \int_{(M_i)} x_i y_i dm & \int_{(M_i)} x_i z_i dm & \int_{(M_i)} x_i dm \\ \int_{(M_i)} y_i x_i dm & \int_{(M_i)} y_i^2 dm & \int_{(M_i)} y_i z_i dm & \int_{(M_i)} y_i dm \\ \int_{(M_i)} z_i x_i dm & \int_{(M_i)} z_i y_i dm & \int_{(M_i)} z_i^2 dm & \int_{(M_i)} z_i dm \\ \int_{(M_i)} x_i dm & \int_{(M_i)} y_i dm & \int_{(M_i)} z_i dm & \int_{(M_i)} dm \end{bmatrix} \quad (5.200)$$

Tinînd cont de expresia momentelor de inerție axiale și centrifugale în raport cu originea reperului R_i :

$$\begin{aligned} J_{xx} &= \int_{(M)} x^2 dm = \int_{(M)} (y^2 + z^2) dm ; & J_{xy} &= J_{yx} = \int_{(M)} xy dm \\ J_{yy} &= \int_{(M)} y^2 dm = \int_{(M)} (z^2 + x^2) dm ; & J_{yz} &= J_{zy} = \int_{(M)} yz dm \\ J_{zz} &= \int_{(M)} z^2 dm = \int_{(M)} (x^2 + y^2) dm ; & J_{zx} &= J_{xz} = \int_{(M)} xz dm \end{aligned} \quad (5.201)$$

și a momentelor statice mecanice :

$$\int_{(M)} x dm = M \cdot x_G ; \quad \int_{(M)} y dm = M \cdot y_G ; \quad \int_{(M)} z dm = M \cdot z_G \quad (5.202)$$

se obține matricea de inerție \underline{J}_i :

$$\underline{J}_i = \begin{bmatrix} \frac{-J_{ixx} + J_{iyy} + J_{izz}}{2} & J_{ixy} & J_{ixz} & M_i x_{Gi} \\ J_{ixy} & \frac{J_{ixx} - J_{iyy} + J_{zz}}{2} & J_{iyz} & M_i y_{Gi} \\ J_{ixz} & J_{iyz} & \frac{J_{ixx} + J_{iyy} - J_{zz}}{2} & M_i z_{Gi} \\ M_i x_{Gi} & M_i y_{Gi} & M_i z_{Gi} & M_i \end{bmatrix} \quad (5.203)$$

Energia cinetică totală a elementelor componente ale structurii mecanismului de orientare se determină prin :

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_{ci} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{TR} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_{oi}}{\partial q_j} J_i \frac{\partial T_{oi}}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \quad (5.204)$$

Energia cinetică a sistemului de acționare al elementului pentru motoare rotative are expresia :

$$E_{ca} = \frac{1}{2} J_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (5.205)$$

iar pentru motoare liniare :

$$E_{ca} = \frac{1}{2} M_i \dot{q}_i^2 \quad (5.206)$$

În final expresia energiei cinetice devine :

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{TR} \left(\frac{\partial T_{oi}}{\partial q_j} J_i \frac{\partial T_{oi}}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n J_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (5.207)$$

Energia potențială a elementului de masă M_i ce are centrul de masă localizat de vectorul $\bar{S}_{Gi}^{(i)} = \left\{ \bar{r}_{Gi}^{(i)} \right\}_1^T$ în reperul R_i , are expresia :

$$E_{pi} = - M_i \bar{g}^T T_{oi} \bar{S}_{Gi}^{(i)} \quad (5.208)$$

ceea ce conduce pentru toate elementele structuri de manipulare la :

$$E_p = - \sum_{i=1}^n M_i \bar{g}^T T_{oi} \bar{S}_{Gi}^{(i)} \quad (5.209)$$

unde vectorul accelerație gravitațională are expresia :

$$\bar{g} = \{ g_x \ g_y \ g_z \ 0 \}^T \quad (5.210)$$

Formînd lagrangeanul conform relației (5.190)

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{TR} \left(\frac{\partial T_{oi}}{\partial q_j} J_i \frac{\partial T_{oi}}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n J_{ai} \dot{q}_i^2 - \sum_{i=1}^n M_i \bar{g}^T T_{oi} \bar{S}_{Gi}^{(i)} \quad (5.211)$$

prin derivare rezultă :

$$\sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \text{TR} \left(\frac{\partial T_{oj}}{\partial q_k} J_j \frac{\partial T_{oj}}{\partial q_i} \right) \ddot{q}_k + J_{ai} \ddot{q}_i +$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{TR} \left(\frac{\partial^{2T} o_j}{\partial q_k \partial q_m} \mathbf{J}_i \frac{\partial^{T} o_j}{\partial q_j} \right) \dot{q}_k \dot{q}_m - \quad (5.212) \\
 & - \sum_{j=i}^n M_j \frac{\partial^{T} o_j}{\partial q_j} \bar{\mathcal{S}}_{G_i}^{(1)} = Q_i
 \end{aligned}$$

O aplicație pentru un mecanism de orientare cu trei grade de mobilitate a fost tratată în [R4].

5.4. Determinarea unghiului de serviciu al unui mecanism de orientare

Geometria mișcării obiectului manipulat se caracterizează prin traiectoria m a punctului caracteristic M și a suprafeței riglate (S δ) de dreapta caracteristică (δ) și (S δ') de cea auxiliară (δ')—figura 5.18.a.

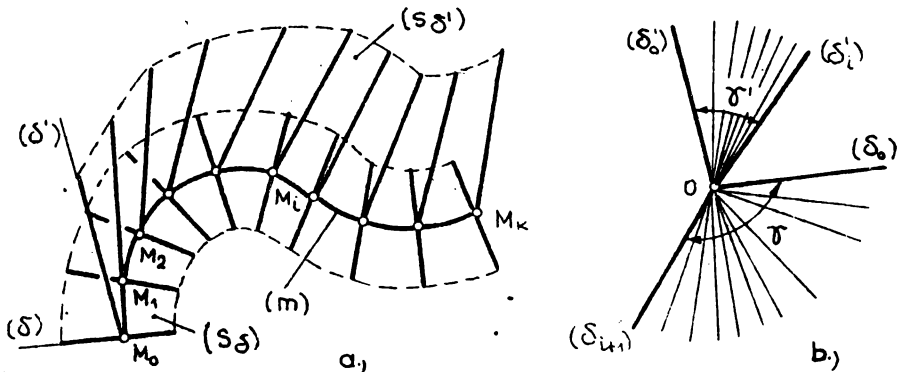


Fig. 5.18. Geometria mișcării obiectului manipulat: a) traiectoria punctului caracteristic (m) și suprafețele riglate de dreapta caracteristică (S δ) și auxiliară (S δ'); b) unghi de serviciu (δ) și unghi auxiliar (δ')

Operația de manipulare poate impune ca punctul caracteristic să descrie o traiectorie bine precizată sau să ocupe la anumite momente bine definite, un număr finit de poziții M_i , $i=1,2,\dots,k$, (puncte sau poziții de precizie).

Admițând că într-un punct O se duc paralele la mulțimea pozițiilor pe care le poate ocupa dreapta caracteristică în timpul operației de manipulare, se obține unghiul solid cu

vîrful în M_0 numit unghi de serviciu γ (fig.5.18.b) a cărei valoare se determină cu relația (3.15). În mod similar s-a definit [C4] unghiul auxiliar (γ').

Fasciculul de drepte caracteristice, concurente în punctul M_0 , se înscrie pe suprafațe conice oarecare, avînd la bază o curbă oarecare.

O suprafață riglată este o suprafață obținută prin mișcarea unei drepte generatoare (g). Notînd cu $\vec{r}_{M_0}(u)$ vectorul de poziție al unui punct M_0 de pe dreapta generatoare, care descrie o curbă directoare (Γ_0) și cu $\vec{a}(u)$ versorul dreptei generatoare, variabil ca direcție și sens, vectorul de poziție al unui punct M al suprafeței se exprimă prin :

$$\vec{r}(u,v) = \vec{r}_{M_0}(u) + v\vec{a}(u) \quad (5.213)$$

Pentru ca suprafața riglată să fie și desfășurabilă trebuie ca tangenta, într-un punct P , la o curbă oarecare (Γ) a suprafeței, să coincidă cu generatoarea, adică :

$$d\vec{r} = d\vec{r}_{M_0} + dv\vec{a} + v d\vec{a} = t\vec{a} \quad (5.214)$$

sau

$$d\vec{r}_{M_0} + (dv-t)\vec{a} + v d\vec{a} = 0 \quad (5.215)$$

ceea ce revine la condiția necesară și suficientă ca vectorii $d\vec{r}_{M_0}$, $d\vec{a}$ și \vec{a} să fie coplanari.

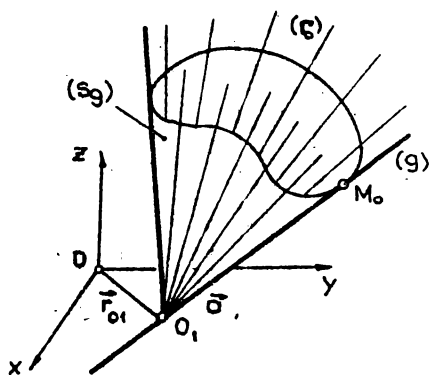


Fig. 5.19. Suprafața conică riglată de o dreaptă directoare (g)

Suprafața generată de dreapta generatoare (g), care trece printr-un punct fix O_1 și se sprijină pe o curbă directoare (Γ_0) va fi un con -figura 5.19.

Considerînd ecuația vectorială a dreptei generatoare :

$$\vec{r} = \vec{r}_{O_1} + t\vec{a} \quad (5.216)$$

unde t este parametrul dreptei, iar componentele versorului $\vec{a} = \{a_x, a_y, a_z\}^T$ satisfac relația :

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1 \quad (5.217)$$

$$a_x = \frac{x_{M_0} - x_{O_1}}{\|\bar{r}_{M_0} - \bar{r}_{O_1}\|}; \quad a_y = \frac{y_{M_0} - y_{O_1}}{\|\bar{r}_{M_0} - \bar{r}_{O_1}\|}; \quad a_z = \frac{z_{M_0} - z_{O_1}}{\|\bar{r}_{M_0} - \bar{r}_{O_1}\|} \quad (5.218)$$

ecuația carteziană a dreptei generatoare devine :

$$\begin{cases} \frac{x - x_{O_1}}{z - z_{O_1}} = \lambda \\ \frac{y - y_{O_1}}{z - z_{O_1}} = \mu \end{cases} \quad (5.219)$$

ecuațiile curbei generatoare (Γ_0) fiind

$$\begin{cases} x = x(v) \\ y = y(v) \\ z = z(v) \end{cases} \quad (5.220)$$

prin eliminarea parametrului v între ecuațiile dreptei generatoare și a curbei generatoare se obține ecuația generală a conului:

$$\varphi(\lambda, \mu) = 0 \quad (5.221)$$

În caz particular, dacă punctul fix O_1 este chiar originea reperului fix :

$$\bar{r} = t \cdot \bar{a} \implies x = \lambda z \quad \text{și} \quad y = \mu z \quad (5.222)$$

Pentru a obține valoarea unghiului solid τ se determină aria porțiunii de sferă, decupată de con, într-o suprafață sferică cu centrul în vârful conului.

Prin atașarea bazei ortonormate \bar{n} , \bar{e} și \bar{a} dispozitivului de prehensiune, orientarea sa în reperul fix, în tot timpul operației de manipulare este bine definită.

Valoarea unghiului ε închis de pozițiile extreme ale dreptei caracteristice și ε' pentru dreapta auxiliară, la momentele 0 și t , permit determinarea unghiului de servicii cu relațiile [C4] :

$$\tau_{\max} = 2 \varepsilon_{\max} \quad \text{respectiv} \quad \tau'_{\max} = 2 \varepsilon'_{\max} \quad (5.223)$$

Intrucît \bar{a} este și versorul dreptei caracteristice, unghiul ε închis de pozițiile dreptei (δ) la momentele 0 și t se determină cu relația :

$$\varepsilon_{ot} = \arccos \frac{a_{x_0} a_{xt} + a_{y_0} a_{yt} + a_{z_0} a_{zt}}{\sqrt{a_{x_0}^2 + a_{y_0}^2 + a_{z_0}^2} \sqrt{a_{xt}^2 + a_{yt}^2 + a_{zt}^2}} \quad (5.224)$$

Pentru unghiul auxiliar orientarea versorului $\bar{\sigma}$ (fig.5.8) al dreptei (δ') în momentele 0 și t conduce la o relație similară :

$$\varepsilon'_{ot} = \arccos \frac{\sigma_{x0} \sigma_{xt} + \sigma_{y0} \sigma_{yt} + \sigma_{z0} \sigma_{zt}}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{y0}^2 + \sigma_{z0}^2} \sqrt{\sigma_{xt}^2 + \sigma_{yt}^2 + \sigma_{zt}^2}} \quad (5.225)$$

Pentru mecanismele de orientare cu un grad de mobilitate fig.5.12, relațiile (5.88) conduc la :

$$\varepsilon_{ot} = \arccos 1 = 0 \quad (5.226)$$

$$\varepsilon'_{ot} = \arccos [\cos (\varphi_{1t} - \varphi_{10})] = \varphi_{1t} - \varphi_{10}$$

Pentru mecanismele de orientare cu $M=2$, cu relațiile (5.95) se obțin :

$$\varepsilon_{ot} = \varphi_{1t} - \varphi_{10} \quad (5.227)$$

$$\varepsilon'_{ot} = \arccos [\cos(\varphi_{1t} - \varphi_{10}) \sin \varphi_{2t} \sin \varphi_{20} + \cos \varphi_{2t} \cos \varphi_{20}]$$

Pentru mecanismele de orientare cu $M=3$, cu relațiile (5.102) rezultă :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ot} &= \arccos [\cos(\varphi_{1t} - \varphi_{10}) \sin \varphi_{2t} \sin \varphi_{20} + \cos \varphi_{2t} \cos \varphi_{20}] \\ \varepsilon'_{ot} &= \arccos [\cos(\varphi_{1t} - \varphi_{10}) (\cos \varphi_{2t} \cos \varphi_{20} + \sin \varphi_{3t} \sin \varphi_{30} + \cos \varphi_{3t} \cos \varphi_{30}) + \\ &\quad + \sin(\varphi_{1t} - \varphi_{10}) (\cos \varphi_{20} \sin \varphi_{30} \cos \varphi_{3t} - \cos \varphi_{2t} \cos \varphi_{30} \sin \varphi_{3t}) + \\ &\quad + \sin \varphi_{2t} \sin \varphi_{20} \sin \varphi_{3t} \sin \varphi_{30}] \quad (5.228) \end{aligned}$$

5.5. Sinteza mișcării relative a elementelor cuplelor cinematice conducătoare ale mecanismului de orientare

Pentru mecanismul de orientare din fig.5.20, se determină legile de variație a momentelor motoare, care trebuie să acționeze în cuplele cinematice conducătoare.

Neglijînd frecările s-au determinat reacțiunile R_{ij} și momentele M_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) din cuplele cinematice conducătoare dependent de solicitările exterioare.

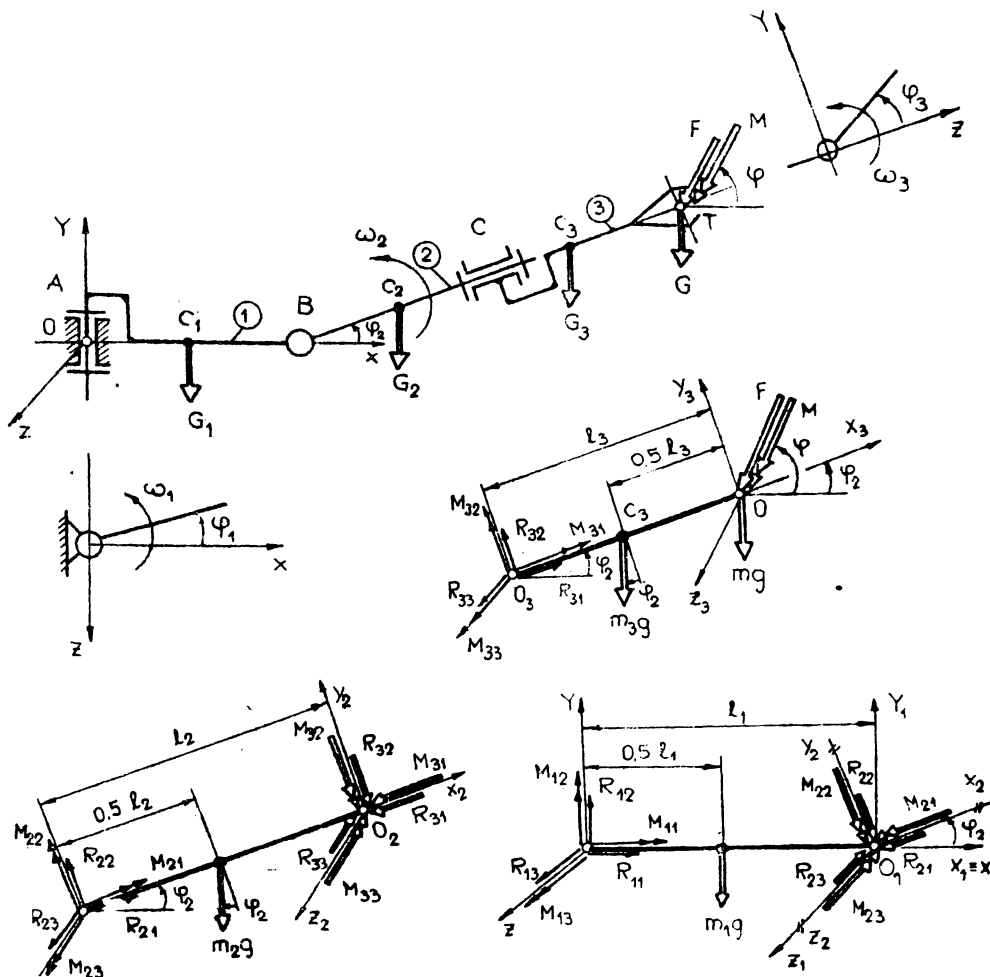


Fig. 5.20. Determinarea reacțiilor și momentelor din cuplele cinematice conducătoare ale unui mecanism de orientare cu $M=3$.

$$\begin{bmatrix} R_{31} \\ R_{32} \\ R_{33} \\ R_{21} \\ R_{22} \\ R_{23} \\ R_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & 0 & 0 & a_{17} & a_{18} & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & a_{25} & 0 & a_{27} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{34} & 0 & 0 & a_{37} & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 & 0 & 0 & a_{47} & a_{49} & 0 \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 & a_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & 0 & 0 & a_{67} & 0 & 0 \\ a_{71} & 0 & 0 & 0 & a_{75} & 0 & a_{77} & a_{78} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ M \\ z \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \omega_1 \end{bmatrix} \quad (5.229)$$

$$\begin{bmatrix} R_{12} \\ R_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{81} & 0 & a_{83} & 0 & a_{85} & 0 & 0 & a_{88} & 0 \\ \varepsilon_{91} & 0 & 0 & a_{94} & 0 & 0 & a_{97} & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_2^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \end{bmatrix}$$

Elementele nenule ε_{kl} ($k, l = 1, 2, \dots, 9$) au următoarele expresii :

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{41} = \cos(\varphi - \varphi_2) & a_{21} &= a_{51} = \sin(\varphi - \varphi_2) \\ a_{74} &= \cos\varphi \cos\varphi_1 & a_{81} &= \sin\varphi & a_{91} &= \cos\varphi \cos\varphi_1 \\ a_{13} &= (m_3 + m) \sin\varphi_2 & a_{23} &= (m_3 + m) \cos\varphi_2 \\ a_{43} &= (m_2 + m_3 + m) \sin\varphi_2 & a_{53} &= (m_2 + m_3 + m) \cos\varphi_2 \\ a_{83} &= m_1 + m_2 + m_3 + m & a_{25} &= m_3 l_2 \\ a_{34} &= -m_3 [l_1 + (1_2 + 0,5 l_3) \cos\varphi_2] & a_{55} &= 0,5 m_2 l_2 + a_{25} \\ a_{64} &= -m_2 (l_1 + 0,5 l_2 \cos\varphi_2) + a_{34} & a_{75} &= -a_{55} \sin\varphi_2 \\ a_{94} &= -0,5 m_1 l_1 + a_{64} & a_{85} &= a_{55} \cos\varphi_2 \\ a_{17} &= a_{34} \cos\varphi_2 & a_{27} &= a_{34} \sin\varphi_2 & (5.230) \\ a_{37} &= 2m_3 \frac{\omega_2}{\omega_1} l_2 \sin\varphi_2 & a_{57} &= -a_{64} \sin\varphi_2 \\ a_{47} &= a_{64} \cos\varphi_2 & a_{77} &= -m_1 l_1 + a_{64} \\ a_{67} &= a_{97} = (m_2 + 2m_3) \frac{\omega_2}{\omega_1} l_2 \sin\varphi_2 & a_{48} &= 0,5(m_2 + m_3) l_2 \\ a_{18} &= -a_{25} & a_{88} &= -a_{55} \sin\varphi_2 \\ a_{78} &= -a_{55} \cos\varphi_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} M_{31} \\ M_{32} \\ M_{33} \\ M_{21} \\ M_{22} \\ M_{23} \\ M_{11} \\ M_{12} \\ M_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & 0 & b_{14} & 0 & b_{16} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & b_{24} & 0 & 0 & b_{27} & 0 & 0 \\ b_{31} & 0 & b_{33} & 0 & 0 & 0 & b_{37} & 0 & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 & b_{44} & 0 & b_{46} & b_{47} & 0 & 0 \\ 0 & b_{52} & 0 & b_{54} & 0 & 0 & b_{57} & 0 & 0 \\ b_{61} & 0 & b_{63} & 0 & b_{65} & 0 & b_{67} & 0 & 0 \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & b_{74} & b_{75} & b_{76} & b_{77} & 0 & 0 \\ b_{81} & b_{82} & 0 & b_{84} & 0 & b_{86} & b_{87} & 0 & 0 \\ b_{91} & b_{92} & b_{93} & b_{94} & b_{95} & b_{96} & b_{97} & b_{98} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F \\ M \\ g \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \end{bmatrix} \quad (5.231)$$

Elementele nenule b_{kl} ($k, l = 1, 2, \dots, 9$) au următoarele expresii :

$$\begin{aligned}
 b_{31} &= l_3 \sin(\varphi - \varphi_2) & b_{61} &= (l_2 + l_3) \sin(\varphi - \varphi_2) \\
 b_{71} &= b_{61} \sin \varphi_1 & b_{81} &= 0,5 l_1 \cos \varphi \sin \varphi_1 \\
 b_{91} &= b_{61} \cos \varphi_1 + 0,5 l_1 \sin \varphi & b_{72} &= \cos \varphi \cos \varphi_1 \\
 b_{12} &= b_{42} = \cos(\varphi - \varphi_2) & b_{82} &= \sin \varphi \\
 b_{22} &= b_{52} = \sin(\varphi - \varphi_2) & b_{92} &= \cos \varphi \sin \varphi_1 \\
 b_{33} &= 0,5(m+m_3)l_3 \cos \varphi_2 \\
 b_{63} &= [0,5 m_2 l_2 + m_3(0,5 l_2 + l_3) + m(l_2 + 0,5 l_3)] \cos \varphi_2 \\
 b_{73} &= b_{63} \sin \varphi_1 \\
 b_{93} &= 0,5(m_1 + m_2 + m_3 + m)l_1 + b_{63} \cos \varphi_1 \\
 b_{14} &= J_{11}^{(3)} \sin \varphi_2 & b_{24} &= a_{34} + J_{22}^{(3)} \\
 b_{44} &= (J_{11}^{(2)} + J_{11}^{(3)}) \sin \varphi_2 \\
 b_{54} &= +0,5 m_2 l_2 (l_1 + 0,5 l_2 \cos \varphi_2) - a_{34} (l_2 - l_1) + J_{22}^{(2)} \cos \varphi_2 + J_{22}^{(3)} \\
 b_{74} &= [-b_{54} + (J_{11}^{(2)} + J_{11}^{(3)}) \cos \varphi_2] \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\
 b_{84} &= 0,25 m_1 l_1^2 + m_2 (l_1 + 0,5 l_2 \cos \varphi_2)^2 - a_{34} [l_1 + (l_2 - l_1) \cos \varphi_2] + \\
 &+ (J_{11}^{(2)} + J_{11}^{(3)}) \sin^2 \varphi_2 + J_{22}^{(2)} \cos^2 \varphi_2 + J_{22}^{(3)} \cos \varphi_2 + J_{22}^{(1)} \\
 b_{94} &= [-b_{54} + (J_{11}^{(2)} + J_{11}^{(3)}) \cos \varphi_2] \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \\
 b_{65} &= (0,25 m_2 + m_3) l_2^2 + J_{33}^{(2)} & b_{75} &= b_{65} \cdot \sin \varphi_1 \\
 b_{95} &= b_{65} \cos \varphi_1 + (0,25 m_2 + 0,5 m_3) l_1 l_2 \cos \varphi_2 + J_{33}^{(2)} \cos \varphi_1 \\
 b_{16} &= b_{46} = J_{11}^{(3)} & b_{76} &= b_{16} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \\
 b_{15} &= b_{15} \cdot \sin \varphi_2 & b_{96} &= b_{16} \cdot \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \\
 b_{27} &= -m_3 \frac{\omega_2}{\omega_1} l_2 l_3 \sin \varphi_2 \\
 b_{37} &= 0,5 a_{34} \cdot l_3 \sin \varphi_2 + 0,5 (J_{22}^{(3)} - J_{11}^{(3)}) \sin 2 \varphi_2 \\
 b_{47} &= (J_{11}^{(2)} - J_{22}^{(2)} + J_{33}^{(2)}) \frac{\omega_2}{\omega_1} \cos \varphi_2 \\
 b_{57} &= \left\{ -0,5 m_2 l_1 - m_3 (l_1 + l_2 + l_3) \right\} l_2 + J_{11}^{(2)} - J_{22}^{(2)} - J_{33}^{(2)} \left\} \frac{\omega_2}{\omega_1} \sin \varphi_2
 \end{aligned}$$

$$b_{67} = \left\{ 0,5 m_2 (l_1 + 0,5 l_2 \cos \varphi_2) l_2 + 0,5 a_{34} l_2 + \right. \\ \left. + (J_{22}^{(2)} - J_{11}^{(2)} + J_{22}^{(3)} - J_{11}^{(3)}) \cos \varphi_2 \right\} \sin \varphi_2 \quad (5.232)$$

$$b_{77} = \left\{ [0,5 m_2 (l_1 + 0,5 l_2 \cos \varphi_2) + 0,5 a_{34}] l_2 \sin \varphi_2 + \right. \\ \left. + 0,5 (J_{22}^{(2)} - J_{11}^{(2)} + J_{22}^{(3)} - J_{11}^{(3)}) \sin 2 \varphi_2 \right\} \sin \varphi_1 + \\ + \left\{ [0,5 m_2 l_1 + m_3 (l_1 + l_2 + l_3)] l_2 \sin^2 \varphi_2 + (J_{11}^{(2)} - \right. \\ \left. - J_{22}^{(2)}) \cos 2 \varphi_2 + J_{33}^{(2)} \right\} \frac{\omega_2}{\omega_1} \cos \varphi_1$$

$$b_{87} = \left\{ [-0,5 m_2 l_1 - m_3 (l_1 + l_2 + l_3)] l_2 \cos \varphi_2 - 0,5 (m_2 + \right. \\ \left. + 2m_3) l_1 (l_1 + l_2) + (J_{11}^{(2)} - J_{22}^{(2)}) \cos \varphi_2 \right\} \frac{\omega_2}{\omega_1} \sin \varphi_2$$

$$b_{97} = \left\{ [0,5 m_2 l_1 + m_3 (l_1 + l_2 + l_3)] l_2 \sin^2 \varphi_2 + J_{33}^{(2)} \cos 2 \varphi_2 + \right. \\ \left. + J_{11}^{(2)} - J_{22}^{(2)} \right\} \frac{\omega_2}{\omega_1} \sin \varphi_1 + \left\{ [0,5 m_2 (l_1 + \right. \\ \left. + 0,5 l_2 \cos \varphi_2) + 0,5 a_{34}] l_2 \sin \varphi_2 + \right. \\ \left. + 0,5 (J_{22}^{(2)} - J_{11}^{(2)} - J_{22}^{(3)} - J_{11}^{(3)}) \sin 2 \varphi_2 \right\} \cos \varphi_1$$

$$b_{98} = -0,25 (m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin \varphi_2$$

Relațiile (5.230) și (5.232) cu caracter general permit în cazuri particulare [R4] trasarea diagramelor de variație a reacțiunilor (fig.5.21) și momentelor (fig.5.22) din cuplurile cinematice conducătoare.

