

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA

ING. IOAN NICOLAE VACARESCU

SINTEZA STRUCTURALA SI DIMENSIONALA OPTIMALA A
MECANISMELOR GENERATOARE DE TRAECTORIE
DIN COMPONENTA ROBOTILOR INDUSTRIALI

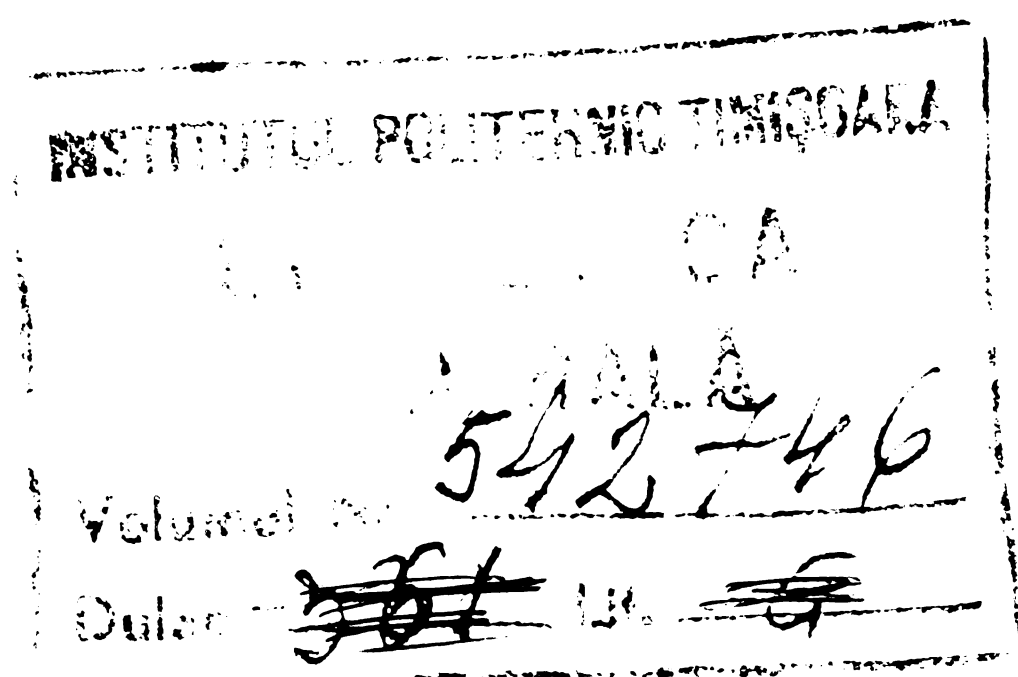
TEZA DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCATOR ȘTIINȚIFIC

Prof.dr.ing. Kovács Francisc

- 1 9 8 9 -



C O N T I N U T

	pag.
INTRODUCERE	1
<u>Capitolul 1</u> : TENDINTE ACTUALE SI DE PERSPECTIVA IN CONS- TRUCTIA ROBOTILOR INDUSTRIALI	3
1.1 Generalități	3
1.2 Trecere în revistă a realizărilor pe plan mondial	5
1.3 Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor din țara noastră	12
<u>Capitolul 2</u> : CARACTERISTICI ARHITECTURALE ALE STRUCTURILOR MECANICE ALE R.I.	15
2.1 Clasificarea roboților industriali	15
2.2 Principalele tipuri de structuri mecanice din construcția R.I. existenți	18
2.3. Analiză componistică a construcției mondiale de roboți industriali	30
2.4. Aprecierea performanțelor roboților indus- triali	36
<u>Capitolul 3</u> : STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR IN DOMENIUL ANALIZEI STRUCTURALE, CINEMATICE, CINETOSTA- TICE SI DINAMICE A MECANISMELOR GENERATOARE DE TRAIECTORIE	40
3.1 Generalități. Definiții	40
3.2. Stadiul actual în domeniul analizei și sinte- zei structurale a mecanismelor	43
3.3 Analiza cinematică a lanțurilor cinematice din componenta M.G.T.	48
3.3.1. Analiza pozițională	48
3.3.1.1. Matrici de transformare. Pro- blema geometrică directă	48
3.3.1.2. Problema geometrică inversă a lanțurilor cinematice	55
3.3.2. Relațiile generale ale vitezei P.C.	56
3.4. Ecuațiile dinamice ale mecanismelor genera- re de traiectorie	61
3.4.1. Energia cinetică a unui lanț cinematic	61
3.4.2. Energia potențială a unui lanț cinema- tic	63
3.4.3. Ecuațiile dinamice ale lanțului cine- matic	63
<u>Capitolul 4</u> : CONSIDERATII ASUIRA ANALIZEI SI SINTEZEI STRUCTURALE, ANALIZEI CINEMATICE SI DINAMICE A M.G.T.	66
4.1 Elemente de sinteză structurală a dispozitive- lor de ghidare (D.G.)	66
4.1.1. Configurații structurale posibile a D.G.	66
4.1.2. Configurații structurale posibile ale M.G.T.	71
4.1.3. Sinteza structurală a lanțurilor cine- matice componente a M.G.T. utilizând noțiunea de conexiune	79

	pag
4.1.4. Analiza structurală a membrului superior uman	82
4.1.4.1. Structura anatomo-funcțională a scheletului membrului superior	82
4.1.4.2. Analiza structurală a lanțului cinematic component al membrului superior uman. Lanț cinematic echivalent	86
4.2 Considerații asupra matricilor de transformare	87
4.2.1. Matrici de transformare, funcționale și constructive	87
4.2.2. Analiza pozițională a lanțului cinematic component al membrului superior uman	90
4.2.3. Analiza pozițională a lanțului cinematic component al robotului REMT-5	93
4.3. Componentele vitezelor liniare și unghiulare	96
4.3.1. Relațiile vitezelor utilizând matrici de forma A_{fn} și A_{cn}	96
4.3.2. Componentele vitezelor în P.C. din lanțul cinematic al membrului superior uman	98
4.3.3. Componentele vitezelor în P.C. al robotului REMT-5	102
4.4 Simplificarea ecuațiilor dinamice ale lanțului cinematic component al M.G.T.	103
4.4.1. Model dinamic simplificat al M.G.T.	103
<u>Capitolul 5</u> : OPTIMIZAREA TRAIECTORIEI ȘI A LEGILOR DE MIȘCARE ALE PUNCTULUI CARACTERISTIC	109
5.1 Probleme privind deplasarea P.C.	109
5.2. Determinarea traiectoriei P.C.	110
5.2.1. Condiții și criterii de alegere a traiectoriei P.C.	110
5.2.2. Traiectorie - linie dreaptă, în spațiul de lucru al R.I.	112
5.3 Stabilirea configurațiilor momentale ale lanțului cinematic (M.G.T.)	116
5.4 Legi de mișcare ale P.C. pe traiectorie	118
5.5 Optimizarea legilor de mișcare ale P.C. și determinarea unor traiectorii optime	121
5.5.1. Parametri funcționali analizați	121
5.5.2. Reducerea accelerației în P.C.	122
5.5.2.1. Parametri care influențează accelerația P.C.	122
5.5.2.2. Limitarea valorii maxime a vitezelor generalizate	123
5.5.2.3. Legi de mișcare optime	125
5.5.2.4. Traiectorii de accelerație minimă	128
5.5.3. Precizia de deplasare pe traiectorie	131
5.5.4. Minimizarea timpului de deplasare pe traiectorie	135
<u>Capitolul 6</u> : SINTEZA DIMENSIONALA OPTIMA A LANȚURILOR CINEMATICE DIN COMPOZIȚIA M.G.T.	138
6.1 Criterii de optimizare	138
6.2. Precizări privind performanțele M.G.T.	139

	6.3 Elemente de sinteză dimensională a lanțurilor cinematice din componența M.G.T.	140
<u>Capitolul 7</u>	: CERCEȚĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PERFORMANȚELE ROBOTULUI INDUSTRIAL REMB-5. APLICĂȚII INDUSTRIALE	147
	7.1 Robotul industrial REMB-5	147
	7.2 Program al cercetărilor experimentale	148
	7.3 Instalații pentru determinări experimentale	151
	7.3.1. Instalație pentru determinarea mărimilor geometrice	151
	7.3.2. Instalație pentru determinarea mărimilor cinematice și dinamice	154
	7.4 Determinarea caracteristicilor geometrice	156
	7.4.1. Curse liniare-unghiulare. Spațiul de lucru real	156
	7.4.2. Săgeata în P.C. sub acțiunea sarcinii	157
	7.4.3. Variația săgeții statice în timp	159
	7.4.4. Incertitudinea de poziționare	159
	7.4.5. Exactitatea traiectoriei P.C.	160
	7.5 Determinarea caracteristicilor cinematice	168
	7.6 Determinarea caracteristicilor dinamice	170
	7.7 Aplicații industriale	172
	7.7.1. Robotul industrial REMB-1	172
	7.7.2. Robot (reciprocator) de vopsire vagoane	173
Program P ₂ -DP-VI	7.7.3. Proteză a membrului superior uman	176
<u>Capitolul 8</u>	: CONCLUZII ASUPRA CONTRIBUȚIILOR ORIGINALE ALE LUCRĂRII	178
	8.1 Considerații finale	181
	8.2 Contribuții teoretice	182
	8.3 Contribuții în domeniul cercetării experimentale	183
BIBLIOGRAFIE	186

INTRODUCERE

Influența profundă și crescândă, pe care noua revoluție tehnico-științifică o are asupra dezvoltării societății în general, a economiei în special, determină schimbări radicale în viziunea privind rolul științei și tehnologiei și contribuția lor la creșterea economică, în sensul afirmării tot mai puternice a caracterului de forță a producției, a științei și de veritabilă pîrghie de creștere economică a tehnologiei. Acestea își evidențiază capacitatea de a potența resursele disponibile, de a asigura valorificarea lor superioară, de a conferi economiei atribute esențiale de modernitate, competitivitate înaltă, eficiență ridicată.

Intr-un asemenea context este firesc ca tot mai multe țări ale lumii să-și fundamenteze strategia dezvoltării lor economice și sociale pe stimularea intensă - prin forme diversificate - a cercetării și creației științifice, pe încororarea din ce în ce mai rapidă și mai largă a noilor realizări tehnice în toate activitățile, în primul rînd în cele productive.

O condiție a eficienței introducerii roboților industriali este concordanța acestora cu ambianța sistemică. Robotul industrial nu trebuie să constituie, în sistem, un corp străin, iar însușirile sale funcționale trebuie să derive din însușirile locului de muncă.

Faptul că robotul industrial execută manipularea automată în cadrul sistemului, influențează - prin reacție- obiectul producției, mijloacele de producție și tehnologia.

Extinderea automatizării proceselor de producție atrage după sine creșterea exigenței activității ingineresti în sfera producției. Implică, de asemenea, scurterea esențială a termene-

lor de aplicare în practică a rezultatelor cercetărilor, optimizarea proiectării proceselor tehnologice, sporirea economicității. Aceste sarcini pot fi îndeplinite numai cu ajutorul noilor mijloace metodologice, bazate pe valorificarea integrală a cunoștințelor teoretice.

Sinteza cunoștințelor - din diferite domenii - și pătrunderea lor în teoria construcției de mașini, permite elaborarea unor metode efective de rezolvare a problemelor tehnice.

Lucrarea de față, având la bază bibliografia existentă, își propune să realizeze o sistematizare și o sintetizare a cunoștințelor în acest domeniu, cu aplicabilitate directă în domeniul cercetării și proiectării manipuletoarelor și roboților industriali. De asemenea se caută ca, funcție de anumite criterii sau parametri impuși să se stabilească principii de optimizare a diferitelor structuri mecanice, respectiv să se stabilească baze teoretice ferme pentru sinteza mecanismelor generatoare de traiectorie, componente ale structurilor mecanice ale roboților industriali.

Capitolul 1

TENDINTE ACTUALE SI DE PERSPECTIVA IN CONSTRUCTIA ROBOTILOR INDUSTRIALI

1.1. Generalități

Producția industrială din domeniul construcției de mașini este dominată de operații tehnologice, cum ar fi : prelucrări mecanice, sudări, asamblări, vopsiri, ambalări, depozitări. Creșterea productivității și realizarea unei eficiențe economice sporite, pe calea automatizării, ridică o serie de probleme tehnice specifice proceselor tehnologice și organizării producției. Rezolvarea - în acest caz - prin sistemele clasice de automatizare, este dificilă și uneori chiar imposibilă. Dificultățile sînt determinate - în special - de operațiile de manipulare a pieselor și a sculelor, de necesitatea trecerii frecvente de la fabricarea unui produs la fabricarea altui produs cu aceleași utilaje tehnologice, de necesitatea efectuării unor operații de control tehnic de calitate interfazic, de sortarea produselor etc.

Pe de altă parte, cerințele actuale de desfășurare a proceselor industriale, determină ritmuri și intensități dificil de realizat de către personalul uman, ritmuri care conduc la eforturi fizice și psihice ridicate și uneori chiar periculoase pentru om.

Cele două obiective majore, de creștere a eficienței economice a producției - pe de o parte - și de umanizare a muncii în sectoarele grele de producție - pe de altă parte - au condus, în cele din urmă, la realizarea unei automatizări flexibile, în cadrul unor celule sau linii de fabricație flexibile.

ROBOTUL INDUSTRIAL reprezintă o componentă de bază a acestor celule de fabricație, componentă care preia - parțial sau total - în special, operații din categoria B /D2/, /K8/, care sînt operații cu caracter discontinuu, cum ar fi : pornire-oprire, încărcare-descărcare, transport, manevrare scule, asamblare, control etc.

O definiție unică, unanim acceptată, a robotului industrial,

nu a apărut încă. Unii specialiști, consideră robotul legat de noțiunea de flexibilitate a părții mecanice componente a acestuia, de posibilitatea de a fi utilizat pentru activități diferite, de noțiunea de adaptabilitate, de posibilitatea funcționării într-un univers imprevizibil etc.

O serie de normative - elaborate pe plan mondial - încearcă să definească cât mai complet această noțiune.

Câteva exemple :

a) "Un robot este un mecanism de manipulare automată, aservit în poziție, reprogramabil, polivalent, capabil să poziționeze și să orienteze materiale, piese, unelte sau dispozitive specializate, în timpul unor mișcări variabile și programate, destinat executării unor sarcini variate". /N1/

b) "Roboții industriali sînt automate mobile universale, cu mai multe axe, ale căror mișcări sînt liber programate (fără legături mecanice), pe traiectorii sau unghiuri, într-o anumită succesiune a mișcărilor și în anumite cazuri, comandate prin senzori. Ei pot fi echipați cu dispozitive de prehensiune, scule sau alte mijloace de fabricație și pot îndeplini activități de manipulare sau tehnologice". /V1/

c) "Robotul industrial este mașina automată, care reprezintă ansamblul manipulatorului și al dispozitivului de comandă reprogramabil pentru realizarea în procesul de producție a funcțiilor motrice și de comandă, înlocuind funcțiile analoge ale omului în deplasarea pieselor și/sau a uneltelor tehnologice". /G1/

d) "Robotul industrial este un sistem mecanic dotat cu funcții motoare flexibile, analoge celor ale organismelor vii sau combină asemenea funcții motoare cu funcții inteligente, sisteme care acționează corespunzător voinței omului. În contextul acestei definiții, prin funcție inteligentă se înțelege capacitatea sistemului de a executa cel puțin una din următoarele acțiuni : judecată, recunoaștere, adaptare sau învățare". /J1/

Etimologia cuvîntului "ROBOT" este incertă, ea putînd fi apropiată de aceea a cuvîntului "robota-muncă" în limba cehă, cu corespondentul din limba română "rob" sau din limba rusă "rab", cu semnificația de "sclav".

Semantica acestor cuvinte sugerează echipamente ce pot executa gesturi specifice omului (realizate cu brațele, picioarele)

sub coordonare biologică "ochi-mână" (operații humanoide).

În limbajul curent, noțiunea de "ROBOT" a fost introdusă, pentru prima oară, de scriitorul ceh Karel Capek în piesa "R.U.R" (Rossum's Universal Robots) dramă utopică apărută în anul 1920. De la acea dată, cuvântul robot a trecut neschimbat în toate limbile, pentru a desemna personaje humanoide protagoniste ale povestirilor de ficțiune.

1.2. Trecere în revistă a realizărilor pe plan mondial

O apreciere exactă asupra mărimii parcului de roboți industriali, care lucrează la ora actuală în lume, este foarte greu de făcut. Aceasta, deoarece, după cum se știe, nu există un consens în ceea ce privește conceptul de robot industrial. Cu toate acestea, se apreciază că în prezent lucrează aproximativ 180.000 R.I. /R2/, /S13/.

Piața mondială a roboților industriali în dezvoltare rapidă explică numărul mare de firme, care se ocupă de prelucrarea acestor utilaje și, în mod implicit, numărul mare de tipuri de roboți industriali în fabricație.

După /A3/, /C2/, /D2/, în domeniul fabricației de roboți industriali, la nivelul anului 1985, se ocupau circa 220 firme. Numărul modelelor fabricate depășește cifra de 450 /K9/, /R2/, /W6/.

Cel mai intens se lucrează în domeniul construcției de roboți industriali în Japonia, SUA și țările vesteuropene : Suedia, RFG, Italia, Franța, Anglia etc.

Multe din firmele producătoare din țările susmenționate au deja mulți ani de specializare în acest domeniu (Unimation Inc. SUA, Kawasaki Heavy Ind.-Japonia etc.)

O puternică dezvoltare cunoaște construcția de roboți industriali, în țările socialiste din Europa și implicit, în țara noastră.

O evoluție a acestei industrii, în diferite zone ale lumii, se poate urmări în figura 1.1. /S13/

De asemenea, urmărind figura 1.2, se pot remarcă domeniile prioritare, în care au pătruns roboții industriali, precum și evoluția fabricării acestora în perspectiva anului 1990 /K9/, /K10/ /S13/. Tendința este clar ascendentă pentru viitorii ani, ritmul

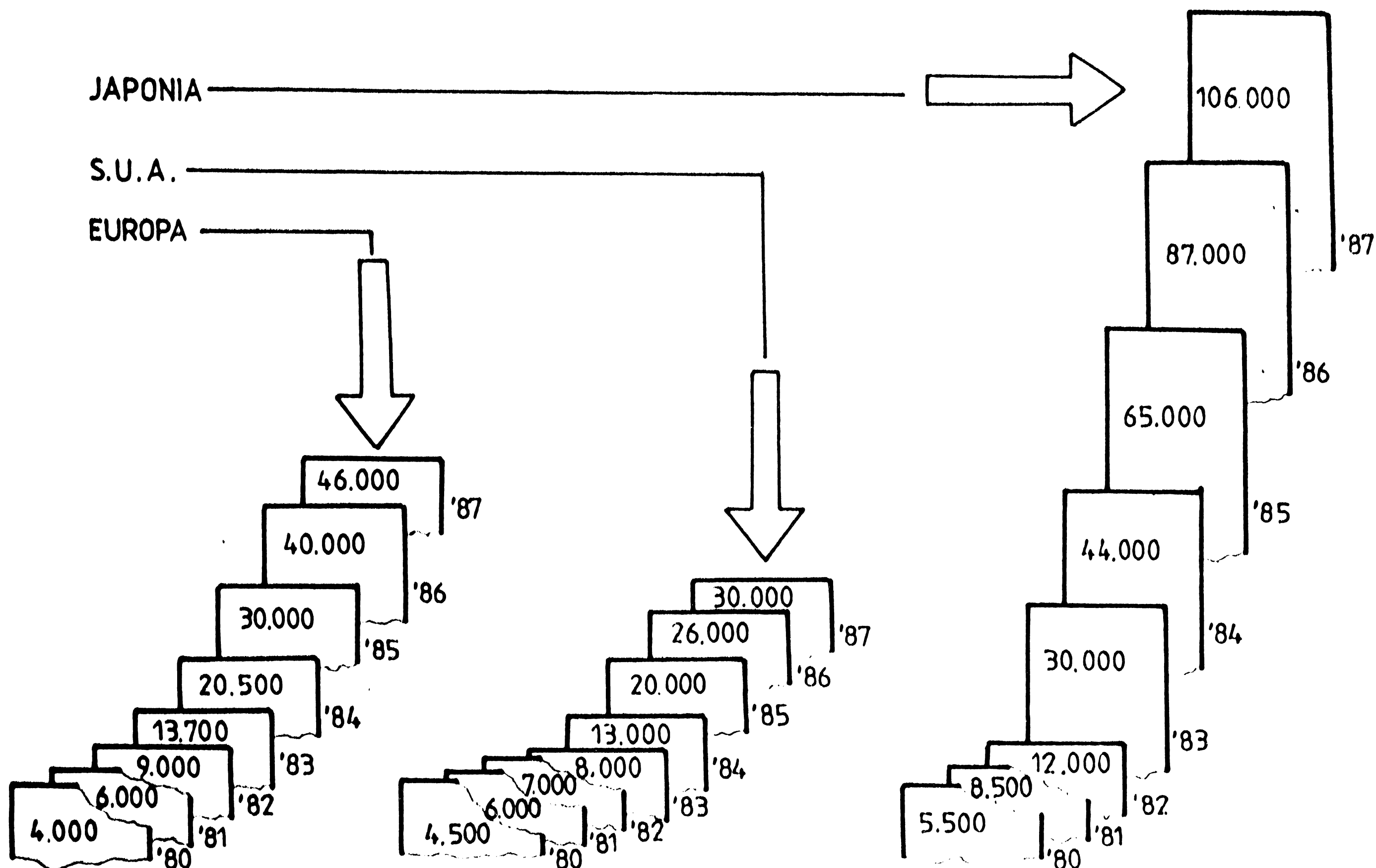


Fig.1.1

fabricării și introducerii în diferite domenii ale roboților industriali accelerându-se în permanență.

Din datele prezentate în figurile 1.1 și 1.2, precum și în histograma din figura 1.3, se remarcă faptul că Japonia se situează pe primul loc, în ceea ce privește parcul de roboți industriali, loc pe care-l va menține și în perspectiva anului 1990. Un ritm înalt de dezvoltare se remarcă în țările dezvoltate ale Europei.

Se observă o întărirea a competiției cu schimbări de loc în clasamentele generale.

Diagrama din figura 1.4 prezintă dezvoltarea acestei industrii în RFG, în ultimul deceniu, pe ansamblu și pe domenii de aplicații.

La nivelul țărilor europene, pe perioada 1981-1986, creșterea fabricației, respectiv a parcului de roboți industriali, s-a făcut în proporție de ~ 37% /02/.

Uniunea Sovietică, R.S.Cehoslovacă, R.P.Bulgareă sînt țări

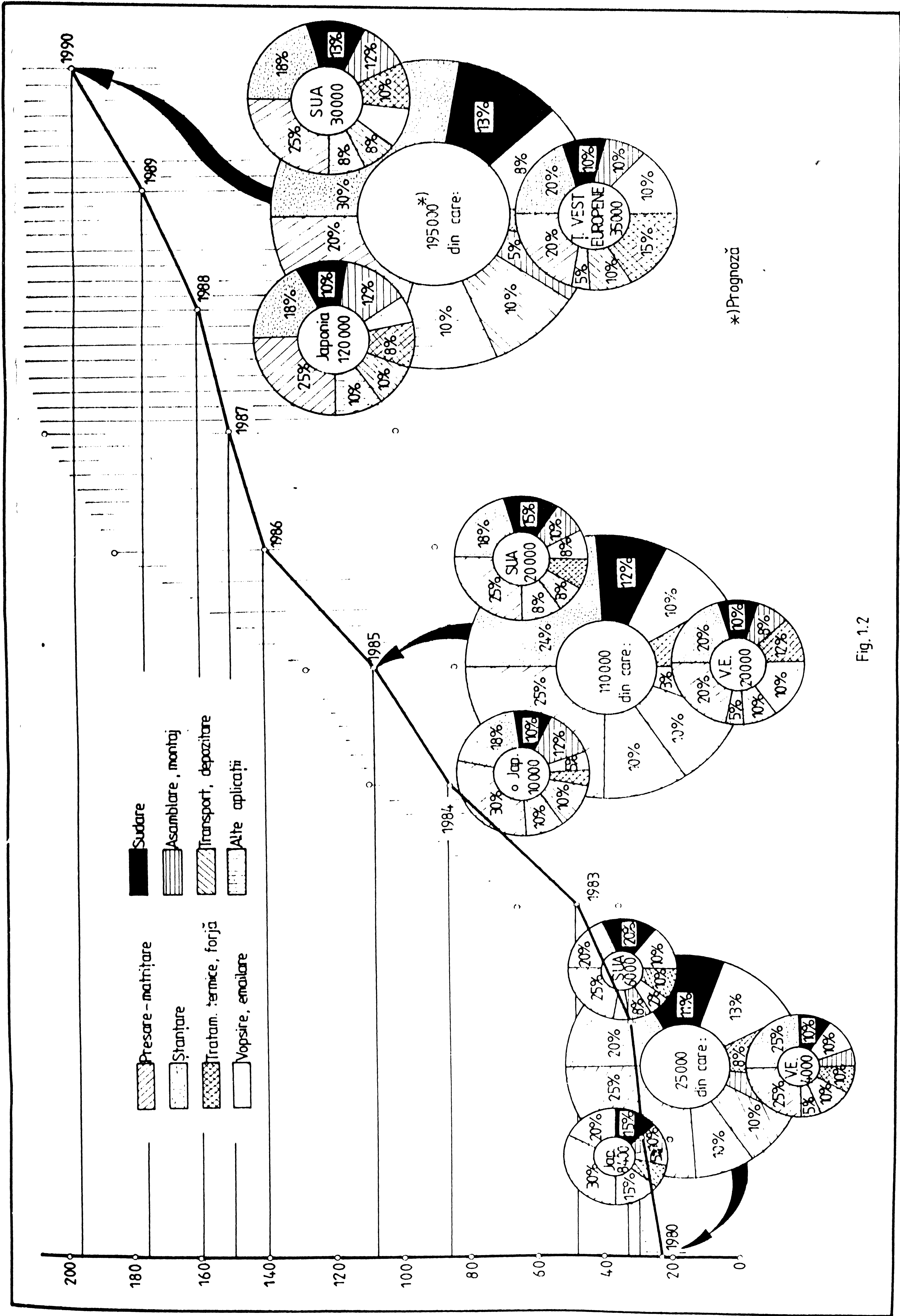


Fig. 1.2

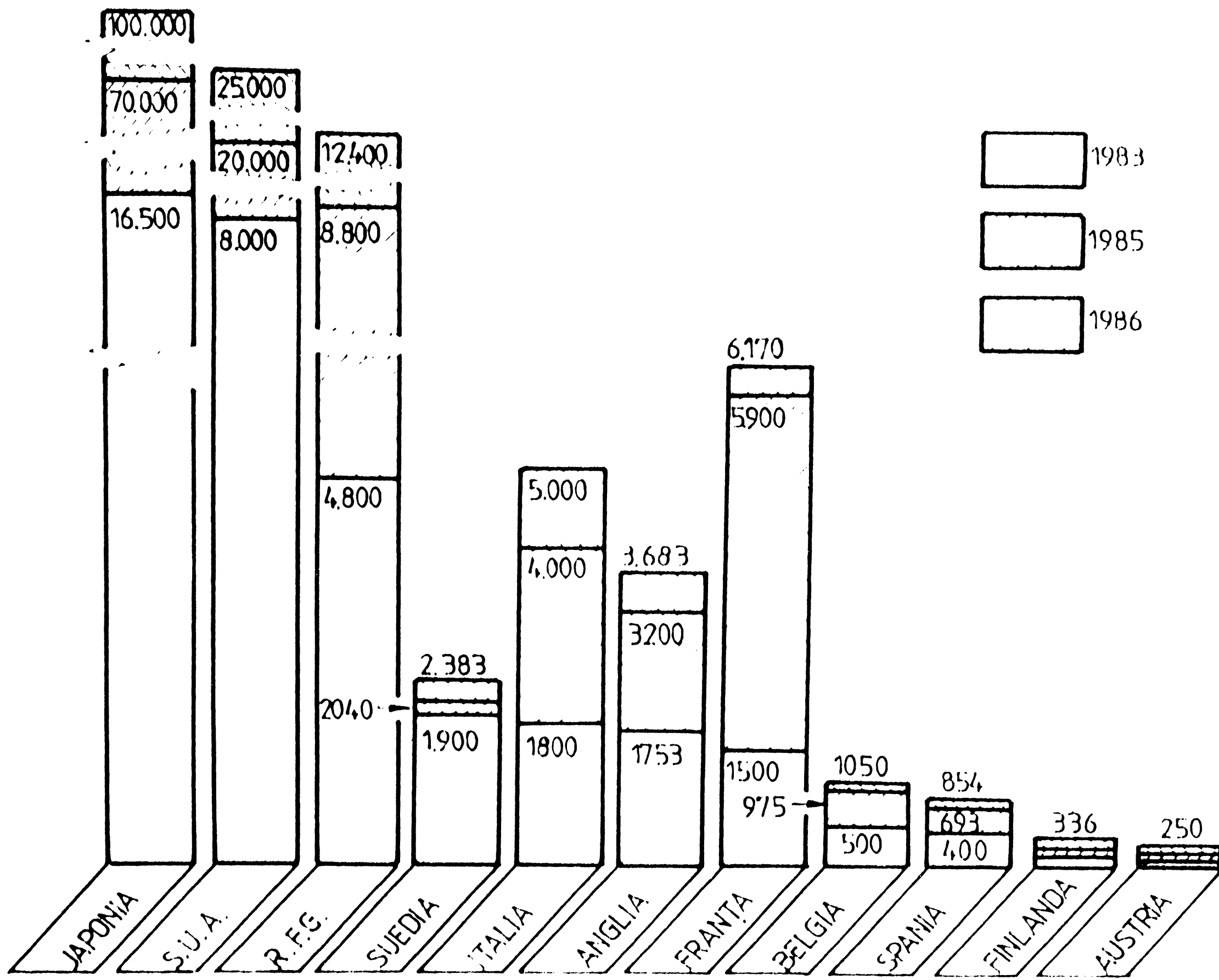


Fig. 1.3

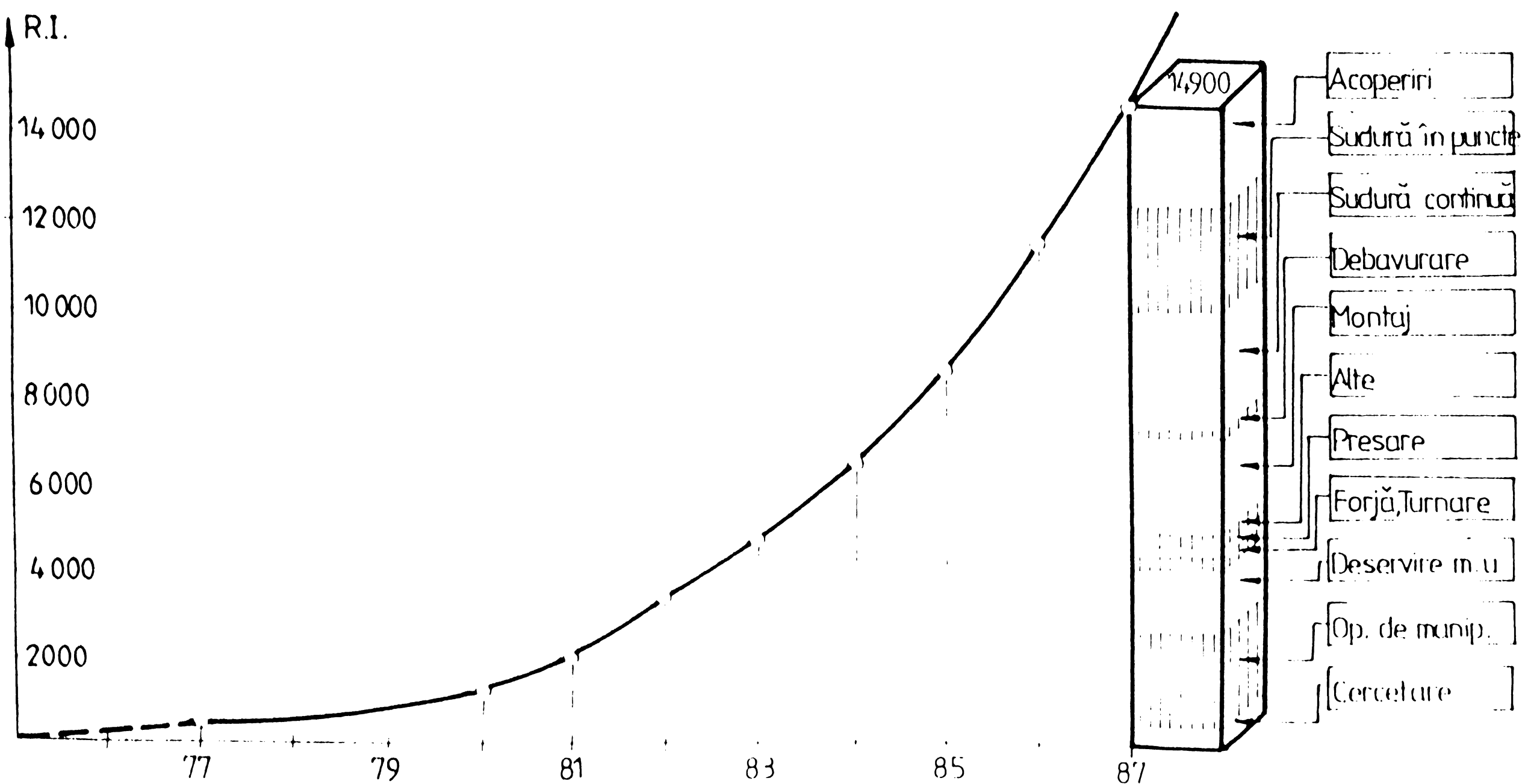


Fig. 1.4

În care s-a produs o creștere explozivă a fabricării și utilizării roboților industriali, fabricația respectivă devenind tot mai competitivă pe plan mondial. După 1980, în URSS se construiesc anual 7000 roboți cu utilizări variate în construcția de mașini, în special în industria de autovehicule /I3/, /K9/, /K10/. În toate țările, considerentele care militează pentru utilizarea roboților industriali sînt cele tehnico-economice și sociale. Desigur că primează avantajele economice, dar nu trebuie neglijate nici un moment avantajele sociale generale și suplimentare /D2/. Figura 1.5 pre-

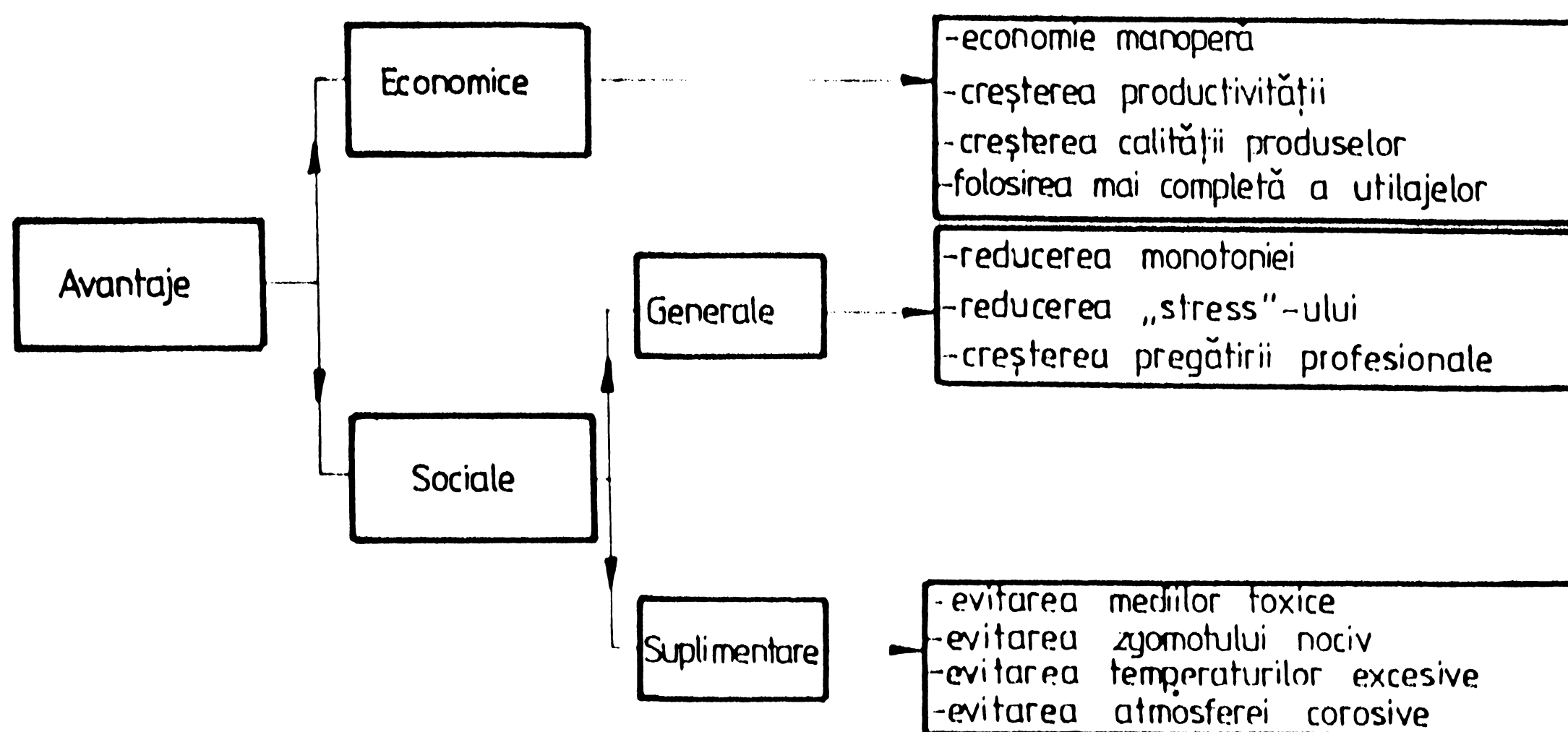


Fig.1.5

zintă tabloul de ansamblu al acestor avantaje.

În legătură directă cu avantajele care rezidă din utilizarea roboților industriali, se stabilesc domeniile prioritare în care prezența acestora se face simțită.

Tabloul 1.1 și histograma din figura 1.6, prezintă principalele domenii de utilizare a roboților industriali, ponderea, precum și evoluția pe ani (în număr efectiv sau procente) a R.I. în Italia, respectiv în Franța /L4/.

Tabloul 1.1

Domeniul de utilizare al roboților ind.	ITALIA (%)		
	1979	1985	1991*
1 Incărcare - descărcare	2 7,0	3 8,5	4 8,3

* Prognoză

Tabelul 1.1 (continuare)

1	2	3	4
Deformare metale	7,0	8,5	9,2
Deformare mase plastice	3,5	3,2	3,7
Stanşare metale	7,0	6,4	6,5
Stanşare mase plastice	7,0	6,4	3,7
Încărcări furnale	3,5	5,3	5,6
Operaţii la cald	5,2	3,2	3,7
Depozitare	5,2	5,3	5,6
Sudare de precizie	13,7	8,5	8,3
Sudare cu arc electric	3,5	4,3	4,3
Ambalare	10,0	10,6	13,0
Operaţii de acoperire (vopsire)	8,5	7,5	7,4
Industria grea	8,5	10,6	6,5
Execuţie cabluri	1,7	2,1	1,8
Măsurări, încercări	5,2	5,3	5,6
Alte domenii	3,5	4,3	6,5

Desigur, aceste realizări au fost obţinute pe baza unor preocupări specifice de la ţară la ţară.

Astfel, în unele ţări (Japonia, RFG) au fost elaborate programe naţionale de robotizare, în cadrul cărora au fost cuprinse o serie de întreprinderi cu preocupări apropiate, cărora li s-au asigurat creditele necesare. În alte ţări (SUA, Anglia etc.) s-au înfiinţat întreprinderi producătoare de roboţi industriali, prin specializarea unor întreprinderi în acest domeniu (exemplu : Automatics - SUA etc.)

Nivelul colaborării internaţionale în acest domeniu este foarte ridicat, datorită licenţelor, acordurilor interguvernamentale şi a activităţii crescînde a companiilor transnaţionale în acest sector. Dacă se va continua tendinţa actuală, adică dublarea la fiecare doi ani a numărului de roboţi, în jurul anului 2000 vor exista mai mult de 10 milioane de roboţi în funcţiune /S11/.

În conformitate cu alte surse /C2/, aproximativ 1 milion de roboţi vor fi în funcţiune în jurul anului 1990.

O altă previziune, publicată de către O.E.C.D. este prezentată în tabelul 1.2 /T1/.