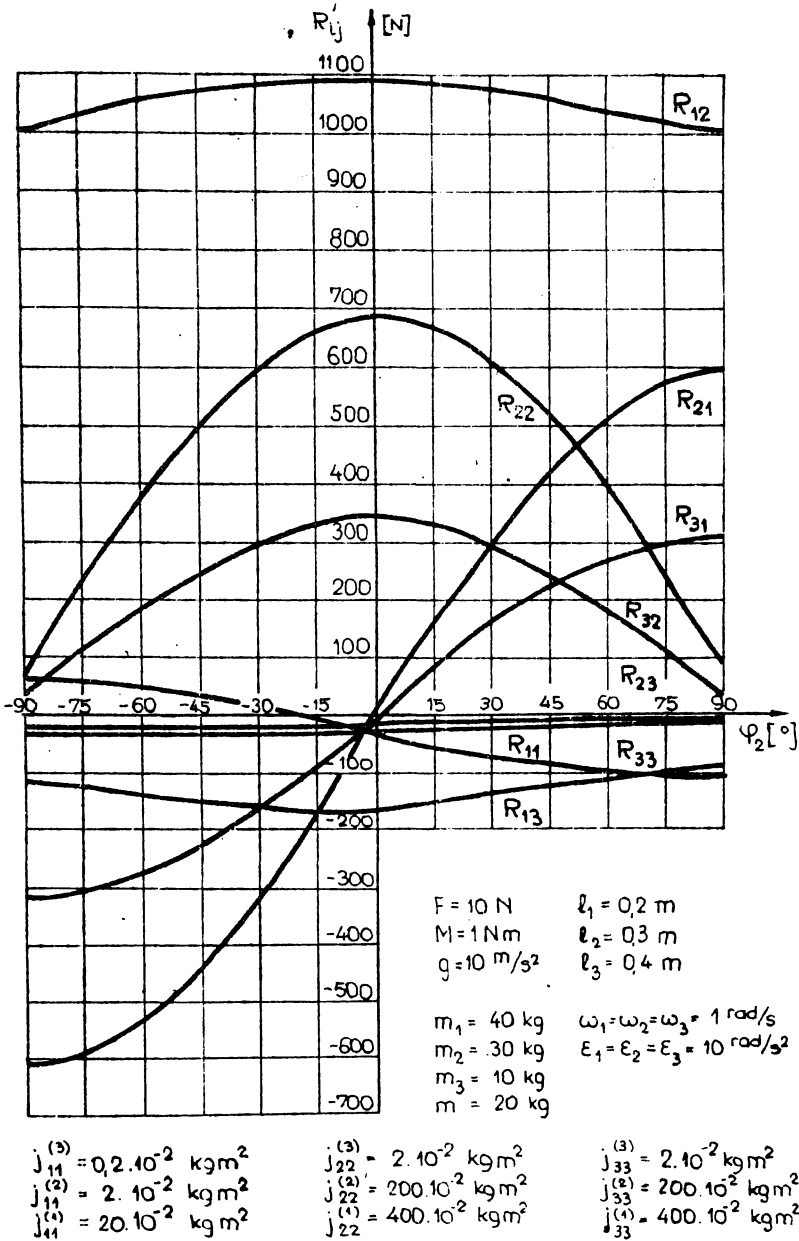


Fig. 5.21. Dependența reacțiilor de unghiul de poziție φ_2 .

Dintre momentele motoare (M_{31} , M_{23} și M_{13}) momentul $M_{13} = M_{13}(\varphi_1, \varphi_2)$ este maxim pentru $\varphi_1 = k\pi$.

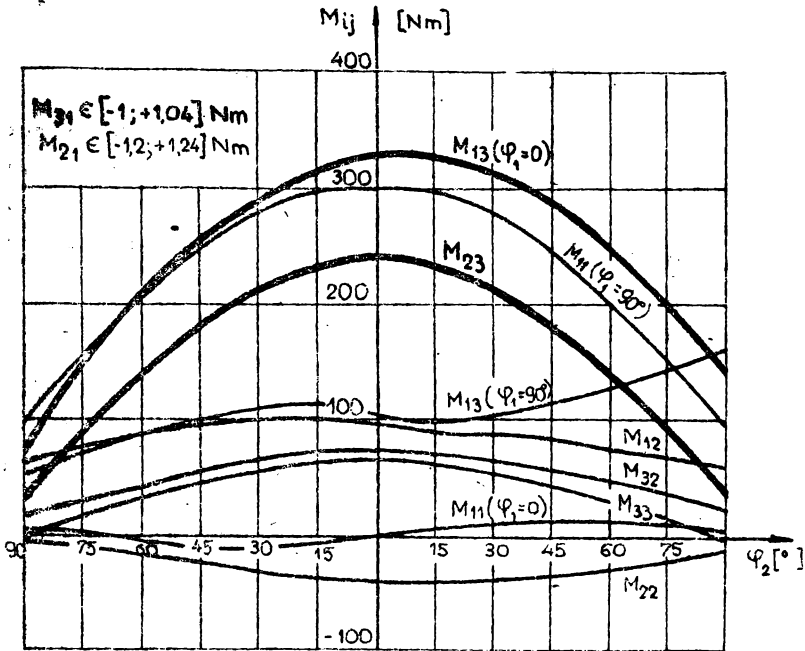


Fig. 5.22. Dependența momentelor de unghiul de poziție φ_2 .

CAPITOLUL 6.

CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND PRECIZIA SI DINAMICA ROBOTILOR INDUSTRIALI

Aplicațiile industriale ale roboților necesită executarea operațiilor cu o precizie prestabilită, ceea ce impune realizarea și menținerea în timp a tuturor mărimilor ce caracterizează operațiile respective, în conformitate cu performanțele robotului și a programului utilizat.

Precizia roboților se apreciază prin intermediul erorilor.

Principalii parametri care determină precizia unui robot industrial sînt $[K14]$; eroarea de poziție și de direcție, eroarea de traiectorie, deplasarea după acționarea întrerupătorului de siguranță și deplasarea minimă programabilă. Stabilirea performanțelor unui robot industrial se face în cadrul unui program de încercări.

Programul de încercări, prezentat în tabelul 6.1. a fost realizat pe robotul industrial REMT-3, amplasat în secția de prelucrări mecanice a întreprinderii "Electromotor" din Timișoara.

Condițiile în care s-au efectuat măsurările diferă de natura mărimilor măsurate și scopul măsurărilor.

Astfel unele mărimi au fost măsurate în regim static altele în ciclu de lucru cu comandă manuală sau automată sau în ciclu de încercare. Măsurările efectuate au avut drept scop determinarea mărimii și distribuției erorilor, a comportamentului la pornire-oprire și la funcționarea de durată a robotului, de determinare a unor distanțe și timpi de siguranță, timpi de amortizare a oscilațiilor, a funcțiilor de comandă de ordinul zero, una, doi, etc.

6.1. Stand pentru determinări privind precizia robotului industrial REMT-3

Determinările privind precizia robotului industrial REMT-3 (poz.1-figura 6.1) s-au efectuat în trei etape distincte.

Programul de încercări privind precizia și dinamica robotului industrial REMT-3 Tabelul 6.1

Nr. crt.	Mărimea măsurată	U.M.	Regimul de lucru	Parametrii		
				Cursă [%]	Sarcină [%]	Viteză [%]
1	Abaterrea sub acțiunea sarcinii	mm	static	0/50/100	40/100/130	-
2	Abaterrea în poziție de repaus	μm	static	50	40/100/130	-
3	Amplitudinea oscilațiilor la oprirea instalației	μm	ciclu automat	50/100	0/40/100	50/100
4	Precizia de repetabilitate	μm	ciclu automat	50/100	0/40/100/130	20/100
5	Eroarea de traiectorie	μm	ciclu automat	0 ÷ 100	0/40/100	50/100
6	Deplasarea după acționarea intreruptorului de siguranță	μm	ciclu automat	50/100	0/40/100	20/100
7	Deplasarea minimă programabilă	μm	ciclu automat	-	40	-
8	Timpul de realizare al curselor	s	ciclu de programare	0 ÷ 100	0/40/100	20/50/100
9	Variația vitezei	m/s	ciclu automat	50	0/40/100	20/50/100
10	Viteza medie	m/s	stabilizat	50	0/40/100	20/50/100
11	Viteza maximă	m/s	ciclu automat	100	0/40/100	100
12	Accele ratio medie	m/s ²	stabilizat	50	0/40/100	20/50/100
13	Accele ratio maximă	m/s ²	ciclu automat	100	0/40/100	100

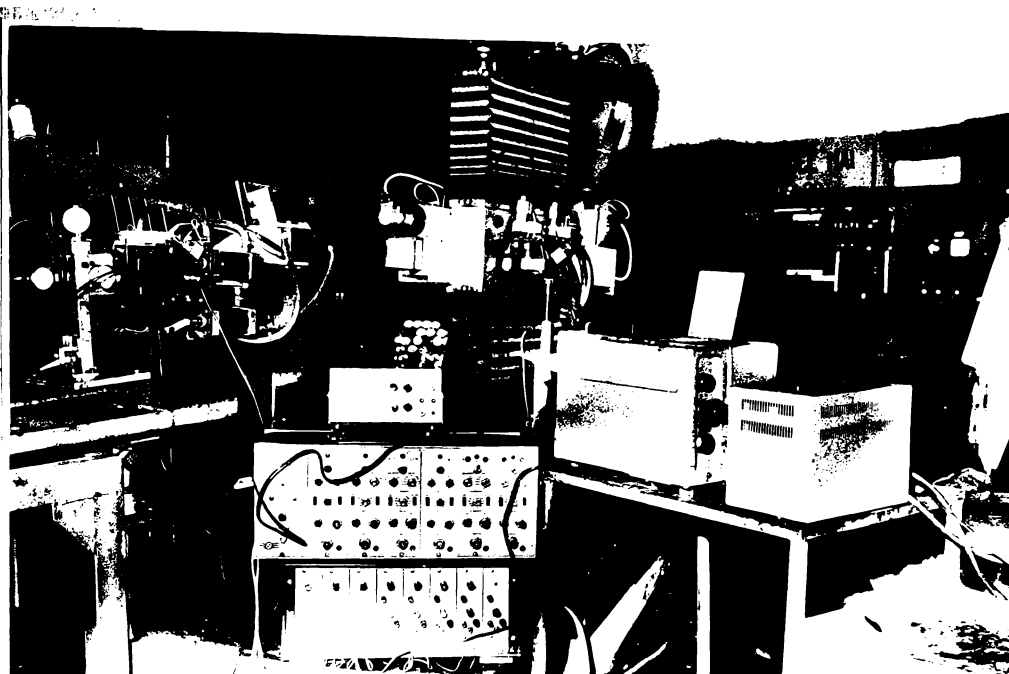


Fig.6.1. Stand pentru determinarea preciziei unui robot.

În prima etapă cu ajutorul corpului de referință cubic (poz.2) montat în dispozitivul de prehensiune al robotului și a unui cap de măsurare tridimensional (3D - poz.3) prevăzut cu trei comparatoare de precizie adecvată (0,01 mm sau 0,001 mm) s-au efectuat măsurări privind abaterea sub acțiunea sarcinii, abaterea în poziția de repaus și precizia de repetabilitate.

6.1.1. Abaterea sub acțiunea sarcinii manipulate se determină în puncte ale spațiului de lucru corespunzătoare la 0,

Abaterea sub acțiunea sarcinii Tabelul 6.2

Masa	x= 0%	x= 50%	x= 100%	x= 100%	x= 50%	x= 0%
	φ= 50%	φ= 50%	φ= 50%	φ= 100%	φ= 100%	φ= 100%
	Z= 50%	Z= 50%	Z= 50%	Z= 100%	Z= 100%	Z= 100%
	Y= 0%	Y= 50%	Y= 100%	Y= 0%	Y= 50%	Y= 100%
	Δl [mm]					
[kg]	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
9,871	0,987	1,310	1,640	0,097	1,537	1,743
17,322	2,357	3,144	3,920	1,830	2,470	2,943
26,151	2,847	3,907	4,180	3,054	3,837	4,629
33,509	3,720	4,787	5,310	3,714	4,717	5,600

50% și locuș din cursa maximă a fiecărui grad de mobilitate, manipulând sarcini de 40, 70, locuș și 130% din valoarea sarcinii maxime.

Media valorilor absolute ale deplasării Δl a punctului caracteristic la sarcini variabile discret sînt trecute în tabelul 6.2.

Din analiza valorilor și compararea diagramelor din fig. 6.2. rezultă :

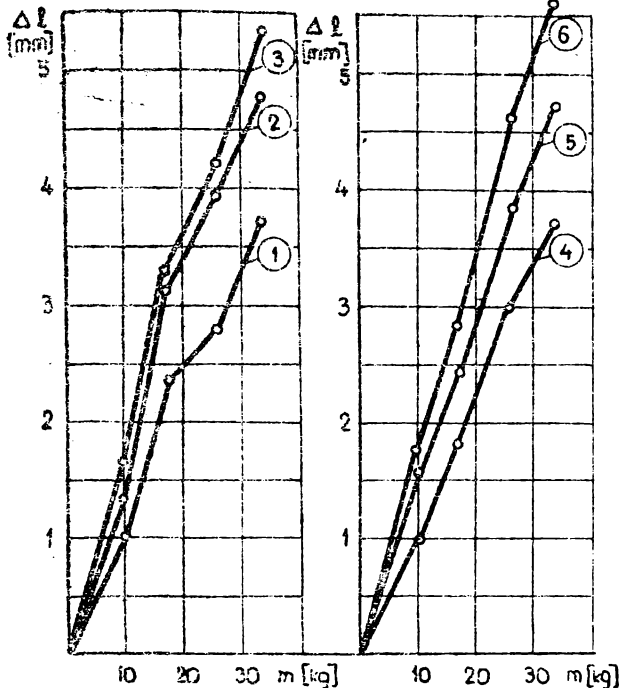


Fig.6.2. Eroarea de pozitie in regim static

6.1.2. Abateră în poziție de repaus se determină într-un punct al spațiului de lucru, considerat ca fiind cel mai frec-

a) valoarea maximă a abaterii de la poziția inițială a punctului caracteristic se obține la sarcina maximă, ea crescând cu extensia brațului robotului (curba 3 și 6).

b) puncte de inflexiune ale curbelor marchează consumarea jocurilor din cuplele cinematice.

c) porțiunile drepte ale curbelor marchează deformațiile elastice ale elementelor.

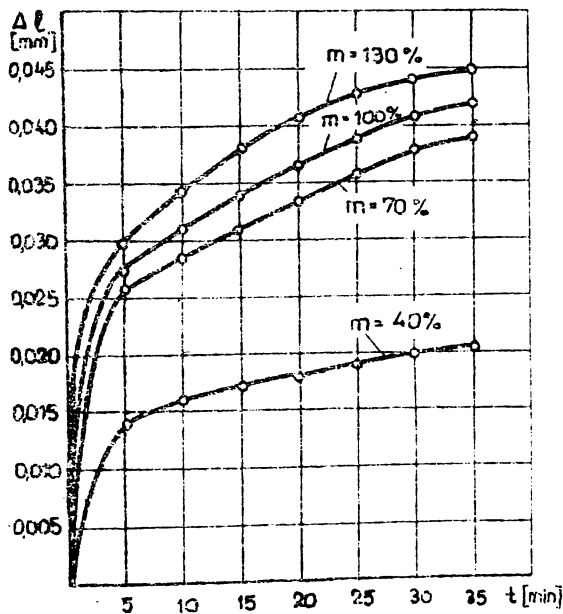


Fig.6.3. Abateră de pozitie în repaus

vent utilizat în exploatare, în care cursele celor patru grade de mobilitate sînt la 50% din valoarea maximă, în condițiile unei solicitări cu sarcini manipulate variabile discret la valori de 40, 70, 100 și 130% din sarcina maximă manipulată, citirile efectuîndu-se la intervale de timp prestabilite (5 min).

Perioada maximă de 30 minute afectată unei măsurări s-a dovedit suficientă pentru manifestarea fenomenului de relaxare (fig.6.3), rezultînd tendința de stabilizare.

6.1.3. Precizia de repetabilitate este parametrul hotărâtor în aprecierea preciziei unui robot industrial. Pentru stabilirea preciziei de repetabilitate se utilizează o măsurare tridimensională, care permite înregistrarea abaterilor repetate ale elementului mobil, cubul de referință, la apropieri din direcții diferite.

Pentru aceasta se divide spațiul de lucru al robotului; în noduri corespunzătoare la 50% și 100% din cursa maximă pentru fiecare grad de mobilitate. Se programează robotul în ciclu automat să atingă punctul țintă din direcții diferite.

Procesul se repetă de 10 ori pentru sarcini diferite, 0, 40, 70, 100 și 130% din sarcina maximă și viteze diferite, 20 și 100% din viteza maximă, rezultatele măsurărilor fiind trecute în tabelul 6.3.

Caracterul aleator al valorilor măsurate impune un calcul probabilistic al încadrării în domeniul de precizie impus.

Admițând că indiferent de masa obiectului manipulat $m \in [0; m_{\max}]$ și viteza $v_j \in [v_{j\min}; v_{j\max}]$ $i, j = 1, 2, \dots, M$, cu care se deplasează fiecare modul al robotului, abaterea de la media măsurărilor trebuie să se încadreze în limite prescrise se poate enunța, pe baza legii numerelor mari a lui Cebîșev, condiția de precizie a unui robot .

Pentru o sarcină manipulată în limite prescrise $m \in [0; m_{\max}]$ și o deplasare cu viteza $v_j \in [v_{j\min}; v_{j\max}]$ $j=1, 2, \dots, M$, condiția de precizie a unui robot impune ca probabilitatea abaterii de la medie cu o cantitate $\xi > 0$, să tindă către unu, pentru toate cele trei direcții ale sistemului de referință. Cu cât probabilitatea obținută tinde spre unu cu atât precizia de repetabilitate a robotului este mai bună.

Pentru șirul de măsurări efectuate ;

$$\begin{aligned} X_i &= \{ \Delta x_{i1}, \Delta x_{i2}, \dots, \Delta x_{ij} \} \\ Y_i &= \{ \Delta y_{i1}, \Delta y_{i2}, \dots, \Delta y_{ij} \} \\ Z_i &= \{ \Delta z_{i1}, \Delta z_{i2}, \dots, \Delta z_{ij} \} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$(i=1, 2, \dots, 20; j=1, 2, \dots, 10)$

S-au determinat media \bar{X} și dispersia s (tabelul 6.3) în condițiile unei repartiții normale. Relația lui Cebîșev permite determinarea probabilității P :

Determinarea preciziei de repetabilitate

Tabelul 6.3.

N _o m _o	V = 20 %			X = 50 %			Y = 50 %			Z = 35 %			φ = 30 %		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
1	+0,75	-0,55	+0,25	+0,51	-0,45	+2,91	+1,02	-0,21	+4,58	+0,92	-0,12	+6,55	+1,01	-0,01	+7,96
2	+0,55	-0,53	+0,25	+0,40	-0,48	+2,91	+1,23	-0,14	+4,55	+0,96	-0,09	+6,58	+1,21	-0,02	+8,00
3	+1,36	-0,58	+0,28	+0,92	-0,35	+2,90	+0,93	-0,22	+4,54	+0,90	-0,05	+6,60	+1,29	-0,01	+7,91
4	+0,77	-0,55	+0,23	+0,60	-0,41	+2,94	+0,79	-0,20	+4,61	+1,30	-0,06	+6,60	+1,39	-0,11	+7,95
5	+1,14	-0,51	+0,21	+0,65	-0,38	+2,92	+0,90	-0,24	+4,58	+0,35	-0,16	+6,61	+1,31	0	+7,97
6	+0,55	-0,56	+0,20	+1,24	-0,35	+2,94	+0,72	-0,20	+4,59	+0,72	-0,11	+6,59	+1,12	+0,01	+8,00
7	+1,04	-0,55	+0,18	+1,26	-0,30	+2,93	+0,74	-0,27	+4,62	+0,98	-0,11	+6,60	+1,12	-0,01	+8,00
8	+1,08	-0,39	+0,24	+0,62	-0,42	+2,93	+1,13	-0,22	+4,57	+0,97	-0,11	+6,65	+1,07	-0,06	+8,00
9	+0,76	-0,62	+0,19	+1,05	-0,32	+2,92	+0,94	-0,27	+4,54	+0,97	-0,15	+6,58	+1,21	+0,02	+8,04
10	+0,72	-0,61	+0,17	+0,76	-0,44	+2,97	+0,49	-0,30	+4,58	+0,86	-0,06	+6,60	+1,25	-0,01	+8,00
\bar{x}	+0,902	-0,565	+0,219	+0,801	-0,394	+2,927	+0,884	-0,227	+4,576	+0,893	-0,102	+6,596	+1,198	-0,021	+7,983
S	0,225	0,035	0,037	0,302	0,058	0,042	0,220	0,045	0,027	0,240	0,037	0,025	0,118	0,038	0,036
s	0,675	0,104	0,110	0,907	0,173	0,127	0,660	0,136	0,081	0,718	0,112	0,076	0,353	0,114	0,109

N _o m _o	V = 20 %			X = 100 %			Y = 100 %			Z = 70 %			φ = 60 %		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
1	+0,35	-0,44	+0,91	+0,60	-0,14	+3,50	+0,41	-0,15	+4,90	+1,60	-0,03	+7,18	+1,65	+0,08	+8,23
2	+1,12	-0,42	+0,85	-0,13	-0,19	+3,48	+0,56	-0,15	+4,88	+1,66	+0,06	+7,20	+1,62	+0,06	+8,18
3	+0,91	-0,44	+0,83	+0,63	-0,21	+3,47	+0,56	-0,15	+4,94	+1,48	0	+7,09	+1,79	+0,05	+8,24
4	+0,68	-0,46	+0,84	+0,45	-0,31	+3,46	+0,90	-0,04	+4,93	+1,49	+0,10	+7,09	+1,61	+0,08	+8,22
5	+0,35	-0,51	+0,74	+0,01	-0,24	+3,50	+0,93	-0,07	+4,97	+1,67	+0,16	+7,07	+1,81	+0,13	+8,20
6	+0,70	-0,43	+0,78	+0,07	-0,31	+3,47	+0,63	-0,18	+4,94	+0,81	+0,02	+7,07	+1,32	+0,01	+8,24
7	+0,49	-0,47	+0,79	+0,17	-0,33	+3,47	+0,93	-0,07	+4,96	+1,19	-0,01	+7,10	+0,94	+0,09	+8,20
8	+0,83	-0,51	+0,74	+0,48	-0,20	+3,43	+0,55	-0,14	+4,96	+1,22	+0,05	+7,11	+1,79	+0,08	+8,15
9	+1,03	-0,41	+0,67	+0,46	-0,35	+3,44	+0,15	-0,20	+4,93	+1,54	-0,08	+7,12	+1,47	+0,09	+8,20
10	+0,63	-0,47	+0,63	+0,69	-0,35	+3,48	+0,75	-0,12	+4,98	+0,98	+0,01	+7,13	+1,51	+0,09	+8,23
\bar{x}	+0,729	-0,456	+0,778	+0,343	-0,263	+3,470	+0,637	-0,125	+4,939	+1,364	+0,028	+7,116	+1,551	+0,076	+8,209
S	0,272	0,038	0,035	0,267	0,076	0,023	0,250	0,051	0,031	0,089	0,057	0,044	0,265	0,038	0,029
s	0,815	0,104	0,256	0,800	0,228	0,068	0,750	0,153	0,093	0,267	0,172	0,131	0,796	0,113	0,087

continuare tabelul 6.3

V = 100%	X = 50%			Y = 50%			Z = 35%			φ = 30%		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
1	+1,76	-0,22	+0,77	+1,25	+0,25	+2,33	+1,12	+0,24	+3,90	+1,30	+0,38	+5,70
2	+1,38	-0,24	+0,86	+1,12	+0,42	+2,32	+1,19	+0,30	+3,97	+1,35	+0,55	+5,75
3	+1,82	-0,45	+0,85	+1,25	0	+2,33	+0,73	+0,41	+3,94	+1,44	+0,92	+5,76
4	+1,53	-0,35	+0,83	+0,99	+0,17	+2,31	+1,04	+0,55	+3,99	+1,46	+0,20	+5,77
5	+1,52	-0,45	+0,84	+1,08	+0,03	+2,37	+1,36	+0,56	+4,00	+1,67	+0,61	+5,76
6	+1,65	-0,31	+0,92	+1,23	+0,13	+2,34	+1,03	+0,43	+4,00	+1,37	+0,38	+5,77
7	+1,43	-0,05	+0,85	+1,14	+0,21	+2,34	+1,09	+0,37	+4,02	+1,22	+0,60	+5,76
8	+1,33	+0,02	+0,82	+0,89	+0,07	+2,32	+1,14	+0,27	+4,06	+1,22	+0,53	+5,77
9	+1,37	-0,02	+0,82	+1,23	+0,22	+2,34	+1,05	+0,39	+4,05	+1,47	+0,46	+5,77
10	+1,50	-0,27	+0,86	+1,18	+0,10	+2,36	+1,32	+0,39	+4,01	+1,64	+0,58	+5,78
X	+1,397	-0,234	+0,842	+1,136	+0,160	+2,336	+1,107	+0,391	+3,994	+1,414	+0,481	+5,759
5	0,226	0,169	0,098	0,121	0,123	0,018	0,174	0,106	0,048	0,155	0,129	0,022
35	0,678	0,508	0,114	0,363	0,369	0,054	0,523	0,319	0,144	0,466	0,386	0,067

V = 100%	X = 100%			Y = 100%			Z = 70%			φ = 60%		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
1	+0,60	+0,02	+0,11	+0,66	+0,32	+3,27	+1,20	+0,66	+5,03	+1,64	+0,42	+6,91
2	+0,66	-0,13	+0,17	+0,78	+0,32	+3,38	+1,24	+0,67	+5,05	+1,83	+0,64	+6,93
3	+0,63	-0,01	+0,22	+0,92	+0,36	+3,43	+1,42	+0,47	+5,10	+1,10	+0,45	+6,95
4	+0,57	-0,04	+0,15	+1,01	+0,49	+3,38	+1,25	+0,48	+5,08	+1,71	+0,57	+6,96
5	+0,66	0	+0,19	+0,77	+0,06	+3,43	+1,37	+0,55	+5,12	+1,63	+0,63	+6,97
6	+0,58	-0,11	+0,16	+0,78	+0,41	+3,40	+1,26	+0,58	+5,09	+1,70	+0,50	+7,00
7	+0,55	+0,09	+0,15	+0,71	+0,28	+3,50	+1,72	+0,58	+5,08	+1,68	+0,73	+6,97
8	+0,53	+0,14	+0,17	+0,32	+0,32	+3,42	+1,18	+0,39	+5,13	+2,18	+0,58	+7,03
9	+0,69	+0,17	+0,18	+0,92	+0,17	+3,48	+1,20	+0,41	+5,20	+1,72	+0,66	+6,99
10	+0,59	-0,05	+0,18	+0,62	+0,35	+3,46	+1,13	+0,64	+5,10	+1,18	+0,60	+7,01
X	+0,606	+0,008	+0,168	+0,749	+0,308	+3,415	+1,297	+0,538	+5,098	+1,645	+0,578	+6,972
5	0,052	0,100	0,029	0,194	0,120	0,065	0,171	0,100	0,047	0,310	0,097	0,089
35	0,157	0,299	0,087	0,582	0,360	0,194	0,514	0,301	0,140	0,930	0,290	0,268

$$P \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - A \right| < \varepsilon \right) \geq 1 - \frac{b^2}{n\varepsilon^2} \quad (6.2)$$

unde A este media aritmetică a valorilor medii ;

$$A = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \bar{X}_i ; \quad (6.3)$$

$$b^2 \geq \max S_i^2 ; \quad i = 1, 2, \dots, 20$$

$$\varepsilon = 0,5 \text{ mm.}$$

Aplicația analizată conduce la următoarele valori :

- direcția de măsurare X, n = 200 ;

$$A = 1,0631 \text{ mm} \quad b^2 \geq 0,310^2 \quad b^2 = 0,1 \quad P_x = 0,99808$$

- direcția de măsurare Y, n = 200 ;

$$A = 0,06915 \text{ mm} \quad b^2 \geq 0,169^2 \quad b^2 = 0,03 \quad P_y = 0,99940$$

- direcția de măsurare Z, n = 200 ;

$$A = 4,5414 \text{ mm} \quad b^2 \geq 0,089^2 \quad b^2 = 0,008 \quad P_z = 0,99984$$

Se observă că precizia de repetabilitate după axa Z este foarte bună, valoarea mai redusă obținută pe direcția X fiind în principal influențată de jocurile existente la nivelul modului de pivotare.

Pentru a analiza comparativ influența pe care o exercită variația vitezei de deplasare a robotului și valoarea cursei efectuate, pînă în momentul măsurării, se utilizează metoda regresiei liniare de reprezentare grafică a dependenței dintre valorile medii ale abaterilor măsurate, pe fiecare direcție și sarcina manipulată.

Dependența liniară dintre valorile adevărate y_i ale mediei mărimilor măsurate a_i și sarcina manipulată x_i ;

$$y_i = \alpha + \beta x_i \quad (6.4)$$

se poate trasa dacă se determină estimațiile parametrilor α și β din ecuațiile de regresie ;

$$\hat{\alpha} = \frac{[pa]}{[p]} - \hat{\beta} \frac{[px]}{[p]} ; \quad \hat{\beta} = \frac{[pax][p] - [pa][px]}{[px^2][p] - [px]^2} \quad (6.5)$$

folosind notațiile lui Gauss :

$$\begin{aligned}
 [p] &= \sum_{i=1}^n p_i & ; & \quad [px] = \sum_{i=1}^n p_i x_i & ; & \quad [px^2] = \sum_{i=1}^n p_i x_i^2 & ; \\
 [pa] &= \sum_{i=1}^n p_i a_i & ; & \quad [pax] = \sum_{i=1}^n p_i a_i x_i & ; & &
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

In cazul măsurărilor cu aceeași precizie, ponderile $p_i = 1$ ($i=1, 2, \dots, n$).

Cunoscând valorile estimate $\hat{\alpha}$ și $\hat{\beta}$ s-au determinat estimațiile :

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \tag{6.7}$$

eroarea medie a măsurărilor individuale :

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i a_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}} \tag{6.9}$$

și din legea propagării erorilor, valorile erorilor medii ale estimațiilor $\hat{\alpha}$ și $\hat{\beta}$:

$$m_{\hat{\alpha}} = \sqrt{\frac{\frac{[p_x^2]}{[p]}}{[p][p_x^2] - [p_x]^2}} & ; & \quad m_{\hat{\beta}} = \sqrt{\frac{[p]}{[p][p_x^2] - [p_x]^2}} \tag{6.9}$$

cu ajutorul cărora se obțin valorile aproximative ale parametrilor;

$$\alpha = \hat{\alpha} \pm m_{\hat{\alpha}} & ; & \quad \beta = \hat{\beta} \pm m_{\hat{\beta}} \tag{6.10}$$

Valorile astfel calculate au fost centralizate în tabelul 6.4.

Drepte de regresie reprezentate în figurile 6.4 și 6.5 permit următoarele concluzii :

a) creșterea vitezei de deplasare a robotului de la $V = 20\% V_{\max}$ la $V = V_{\max}$ are ca efect: creșterea cu 30,013 % a abaterii medii estimate după axa de referință Ox (curba 3 față de curba 1 din fig.6.4.); creșterea cu 180,945% a abaterii medii estimate după axa de referință Oy (curba 8 față de curba 6 din fig.6.4) și o scădere cu 10,5% a abaterii medii estimate după axa de referință Oz (curba 11 față de curba 9 din fig.6.5).

b) extensia maximă a "bratului" robotului, în condițiile unei deplasări cu viteză constantă provoacă creșterea cu 1,384% a abaterii medii estimate după axa de referință Ox (curba 1 față de curba 2); creșterea cu 54,981% a abaterii medii estimate

Tabelul 6.4.

Calculul parametrilor α și β ai ecuațiilor de regresie:

n	X_i	① $V=20\%$			② $V=50\%$			③ $V=100\%$			④ $V=100\%$			⑤ $V=20\%$			⑥ $V=100\%$			⑦ $V=20\%$			⑧ $V=100\%$		
		ql	yl	yl'	ql	yl	yl'	ql	yl	yl'	ql	yl	yl'	ql	yl	yl'	ql	yl	yl'	ql	yl	yl'	ql	yl	yl'
1	0	+0,801	+0,801	+0,729	+0,382	+1,310	+0,606	+0,587	-0,565	-0,456	-0,452	-0,234	-0,130												
2	19871	+0,801	+0,879	+0,343	+0,890	+1,136	+0,749	+0,919	-0,324	-0,386	-0,471	+0,160	+0,098												
3	17327	+0,894	+0,937	+0,637	+0,923	+1,107	+1,219	+1,169	-0,227	-0,283	-0,149	+0,391	+0,270												
4	26151	+0,893	+1,006	+1,364	+1,199	+1,414	+1,473	+1,466	-0,102	-0,116	+0,028	+0,481	+0,473												
5	33502	+1,198	+1,064	+1,531	+1,429	+1,041	+1,135	+1,550	+0,021	+0,009	+0,076	+0,535	+0,642												
[P]																									
[Px]																									
[Pa]		4,688		4,624		6,095		5,855		-1,309		-0,74	1,353												
[Pax]		86,880778		102,05143		102,24201		125,0732		-1,192212		-1,482943	39,524503												
α		0,80135		0,381811		1,309512		0,567092		0,550180		-0,432038	-0,129692												
β		0,007844		0,031262		-0,005211		0,033623		0,016603		0,016353	0,023046												
m		0,127598		0,348889		0,184341		0,184034		0,029716		0,035740	0,111372												
m ₂		0,101591		0,277777		0,146768		0,146524		0,023660		0,028455	0,088672												
m ₃		0,004839		0,013231		0,006991		0,006979		0,001127		0,001355	0,004224												
[P]																									
[Px]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									
[Pax]																									
[Pa]																									

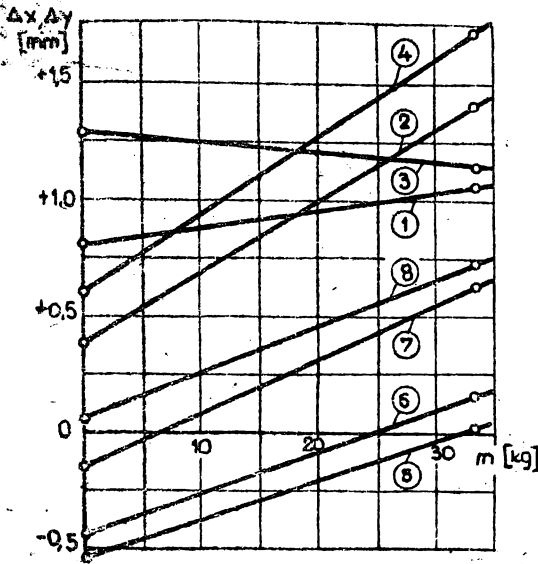


Fig. 6.4. Dreptele de regresie $\Delta x = f(m)$ și $\Delta y = f(m)$

mm). De remarcat că această diferență crește cu creșterea gradului de extensie al "brațului" robotului și cu scăderea vitezei

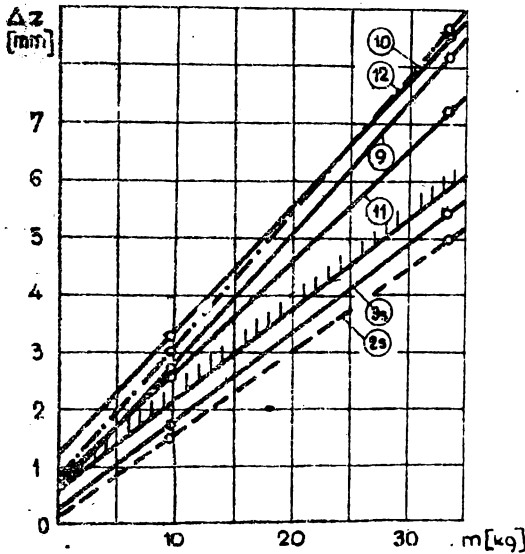


Fig. 6.5. Dreptele de regresie $\Delta z = f(m)$

față de axa de referință Oy (curba 8 față de curba 7) și o creștere cu 18,112% a abaterii medii estimate față de axa de referință Oz (curba 12 față de curba 11).

c) eroarea de poziție după axa de referință Oz măsurată în regim dinamic (curbele 9-12 din fig. 6.5) este superioară erorii de poziție măsurate în regim static (curbele 2s și 3s cu valori din tabelul 6.2.), chiar superioară și valorii limită a erorii de poziție în regim static (curba 3s+0,5

de deplasare. Astfel la extensia maximă a "brațului" robotului și la viteza minimă de deplasare, $V=20\%$ din V_{max} se obține cea mai mare diferență, dintre eroarea în regim dinamic și cea statică și anume de 86,499% (curba 10 față de curba 2s). La viteza maximă de deplasare această valoare scade la 81,292% (curba 12 față de curba 2s). La o extensie de numai 50% și $V=20\%$ din V_{max} se obține o diferență de 55,400% (curba 9 față de curba 3s), iar la $V=V_{max}$ se obține cea mai mică diferență : 40,627% (curba 11 față de curba 3s).

6.1.4. Deplasarea minimă programabilă ne oferă o imagine a modului în care sistemul mecanic al robotului execută comenzi fine și foarte fine (număr mic și foarte mic de impulsuri programate).

În acest scop se comandă realizarea în ciclu automat a unui tren de impulsuri (x_i - tabelul 6.5) și se înregistrează valoarea realizată (a_{ij} - tabelul 6.5) în condițiile unei solicitări la sarcină constantă, $m = 9,871$ kg, reprezentînd 40% din sarcina maximă.

Pentru determinarea valorilor reale ale deplasărilor, pe baza mărimilor măsurate, se utilizează principiul verosimilității maxime sau metoda celor mai mici pătrate a lui Gauss, care oferă o probabilitate maximă pentru valorile aproximative y_i ale mărimilor măsurate a_{ij} , dacă suma S a pătratelor erorilor este minimă:

$$S = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^j P_i (a_{ij} - y_i)^2 \rightarrow \text{minim} \quad (6.11)$$

În cazul măsurărilor cu aceeași precizie ponderile fiind $p_i = 1 (i=1, 2, \dots, n)$, condiția (6.11) permite scrierea ecuațiilor normale :

$$\frac{\partial S}{\partial y_i} = \frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial}{\partial y_i} \left[\sum_{j=1}^3 (a_{ij} - y_i)^2 \right] = - \frac{2}{\sigma^2} \left[\sum_{j=1}^3 (a_{ij} - y_i) \right] = 0 \quad (i=1, 2, \dots, 32) \quad (6.12)$$

Sistemul de ecuații astfel obținut are ca soluții estimațiile :

$$\hat{y}_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 a_{ij} = \frac{a_{i1} + a_{i2} + a_{i3}}{3} = \bar{a}_i \quad (i=1, 2, \dots, 32) \quad (6.13)$$

ce sînt egale cu media aritmetică \bar{a}_i a măsurării (i).

Eroarea medie a estimației $m_{\hat{y}}$ se determină din legea propagării erorilor, pentru :

$$\frac{\partial \hat{y}_i}{\partial a_i} = \frac{1}{3} \quad \forall (i=1, 2, \dots, 32) \quad (6.14)$$

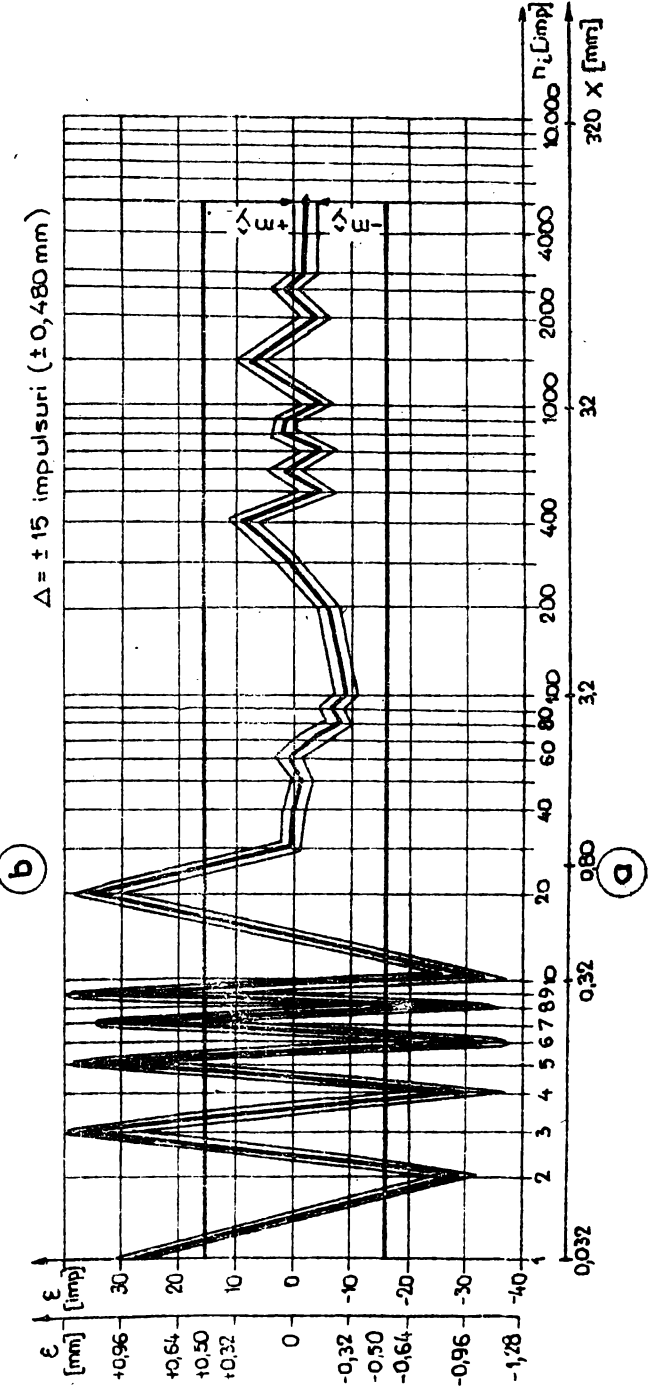
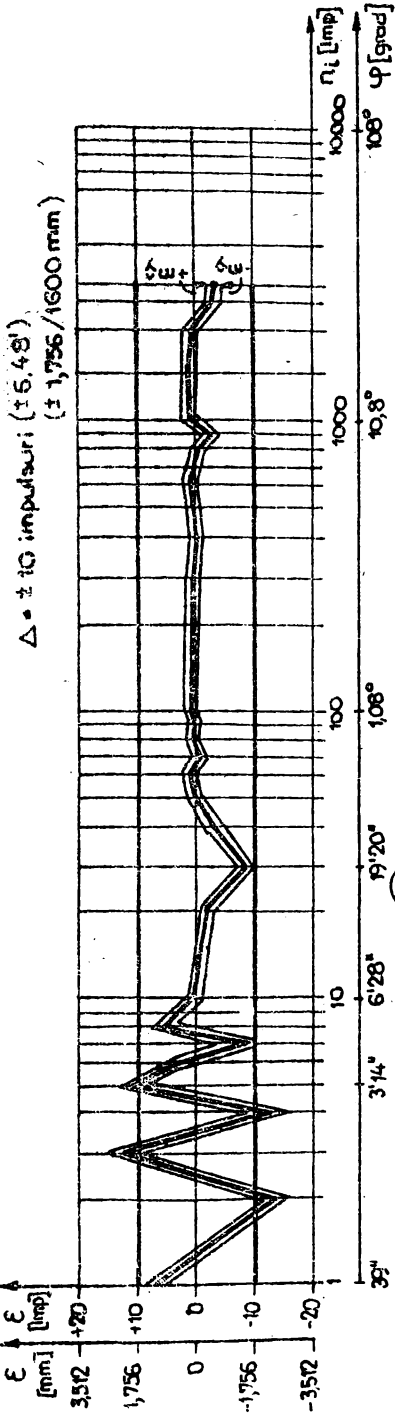
fiind de formă :

$$m_{\hat{y}} = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

Tabelul 6.5.

Deplasarea minimă programată. Calculul erorilor

i	X _i	TRANSLATIE X					ROTATIE φ					TRANSLATIE Z					TRANSLATIE Y									
		Q _{Xj}			ε _X	ε̄ _X	Q _{φj}			ε _φ	ε̄ _φ	Q _{Zj}			ε _Z	ε̄ _Z	Q _{Yj}			ε _Y	ε̄ _Y					
		j=1	j=2	j=3	1=1	1=2	1=3	j=1	j=2	j=3	1=1	1=2	1=3	j=1	j=2	j=3	1=1	1=2	1=3	j=1	j=2	j=3	1=1	1=2	1=3	
1	28	23	41	+30,7	+29,7	28,5	8	8	8	+8	+7	700	23	-19	24	+9,3	+8,3	833	-23	18	17	+4,0	+3,0	300		
2	30	36	19	-28,3	-30,3	15,7	-12	-11	-12	-14,7	-13,7	636	-20	22	-23	-7,0	-9,0	450	20	-27	-25	-0,7	-0,7	633		
3	39	38	40	+39,0	+36,0	120,0	16	16	16	+16	+13	433	37	-18	27	+22,0	+19,0	635	-24	27	20	+7,7	+7,7	476		
4	32	31	-30	-31,0	-36,0	87,5	-9	-9	-9	-9	-9	433	-16	24	-16	-2,7	-6,7	167	23	-24	-19	-6,7	-10,7	267		
5	40	40	41	+40,3	+35,3	70,7	17	16	16	+16,3	+11,3	228	24	-15	24	+11,0	+6,0	120	14	24	25	+21,0	+16,0	320		
6	28	29	31	-29,3	-36,3	58,9	8	8	9	+8,7	+2,3	28,8	-15	25	-10	0	-6,0	100	-22	19	17	+4,7	+1,3	212		
7	39	39	42	+39,3	+32,3	46,2	-1	-1	-2	-1,3	-8,3	19,0	27	-11	19	+11,7	+4,7	66,7	31	-24	-24	-5,7	-12,7	180		
8	27	24	28	-25,0	-33,0	41,3	15	10	16	+13,7	+7,7	70,8	-11	28	8	+8,3	+3,3	103	19	31	25	+12,3	+3,3	54,7		
9	44	44	44	+44,0	+36,0	38,9	10	15	10	+11,7	+2,7	23,7	32	-11	8	+9,7	+0,7	24,1	28	15	20	+21,0	+12,0	133		
10	23	25	25	-24,3	-3,3	34,3	10	10	10	+10,0	+0	0	-11	+131	-145	+21,7	+11,7	116	21	-24	-20	-7,7	-17,7	176		
11	33	57	56	+55,3	+35,3	17,7	18	18	18	+18,0	-2,0	10,0	28	4	20	+24,7	+4,7	23,3	26	34	33	+31,0	+10	55,0		
12	30	31	29	-30,3	+3	1,1	21	22	21	+21,3	-8,7	29,0	28	47	29	+34,7	+4,7	15,5	24	30	32	+28,7	+1,3	44,3		
13	40	40	40	+39,7	-3	0,3	37	36	38	+37,0	-3,0	7,50	39	41	45	+41,7	+1,7	4,7	31	35	37	+34,3	-5,7	14,2		
14	50	47	50	+48,7	-1,3	2,67	50	51	49	+50,0	0	0	30	51	65	+55,3	+5,3	10,7	43	48	40	+43,7	-6,3	12,6		
15	60	67	58	+60,7	+7	1,1	61	59	61	+60,3	+3	0,55	59	57	69	+61,7	+1,7	2,78	46	54	58	+52,7	-7,3	12,2		
16	70	62	66	+66,7	-3,3	4,76	69	70	69	+69,3	-0,7	1,00	71	72	81	+74,7	+4,7	6,67	70	69	72	+70,3	-3	0,48		
17	80	71	72	+72,3	-7,7	9,98	80	80	80	+80,0	0	0	74	78	85	+79,0	-1,0	1,25	83	80	82	+81,7	+1,7	2,88		
18	90	86	83	+83,3	-6,7	7,14	90	90	90	+90,0	0	0	89	90	88	+86,0	-1,0	1,11	85	93	87	+88,3	-1,7	18,6		
19	100	92	91	+91,3	-8,7	8,66	100	101	101	+100,7	+7	0,70	90	88	98	+92,0	-8,0	8,00	105	103	103	+103,7	+3,7	3,66		
20	200	193	196	+193,3	-6,7	3,33	200	200	200	+200,3	+0,3	0,15	196	192	198	+196,3	-4,7	2,33	234	213	217	+221,3	+2,3	10,7		
21	300	299	304	+299,0	+1,0	0,33	300	299	301	+300,0	0	0	306	307	299	+304,0	+4,0	1,33	285	318	314	+305,7	+5,7	18,7		
22	400	411	405	+411	+309,0	+9,0	2,25	400	399	+399,7	-0,3	0,08	394	394	403	+397,0	-3,0	0,75	412	402	402	+402,0	+2,0	0,50		
23	500	504	494	+495,7	-4,3	0,87	514	514	514	+513,7	+13,7	2,74	499	499	499	+498,7	-1,3	0,26	500	500	500	+502,3	+2,3	0,47		
24	600	597	602	+601,7	+1,7	0,28	601	600	600	+600,3	+0,3	0,05	603	599	598	+600,0	0	0	599	584	584	+583,3	+0,7	1,78		
25	700	689	702	+695,3	-4,7	0,67	700	700	700	+700,0	+0	0	701	701	701	+700,0	+2,0	0,29	690	705	707	+702,7	+0,7	0,14		
26	800	808	798	+802,0	+2,0	0,25	800	799	799	+799,7	-0,3	0,04	797	803	803	+804,0	-1,0	0,24	810	805	806	+807,0	+0,7	0,88		
27	900	905	896	+903,3	+1,3	0,15	900	890	901	+897,0	-3,0	0,33	906	901	900	+902,3	+2,3	0,26	900	900	900	+900,0	0	0		
28	1000	994	998	+995,6	-4,3	0,43	1000	1001	1000	+1000,3	+0,3	0,03	995	997	1000	+998,0	-2,0	0,11	1000	1003	1001	+998,3	-1,7	0,17		
29	1500	1511	1506	+1507,7	+7,7	0,75	1501	1502	1500	+1500,3	+1,0	0,07	14,98	14,97	1500	+1498,3	-1,7	0,10	1485	1495	1503	+1493	-6,7	0,33		
30	2000	1997	2000	+1998,0	-4,0	0,20	2001	2000	2000	+2000,0	0	0	2000	2002	2003	+2001,7	+1,7	0,08	2013	2011	2008	+2008,7	+8,7	0,43		
31	2500	2507	2495	+2503,3	+3,3	0,17	2494	2500	2494	+2497,0	-3,0	0,12	2501	2499	2495	+2498,3	-1,7	0,07	2483	2499	2483	+2500,0	0	0		
32	3000	2993	3005	+2996,7	-3,3	0,41	3000	2993	2996	+2996,7	-3,3	0,41	3000	2999	3005	+3001,3	+1,3	0,04	2999	3013	2997	+3003,0	+3,0	0,10		
m										1,397						12,307								12,177		
m _γ										0,806						7,106									7,031	