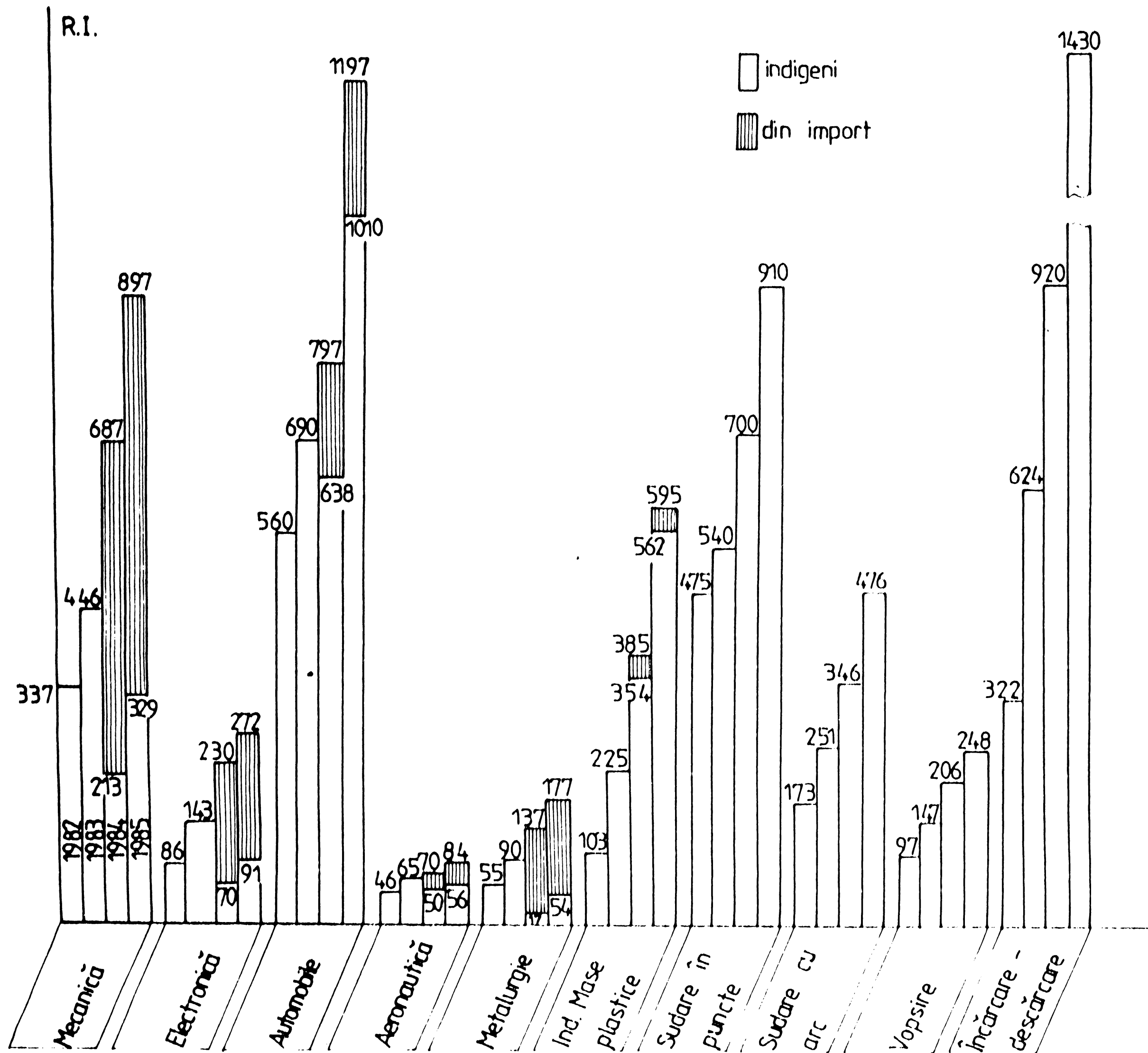


Fig.1.6

Tabelul 1.2

Tara	1981	1985	1990	Rata cresterii anuale %	
				'81 - '85	'85 - '90
Japonia	9500	27000	67000	30	20
SUA	4500	15000	56000	35	30
Suedia	1700	4100	8300	25	15
R.F.G.	2300	8300	27000	40	25
Anglia	713	2700	10000	40	30
Franța	790	2100	6500	28	25

Tabelele 1.3 și 1.4 prezintă distribuția roboților după tip în Japonia și respectiv în URSS /C2/, în [%]

Tabelul 1.3

Tipul de robot	1978	1979	1985	1990
Comandă manuală	16	7	11	9
Secvență fixă	70	74	57	56
Secvență variabilă	6	8	18	17
Roboți cu redare (playback)	5	5	7	8
Roboți cu comandă numerică	-	1	2	2
Roboți inteligenți	3	5	5	8
T o t a l	100	100	100	100

Tabelul 1.4

Tipul de robot	1980	1981	1982	1985
Roboți simpli	77	75	70	60
Roboți programabili multifuncționali	20	21	25	30
Roboți adaptivi	3	4	5	10
T o t a l	100	100	100	100

Urmărind datele statistice expuse, care de foarte multe ori prezintă valori contradictorii, se poate totuși spune că fenomenul extensiei explozive, atât a fabricației cât și a utilizării roboților, este cert.

Sub imperiul dorinței de a lărgi câmpul de folosire a roboților în producția industrială și de a ridica eficiența, principalele țări au angajat sume uriașe în lucrări de cercetare-dezvoltare, care să pregătească o nouă generație de roboți. Generația de mâine, care se proiectează astăzi în laboratoare, va fi formată din roboți mai inteligenți, care "să vadă", "să simtă" și chiar "să gândească".

Sînt pașii care duc la cea de a doua revoluție industrială caracterizată prin faptul că omul va transfera mașinii nu numai unele din capacitățile sale fizice, ca în timpul primei revoluții industriale, dar și o serie de atribute ale inteligenței sale.

1.3. Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor din țara noastră

În țara noastră, programul privind realizarea "Sistemului de Roboți Industriali" avizat în 1980, a deschis perspective noi cercetării în domeniul roboticii industriale. De altfel "febra" cercetărilor în domeniul roboților industriali a cuprins colective

largi de cercetători și proiectanți din întreaga 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 amborat axe grele, deservită de un robot industrial tip MERO-3 B.

Întreprinderea "Automatica" București, în colaborare cu I.P.A. București, a omologat în octombrie 1983, robotul industrial RIP-63 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 REH-01 /A5/, /A6/, REH-02 /A7/ și VIPAS /I7/, desfășurând ample cercetări în domeniul roboticii /A8/, /A9/, /A10/, /A11/.

La Institutul politehnic din Iași s-a realizat robotul industrial ROBI-01, destinat alimentării precilor de brichetat deșeurilor din tablă la I.M.A.I.A. Tecuci /Z1/, la Universitatea Brașov, robotul industrial de tip pistol /P11/, destinat servirii de mașin-unelte pentru întreprinderea "Tractorul" din Brașov.

În cadrul Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, a fost înființat un colectiv multidisciplinar de cercetare - proiectare a roboților industriali. În cadrul acestui colectiv, în strînsă colaborare cu întreprinderea "Electromotor" din Timișoara, s-a omologat la data de 8 februarie 1982, celula de fabricație flexibilă, ce conține un robot industrial tip REMT-1, destinată prelucrării arborilor motoarelor electrice pentru gabarite 160-225.

Robotul industrial REMT-1 /K15/, /K16/, /G3/ este primul robot industrial românesc operațional în mediu industrial. Acestuia i-au urmat robotul industrial REMT-2 /K17/, /K18/ utilizat de Întreprinderea de scule din Rînov la automatizarea manipulărilor în sectoarele de tratamente termice, robotul industrial REMT-2S /K34/ destinat automatizării operațiilor de sudare ale șasiului de vagoane de la întreprinderea MEVA Drobeta-Turnu Severin și robotul industrial REMT-3 /K19/, /K20/ destinat manipulării tubului cinescopic la Întreprinderea de cinescoape București.

Tot din seria REMT au fost elaborate două exemplare ale robotului REMT-5, destinat industriei electrotehnice.

Pentru întreprinderea "Armătura" din Zalău au fost executați roboții REMT-3-09 și -10 amplasați în celulă flexibilă de deservire a unei linii de prelucrări mecanice.

Din aceeași colaborare IPPVT-Electromotor, a rezultat "Reciprocatorul" de vopsire a vagoanelor de marfă pentru întreprinderea MEVA Drobeta TurnuSeverin /K30/.

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 /M6/, /C3/.

La întreprinderea de aparate electrice de măsură -IALM- din Timișoara se află în probe tehnologice automatizarea servirii unei linii de prese cu ajutorul unui robot cu acționare pneumatică RP-1 /V3/, iar la întreprinderea "Electromotor" automatizarea "Liniei tehnologice flexibile de fabricație a rotoarelor motoarelor electrice" /M7/.

În colaborare cu întreprinderea "Electrotimiș" din Timișoara /C8/, s-au conceput, proiectat și realizat : microrobotul μ R-2,5 /K21/, minirobotul cu acționare pneumatică MRP-12,5 /K22/, manipulatorul cu acționare electrică MAE-100 /K23/, manipulatorul cu acționare pneumatică MAP-100 /K24/, robotul cu acționare hidraulică RH-1KN /K25/ și lanțul cinematic de instruire a roboților de vopsire R.I.V. /K26/.

Pentru întreprinderea "UNIO" Satu Mare s-a conceput o familie de roboți industriali cu acționare electrică /C10/, din care s-au executat roboții industriali RIE-50.

În colaborare cu IMMUM Baia Mare s-a elaborat seria de manipolatoare sincrone MS-500 și MS-1000, prima variantă fiind deja în funcțiune în sectoarele calde, pentru manipularea unor piese turnate sau forjate.

Desigur, activitatea de cercetare a colectivului multidisciplinar de roboți, din cadrul institutului nostru, are preocupări diverse vizând perspectiva abordării unor variante de roboți mai perfecționați.

Nu putem încheia fără a aminti o parte din aceste realizări, care au fost comunicate într-o serie de lucrări, dintre care prezentăm : /K27/, /K28/, /K29/, /K30/, /K31/, /K32/, /K33/, /G4/, /G5/, /P9/, /R5/.

Capitolul 2

CARACTERISTICI ARHITECTURALE ALE STRUCTURILOR MECANICE ALE ROBOTILOR INDUSTRIALI

2.1. Clasificarea roboților industriali

Înăși definiția roboților industriali /N1/, /V1/, /O1/, /J1/ sugerează o diversitate a acestora, în funcție de complexitatea funcțiilor pe care le pot realiza /D2/.

Structura mecanică trebuie să răspundă cerințelor tot mai înalte ale sistemelor de comandă ale R.I.

Prin urmare, corelația aceasta biunivocă, structură mecanică-sistem de comandă, trebuie să răspundă perfect cerințelor impuse.

Evolutiv prezentând lucrurile, acest deziderat a fost realizat, mai puțin sau mai mult, pe măsură ce posibilitățile tehnologice momentane au permis-o.

Funcție de complexitatea sistemelor de comandă, funcție de numărul nivelelor ierarhice ale acestora, roboții industriali se pot împărți în GENERAȚII de roboți /V2/, /K1o/, (fig.2.1).

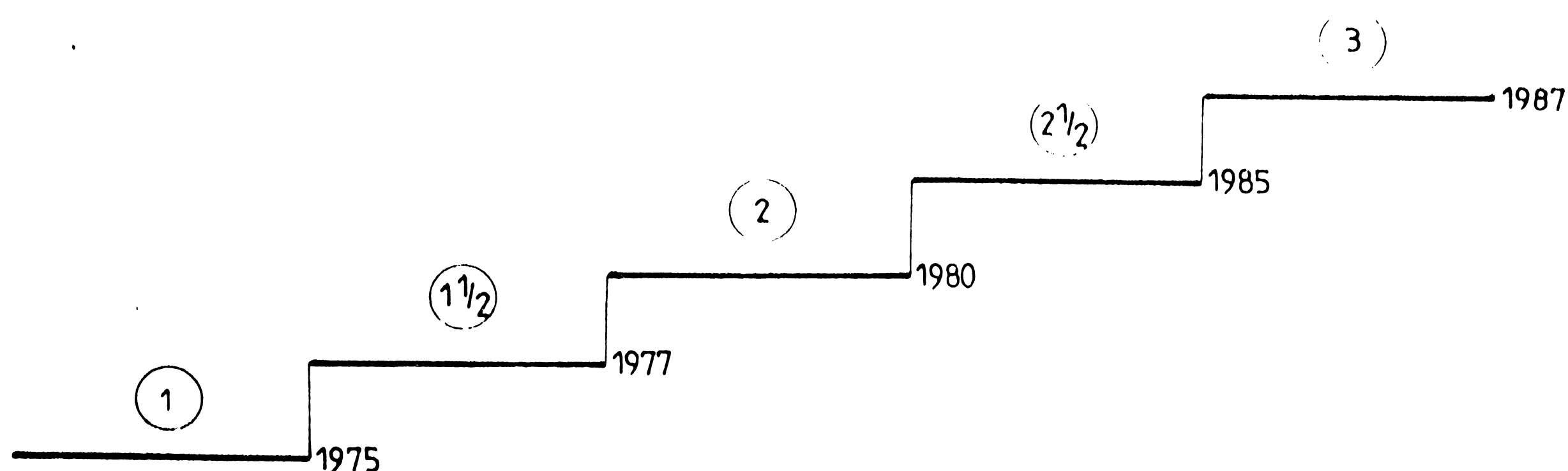


Fig.2.1

Prima generație include roboți programabili. Aceștia sînt capabili să repete o mulțime specificată de operații (program robot), în condiții externe determinate apriori și în lipsa perturbațiilor. Nu există posibilitatea de adaptare la schimbările de mediu (spațiul de lucru), dar programele robot pot fi modificate

funcție de necesități.

Programabilitatea roboților din prima generație a crescut odată cu introducerea în sistemele de comandă a structurilor de tip microprocesor, micro- și minicalculator și se realizează prin două metode : instruire și programare textuală.

A doua generație de roboți cuprinde "roboții adaptivi", care sînt capabili să lucreze în condiții de mediu variabil sau în spații doar parțial cunoscute. Aceștia își adaptează acțiunile la perturbațiile datorate modificărilor din spațiul de lucru. Acești roboți sînt dotați cu puternice sisteme senzoriale, cu care recunosc un spațiu nou, sau modificările dintr-un spațiu dat.

Robotul de generația a doua, se definește deci ca un sistem automat adaptiv, care realizează sarcina programată printr-o interacțiune continuă cu mediul de lucru, apelînd la funcții elementare de decizie și autoinstruire.

A treia generație de roboți ("roboți inteligenți") posedă elemente de inteligență. Aceștia pot să-și definească singuri sarcinile pentru rezolvarea unei probleme particulare, considerînd informația despre mediul înconjurător și să-și modifice acțiunile, funcție de informațiile furnizate de sistemul senzorial.

Roboții inteligenți pot fi complet autonomi, gradul lor de inteligență variînd, funcție de scopurile pentru care au fost construiți. Putem aprecia că un astfel de robot industrial poate fi caracterizat prin următoarele :

- actualizarea permanentă a unui model al mediului ;
- capacitatea de abstractizare și generalizare ;
- capacitatea de deducție și inducție ;
- folosirea unei baze de cunoștințe, care reprezintă scheme de comportament ;
- capacitatea de planificare și de realizare a unui plan.

Figura 2.1 prezintă evoluția, pe generații și ani, ai roboților industriali. Se remarcă prezența unor etape evolutive intermediare, care cuprind construcțiile care nu realizează în totalitate dezideratele impuse de generația următoare.

Pe lângă clasificarea roboților industriali pe generații, mai există multe alte criterii de clasificare.

Spre exemplu, unul din standardele japoneze împarte roboții în următoarele clase :

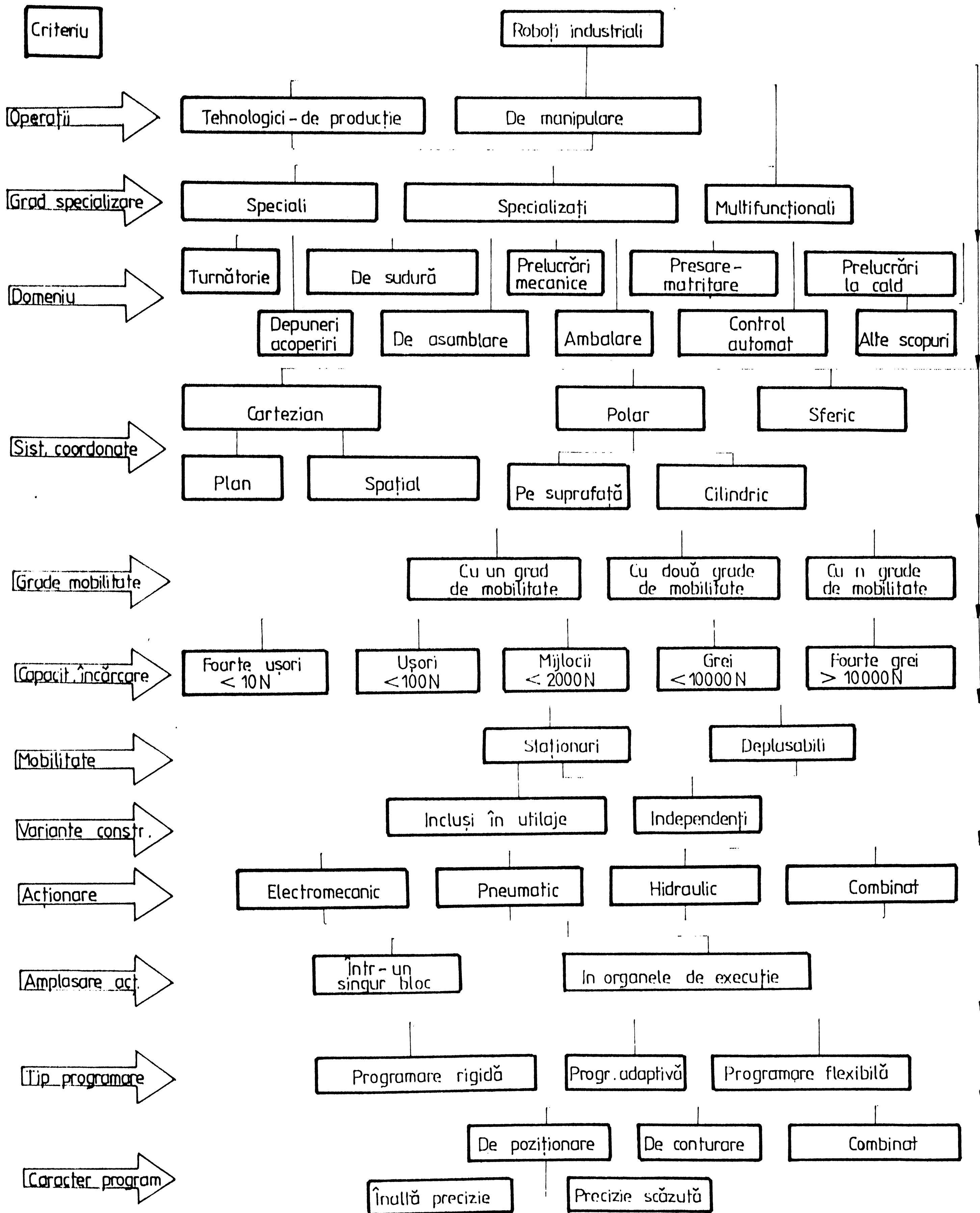


Fig. 2.2

542746
~~5016~~
 12+1

- manipulatori, roboți secvențiali (fiecși și variabili), roboți repetitori, roboți cu comandă numerică și roboți inteligenți.

De asemenea, într-un articol prezentat în /B9/, roboții industriali se clasifică astfel :

- roboți "pick and place" (manipulatoare simple), roboți programabili, roboți comandați cu calculatorul, roboți cu sisteme senzoriale și roboți de asamblare.

Alte criterii de clasificare țin seama de sistemul de coordonate în care lucrează roboții, de tipul sistemului de acționare, de caracteristicile sistemului de comandă, de capacitatea lor de sarcină, precizia de poziționare, repetabilitate, fiabilitate, capacitate de percepție senzorială etc.

Pentru a avea o imagine de ansamblu asupra tipurilor de roboți industriali existenți în parcul mondial, este prezentată în figura 2.2, conform /K9/, o clasificare după criteriile enunțate.

2.2. Principalele tipuri de structuri mecanice din construcția roboților industriali existenți

Datorită faptului că industria de roboți s-a dezvoltat în cele mai multe cazuri, de la special spre general, există la ora actuală structuri mecanice în componența roboților industriali, de o diversitate deosebită. Pe de altă parte, trecerea spre generații superioare de roboți impune și creșterea gradului de mobilitate și manevrabilitate ale acestora, prin urmare, creșterea complexității lanțurilor cinematice componente.

Urmărind situația existentă la ora actuală, se pot trage o serie de concluzii cu privire la arhitectura generală a R.I., arhitectură care este în directă corelație cu performanțele ce le pot obține și cu soluțiile constructive utilizate.

Din acest punct de vedere, lucrarea /K8/ propune opt tipuri fundamentale, tipuri acceptate și de alte lucrări /K9/, /K10/, /I3/, /I6/.

1) Tipul braț articulată și Scara (B.A.), (SC). Această categorie de roboți industriali se caracterizează prin faptul că structura mecanică este constituită dintr-un lanț cinematic deschis, având cu preponderență cuple cinematice de rotație, ale căror elemente sînt acționate în mișcare relativă, direct de motoare rotative amplasate în apropierea zonelor de contact (a cuple-

lor cinematice).

Roboții tip BA, se au avantajul unei supleți mari și o accesibilitate sporită a mecanismului de prehensiune spre obiectul manipulat.

Din aceste considerente, acest tip de roboți se utilizează cu succes în aplicații de sudare, vopsire, montaj etc.

Deși are, în general, spațiu de lucru relativ mare, robotul cu braț articulată prezintă o rigiditate scăzută.

În figurile 2.3 și 2.4, se prezintă doi roboți din această categorie, și anume: robotul R 50 al firmei Jungheinrich K.G.-RFG și respectiv, robotul SR 800 al firmei BOSCH-RFG. Dacă primul prezintă cinci cuple cinematice de rotație, cel de al doilea prezintă patru, dintre care una de translație.

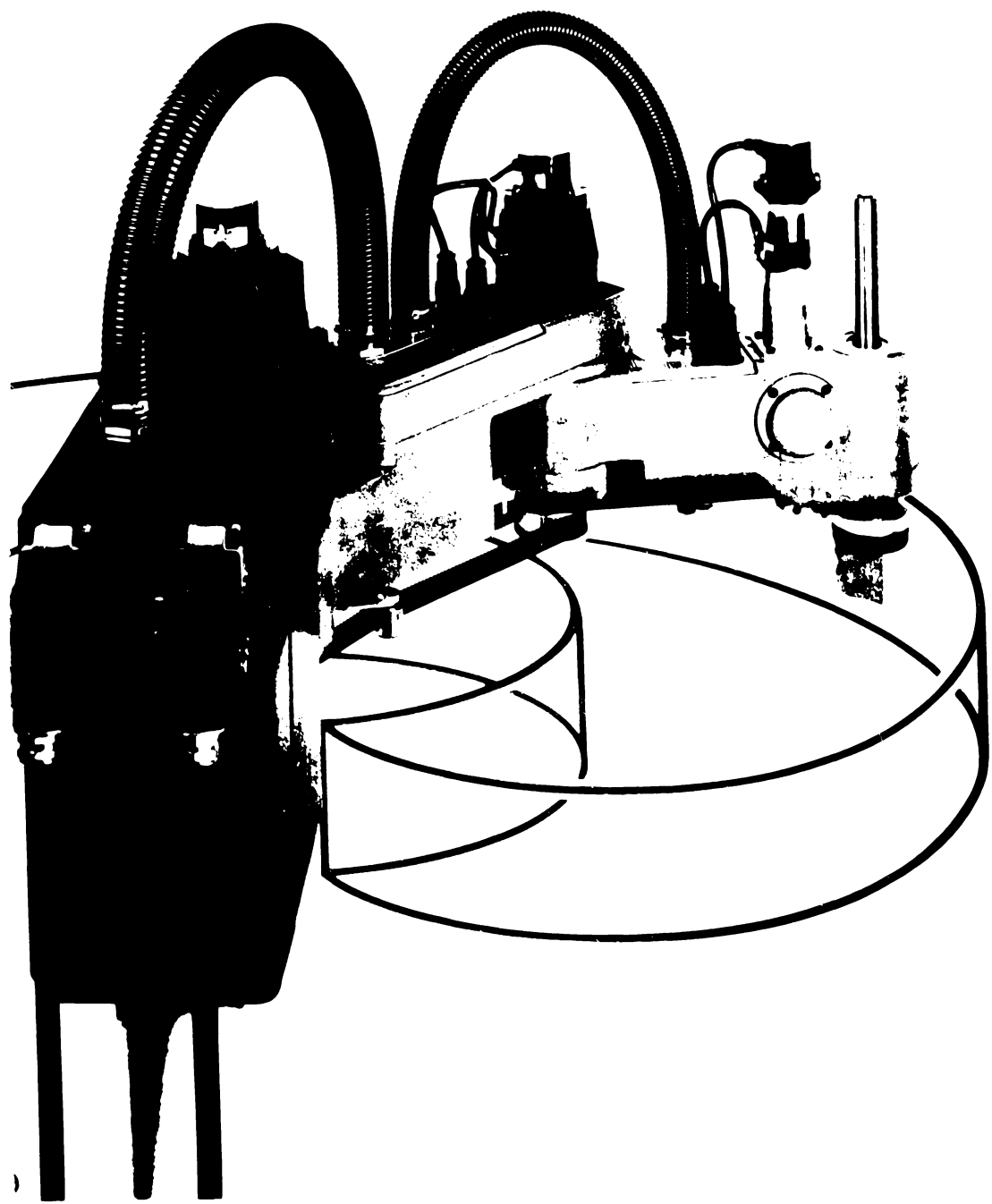


Fig.2.3

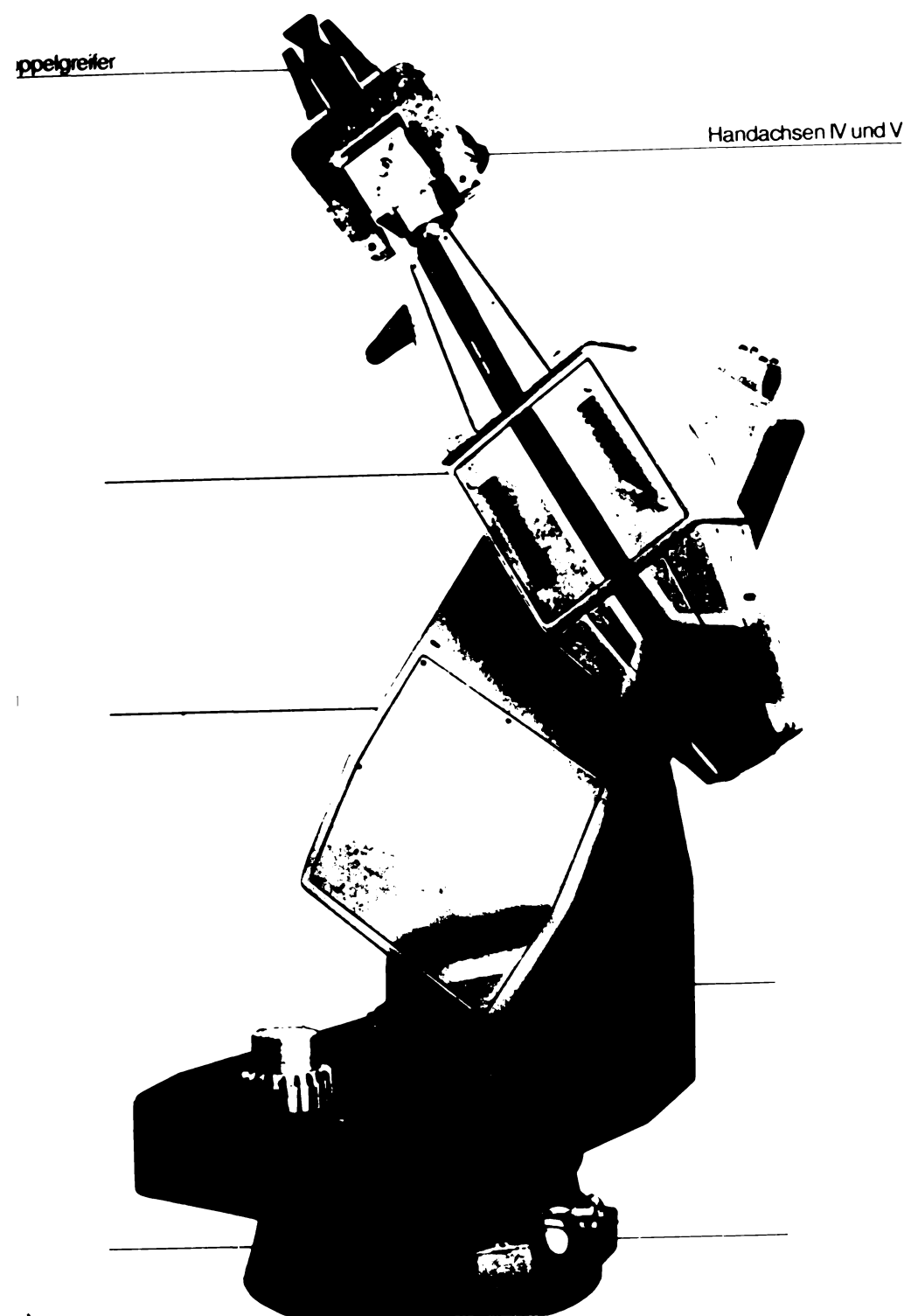
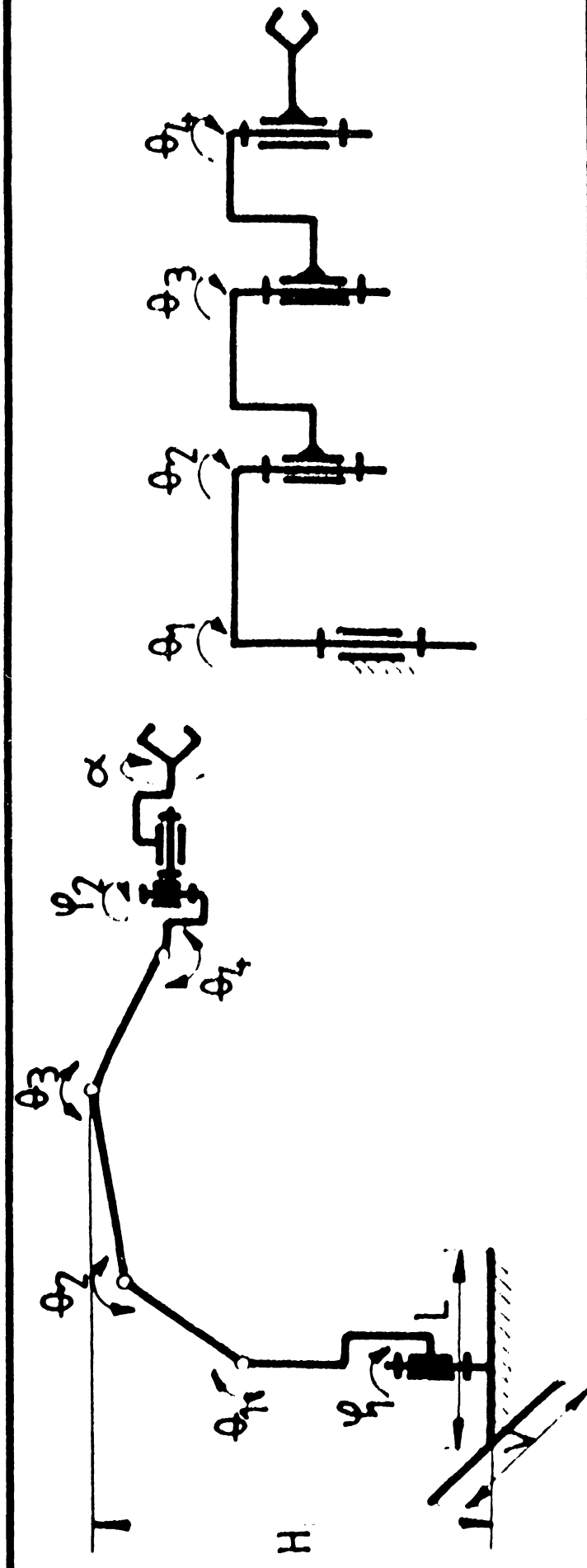


Fig.2.4

În tabelul 2.1 sînt prezentați cîțiva roboți din această categorie, împreună cu caracteristicile mai importante, atît ale structurii mecanice, cît și ale sistemului de acționare și de comandă.

2) Tipul "Lanț închis" (LI). Roboții de tip "Lanț închis" au în structura lor cel puțin un contur poligonal închis. Acest lucru permite realizarea unor spații de lucru cu o geometrie mai complexă, conducînd totodată la rigidizarea sistemului mecanic.

1. ROBOTI TP BRAI ARTICULAT SI TP SCARA. (BAJ)(SC)



Tara productie	Model R.i.	Sarcina vehiculata [Kg]	Nr. grade de libertate	Executie	Actiunea	Sistem de comanda	Precizia de pozitionare [mm]	Poziția maximă de extensie a brațului [mm]	Deplasarea unghiulară [°] Viteza unghiulară [%/s]								Dimensiuni de gabarit [mm]				Masa [Kg]
									φ_1	φ_2	α	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	H	L	V			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
R.P.																					
Bulgara	RB-210	15	6	1	E-H	C	3	2680	90	210	270	90	90	210	-	1800	700	700	550		
R.S.									$\frac{270}{90}$	-	$\frac{360}{115}$	$\frac{70}{90}$	$\frac{75}{90}$	$\frac{330}{115}$	$\frac{250}{115}$	1950	840	920	1340		
Cehoslov.	PR-32E	80	6	2	E	P	0,6	1720	$\frac{300}{90}$	-	$\frac{180}{180}$	75	75	180	-	2200	900	900	800		
R.D.G.	IR-60E	60	5	2	E	C	0,8	1900	$\frac{90}{60}$	$\frac{240}{90}$	-	$\frac{60}{60}$	$\frac{135}{60}$	$\frac{240}{60}$	$\frac{240}{90}$	1650	980	980	590		
Italia	Painter (Basfer)	25	6	3	H	U	0,4	2100	$\frac{270}{60}$	$\frac{150}{90}$	$\frac{350}{30}$	$\frac{100}{60}$	$\frac{110}{60}$	$\frac{200}{60}$	-	-	-	-	1800		
Italia	Job'Of 20	50	6	3	E	P	0,5	2600	$\frac{180}{45}$	$\frac{180}{120}$	$\frac{160}{90}$	$\frac{160}{90}$	$\frac{155}{90}$	-	$\frac{180}{120}$	-	-	-	568		
Italia	Spraying Robot	136	5	3	H	C	4,0	1270	70	210	210	77	77	90	-	1950	710	110	800		
Japonia	Mitsubishi - Iwata	3	6	1	H	C	2,0	2200													

Tabel 2.1

Roboții din această categorie sînt supli și asigură un acces facil în toate punctele spațiului de lucru.

Acționarea se face, fie hidraulic, cu motoare liniare fie electric, prin motoare amplasate în zonele de contact ale cuplelor cinematice conducătoare.

Au o utilitate largă, putînd fi folosiți la deservirea unor prese, ciocane de forjă, în depozite pentru paletare etc.

În figurile 2.5 și 2.6 sînt prezentați doi asemenea roboți și anume : robotul firmei Schlatter - Elveția și respectiv robotul IR 601/60 al firmei KUKA-RFG.

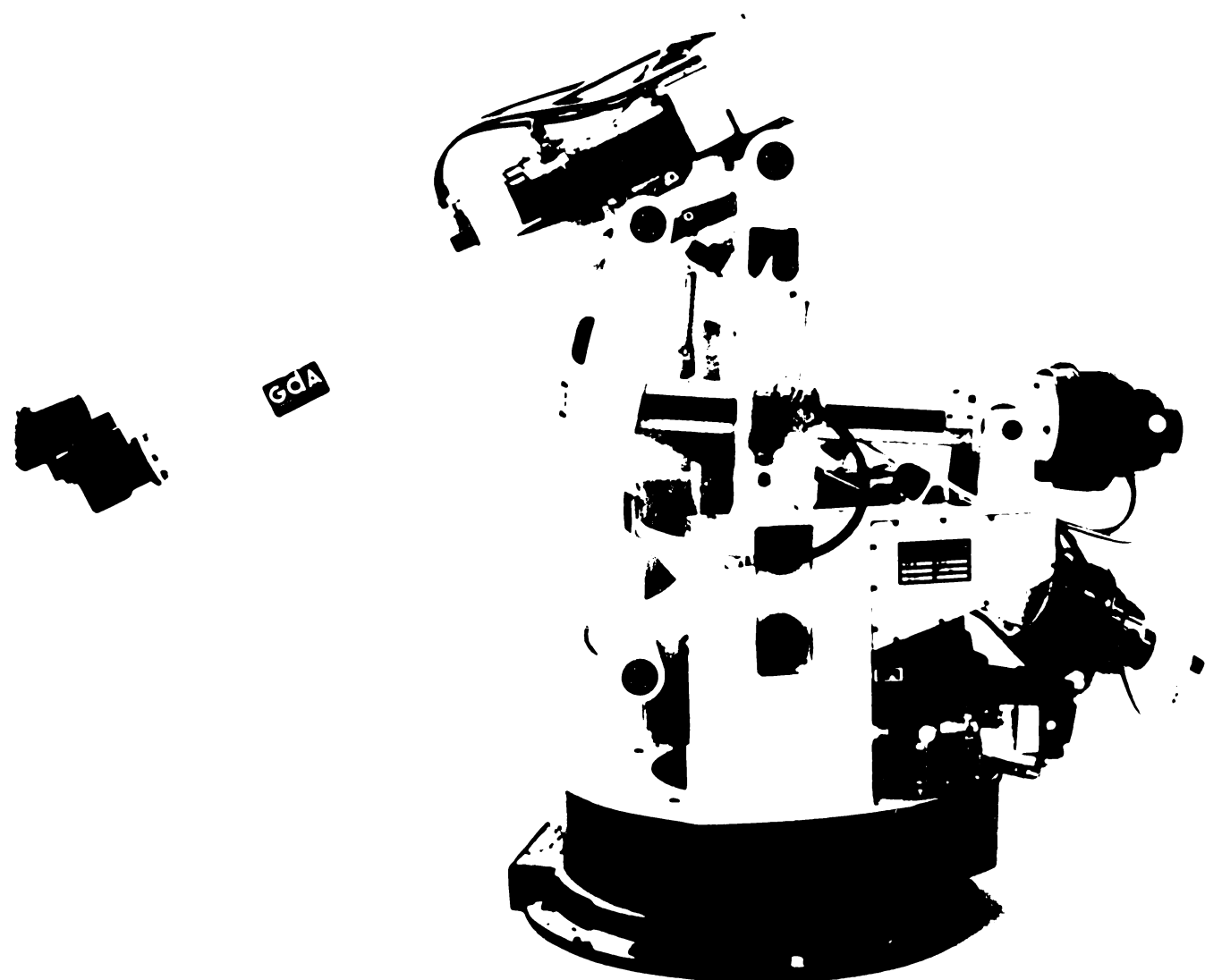


Fig.2.5



Fig.2.6

În tabelul 2.2 se prezintă principalele caracteristici ale unor roboți din această categorie.

3. Tipul "pistol" (P). Roboții industriali din această categorie sînt compuși dintr-o structură principală, care poartă un braț asemănător țevii unui pistol (de unde și numele).

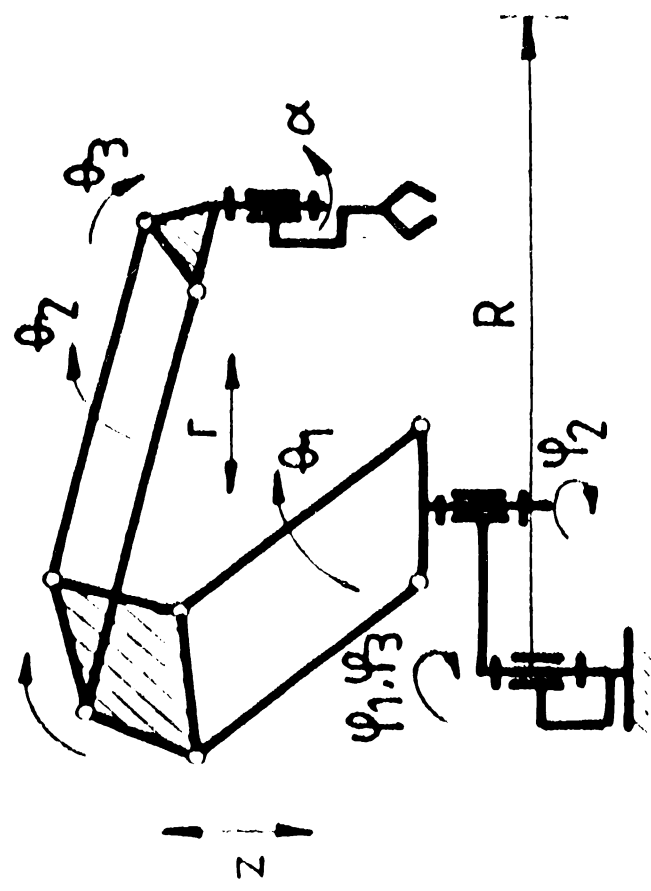
Lungimea și poziția acestuia poate fi modificată.

Din punct de vedere constructiv sînt foarte simpli, dar manevrabilitatea este relativ scăzută, datorită unui număr redus de mișcări ce se pot executa.

Se utilizează, în special, pentru deservirea mașinilor-unelte sau a unor prese de ștanțare-ambutisare .