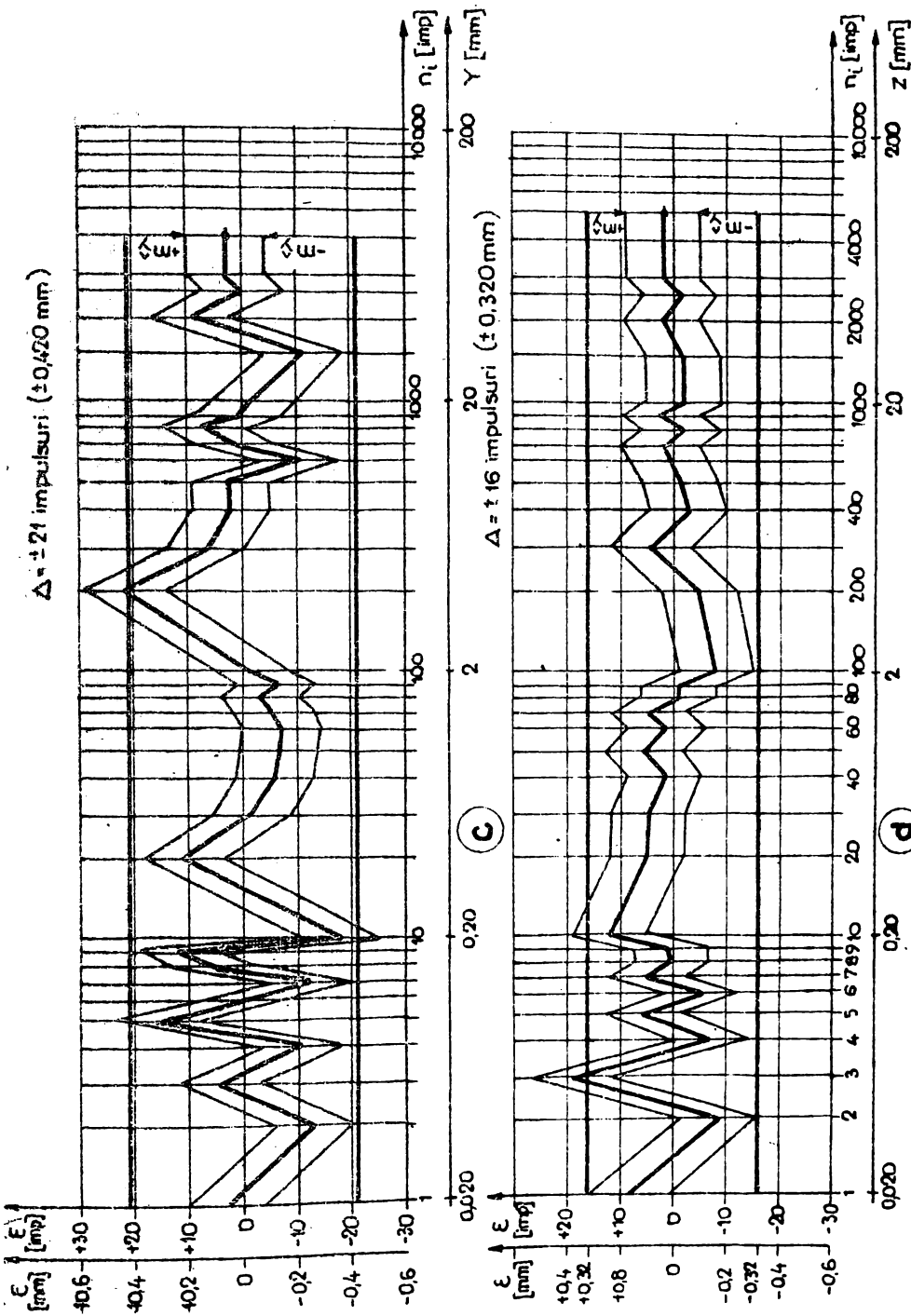


Fig.6.6. Deplasarea minimă programabilă. Propagarea erorilor.

și depinzând de eroarea medie a măsurărilor de aceeași precizie:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^3 (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n - 2}} \quad (6.16)$$

unde $n = 99$ este numărul total de măsurări.

Valoarea aproximativă a mărimii măsurate determinată cu relația :

$$y_i = \hat{y} \pm m_y \quad (i=1, 2, \dots, 32) \quad (6.17)$$

eroarea absolută :

$$\epsilon_i = y_i - x_i \quad (i=1, 2, \dots, 32) \quad (6.18)$$

respectiv eroarea relativă $\left| \frac{\epsilon_i}{x_i} \right|$ sînt trecute în tabelul 6.5.

Cunoscînd eroarea maximă Δ pentru fiecare grad de libertate în parte, pe baza datelor din tabelul 6.5, s-au trasat diagramele de variație a erorii absolute a deplasării față de deplasarea programată (fig.6.6).

Se observă că pentru deplasări mai mari de : 0,80 mm translația X ; 3'14" rotația φ ; și 0,20 mm, pentru translațiile Y și Z , eroarea absolută se încadrează în limitele impuse de eroarea maximă.

Practic pentru mișcările de translație Y și Z , dacă se ține seama de cîmpul de toleranță oferit de eroarea medie a estimăției m_y există premisele încadrării, pe întregul domeniu al deplasărilor programate în precizia impusă.

6.1.5. Eroarea de traiectorie este o mărime complexă fiind influențată de toate elementele care influențază eroarea de poziție a punctului caracteristic. Pentru măsurarea erorii de traiectorie s-a materializat printr-o riglă de oțel (poz.1 - figura 6.7) traiectoria ce va fi urmărită de capul de măsurare bidimensional (2 D - poz.2), prevăzut cu doi traductori de deplasare inductivi. Se programează robotul să efectueze traiectoria și se execută un ciclu de încercare, după care se execută 10 cicluri automate, în ambele sensuri, la sarcini diferite : 0, 40 și 100% din sarcina maximă și viteze variabile: 20; 50 și 100% din viteza maximă.

În figura 6.8 a se prezintă variația erorii de traiectorie cu sarcina la diferite viteze de deplasare.

Eroarea de traiectorie maximă de $507,5 \mu\text{m}$ se obține la viteza maximă cu dispozitivul de prehensiune descărcat, iar eroarea de traiectorie minimă înregistrată de $17,5 \mu\text{m}$,

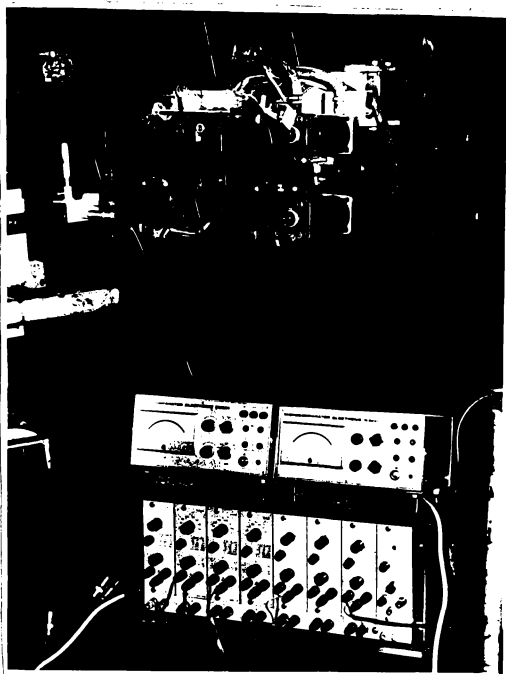


Fig.6.7. Montaj pentru măsurarea erorii de traiectorie.

la viteza minimă de deplasare după direcția de referință X și sarcină de 40% din sarcina maximă.

Figura 6.8 b evidențiază eroarea de traiectorie pentru diferite viteze la sarcină constantă.

Oscilațiile punctului caracteristic cauzează o distribuție a erorii de traiectorie în jurul valorii nule, iar deformările statice și dinamice ale sistemului mecanic au ca efect o distribuire a erorii de traiectorie în jurul unei valori diferite de zero (eroarea de "tracta-

re [K 14]). În cazul experimentului realizat s-a obținut o eroare de tractare de $805 \mu\text{m}$ (figura 6.8 b). Se apreciază ca relevantă pentru precizia unui robot eroarea de traiectorie absolută, ca fiind abaterea maximă înregistrată la sarcină constantă și vitezele extreme de deplasare ale robotului.

Astfel eroarea de traiectorie absolută de $595 \mu\text{m}$ înregistrată la sarcină manipulată egală cu zero a scăzut de peste 11 ori ($52,5 \mu\text{m}$) la o sarcină de 40% din sarcina maximă, fiind practic nulă la sarcina maximă manipulată.

6.1.6. Deplasarea după acționarea întrerupătorului de siguranță, se măsoară la oprirea fiecărui modul în parte. În acest scop se programează robotul să atingă punctul țintă, unde se află montat un traductor de deplasare inductiv (fig.6.9), deplasându-se cu diferite viteze de 20, 50 și 100% din viteza maximă la sarcina manipulată minimă și maximă.

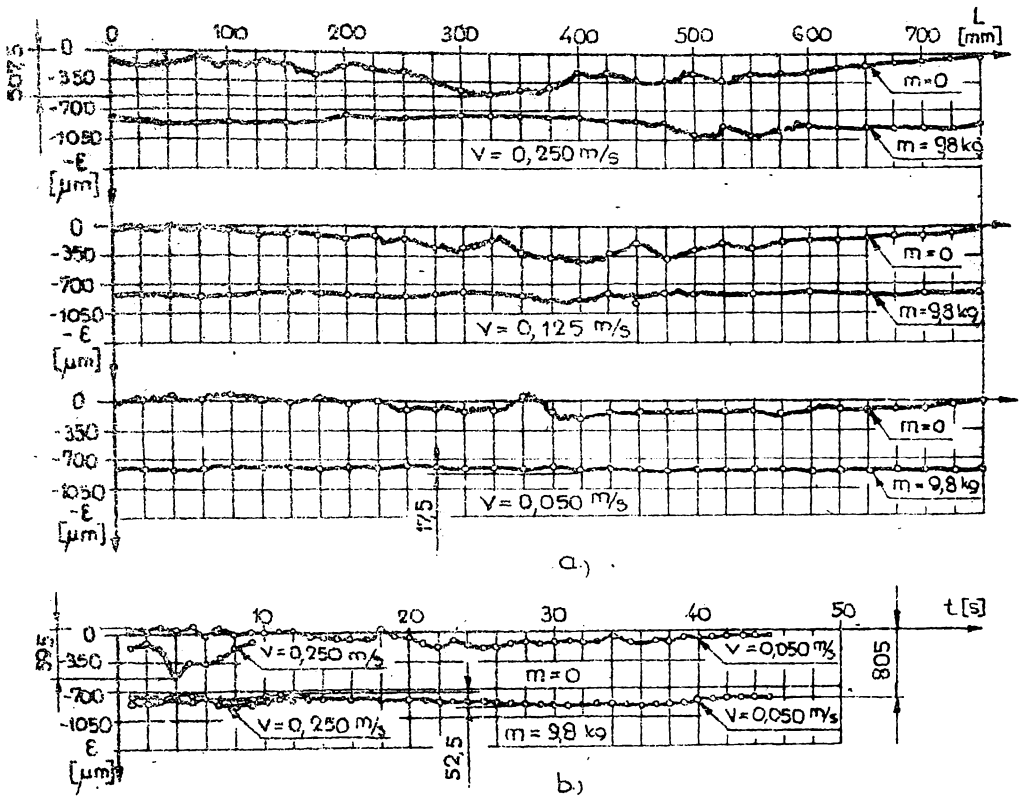


Fig.6.8. Variația erorii de traiectorie: a) cu sarcina; b) cu viteza



Fig.6.9. Montaj pentru măsurarea deplasării și oscilațiilor punctului caracteristic la opriri.

Diagramele rezultate înregistrate pe hîrtie fotosensibilă sînt redade în figurile 6.10 ÷ 6.13, unde s-a ales ca axă de referință pentru măsurarea deplasării punctului caracteristic, deplasarea sa după amortizarea oscilațiilor la viteza minimă manipulînd sarcina minimă. Valorile astfel determinate au fost centralizate în tabelul 6.6.

Se poate constata că deplasările punctului caracteristic după acționarea întrerupătorului de siguranță pentru fiecare grad de libertate se încadrează în precizia de repetabilitate (tabelul 6.6 și § 6.1.4). Valorile maxime ale acestei deplasări pentru translația după direcția X, Y și rotația φ se obțin la viteza maximă și sarcina maximă manipulată. Valoarea minimă se obține pentru viteze mai mici de 50% V_{\max} și fără sarcină manipulată (X și φ) și cu sarcina maximă manipulată (Y). Translația după direcția Z oferă aceeași deplasare a punctului caracteristic indiferent de regimul de viteze și de sarcina manipulată situație explicabilă prin existența unei frîne electromagnetice pe lanțul cinematic.

Prezența frînei cu saboți acționată pneumatic la mișcarea de rotație φ explică faptul că în regim de $\omega = 50\% \omega_{\max}$ și fără sarcină manipulată, deplasarea este de 23,15 ori mai mică ca în regimul $\omega = 100\% \omega_{\max}$ și sarcină manipulată maximă (fig.6.11), fiind chiar nulă la viteza unghiulară minimă. Existența unei deplasări a punctului caracteristic după acționarea întrerupătorului de siguranță, atestă prezența jocurilor din cuplele cinematice, a duratei de timp necesare transmiterii comenzii de oprire a motorului electric și de disipare prin frecare (cu sau fără frînă) a energiei cinetice a elementelor în mișcare.

6.1.7. Fenomene oscilatorii la oprirea deplasării au fost puse în evidență în diagramele din figurile 6.10 ÷ 6.13. Analizînd durata de timp necesară amortizării oscilațiilor (tabelul 6.7), se observă că, în general cu scăderea vitezei scade și durata de amortizare a oscilațiilor, cu excepția mișcării de translație verticală Z și de pivotare φ , la care timpul necesar anclanșării frînei și durata de disipare a energiei prin frecare fac ca aceste valori să difere.

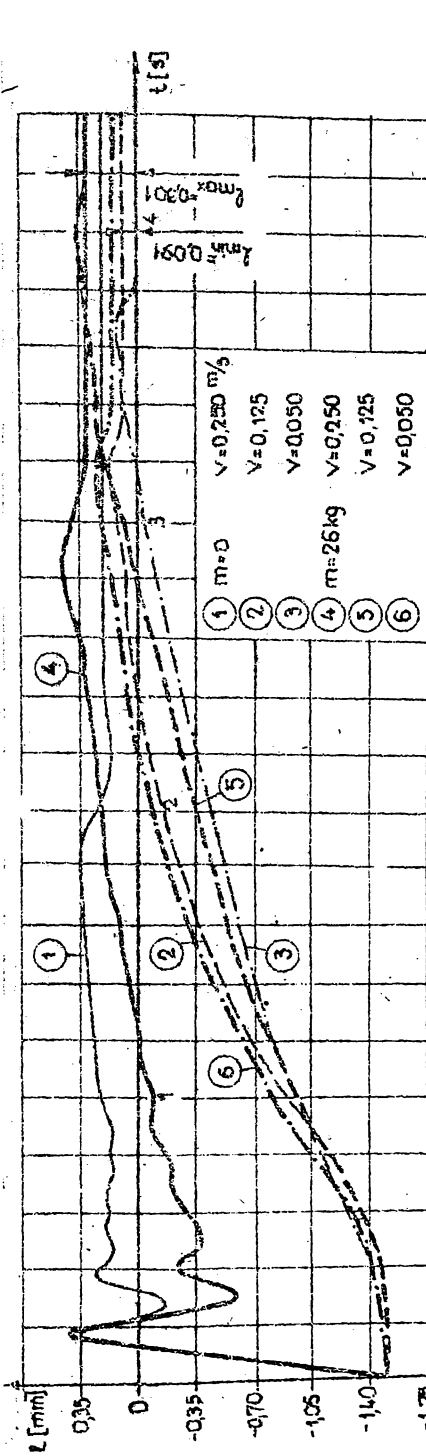


Fig. 6.10. Deplasarea și oscilațiile punctului caracteristic la oprirea modulului de translație bază, X

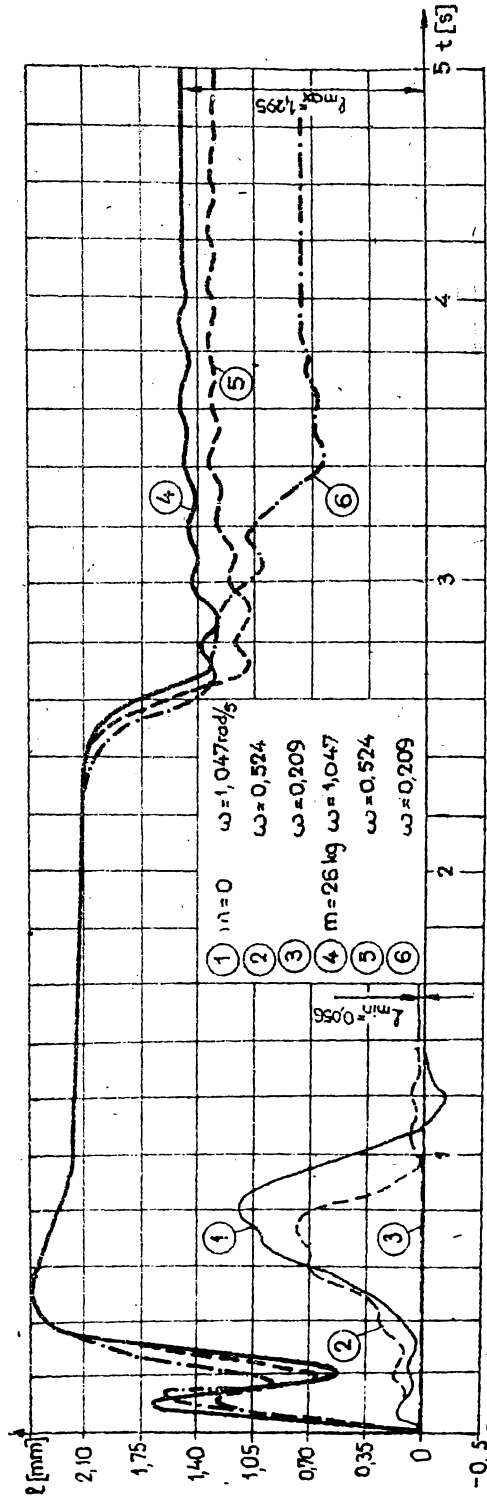


Fig. 6.11. Deplasarea și oscilațiile punctului caracteristic la oprirea modulului de rotație, φ

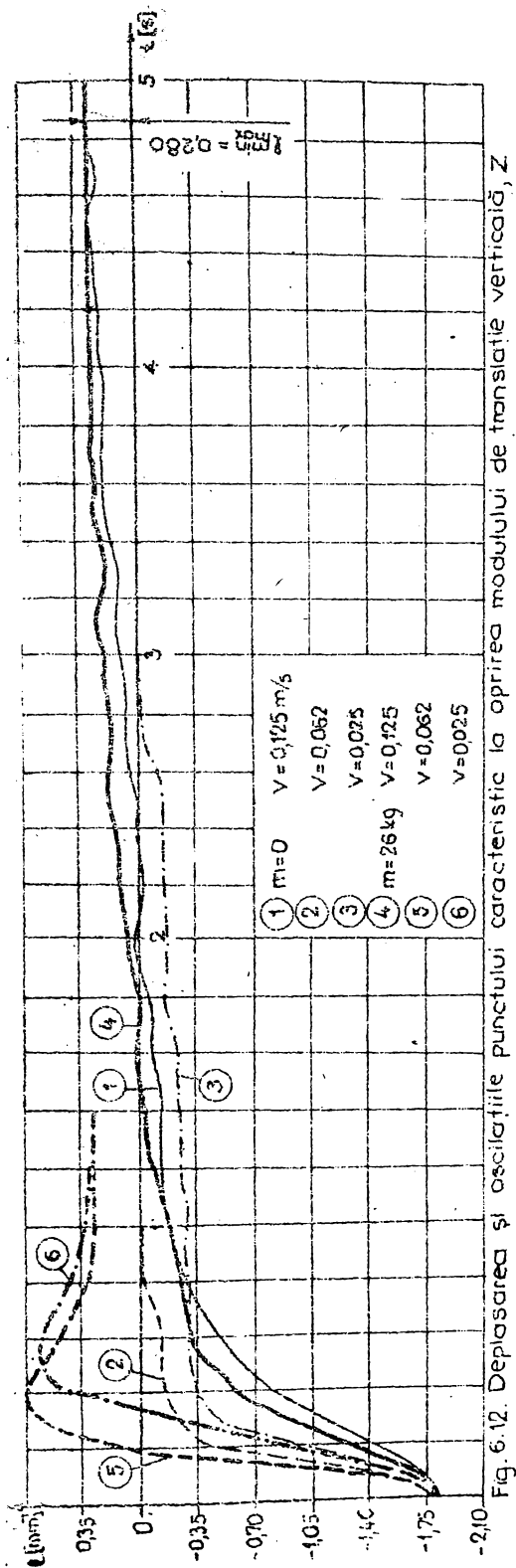


Fig. 6.12. Deplasarea și oscilațiile punctului caracteristic la oprirea modulului de translație verticală, Z

Durata de amortizare a oscilațiilor Tabelul 6.7.

Direcția de deplasare	Sarcina manipulată [kg]				
	m = 0				
	n = 26,151				
	Viteza în % Vmax (ωmax)				
	100%	50%	20%	100%	20%
	Timp de amortizare al oscilațiilor [s]				
X	2,4	3,4	3,8	3,2	3,4
Y	2,2	1,7	1,5	2,2	1,7
Z	4,9	1,0	3,0	3,7	1,4
φ	1,5	1,3	0	4,1	4,6

Deplasarea punctului caracteristic Tabelul 6.6.

Direcția de deplasare	Sarcina manipulată [kg]		Precizia de repetabilitate [mm]
	m = 26,151		
	Deplasarea punctului caracteristic Δ l [mm]		
	min	max	
X	0,091	0,301	± 0,500
Y	0,175	0,385	± 0,420
Z	0,280	0,280	± 0,320
φ	0,056	1,295	± 1,756

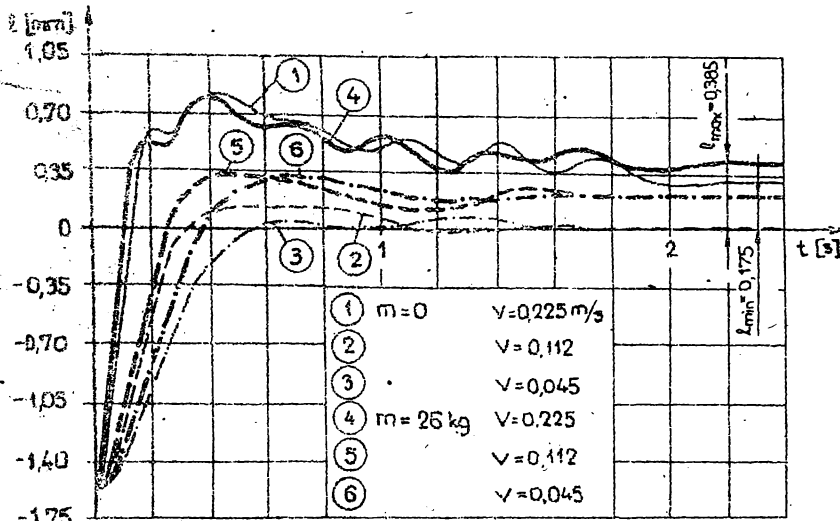


Fig. 6.13. Deplasarea și oscilațiile punctului caracteristic la oprirea modulului de translație orizontală, Y.

6.2. Stand pentru determinarea funcțiilor de comandă ale robotului industrial KEMT-3

În etapa a doua a determinărilor pe cale experimentală s-a utilizat un traductor de poziție inductiv montat, între partea fixă și cea mobilă a fiecărui modul în parte, fig. 6.14 pentru trasarea pe oscilograf a ciclogramei mișcării. Diagramele $v=v(t)$ respectiv $\omega=\omega(t)$ s-au obținut prin derivare numerică.

Din analiza ciclogramelor înregistrate s-a confirmat că mărimea sarcinii manipulate de robot este neglijabilă în raport cu masa mobilă a fiecărui modul în parte.

Modificarea vitezei în trepte de 20%, 50% și 100% V_{max} (ω_{max}) a pus în evidență ciclograma reprezentate în figurile 6.16; 6.18; 6.20 și 6.22.

Diagramele $v=v(t)$, respectiv $\omega=\omega(t)$ sînt prezentate în figurile 6.17; 6.19; 6.21, 6.23 și pun în evidența particularității legate de modul de variație al vitezei în regimurile tranzitorii. Astfel semnalul treaptă de schimbare al vitezei asigurat de variatorul electronic în regimurile tranzitorii, conduse la o mișcare periodică, cu amplitudinea oscilației avînd valori cuprinse între $\pm 10\%$ din valoarea vitezei programate, perioada de stabilizare variînd între 0,2 - 0,6 (max. 0,8) secunde.

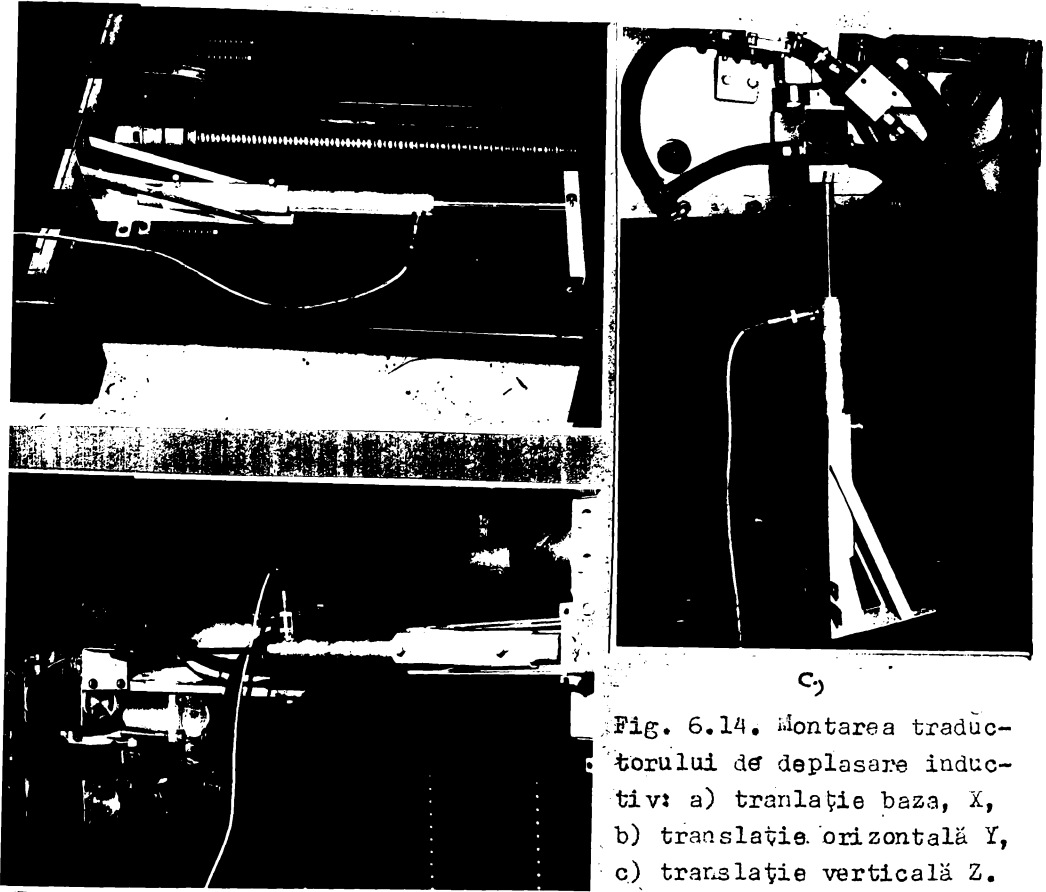


Fig. 6.14. Montarea traduc-
torului de deplasare inductiv: a) translație baza, X,
b) translație orizontală Y,
c) translație verticală Z.

b,

Datele extrase din diagramele de variație a vitezei în timp și centralizate în tabelul 6.8, evidențiază :

- încadrarea vitezelor maxime în limite restrânse, $1 \pm 12\%$ față de viteza maximă proiectată.

- abateri mari în regimul de funcționare cu viteză medie și joasă ($20\% V_{max}$), variind între $12 \pm 187\%$ favorizate în special de șocurile moi ce apar, în regimurile tranzitorii.

A treia etapă a determinărilor, experimentale efectuate pe robotul industrial REMT-3 a vizat măsurarea accelerațiilor. În acest scop utilizând trei traductori seismici, dispuși ca în figura 6.15, s-a înregistrat pe hîrtie fotosensibilă variația accelerației în timp, valorile maxime ale accelerațiilor, înregistrate după cele trei axe ale sistemului de referință, fiind centralizate în tabelul 6.9. Analizînd aceste valori se observă că :

Parametrii cinematici ai robotului Industrial REMT-3

Tabelul 6.8.

Direcția	Regim %V _{max}	Sensul deplasării	Spațiul parcurs [mm]	Timp ciclului [s]	Viteza medie [mm/s]	Viteza maximă [mm/s]		Eroarea relativă [%]	Timp V _{max} [s]	Accel. medie [mm/s ²]
						teoretic	experim.			
X	100	apropiere	225,75	2,2	102,61	250,0	247,5	1	0,65	380,769
		retragere		2,2	102,61		-247,5	1	1,05	235,714
	50	apropiere	223,50	4,2	53,214	125,0	123,75	1	1,35	91,666
		retragere		4,8	-46,562		-110	12	2,05	86,685
	20	apropiere	223,50	11,4	19,069	50,0	42,5	15	1,5	28,333
		retragere		19,6	11,403		-34,375	31,25	2,05	16,769
Y	100	extensie	219,065	2	109,532	225	250,275	11,23	1,05	238,357
		retragere		2	109,532		-234,350	4,13	1,15	203,739
	50	extensie	219,065	3,0	73,022	112,5	159,75	42	1,55	103,064
		retragere		3,0	73,022		-149,10	32,53	1,25	119,280
	20	extensie	218,0	5,2	41,923	45	84,0	86,67	1,15	73,043
		retragere		6,8	33,030		-74,75	66,11	1,15	65,0
Z	100	urcare	223,375	3,8	58,767	125	123,75	1	1,05	117,857
		coborire		3,6	62,032		-123,75	1	0,45	258,555
	50	urcare	223,375	5,0	44,663	62,5	101,55	62,48	0,75	135,400
		coborire		5,0	44,663		-107,40	71,84	0,65	165,231
	20	urcare	223,375	9,0	24,820	25	67,70	170,80	1,05	64,476
		coborire		7,4	30,186		-71,60	186,40	1,05	69,190
φ	Indif.	sens orar	41,525°	2,4	17,302%	45%	41,58%	7,6	0,55	75,600%
		sens trig.		1,8	23,069%		-40,59%	9,8	0,45	90,213%

- în cazul robotului REMT-3 sarcina manipulată are o influență neglijabilă asupra valorilor accelerației maxime.

- valoarea maximă a accelerației de 5,489 m/s² se obține în mișcarea de pivotare, după direcție radială, cu brațul extins 50% din cursa maximă.

- mișcarea de extensie, Y are funcționarea cea mai "liniștită" valorile accelerației maxime fiind semnificative numai pe direcția mișcării.

- de menționat o creștere cu 119,30% a accelerației medii (tabelul 6.8) în cursa de coborire față de cea de ridicare (a x a Z, V = 100% V_{max}).

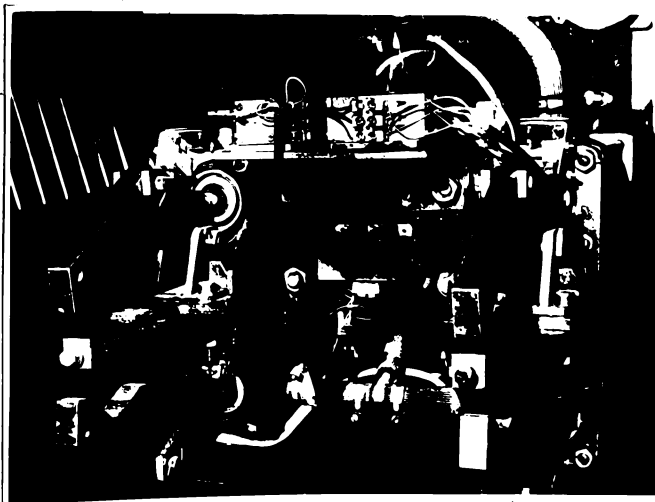


Fig.6.15 Montașul accelereometrelor.

Tabelul 6.9

Valorile accelerațiilor maxime măsurate pe robotul REMT - 3

Sarcina % M _{max}	Viteza % V _{max} (ω _{max})	Accelerația maximă [m/s ²]	Direcția de deplasare							
			X		φ		Z		Y	
			apropiere retroagere	sens orar trigonometric	sens trigonometric	urcare	coborâre	extensie	retragere	
0	100	a _x	1,829	0,311	0,566	0,566	1,697	1,358	0,113	0,085
		a _y	3,659	4,574	4,452	4,878	1,464	1,708	1,464	1,952
		a _z	4,360	3,139	2,703	3,401	2,516	3,837	0	0
	a _x	1,018	1,358	0,962	0,792	1,388	1,758	0,113	0,085	
	a _y	1,708	2,256	3,842	5,489	1,492	0,792	1	1,342	
	a _z	2,768	4,447	3,837	3,096	2,398	3,444	0	0	
100	100	a _x	0,566	0,735	0,849	0,792	0,622	0,568	0	0
		a _y	1,037	1,403	4,574	5,489	0,976	0,854	1,159	1,433
		a _z	2,398	2,594	3,139	3,357	2,747	3,052	0	0
	a _x	0,849	1,641	0,933	0,707	0,566	0,509	0,509	0,396	
	a _y	4,574	3,787	4,208	4,939	1,525	1,037	1,494	1,891	
	a _z	4,229	3,662	3,052	4,360	3,140	3,270	0	0	
100	50	a _x	1,246	1,301	0,962	0,424	0,905	0,566	0,339	0,226
		a _y	2,500	1,768	4,025	5,031	0,732	1,464	0,793	0,793
		a _z	3,270	3,182	3,226	1,875	2,180	3,140	0	0
	a _x	0,622	1,075	0,962	0,481	0,396	1,075	0	0	
	a _y	1,098	1,372	4,757	5,080	1,098	0,671	0,823	1,159	
	a _z	2,398	2,878	3,444	3,052	2,660	3,052	0	0	

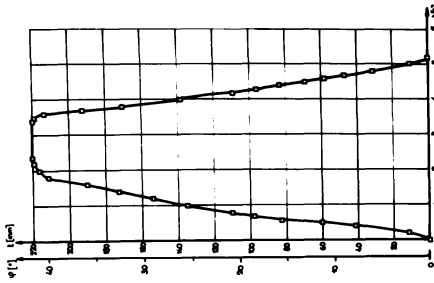


Fig 6.18 Octogonam mēdān: modulu de rotāre, φ

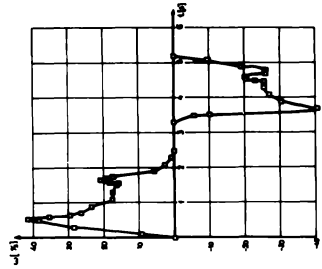


Fig 6.19 Diagrama v-v(x) o modulu de rotāre, φ

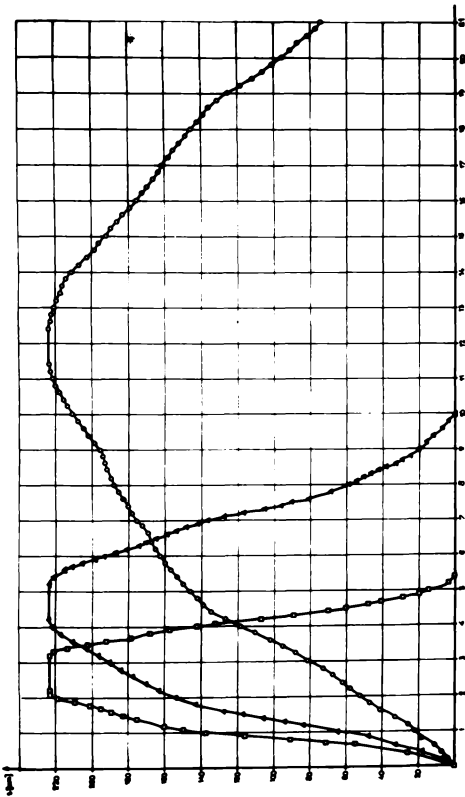


Fig 6.17 Diagrama v-v(x) o modulu de tensiōne Bato, X

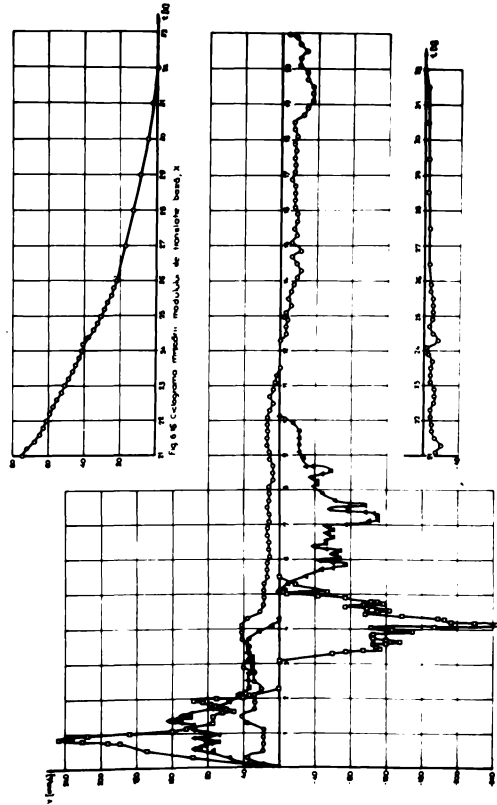
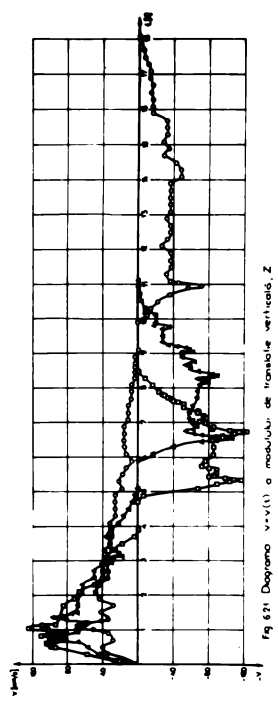
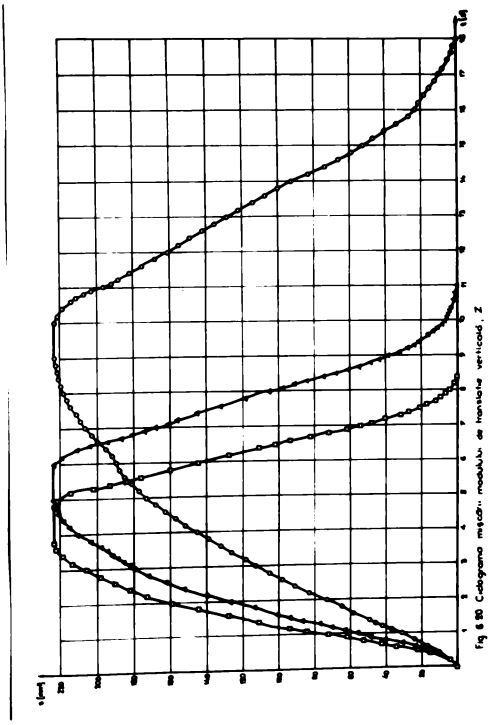
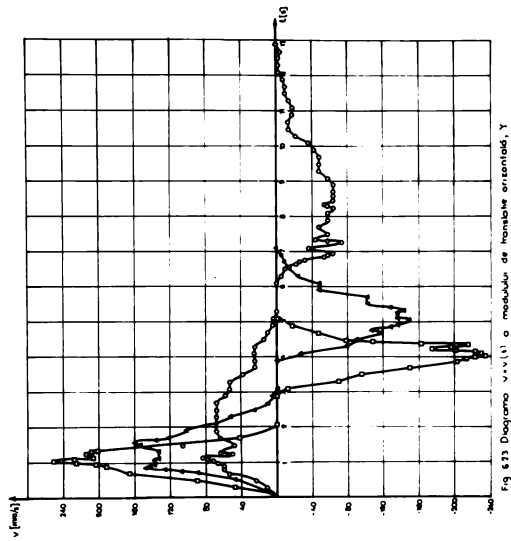
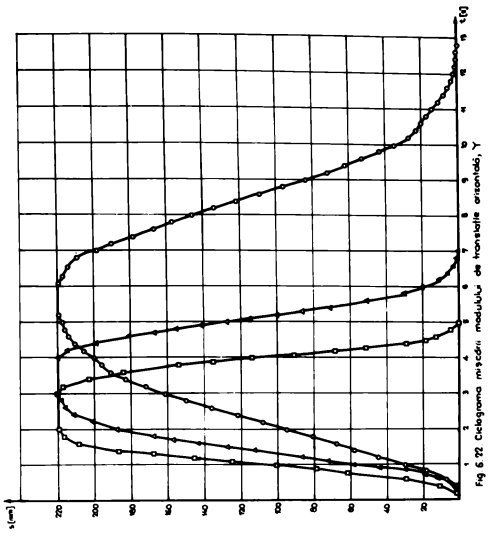


Fig 6.16 Octogonam mēdān: modulu de tensiōne Bato, X



6.3. Stand pentru determinări privind precizia cinematică a mecanismului de orientare din componenta robotului hidraulic R.H - 1 kN

Mecanismul de orientare al robotului hidraulic RH - 1 kN (fig.6.24) este un mecanism de orientare cu mișcări dependente.

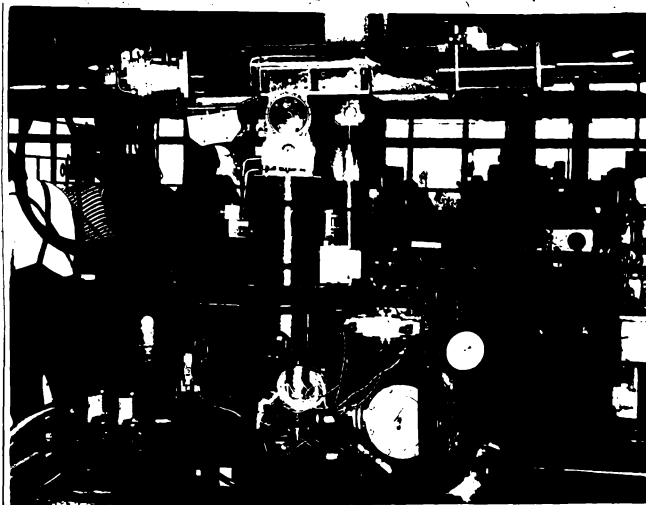


Fig.6.24. Robot hidraulic RH - 1 kN în faza de probe de mers în gol.

El a făcut obiectul unui contract de cercetare cu întreprinderea "Electrotimiș" din Timișoara [C 11], în cadrul căruia autorul a elaborat proiectul de execuție, al cărui desen de ansamblu este prezentat în figura 6.25. Sinteza structurală a acestui mecanism a fost studiată în prezenta lucrare (§ 4.2.9 pct. b 2).

Existența unei mișcări dependente, mișcarea de pronție-supinație α (fig.6.25) fiind influențată de executarea mișcării de flexie - extensie β , s-a efectuat determinarea pe cale experimentală a gradului de dependență dintre cele două mișcări.

Din figura 6.25 rezultă că lanțul cinematic al mișcării de flexie-extensie β conține un reductor melcat cu $i = 40$ (melc, poz.69 - roată melcată, poz.2), iar mișcarea de flexie-extensie are în plus un angrenaj conic, $i = 1$ (roțile conice poz.21 și 53).

Pentru măsurarea unghiurilor s-au utilizat traductoare TIRO-1000, pentru mișcarea motoare și traductoare TIRO-2000 pentru

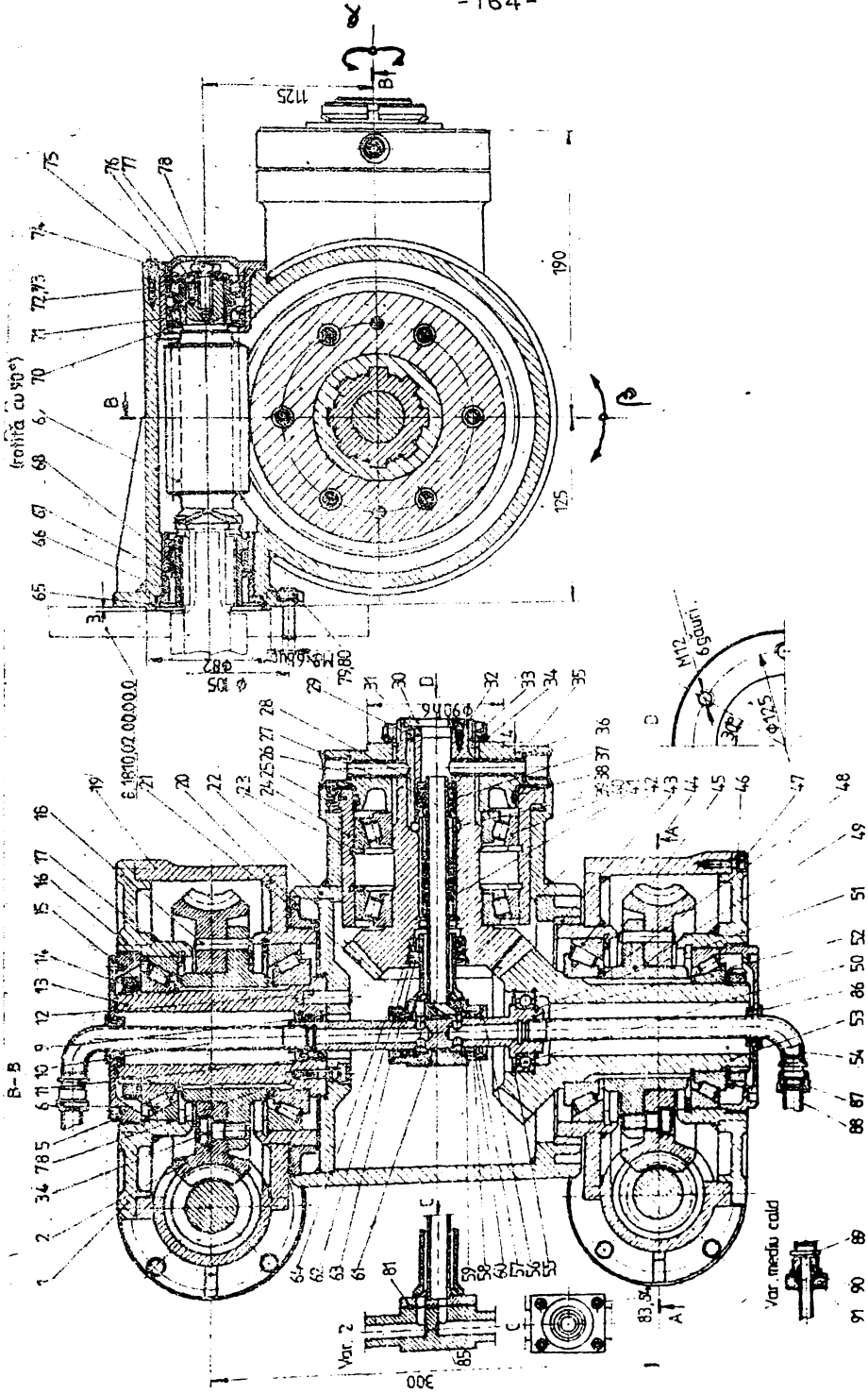


Fig.6.25. Desenul de ansamblu al mecanismului de orientare din
componenta robotului industrial RH - 1 kW.

mișcarea de ieșire, al căror semnal a fost cules la un numărător electronic (figura 6.26).

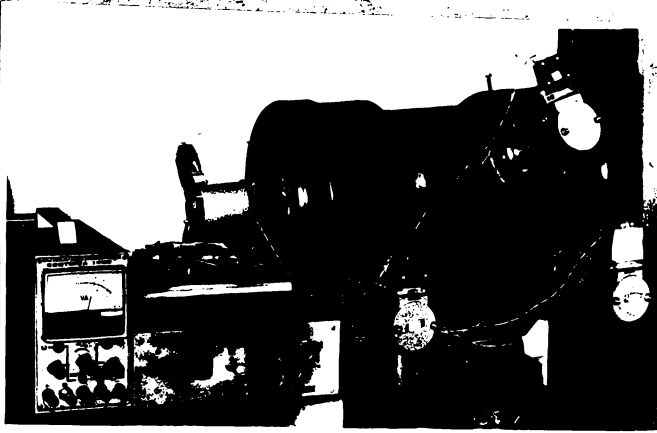


Fig.6.26. Stand pentru determinarea preciziei cinematice al mecanismelor de orientare.

Notînd cu x_α și x_β semnalele de intrare, unghiurile motoare și cu y_α și y_β , semnalele de ieșire, între cele două mărimi există o dependență liniară :

$$\begin{aligned} y_\alpha &= + k_\alpha \cdot x_\alpha \\ y_\beta &= - k_\beta \cdot x_\beta \end{aligned} \quad (6.19)$$

unde factorii de proporționalitate sînt dependenți de raportul de transmitere pe lanțul cinematic al mișcării :

$$k_\alpha = k_\beta = \frac{1}{40} \quad (6.20)$$

cu semnul plus fiind afectată mișcarea în sens orar.

Pentru studiul preciziei cinematice al mecanismului de orientare s-au efectuat patru măsurări distincte.

În primul rînd s-a urmărit determinarea pe cale experimentală al raportului de transmitere i_α pe lanțul cinematic al mișcării de pronăție-supinație, și variația acestuia $i_{\alpha x}$ de-a lungul unui ciclu cinematic al elementului de ieșire. Valoarea medie a acestui raport, rezultată din datele din tabelul 6.10 este $i_\alpha = 39,491$, evidențiind o eroare relativă de 1,27% față de raportul teoretic.

În al doilea rînd s-a determinat raportul de transmitere i_{β} pe lanțul cinematic al mișcării de flexie-extensie, care după cum rezultă din datele din tabelul 6.10 este influențat la schimbarea sensului de rotație, de jocul existent în special în angrenajul melcat ($\varepsilon = 6,38\%$).

Corelația dintre cele două mișcări exprimată conform relației (3.14) este :

$$x_{\beta} = i_{\alpha}^{\beta} \cdot y_{\alpha}^{\beta} \quad (6.21)$$

de care trebuie să se țină cont la întocmirea programului de comandă. Valoarea medie a raportului de transmitere $i_{\alpha}^{\beta} = 39,452$ prezintă o eroare relativă de 1,37% față de valoarea teoretică.

Ultimele două măsurări au urmărit simularea comportării mecanismului de orientare în condiții reale de funcționare, cînd mișcările motoare au acelaș sens de rotație ($x_{\alpha} = x_{\beta}$) și sensuri diferite ($x_{\alpha} = -x_{\beta}$).

Pe baza datelor prezentate în tabelul 6.10 se pot emite următoarele concluzii :

- la un ciclu cinematic eroarea de direcție este de $0,36 \pm 0,54^{\circ}$ pentru mișcarea de pronție-supinație și de $0,54^{\circ}$ pentru mișcarea de flexie-extensie.

- combinarea mișcărilor ($x_{\alpha} = x_{\beta}$), în scopul menținerii pe direcție a obiectului manipulat, prezintă o eroare absolută $\varepsilon = 0 \pm 0,90^{\circ}$ favorizată în special de schimbarea sensului de rotație al obiectului manipulat.

Variația rapoartelor de transmitere i_{α} , i_{β} și i_{α}^{β} pe un ciclu cinematic este prezentată în figura 6.27.