Sînt acționați, în general, pneumatic, hidraulic, dar există

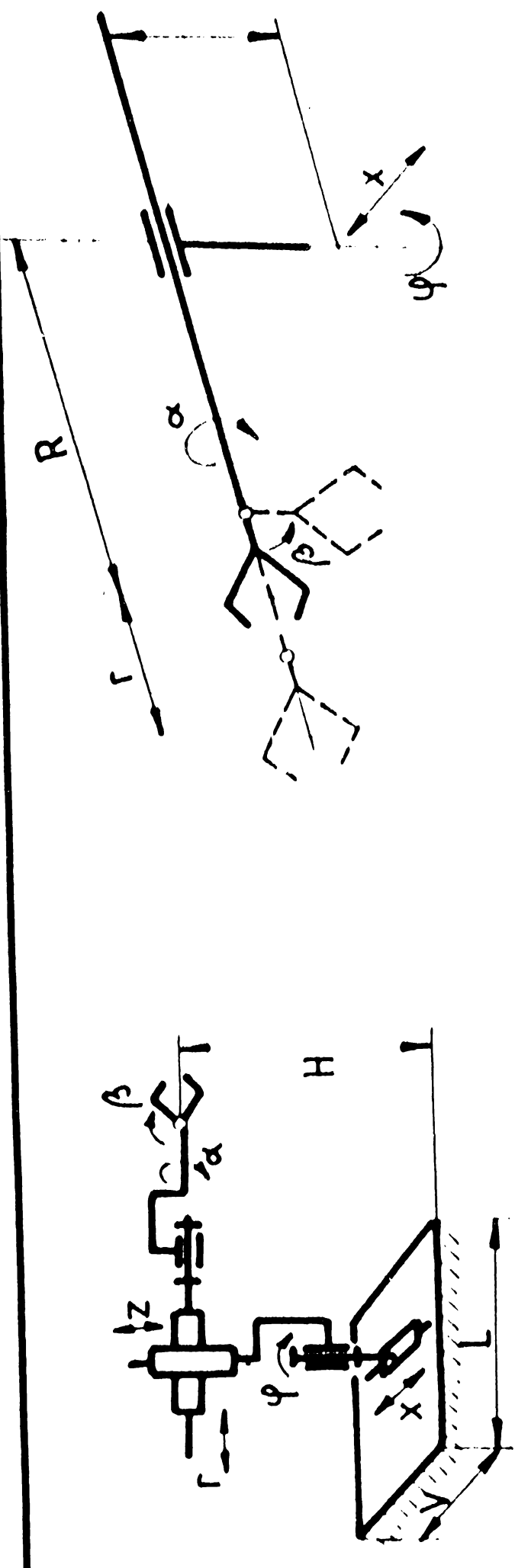
2. ROBOTI TIP „LANT ÎNCHIS” (L.I.)



Tabel 2.2

Tara producătoare	Model R.I.	Sarcina vehiculată [Kg]	Nr. grade de libertate	Execuție	Acționarea	Sistem de comandă	Precizia de poziționare [mm]	Poziția maximă de extensie a brațului [mm]	Nr. brațelor	Nr. mecanismelor de prehensiune pe braț	Deplasarea liniară [mm]		Deplasarea unghiulară [°]							Masa [Kg]
											r	z	φ ₁	φ ₂	φ ₃	φ ₁	φ ₂	φ ₃	α	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
R.P. Bulgaria	MBR 63	63	3	-	P	-	-	1800	1	1	1500	1228	360°	-	-	-	-	-	-	300
R.P. Bulgaria	MBR 250	250	3	-	P	-	-	1200	1	1	1000	855	360°	-	-	-	-	-	500	
R.F.G	„Manipulator”	400, 600	3	-	H	M	-	2500 (2000)	1	1	-	-	360°	-	-	180	180	-	400	
Japonia	KT 101	50, 100	5	-	H	C	10	7000	1	1	-	-	100	-	-	77	118	-	-	
Japonia	AA 50A	75	3	-	E	-	-	2000	1	1	2000	1500	350	-	-	-	-	-	105	
Japonia	HBL-75A	75	3	-	E	-	-	1800	1	1	1400	1400	350	-	-	-	-	-	450	
Japonia	AA-100G	100	3	-	E, M	-	-	2270	1	1	1700	1400	330	-	-	-	-	-	125	

3. ROBOTI TIP "PISTOL" (P)



Tabel 2.3

Țara producătoare	Model R.I.	Sarcina vehiculată [Kg]	Nr. grade de libertate	Nr. brațe	Tipul acționării	Sistemul de comandă	Nr. coordonate programabile	Mod de schimbare a programului	Capacitatea de memorie a sist. de comandă (nr. comenzi)	Precizia de poziționare(±mm)	Poziția maximă de extensie a brațului R [mm]	Depplasarea liniară [mm] Viteza [m/s]			Deplasarea unghiulară[°] Viteza unghiulară[°/s]			Execuție	Dimensiuni de gabarit [mm]			Masa [Kg]
												z	r	x	φ	α	β		H	L	V	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
R.P.B.	Pirin - 521	40	7	2	H	C	5	Pe suport	104	0,3	900	205 0,5	350 0,5	100 0,5	180 120	180 120	-	-	1246	1658	1000	1200
R.S.C.	PR - 16P	16	6	1	P	C	5	Pe suport	27	0,2	2000	500 0,4	1000 1,0	50 0,5	360 20	180 90	-	1	1170	1400	1200	813
R.F.G.	Mini-Mater Cx-312	4	3	1	P	P	3	Pe suport	-	0,1	350	300 0,8	500 0,8	-	270 80	-	-	-	-	-	-	100
R.F.G.	PM - 12 (KUKA)	10	5	1	P	P	5	Pe suport	-	1,5	1930	500 0,9	1200 1,5	-	210 130	220 90	220 90	1	1110	1200	680	625
Italia	Pragma - A 3000 (DEA)	1,5	5	1	E	U	5	EVM	-	0,1	-	300 0,5	0,67	250 0,5	-	180 132	132 132	1	-	-	-	36
Japonia	Synchro Trans (Keiaishif Mfg. Ltd.)	10	4	1	P	P	4	Pin în vâtaie	360	1,0	1000	100 0,5	500 0,7	-	180 220	180 600	-	-	1010	1237	500	520
Japonia	Kawasaki MHU SENIOR (Kawasachi Heavy Ind.)	15	3	1	P	C	3	Pe suport	60	0,1	1560	500 0,3	1100 1,0	-	360 90	-	1	1290	1120	1120	1120	500

variante și cu acționare electrică.

În figurile 2.7 și 2.8 se prezintă doi asemenea roboți și numele robotului MM-II cu acționare pneumatică al firmei Siemsi&Klein KG-RFG și respectiv, robotul MHU-Senior al firmei Electrolux.

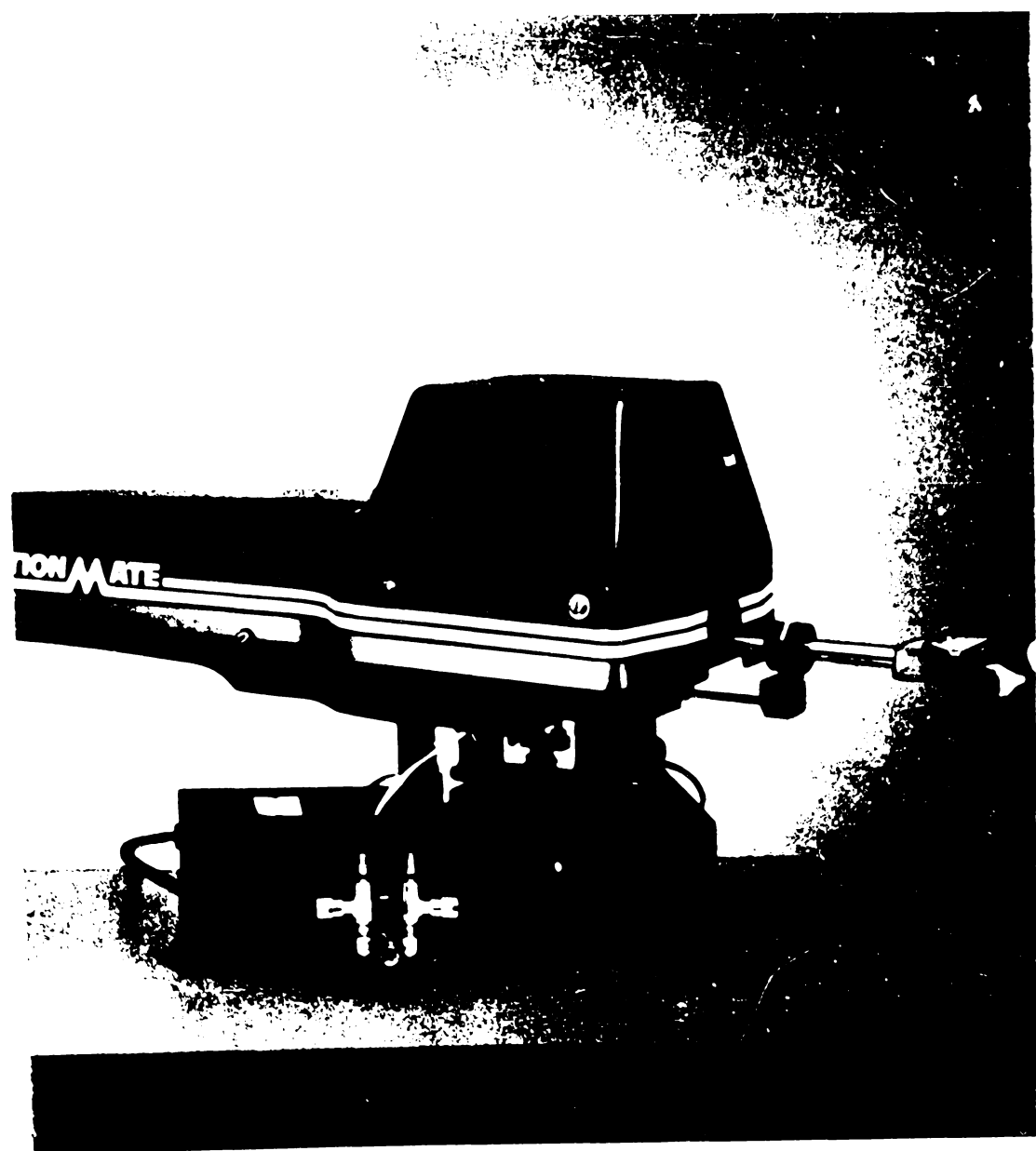


Fig.2.7

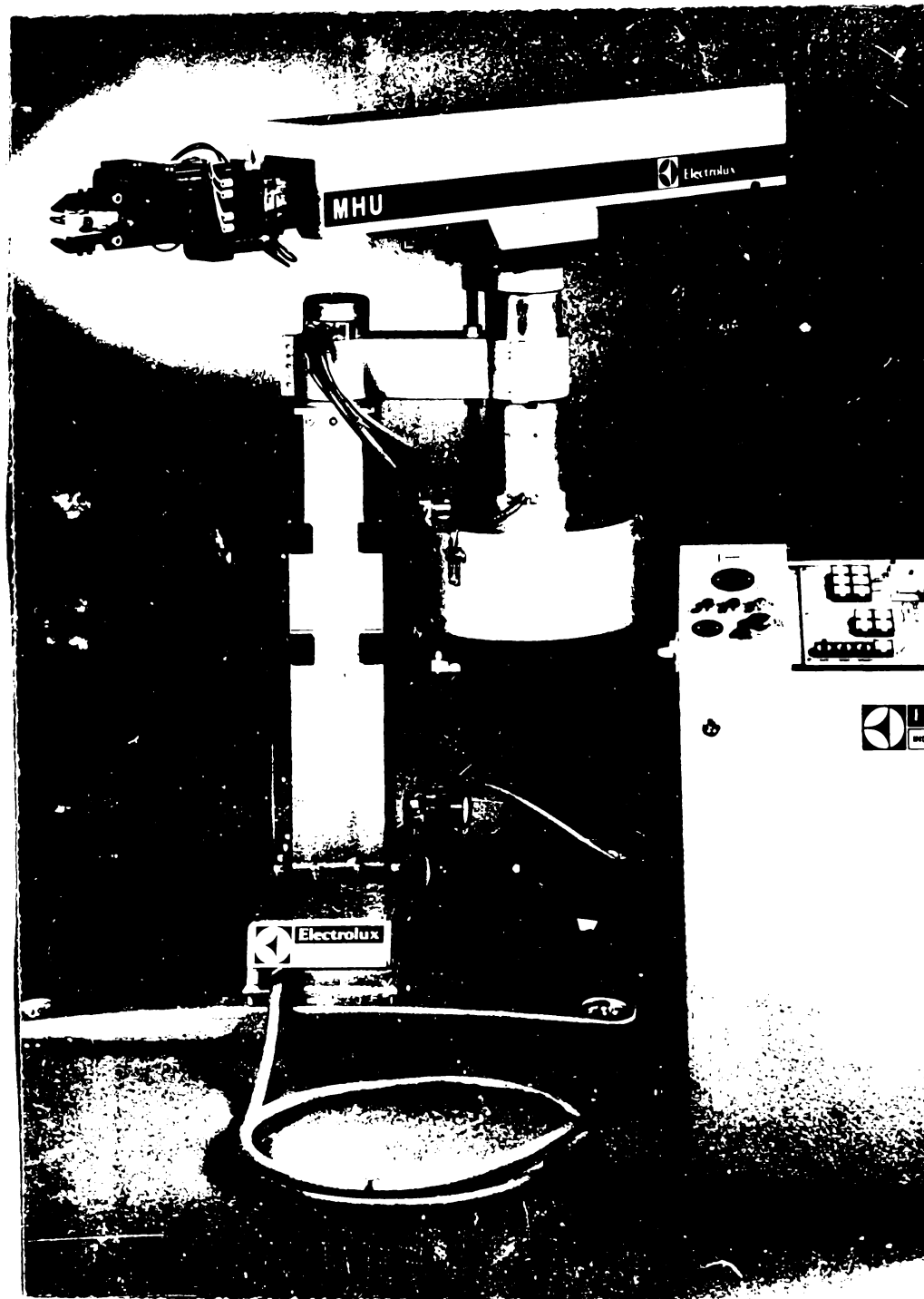


Fig.2.8

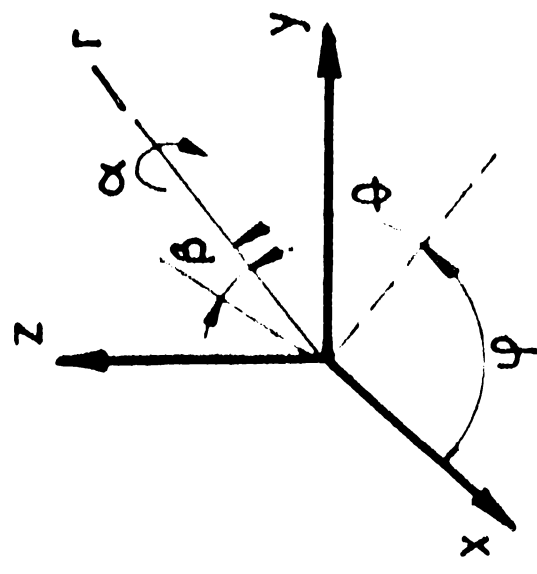
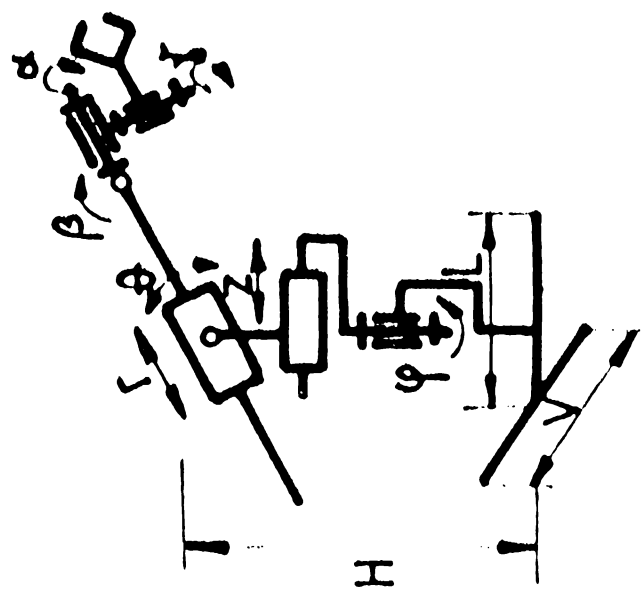
În tabelul 2.3 sînt prezentați cîțiva dintre roboții cuprinși în această categorie.

4. Tipul "turelă" (T). Caracteristic pentru acest tip de roboți industriali este faptul că între corpul central al robotului și braț, se interpune un subansamblu de forma unei turele, care permite o rotație suplimentară, în jurul unei axe, care se găsește în plan orizontal. Construcția brațului este similară cu cea a tipului precedent. Sînt, în majoritatea cazurilor, cu acționare hidraulică. Prezintă o mare robustețe și de asemenea, o dexteritate sporită față de tipul anterior. Roboții din această categorie au practic o aplicabilitate universală.

În figura 2.9 se prezintă robotul PRAB-5800, iar în figura 2.10, se prezintă robotul UNIMATE 1000 al firmelor cu același nume din SUA.

În tabelul 2.4 sînt prezentate caracteristicile principale ale structurii mecanice, ale sistemului de acționare și respectiv de comandă, a unor roboți din această categorie.

4. ROBOTI TIP „TURELĂ” (T)



Tabel 2.4

Tara producătoare	Model R.I	Sarcina vehiculată [Kg]	Nr. grade de libertate	Nr. coord. programabile	Tipul acționării	Sistemul de comandă	Mod de schimbare a programului	Capacitatea de memorie (nr. comenzi)	Precizia de poziționare [±mm]	Poziția maximă de extensie a brațului R [mm]	Deplasarea liniară [mm]			Viteza unghiulară [°/s]			Dimensiuni de gabarit [mm]			Masa [Kg]	
											r	x	y	φ	β	α	H	L	V		
0		2	3	4	5	6	7	8	9	10	r	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Anglia	Unimate - 2100	70	6	6	H	P	Pin în vântare	-	1,25	2838	1350	-	-	220	+30/-27	220	200	1620	1310	1300	1100
Italia	Auto-Mate	5	6	6	P	P	Pin în vântare	53	4,0	-	609	-	380	120	10	-	180	-	-	-	-
Italia	Polar - 6000	60	6	6	H	U	EVM	-	1,0	2980	1300	-	-	210	50	240	1400	-	-	1340	3700
Japonia	Tokio Shibaura Electric IX-12	40	5	5	H	P	Disc magn.	300	1,0	1900	700	-	-	220	30	220	1410	1020	1020	600	
Japonia	Kawasaki Unimate 2000	35	5	5	H	P	Disc magn.	180	1,0	2418	10x1	-	-	220	+30/-27	220	1435	162	1230	1500	
Japonia	Uniman UM 3600 -MP	40-75	6	6	H	P	Bandă magn.	-	1,0	2125	1000	180	20	240	+27/-33	220	1260	1280	-	1900	
Japonia	Matbac - IPA 50	80	5	5	H	P	Bandă magn.	28	2,0	1750	800	-	-	220	+45/-60	180	1590	865	2510	700	

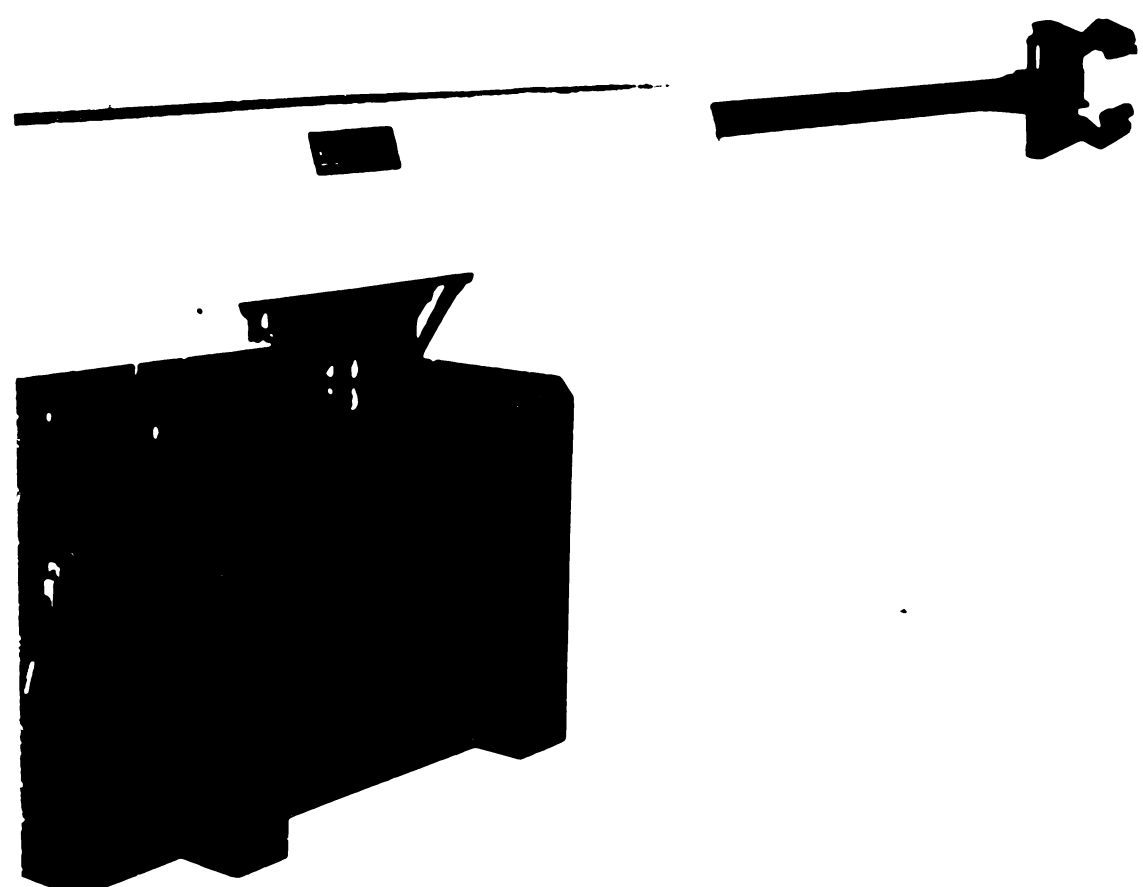


Fig.2.9

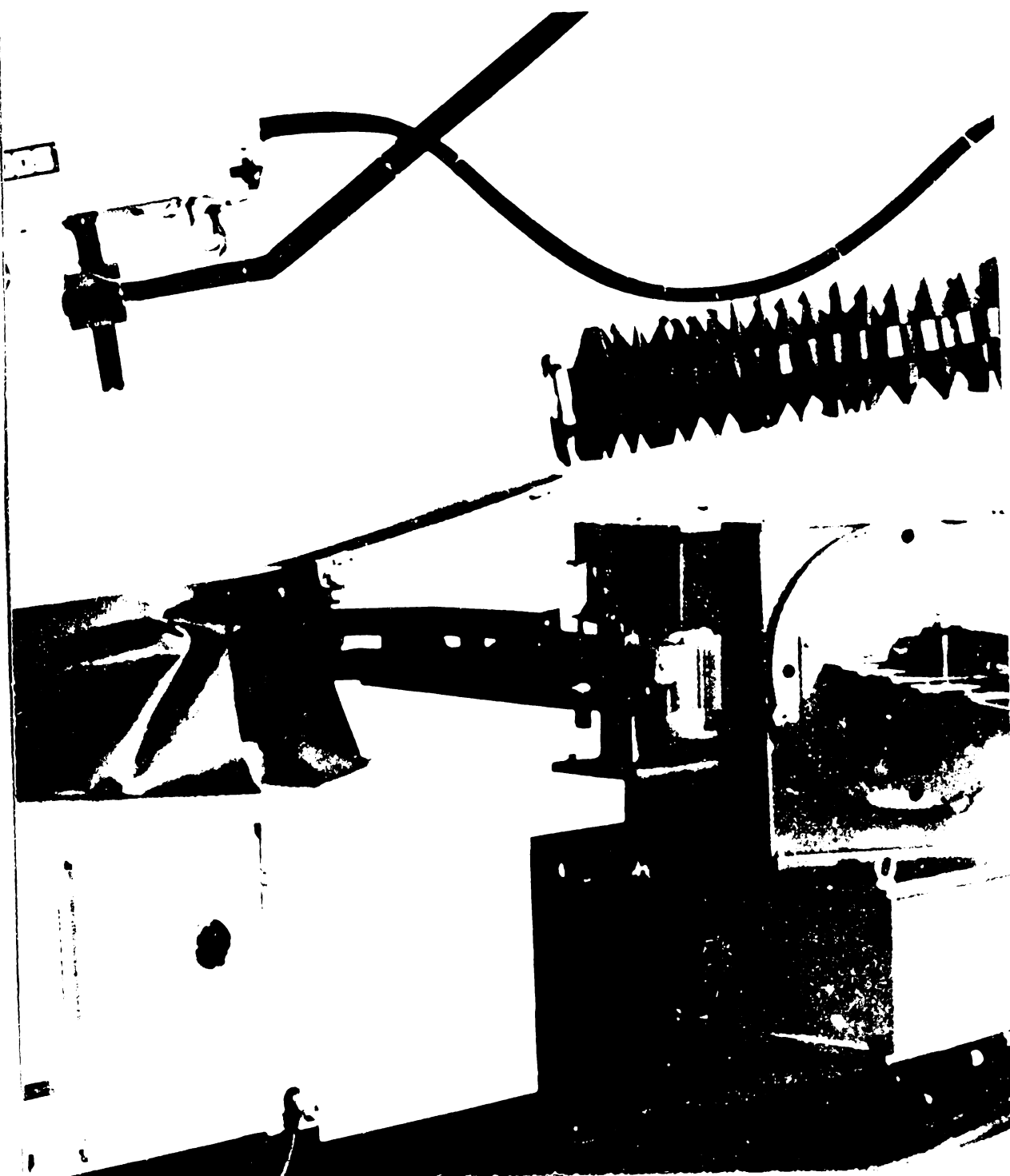


Fig.2.10

5;6. Tipurile "coloană" (C) și "cadru" (CD). Roboții tip "coloană" se caracterizează prin faptul că brațul propriu, zis, asemănător cu cel de la tipurile precedente, este purtat de o coloană verticală, care permite o deplasare de translație, după aceeași direcție.

În general, această coloană este constituită din două tije cilindrice verticale. Mișcarea de translație este realizată prin intermediul unui mecanism gurub-piuliță.

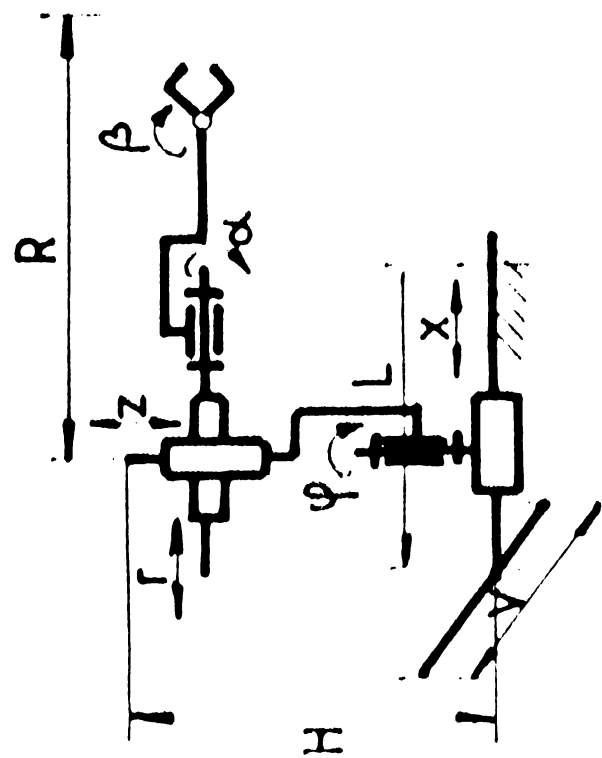
Acești roboți prezintă o construcție simplă și robustă, rigidă. Au o dexteritate suficient de mare, dar au suplețea relativ redusă.

În unele cazuri, coloana verticală a robotului este inclusă într-un cadru, lucru ce conferă structurii mecanice o rigiditate sporită. În acest mod se obține structura tip cadru.

În figura 2.11 se prezintă robotul FANUC-model 3 al firmei FANUC-FUJITSU-Japonia, iar în figura 2.12, robotul SIROBOT-2 al firmei SIEMENS (RFG). Se observă că primul este de tip coloană, cel de al doilea fiind tip cadru.

Tabelul 2.5 prezintă câteva variante de roboți din aceste categorii.

5.6 ROBOTI TIP „COLOANĂ” (C) ȘI „CADRU” (CD)



Țara producătoare	Model R.I.	Sarcina vehiculată [Kg]	Nr. grade de libertate	Nr. coordonate programabile	Tipul acționării	Sistemul de comandă	Mod de schimbare a programului	Capacitatea de memorie a sistemului de comandă (nr. comenzi)	Precizia de poziționare [±mm]	Poziția maximă de extensie a brațului R [m]	Deplasarea liniară [mm]				Deplasarea unghiulară [°]				Dimensiuni de gabarit [mm]			Masa [Kg]
											Viteza [m/s]	r	x	y	z	φ	α	β	H	L	V	
0	?	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
R.P. Bulgară	RB - 232	110	7	7	H	P-C	Prin învârtire	430-5000	1,2	1981	914-1220-1525-6095 0,76-0,45	120-6095	-	914-1525-0,76	300-60	300-45	180-45	340+	1116	1116	1116	810
R.D.G.	IR - 1	5-10	3	3	H	P	Prin învârtire	-	0,3	-	400	-	630	270	-	-	-	-	-	-	900	
Japonia	MHY Junior	5	3	3	P	P	Prin învârtire	30-60	0,1	1250	500	-	150	270	-	-	-	550	600	600	50	
Japonia	Versatran E-401	5	4	4	P	P	Prin învârtire	30-60	0,5	1132	700	-	500	180	180	180	1575	1325	600	400		
Japonia	Uniman UM 1320 PT (Uniman 1000)	10-30	4	4	H	P	Prin învârtire	30	1	1150	500	-	700	240	180	180	1735	1190	700	750		
Japonia	Matbac IRC-30	60	6	6	H	P	Prin învârtire	1200	1	2000	1000	-	700	140	180	90	2161	800	1950	800		
R.P. Polonă	MP-25	2	2	2	P	C	Pe suport	10	0,1	185	-	-	125	90	-	-	370	383	140	20		

Tabel 2.5

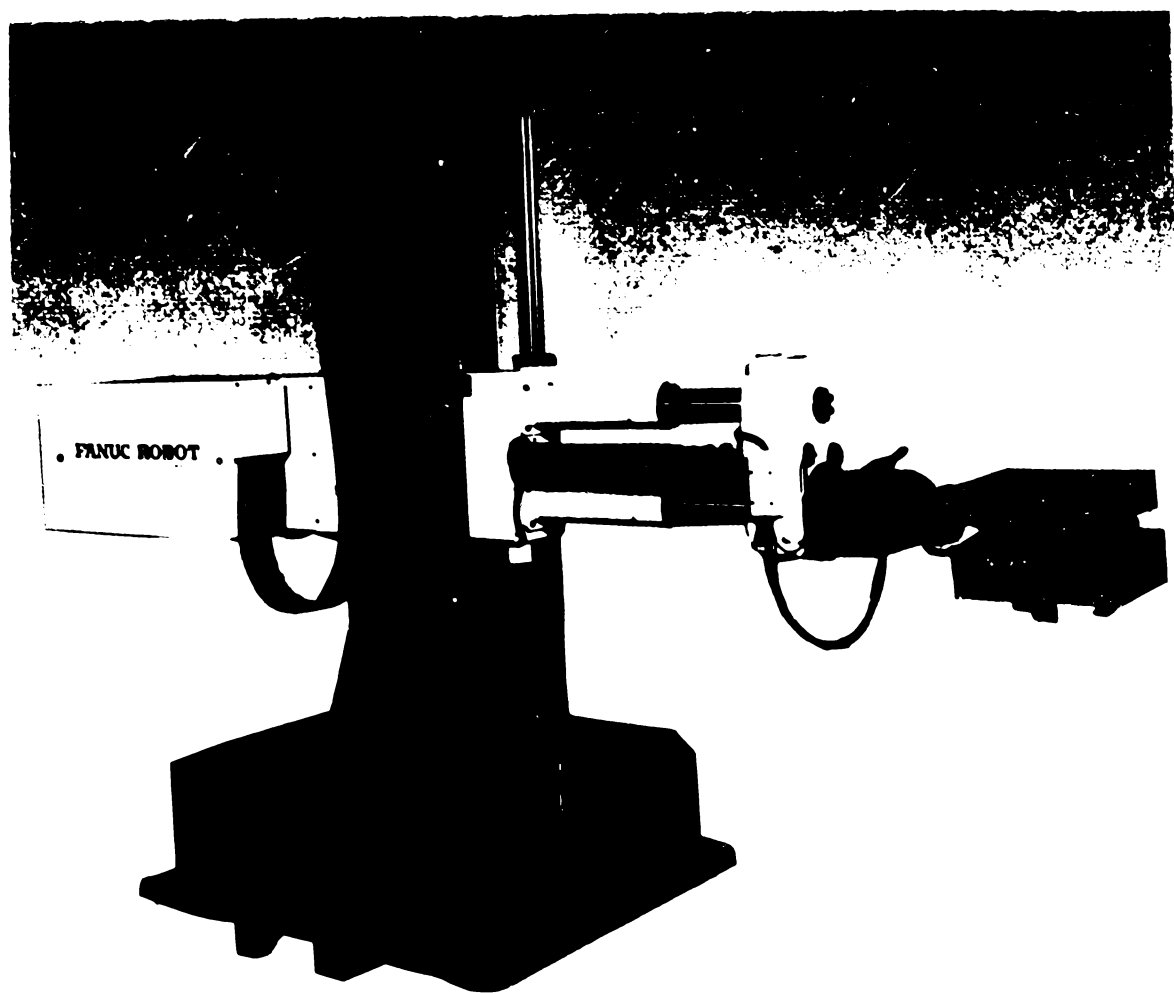


Fig.2.11

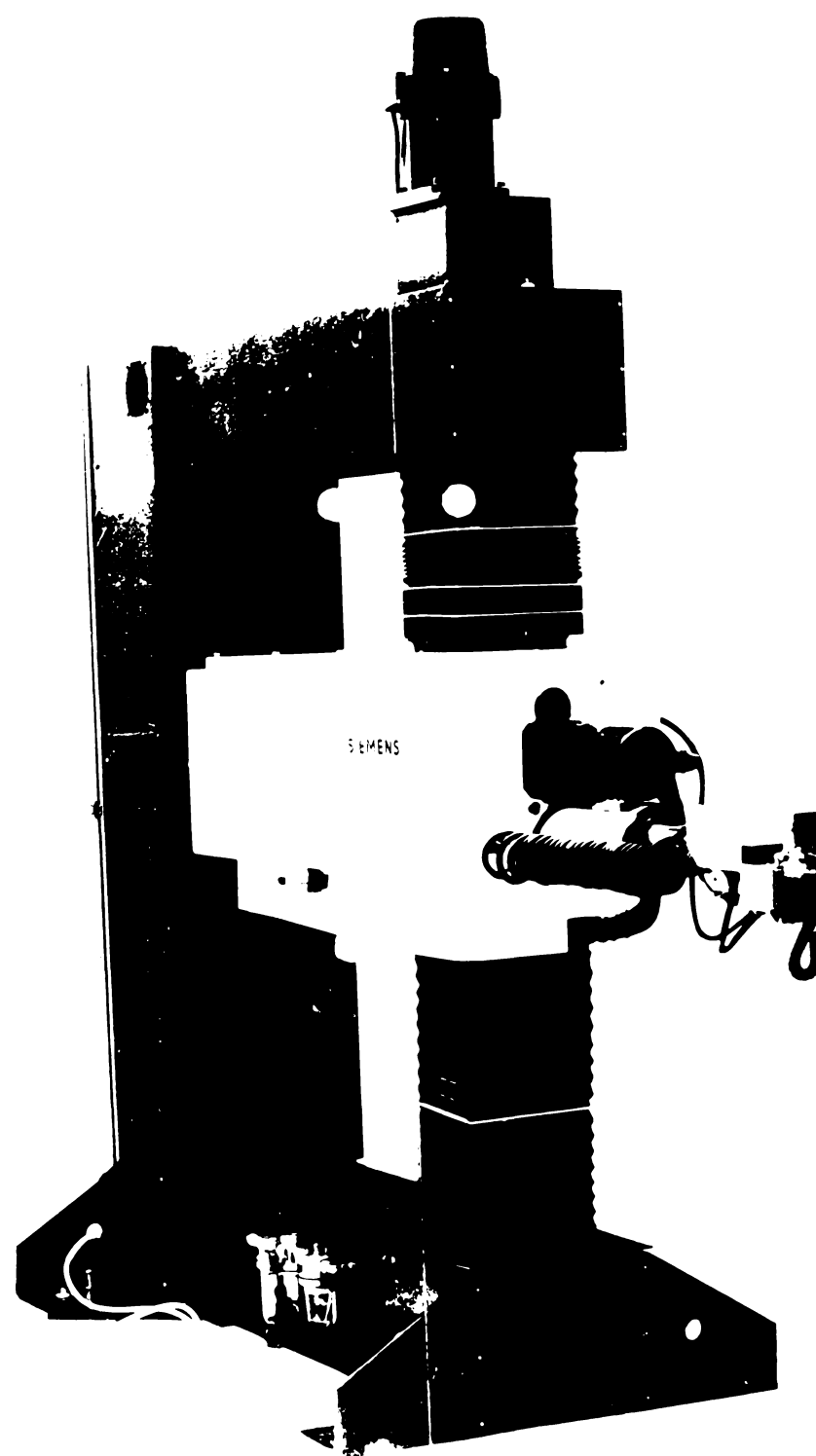


Fig.2.12

7;8) Tipurile "Portal" (PO) și montați pe cărucior (CA).

Construcțiile portal pentru roboții industriali, se folosesc în situațiile în care se necesită vehicularea unor sarcini mari. Trebuie să se aibă în vedere și avantajele care rezidă din faptul că asemenea tipuri de roboți au accesibilitate din partea superioară într-un spațiu de lucru.

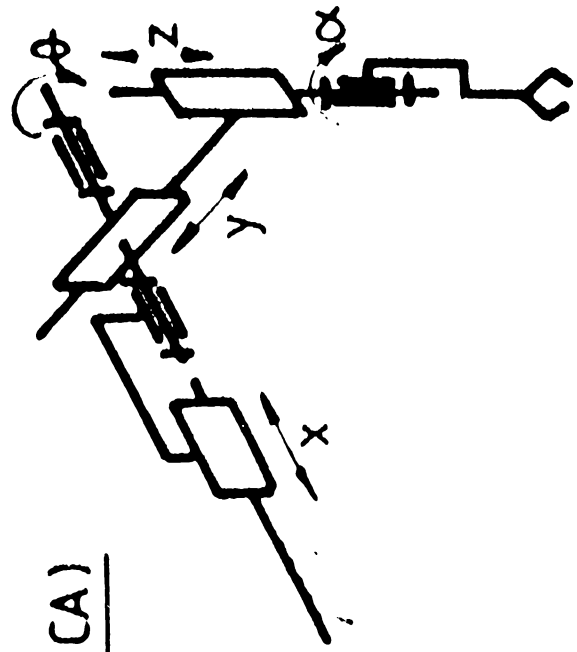
Tot pentru acoperirea unor spații de lucru mari, roboții pot fi montați pe șasiuri sau cărucioare, care se deplasează liber sau ghidate pe șine.

Se utilizează, în special, în industria de autoturisme sau în depozite pentru paletare.

În figurile 2.13 și 2.14 sînt prezentați robotul portal PM-22 al firmei PFAFF-RFG și robotul ROBOLANG al firmei LANCUEPIN-Franța, robot care este montat pe un cărucior suspendat.

Tabelul 2.6 prezintă caracteristicile tehnice principale ale structurii mecanice, a sistemului de acționare și de comandă a unor roboți industriali din aceste două tipuri.