Tabelul 6.10
 Determinarea preciziei cinematice a mecanismului de orientare al robotului RH-1kn

X_{α} [grad]	Y_{α} [grad]	Z_{α} [grad]	X_{β} [grad]	Y_{β} [grad]	Z_{β} [grad]	X_{γ} [grad]	Y_{γ} [grad]	Z_{γ} [grad]	l_{β}	l_{α}	β [grad]	α [grad]	X_{α} [grad]	Y_{α} [grad]	Z_{α} [grad]	X_{β} [grad]	Y_{β} [grad]	Z_{β} [grad]	X_{γ} [grad]	Y_{γ} [grad]	Z_{γ} [grad]	X_{α} [grad]	Y_{α} [grad]	Z_{α} [grad]	X_{β} [grad]	Y_{β} [grad]	Z_{β} [grad]	X_{γ} [grad]	Y_{γ} [grad]	Z_{γ} [grad]		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	38,461	38,461	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+720	+18	40	-360	+9	0	+3,35	40	0	40	38,461	38,461	+360	+0,90	+0,90	+360	+0,90	+0,90	+360	+0,90	+0,90	+360	+0,90	+0,90	+360	+0,90	+0,90	+360	+0,90	+0,90	+360	+0,90	+0,90
+1440	+36	40	-720	+18	0	+18,30	40	0	40	38,095	37,735	+720	+0,90	0	+720	+0,90	0	+720	+0,90	0	+720	+0,90	0	+720	+0,90	0	+720	+0,90	0	+720	+0,90	0
+2160	+54	40	-1080	+27	0	+28,74	40	0	40	37,974	37,735	+1080	+0,90	0	+1080	+0,90	0	+1080	+0,90	0	+1080	+0,90	0	+1080	+0,90	0	+1080	+0,90	0	+1080	+0,90	0
+2880	+72	40	-1440	+36	0	+37,98	40	0	40	37,914	37,735	+1440	+0,90	0	+1440	+0,90	0	+1440	+0,90	0	+1440	+0,90	0	+1440	+0,90	0	+1440	+0,90	0	+1440	+0,90	0
+3600	+90	40	-1800	+45	0	+47,34	40	0	40	38,022	38,461	+1800	+0,90	0	+1800	+0,90	0	+1800	+0,90	0	+1800	+0,90	0	+1800	+0,90	0	+1800	+0,90	0	+1800	+0,90	0
+4320	+108	40	-2160	+54	0	+56,70	40	0	40	38,095	38,461	+2160	+0,90	0	+2160	+0,90	0	+2160	+0,90	0	+2160	+0,90	0	+2160	+0,90	0	+2160	+0,90	0	+2160	+0,90	0
+5040	+126	40	-2520	+63	0	+66,06	40	0	40	38,251	39,215	+2520	+0,90	0	+2520	+0,90	0	+2520	+0,90	0	+2520	+0,90	0	+2520	+0,90	0	+2520	+0,90	0	+2520	+0,90	0
+5760	+144	40	-2880	+72	0	+74,88	40	0	40	38,461	40	+2880	+0,90	0	+2880	+0,90	0	+2880	+0,90	0	+2880	+0,90	0	+2880	+0,90	0	+2880	+0,90	0	+2880	+0,90	0
+6480	+162	40	-3240	+81	0	+83,58	40	0	40	38,626	40	+3240	+0,90	0	+3240	+0,90	0	+3240	+0,90	0	+3240	+0,90	0	+3240	+0,90	0	+3240	+0,90	0	+3240	+0,90	0
+7200	+180	40	-3600	+90	0	+92,70	40	0	40	38,834	39,215	+3600	+0,90	0	+3600	+0,90	0	+3600	+0,90	0	+3600	+0,90	0	+3600	+0,90	0	+3600	+0,90	0	+3600	+0,90	0
+7920	+198	40	-3960	+99	0	+101,78	40	0	40	39,076	40,54	+3960	+0,90	0	+3960	+0,90	0	+3960	+0,90	0	+3960	+0,90	0	+3960	+0,90	0	+3960	+0,90	0	+3960	+0,90	0
+8640	+216	40	-4320	+108	0	+110,44	40	0	40	39,321	41,54	+4320	+0,90	0	+4320	+0,90	0	+4320	+0,90	0	+4320	+0,90	0	+4320	+0,90	0	+4320	+0,90	0	+4320	+0,90	0
+9360	+234	40	-4680	+117	0	+119,10	40	0	40	39,572	42,53	+4680	+0,90	0	+4680	+0,90	0	+4680	+0,90	0	+4680	+0,90	0	+4680	+0,90	0	+4680	+0,90	0	+4680	+0,90	0
+10080	+252	40	-5040	+126	0	+127,78	40	0	40	39,826	43,53	+5040	+0,90	0	+5040	+0,90	0	+5040	+0,90	0	+5040	+0,90	0	+5040	+0,90	0	+5040	+0,90	0	+5040	+0,90	0
+10800	+270	40	-5400	+135	0	+136,44	40	0	40	39,834	44,54	+5400	+0,90	0	+5400	+0,90	0	+5400	+0,90	0	+5400	+0,90	0	+5400	+0,90	0	+5400	+0,90	0	+5400	+0,90	0
+11520	+288	40	-5760	+144	0	+145,10	40	0	40	39,934	45,54	+5760	+0,90	0	+5760	+0,90	0	+5760	+0,90	0	+5760	+0,90	0	+5760	+0,90	0	+5760	+0,90	0	+5760	+0,90	0
+12240	+306	40	-6120	+153	0	+153,78	40	0	40	39,976	46,54	+6120	+0,90	0	+6120	+0,90	0	+6120	+0,90	0	+6120	+0,90	0	+6120	+0,90	0	+6120	+0,90	0	+6120	+0,90	0
+12960	+324	40	-6480	+162	0	+162,44	40	0	40	39,976	47,53	+6480	+0,90	0	+6480	+0,90	0	+6480	+0,90	0	+6480	+0,90	0	+6480	+0,90	0	+6480	+0,90	0	+6480	+0,90	0
+13680	+342	40	-6840	+171	0	+171,10	40	0	40	39,976	48,54	+6840	+0,90	0	+6840	+0,90	0	+6840	+0,90	0	+6840	+0,90	0	+6840	+0,90	0	+6840	+0,90	0	+6840	+0,90	0
+14400	+360	40	-7200	+180	0	+179,78	40	0	40	39,976	49,54	+7200	+0,90	0	+7200	+0,90	0	+7200	+0,90	0	+7200	+0,90	0	+7200	+0,90	0	+7200	+0,90	0	+7200	+0,90	0
+15120	+378	40	-7560	+189	0	+188,44	40	0	40	39,976	50,54	+7560	+0,90	0	+7560	+0,90	0	+7560	+0,90	0	+7560	+0,90	0	+7560	+0,90	0	+7560	+0,90	0	+7560	+0,90	0
+15840	+396	40	-7920	+198	0	+197,10	40	0	40	39,976	51,54	+7920	+0,90	0	+7920	+0,90	0	+7920	+0,90	0	+7920	+0,90	0	+7920	+0,90	0	+7920	+0,90	0	+7920	+0,90	0
+16560	+414	40	-8280	+207	0	+205,78	40	0	40	39,976	52,53	+8280	+0,90	0	+8280	+0,90	0	+8280	+0,90	0	+8280	+0,90	0	+8280	+0,90	0	+8280	+0,90	0	+8280	+0,90	0
+17280	+432	40	-8640	+216	0	+214,44	40	0	40	39,976	53,54	+8640	+0,90	0	+8640	+0,90	0	+8640	+0,90	0	+8640	+0,90	0	+8640	+0,90	0	+8640	+0,90	0	+8640	+0,90	0
+18000	+450	40	-9000	+225	0	+223,10	40	0	40	39,976	54,54	+9000	+0,90	0	+9000	+0,90	0	+9000	+0,90	0	+9000	+0,90	0	+9000	+0,90	0	+9000	+0,90	0	+9000	+0,90	0
+18720	+468	40	-9360	+234	0	+231,78	40	0	40	39,976	55,54	+9360	+0,90	0	+9360	+0,90	0	+9360	+0,90	0	+9360	+0,90	0	+9360	+0,90	0	+9360	+0,90	0	+9360	+0,90	0
+19440	+486	40	-9720	+243	0	+240,44	40	0	40	39,976	56,54	+9720	+0,90	0	+9720	+0,90	0	+9720	+0,90	0	+9720	+0,90	0	+9720	+0,90	0	+9720	+0,90	0	+9720	+0,90	0
+20160	+504	40	-10080	+252	0	+249,10	40	0	40	39,976	57,53	+10080	+0,90	0	+10080	+0,90	0	+10080	+0,90	0	+10080	+0,90	0	+10080	+0,90	0	+10080	+0,90	0	+10080	+0,90	0
+20880	+522	40	-10440	+261	0	+257,78	40	0	40	39,976	58,54	+10440	+0,90	0	+10440	+0,90	0	+10440	+0,90	0	+10440	+0,90	0	+10440	+0,90	0	+10440	+0,90	0	+10440	+0,90	0
+21600	+540	40	-10800	+270	0	+266,44	40	0	40	39,976	59,54	+10800	+0,90	0	+10800	+0,90	0	+10800	+0,90	0	+10800	+0,90	0	+10800	+0,90	0	+10800	+0,90	0	+10800	+0,90	0
+22320	+558	40	-11160	+279	0	+275,10	40	0	40	39,976	60,54	+11160	+0,90	0	+11160	+0,90	0	+11160	+0,90	0	+11160	+0,90	0	+11160	+0,90	0	+11160	+0,90	0	+11160	+0,90	0
+23040	+576	40	-11520	+288	0	+283,78	40	0	40	39,976	61,54	+11520	+0,90	0	+11520	+0,90	0	+11520	+0,90	0	+11520	+0,90	0	+11520	+0,90	0	+11520	+0,90	0	+11520	+0,90	0
+23760	+594	40	-11880	+297	0	+292,44	40	0	40	39,976	62,53	+11880	+0,90	0	+11880	+0,90	0	+11880	+0,90	0	+11880	+0,90	0	+11880	+0,90	0	+11880	+0,90	0	+11880	+0,90	0
+24480	+612	40	-12240	+306	0	+301,10	40	0	40	39,976	63,54	+12240	+0,90	0	+12240	+0,90	0	+12240	+0,90	0	+12240	+0,90	0	+12240	+0,90	0	+12240	+0,90	0	+12240	+0,90	0
+25200	+630	40	-12600	+315	0	+309,78	40	0	40	39,976	64,54	+12600	+0,90	0	+12600	+0,90	0	+12600	+0,90	0	+12600	+0,90	0	+12600	+0,90	0	+12600	+0,90	0	+12600	+0,90	0
+25920	+648	40	-12960	+324	0	+318,44	40	0	40	39,976	65,54	+12960	+0,90	0	+12960	+0,90	0	+12960	+0,90	0	+12960	+0,90	0	+12960	+0,90	0	+12960	+0,90	0	+12960	+0,90	0
+26640	+666	40	-13320	+333	0	+327,10	40	0	40	39,976	66,54	+13320	+0,90	0	+13320	+0,90	0	+13320	+0,90	0	+13320	+0,90	0	+13320	+0,90	0	+13320	+0,90	0	+13320	+0,90	0
+27360	+684	40	-13680	+342	0	+335,78	40	0	40	39,976	67,53	+13680	+0,90	0	+13680	+0,90	0	+13680	+0,90	0	+13680	+0,90	0	+13680	+0,90	0	+13680	+0,90	0	+13680	+0,90	0
+28080	+702	40	-14040	+351	0	+344,44	40	0	40	39,976	68,54	+14040	+0,90	0	+14040	+0,90	0	+14040	+0,90	0	+14040	+0,90	0	+14040	+0,90	0	+14040	+0,90	0	+14040	+0,90	0
+28800	+720	40	-14400	+360	0	+353,10	40	0	40	39,976	69,54	+14400	+0,90	0	+14400	+0,90	0	+14400	+0,90	0	+14400	+0,90	0	+14400	+0,90	0	+14400	+0,90	0	+14400	+0,90	0
+29520	+738	40	-14760	+369	0	+361,78	40	0	40	39,976	70,54	+14760	+0,90	0	+14760	+0,90	0	+14760	+0,90	0	+14760	+0,90	0	+14760	+0,90	0	+14760	+0,90	0	+14760	+0,90	0
+30240	+756	40	-15120	+378	0	+370,44	40	0	40	39,976	71,53	+15120	+0,90	0	+15120	+0,90	0	+15120	+0,9													

Tabelul f. 10 (continuare)

X_{α} [grad]	X_{β} [grad]	$l_{\alpha x}$	l_{β}	$l_{\beta x}$	$l_{\alpha x}$	l_{β}	$l_{\beta x}$	Y_{β} [grad]	X_{β} [grad]	Y_{β} [grad]	X_{α} [grad]	X_{α} [grad]	X_{β} [grad]	X_{β} [grad]	X_{α} [grad]	X_{β} [grad]	X_{α} [grad]	X_{β} [grad]
-1440	-26	40	388314	+720	-18	-17,54	40	40	44,287	35,215	-720	+0,90	0	-720	-34,38	+12,44	-720	-34,38
-720	-17,54	40	39215	+360	-9	-8,28	40	40	43,478	39,215	-360	+0,90	0	-360	-17,10	+12,28	-360	-17,10
0	+0,18	40	40	0	0	+0,90	40	40	39,215	39,215	0	+0,90	0	0	+0,18	+12,28	0	+0,18

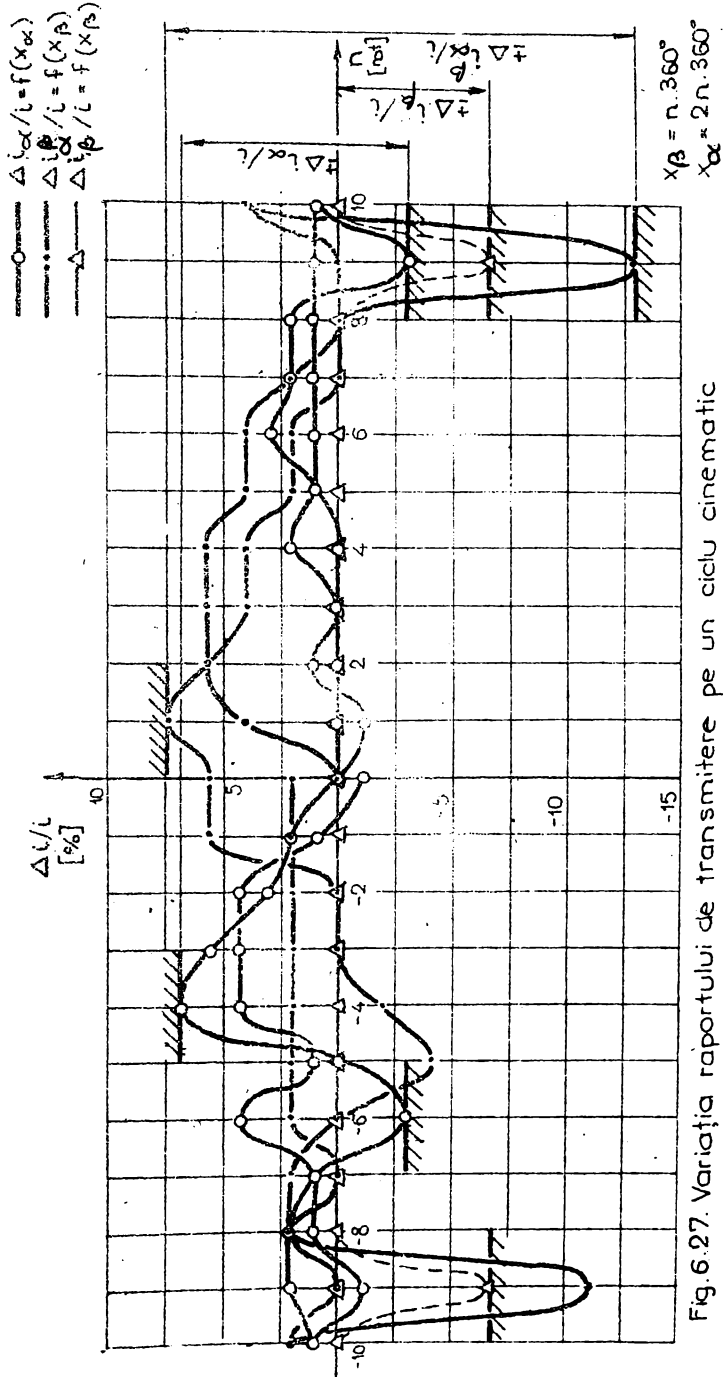


Fig. 6.27. Variația raportului de transmitere pe un ciclu cinematic

CAPITOLUL 7

CONSIDERATII FINALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE

Este deja un fapt dovedit de practica industrială că roboții pot ridica cu pînă la un ordin de mărime nivelul productivității muncii.

Datorită complexității sistemelor ce compun un robot industrial concepția, realizarea și implementarea sa în industrie constituie prin excelență o activitate cu caracter multidisciplinar. Sistemul mecanic are rolul de a materializa "gîndirea" sistemul de comandă prin intermediul sistemului de acționare.

Prezenta lucrare cuprinde sinteza cercetărilor teoretice și experimentale întreprinse de autor, pe o perioadă de mai bine de șase ani, cu privire la sistemul mecanic al roboților industriali în general și al mecanismelor de orientare, ca aplicații ale mecanismelor sferice, în particular, ce se concretizează în următoarele :

a) contribuții la studiul și analiza criterială a arhitecturii roboților industriali.

b) contribuții la elaborarea unor criterii de analiză a performanțelor roboților industriali.

c) stabilirea unui prim criteriu calitativ de departajare al mecanismelor de orientare cu mișcări independente de cele cu mișcări dependente.

d) stabilirea unor corelații analitice între numărul elementelor motoare și suma gradelor de libertate ale conexiunilor motoare.

e) stabilirea unor corelații analitice între numărul elementelor conduse și suma gradelor de libertate ale conexiunilor geometrice.

f) stabilirea relațiilor generale de calcul al gradelor de libertate al conexiunilor, dependent de numărul elementelor de diferite ranguri și numărul cuplelor cinematice componente, pentru mecanisme sferice.

g) stabilirea relației de calcul al conexiunilor avînd acelaș grad de libertate, dependent de numărul de elemente de diferite ranguri, pentru mecanisme sferice.

h) definirea și determinarea matricii conexiunilor, necesare sintezei structurale a mecanismelor de orientare.

i) stabilirea relațiilor de calcul al numărului de elemente și cuple cinematice ale conexiunilor geometrice ce conduc la soluții structurale de mecanisme de orientare fără grade de libertate de prisos (L_{id}) și/sau legături pasive (L_p).

j) stabilirea criteriului de optimizare structurală pentru obținerea de mecanisme de orientare cu mișcări independente.

k) optimizarea sintezei structurale a mecanismelor de orientare pe criteriul minimizării numărului de elemente și cuple cinematice.

l) elaborarea a două programe în limbaj Basic, rolate pe un calculator SPECTRUM ZX pentru sinteza structurală a mecanismelor de orientare.

m) stabilirea relațiilor de calcul al poziției și orientării obiectului manipulat, ca funcții de timp, în raport cu reperul fix atașat bazei robotului, pentru mecanismele de orientare avînd la bază mecanisme sferice și cvasisferice cu 1 - 3 grade de mobilitate.

n) stabilirea relațiilor de calcul al parametrilor de poziție, $\varphi_1 = \varphi_1(t)$, al cuplelor cinematice conducătoare în funcție de poziția și orientarea impusă obiectului manipulat, pentru mecanismele de orientare avînd la bază mecanisme sferice și cvasisferice cu 1 ÷ 3 grade de mobilitate.

o) stabilirea relațiilor de calcul al unghiului de servicii pentru mecanismele de orientare cu 1 ÷ 3 grade de mobilitate.

p) determinarea relațiilor de calcul al reacțiunilor și momentelor din cuplele cinematice conducătoare, în regim dinamic, dependent de sarcinile exterioare ce solicită mecanismul de orientare. Caracterul general al acestor relații, a permis ca în cazuri particulare tratate să se determine legile de variație al momentelor motoare.

r) utilizarea principiilor elaborate de sinteză structurală și dimensională la mecanismele de orientare concepute în cadrul a 6 contracte de cercetare științifică avînd ca beneficiari

intreprinderile: "Electrotimis", "Electromotor" și A.E.M. Timișoara, I.C.S.I.T. Titan București, MEVA Drobeta Turnu-Severin, Unio Satu-Mare.

a) cercetări experimentale privind precizia de repetabilitate, prin studiul probabilității încadrării în limitele impuse și a influențelor produse de variația vitezei și a sarcinii manipulate.

t) cercetări experimentale privind deplasarea minimă programabilă și studiul propagării erorilor.

u) cercetări experimentale privind eroarea de poziție și de traiectorie precum și a funcțiilor de comandă de ordinul zero, unu și doi.

v) cercetări experimentale privind precizia cinematică a mecanismului de orientare al robotului hidraulic RH-1 KN.

x) pentru activitatea depusă în cadrul colectivului de concepție și implementare în industrie a robotului REBIT-1, autorul a fost premiat cu Premiul "Traian Vuia" pe anul 1982 al Academiei R.S.R.

BIBLIOGRAFIE

1. Ceaușescu, Nicolae. - Raport la cel de al XIII-lea Congres al Partidului Comunist Român. Editura Politică, București, 1984 p.29
2. x x x - Directivele Congresului al XIII-lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economico-socială a României în cincinalul 1986-1990 și orientările de perspectivă până în anul 2000. Editura Politică, București 1984, p.22, p.25, p.33, p.54.
3. Ceaușescu, Nicolae. - România pe drumul construirii societății socialiste, multilateral dezvoltate, Vol.19. Editura Politică, București, 1980 p.31.
- A1. Albu, A., Blebea, I., Tăciulescu, N. - Cercetări asupra robotului industrial RBH-01 și performanțele obținute. Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct.1982, pag.1-8.
- A2. Albu, A., Blebea, I., ș.a. - Contribuția privind comportarea dinamică a roboților industriali acționați cu motoare liniare electrohidraulice pas cu pas, Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali, oct.1982, pag.9-17.
- A3. Albu, A., Blebea, I., ș.a. - Robotul industrial RGH-01. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali, București, 27-29 octombrie, 1983, p.1-6.
- A4. Albu, A., Blebea, I. - Noi soluții în construcția roboților industriali, aplicate la RBH-02. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea industrie", Timișoara, dec.1984, Vol. III, pag.1-8.
- A5. Albu, A., Galiș, M., Blebea, I. - Determinarea modelului matematic și cercetarea unui sistem de transfer pentru deplasarea roboților mobili cu comandă numerică după program Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct.1985. Partea I-a, pag.1-8.
- A6. Albu, A., Handra-Luca, V., ș.a. - Noi soluții pentru construcția, acționarea și comanda roboților industriali, cu braț multiarticulat. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, Vol.1, pag.257-266.
- A7. Albu, A., ș.a. - Elaborarea structurii constructive de acționare și comandă a unei celule flexibile de tratament termic robotizate, comandată prin microcalculator specializat, Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, Vol. III p.235-242.
- A8. Andre, P., Kauffmann, I., M, e.o. - Les robots. Constituants technologiques, Tome 4. Hermes Publishing, Paris, 1983
- A9. Artobolevski, I., I. - Teoria mecanismelor și mașinilor Editura tehnică, București, 1955

- A10. Artobolevski, I., I., Levitski, N., I., Cerkudinov, S., A., - Sintez ploskih mehanizmov. Fizmatgiz, Moskva, 1959
- A11. Artobolevski, I., I., - Teoria mehanizmov i mašin, Izdatelstvo "Visoko Skola" Moskva, 1965.
- A12. Artobolevski, I., I. -Théorie des mecanismes et de machines. Editura Mir, Moskva, 1977, p.629.
- A13. Asimov, I. - Eu, robotul. Editura Tineretului, București, 1967
- A14. Assur, L., V. - Issledovanie ploskih strejnevih mehanizmov s nizšimi parami s tociki zvenia ih strukturf i klassifikii. Izdatelstvo Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1952.
- B1. Baciú, C. - Aparatul locomotor. Editura medicală, București, 1981.
- B2. Badea-Dinca, N., Drăgănescu, M. - Informatica, științele sociale și științele culturii. Editura Tehnică, București, 1981.
- B3. Baltag, V. - Tehnica electronică de calcul și dezvoltarea României, Simpozionul "Contribuția tovarășului Nicolae Ceaușescu la introducerea și dezvoltarea informaticii în România", București, 19 martie, 1980.
- B4. Baranov, G., G. - Klasifiacija, stroenie, kinematika i kine-tostatika ploskih mehanizmov s porami pervevo roda, Trudi seminova po T.M.M. Akademia Nauka SSSR, V/20 Moskva, 1952.
- B5. Bălan, St. - Lecturi complementare de mecanică teoretică. Ed-tura didactică și pedagogică, București, 1969
- B6. Bolotin, L., M. - Analiz kinematiceskih struktur promišlennih robotov. Mașinovedenie, nr.2, 1984, p.33-39.
- B7. Buda, J., ș.a. - Manipulatočne a univerzálne roboty. Katalog I, 1 časť, Adaptívne roboty, 2 časť, Programoválne roboty. Vystup rešeni statniho bloku R.S.C, 1982.
- C1. x x x - Cartea tehnică a robotului industrial UNIMATE 2000.
- C2. x x x - Cartea tehnică a robotului industrial UNIMATE 4000
- C3. Cîrțu, N., D., Popescu, Gh. - Roboții industriali în sistemele flexibile. Seria AMC, nr.52, pag.285-323 și nr.53 pag.109-136, Editura Tehnică, București, 1986.
- C4. Cojocaru, G., Kovács, Fr. - Roboții în acțiune. Sistemele flexibile și fabricația de serie. Editura Facla, Timișoara, 1986.
- C5. Cojocaru, G., Kovács, Fr. - Roboții în acțiune. Probleme ale sin-tezei sistemelor de fabricație flexibilă. Editura Facla, Timișoara, 1986
- C6. x x x - Contract de cercetare științifică nr.1/1980. Beneficiar I. Electromotor, Timișoara
- C7. x x x - Contract de cercetare științifică nr.163/1980. Beneficiar C.C.S.I.T.M.U.A.M.P.S.Titan, București.