7.8 ROBOTI „TP „PORTAL” (PO) SI MONTAJI PE CĂRUȚIOR (CA)



Tabel 2.6

Tara producătoare	Model R.I.	Sarcina vehiculată [Kg]	Nr. grade de libertate	Execuție	Nr. brațe	Nr. mecanisme de prehensiune pt. un braț	Acționarea	Sistem de comandă	Mod de schimbare a programului	Capacitatea de memorie (nr. comenzi)	Precizia de poziționare [±mm]	Poziția max. de extensie a brațului [mm]	Deplasarea liniară [mm]			Deplasarea unghiulară [°]		Lungime monorai [m]	Masa [Kg]
													x	y	z	α	φ		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
R.P. Bulgară	RB - 250	10	5	-	1	1	-	-	-	-	0,25	-	2500	1250	630	360	110	4,2	3600
R.P. Bulgară	Pirin 510	60/30 80/40	3-6	-	2	1	H	C	Pe suport rigid	-	0,25	-	4000 - 5000 0,6 (0,15)	-	500, 600 0,6 (0,15)	180	20	4-6	-
R.S. Ce.- Iugoslavia	M63 - 0L	20	3	1	1	2	H	P	Pe suport rigid	64	0,5	800	4000	-	800	-	180	4,7	1300
Finlanda	RB 1	40	5	-	1	1	H	P	Prin învârtire	-	-	-	la întelegere	-	1200	-	360°	-	-
Italia	Sigma / MTS	5	3-6	-	2 sau 1	1	E	U	Prin învârtire	-	0,15	-	1010	400	400	-	-	-	-
Japonia	RC	15	3	-	1	1	P	C	Pe suport	-	0,2	-	la întelegere	-	750, 1350	180	-	-	-
Japonia	Synchro hand	20; 30	3	-	1	1	P	C	Cu potenta- metru	-	1,0	-	1000	500	400	-	-	400	400

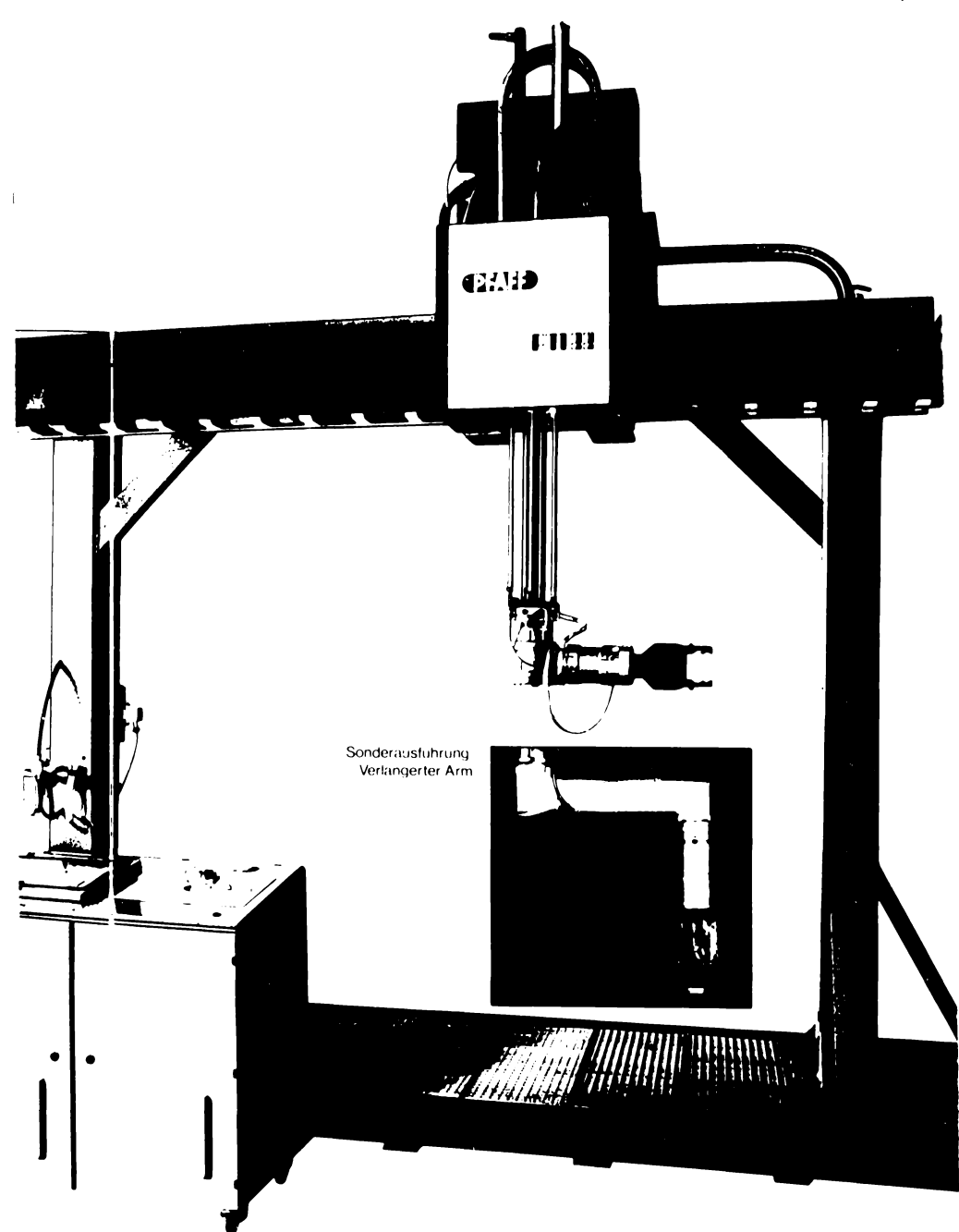


Fig. 2.13

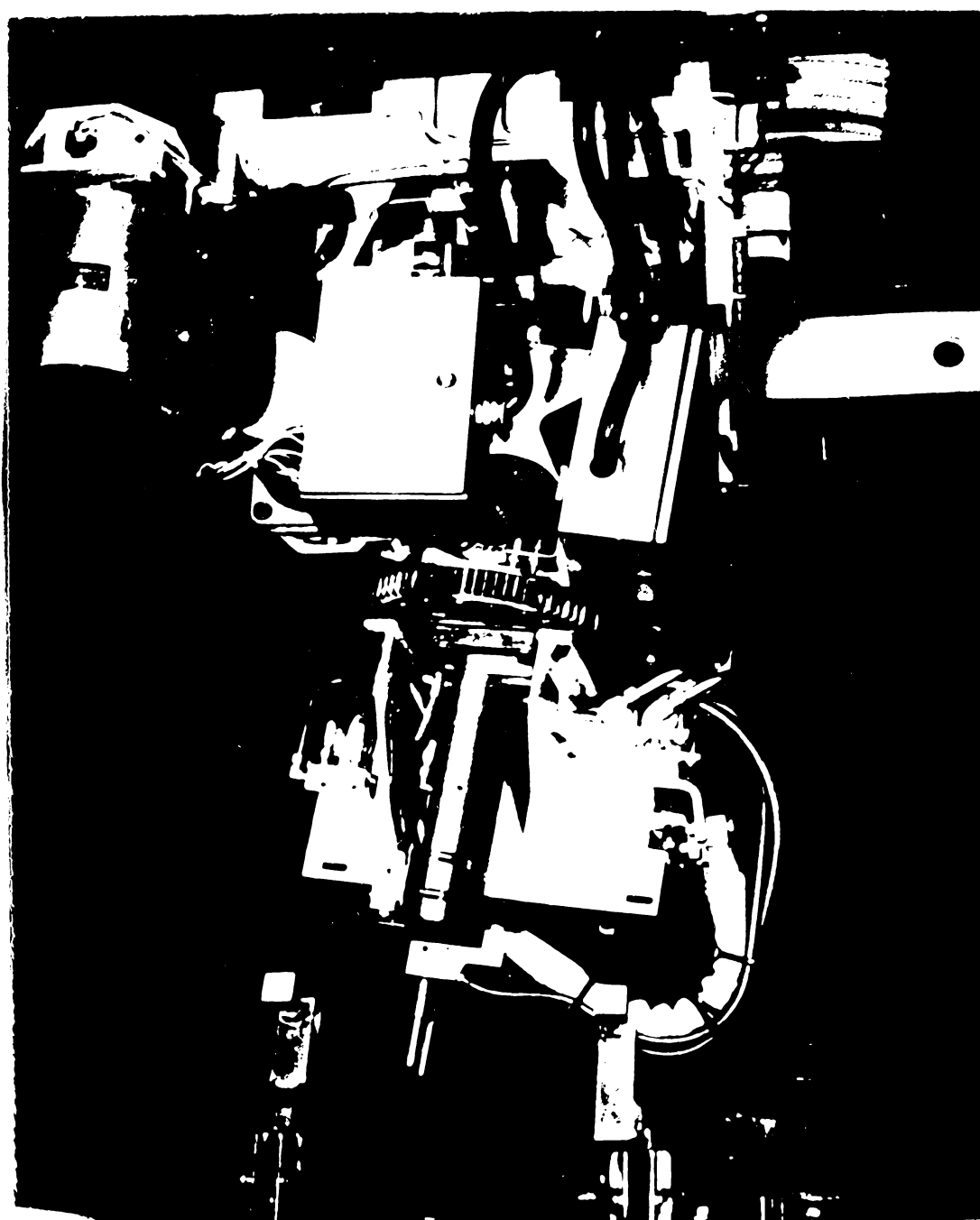


Fig. 2.14

2.3. Analiză componistică a construcției mondiale de roboți industriali

Este cunoscut faptul că dezvoltarea industriei de roboți s-a făcut de la particular spre general. Primii roboți industriali au fost concepuți ca să asigure operații specifice unui anumit domeniu. Industria ultimilor ani are tendința de a crea roboți multifuncționali, care să poată fi utilizați în largi aplicații industriale, deși în paralel producția roboților superspecializați continuă. De aici marea varietate de modele și variante de roboți industriali.

Desigur că pentru un studiu componistic este necesară stabilirea unor criterii de apreciere, pe baza cărora să se încerce o categorisire a structurilor mecanice a roboților industriali. Această acțiune este deosebit de importantă, deoarece ea poate da o imagine clară asupra unor aspecte ale corelației structură-performanță. Drept criterii de clasificare - luate în considerare - se amintesc :

- a) forma spațiului de lucru;
- b) volumul spațiului de lucru;
- c) numărul gradelor de libertate a mecanismului de ghidare;
- d) sarcina vehiculată;

- e) tipul acționării,
- f) vitezele liniare și unghiulare de deplasare la nivelul cuplelor cinematice,
- g) precizia de poziționare etc.

Dacă se ia în considerare spațiul de lucru, se poate forma o imagine clară asupra componenței parcului actual de roboți industriali, analizând histograma din figura 2.15 /K9/.

Se remarcă ponderea majoră a roboților, care prin structura mecanică proprie realizează spații de lucru de formă cilindrică (58,5%). Celelalte categorii reprezintă procentul o pondere neînsemnată din totalul roboților existenți.

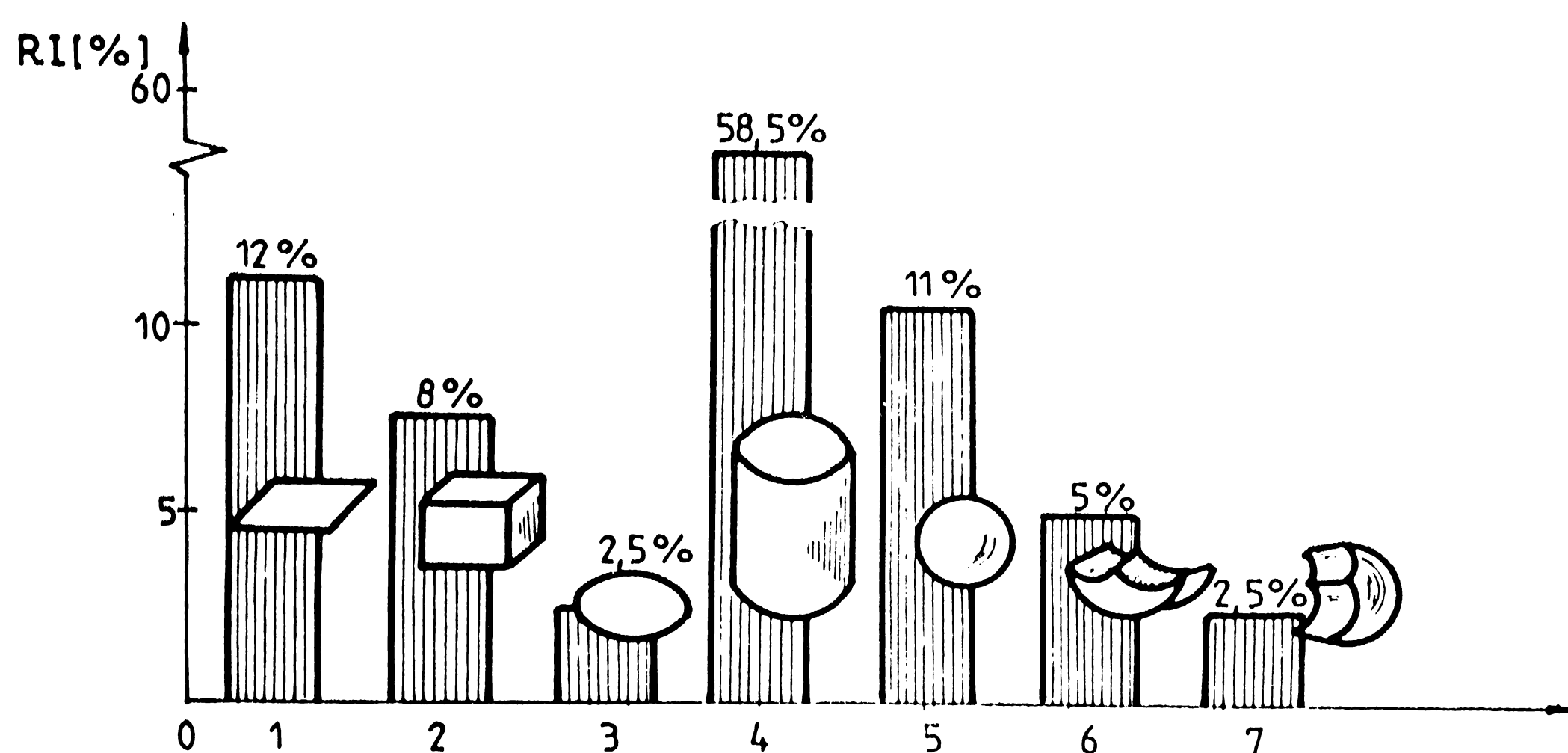


Fig.2.15

Se va acorda o atenție sporită structurilor mecanice (mecanismelor generatoare de traiectorie - MGT), care generează spații de lucru de formă cilindrică.

Structura lanțului cinematic component al M.G.T. al robotului industrial joacă un rol deosebit în realizarea parametrilor funcționali și cinematici ai acestuia. De aceea, alegerea corespunzătoare a acestuia este o problemă majoră, cu care se confruntă orice proiectant de roboți industriali.

Dacă urmărim figura 2.16, se remarcă ponderea masivă a structurilor care au în componență lanțuri cinematice cu 3, 4 și 5 grade de libertate, celelalte categorii reprezentând un procent redus.

Totuși, roboții multifuncționali, dotați cu elemente de inteligență artificială (făcând parte din generația a 3-a), apăruiți în

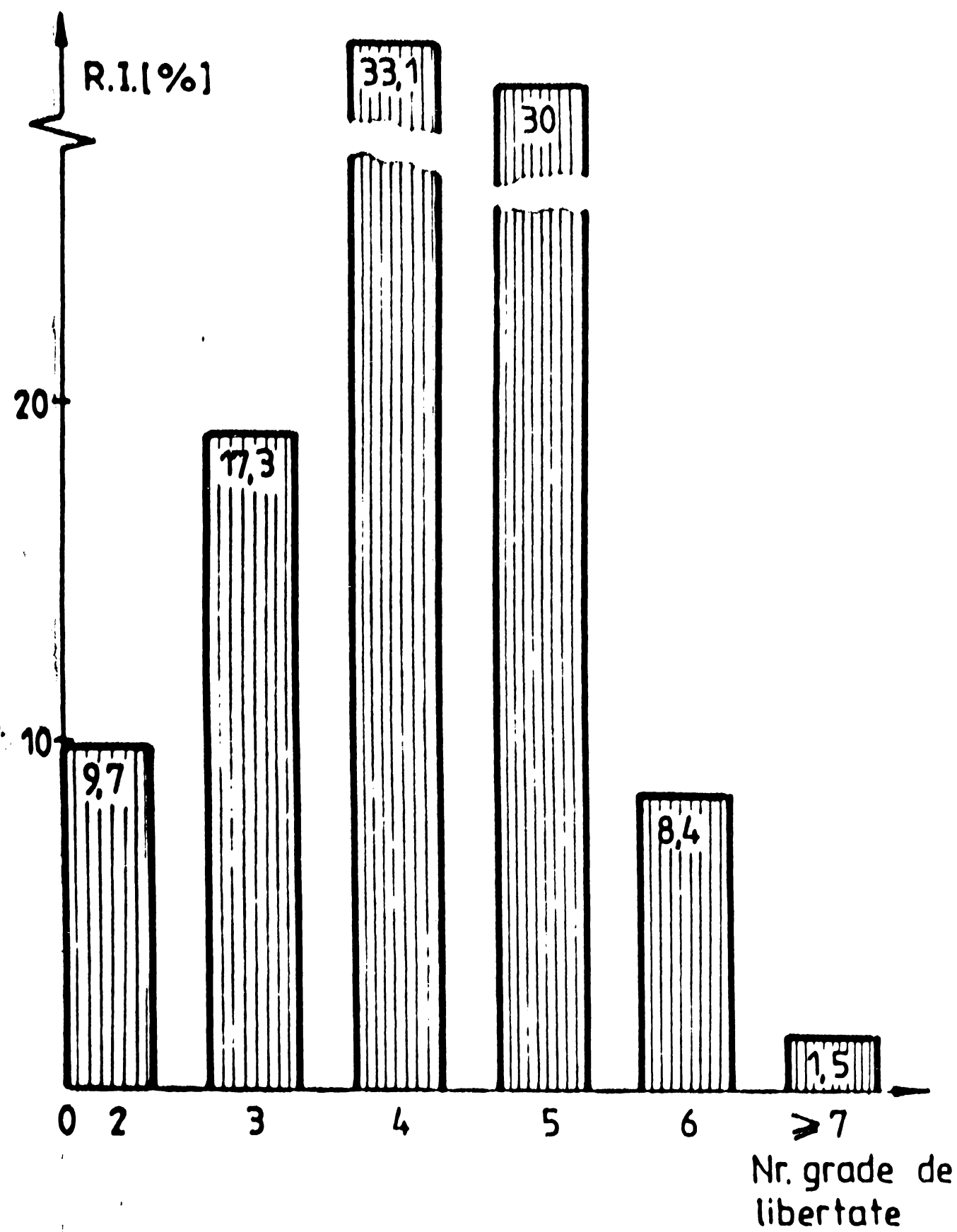


Fig.2.16

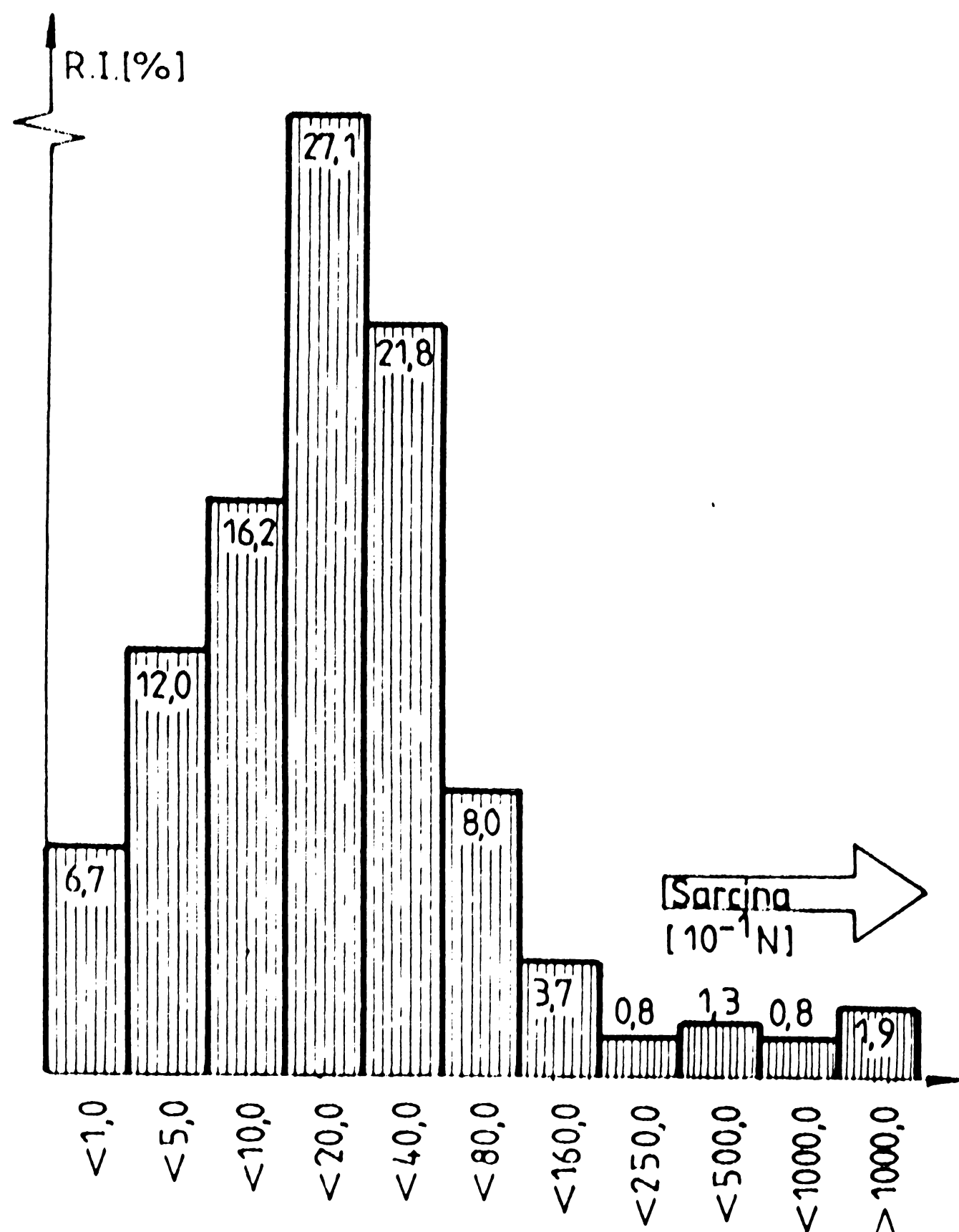


Fig.2.17

special după anul 1985, sînt în majoritatea cazurilor cu 6 sau cu mai multe grade de libertate.

În legătură cu histogramele prezentate în figura 2.17 și 2.18, se poate afirma că la ora actuală se construiesc roboți industriali, care pot vehicula greutateți (sarcini) pornind de la fracțiuni de [N] pînă la peste 10.000 [N].

Se observă totuși că majoritatea roboților construiți vehiculează greutateți pînă la 400 [N] (83,5% din total parc roboți).

Deasigur că sarcina vehiculată dictează cu oarecare prioritate tipul acționării roboților industriali.

La ora actuală, acționarea electrică este pe primul loc (79%), /S13/ (fig.2.18), urmată de acționarea hidraulică (17%) și doar în proporție de 4% de către acționarea pneumatică.

Cu privire la sistemul de comandă al roboților industriali, se poate vedea clar (fig.2.19) că primează sistemul de comandă de poziționare (punct cu punct - point to point), mai ales în cazul utilizării acționărilor de tip pneumatic și hidraulic. În cazul

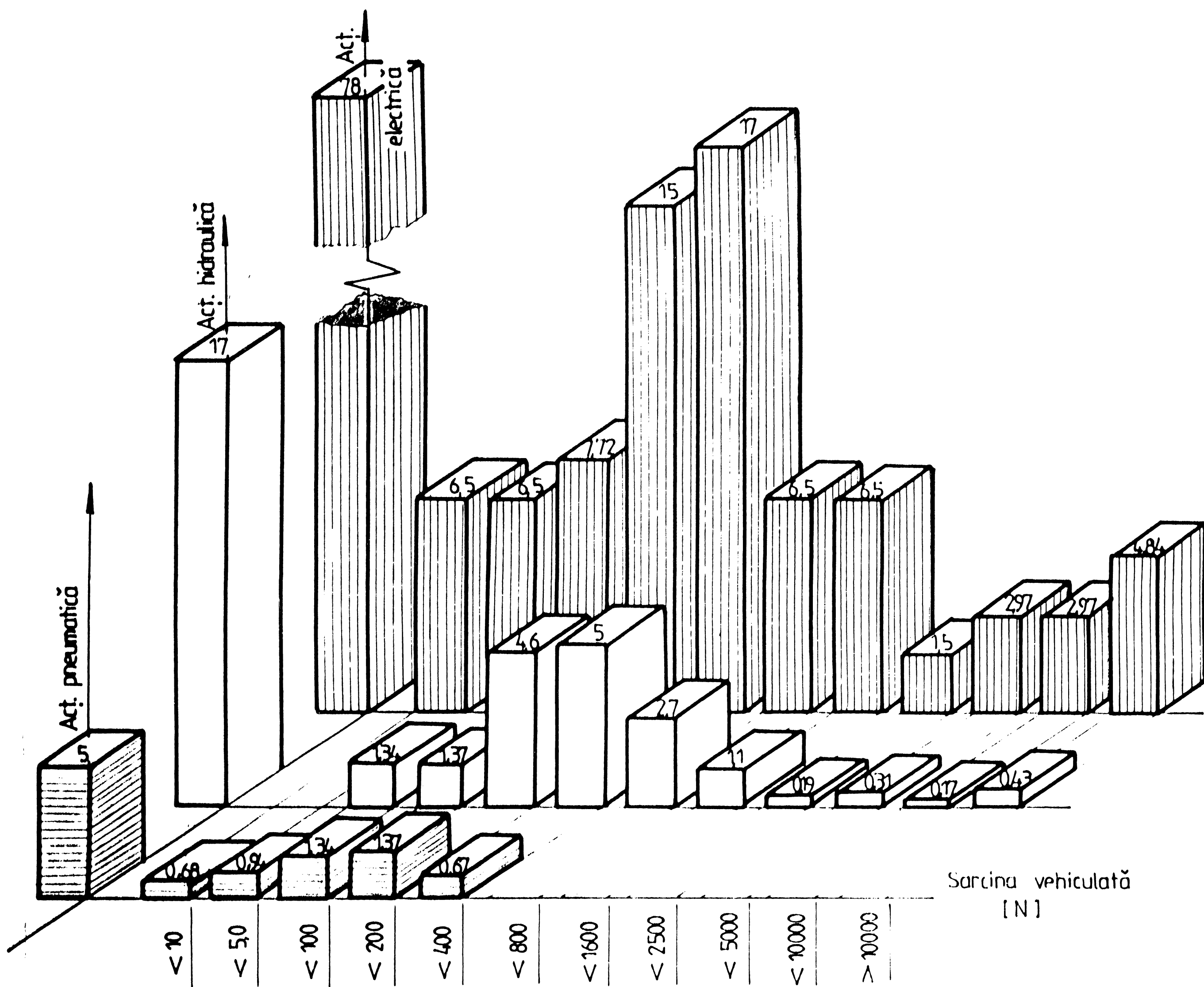


Fig. 2.18

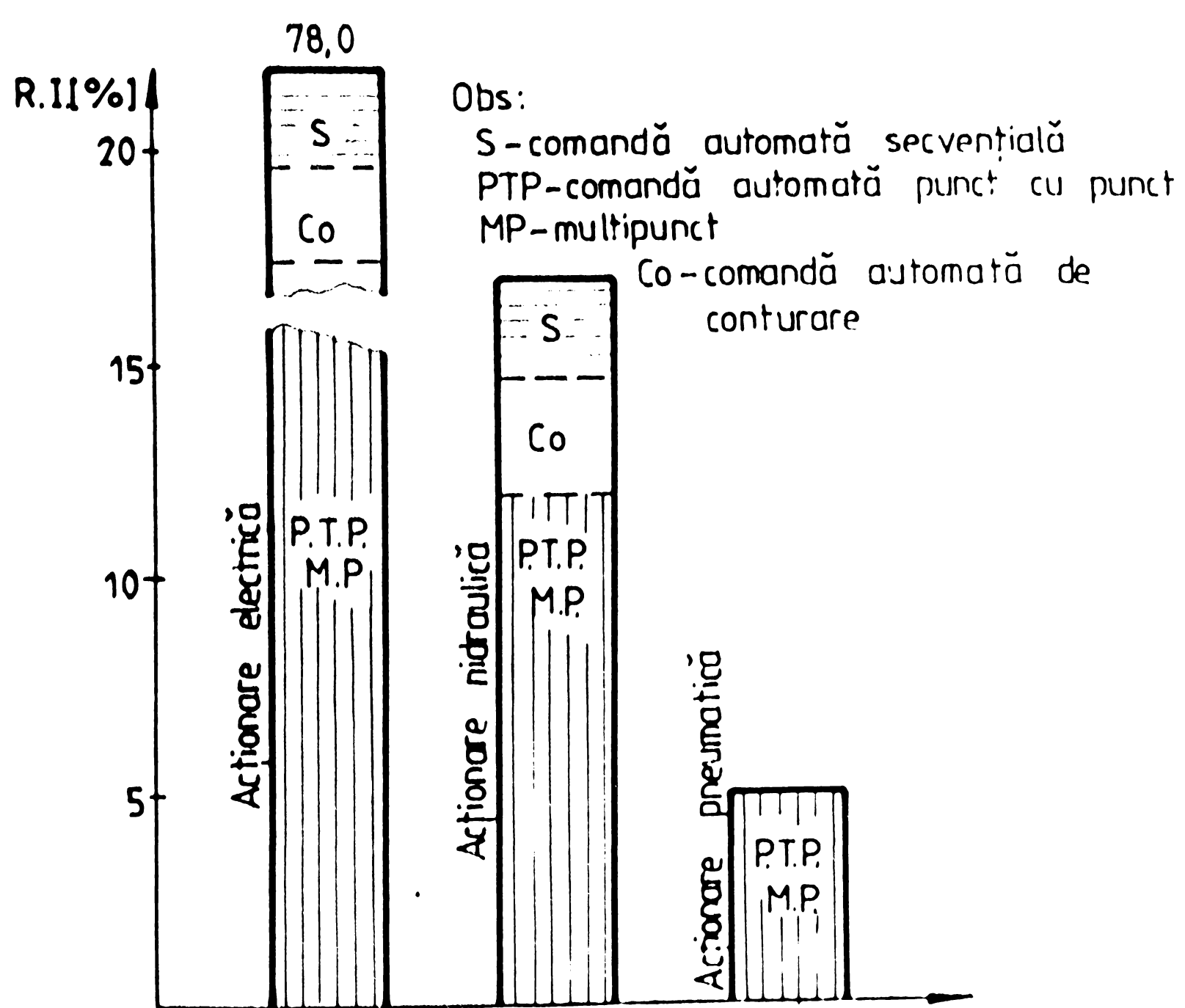


Fig. 2.19

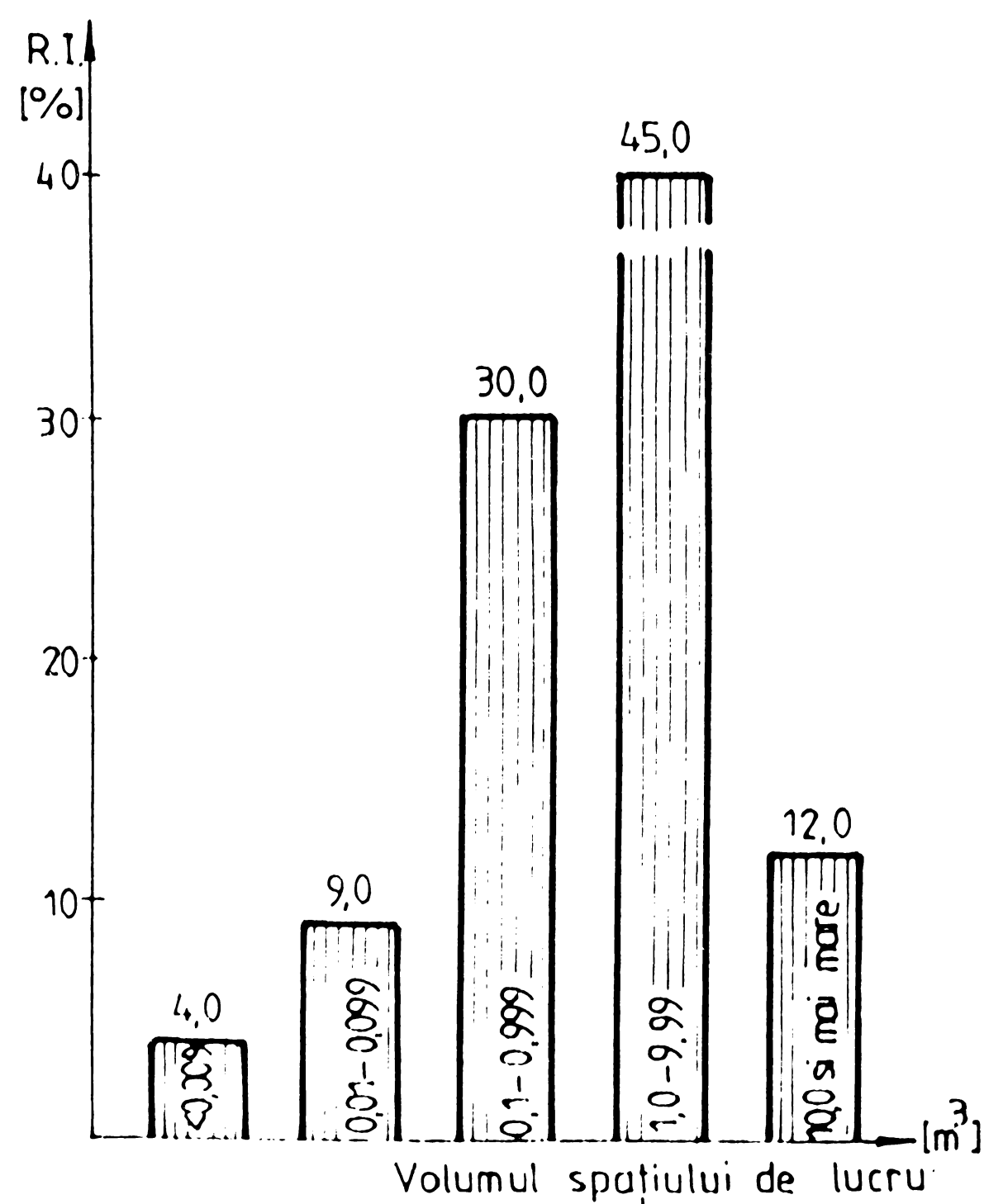


Fig. 2.20

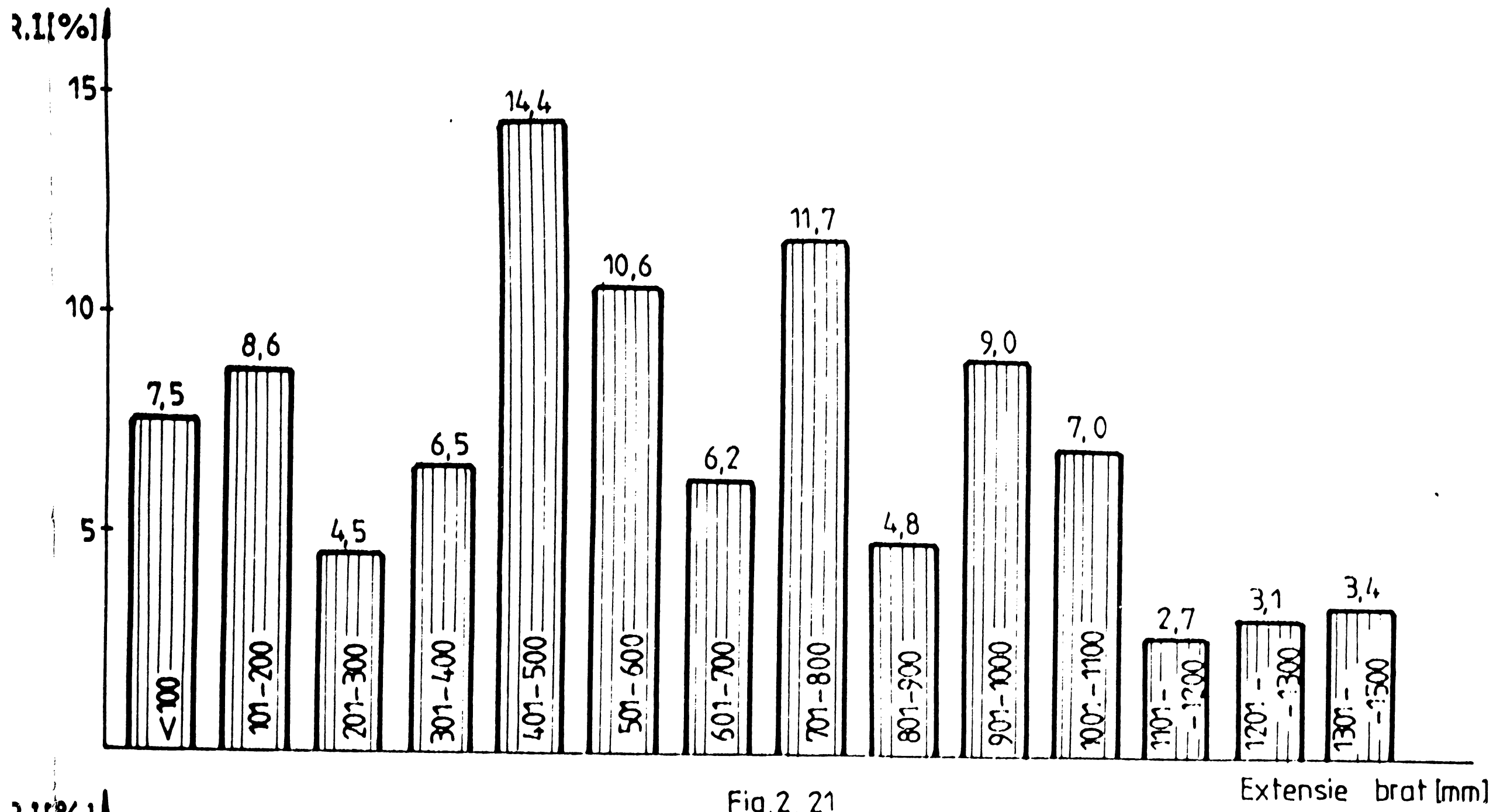


Fig.2.21

Extensie braț [mm]

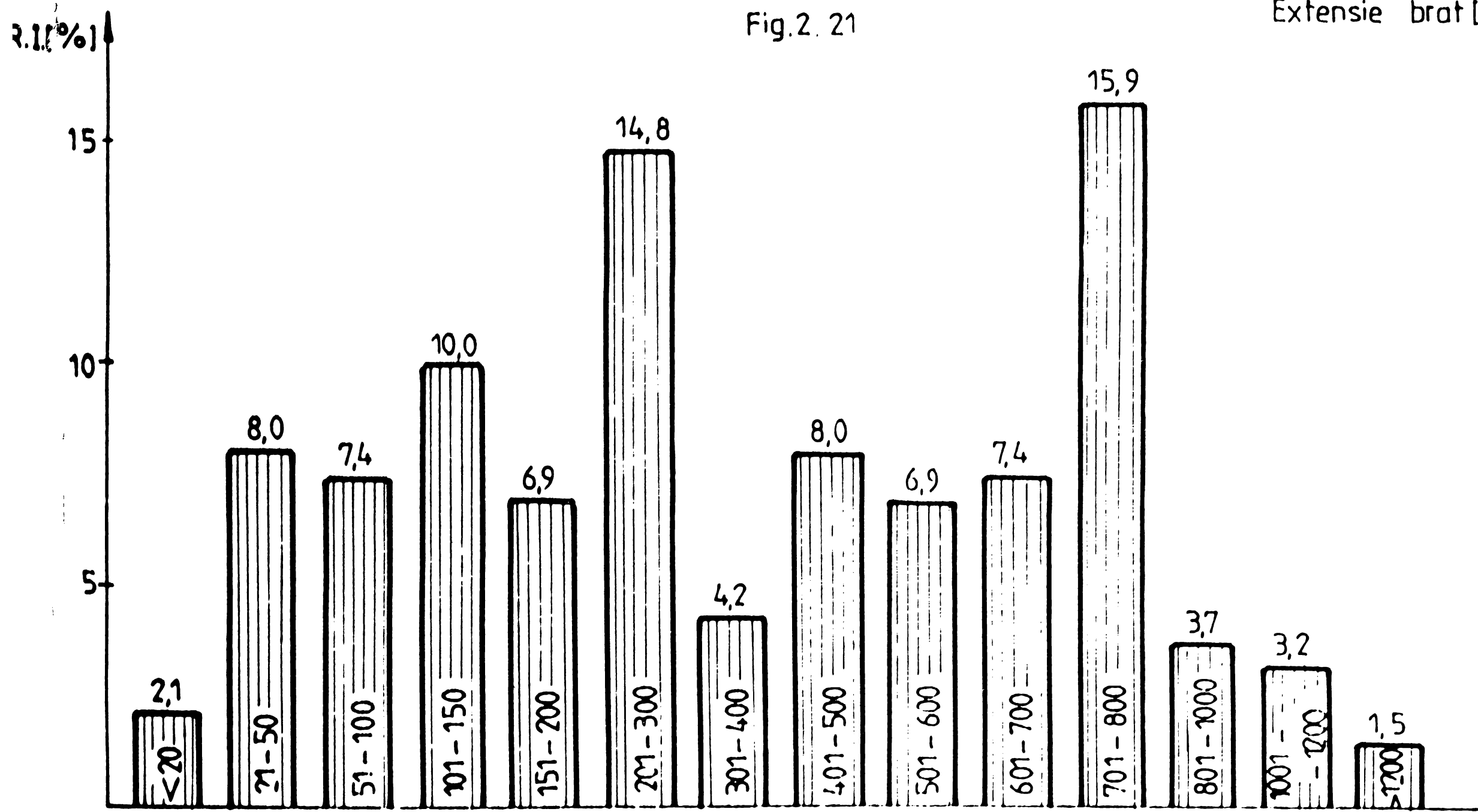


Fig.2.22

Ridicare braț [mm]
(Translație verticală)

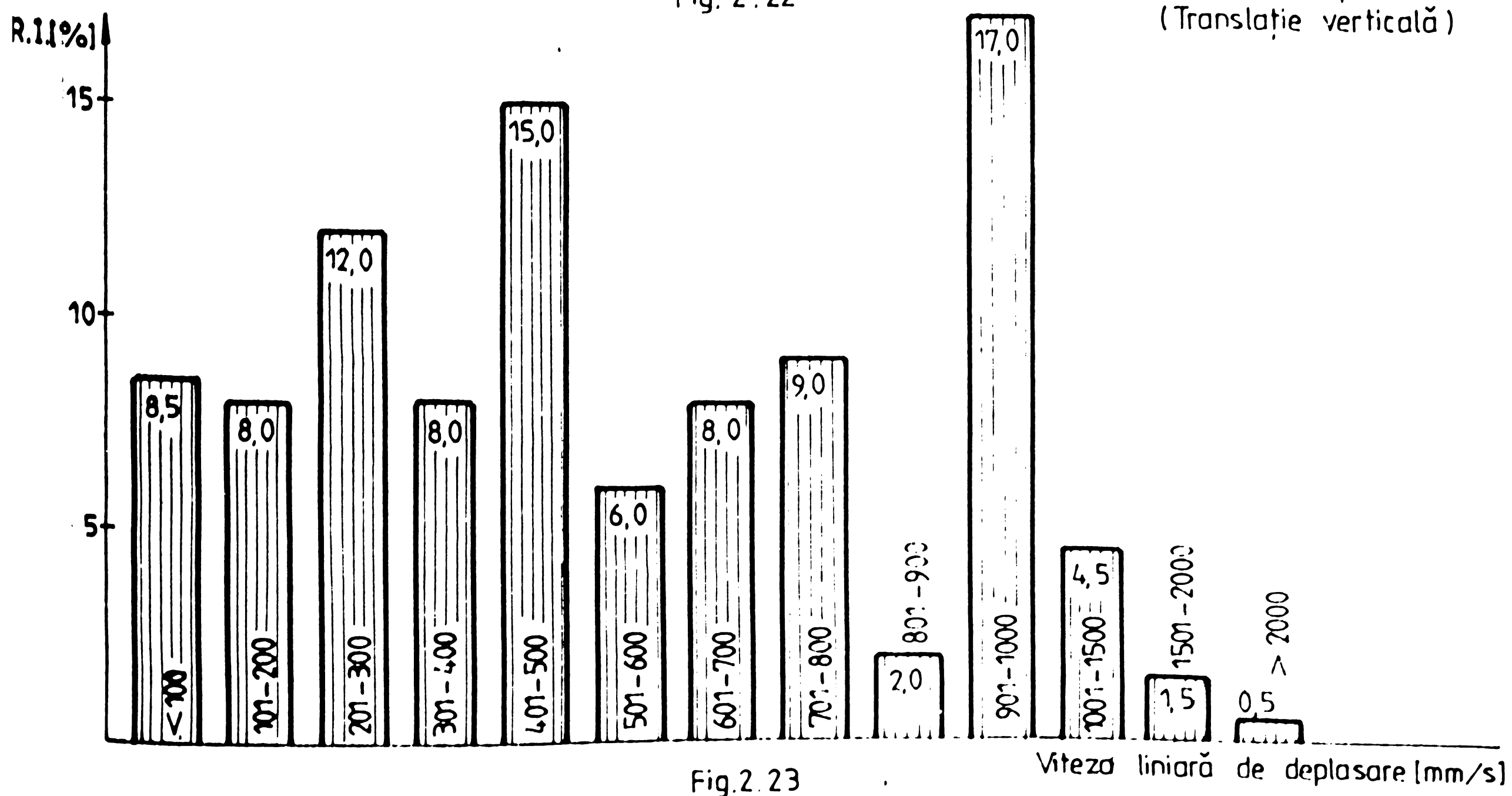


Fig.2.23

Viteza liniară de deplasare [mm/s]

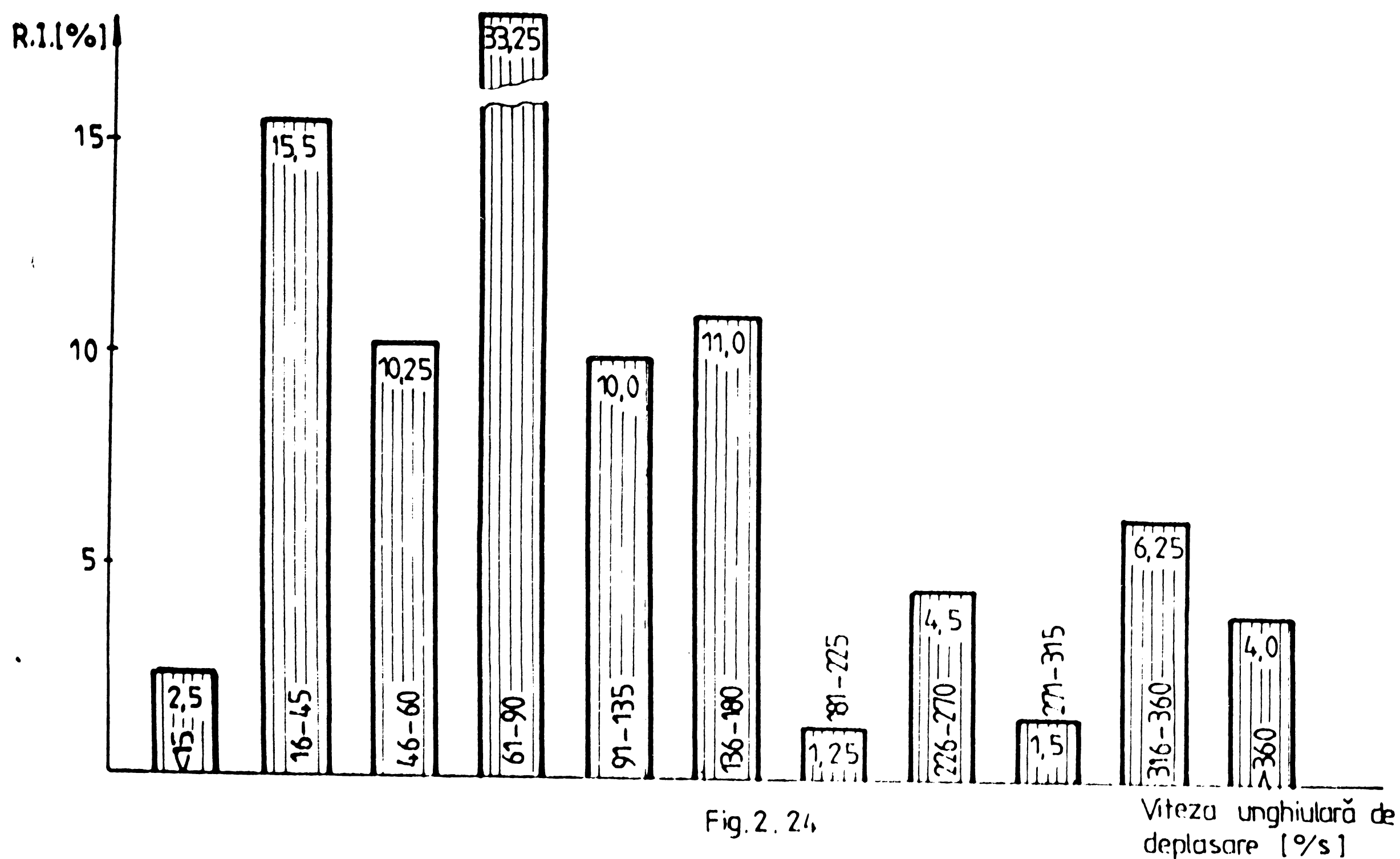


Fig. 2. 24

Viteza unghiulară de deplasare [°/s]

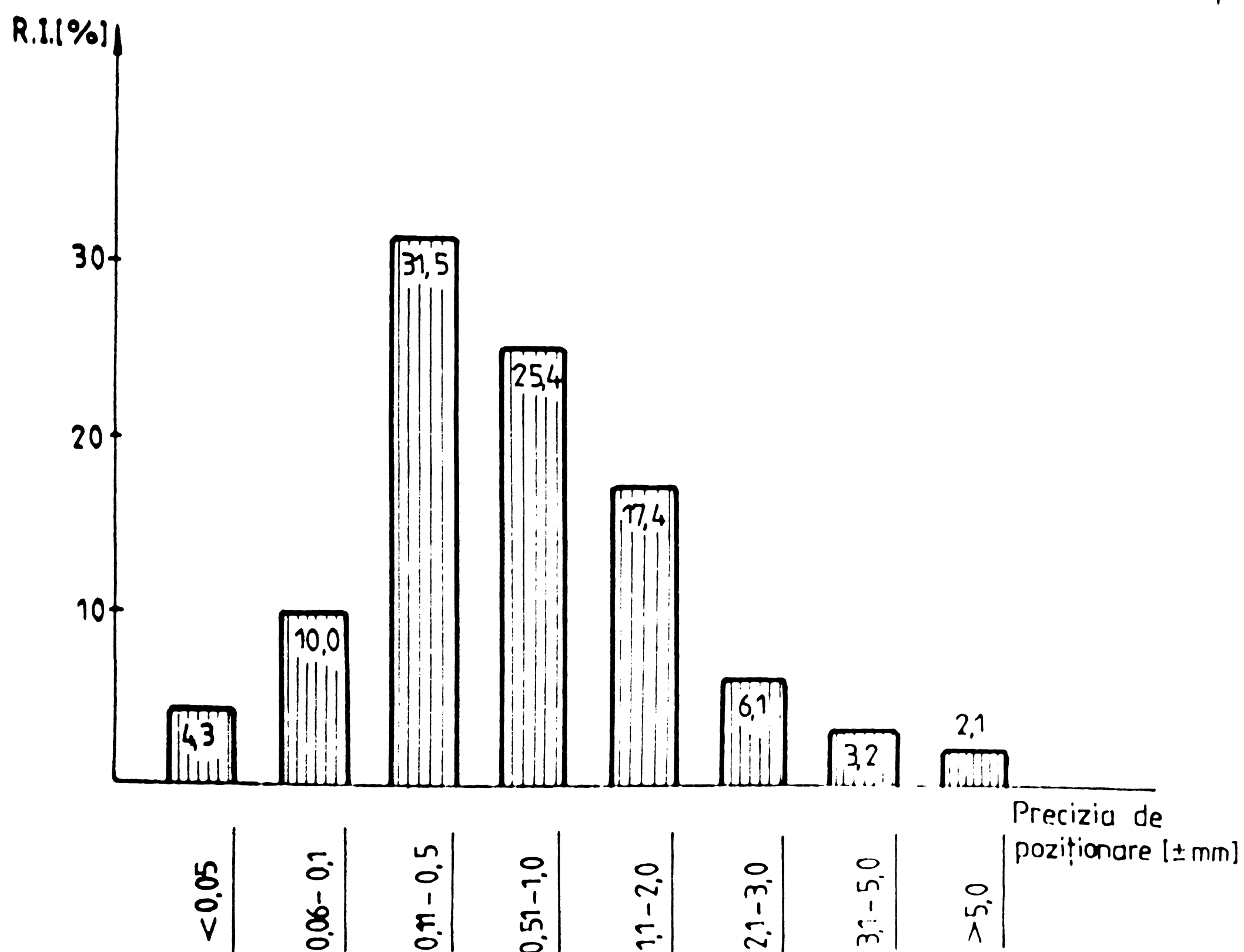


Fig. 2. 25

utilizării unor acționări electrice, ponderea celor patru categorii de sisteme de comandă (S, PTP, MP, CP) este sensibil apropiată.

O imagine asupra caracteristicilor cinematice ale structurilor mecanice din componența roboților industriali existenți, se poate face urmărind histogramele prezentate în figurile 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 și 2.24.

Sînt prezentate valorile spațiilor de lucru realizate, vitezele liniare și unghiulare utilizate în cuplele cinematice componente, precum și amplitudinea de extensie a brațului roboților industriali, a translației pe verticală a acestora.

Și, în sfîrșit - dar nu în ultimul rînd - este urmărită precizia de poziționare. Se poate afirma că mai mult de 70% din totalul parc roboți (71,2%, fig.2.25) realizează în funcționare o precizie de poziționare de pînă la ± 1 mm.

2.4. Aprecierea performanțelor roboților industriali

Este evident faptul că performanțele roboților industriali sînt în strînsă corelație cu arhitectura, respectiv structura lanțului cinematic component al mecanismului generator de traiectorie. De aceea, alegerea celei mai adecvate structuri (variante optimă) este o problemă cardinală încă în faza de proiectare a acesteia.

Este necesar să se cunoască, în primul rînd, scopul (sau scopurile) în care este concepută o asemenea structură.

Subcapitolul 2.2 a prezentat multitudinea de posibilități de realizare a structurilor mecanice ale roboților industriali.

Pe baza analizei acestor variante constructive existente, se pot realiza o serie de corelații între aspectele constructive ale lanțurilor cinematice și evident, performanțele obținute de acestea. Cînd se pronunță cuvîntul performanță se înțelege, fie acoperirea unui spațiu de lucru impus ca formă și dimensiuni, fie realizarea unei precizii de poziționare a unui punct caracteristic, fie asigurarea unei traiectorii date, fie parcurgerea unor traiectorii în timpi minimi sau cu accelerații minime etc. etc.

În ceea ce privește spațiul de lucru al roboților industriali, respectiv corelația între forma acestuia și tipul lanțului cinematic din construcția mecanismului generator de traiectorie, aceasta este prezentată în tabelul 2.7 /K8/.

Tabelul 2.7

Forma spațiului de lucru	Paralelipipedic	Cilindric	Sferic	Compus
Tipul R.I. (2.2)	C; CD; PO;	C; P; CD;	BA; T;	CA; LI

Tot în lucrarea /K8/ se propun o serie de coeficienți globali de calitate, pe baza cărora se pot face aprecieri cu privire, la unele din performanțele enumerate anterior.

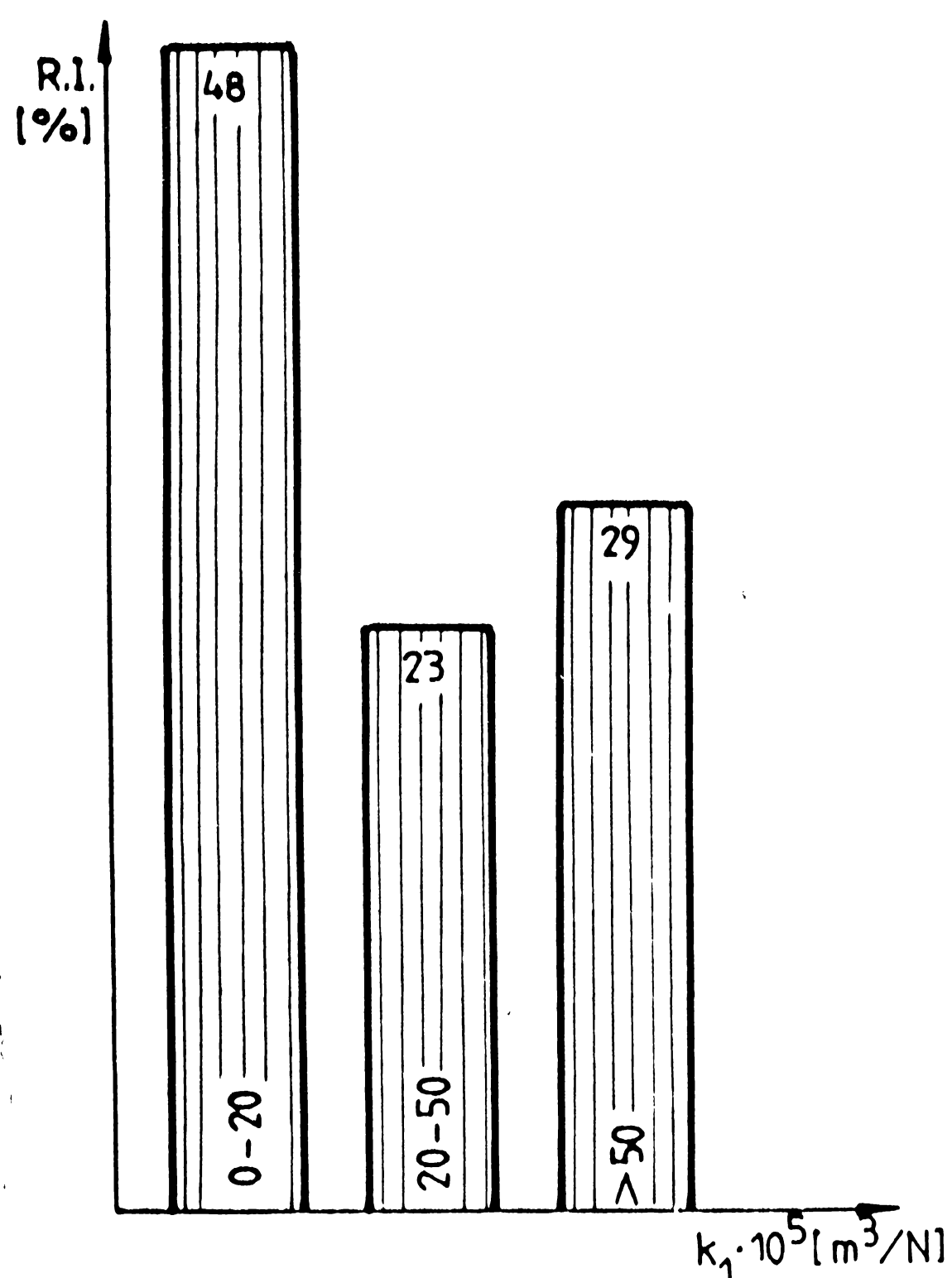
Astfel, coeficientul notat cu k_1 reprezentat de următorul raport :

$$k_1 = \frac{\text{Volumul spațiului de lucru [m}^3\text{]}}{\text{Greutatea de serviciu a R.I. [N]}} \quad (2.1)$$

caracterizează R.I. din punct de vedere al eficienței sale de intervenție în mediul industrial, precum și suplețea acestuia.

Prin greutate de serviciu se înțelege greutatea totală a R.I. în condiții de funcționare.

Valori ridicate ale acestui coeficient corespund unor roboți supli, cu eficiență de intervenție mare. După cum se observă din



histograma prezentată în figura 2.26, aproape jumătate (48%) din roboții industriali existenți prezintă valoarea coeficientului k_1 pînă la valoarea $20 \cdot 10^{-5}$ [m³/N]. Restul de 52% dintre R.I. prezintă $k_1 > 20 \cdot 10^{-5}$ [m³/N], deci o suplețe bună.

De remarcă că histograma prezentată este globală și nu ține seama de tipul acționării roboților (electrică, hidraulică, pneumatică).

Desigur că pe tipuri de acționări, există alte proporții în ceea ce privește suplețea roboților industriali.

Cel de al doilea coeficient global de calitate este notat cu

k_2 și este reprezentat de raportul :

$$k_2 = \frac{\text{Greutatea obiectului manipulat [N]}}{\text{Greutatea de serviciu [N]}} \quad (2.2)$$

După cum se observă, k_2 reprezintă un coeficient specific al capacității gravitaționale de manipulare.

Din figura 2.27 se remarcă faptul că există o tendință de creștere a coeficientului k_2 cu spațiul de lucru, valoarea acestu-

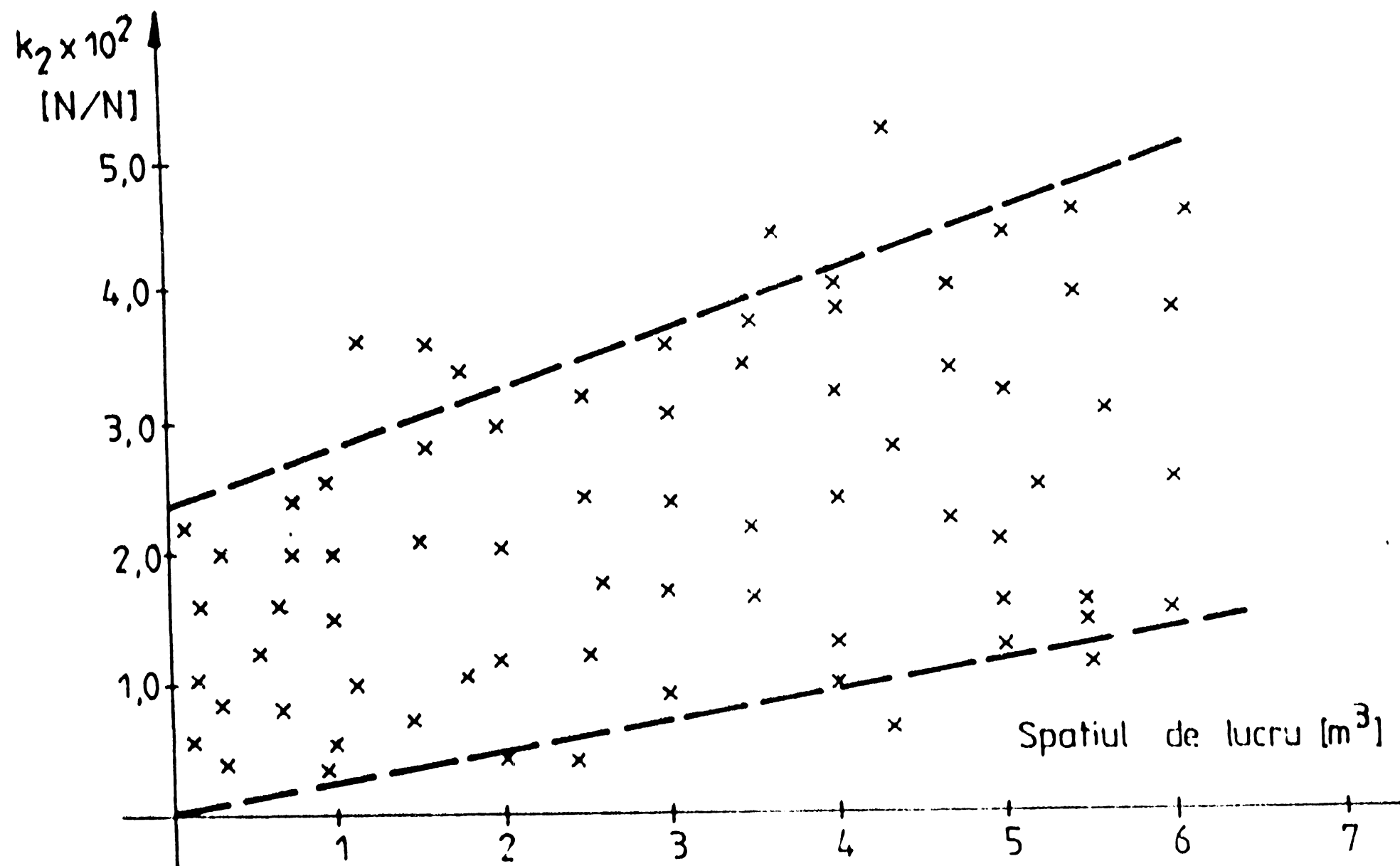


Fig.27

ia situându-se într-un domeniu marcat de cele două linii înterupte

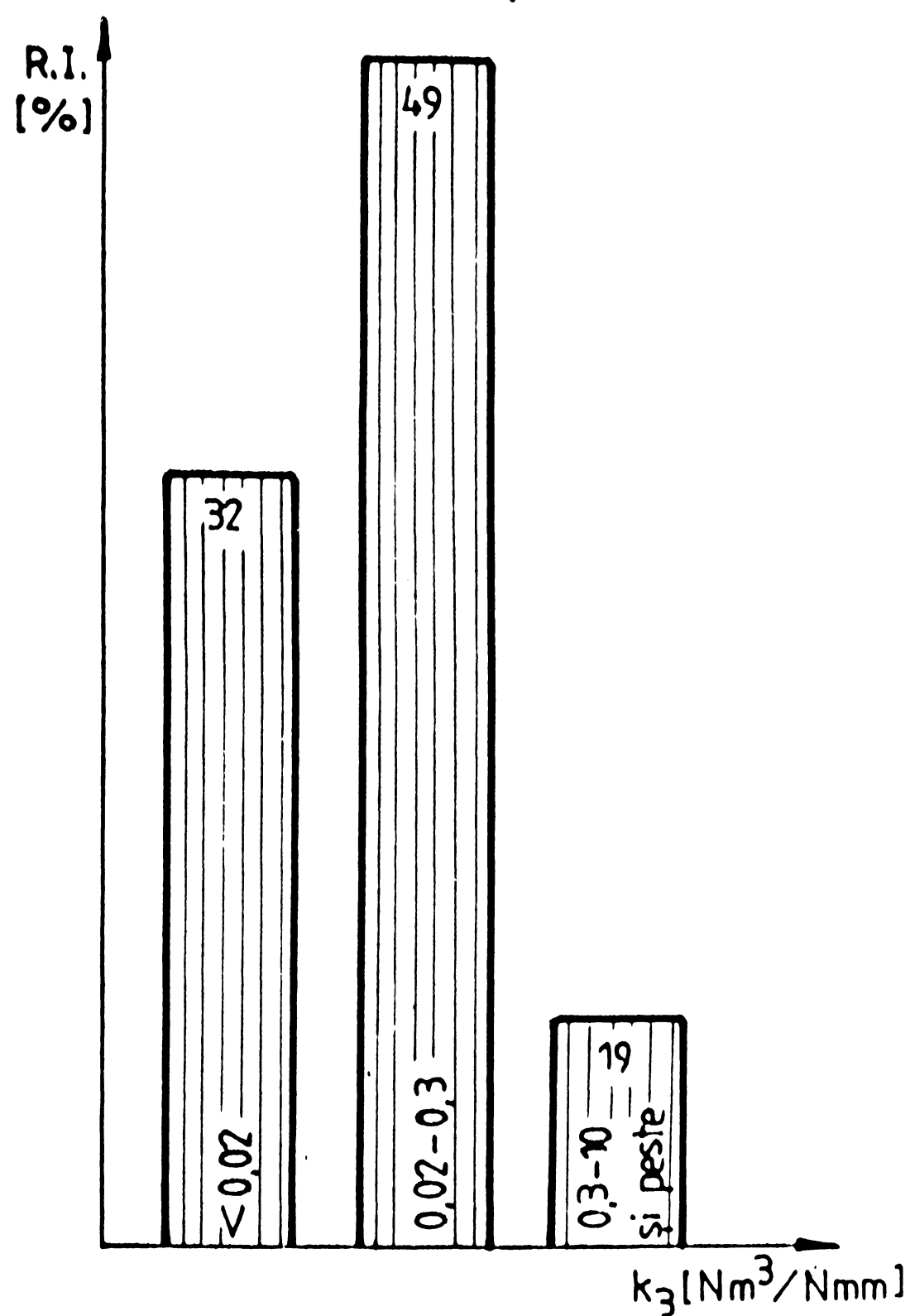


Fig.2.28

Cel de al 3-lea coeficient global de calitate - notat cu k_3 - este reprezentat prin produsul de rapoarte :

$$k_3 = \frac{\text{Vol. spatiului de lucru [m}^3\text{]}}{\text{Greut. serv. a R.I. [N]}}$$

$$\cdot \frac{\text{Greut. obiect. manipulat [N]}}{\text{Precizia de poziționare [mm]}}$$

k_3 este un coeficient global, care caracterizează calitățile tehnice ale roboților industriali.

Se remarcă faptul că și în cazul acestui coeficient există o direct proporționalitate între valoarea sa și performanțele tehnice ale robotului industrial. În figura 2.28 se observă valori

ridicate ale lui k_3 pentru aproximativ 19% din totalul roboților

industriali examinați.

Circa jumătate din roboții examinați (49%) prezintă valori ale lui k_3 destul de bune ($> 0,02$).

Toți cei trei coeficienți k_1 , k_2 și k_3 conțin în structura lor, greutatea de serviciu (greutatea R.I. în stare de funcționare). Aceasta, așa cum se cunoaște, diferă de la un tip de acționare la altul. Figura 2.29 delimitează aproximativ domeniile

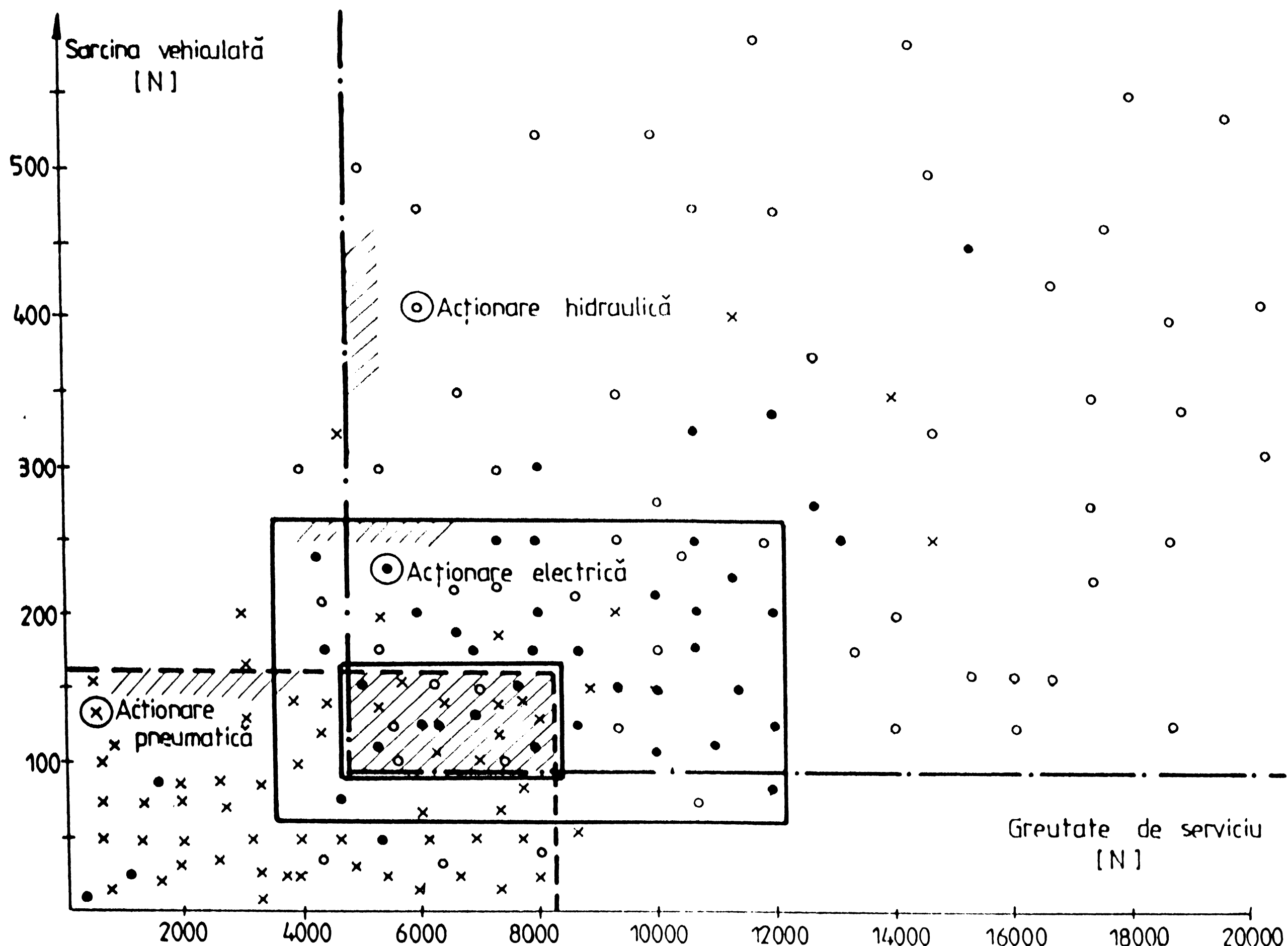


Fig.2.29

în care, o anumită greutate de serviciu răspunde la sarcina vehiculată.

Cei mai "grii" roboți industriali sînt cei cu acționare hidraulică, dar sînt preferați cînd este vorba de a vehicula sarcini mari. Se remarcă un domeniu comun pentru toate cele trei tipuri de acționări, cînd pentru alegerea tipului de acționare se au în vedere factori de altă natură.

Capitolul 3

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL ANALIZEI STRUCTURALE, CINEMATICE, CINETOSTATICE ȘI DINAMICE A ME- CANISMELOR GENERATOARE DE TRAIECTORIE

3.1. Generalități. Definiții

Parcurgînd definițiile enunțate în capitolul 1 al prezentei lucrări, se constată de fiecare dată, prezența unei structuri mecanice a robotului industrial (SISTEM MECANIC).

Sistemul mecanic, a cărui componență este prezentată în figura 3.1, are rolul de a deplasa un obiect considerat solidar cu

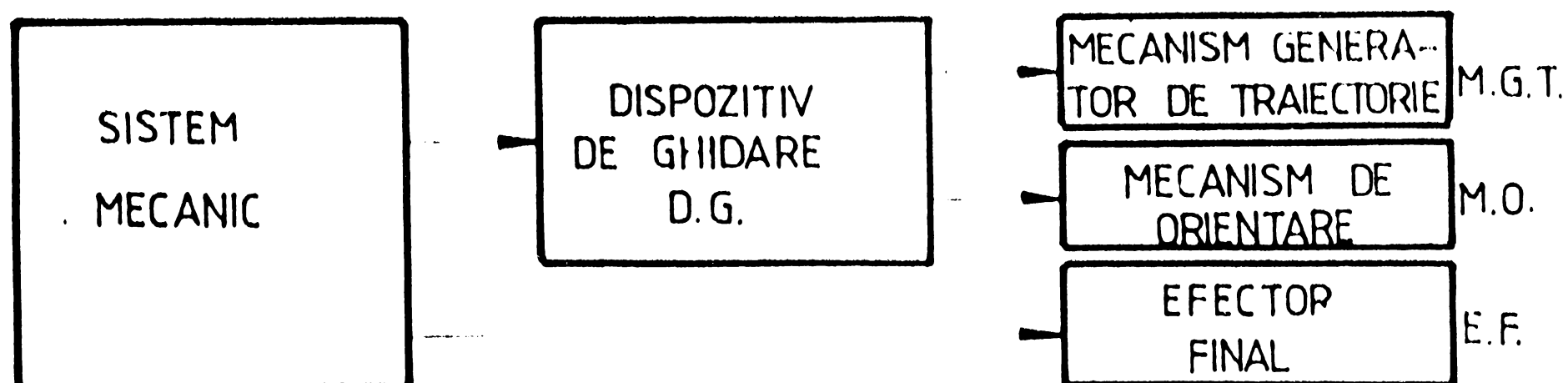


Fig.3.1

un element al său dintr-o poziție inițială (START), într-o poziție finală (TINTA).

Operația de deplasare este realizată de către componenta denumită : "dispozitiv de ghidare" - D.G.

Deplasarea aceasta poate fi divizată în două faze distincte și anume :

- o fază de deplasare pe o traiectorie impusă a unui punct oarecare din obiectul manipulat (punct caracteristic), de la poziția inițială la cea finală. Geometric aceasta înseamnă modificarea celor trei coordonate ale punctului caracteristic.

Componenta dispozitivului de ghidare, care realizează acest lucru, poartă denumirea de MECANISM GENERATOR DE TRAIECTORIE (MGT);

- o fază de orientare, în cadrul căreia o dreaptă din obiectul manipulat (dreapta caracteristică) și una perpendiculară pe

ea (dreaptă auxiliară), sînt orientate după direcții care corespund cerințelor impuse de poziția finală a obiectului. Geometric, aceasta înseamnă modificarea celor trei unghiuri ale lui Euler, care definesc poziția dreptei caracteristice. Componenta dispozitivului de ghidare, care realizează această operațiune, poartă denumirea de MECANISM DE ORIENTARE (MO).

În figura 3.2 este prezentat sistemul mecanic al unui robot industrial. Sînt puse în evidență componentele acestuia.

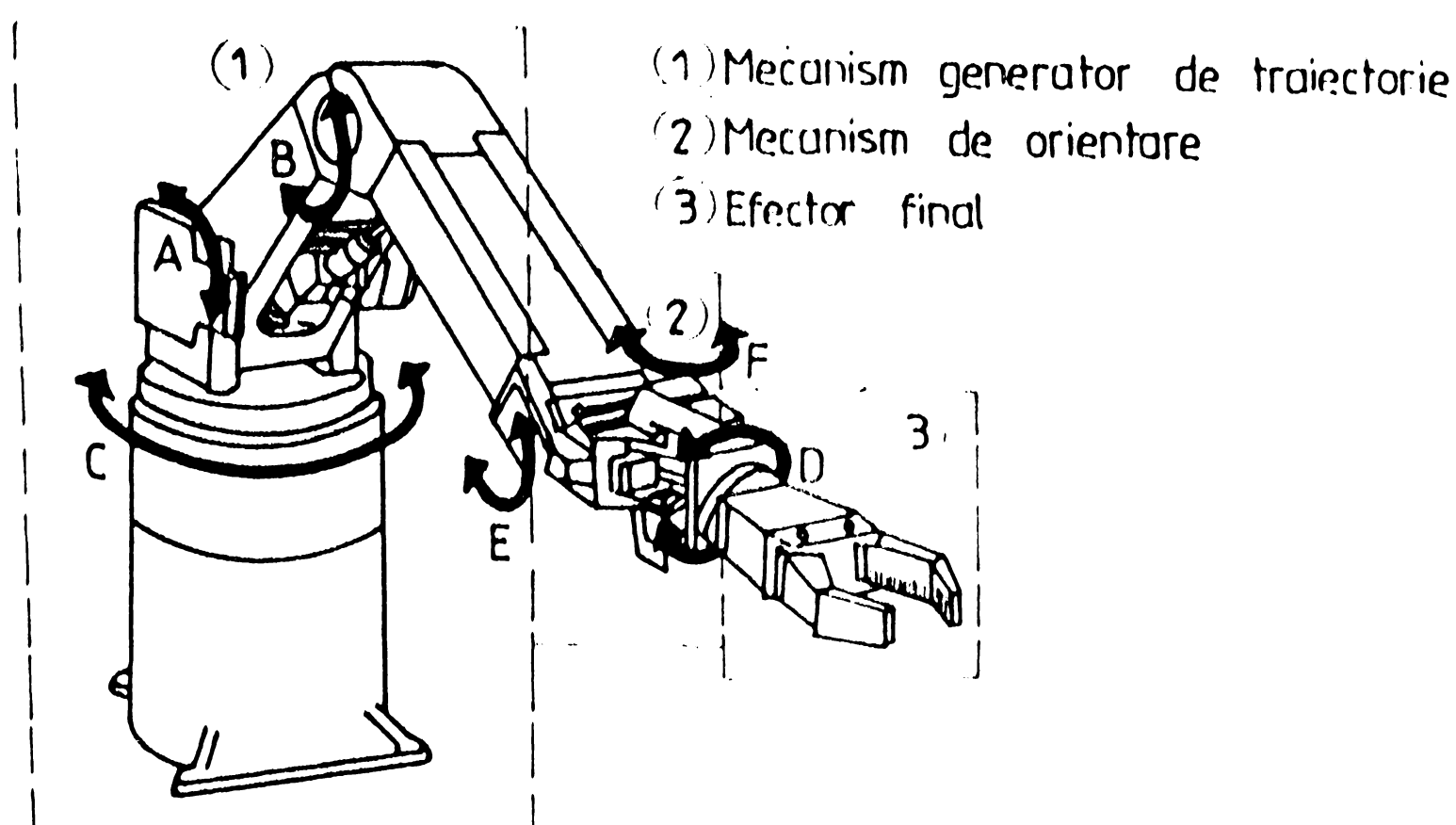


Fig.3.2

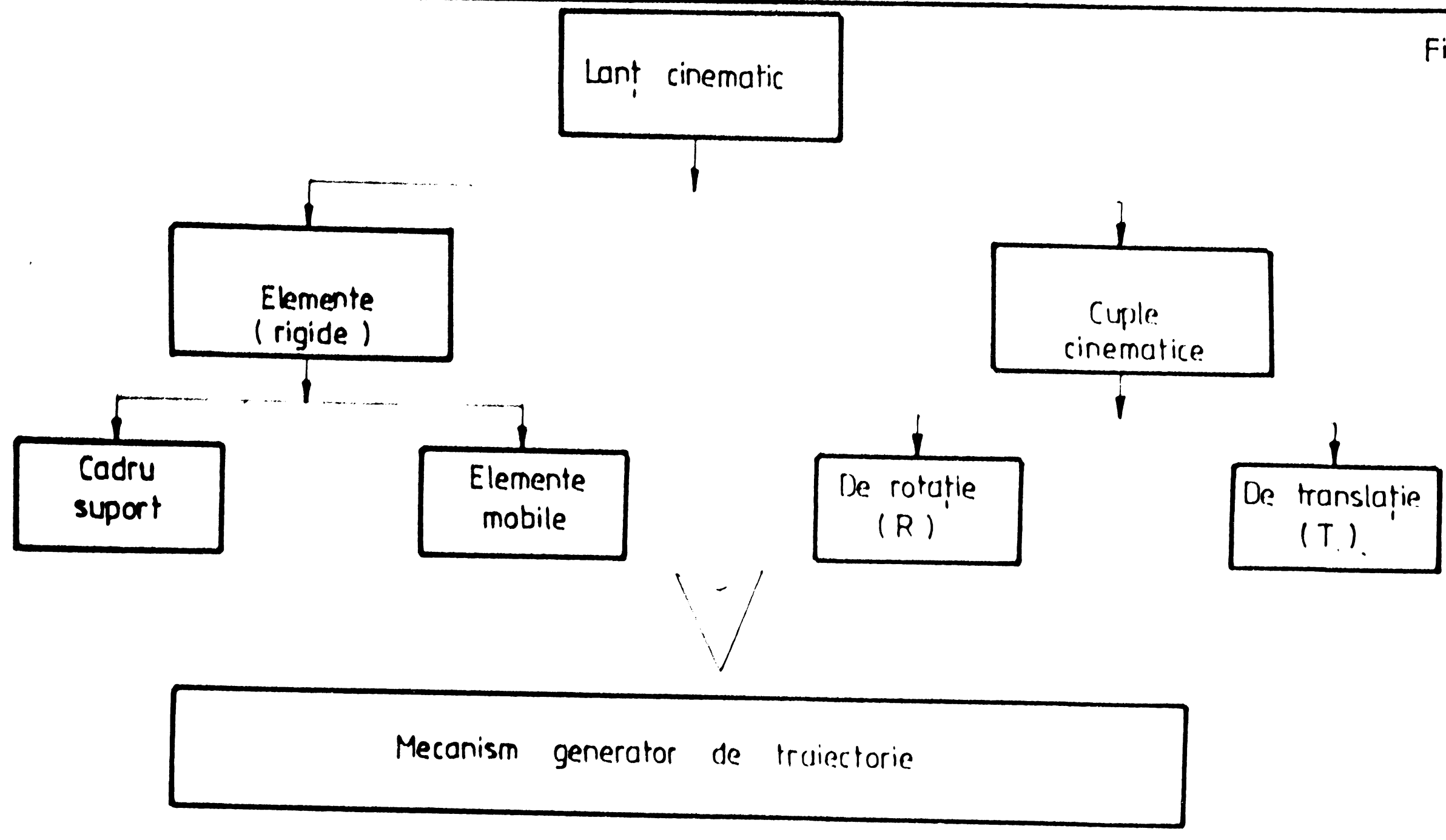
Dată fiind importanța și rolul deosebit, pe care-l joacă mecanismul generator de traiectorie al roboților industriali, i se va acorda o atenție sporită în cadrul lucrării de față. Desigur că acesta nu poate fi studiat decât în contextul general al structurii robotului industrial : sistem mecanic - sistem de acționare - sistem de comandă.