- C8. x x x - Contract de cercetare științifică nr.197/81,
Beneficiar I.A.S.M. Timișoara
- C9. x x x - Contract de cercetare științifică nr.224/1981
Beneficiar I.Electromotor, Timișoara
- C10. x x x - Contract de cercetare științifică nr.192/1982.
Beneficiar I.Electrotimiș, Timișoara
- C11. x x x - Contract de cercetare științifică nr.132/85.
Beneficiar I."Electrotimiș" Timișoara.
- C12. x x x - Contract de cercetare științifică nr.170/85.
Beneficiar I.MEVA, Drobeta-Turnu-Severin
- C13. x x x - Contract de cercetare științifică nr.136/86.
Beneficiar, I.Unio, Satu-Mare.
- C14. Crișan, I., Dobre, N. - Automatizarea montajului în construc-
ția de mașini. Editura Tehnică, București 1979, p.152.
- C15. Crișan, I. - Sisteme de fabricație flexibile, sesiunea comi-
siei de cibernetică a Academiei R.S.R. 20 aprilie
1982.
- C16. Crossley, F.R.E. - A contribution to Grubler's Theory in
the Number Synthesis of Plane Mechanisms.
Trans.of the ASME, Serie B., vol.86, febr.1964.
- D1. Davidovici, A. - Microtehnica, robotica industrială și auto-
matizarea suplă. Revista "Contemporanul" 30 mai
1980 și 17 septembrie 1982.
- D2. Davidoviciu, A., Drăgănoiu, Gh., Moangă, A. - Modelarea, simula-
rea și comanda manipuletoarelor și roboților in-
dustriali, Editura Tehnică, București, 1986.
- D3. Denavit J., Hartenberg, R., S. - A kinematic notation for lower
pair mechanisms based on matrices. Journal of app-
lied mechanics. Trans. ASME, 1955, iunie, p.215-221.
- D4. Denavit, J., Hartenberg, R., S., Razi, R., Gickler, J, J, Jr. - Velo-
city, acceleration and static-force analyses of
spațial linkages. Journal of applied mechanics,
Trans. ASME 1965, Paper no.65-APMW-13 p.1-8.
- D5. Diaconescu, D., Dudița, Fl. - Sinteza structurală a mecanisme-
lor de orientare destinate roboților industriali.
Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie"
Timișoara, dec.1984, vol. III, p.23-27.
- D6. Dobrovolski, V.V. - Teoria sfericeskih mehanizmov,
Mașghiz, Moskva, 1947.
- D7. Dobrovolski, V.V. - Teoria mehanizmov, Mașghiz, Moskva, 1951.
- D8. Dolga, V., Rădulescu, C., Văcărescu, I. - Asupra ecuațiilor dina-
mice și a supleței robotului industrial de tip
cartezian. Al III-lea Simpozion "Mecanisme și trans-
misii mecanice", Timișoara, 1980, Vol. 4, pag.159-164.
- D9. Dolga, V., Văcărescu, I., Rădulescu, C. - Principii de calcul
al sistemului motor cu notoare pas cu pas și șuru-
buri cu bile pentru roboți industriali. Al III-lea
Simpozion "Mecanisme și transmisii mecanice", Timi-
șoara, 1980, Vol. 4., pag. 165-172.

- D10. Drăgănescu, M. - Sistem și civilizație. Editura Politică, București, 1976.
- D11. Drăgănescu, M. - Structuri și inteligență artificială. Sesiunea științifică a Academiei "Stefan Gheorghiu". 3 februarie, 1978.
- D12. Drăgănescu, M. - A doua revoluție industrială. Microelectronica, automată, informatică - factori determinanți. Editura Tehnică, București, 1980, p. 32.
- D13. Drăgănescu, M. - Cibernetică industriei. Revista "Era Socialistă" nr. 18, 1982.
- D14. Drimer, D., Oprean, A., ș.a. - Roboți industriali și manipuloare. Editura tehnică, București, 1985.
- D15. Dudită, Fl. - Existența manivelei la mecanismele patrulete sferice. Studii și cercetări de mecanică aplicată Nr. 2-1965.
- D16. Dudită, Fl. - Transmisii cardanice, Editura tehnică, București, 1966.
- D17. Dudită, Fl. - Cuplaje mobile homocinetice, Editura tehnică, București, 1974.
- D18. Dudită, Fl., Diaconescu, D. - Sinteza structurală a mecanismelor de transport, destinate roboților industriali. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie" Timișoara, dec. 1984, Vol. III, pag. 39-48.
- E1. Гогорь, И. М. - Системы привода роботов. Издательство Ленинградского Университета, Ленинград, 1982.
- G1. Gheorghiu, H., Rădulescu, C., ș.a. - Modulul de rotație al robotului industrial REMPAI. Al VII-lea Simpozion "Mecanisme și transmisii mecanice". Timișoara, 1980, Vol. 4, pag. 123-128.
- G2. Gheorghiu, N. S., Perju, D. - Aspecte funcțional-constructive ale controlului poziției la roboți industriali. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie" Timișoara, 1984, dec. Vol. III, p. 63-70.
- G3. Gheorghiu, N. S., Perju, D. - Asupra mecanismelor tip "Trompă de elefant". Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec. 1984, p. 71-78. Vol. III.
- G4. Gheorghiu, N., Perju, D., ș.a. - Unele aspecte ale structurii și funcționării robotului industrial "Messer-Irisheim" specializat în sudarea în puncte. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali Brașov, dec. 1986, Vol. I, p. 17-26.
- G5. Gheorghiu, N., ș.a. - Manipulatoare dozatoare pentru alinierea mașinilor de turnat sub presiune. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali Brașov, dec. 1986, vol. III, p. 53-58.
- G6. Greger, B., Jacobi, P., ș.a. - Industrie roboter-Aufbau, Wirkungsweise und Anwendung, Maschinenbautechnik. 24 nr. 7, 1975, p. 209-303.

- G7. Groșanu, I., Văduva, Gh. - Studiul dinamic al roboților industriali prin metoda Newton-Euler, utilizând calculatorul electronic. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec. 1984, p. 79-86.
- G8. Groșanu, I. - Mecanică. Statica și cinematica Vol. I. Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1985.
- G9. Groșanu, I. - Mecanică. Dinamica, vol. II, Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1985.
- H1. Hartenberg, R., Denavit, J. - Kinematic synthesis of linkages, Mc.Graw-Hill Book Company, New York, 1964.
- I1. Ionemoto, K., Siino, K. - Sostoiannie i perspektivi razvitia robototekhnika v Japonii (referat stati). Stanki i instrument nr. 8, 1978, p. 37-38.
- I2. Ioniță, N. - Elemente de mecanică automatelor și dinamica automatizării proceselor industriale. Editura Tehnică, București, 1985.
- I3. Ispas, V., Pop, I., Bocu, M. - Roboți industriali. Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1985.
- I4. Iurevici, S., I., Avetikov, B. G., u. d. - Ustroistvo promislennix robotov, Izd. "Mašinostroeni" 1980.
- J1. x x x - Japan Industrial Robot Association, The specifications and applications of industrial robots in Japan. Shiba Koen, Minato-ku Tokio, 1982.
- J2. Joni, N. - Răpîndirea actuală a roboților industriali și prognoza dezvoltării numărului de RI, Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 17-19 octombrie, 1985 p. 339-347.
- K1. Kamîșani, N. I., Pavlenko, I. I. - Kinematica promislennix robotov, Vestnik mašinostroenia, nr. 1, 1975, p. 63-65.
- K2. Kobrinskij, A. E. - Vot oni-roboti. Izd. Nauka, Moskva, 1972.
- K3. Kobrinskij, A. E., Korendiacev, A. I., u. d. - Avtomaticeskie manipulatori c programmim upravleniem (promislennix roboti) Sostoiannie, perspektivi, problemî. Stanki i instrument nr. 11, 1974, p. 4-11.
- K4. Kovács, Fr. - Contribuții la elaborarea unei metode unitare de sinteză a mecanismelor. Teză de doctorat, Inst. Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1969.
- K5. Kovács, Fr., Dimulescu, V., Niculescu, V. - Beiträge zum Studium des menschlichen Oberarm-Unterarm und Handskelettes als offene räumliche kinematischen Kette. XII Vedecká konference kateder štasti stroju, 11-13 černa, Brno, 1975.
- K6. Kovács, Fr., Perju, D., Savii, G. - Metode noi de sinteză a mecanismelor. Editura Facla, Timișoara, 1976.
- K7. Kovács, Fr., Perju, D. - Mecanisme, Partea a II-a Sinteza mecanismelor. Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1977.
- K8. Kovács, Fr., Perju, D., Crudu, M. - Mecanisme. Partea I-a. Analiza mecanismelor. Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1978.

- K9. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Mehedințeanu, M. - Posibilități de realizare pe baza robotului RBMT-1 a două familii modularizate de roboți industriali. Primul simpozion național de roboți industriali, București, oct.1981, p.170-178.
- K10. Kovács, Fr., Rădulescu, C., Mălai, D. - Considerații cu privire la arhitectura generală a roboților industriali. Primul simpozion național de roboți industriali. București, 29-31 octombrie 1981, p.179-187.
- K11. Kovács, Fr., Rădulescu, C. - Cu privire la sinteza mecanismelor de orientare ale roboților industriali. Primul Simpozion național de roboți industriali, București, 29-31 oct.1981, pag.195-211.
- K12. Kovács, Fr. - Contribuții la elaborarea unei terminologii de robotică. Primul Simpozion național de roboți industriali, București, 29-31 octombrie 1981. pag.228-234.
- K13. Kovács, Fr., Mureșan, T., ș.a. - Robotul industrial RBMT-1. Lucrările SYROM-81, Vol. II, paper 19, p.177-191. București, 1981, p.177-191.
- K14. Kovács, Fr., Cojocaru, G. - Manipulatoare, roboți și aplicațiile lor industriale. Editura Facla, Timișoara, 1982.
- K15. Kovács, Fr., Rădulescu, C., ș.a. - Dispozitive de preluare ale roboților industriali. Revista "Construcția de mașini" 34, 1982, nr.10, p.535-536.
- K16. Kovács, Fr., Mureșan, T., Gheorghiu, N., Micșo, I., Selariu, M., Rădulescu, C., ș.a. - Robotul industrial RBMT-2. Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 29-31 octombrie, 1982 p.416-424.
- K17. Kovács, Fr. - Unele probleme economico-organizatorice și social-umane legate de implementarea unui robot industrial. Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 28-30 octombrie 1982, p.425-434.
- K18. Kovács, Fr., Mureșan, T., Popa, H. - Principii în tipizarea seriilor unitare și familiilor de roboți industriali. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct.1983, Partea I-a p.266-275.
- K19. Kovács, Fr., Mureșan, T., Gheorghiu, N., Rădulescu, C., ș.a. - Robotul industrial RBMT-3. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 27-29 octombrie 1983 p.276-282.
- K20. Kovács, Fr., ș.a. - Celulă de fabricație experimentală pentru prelucrarea unor piese în formă de disc. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct.1983, Partea II-a p.283-290.
- K21. Kovács, Fr. - Cu privire la unele probleme ale concepției, realizării, implementării în producție și exploatarea roboților industriali. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 27-29 octombrie 1983 p.291-297.

- K22. Kovács, Fr. - Tehnică, pasiune, eficiență. Revista "Forum studentesc" nr.5 martie 1984.
- K23. Kovács, Fr. - Cu privire la implementarea roboților în întreprinderi industriale. Sesiune de comunicări științifice "Electromotor'84", Timișoara, febr. 1984, Vol. II. p.4-11
- K24. Kovács, Fr., Cojocaru, G. - Pentru o știință interdisciplinară a producției. Al 4-lea Simpozion "Robotizare în industrie" Timișoara, dec.1984, vol. III, p.125-128.
- K25. Kovács, Fr. - Unele probleme ale corelării funcționării componentelor subsistemului de manipulare flexibilă automată. Problema pozițiilor. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie" Timișoara, dec.1984, Vol. III, p.129-134.
- K26. Kovács, Fr. - Unele probleme ale corelării funcționării componentelor subsistemului de manipulare automată. Problema vitezelor. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec.1984, Vol. III, p.135-138.
- K27. Kovács, Fr.-Rădulescu, C. - Cu privire la stadiul actual al construcției de roboți industriali. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec.1984, pag.139-148.
- K28. Kovács, Fr.-Groșanu, I., Mureșan, I., Gheorghiu, N., Rădulescu, C., ș.a. -Minirobot cu acționare electrică MRE-12, 5 N. Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 17-19 octombrie, 1985, p. 348-356.
- K29. Kovács, Fr., Groșanu, I., Mureșan, T., Gheorghiu, N., Straganu, C., Rădulescu, C., ș.a. - Robotul industrial cu acționare hidraulică RH-1k N. Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 17-19 octombrie 1985, p. 357-375.
- K30. Kovács, Fr., Groșanu, I., Gheorghiu, N., Mureșan, T., Văduva, Gh., Orgovici, I., Rădulescu, C., ș.a. -Microrobot cu acționare electrică $\mu R-2, 5N$, Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 17-19 octombrie, 1985, p. 376-382.
- K31. Kovács, Fr., Groșanu, I., Mureșan, I., Gheorghiu, N., Rădulescu, C., ș.a. - Minirobot cu acționare pneumatică MRP-12, 5 N Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 17-19 octombrie 1986, p. 383-393.
- K32. Kovács, Fr., Groșanu, I., Stoica, Gh., Gheorghiu, N., Mureșan, T., Rădulescu, C., ș.a. - Manipulator cu acționare pneumatică. Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 17-19 octombrie, 1985, p. 394-400.
- K33. Kovács, Fr. - Cu privire la formarea specialiștilor în robotică, în România, Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali Brașov, dec.1986, Vol. I. pag.293-300.
- K34. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., ș.a. - Încercarea unor capete de forță pneumatice pentru demaschetarea și debavurarea pieselor turnate. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, Vol. II, p.75-88.

- K35. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Groșanu, I., Mureșan, T., Rădulescu, C., ș.a. - Programarea roboților industriali de vopsire, Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, vol. II, p.271-277.
- K36. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Groșanu, I., Rădulescu, C., ș.a. - Manipulator cu acționare electrică M.A.E.100 N. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, pag.9-14, Vol. III.
- K37. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Groșanu, I., Mureșan, T., Rădulescu, C., ș.a. Robotul industrial RBMT-25. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, Vol. III. p.79-86.
- K38. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Văcărescu, I., ș.a. - Robot (reciprocator) de vopsire. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, Vol. III, p.119-128.
- K39. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., ș.a. - Celule de fabricație flexibilă, mecanizate pentru tăierea maselotelor, curățirea și debavurarea pieselor turnate. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.,1986, Vol. III, p.193-198.
- K40. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Sălăgean, T., Rădulescu C., ș.a. - Celulă de fabricație flexibilă pentru sudarea unor componente ale șasiului-vagon. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec. 1986, Vol. III. p.199-204.
- K41. Kovács, Fr., Micșă, I., ș.a. - Celulă de fabricație flexioilă pentru matrițarea la cald a unor semifabricate. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec.1986, Vol. III, p.225-234.
- K42. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Mesaroș-Anghel, ș.a. - Instalație automată pentru sablarea vagoanelor. Al 6-lea Simpozion național de roboți, Brașov, dec.1986 Vol. III, p.253-256.
- K43. Kozirev, I., G. - Promislennii roboti P R G, Stanki i instrument nr.10, 1979 p.24-25.
- K44. Kozirev, I., G. - Promislenie roboti-spravocinik, Mașinostroenie, Moskva 1983
- K45. Kraus, R. - Die Wetigkeitsbilanz und ihre Anverdung und der Geradführung für Messgeräte, Feinwerktechnik, 10, 1952.
- K46. Kraus, R. - Getriebelehre I, II, III. Technik Berlin, 1951, 1952, 1956
11. Lilov, L., K. - Structurnaia clasificaciia regionalnih dvijenii ispolnitelnovo organa robota. Dokl. Bolg. acad. nauk, Tom. 33, nr.9, 1980, p.1175-1177
2. Lündström, G., ș.a. - Industrial robots-A survey Details of construction, performance, prices and applications. Published by International Fluidics Services Ltd, Bedford, England, 1972.

- M1. Manolescu, N. L. - O metodă unitară de alcătuire a lanțurilor cinematice și a mecanismelor plane articulate de diferite grade de libertate și mobilitate. Studii și cercetări de mecanică aplicată, Tom XVII, nr. 6, 1964, p. 1465-1512.
- M2. Manolescu, N. I., ș.a. - Metodele de alcătuire a grupelor asurice în funcție de numărul de contururi și rangul elementelor. Buletinul I.P. București, Tom. 28, nr. 4, 1966
- M3. Manolescu, N. I. - Alcătuirea mecanismelor caracteristice plane cu zece elemente. Buletinul I.P. București nr. 4/1966
- M4. Manolescu, N. I. - De la grinzile Baranov cu ajutorul grafului la mecanismele cu articulații multiple. Comunicare la sesiunea XIII-a I.P. București, mai, 1970.
- M5. Manolescu, N. I., Tempea, I. - Sinteza structurală a lanțurilor cinematice plane articulate cu $e=10$ elemente, $c_5=13$ și $L_5=4$, Buletinul I.P. București, Tom XXXII, nr. 1, 1970, p. 65.
- M6. Manolescu, N., Kovács, Fr., Orănescu, A. - Teoria mecanismelor și a mașinilor. Editura didactică și pedagogică, București, 1972.
- M7. Marx, K., Engels, Fr. - Opere, vol. 23. Editura Politică, București 1966, p. 389-390.
- M8. Mădăraș, L., Rădulescu, C., Chiriac, D. - Aspecte ale comportării dinamice a modului de orientare din structura roboților industriali. Al 3-lea Simpozion de mecanisme și Transmisii mecanice. Timișoara, octombrie 1980, Vol. IV, p. 145-152.
- M9. Mășalar, L. - Considerații asupra RI/M prezentați la expoziția și Congresul "Robot 82", Brno. Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 28-30 octombrie 1982, p. 466-472.
- M10. Mășalar, L. - Tendințe de evoluție în robotică desprinse de la Sîngul Internațional din Brno-1984, Al 14-lea Simpozion "Robotizarea în industrie". Timișoara, 29 nov. - 2 dec. 1984 Vol. N. p. 295-302.
- M11. Megahed, S., Renaud, M. - Minimisation du temps de calcul le comande dynamique des robots manipulateurs. Etat de la robotique en France, AFRI, - Hermens Agence Vol. 1. Recherche. 1983. Paris.
- M12. Micșa, I., Kovács, Fr. - Linie tehnologică pentru prelucrarea arborilor și rotoarelor motoarelor electrice gabarit 180-225, deservită de roboți industriali, Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 28-30 octombrie 1982, p. 394-404
- M1. Nazarov, I. A., Kozirev, I. G. - Promislenie robotf Japonii, Stanki i instrument nr. 3 1978, p. 35-36.
- P1. Pavlenko, I. I. - Konstrukivnie i kinematicheskie variantf promišlenih robotov, Vestnik mašinostroenie, nr. 11, 1980, p. 3-5.
- P2. Pavlenko, I. I. - Kinematika kisti promišlennih robotov. Vestnik Mašinostroenia nr. 1. 1979, p. 28-30.

- P3. Pelecudi, Chr. - Metoda contururilor și sinteza numerică și structurală a lanțurilor cinematice. Studii și cercetări de mecanică aplicată, Tom XXV, nr.3, 1967.
- P4. Pelecudi, Chr. - Bazele analizei mecanismelor. Editura Academiei RSR, București, 1967.
- P5. Pelecudi, Chr. - Sinteza numerică și structurală a mecanismelor spațiale de diferite familii. Studii și cercetări de mecanică aplicată, nr.6, 1969.
- P6. Pelecudi, Chr. - Teoria mecanismelor spațiale. Editura Academiei RSR, București, 1972.
- P7. Pelecudi, Chr., Pandrea, N., ș.a. - Structura modulară a roboților industriali. Al 3-lea Simpozion de mecanisme și transmisii mecanice. Timișoara, octombrie 1980 p.107-113.
- P8. Pelecudi, Chr., Simionescu, I., ș.a. - Sinteza structurală și cinematică a multipolilor activi pentru mecanismele periferice ale roboților industriali. Al 3-lea Simpozion de mecanisme și transmisii mecanice. Timișoara, octombrie 1980, vol. IV. p.115-121.
- P9. Pelecudi, Chr., ș.a. - Reprezentarea prin 6 poli și calculul cinematic al mecanismului carolian. Primul simpozion național de roboți industriali, București, oct. 1981, p.325-332.
- P10. Pelecudi, Chr., ș.a. - Probleme de mecanisme. Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
- P11. Pelecudi, Chr., Simionescu, I., ș.a. - Mecanismul carolian cu mișcări independente. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 27-29 octombrie 1983, p.407-412.
- P12. Pelecudi, Chr., Semenescu, I., ș.a. - Celulă flexibilă de fabricație pentru frezat și amborat axe grele deservită de robotul industrial MERO-3B. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 27-29 octombrie 1983, p.394-399.
- P13. Peneș, D., Dumitru, A. - Robot de tip pistol cu șase grade de mobilitate, Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 27-29 octombrie 1983 p.435-438.
- P14. Perju, D. - Contribuții la sinteza mecanismelor plane pentru conducerea unui punct pe o curbă dată. Teză de doctorat, Inst. Politehnic București, 1971.
- P15. Perju, D. - Mecanisme de mecanică fină, vol. I. Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1986.
- P16. Perju, D., Gheorghiu, N. - Analiza mecanismului unui braț articulată (tip "trompă de elefant") cu bare și sectoare dințate. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie". Timișoara, dec. 1984, Vol. III. p.211-216.

- P17. Perju, D., Gheorghiu, N. - Braț articulată realizat ca mecanism cu bare (tip "trompă de elefant") utilizat în construcția roboților. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec. 1984, vol. III, p. 217-226.
- P18. Perju, D., Gheorghiu, N., Kovács, Fr., Varga, St., ș.a. - Manipulator sincron MS-200. Al 6-lea Simpozion național de roboți industriali, Brașov, dec. 1986, Vol. III, p. 45-52.
- P19. x x x - Program de realizare în R.S.R. în perioada 1985-1990 de celule și sisteme flexibile de prelucrare prin aşchiere și deformare la rece în construcția de mașini. I.C.S.L.T. Titan, București 1985.
- R1. Rădulescu, C., Kovács, Fr. - Spațiul de lucru-indicator calitativ al posibilităților de utilizare concretă a roboților industriali. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct. 1983 partea II-a p. 471-476.
- R2. Rădulescu, C., Kovács, Fr. - Aplicații ale mecanismelor sferice și cvasisferice în construcția mecanismelor de orientare din componența roboților industriali. Al 3-lea simpozion național de roboți industriali București, oct. 1983, partea II-a, p. 477-484.
- R3. Rădulescu, C. - Soluții constructive optime de mecanisme sferice și cvasisferice. Referat de doctorat nr. 1, Inst. Politehnic "Tr. Vuia" Timișoara, 1984.
- R4. Rădulescu, C. - Dinamica sistemelor de rigide cu punct fix. Referat de doctorat nr. 2, Timișoara, 1984.
- R5. Rădulescu, C. - Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor tehnice în domeniul mecanismelor sferice și cvasisferice. Referat de doctorat nr. 3, Timișoara 1985.
- R6. Rădulescu, C., Kovács, Fr. - Codul structural-indicator sintetic al structurii mecanice al unui robot industrial. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec. 1984, pag. 233-240.
- R7. Rădulescu, C., Kovács, Fr. - Mecanisme de orientare în concepție modulară acționate de motoare pneumatice liniare. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec. 1984, pag. 241-250.
- R8. Rădulescu, C., Văcărescu, I., Diaconu, A. - Robot industrial pentru schimbarea levatei în filaturi. Sesiune de comunicări științifice "Electromotor '84", Timișoara, febr. 1984, Vol. II, p. 160-166.
- R9. Rădulescu, C., Varga, St., Kovács, Fr. - Sinteză structurală a mecanismelor sferice cu $M=1 \div 3$, $N=1 \div 6$ și $n \leq n_7$ prin metoda elementelor. Al 3-lea Simpozion național PRASIC, Brașov, dec. 1986, p. 255-262.
- R10. Richard P., P. - Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control. M.I.T. Press Cambridge, England, 1982.
- R11. x x x - Robot Welding Advances, welding and Metal Fabrication november 1976, p. 613-620.

- R12. x x x - ROBOT 78 - Auswertung der Ausstellung für Industrieroboter in Brno. Maschinenbautechnik nr.4, 1979, p.181-184.
- R13. x x x - ROBOTY 79 - Nationale Wissenschaftlich - technische konferentz und Ausstellung Stara Zagora. Maschinenbautechnik nr.1, 1980, p.42-44.
- R14. x x x - Roboții în Japonia "Automatică Management, calculatoare, vol.43. Editura Tehnică, București, 1985.
- R15. Roman, V. - Industrializare, informatizare. Revista economică nr.36 și 37, 1982.
- R16. Roman, V. - Noua revoluție industrială. Revista economică nr.5 și nr.6, 1983.
- R17. Rosheim, E.M. - Robot wrist actuators. Robotics Age nov/dec. 1982, p.15-22.
- S1. Schraft, R.D., Womner, M. - Bestimmen der Achszahl von Industrierobotern nach vorgegebenen Aufgaben. Maschinenmarkt, 1984, nr.4, p.57-50.
- S2. Stănescu, A.M. - Tendințe de dezvoltare pe plan mondial în robotica industrială. Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali. București 28-30 octombrie 1982, p.435-443.
- S3. Surnin, B.N., ș.a. - Osobenosti konstrukcii robotov modulnogo tipo. Stanki i instrument, nr.7, 1978, p.13-16.
- U1. Uicker, J.J. - Dynamic behaviour of spatial linkages. Journal of applied mechanics Trans ASME, 1968, March 5, p.1-15.
- V1. Văcărescu, I., Văcărescu, V., Rădulescu, C. - Studiul cinematic și dinamic asupra membrului superior uman. COMEPIN 2, București, 1986.
- V2. Văduva, Gh., Orgovici, I., Groșanu, I., ș.a. - Robot cu acționare pneumatică R.P.-1, Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București 27-29 octombrie 1983, p.537-540.
- V3. Văduva, Gh., Groșanu, I. - Studiul cinematic al unor roboți industriali. Al 4-lea Simpozion "Robotizarea în industrie", Timisoara, dec.1984, p.269-276.
- V4. Văduva, Gh. - Simularea pe calculator a funcționării roboților industriali utilizând metoda teoremelor generale. Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct.1985, p.895-905.
- V5. Velicovici, V.B. - Promislenie roboti PNR, Stanki i instrument nr.10, 1979, p.25-27.
- V6. Velicovici, V.B., Kozirev, I.G. - Promislenie roboti CSSR. Stanki i instrument nr.1, 1980, p.35-36.
- V7. Vinogradov, I.B., Kobrinskii, A.E., Stepanenko Iu.A. ș.a. - Metod obenov i «servis» manipulatorov. Revista «Masincvedenie, 1969, nr.3, pag.17-19.
- V8. Vinogradov, I.V. - Kinematic features of human arm in "operator manipulator" system. J.I.S.M.-IFTOMH Symposium, Udine, 1974, Vol.2 p.185-192.