Indicarea utilității acestor mecanisme pentru satisfacerea unor cerințe concrete de lucru, se face pe baza analizei spațiului de lucru aferent.

Se definește : SPATIU DE LUCRU al unui mecanism generator de traiectorie, mulțimea pozițiilor pe care le poate ocupa punctul caracteristic /K_B/.

Spațiile de lucru obținute, pot fi : liniare, plane sau spațiale. Natura și forma acestora depind de structura și dimensiunile schemei cinematice ale mecanismului generator de traiectorie.

Fig. 3.3



Nr. crt.	Nr. cuple cinematice	Nr. elemente	Grad de mobilitate	Schema cinematică (și spațiul de lucru)			
1	1	2	1				
2	2	3	2				
3	3	4	3				

In figura 3.3 se prezintă schemele cinematice ale unor mecanisme generatoare de traiectorie, împreună cu spațiile aferente.

3.2. Stadiul actual în domeniul analizei și sintezei structurale a mecanismelor

Analiza structurală a mecanismelor urmărește determinarea schemei structurale a acestora, deci a numărului de elemente, numărului și clasei cuplelor cinematice și modul cum acestea se assemblează într-un tot cu mișcare determinată a elementelor, adică într-un mecanism desmodrom /P12/.

Această structură cinematică va trebui, prin urmare, să fie capabilă să vehiculeze dintr-un punct al spațiului într-altul, mișcare și respectiv energie mecanică primită de la un sistem exterior și transferată altui sistem exterior.

Astfel, dacă se impune starea de mișcare a elementului sau elementelor conduse, precum și starea de mișcare a elementului sau elementelor conducătoare (funcție de natura sursei de energie mecanică, care acționează mecanismul), se pune problema determinării lanțului cinematic, cel mai simplu, capabil să coreleze mișcările acestor elemente prin interpunerea între ele. Problema este puțin mai complexă, în sensul că rezolvarea dorită nu poate evita un studiu de optimizare al variantelor posibile, care rezultă din condițiile impuse.

Din cele expuse, se remarcă o interdependență între analiza structurală a mecanismelor și sinteza acestora, fiind vorba - în ambele cazuri - de stabilirea compoziției mecanismelor din elemente și cuple cinematice, al căror număr este corelat corespunzător, precum și schemele posibile ale acestora.

Dispozitivul de ghidare din componența structurii mecanice a unui manipulator sau robot industrial, este un mecanism poliarticulat (fig.3.4) format din ;

- elemente S_i ; corpuri solide considerate rigide, susceptibile de mișcări în raport cu suportul,

- cuple cinematice A_i ; sisteme de legături bilaterale limitând posibilitățile de mișcare relativă între elementele adiacente.

Cel puțin unul dintre elemente este articulat pe suportul S_0 , lanțul cinematic purtînd pe unul din elemente S_n , element terminal, mecanismul de prehensiune.

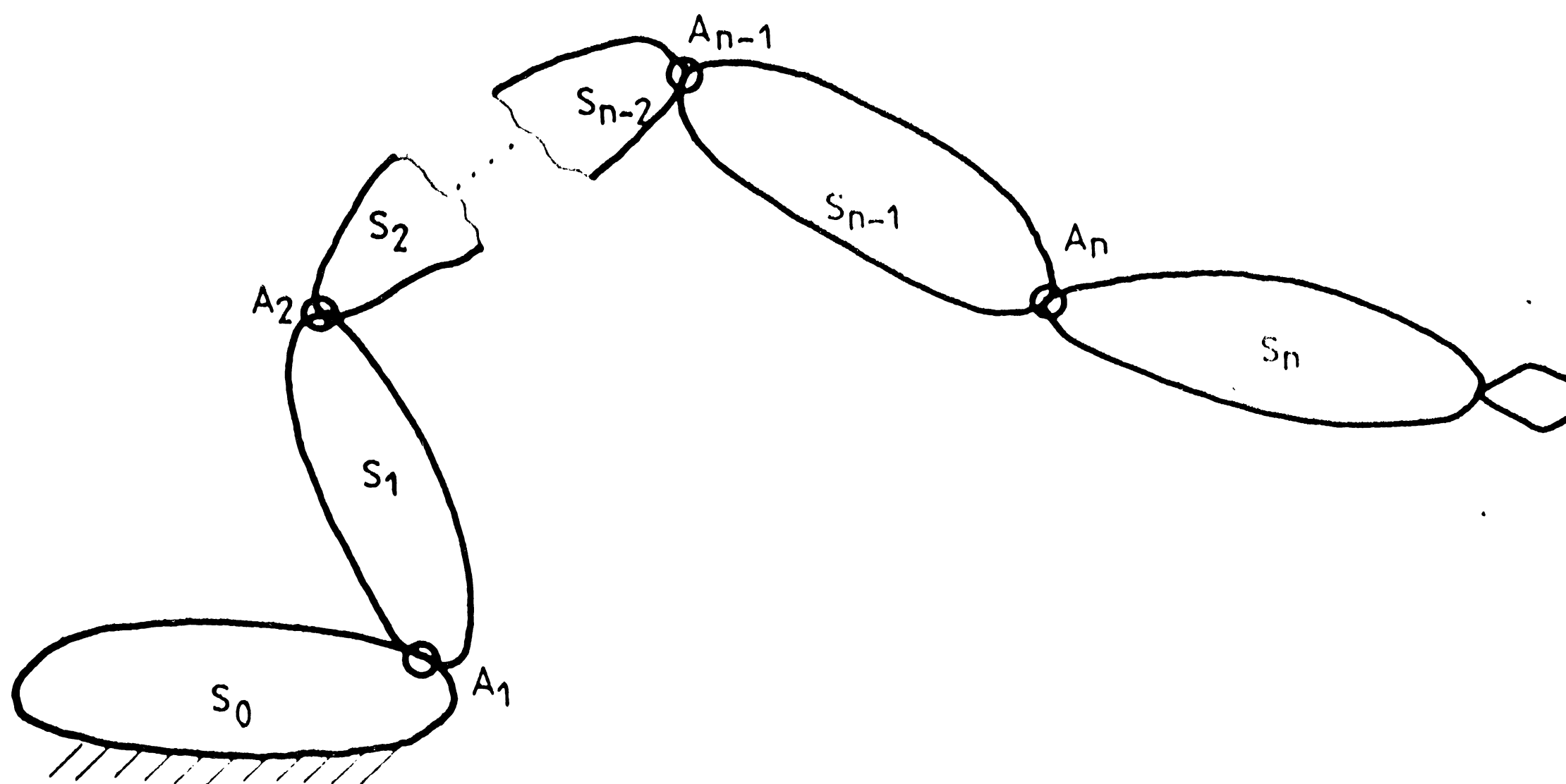


Fig. 3.4

Rolul lanțului cinematic este de a deplasa efectatorul final (elementul terminal al lanțului) și odată cu el obiectul manipulat. Prin urmare, el trebuie să asigure elementului terminal posibilități de deplasare și orientare, în așa fel, încât obiectul manipulat să atingă destinația propusă.

Se știe că un corp liber, în spațiu, posedă 6 grade de libertate, deoarece poziția sa la un moment dat poate fi definită prin 6 parametri independenți (fig. 3.5)

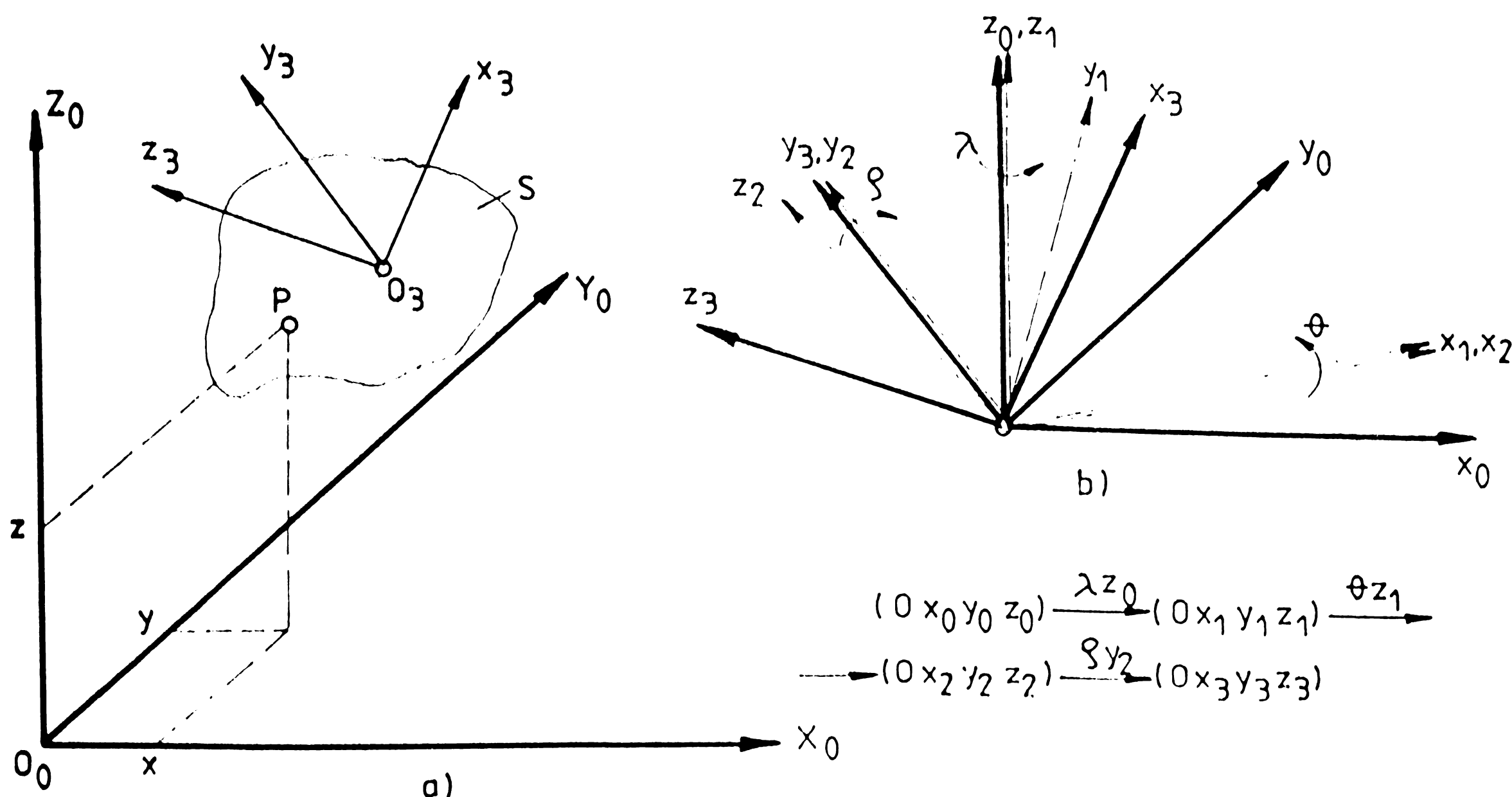


Fig. 3.5

x, y, z - coordonatele unui punct particular P S și
 λ, θ, φ - unghiurile lui Euler.

Desigur că legat bilateral cu alte corpuri (elemente), corpul prezintă un număr de grade $L \leq 6$.

Se cunoaște că structura mecanică a roboților industriali conține - aproape în exclusivitate - cuple cinematice inferioare (de rotație, translație, elicoidale).

Antrenarea lanțului cinematic component al roboților industriali se face de către sistemul de acționare care convertește o energie primară în energie mecanică, producând deplasări liniare sau de rotație în cuplele cinematice.

Diferitele cuple cinematice nu sînt acționate sau acționabile întotdeauna independent. Trebuie avut în vedere că există cazuri diferite, după cum avem de a face cu lanțuri cinematice deschise sau închise.

În cazul unui mecanism cu lanț cinematic deschis, fiecare element S_i este articulată cu un element S_{i-1} și cu unul posterior S_{i+1} ; elementul terminal S_n nu este legat decât de elementul S_{n-1} .

Starea lanțului cinematic este definită de ansamblul de parametri cinematici r_i (rotații) și t_k (translații).

Dacă utilizăm "n" acționări diferite și comandate independent, evoluția stării în timp poate fi descrisă de cele "n" variabile independent constituite.

În figura 3.6 se prezintă un lanț cinematic deschis cu 6 cuple cinematice caracterizate prin matricea

$$A = (r_1, r_2, r_3, t_4, r_5, r_6).T$$

În ecuațiile cinematice ale mecanismului se rețin, pentru cuplele cinematice, câte o singură variabilă cinematică inde-

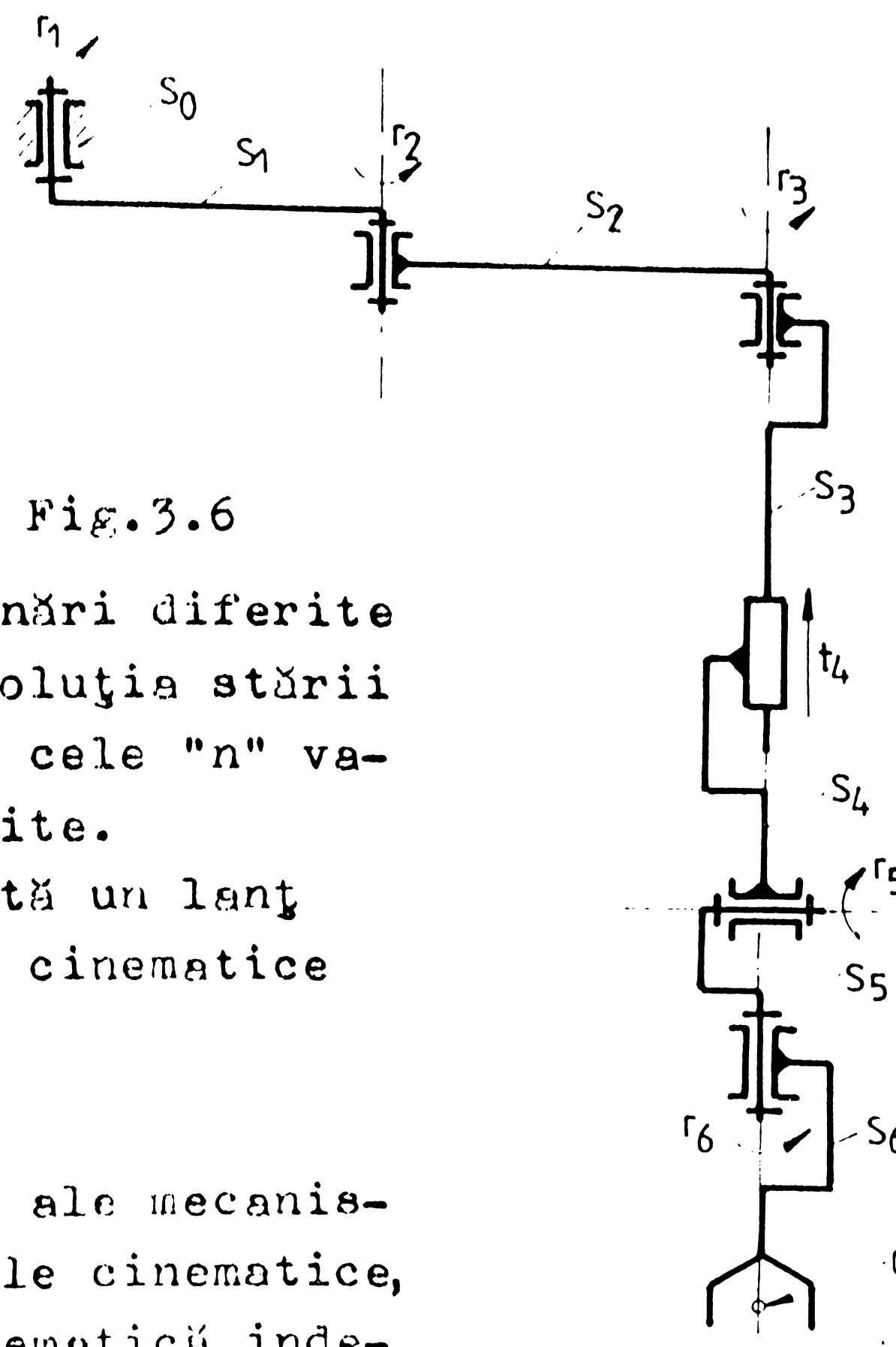


Fig. 3.6

pendentă, în funcție de care se exprimă diferenții parametri cinematici dependenți.

Prin urmare, numărul axelor de legătură (a cuplelor cinematice) nu se confundă întotdeauna cu numărul variabilelor independente "n". Deci, dimensiunea "n" a matricei A nu se identifică întotdeauna cu numărul gradelor de libertate "l" ale elementului terminal S_n . Acest lucru se datorează faptului că fie "n", fie "l", este necesar să aibe valoarea ≤ 6 , sau dacă $n \geq 6$, nu este suficient pentru a obține $l = 6$ (spre exemplu, cazul unor lanțuri cinematice plane cu $l = 3$).

Dacă se notează cu $x = f(A)$, aplicația R^n în R^6 , pozițiile elementului terminal funcție de variabilele independente, numărul gradelor de libertate ale lanțului cinematic este - prin definiție - dimensiunea domeniului $V = f(R^n)$ din R^6 , determinată de posibilitățile de mișcare ale cuplelor cinematice. Această dimensiune se definește pornind de la considerații locale, în jurul unei situații oarecare notată cu A^* . Variația dx se poate exprima :

$$dx = F_A(A^*) \cdot dA \quad (3.1)$$

unde : $F_A(A^*)$ reprezintă iacobianul lui f de dimensiune $6 \times n$:

$$F_{ij}(A) = \frac{\partial f_i}{\partial a_j} (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3.2)$$

Dacă se notează cu $x_1(A^*), x_2(A^*), \dots, x_n(A^*)$, cele "n" coloane ale matricei $F_A(A^*)$ mai pot fi scrise :

$$dx = \sum_{j=1}^n da_j x_j(A^*) \quad (3.3)$$

Notînd cu "p" rangul matricei $F_A(A^*)$, acesta fiind deci și dimensiunea maximă a determinanților nonuli ce se pot scrie, putem analiza următoarele situații :

a) $p = 6$; în acest caz, scalarii da_j fiind distincți, combinația liniară (3.3) dă naștere unui domeniu de dimensiune 6;

b) $p < 6$; cu $n \geq 6$, rangul maximal pentru $F_A(A^*)$ este 6.

Situația $p < 6 \leq n$ corespunde unei degenerescențe de la cazul general.

c) $p < 6$ cu $n < 6$; în această situație, rangul maximal pentru matricea $F_A(A^*)$ este n.

Valoarea maximă a lui p, respectiv p_{max} , constituie deci dimensiunile domeniului V, care furnizează în întregime totalitatea

posibilităților de mișcare a lanțului cinematic, cu alte cuvinte, numărul gradelor de libertate ale acestuia : $l = P_{\max}$.

In cazul lanțurilor cinematice închise (fig.3.7), cuplele cinematice implicate sînt structural dependente.

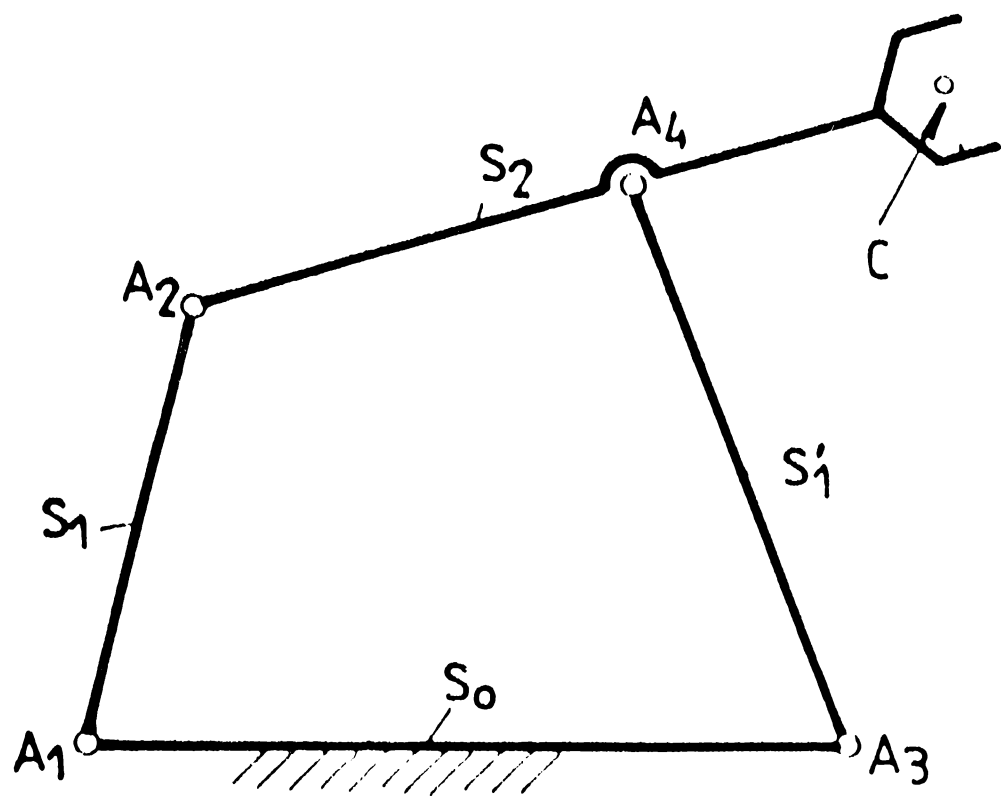


Fig.3.7

In aceste situații este necesară determinarea unui ansamblu maximal "n" de parametri cinematici independenți și exprimarea celor "q" parametri, care definesc mișcarea celorlalte cuple cinematice.

Dacă acceptăm o matrice A de dimensiune "n+q", aplicației $X = f(A)$ pe R^n i se mai adaugă una de forma : $Xq = g(A)$.

In jurul unei situații oarecare, notată cu A^* , putem scrie variațiile :

$$\begin{aligned} dX &= F_A(A^*) \cdot dA \\ dXq &= G_A(A^*) \cdot dA \end{aligned} \quad (3.4)$$

Independența restricțiilor se traduce, în realitate, pentru situația cînd rangul $G_A = q$. In aceste condiții, deplasările cuplelor cinematice dA , aparțin unui subspațiu W de dimensiune n din R^{n+q} .

Cele "q" coloane ale lui G_A sînt termeni liniari independenți, care dau naștere unui subspațiu W din R^{n+q} .

Fie H o matrice (n+q)xn, a cărei coloane z_k formează o bază în subspațiul W. Putem scrie că variația dA este o combinație liniară de z_k :

$$dA = \sum_{k=1}^n db_k \cdot z_k \quad (3.5)$$

sau :

$$dA = H(A^*) \cdot dB \quad (3.6)$$

unde :

$$dB = (db_1, db_2, db_3, \dots, db_n)^T \in W \quad (3.7)$$

Cele n componente ale lui dB sînt independente.

Deducem că :

$$dX = F_A(A^*) \cdot H(A^*) \cdot dB \quad (3.8)$$

Dacă dB descrie subspațiul W , dX descrie un domeniu de dimensiune :

$$p = \text{Rang} [F_A(A^*) \cdot H(A^*)] \leq (6, n) \quad (3.9)$$

Valoarea maximă a lui "p" definește, în acest caz, dimensiunea "l" a domeniului $V \in R^6$, determinat de mișcările independente ale articulațiilor - sau altfel spus - numărul gradelor de libertate ale lanțului cinematic considerat. Aceste chestiuni teoretice permit punerea corectă a problemei sintezei lanțurilor cinematice ale M.G.T.

Pentru un lanț cinematic, o suprafață din spațiul de lucru poate fi generată de un ansamblu de traiectorii în R^6 și o familie de suprafețe de un domeniu V din R^6 . Această familie de suprafețe va putea fi realizată de un lanț cinematic cu "l" grade de libertate, dacă putem determina cel puțin o morfologie unde parametri cinematici independenți pot da naștere unui domeniu V din R^6 .

3.3. Analiza cinematică a lanțurilor cinematice din componenta M.G.T.

3.3.1. Analiză pozițională

3.3.1.1. Matrici de transformare. Problema geometrică directă

În cadrul acestei problematice, se determină parametri poziționali ai elementului terminal (efectorul final) al lanțului cinematic component al M.G.T.

Cu alte cuvinte spus, se pune problema determinării vectorului de poziție al punctului caracteristic (P.C.). În literatură, se prezintă diferite metode de abordare a acestei probleme, uzând de un spectru larg de limbaje matematice /A4/, /C1/, /D5/, /H7/, /H8/, /I6/, /K8/, /K10/, /M3/, /P4/, /R3/, /S12/ etc.

Vom prezenta în continuare, cazul unor M.G.T. compuse din lanțuri cinematice deschise, cuprinzând numai cuple cinematice inferioare (rotații, translații).

Orice mecanism spațial cu bare, constituit pe baza cuplelor cinematice de clase diferite, poate fi transformat în situația de mai sus, considerând că avem de a face cu un mecanism echivalent numai cu cuple cinematice de clasa V-a, adăugându-se mecanismului

in schimb, un număr suplimentar de bare.

Oricum, așa cum s-a menționat, M.G.T. sînt în general compuse numai cu cuple inferioare.

Fiecărui element n_i al lanțului cinematic i se poate asocia un sistem cartezian triortogonal drept $O_i x_i y_i z_i$ convenabil ales,

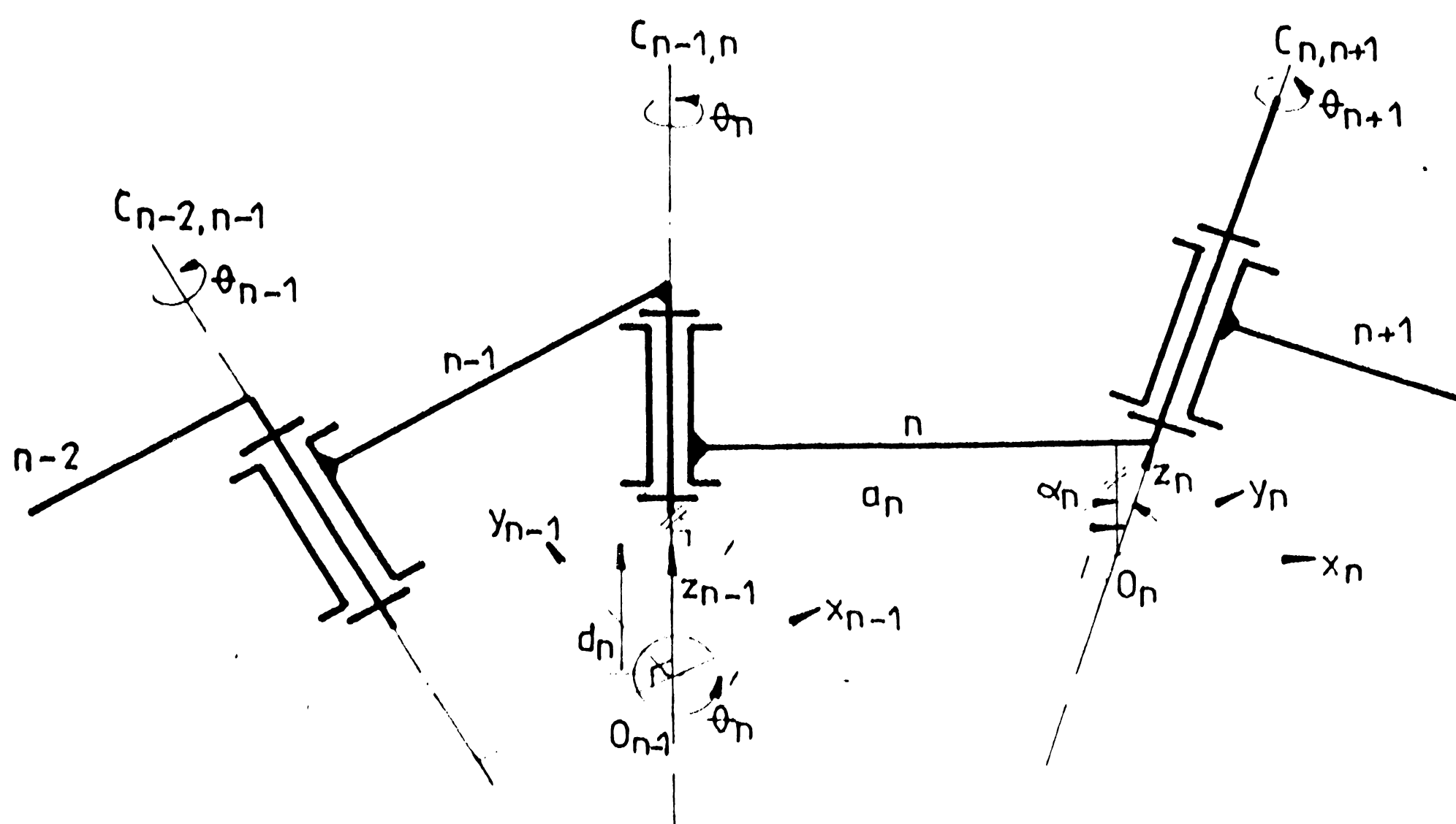


Fig.3.8

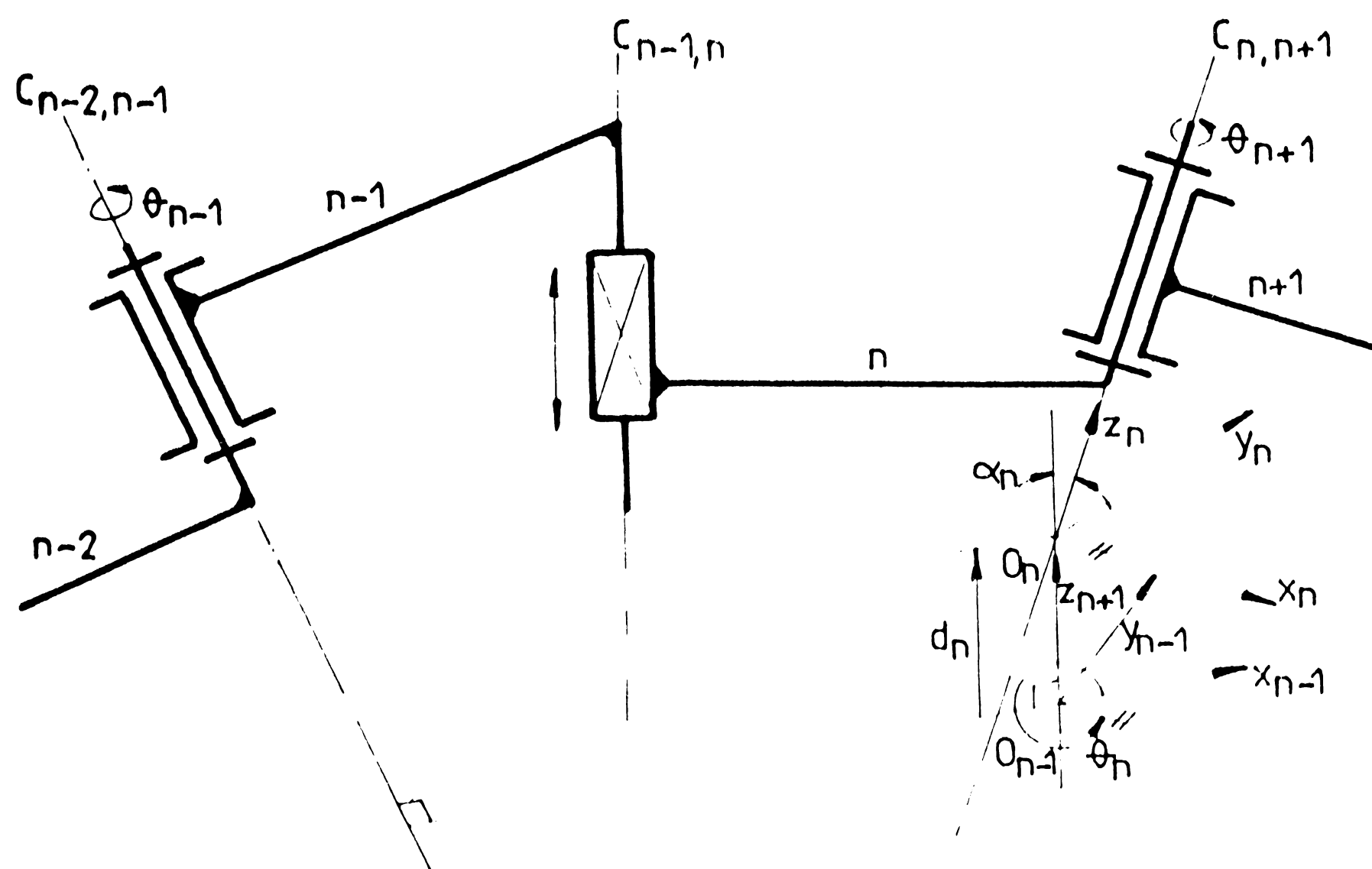


Fig.3.9

după criterii care urmăresc simplificarea la maximum a ecuațiilor de legătură stabilite cu ajutorul acestei metode /H7/, /C1/.

Criteriul Hartenberg-Denavit, care urmărește dezideratul e-

nunțat, propune alegerea sistemelor de coordonate în modul prezentat în figurile 3.8 și 3.9.

Se remarcă faptul că sistemele de referință legate de elemente, se aleg de așa manieră ca originile lor să se găsească în punctele care constituie picioarele perpendiculalelor comune ale axelor cuplelor cinematice. Axele Ox sînt coincidente cu perpendicularele comune ale axelor cuplelor cinematice, sensurile pozitive fiind de la axa elementului cu indice mai mic spre axa elementului cu indice mai mare. Axele Oz sînt coincidente cu axele cuplelor cinematice, iar axa Oy dirijată în conformitate cu regulile de formare ale unui triedru dextru.

În aceste condiții trecerea de la sistemul de referință cu originea în punctul O_{n-1} la cel cu originea în O_n , se realizează prin translația în lungul axei $O_{n-1}z_{n-1}$ cu segmentul d_n și în lungul axei O_nx_n cu segmentul a_n . Aceste translații se cuplează cu rotațiile cu unghiul θ_n în jurul axei $O_{n-1}z_{n-1}$ și cu unghiul α_n în jurul axei O_nx_n .

Astfel se poate determina matricea de transformare cu următoarea componență :

$$A_n = \text{Rot}(z, \theta_n) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_n) \cdot \text{Trans}(a_n, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_n) \quad (3.10)$$

Prin urmare :

$$A_n = \begin{vmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n & 0 & 0 \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_n & -\sin\alpha_n & 0 \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

Efectuînd operații se obține :

$$A_n = \begin{vmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.12)$$

Urmărind același raționament, pentru situația prezentată în figura 3.9 se obține matricea de transformare sub forma :

$$A_n = \begin{vmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & 0 \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & 0 \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.13)$$

Se poate concluziona că trecerea dintr-un sistem de referință legat de elementul "j" al lanțului cinematic, în alt sistem de referință legat de elementul "i" al aceluiași lanț, se face prin matricea de transformare de forma :

$${}^i T_j = \prod_{n=i+1}^j A_n; \quad {}^i T_j = A_{i+1} \cdot A_{i+2} \cdot \dots \cdot A_{j-1} \cdot A_j \quad (3.14)$$

sau, în cazul general, trecerea dintr-un sistem de referință legat de un element "j" al lanțului cinematic în sistemul de referință legat de elementul fix (suportul robotului), se face prin matricea de transformare de forma :

$${}^0 T_j = \prod_{n=1}^j A_n \quad (3.15)$$

Prin trecerea succesivă de la un sistem de referință la următorul, pornind de la elementul fix la efectorul final, solidarizat cu obiectul manipulat, respectiv cu elementul "n" al lanțului cinematic, se obține matricea de transformare liniară :

$${}^0 T_n = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dots \cdot A_{i-1} \cdot A_i \cdot \dots \cdot A_{n-1} \cdot A_n \quad (3.16)$$

Astfel, pentru M.G.T., al cărui lanț cinematic este prezentat în figura 3.10, se pot scrie matrici de transformare dintr-un sistem de referință în altul, respectiv între orice sisteme de referință ale M.G.T.

Vectorul de poziție al punctului caracteristic M, aparținând elementului 6, poate fi scris în raport cu sistemul de referință legat de suportul M.G.T. (elementul fix).

$$\bar{r}_{M_{60}} = {}^0 T_6 \cdot \bar{r}_{M_{66}} \quad (3.17)$$

unde :

$${}^0 T_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \quad (3.18)$$

Ansamblul de transformări (3.15), (3.16) poate fi exprimat simplificat, sub forma grafului din figura 3.11.

Matricile A_n ($n = 1 + 6$) se obțin concret prin înlocuirea în relațiile (3.12), (3.13) a parametrilor cuplelor cinematice ale lan-

țului cinematic.