- V9. Volmer, J., ș.a. - Industrieroboter. VEB Verlag Technik, Ediția a 2-a Berlin, 1981.
- V10. Volmer, J., ș.a. - Industrieroboter. VEB Verlag Technik, Ediția a 3-a Berlin, 1983.
- W1. Warnecke, H., J., Schraft, R., D. - Industrieroboter, katalogband, Krausskopf-Verlag, G.m.b.H., Mainz, 1973.
- W2. Warnecke, H., I., Schraft, R., D. - Industrieroboter, Katalogband. Krausskopf-Verlag, G.m.b.H. Mainz, 1980.
- W3. Warnecke, H., J., Schraft, R., D. - Industrieroboter. Krausskopf-Verlag, G.m.b.H., Mainz, 1983.
- W4. Warnecke, H., J., Schraft, R., D., - Industrieroboter. Katalogband, Krausskopf Verlag G.m.b.H. Mainz, 1986.
- Z1. Zetu, D., Lungu, Gh., ș.a. - Realizarea și încercarea unui robot industrial pentru alimentarea preșelor de brichet deșeuri de tablă. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali. București, 27-29 octombrie 1983, p.544-550.

Program utilizat la sinteza structurală a
mecanismelor prin metoda elementelor [R9].

```
10 PRINT AT 1,10; "PROGRAM 0001"
20 PRINT AT 5,5; "Programul execută sinteza structurală a me-
canismelor avînd N = 1-6 contururi independente deformabile
cu M=1-3 grade de mobilitate utilizînd metoda elementelor."
30 PRINT AT 12,5; "Soluțiile viabile se aleg astfel ca elemente-
le de toate rangurile să fie în număr  $n_i \geq 0$ ."
40 PRINT AT 20,9; "Timișoara 24 iulie 1986"
50 STOP
60 DIM A $(1,30)
70 LET A $(1,1) = "1": LET A $(1,5 TO 6) = "nt":
LET A $(1,9 TO 10) = "n2": LET A $(1,13 TO 14) = "n3":
LET A $(1,17 TO 18) = "n4": LET A $(1,21 TO 22) = "n5":
LET A $(1,25 TO 26) = "n6": LET A $(1,29 TO 30) = "n7"
80 LET r=4
90 INPUT "N=?"; N; TAB(16); "M=?"; M
100 IF M < 1 OR M > 3 THEN GO TO 20
110 LET c5 = M + 3 * N
120 LET imax = 1 + N : LET nt = M + 2 * N + 1
130 IF imax < 2 OR imax > 7 THEN GO TO 20
140 IF imax = 7 THEN GO TO 220
150 IF imax = 6 THEN GO TO 210
160 IF imax = 5 THEN GO TO 200
170 IF imax = 4 THEN GO TO 190
180 IF imax = 3 THEN GO TO 310
190 LET q=N : DIM A (q,9) : GO TO 260
200 LET q=N * (1+INT (2 * (N-1)/3)) : DIM A (q,9) : GO TO 250
210 LET q=N * (1+INT (2 * (N-1)/3)) * (1+INT ((N-1)/2)) :
DIM A (q,8) : GO TO 240
220 LET q=N * (1+INT (2*(N-1)/3)) * (1+INT ((N-1)/2)) * (1+INT
(2*(N-1)/5)): DIM A (q,9) : GO TO 230
230 FOR a=0 TO INT (2 * (N-1)/5)
240 FOR b=0 TO INT ((N-1)/2)
250 FOR c=0 TO INT (2 * (N-1)/3)
260 FOR d=0 TO (N-1)
```



```
27a IF  $i_{\max} = 4$  THEN GO TO 32o
28o IF  $i_{\max} = 5$  THEN GO TO 34o
29o IF  $i_{\max} = 6$  THEN GO TO 35o
30o IF  $i_{\max} = 7$  THEN GO TO 36o
31o LET q=1: DIM A (q,8): LET  $n_3 = n_2 * (N-1)$ :
    LET  $n_2 = n_t - n_3$ : LET A (1,1)=1: LET A (1,2) =  $n_t$ : LET A(1,3)= $n_2$ :
    LET A(1,4)= $n_3$ : LET A(1,5)=0: LET A(1,6)=0: LET A(1,7)= 0 :
    LET A(1,8)=0 GO TO 91o
32o LET  $n_4 = d$ : LET  $n_3 = 2 * (N-1-n_4)$ : LET  $n_2 = n_t - n_3 - n_4$ 
33o LET  $i = n_4 + 1$ : LET A(i,1)=i: LET A(i,2) =  $n_t$ : LET A(i,3)= $n_2$ :
    LET A(i,4)= $n_3$ : LET A(i,5)= $n_4$ : LET A(i,6)=0: LET A(i,7)=0 :
    LET A(i,8)=0: NEXT d: GO TO 91o
34o LET  $n_4 = d$ : LET  $n_5 = c$ : LET  $n_3 = 2 * (N-1-n_4) - 3 * n_5$ :
    LET  $n_2 = n_t - n_3 - n_4 - n_5$  : GO TO 37o
35o LET  $n_4 = d$  : LET  $n_5 = c$ : LET  $n_6 = b$ : LET  $n_3 = 2 * (N-1-n_4-2 * n_6) -$ 
     $-3 * n_5$ : LET  $n_2 = n_t - n_3 - n_4 - n_5 - n_6$ : GO TO 41o
36o LET  $n_4 = d$ : LET  $n_5 = c$ : LET  $n_6 = b$ : LET  $n_7 = a$ : LET  $n_3 = 2 * (N-1-n_4-$ 
     $-2 * n_6) - 3 * n_5 - 5 * n_7$ : LET  $n_2 = n_t - n_3 - n_4 - n_5 - n_6 - n_7$ : GO TO 51o
37o IF  $n_5 = 0$  THEN LET k=1
38o IF  $n_5 = 1$  THEN LET k=5
39o IF  $n_5 = 2$  THEN LET k=9
40o GO TO 88o
41o IF  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 0$  THEN LET k=1
42o IF  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 1$  THEN LET k=6
43o IF  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 2$  THEN LET k=11
44o IF  $n_6 = 1$  AND  $n_5 = 0$  THEN LET k=16
45o IF  $n_6 = 1$  AND  $n_5 = 1$  THEN LET k=21
46o IF  $n_6 = 1$  AND  $n_5 = 2$  THEN LET k=26
47o IF  $n_6 = 2$  AND  $n_5 = 0$  THEN LET k=31
48o IF  $n_6 = 2$  AND  $n_5 = 1$  THEN LET k=36
49o IF  $n_6 = 2$  AND  $n_5 = 2$  THEN LET k=41
50o GO TO 89o
51o IF  $n_7 = 0$  AND  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 0$  THEN LET k=1
52o IF  $n_7 = 0$  AND  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 1$  THEN LET k=7
53o IF  $n_7 = 0$  AND  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 2$  THEN LET k=13
54o IF  $n_7 = 0$  AND  $n_6 = 0$  AND  $n_5 = 3$  THEN LET k=19
55o IF  $n_7 = 0$  AND  $n_6 = 1$  AND  $n_5 = 0$  THEN LET k=25
56o IF  $n_7 = 0$  AND  $n_6 = 1$  AND  $n_5 = 1$  THEN LET k=31
```

```
570 IF n7=0 AND n6=1 AND n5=2 THEN LET k=37
580 IF n7=0 AND n6=1 AND n5=3 THEN LET k=43
590 IF n7=0 AND n6=2 AND n5=0 THEN LET k=49
600 IF n7=0 AND n6=2 AND n5=1 THEN LET k=55
610 IF n7=0 AND n6=2 AND n5=2 THEN LET k=61
620 IF n7=0 AND n6=2 AND n5=3 THEN LET k=67
630 IF n7=1 AND n6=0 AND n5=0 THEN LET k=73
640 IF n7=1 AND n6=0 AND n5=1 THEN LET k=79
650 IF n7=1 AND n6=0 AND n5=2 THEN LET k=85
660 IF n7=1 AND n6=0 AND n5=3 THEN LET k=91
670 IF n7=1 AND n6=1 AND n5=0 THEN LET k=97
680 IF n7=1 AND n6=1 AND n5=1 THEN LET k=103
690 IF n7=1 AND n6=1 AND n5=2 THEN LET k=109
700 IF n7=1 AND n6=1 AND n5=3 THEN LET k=115
710 IF n7=1 AND n6=2 AND n5=0 THEN LET k=121
720 IF n7=1 AND n6=2 AND n5=1 THEN LET k=127
730 IF n7=1 AND n6=2 AND n5=2 THEN LET k=133
740 IF n7=1 AND n6=2 AND n5=3 THEN LET k=139
750 IF n7=2 AND n6=0 AND n5=0 THEN LET k=145
760 IF n7=2 AND n6=0 AND n5=1 THEN LET k=151
770 IF n7=2 AND n6=0 AND n5=2 THEN LET k=157
780 IF n7=2 AND n6=0 AND n5=3 THEN LET k=163
790 IF n7=2 AND n6=1 AND n5=0 THEN LET k=169
800 IF n7=2 AND n6=1 AND n5=1 THEN LET k=175
810 IF n7=2 AND n6=1 AND n5=2 THEN LET k=181
820 IF n7=2 AND n6=1 AND n5=3 THEN LET k=187
830 IF n7=2 AND n6=2 AND n5=0 THEN LET k=193
840 IF n7=2 AND n6=2 AND n5=1 THEN LET k=199
850 IF n7=2 AND n6=2 AND n5=2 THEN LET k=205
860 IF n7=2 AND n6=2 AND n5=3 THEN LET k=211
870 GO TO 900
880 LET i=n4+k: LET A(i,1)=i: LET A(i,2)=nt: LET A(i,3)=n2:
    LET A(i,4)=n3: LET A(i,5)=n4: LET A(i,6)=n5: LET A(i,7)=0:
    LET A(i,8)=0: NEXT d: NEXT c: GO TO 910
890 LET i=n4+k: LET A(i,1)=i: LET A(i,2)=nt: LET A(i,3)=n2:
    LET A(i,4)=n3: LET A(i,5)=n4: LET A(i,6)=n5: LET A(i,7)=n6:
    LET A(i,8)=0: NEXT d: NEXT c: NEXT b: GO TO 910
```

```
900 LET i=n4+k : LET A(i,1)=i : LET A(i,2) = nt : LET A(i,3)=n2 :  
    LET A(i,4)=n3 : LET A(i,5)=n4 : LET A(i,6)=n5 : LET A(i,7)=n6 :  
    LET A(i,8)=n7 : NEXT d : NEXT c : NEXT b : NEXT a:GO TO 910  
910 CLS : PRINT AT 0,3; "CONSTANTE:" : PRINT AT 0,14; "M=";  
    M: PRINT AT 0,19; "N=";N: PRINT AT 0,24;"c5=";c5  
920 PRINT AT 2,1; A$(1,1 TO 30): PRINT AT 3,1;  
930 IF N<5 THEN GO TO 960  
940 IF N=5 THEN GO TO 990  
950 IF N>5 THEN GO TO 1070  
960 FOR i=1 TO q : FOR j=1 TO 8  
970 PRINT AT 3+i, 1+(j-1) * r ; A(i,j)  
980 NEXT j: NEXT i: GO TO 1240  
990 LET p=q/15  
1000 FOR k=1 TO p  
1010 IF k=1 THEN LET s=1  
1020 IF k=2 THEN LET s=17  
1030 IF k=3 THEN LET s=33  
1040 FOR i=s-k+1 TO 15 * k: FOR j=1 TO 8  
1050 PRINT AT 3+i+(1-k)* 15,1+(j-1)* r ; A(i,j)  
1060 NEXT j: NEXT i: STOP : CLS : NEXT k:-GO TO 1240  
1070 LET p=q/18  
1080 FOR k=1 TO p  
1090 IF k=1 THEN LET s=1  
1100 IF k=2 THEN LET s=20  
1110 IF k=3 THEN LET s=39  
1120 IF k=4 THEN LET s=58  
1130 IF k=5 THEN LET s=77  
1140 IF k=6 THEN LET s=95  
1150 IF k=7 THEN LET s=115  
1160 IF k=8 THEN LET s=134  
1170 IF k=9 THEN LET s=153  
1180 IF k=10 THEN LET s=172  
1190 IF k=11 THEN LET s=191  
1200 IF k=12 THEN LET s=210  
1210 FOR i=s-k+1 TO 18*k: FOR j=1 TO 8  
1220 PRINT AT 3+i+(1-k)*18, 1+(j-1)* r; A(i,j)  
1230 NEXT j: NEXT i: STOP: CLS: NEXT k  
1240 STOP
```

Annex 2.

Solufii ale sintezei structurale a mecanismelor cu $M=1-3, N=1-6$

#1 $n \leq n_7$ prin metoda elementelor

ID	Z	Structura numerica																
		1			2			3			Structura numerica							
M	N	C	n	n ₂	C	n	n ₂	C	n	n ₂	C	n	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	n ₆	n ₇
30	1	4	4	4	3	5	6	6	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0
31	2	7	6	4	8	7	5	9	8	6	5	8	6	2	0	0	0	0
32	3	10	8	4	11	9	5	12	10	6	4	0	0	0	0	0	0	0
33	4			5		6				7	2	1	0	0	0	0	0	0
34	5			6		7				8	0	2	0	0	0	0	0	0
35	6	13	10	4	14	11	5	15	12	6	6	0	0	0	0	0	0	0
36	7			5		6				7	4	1	0	0	0	0	0	0
37	8			6		7				8	2	2	0	0	0	0	0	0
38	9			7		8				9	0	3	0	0	0	0	0	0
39	10			8		9				10	1	1	0	0	0	0	0	0
40	11			9		10				11	0	0	2	0	0	0	0	0
41	12			10		11				12	0	2	2	0	0	0	0	0
42	13	16	12	4	17	13	5	18	14	6	8	0	0	0	0	0	0	0
43	14			5		6				7	6	1	0	0	0	0	0	0
44	15			6		7				8	4	2	0	0	0	0	0	0
45	16			7		8				9	2	3	0	0	0	0	0	0
46	17			8		9				10	0	4	0	0	0	0	0	0
47	18			9		10				11	6	0	1	0	0	0	0	0
48	19			10		11				12	3	1	1	0	0	0	0	0
49	20			11		12				13	2	2	0	0	0	0	0	0
50	21			12		13				14	1	2	0	2	0	0	0	0
51	22			13		14				15	0	1	2	0	0	0	0	0
52	23			14		15				16	4	0	0	1	0	0	0	0
53	24			15		16				17	2	1	0	1	0	0	0	0
54	25			16		17				18	0	2	0	1	0	0	0	0
55	26			17		18				19	1	0	1	1	0	0	0	0
56	27	6	19	14	4	20	15	5	21	16	6	10	0	0	2	0	0	0
57	28			18		19				20	7	8	1	0	0	0	0	0
58	29			19		20				21	8	1	0	0	0	0	0	0

Program utilizat la sinteza structurală a
mecanismelor prin metoda conturilor.

```
10 PRINT AT 1,10 ; "PROGRAM 0002"
20 PRINT AT 5,5 ; "Programul execută sinteza structurală a
mecanismelor avînd M=1-6 contururi independente deformabile
cu M=1-3 grade de mobilitate utilizînd metoda conturilor."
30 PRINT AT 13,9; "Timișoara 20 iunie 1987"
40 PRINT AT 15,1; "1.Toate valorile pentru M și N"; AT 16,1
"2. Valori pentru M și N impuse": AT 20,1:
"APASATI TASTA CORESPUNZATOARE"
50 IF INKEY $ = " " THEN GO TO 50
60 IF INKEY $ = "1" THEN GO TO 100
70 IF INKEY $ = "2" THEN GO TO 170
80 IF INKEY $ <> "1" OR INKEY $ <> "2" THEN GO TO 50
90 STOP
100 CLS
110 FOR c=1 TO 3
120 FOR b=1 TO 6
130 GO SUB 210
140 NEXT b
150 NEXT c
160 STOP
170 INPUT "M= "; c, "N= "; b
180 CLS
190 GO SUB 210
200 STOP
210 DIM a(16)
220 LET nmic = c+2 * b+1
230 LET cmic = c+3 * b
240 LET kmic = INT (((2 * c mic)/1+b)*10+5)/10)
250 IF n mic <=(2 * c mic-4 * b) THEN LET k max = n mic
260 IF n mic > (2 * c mic-4 * b) THEN LET k max=(2 * c mic -4 * b)
270 LET sigma = 2 * (n mic+b-1)
280 FOR i=k min TO k max
285 PRINT ; "|-----|";
PRINT "M=";c"; "N="; b;" ";k="i;" "; "SIGMA=";sigma;
```

```
PRINT " |-----|":
PRINT " | M N N N N N V N N N N N " : PRINT " | 4 5 6 7 8
9 1 1 1 1 1 1 1 " : PRINT " |----- 0 1 2 3 4 5 6 " :
PRINT " |-----
- - - |"
290 FOR k=0 TO sigma/16 * (i >= 16)
300 FOR l = 0 TO sigma/15 * (i >= 15)
310 FOR m = 0 TO sigma/14 * (i >= 14)
320 FOR n = 0 TO sigma/13 * (i >= 13)
330 FOR o = 0 TO sigma/12 * (i >= 12)
340 FOR p = 0 TO sigma/11 * (i >= 11)
350 FOR q = 0 TO sigma/10 * (i >= 10)
360 FOR r = 0 TO sigma/9 * (i >= 9)
370 FOR s = 0 TO sigma/8 * (i >= 8)
380 FOR t = 0 TO sigma/7 * (i >= 7)
390 FOR u = 0 TO sigma/6 * (i >= 6)
400 FOR v = 0 TO sigma/5 * (i >= 5)
410 FOR w = 0 TO sigma/4
420 LET a(16)=k: LET a(15)=l : LET a(14) = m :
LET a(13)=n: LET a(12)=o : LET a(11) = p :
LET a(10)=q: LET a( 9)=r : LET a(8) = s :
LET a(7 )=t: LET a(6) =u : LET a(5 ) = v :
LET a(4 )=w
430 LET suma = 0
440 FOR j=4 TO 16
450 LET suma = suma + a(j) * j
460 NEXT j
461 LET suma 1 = 0
462 FOR j=4 TO 16
463 LET suma 1 = suma 1+a(j)
464 NEXT j
470 LET cond = 1
480 FOR j=4 TO 16
490 IF a(j) <> 0 AND j > i THEN LET cond = 0
500 NEXT j
510 LET suma ii=0
520 FOR j=5 TO i STEP 2
530 LET suma ii= suma ii + a(j) * j
```

```
540 NEXT j
550 IF suma = sigma AND INT (suma ii/2) * 10 = suma ii * 10/2
    AND cond < > 0 AND a(i) > 0 AND suma l=(b+1) THEN PRINT " | ";
    : FOR j= TO i : PRINT " " ; a(j); : NEXT j: PRINT " | "
560 NEXT w
570 NEXT v
580 NEXT u
590 NEXT t
600 NEXT s
610 NEXT r
620 NEXT q
630 NEXT p
640 NEXT o
650 NEXT n
660 Next m
670 NEXT l
680 NEXT k
685 PRINT " | - - - - - | "
690 NEXT i
700 RETURN
```

Soluții ale sintezei structurale a mecanismelor prin metoda contururilor

Anexa 4

N	n	M	k _{max}	Σ _j	ΣN _j	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁	N ₁₂	
1	4	1	4	8	2	2									
	5	2	5	10		0	2								
	6	3	6	12		0	0	2							
2	6	1	5	14	3	1	2								
			6			2	0	1							
	7	2		16		0	2	1							
			7			1	0	2							
			7			1	1	0	1						
	8	3	6	18		0	0	3							
			7			0	1	1	1						
			7			1	0	0	2						
			8			0	2	0	0	1					
	3	9	2	6		22	1	0	1	0	1				
7				0	4										
8				1	2		1								
8				2	0		2								
10		3	6	24	2	2	1	0	1						
			7		2	1	0	0	1						
			7		0	2	2								
			8		1	0	3								
			8		0	3	0	1							
			9		1	2	0	0	1						
4		1	6	26	5	2	0	0	4						
						7	1	2	1						
						7	0	2	0	2					
						8	1	0	1	2					
						8	0	2	1	0	1				
						9	1	0	2	0	1				
						9	2	0	0	1	1				
						10	2	0	0	0	2				
	10					0	3	0	0	0	1				
	10					1	1	1	0	0	1				
10	2	0	0	1	0	1									
10	1	2	0	0	0	0	1								
10	2	0	1	0	0	0	1								
4					0	4	1								
					1	2	2								
					2	0	3								
					1	3	0	1							

N	n	M	k _{max}	Σ _j	Σ N _j	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁	N ₁₂		
4	10	1	7	26	5	2	1	1	1							
			8			3	0	0	2							
			9			2	2	0	0	1						
			10			3	0	1	0	1						
	11	2	2	6	28	5	4	0	0	0	0	1				
				7			0	0	0	0	0	0	0	1		
				8			0	2	3							
				9			1	0	4							
				10			0	3	1	1						
				11			1	1	2	1						
		3	2	2	6	28	5	1	2	0	2					
					7			2	0	1	2					
8					0			4	0	0	1					
9					1			2	1	0	1					
10					2			0	2	0	1					
11					2			1	0	1	1					
3		2	3	6	30	5	3	0	0	0	2					
				7			1	3	0	0	0	1				
				8			2	1	1	0	0	1				
				9			3	0	0	1	0	1				
				10			2	2	0	0	0	0	1			
				11			3	0	1	0	0	0	1			
	3	3	3	6	30	5	7	0	0	5						
				8			0	1	3	1						
				9			0	2	1	2						
				10			1	0	2	2						
				11			1	1	0	3						
				12			0	2	2	0	1					
3	3	3	6	30	5	7	1	0	3	0	1					
			8			0	3	0	1	1						
			9			1	1	1	1	1						
			10			2	0	0	2	1						
			11			1	2	0	0	2						
			12			2	0	1	0	2						
	3	3	3	6	30	5	7	0	3	1	0	0	1			
				8			1	1	2	0	0	1				
				9			1	2	0	1	0	1				
				10			2	0	1	1	0	1				
				11			2	1	0	0	1	1				
				12			3	0	0	0	0	2				
3	3	3	6	30	5	7	0	4	0	0	0	0	1			
			8			1	2	1	0	0	0	1				
			9			2	0	2	0	0	0	1				
			10			2	1	0	1	0	0	1				
			11			3	0	0	0	1	0	1				
			12			2	2	0	0	0	0	0	1			
3	3	3	6	30	5	7	3	0	1	0	0	0	0	1		
			8			2	1	1	0	0	0	0	1			
			9			3	0	0	1	0	0	0	1			
			10			2	2	0	0	0	0	0	1			
			11			3	0	0	0	1	0	0	1			
			12			2	2	0	0	0	0	0	0	1		
3	3	3	6	30	5	7	3	0	1	0	0	0	0	1		
			8			2	0	1	0	0	0	0	1			
			9			3	0	0	0	1	0	0	1			
			10			2	2	0	0	0	0	0	1			
			11			3	0	1	0	0	0	0	1			
			12			2	2	0	0	0	0	0	0	1		

CUPRINS

	Pag.
Introducere	1
1. Robotul industrial factor determinant în creșterea productivității muncii	5
1.1. Domenii de aplicare și dinamica producției de roboți industriali	8
2. Considerații generale privind roboții industriali	15
2.1. Considerații cu privire la arhitectura generală a roboților industriali	15
2.2. Parametrii globali de analiză a roboților industriali	18
2.3. Criterii de clasificare a roboților industriali	20
3. Mecanismele de orientare, aplicații ale mecanismelor sferice în construcția roboților industriali	23
3.1. Mecanismul patruleter sferic	23
3.2. Sistemul mecanic al robotului industrial	28
3.2.1. Funcțiile sistemului mecanic al robotului industrial	29
3.2.2. Comparații între sistemul mecanic al unui robot industrial și membrul superior uman	31
3.3. Mecanismul de orientare componentă importantă a sistemului mecanic al robotului industrial	35
3.3.1. Clasificarea mecanismelor de orientare	35
3.3.2. Biomecanica articulației carpiene	39
4. Considerații cu privire la sinteza structurală a mecanismelor de orientare	41
4.1. Metode de sinteză structurală a mecanismelor	41
4.2. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare cu metoda conexiunilor	52
4.2.1. Clasificarea mecanismelor de orientare în funcție de numărul elementelor motoare și conduse	53
4.2.2. Gradul de libertate al conexiunii, sumă a gradelor de libertate ale conexiunilor motoare și conexiunilor geometrice	53

4.2.3. Determinarea gradelor de libertate eliminate de conexiunile motoare	54
4.2.4. Determinarea gradelor de libertate eliminate de conexiunile geometrice	55
4.2.5. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare folosind conexiuni cu $L_k < 0$	64
4.2.6. Sinteza structurală a mecanismelor de orientare folosind conexiuni avînd $L_k \geq 0$	66
4.2.7. Determinarea structurii mecanismelor de orientare cu ajutorul conexiunilor	67
4.2.8. Condiția de sinteză structurală a mecanismelor de orientare cu mișcări independente	70
4.2.9. Soluții structurale optimale de mecanisme de orientare	72
5. Considerații cu privire la analiza și sinteza dimensională a mecanismelor de orientare	88
5.1. Analiza pozițională a mecanismului de orientare	91
5.1.1. Aplicarea teoremei lui Euler la analiza pozițională a mecanismelor de orientare	95
5.1.2. Utilizarea coordonatelor omogene la analiza pozițională a mecanismelor de orientare	101
5.1.3. Analiza pozițională a mecanismelor de orientare cu $M = 1 \div 3$	106
5.2. Considerații privind analiza cinematică a mecanismelor de orientare	114
5.3. Considerații privind analiza dinamică a mecanismelor de orientare	122
5.4. Determinarea unghiului de servicii al unui mecanism de orientare	126
5.5. Sinteza mișcării relative a elementelor cuplelor cinematice conducătoare ale mecanismului de orientare	129
6. Cercetări experimentale privind precizia și dinamica roboților industriali	136
6.1. Stand pentru determinări privind precizia robotului industrial KEMT-3	136

	Pag.
6.1.1. Abaterea sub acțiunea sarcinii	138
6.1.2. Abaterea în poziție de repaus	139
6.1.3. Precizia de repetabilitate	140
6.1.4. Deplasarea minimă programabilă	147
6.1.5. Eroarea de traiectorie	151
6.1.6. Deplasarea după acționarea întreru- pătorului de siguranță	152
6.1.7. Fenomene oscilatorii la oprire	154
6.2. Stand pentru determinarea funcțiilor de co- mandă ale robotului industrial RIMT-3	157
6.3. Stand pentru determinări privind precizia cinematică a mecanismului de orientare din componența robotului hidraulic R.H. - 1 kW	163
7. Considerații finale și contribuții originale	169
8. Bibliografie	173
9. Anexe	187