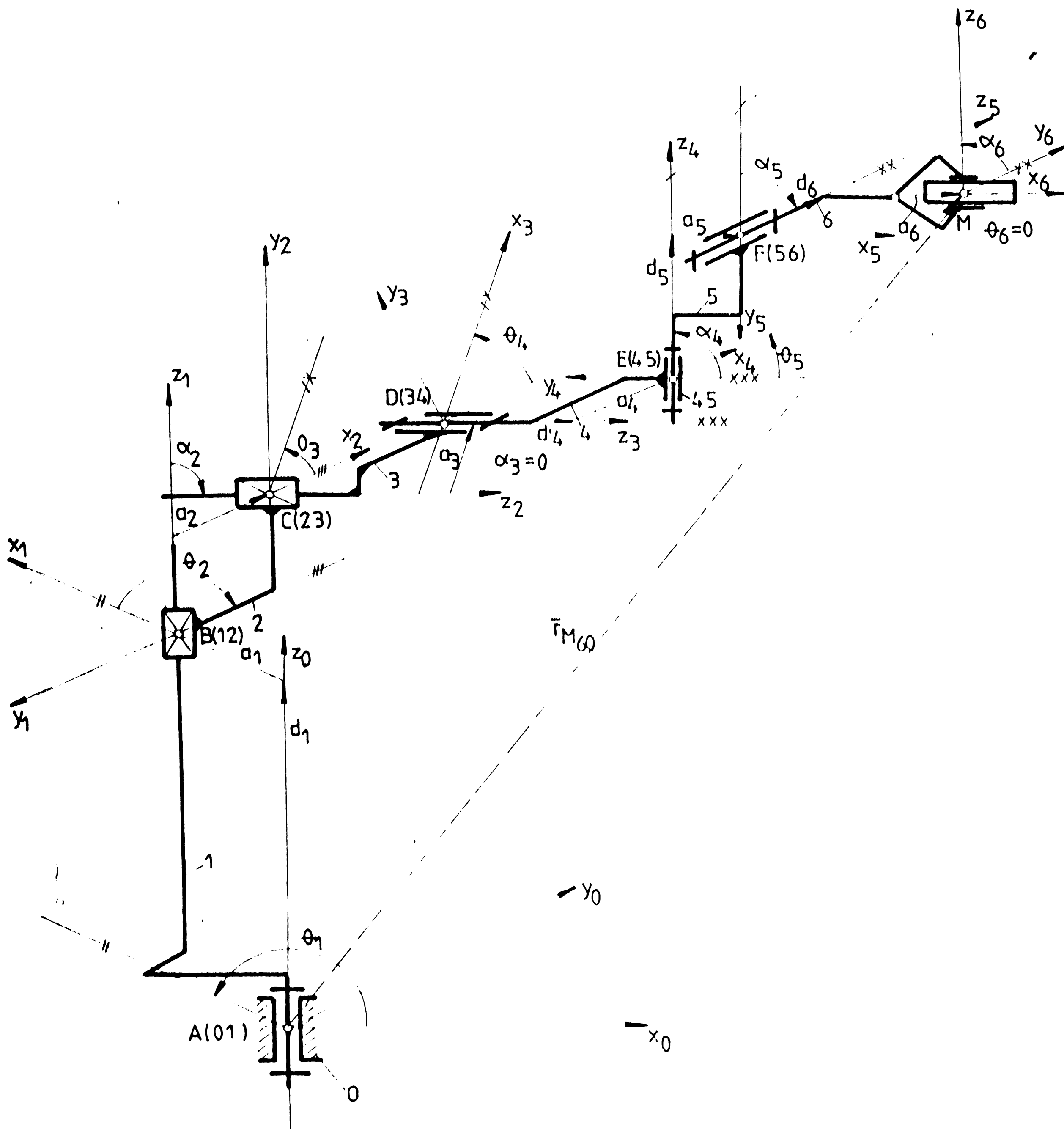


Fig. 3.10

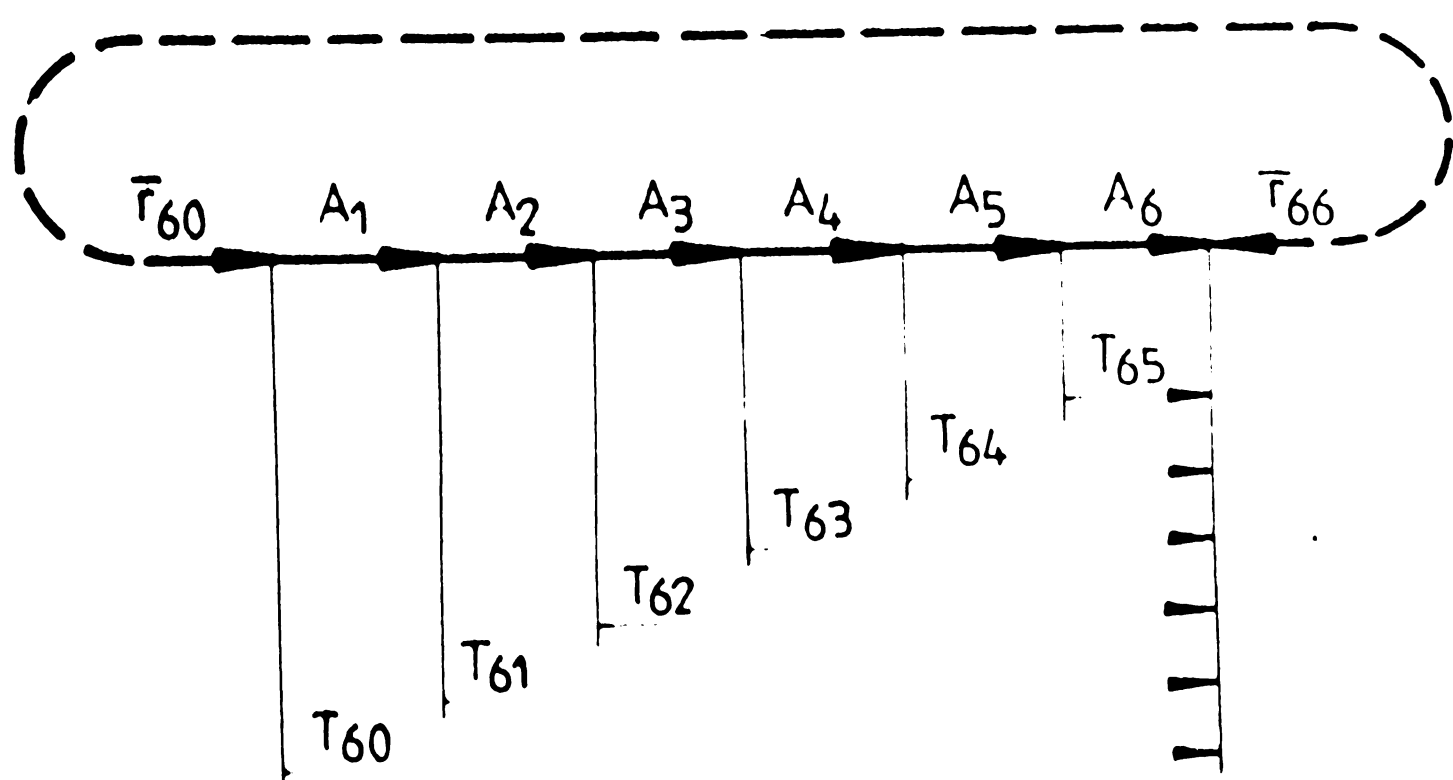


Fig. 3.11

In ceea ce privesc termenii matricilor de transformare de tip (3.14), (3.15), (3.16), aceștia sînt dependenți de parametri de poziție ai cuplelor cinematice conducătoare, respectiv de coordonatele genera-

lizate $q_n = q_n(t)$, $n = 1, 2, 3, \dots, j$. Coordonatele generalizate, fiind funcții de timp, matricea de transformare 0T_j se poate scrie :

$${}^0T_j = \begin{vmatrix} f_{11}^{0j} & f_{12}^{0j} & f_{13}^{0j} & f_{14}^{0j} \\ f_{21}^{0j} & f_{22}^{0j} & f_{23}^{0j} & f_{24}^{0j} \\ f_{31}^{0j} & f_{32}^{0j} & f_{33}^{0j} & f_{34}^{0j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.19)$$

cu elementele :

$$f_{pr}^{0j} = f_{pr}^{0j}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_j) \quad (3.20)$$

$$p = 1, 2, 3; \quad r = 1, 2, 3, 4$$

Pe de altă parte, matricea de transformare (3.15) poate fi divizată în submatrici cu semnificații distincte :

$${}^0T_j = \left| \begin{array}{c|c} \begin{array}{c} \text{Matricea de} \\ \text{orientare} \\ (3 \times 3) \end{array} & \begin{array}{c} \text{Matricea de} \\ \text{poziționare} \\ (3 \times 1) \end{array} \\ \hline \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \end{array} \end{array} \right| \quad (3.21)$$

sau :

$${}^0T_j = \left| \begin{array}{c|c} \bar{R} & \bar{P} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right| \quad (3.21')$$

Dacă versorii sistemului de axe, legat de efectorul final,

au direcțiile prezentate în figura 3.12 (\bar{a} - versorul de apropiere, \bar{o} - versorul de orientare și $\bar{n} = \bar{o} \times \bar{a}$), iar \bar{p} vectorul de poziție al originii sistemului de axe, respectiv matricea de transformare 0T_j mai poate fi scrisă și sub forma :

$${}^0T_j = \left| \begin{array}{c|c} \begin{array}{ccc} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{array} & \begin{array}{c} p_x \\ p_y \\ p_z \end{array} \\ \hline \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \end{array} \end{array} \right| \quad (3.22)$$

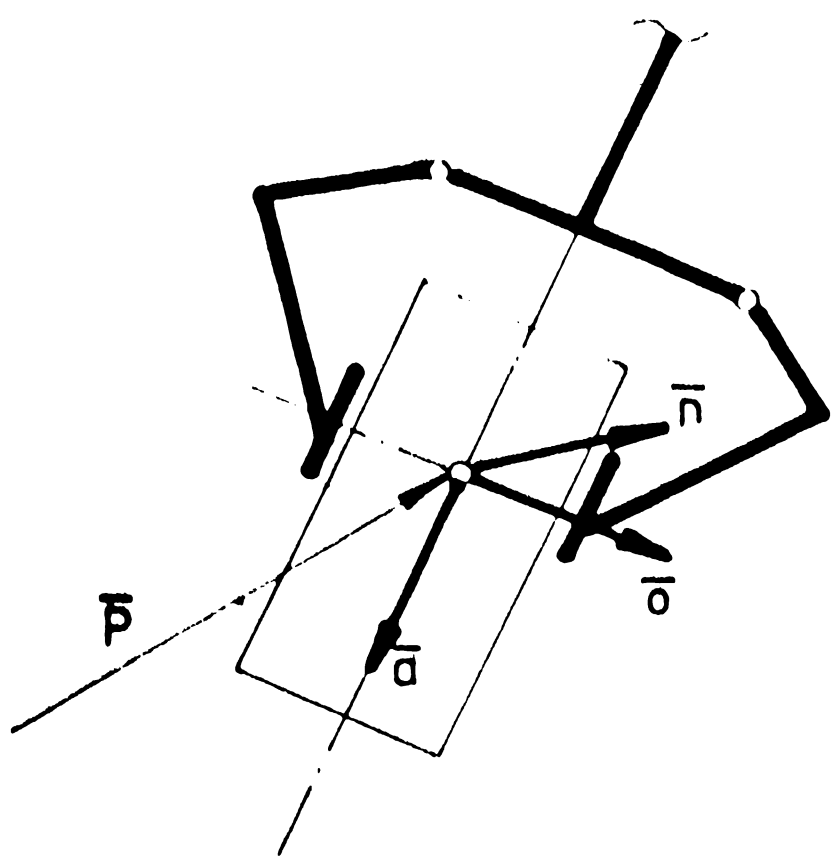


Fig.3.12

Se remarcă termenii componenți ai submatricilor din (3.21).

Analizând expresiile matricilor (3.14), (3.15), (3.16), se poate spune că o parte din matricile factori componenți exprimă deplasarea (poziția) P.C. în spațiul de lucru al robotului, iar celelalte exprimă orientarea în același spațiu.

Dacă cele șase matrici A_n , din expresia (3.18) se grupează sub următoarea formă :

$$T = {}^0T_6 = (A_1 \cdot A_2 \cdot A_3) \cdot (A_4 \cdot A_5 \cdot A_6) \quad (3.23)$$

atunci, conform grafului (3.11):

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = {}^0T_3 = {}^0T_d \quad (3.24)$$

reprezintă matricea de deplasare pe traiectorie (matricea de poziționare), iar :

$$A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 = {}^3T_6 = {}^dT_o \quad (3.25)$$

reprezintă matricea ce caracterizează orientarea E.F.

Dacă se exprimă submatricile 0T_d și dT_o sub aceeași formă ca și T , vom avea :

$${}^0T_d = {}^0T_3 = \begin{vmatrix} n_{dx} & o_{dx} & a_{dx} & p_{dx} \\ n_{dy} & o_{dy} & a_{dy} & p_{dy} \\ n_{dz} & o_{dz} & a_{dz} & p_{dz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.26)$$

sau :

$${}^0T_d = \left| \begin{array}{c|c} {}^0R_3 & {}^0p_d \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right| \quad (3.26')$$

și

$${}^dT_o = {}^3T_6 = \begin{vmatrix} n_{ox} & o_{ox} & a_{ox} & p_{ox} \\ n_{oy} & o_{oy} & a_{oy} & p_{oy} \\ n_{oz} & o_{oz} & a_{oz} & p_{oz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.27)$$

sau

$${}^dT_o = \left| \begin{array}{c|c} {}^3R_6 & {}^3p_o \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right| \quad (3.27')$$

Prin urmare :

$$T = {}^0T_d \cdot {}^d T_0 = \begin{vmatrix} {}^0R_3 & | & {}^0p_d \\ \hline 0 & | & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} {}^3R_6 & | & {}^3p_0 \\ \hline 0 & | & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} {}^0R_6 & | & {}^0R_3 \cdot {}^3p_0 + {}^0p_d \\ \hline 0 & | & 1 \end{vmatrix}, \quad (3.28)$$

Se poate concluziona că matricea $R = {}^0R_6$ reprezintă matricea rotațiilor care conduc la orientarea E.F., iar matricea $p = {}^0R_3 \cdot {}^3p_0 + {}^0p_d$, conduce la determinarea poziției P.C. din obiectul manipulat.

Deci, stabilirea poziției P.C. precum și orientarea efectorului final (și a obiectului manipulat), în raport cu sistemul de referință atașat elementului fix al lanțului cinematic al robotului, ca funcții de timp, sau cu alte cuvinte, rezolvarea problemei geometrice directe a lanțului cinematic este asigurată de matricea de transformare T . Exprimată sub forma (3.19) și (3.22), se poate scrie :

$$\begin{vmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.29)$$

Din expresia (3.29) rezultă componentele versorilor \bar{n}, \bar{o} și \bar{a} ai axelor sistemului de referință final (legat de E.F.) exprimate în sistemul de referință fix și respectiv, componentele vectorului de poziție a originii, sistemului de referință final în raport cu originea sistemului de referință fix.

Se remarcă faptul că aceste componente sînt funcție de timp, prin intermediul coordonatelor generalizate ale cuplelor cinematice componente ale lanțului cinematic.

3.3.1.2. Problema geometrică inversă a lanțurilor cinematice

Problema rezolvării modelului geometric invers al unui lanț cinematic presupune acceptarea poziției P.C. și respectiv, orientarea E.F. Pe această bază se cere determinarea valorilor coordonatelor generalizate q_n , respectiv ai parametrilor cinematici ce caracterizează poziția cuplelor cinematice conducătoare.

Se pornește, în acest caz, de la expresia matricei generale

de transformare 0T_n sub forma (3.16).

Dacă se înmulțește succesiv, la stînga cu inversa matricei A_n , respectiv A_n^{-1} , se obțin relații de forma :

$$A_1^{-1} \cdot {}^0T_n = {}^1T_n \quad (3.30)$$

$$A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot {}^0T_n = {}^2T_n \quad (3.31)$$

$$A_3^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot {}^0T_n = {}^3T_n \quad (3.32)$$

⋮
⋮

Cunoscîndu-se matricea de transformare generală 0T_n (3.22), se exprimă poziția P.C., respectiv orientarea E.F. în raport cu elementul fix, matricile de transformare A_n , precum și inversele acestora A_n^{-1} și de asemenea matricile din membrul drept (obținute succesiv cu relația 3.14), se obțin următoarele egalități :

$$\begin{vmatrix} f_{i1}(\bar{n}) & f_{i1}(\bar{o}) & f_{i1}(\bar{a}) & f_{i1}(\bar{p}) \\ f_{i2}(\bar{n}) & f_{i2}(\bar{o}) & f_{i2}(\bar{a}) & f_{i2}(\bar{p}) \\ f_{i3}(\bar{n}) & f_{i3}(\bar{o}) & f_{i3}(\bar{a}) & f_{i3}(\bar{p}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} g_{11}^{i+1,n} & g_{12}^{i+1,n} & g_{13}^{i+1,n} & g_{14}^{i+1,n} \\ g_{21}^{i+1,n} & g_{22}^{i+1,n} & g_{23}^{i+1,n} & g_{24}^{i+1,n} \\ g_{31}^{i+1,n} & g_{32}^{i+1,n} & g_{33}^{i+1,n} & g_{34}^{i+1,n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.33)$$

Egalînd termenii celor două matrici, rezultă ecuațiile necesare pentru obținerea coordonatelor generalizate q_i ($i = 1, 2, \dots, n$)

Se remarcă faptul că elementele matricei din membrul stîng sînt dependente numai de coordonata generalizată q_i :

$$f_{ij} = f_{ij}(q_i) \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.34)$$

pe cînd elementele matricei din membrul drept sînt dependente sau independente de coordonatele generalizate q_{i+1}, \dots, q_n

$$g_{pr}^{i+1,n} = g_{pr}^{i+1,n}(q_{i+1}, q_{i+2}, \dots, q_n) \quad (3.35)$$

$$p = 1, 2, 3; \quad r = 1, 2, 3, 4$$

3.3.2. Relațiile generale ale vitezei P.C.

Punctul caracteristic (P.C.) din efectorul final se consideră

legat de un sistem de coordonate $O_1x_1y_1z_1$ mobil în spațiu odată cu acesta. Acest sistem de coordonate este poziționat prin vectorul \bar{r}_{O_1} al originii O_1 , față de sistemul de coordonate $O_0x_0y_0z_0$ legat de elementul fix al lanțului cinematic.

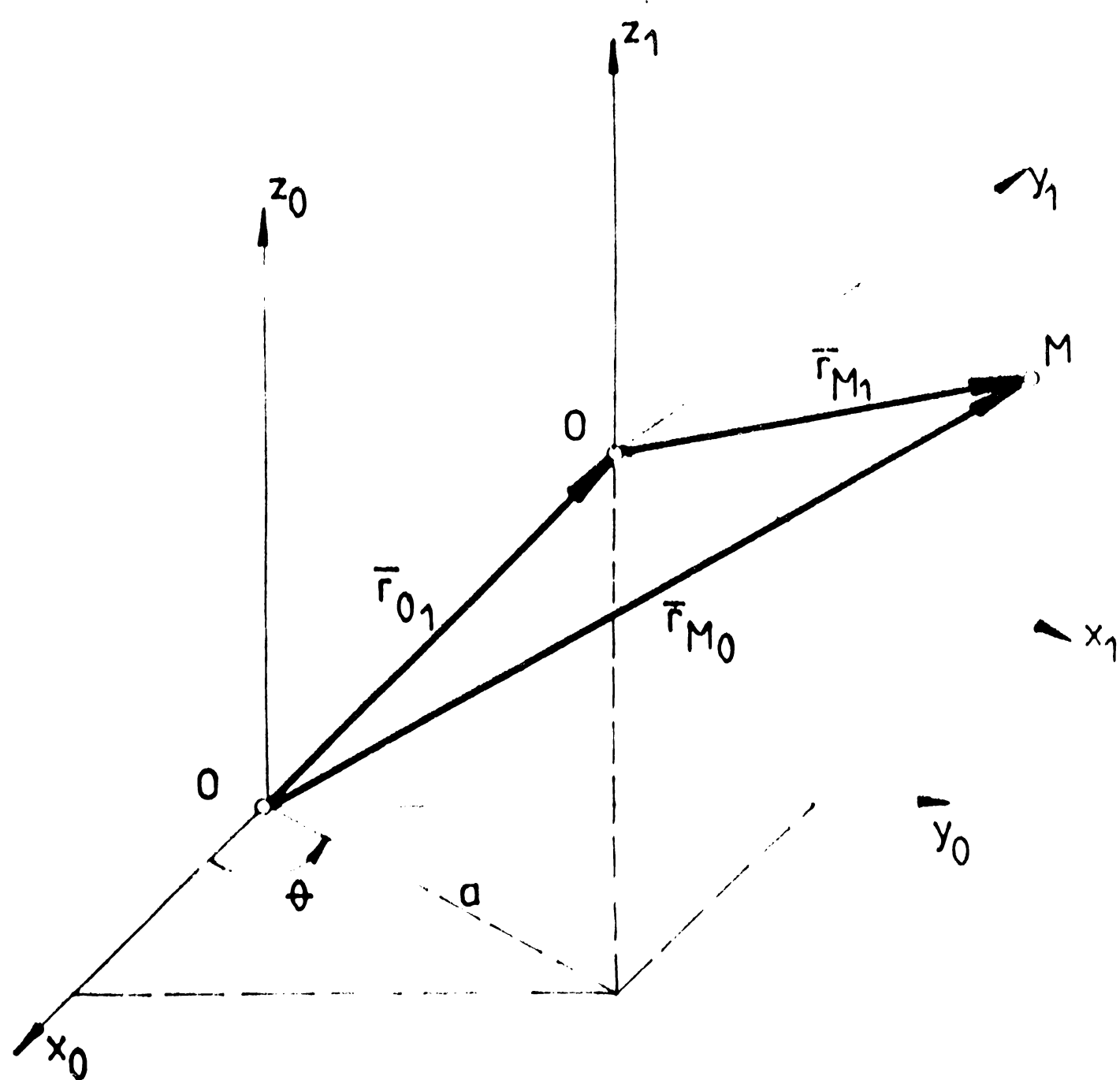


Fig.3.13

Urmărind figura 3.13 se poate scrie :

$$\bar{r}_{M_0} = \bar{r}_{O_1} + \bar{r}_{M_1} \quad (3.36)$$

și :

$$\bar{v}_{M_0} = \bar{v}_{O_1} + \bar{v}'_{M_1} \quad (3.37)$$

Dar :

$$\bar{r}_{M_1,0} = R_0 \cdot \bar{r}_{M_1,1} \quad (3.38)$$

unde R_0 este matricea de transformare (de rotație) în jurul lui \bar{z}_0

Deci :

$$\bar{r}'_{M_1,0} = R'_0 \cdot \bar{r}_{M_1,1} + R_0 \cdot \bar{r}'_{M_1,1} \quad (3.39)$$

Cum $\bar{r}_{M_1,1}$ = constant, relația (3.39) devine :

$$\bar{r}'_{M_1,0} = R'_0 \cdot \bar{r}_{M_1,1} \quad (3.39')$$

sau :

$$\bar{r}'_{M_1,0} = R'_0 \cdot R_0^{-1} \cdot R_0 \cdot \bar{r}_{M_1,1} = (R'_0 \cdot R_0^{-1}) R_0 \cdot \bar{r}_{M_1,1} \quad (3.39'')$$

Matricea R_0 este componenta de orientare (de rotație) din matricea (3.12) și are forma :

$$R_0 = \begin{vmatrix} c\theta & -s\theta \cdot c\alpha & s\theta \cdot s\alpha \\ s\theta & c\theta \cdot c\alpha & -c\theta \cdot s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{vmatrix} \quad (3.40)$$

unde s-a notat cu : $s\theta = \sin\theta$; $s\alpha = \sin\alpha$; $c\theta = \cos\theta$; $c\alpha = \cos\alpha$ (3.41)

Dacă se notează produsul :

$$R'_0 \cdot R_0^{-1} = \Omega_0 = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (3.42)$$

relația (3.37) se poate scrie :

$$\bar{v}_{Mo} = \bar{v}_{o1} + \Omega_o \cdot R_o \cdot \bar{r}_{M_{1.1}} \quad (3.43)$$

sau :

$$\begin{vmatrix} v_x(Mo) \\ v_y(Mo) \\ v_z(Mo) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a \sin \theta \theta' \\ a \cos \theta \theta' \\ d' \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \theta' \cdot \begin{vmatrix} c\theta & -s\theta \cdot c\alpha & s\theta \cdot s\alpha \\ s\theta & c\theta \cdot c\alpha & -c\theta \cdot s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_{M1} \\ y_{M1} \\ z_{M1} \end{vmatrix} \quad (3.43')$$

Relația (3.43) poate fi particularizată pentru cazurile cînd există translații relative sau rotații relative.

In primul caz :

$$\theta' = 0; \quad \Omega = 0 \quad \text{și} \quad \bar{v}_{Mo} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ d' \end{vmatrix} \quad (3.44)$$

dacă translația are loc în lungul axei $O_o z_o$.

Presupunînd că translația are loc între elementele $i-1$ și i al lanțului cinematic, viteza relativă se va scrie :

$${}^{i-1}\bar{v}_{Mi} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ d'_i \end{vmatrix} \quad \text{sau} \quad \begin{vmatrix} v_{xM} \\ v_{yM} \\ v_{zM} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_i d'_i \quad (3.45)$$

Scriind viteza relativă a elementului "i" al lanțului cinematic, față de sistemul de coordonate inițial, rezultă :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = (A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \dots A_{i-1}) \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_i d'_i \quad (3.46)$$

unde A_{i-1} sînt matrici de transformare de tip (3.12) și (3.13).

Expresia (3.46) se mai poate scrie :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{vmatrix}_{i-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_i d'_i \quad (3.46')$$

sau

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{vmatrix}_{i-1} \cdot d'_i \quad (3.46'')$$

In final, dat fiind faptul că $\theta' = 0$, componentele vitezei de translație și a vitezei unghiulare, a elementului condus, re-

rezultă din următoarea matrice :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix} = {}^0 \begin{vmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot d_i^i \quad (3.47)$$

dacă, bineînțeles, deplasarea are loc în lungul axei $O_0 z_0$.

Relația (3.47) se adaptează corespunzător, dacă translația are loc în lungul celorlalte axe ale sistemului de coordonate.

În cazul al doilea, când este vorba numai de mișcări relative de rotație, relația (3.43') se va transforma, ținând seama de faptul că :

$$\bar{v}_{01} = 0 \quad (3.48)$$

Expresia (3.43) pentru mișcarea relativă de rotație între elementele $i-1$ și i ale lanțului cinematic devine :

$${}^{i-1} \bar{v}_{Mi} = {}^{i-1} \Omega_i \cdot {}^{i-1} R_i \cdot \bar{r}_{Mi} \quad (3.49)$$

Înlocuind corespunzător, se obține :

$${}^{i-1} v_{Mi} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \theta_i^i \\ \theta_i^i \\ \theta_i^i \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c\theta & -s\theta \cdot c\alpha & s\theta \cdot s\alpha \\ s\theta & c\theta \cdot c\alpha & -c\theta \cdot s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_{Mi} \\ y_{Mi} \\ z_{Mi} \end{vmatrix} \quad (3.50)$$

Dacă punctul M este tocmai punctul caracteristic (I.C.) al lanțului cinematic, atunci vectorul de poziție al acestuia exprimat în sistemul $O_i x_i y_i z_i$ are componentele tocmai termenii coloanei a patra a matricei (3.12).

Prin urmare :

$${}^{i-1} v_{Mi} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \theta_i^i \\ \theta_i^i \\ \theta_i^i \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c\theta & -s\theta \cdot c\alpha & s\theta \cdot s\alpha \\ s\theta & c\theta \cdot c\alpha & -c\theta \cdot s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{vmatrix} \quad (3.51)$$

Dacă se consideră ansamblul lanțului cinematic, atunci se poate scrie, după operațiile corespunzătoare :

$${}^0 v_{Mi} = ({}^0 R_1 \cdot {}^1 R_2 \cdot {}^2 R_3 \dots {}^{i-2} R_{i-1}) \cdot \begin{vmatrix} -p_y \\ p_x \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \theta_i^i \quad (3.52)$$

sau :

$${}^0 v_{Mi} = \begin{vmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -p_y \\ p_x \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \theta_i' \quad (3.53)$$

rezultând forma finală a matricei, care dă componentele vitezei liniare :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i \\ \cdot \\ i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \cdot i^{-1}(p_y)_n + \begin{vmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \cdot i^{-1}(p_x)_n \cdot \theta_i' \quad (3.54)$$

Componentele vitezei unghiulare de rotație în jurul axei $O_0 z_0$, rezultă din expresiile :

$${}^0 \theta_i' = {}^0 R_{i-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \theta_i' = \begin{vmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \theta_i' \quad (3.55)$$

sau :

$$\begin{vmatrix} \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i \\ \cdot \\ i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \cdot \theta_i' \quad (3.56)$$

Combinând relațiile (3.54) cu (3.56) se obține matricea componentelor vitezei liniare și a vitezei unghiulare /P4/, /S7/ :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \cdot i^{-1}(p_y)_n + \begin{vmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \cdot i^{-1}(p_x)_n \cdot \theta_i' + \begin{vmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i-1 \\ \cdot \\ i-1 \end{vmatrix} \cdot \theta_i' \quad (3.57)$$

Analizând relațiile (3.47) și (3.57) se poate concluziona că matricea componentelor vitezelor liniare și unghiulare ale elementului final, al lanțului cinematic al D.G. se obține cu ajutorul matricei iacobian, de următoarea formă :

$$\begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{matrix} \Big|_n = \begin{matrix} X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_n \\ \theta_{1x} & \theta_{2x} & \dots & \theta_{nx} \\ \theta_{1y} & \theta_{2y} & \dots & \theta_{ny} \\ \theta_{1z} & \theta_{2z} & \dots & \theta_{nz} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \vdots \\ \Delta q_n \end{matrix} \quad (3.58)$$

unde : $q_i = \theta_i$ sau $q_i = d_i$ (funcție de tipul mișcării)
 $x_i = \partial X / \partial q_i$; $\theta_{ix} = \partial \theta_x / \partial q_i$ (3.59)

coloanele matricei iacobiene obținându-se din (3.57).

3.4. Ecuatiile dinamice ale mecanismelor generatoare de traiectorie

3.4.1. Energia cinetică a unui lanț cinematic

Problema răspunsului dinamic al unui lanț cinematic component al M.G.T. este de importanță deosebită, atât în ce privește materializarea structurii mecanice a roboților industriali, precum și în vederea determinării sistemului de acționare și comandă a acestora.

Din această cauză este foarte des întâlnită și rezolvată în literatura de specialitate /B1/, /B3/, /D2/, /D5/, /I3/, /I6/, /K8/, /M3/, /P4/, /R3/, /S7/, /V2/. Desigur că autorii s-au orientat asupra unuia sau altuia din formalismele matematice (Newton-Euler, Lagrange, d'Alembert, Gibbs-Appel), după cum cazurile de lanțuri cinematice luate în studiu, precum și tipurile de legi de mișcare au permis.

Având în vedere avantajele pe care le prezintă formalismul Lagrange, în scrierea ecuațiilor dinamice, în continuare se va prezenta numai acesta.

Așa cum s-a prezentat în § 3.3.1.1, vectorul de poziție al P.C. raportat la un sistem de coordonate legat de suportul (elementul fix) lanțului cinematic a fost scris cu relația (3.17), care scrisă în caz general, ia forma :

$$\bar{r} = T_1 \cdot \bar{r}_1 \quad (3.60)$$

Derivând expresia (3.60), în raport cu timpul, se obține :

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = \left[\sum_{j=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right] \cdot \bar{r}_i \quad (3.61)$$

și ținând seama de faptul că

$$\left(\frac{d\bar{r}}{dt} \right)^2 = \dot{\bar{r}} \cdot \dot{\bar{r}} = \text{diag} \left(\dot{\bar{r}} \cdot \dot{\bar{r}}^T \right) \quad (3.62)$$

atunci :

$$\left(\frac{d\bar{r}}{dt} \right)^2 = \text{diag} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \bar{r}_i \cdot \bar{r}_i^T \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (3.63)$$

Prin urmare, energia cinetică a unei mase elementare dm aparținând elementului i din lanțul cinematic, va avea expresia :

$$dK_i = \frac{1}{2} \text{diag} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} (\bar{r}_i \cdot dm \cdot \bar{r}_i^T) \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (3.64)$$

Energia cinetică a elementului "i" al lanțului cinematic va fi :

$$\begin{aligned} K_i &= \int_{\text{elem } i} dK_i = \frac{1}{2} \text{diag} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \left(\int \bar{r}_i \cdot \bar{r}_i^T dm \right) \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] = \\ &= \frac{1}{2} \text{diag} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \cdot J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \end{aligned} \quad (3.65)$$

unde s-a notat cu :

$$J_i = \int \bar{r}_i \cdot \bar{r}_i^T \cdot dm =$$

$$= \begin{vmatrix} \left[-I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz} \right] / 2 & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i x_i \\ I_{ixy} & \left[I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz} \right] / 2 & I_{iyz} & m_i y_i \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \left[I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz} \right] / 2 & m_i z_i \\ m_i x_i & m_i y_i & m_i z_i & m_i \end{vmatrix} \quad (3.66)$$

momentul de inerție redus al elementului i al lanțului cinematic.

Energia cinetică totală a lanțului cinematic va fi :

$$K = \sum_{i=1}^6 K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \text{diag} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \cdot J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (3.67)$$

La energia cinetică a lanțului cinematic se mai adaugă un termen, care ține seama de energia cinetică a sistemului de acți-

energie a cuplelor motoare, termen pe care-l notăm cu Kc_i :

$$Kc_i = \frac{1}{2} I a_i \cdot \dot{q}_i^2 \quad (3.68)$$

În sfârșit, energia cinetică a întregului ansamblu (sistem mecanic) al robotului industrial se poate exprima prin :

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{diag} \left(\frac{\partial T_i}{\partial q_j} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right) q_j \cdot q_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 I a_i \dot{q}_i^2 \quad (3.69)$$

3.4.2. Energia potențială a unui lanț cinematic

Pornind de la expresia generală a energiei potențiale :

$$P = m \cdot g \cdot h \quad (3.70)$$

unde : g - accelerația gravitațională ; $g = \begin{vmatrix} g_x & g_y & g_z \end{vmatrix}$
 h - poziția centrului de masă,

expresia (3.70) se poate particulariza pentru situația lanțului cinematic :

$$P_i = - m_i \cdot g^T \cdot T_i \cdot r_i \quad (3.71)$$

pentru elementul "i" al lanțului cinematic, și :

$$P = - \sum_{i=1}^6 m_i \cdot g^T \cdot T_i \cdot r_i \quad (3.72)$$

3.4.3. Ecuațiile dinamice ale lanțului cinematic

Dinamica sistemului mecanic poate fi descrisă utilizând funcția Lagrange :

$$L = K - P \quad (3.73)$$

a cărei expresie, ținând seama de (3.69) și (3.72), va fi :

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_j} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right] \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 I a_i \cdot \dot{q}_i^2 + \sum_{i=1}^6 m_i \cdot g^T \cdot T_i \cdot r_i \quad (3.74)$$

Expresia forței generalizate rezistente, reduse la elementul unei cuple cinematice motoare, va fi :

$$F_i = \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (3.75)$$

Primul termen al expresiei (3.75) se obține :

$$\frac{\partial L}{\partial q_p} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_p} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right] \cdot \dot{q}_k +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_j} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_p} \right] \cdot \dot{q}_j + I_{ap} \cdot \dot{q}_p \quad (3.76)$$

Cum :

$$\frac{\partial T_i}{\partial q_j} J_i \frac{r_i^T}{q_k} = \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_j} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial q_k} \right]^T = \frac{\partial T_i}{\partial q_k} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_j}$$

se obține :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} = \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_k} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_p} \right] \cdot \dot{q}_k + I_{ap} \cdot \dot{q}_p \quad (3.77)$$

Întorcând :

$$\frac{\partial T_i}{\partial q_p} = 0 \quad \text{pentru} \quad p > i$$

se obține în final :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} = \sum_{i=p}^6 \sum_{k=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_k} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial q_p} \right] \cdot \dot{q}_k + I_{ap} \cdot \dot{q}_p \quad (3.78)$$

Derivând în raport cu timpul, se obține :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} &= \sum_{i=p}^6 \sum_{k=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_k} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_p} \right] \cdot \ddot{q}_k + I_{ap} \cdot \ddot{q}_p + \\ &+ \sum_{i=p}^6 \sum_{k=1}^i \sum_{m=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial^2 T_i}{\partial q_k \partial q_m} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_p} \right] \cdot \dot{q}_k \cdot \dot{q}_m + \\ &+ \sum_{i=p}^6 \sum_{k=1}^i \sum_{m=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial^2 T_i}{\partial q_p \partial q_m} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right] \cdot \dot{q}_k \cdot \dot{q}_m \end{aligned} \quad (3.79)$$

Cel de al doilea termen al expresiei (3.75) se obține :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_p} &= \sum_{i=p}^6 \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{diag} \left[\frac{\partial^2 T_i}{\partial q_p \partial q_j} \cdot J_i \cdot \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right] \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + \\ &+ \sum_{i=p}^6 m_i \cdot g^T \cdot \frac{\partial T_i}{\partial q_p} r_i \end{aligned} \quad (3.80)$$

Înlocuindu-se termenii (3.79) și (3.80) în (3.75), se obține expresia finală a forței generalizate :

$$\begin{aligned} F_i &= \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^j \text{diag} \left[\frac{\partial T_j}{\partial q_k} \cdot J_j \cdot \frac{\partial T_j^T}{\partial q_i} \right] \cdot \ddot{q}_k + I_{ai} \cdot \ddot{q}_i + \\ &+ \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{diag} \left[\frac{\partial^2 T_j}{\partial q_k \partial q_m} \cdot J_j \cdot \frac{\partial T_j^T}{\partial q_i} \right] \cdot \dot{q}_k \cdot \dot{q}_m - \end{aligned}$$

$$- \sum_{j=1}^6 m_j \cdot g^T \cdot \frac{\partial T_j}{\partial q_i} \cdot r_j \quad (3.81)$$

sau :

$$F_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \cdot \ddot{q}_j + I a_i \cdot \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + D_i \quad (3.82)$$

unde :

$$D_{ij} = \sum_{p=\max i,j}^6 \text{diag} \left[\frac{\partial T_p}{\partial q_j} \cdot J_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial q_i} \right] \quad (3.83)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max i,j,k}^6 \text{diag} \left[\frac{\partial^2 T_p}{\partial q_j \cdot \partial q_k} \cdot J_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial q_i} \right] \quad (3.84)$$

$$D_i = \sum_{p=i}^6 \left[-m_p \cdot g^T \cdot \frac{\partial T_p}{\partial q_i} \cdot \bar{r}_p \right] \quad (3.85)$$

In expresia (3.82), D_{ii} și D_{ij} reprezintă coeficienți inerțiali; D_{ijj} reprezintă coeficientul centripet, D_{ijk} reprezintă coeficientul Coriolis și D_i reprezintă coeficientul gravitațional.

Capitolul 4

CONSIDERATII ASUPRA ANALIZEI SI SINTEZEI STRUCTURALE
ANALIZEI CINEMATICE SI DINAMICE A M.G.T.

4.1. Elemente de sinteză structurală a
dispozitivelor de ghidare (D.G)

4.1.1. Configurații structurale posibile a D.G.

Am arătat care este rolul M.G.T. și al M.O. din componența D.G. În vederea realizării dezideratelor impuse, lanțurile cinematice componente compuse dintr-un număr oarecare de elemente și respectiv cuple cinematice, trebuie să prezinte, în consecință, cel puțin trei grade de libertate pentru funcția de deplasare în spațiu și trei grade de libertate pentru funcția de orientare. În aceste condiții se pot obține traiectorii dorite, pe care să se deplaseze punctul caracteristic și totodată o orientare corespunzătoare a dreptei caracteristice.

Având în vedere cele expuse, concluzionăm că unul din factorii care influențează, în mod direct, structura lanțurilor cinematice ale D.G. este gradul de mobilitate al acestora.

Este știut că fizic, acesta reprezintă numărul posibilităților de mișcare pe care lanțul cinematic le poate avea, în raport cu un sistem de referință solidarizat cu unul dintre elementele sale.

Dacă :

$$L = 6n - \sum_{i=1}^5 i C_i \quad (4.1)$$

reprezintă gradul de libertate /A12/, /D6/, /K37/, /L7/, /M3/ al lanțului cinematic, atunci :

$$M = L - 6 = 6(n-1) - \sum_{i=1}^5 i C_i = 6n' - \sum_{i=1}^5 i C_i \quad (4.2)$$

reprezintă expresia gradului de mobilitate.

n' - numărul elementelor mobile

Condiția de deplasare și de orientare în spațiu, impune ca posibilitățile de mișcare să aibă valoarea :

$$\sum_{i=1}^5 (6 - i) C_i = 6 \quad (4.3)$$

Possibilitățile de mișcare se obțin prin alegerea corespunzătoare a cuplurilor cinematice componente.

Dacă se ține seama de condiția (4.3), se pot realiza combinații de cuple cinematice componente ale lanțurilor cinematice de clase diferite, după cum urmează :

- a) $6 = 1+1+1+1+1+1$ (6 cuple de cl.V)
- b) $6 = 1+1+1+1+2$ (4 cuple de cl.V, o cuplă de cl.IV)
- c) $6 = 1+1+1+3$ (3 cuple de cl.V, o cuplă de cl.III)
- d) $6 = 1+1+4$ (2 cuple de cl.V, o cuplă de cl.II)
- e) $6 = 1+5$ (o cuplă de cl.V, o cuplă de cl.I) (4.4)
- f) $6 = 1+2+3$ (o cuplă de cl.V, o cuplă de cl.IV, o cuplă de cl.III)
- g) $6 = 1+1+2+2$ (2 cuple de cl.V, 2 cuple de cl.IV)
- h) $6 = 2+2+2$ (3 cuple de cl.IV)
- i) $6 = 3+3$ (2 cuple de cl.III)
- j) $6 = 2+4$ (o cuplă de cl.IV, o cuplă de cl.II)

Din cele 10 posibilități de descompunere, se rețin doar combinațiile care conțin cuple cinematice de clasele III, IV și V, fiind cuplurile cinematice uzuale întâlnite în construcția roboților industriali.

Se rețin, în aceste condiții, combinațiile notate cu a), b), c), f), g), h), i).

Dacă se consideră că avem de a face cu lanțuri cinematice deschise, mulțimea elementelor și a cuplurilor cinematice de forma $m(E,C)$ se poate scrie pentru combinațiile rămase :

- a) $m_a(7,6)$; b) $m_b(6,5)$; c) $m_c(5,4)$; f) $m_f(4,3)$;
- g) $m_g(5,4)$; h) $m_h(4,3)$; i) $m_i(3,2)$ (4.5)

sau :

- a) $m_a[E(e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6), C(c_5^1, c_5^2, c_5^3, c_5^4, c_5^5, c_5^6)]$
- b) $m_b[E(e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5), C(c_4^1, c_4^2, c_4^3, c_4^4, c_4^5)]$
- c) $m_c[E(e_0, e_1, e_2, e_3, e_4), C(c_5^1, c_5^2, c_5^3, c_5^4)]$
- f) $m_f[E(e_0, e_1, e_2, e_3), C(c_5^1, c_4^2, c_3^3)]$ (4.6)
- g) $m_g[E(e_0, e_1, e_2, e_3, e_4), C(c_5^1, c_5^2, c_4^3, c_4^4)]$
- h) $m_h[E(e_0, e_1, e_2, e_3), C(c_4^1, c_4^2, c_4^3)]$
- i) $m_i[E(e_0, e_1, e_2), C(c_3^1, c_3^2)]$

Numărul variantelor și alternativelor schemei structurale

a lanțurilor cinematice, corespunzător fiecărei descompuneri, crește cu diversitatea cuplelor cinematice.

Astfel, cuplele inferioare (cl.V), care se prezintă sub cele trei forme cunoscute : de rotație, de translație și elicoidale, incluse în lanțurile cinematice, conduc la diversificarea și creșterea numărului de posibilități de compunere. Pe de altă parte, numărul variantelor crește și prin permutarea corespunzătoare a cuplelor în lanțul cinematic.

De exemplu, lanțul cinematic compus dintr-o cuplă de cl.V-a, una de cl.IV-a și una de cl.III-a, împreună cu elementele aferente, poate da un număr de : $A_m^n = 210$ variante de lanțuri cinematice ($m = 7$ - reprezintă numărul alternativelor de cuple cinematice, $n = 3$ - reprezintă numărul cuplelor în lanțul cinematic).

Combi-nașiiile posibile a cuplelor cinematice se pot aranja în lanțuri cinematice deschise, închise sau combinate, lucru care multiplică numărul variantelor.

Multitudinea variantelor posibile pentru lanțurile cinematice deschise se poate obține și în contextul următorului raționament :

- în momentul atingerii poziției țintă (deci în momentul prehensiunii, lanțul cinematic care pînă în prezent a fost un lanț cinematic deschis, devine un lanț cinematic cu grad de mobilitate egal cu zero.

Expresia (4.2), pentru această situație, va lua forma :

$$M = 6n'' - \sum_{i=1}^5 i.C_i = 0 \quad (4.7)$$

$n'' = n' - 1$ (ultimul element al lanțului cinematic se solidarizează cu elementul fix)

Din relațiile (4.3) și (4.7) rezultă următoarea expresie :

$$\sum_{i=1}^5 C_i = n'' + 1 = n' \quad (4.8)$$

Sinteza structurală a lanțurilor cinematice deschise se reduce la rezolvarea ecuației (4.8) pentru C_i și n' întregi și pozitivi.

Considerînd și de această dată că lanțurile cinematice conțin numai cuple cinematice de clasele 3, 4 și 5, expresiile (4.3) (4.7) și (4.8) devin :

$$3 C_3 + 2 C_4 + C_5 = 6 \quad (4.9)$$

$$6(n'-1) - 3 C_3 - 4 C_4 - 5 C_5 = 0 \quad (4.10)$$

$$C_3 + C_4 + C_5 = n' \quad (4.11)$$

Pe baza acestor relații, pentru n', C_3, C_4, C_5 numere întregi, rezultă șapte soluții posibile. Tabelele 4.1 și 4.2 prezintă cele șapte soluții posibile și variantele care se pot obține pe baza acestora. Se remarcă pentru fiecare caz, numărul de variante posibile. În cazul lanțurilor cinematice ce conțin două cuple de clasă III-a (soluția 1), se remarcă gradul de libertate de prisos efectuat de elementul de legătură. Lanțul cinematic echivalent este compus dintr-o cuplă sferică și una cilindrică (de rototranslație).

Tabelul 4.1

Soluția	Număr elemente și cuple cinematice				
	n'	n	$C_3(S)$	$C_4(C)$	$C_5 \begin{matrix} (R) \\ (T) \end{matrix}$
1	2	3	2	-	-
2	3	4	-	3	-
3	3	4	1	1	1
4	4	5	-	2	2
5	4	5	1	-	3
6	5	6	-	1	4
7	6	7	-	-	6

În figura 4.1 sînt expuse lanțurile cinematice, concepute după soluțiile propuse în tabelele 4.1 și 4.2

Sarcina fiecărui lanț cinematic obținut este de a deplasa în spațiu punctul caracteristic M și totodată de a orienta dreapta caracteristică A .

Se obține astfel un număr de 130 variante de lanțuri cinematice, care răspund condițiilor impuse de relațiile (4.10) și (4.11).

Dacă se ține seama de relațiile (4.7) și (4.8), se obține expresia :

$$5n'' + \sum_{i=1}^5 C_i - 1 - \sum_{i=1}^5 i.C_i = 0 \quad (4.12)$$

adică :

$$5n'' - \sum_{i=2}^5 (i-1).C_i = 1 \quad (4.13)$$

Tabel 4.2

Solusia	n	c ₃	c ₄	c ₅	Variante posible	Nr. total
1	3	2	-	-	SS → SC, SS	2
2	4	-	3	-	CCC	1
3	4	1	1	1	RCS; TCS; CRS; CTS; RSC; TSC; CSR; SRC; STC; SCR;	10
4	5	-	2	2	RRCC; RTCC; TRCC; TTCC; RCRC; RCTC; TCRC; TCTC; CRRC; CRTC; CTRC; CTTC; RCCR; TCCR; CRCR; CTCR; CCRR; CCTR;	18
5	5	1	-	3	RRRS; RRSR; TTTS; TTST; RPTS; RTRS; TRRS; PTSR; TRSR; RRST; RTTS; TRTS; TTRS; TTSR; RTST; TRST;	16
6	6	-	1	4	RRRRC; RRRTC; RRTRC; RTRRC; TRRRC; RRTTC; RTRTC; TRRTC; RTTRC; TRTRC; TRRC; RTTTC; TRTTC; TTRTC; TTTRC; TTTTC; RRRCR; RRTCR; RTRCR; TRRCR; RTTCR; TRTCR; TTRCR; TTTTCR; RRCRR; RRCTR; RTCRR; TRCRR; RTCTR; TRCTR; TTCRR; TTCTR; RCRRR; RCRR; RCTRR; TCRRR; RCTTR; TCRR; TCTRR; TCTTR; CRRRR; CRRR; CRTRR; CTRRR; CRTRR; CTRR; CTTRR; CTTTR;	48
7	7	-	-	6	RRRRTT, RRRTR, RRTRR; RRRTRT; RRTRRT; RTRRR; TRRRRT; RRTRTR; RTRRTR; RRRTT; RRTRT; RRTRT; RTTRRT; TTRRR; RTTRTR; TTRTR; TTRTRR; TRTRTR; TTTTR; TTRRT; TTRRTT; TTRTR; TTRTR; TRTTTR; RTTTTR; TTRTRT; TRTTT; RRRRRT; RRRTR; RRRTR; RRRRR; TTTTTR; TTTTR; TTTTR; TTTTT;	35

expresie care poate fi scrisă și sub forma :

$$(6-f)n'' - \sum_{i=f+1}^5 (i-f).C_i = 1 \quad (4.14)$$

unde $f = 1$.

Relația (4.14) reprezintă gradul de mobilitate a unui mecanism spațial de familia 1 cu :

$$M_1 = 1 \quad (4.15)$$

Se poate concluziona că mecanismul care se formează prin cuplarea lanțului cinematic al D.G. la obiectul de manipulat, considerat fix, se transformă într-un mecanism spațial de familia 1, cu gradul de mobilitate egal cu unitatea.

Dacă se analizează acum situația lanțului cinematic în faza de prehensare (momente infimitezimale celui final - de prindere a obiectului), gradul de mobilitate ar avea expresia :

$$M = 6(n''+1) - \sum_{i=1}^5 i.C_i - i_s.C_s \quad (4.16)$$

unde : i_s reprezintă numărul posibilităților de mișcare în cupla suplimentară ce se formează între elementul final al lanțului cinematic și obiectul de prehensat ;

$C_s = 1$ - cupla suplimentară formată.

Funcție de valoarea lui i_s , gradul de mobilitate al lanțului cinematic - ținând seama și de expresia (4.7), poate să ia valoarea 5, 4, 3, 2, 1, după cum cupla cinematică suplimentară este de clasa I, II, III, IV sau V. Cum de regulă această cuplă suplimentară este o cuplă cinematică inferioară (de rotație sau translație), putem spune că lanțul cinematic al D.G. se constituie într-un mecanism spațial de familia zero, cu grad de mobilitate egal cu unitatea.

Se poate concluziona că o analiză structurală - sau aspecte ale sintezei structurale - pot fi făcute cu succes pe aceste mecanisme echivalente.

4.1.2. Configurații structurale posibile ale M.G.T.

Așa cum s-a arătat, sarcina cea mai generală a unui M.G.T. este de a plimba punctul caracteristic M dintr-o poziție inițială (start) într-o poziție finală (țintă) oarecare, în spațiul

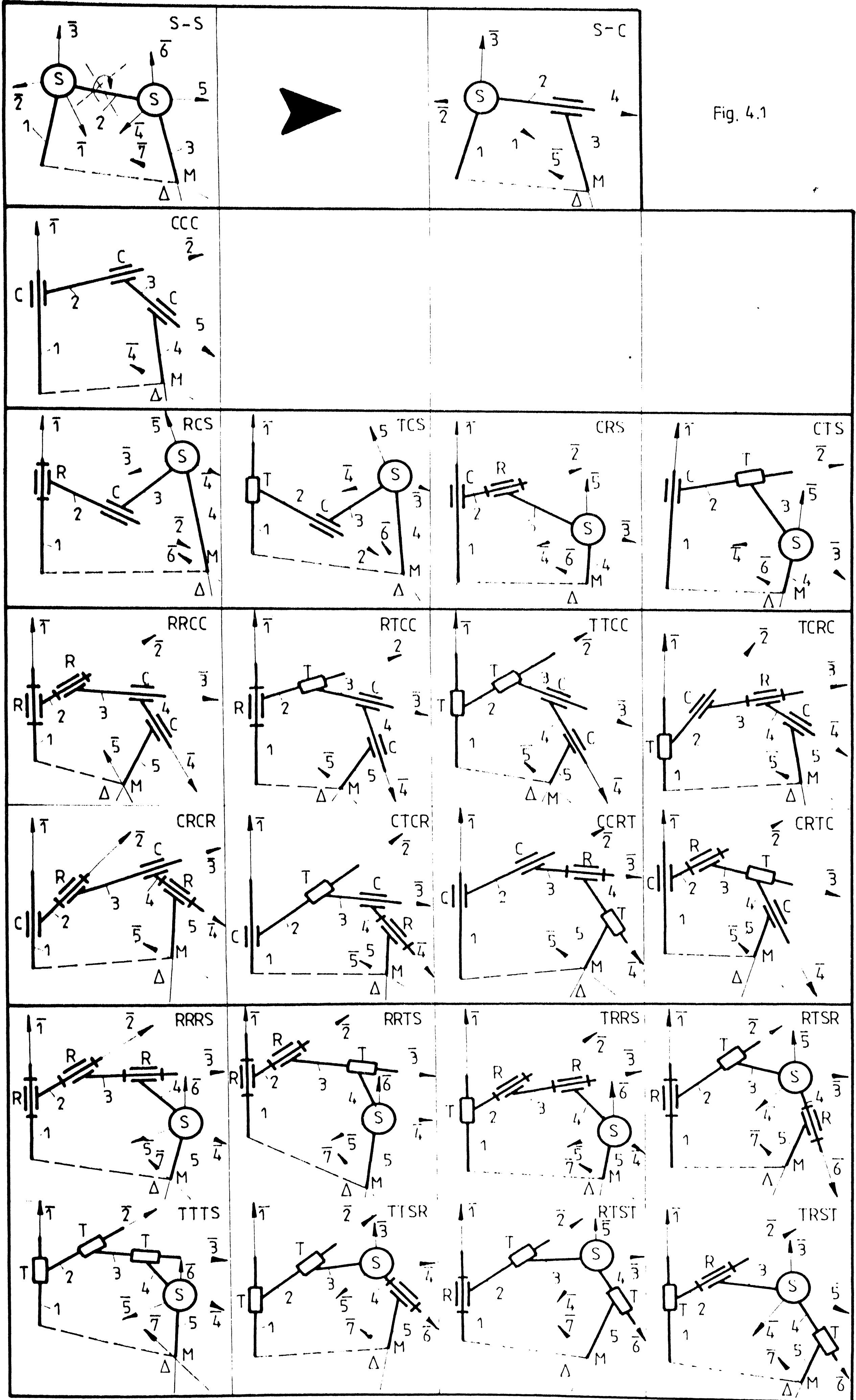
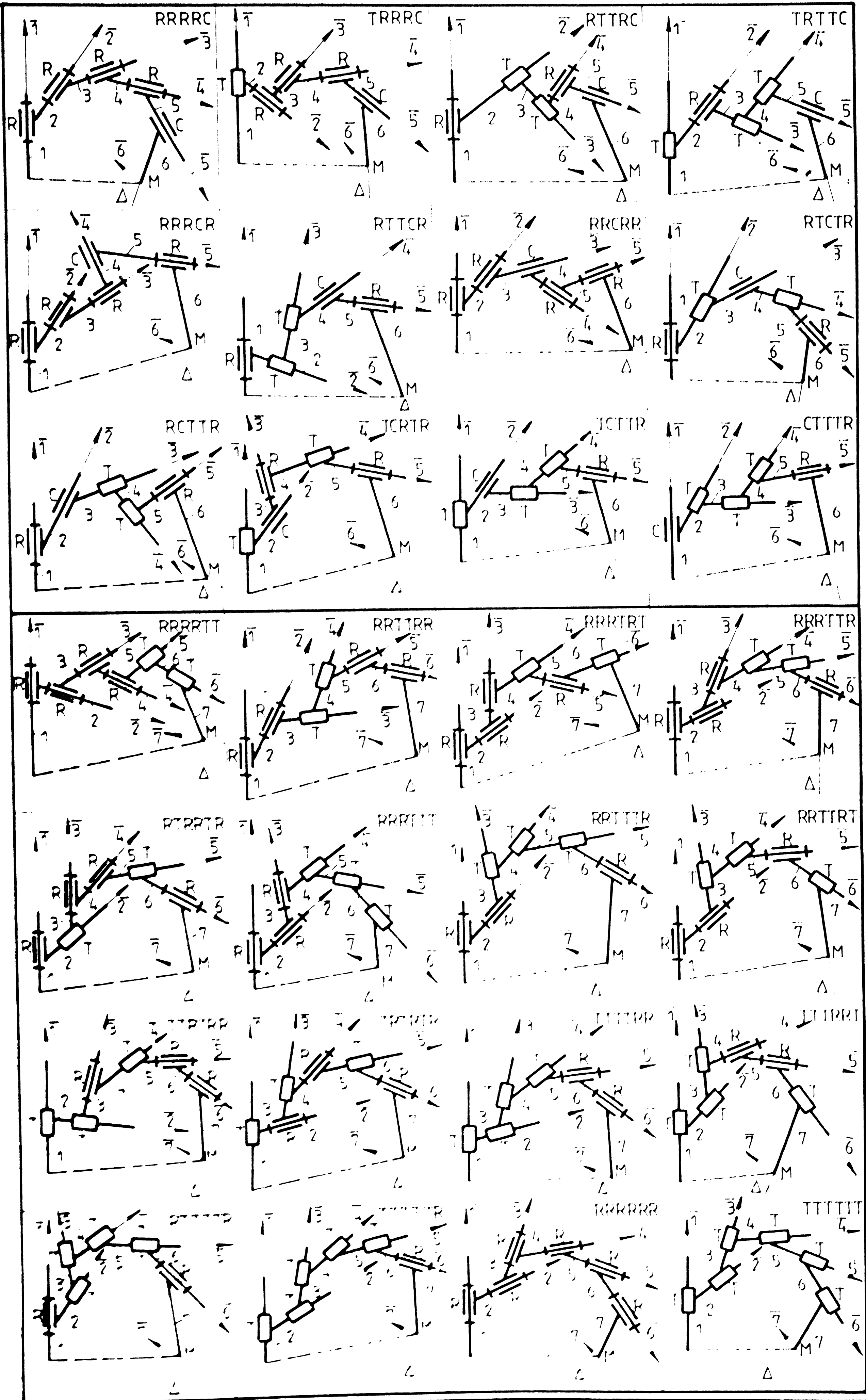


Fig. 4.1

Fig. 4.1(continue)



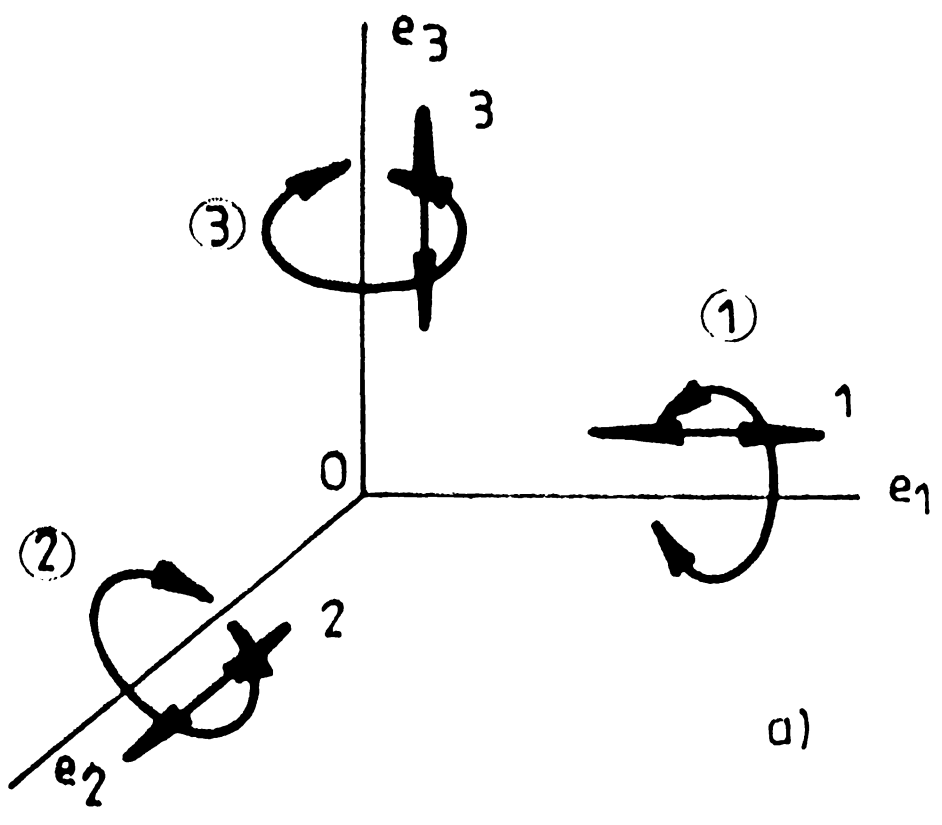


Fig. 4.2

RRR

①②③	③①②	②③①	①③②	③②①	②①③
①②②	②①②	②②①	①③③	③①③	③③①
②①①	①②①	①①②	②③③	③②③	③③②
③①①	①③①	①①③	③②②	②③②	②②③
①①①	②②②	③③③			

RRT

1)1)1	1)1)2	1)1)3	2)2)1	2)2)2	2)2)3
3)3)1	3)3)2	3)3)3	1)2)1	1)2)2	1)2)3
2)3)1	2)3)2	2)3)3	3)1)1	3)1)2	3)1)3
1)3)1	1)3)2	1)3)3	3)2)1	3)2)2	3)2)3
2)1)1	2)1)2	2)1)3			

RTR

① 1 ①	① 2 ①	① 3 ①	② 1 ②	② 2 ②	② 3 ②
③ 1 ③	③ 2 ③	③ 3 ③	① 1 ②	① 2 ②	① 3 ②
② 1 ③	② 2 ③	② 3 ③	③ 1 ①	③ 2 ①	③ 3 ①
① 1 ③	① 2 ③	① 3 ③	③ 1 ②	③ 2 ②	③ 3 ②
② 1 ①	② 2 ①	② 3 ①			

TRR

1 (1)1)	2 1)1)	3 1)1)	1 2)2)	2 2)2)	3 2)2)
1 (3)3)	2 3)3)	3 3)3)	1 (1)2)	2 (1)2)	3 (1)2)
1 (2)3)	2 2)3)	3 2)3)	1 3)1)	2 3)1)	3 3)1)
1 (1)3)	2 (1)3)	3 1)3)	1 (3)2)	2 (3)2)	3 (3)2)
1 (2)1)	2 2)1)	3 2)1)			

TTT

1 2 3	3 1 2	2 3 1	1 3 2	3 2 1	2 1 3
1 2 2	2 1 2	2 2 1	1 3 3	3 1 3	3 3 1
2 1 1	1 2 1	1 1 2	2 3 3	3 2 3	3 3 2
3 1 1	1 3 1	1 1 3	3 2 2	2 3 2	2 2 3
1 1 1	2 2 2	3 3 3			

TTR

1 1(1)	1 1 2)	1 1 3)	2 2(1)	2 2 2)	2 2 3)
3 3(1)	3 3(2)	3 3(3)	1 2(1)	1 2 2)	1 2(3)
2 3(1)	2 3(2)	2 3(3)	3 1(1)	3 1(2)	3 1(3)
1 3(1)	1 3(2)	1 3(3)	3 2(1)	3 2 2)	3 2 3)
2 1(1)	2 1(2)	2 1(3)			

TRT

1 ① 1	1 ② 1	1 ③ 1	2 ① 2	2 ② 2	2 ③ 2
3 ① 3	3 ② 3	3 ③ 3	1 ① 2	1 ② 2	1 ③ 2
2 ① 3	2 ② 3	2 ③ 3	3 ① 1	3 ② 1	3 ③ 1
1 ① 3	1 ② 3	1 ③ 3	3 ① 2	3 ② 2	3 ③ 2
2 ① 1	2 ② 1	2 ③ 1			

RTT

1)1)1	2)1)1	3)1)1	1)2)2	2)2)2	3)2)2
1)3)3	2)3)3	3)3)3	1)1)2	2)1)2	3)1)2
1)2)3	2)2)3	3)2)3	1)3)1	2)3)1	3)3)1
1)1)3	2)1)3	3)1)3	1)3)2	2)3)2	3)3)2
1)2)1	2)2)1	3)2)1			

de lucru. Acest deziderat poate fi realizat de un mecanism spațial desmodrom, care are cel puțin trei grade de mobilitate. Mișcarea se poate realiza printr-un lanț cinematic cu cel puțin patru elemente și trei cuple cinematice inferioare, de rotație (R) sau de translație (T).

Combinând corespunzător cuplele cinematice în lanțuri cinematice spațiale, se constată că se obține un număr de $2^3 = 8$ variante (tab.4.3).

Tabelul 4.3

RRR	RRT	RTR	TRR
TTT	TTR	TRT	RTT

Orientând mișcările de rotație și respectiv translație, în jurul și în lungul axelor unui sistem rectangular ($Oe_1e_2e_3$), se obțin $3^3 = 27$ combinații.

Prin urmare, numărul total de posibilități de structură, rezultă din înmulțirea variantelor structurale cu numărul combinațiilor : $8 \times 27 = 216$ lanțuri cinematice (fig.4.2, a...g).

Eliminând variantele identice și cele care nu dau spațiu de lucru tridimensional, rămâne un număr de 28 lanțuri cinematice distincte posibile (tab.4.4).

Tabelul 4.4

RRR	① ① ②	① ② ①	① ② ②	① ② ③	① ③ ②
RRT	① ① 1	① ② 1	① ② 2	① ② 3	① ③ 2
RTR	① 1 ①	① 1 ②	① 2 ②	① 2 ③	① 3 ②
TRR	1 ① ①	1 ① ②	1 ② ①	1 ② ③	1 ③ ②
TTT	1 2 3				
TTR	1 2 ①	1 2 ②			
TRT	1 ① 2	1 ② 2	1 ② 1		
RTT	① 1 2	① 2 1			

Ele se pot constitui în structuri ale M.G.T. din componenta roboților industriali. Figura 4.3 prezintă schemele cinematice ale acestor 28 de variante.

Aceste variante sînt distincte din punct de vedere al structurii cinematice, precum și al spațiului de lucru pe care îl realizează.

Fig. 4.3

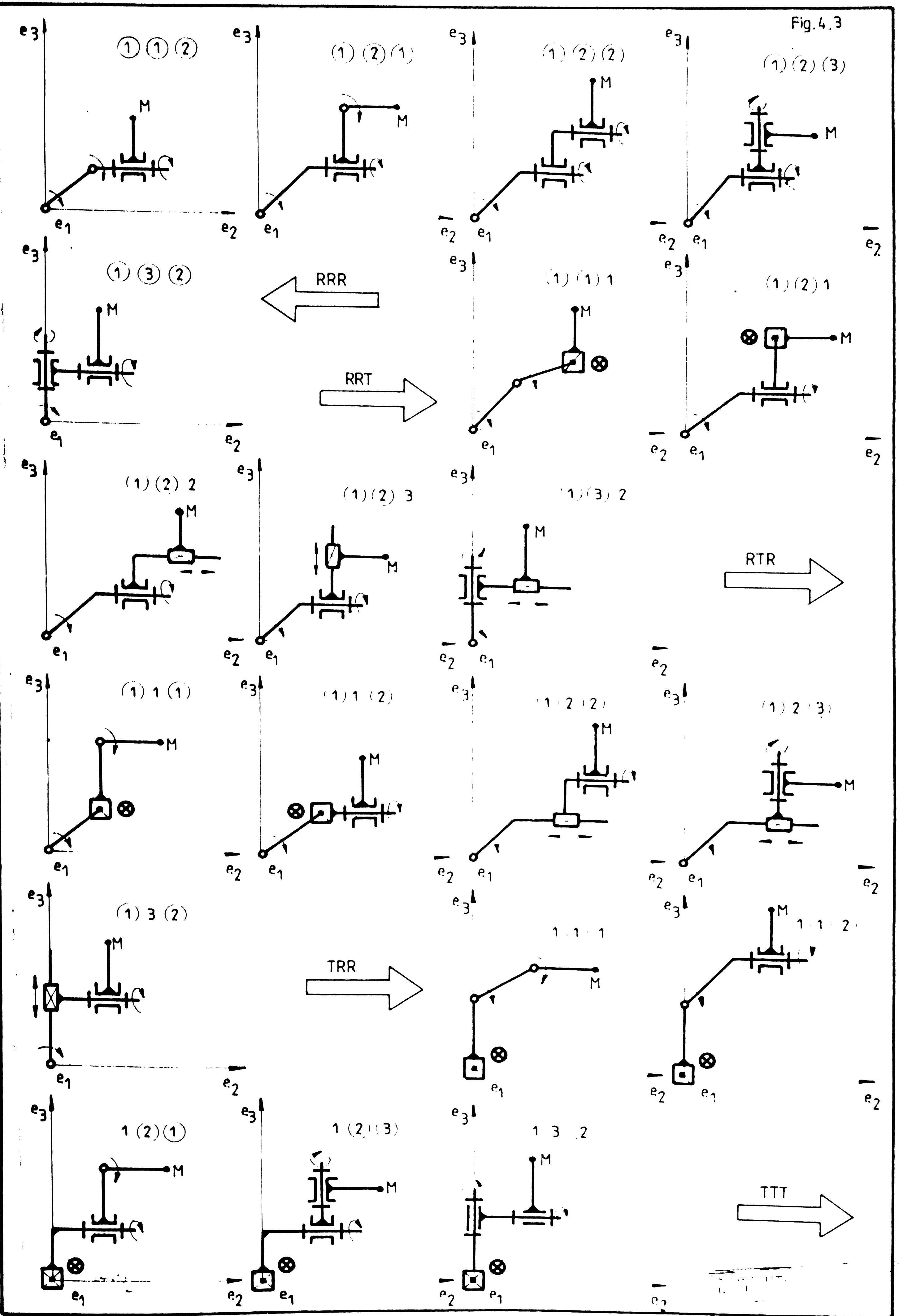


Fig. 4.3 (continuare)

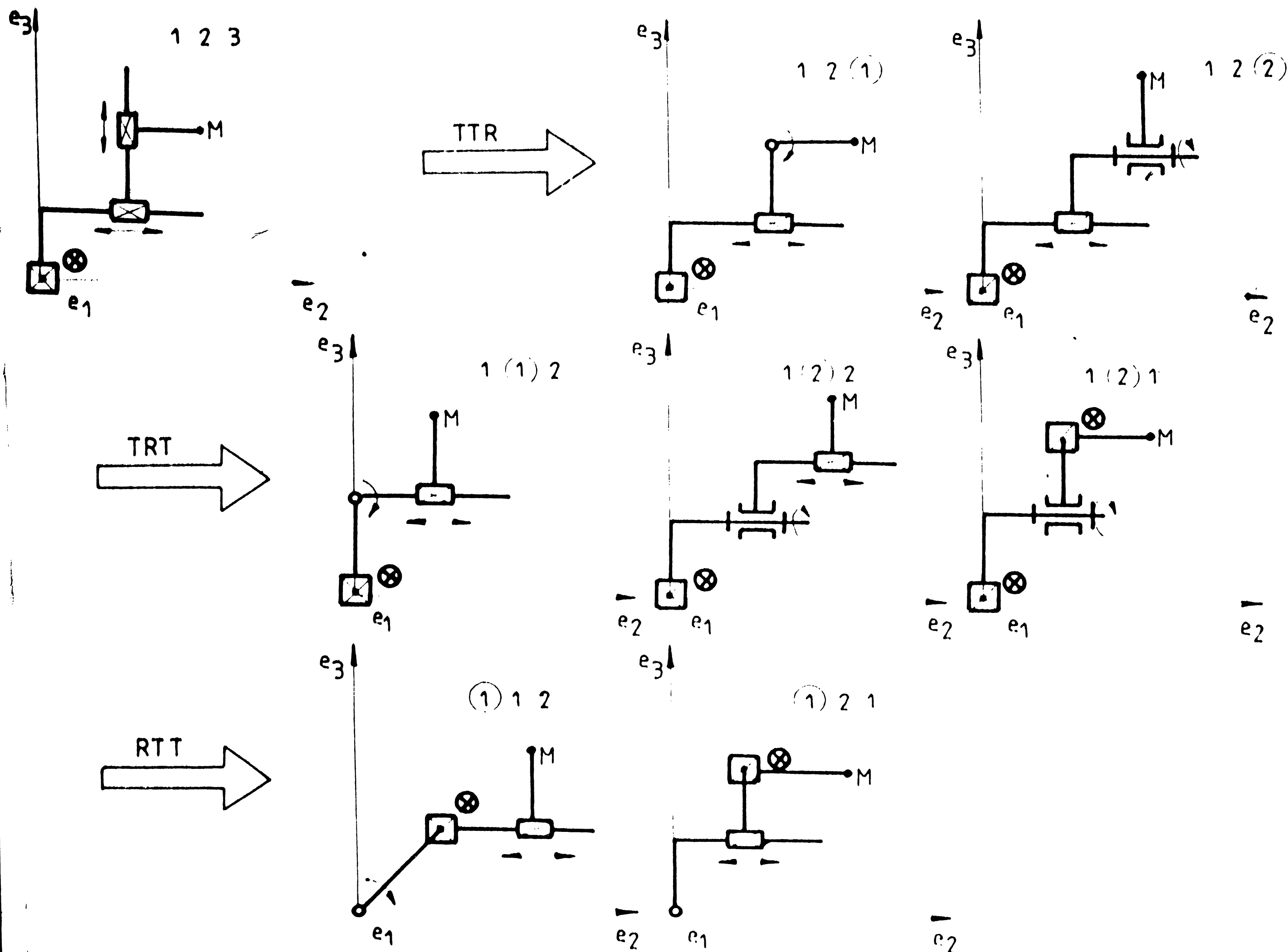
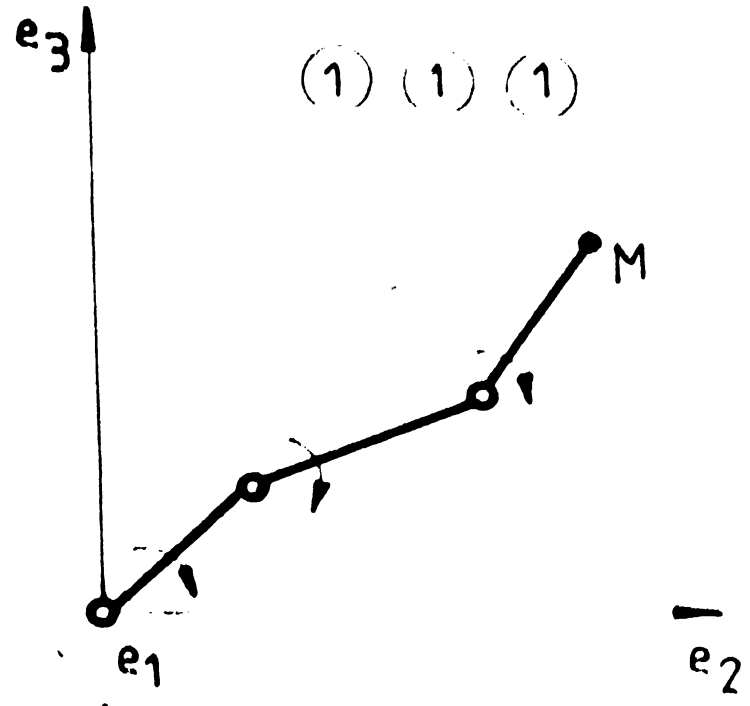
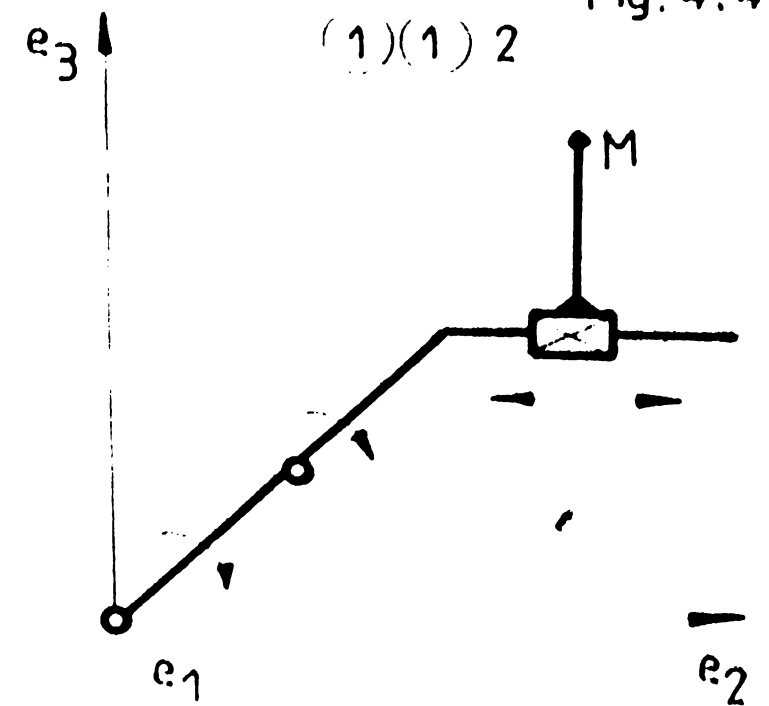


Fig. 4.4

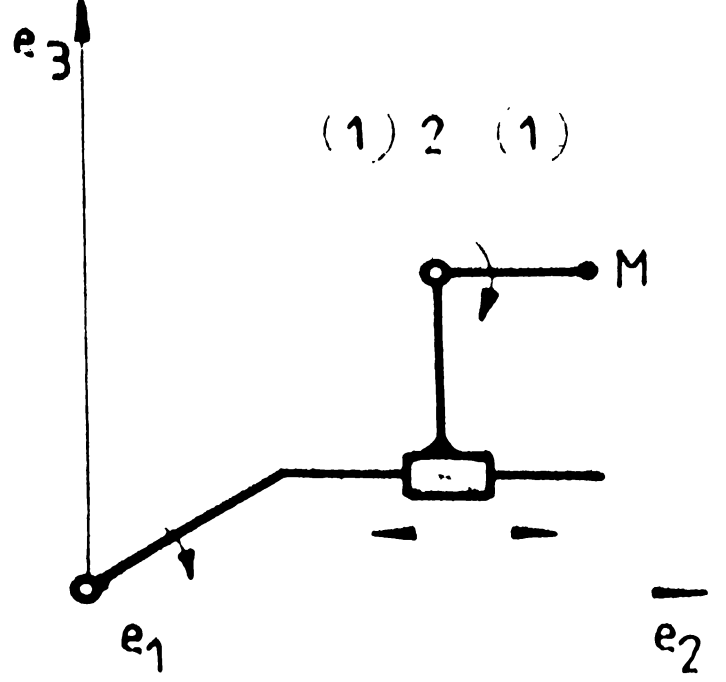
RRR →



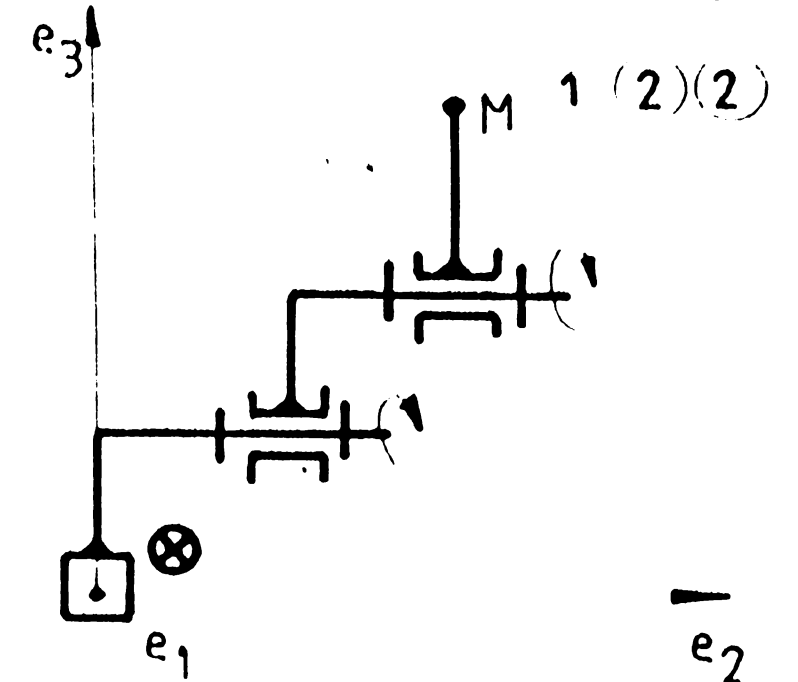
RRT →



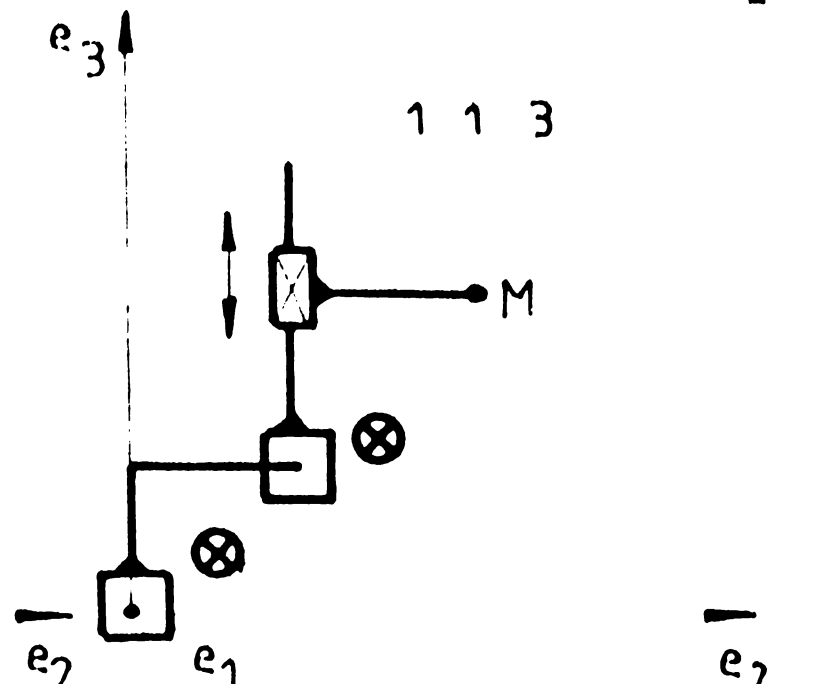
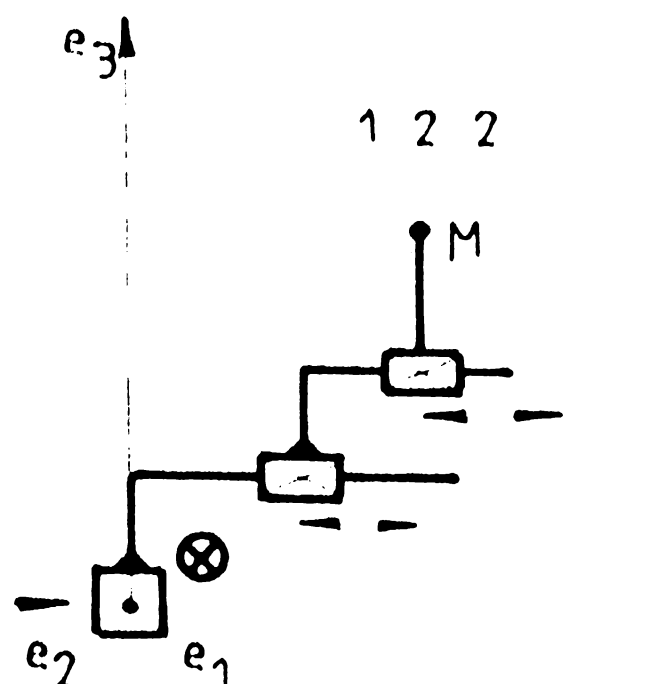
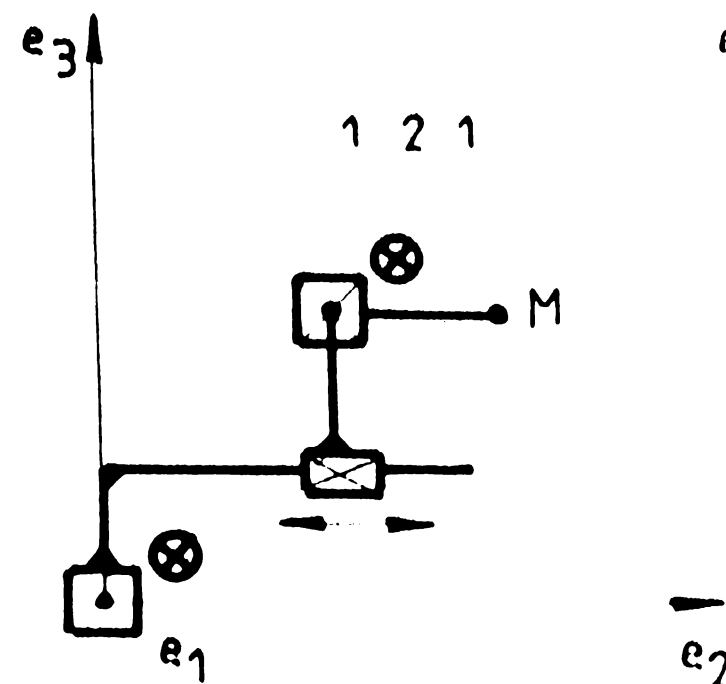
RTR →



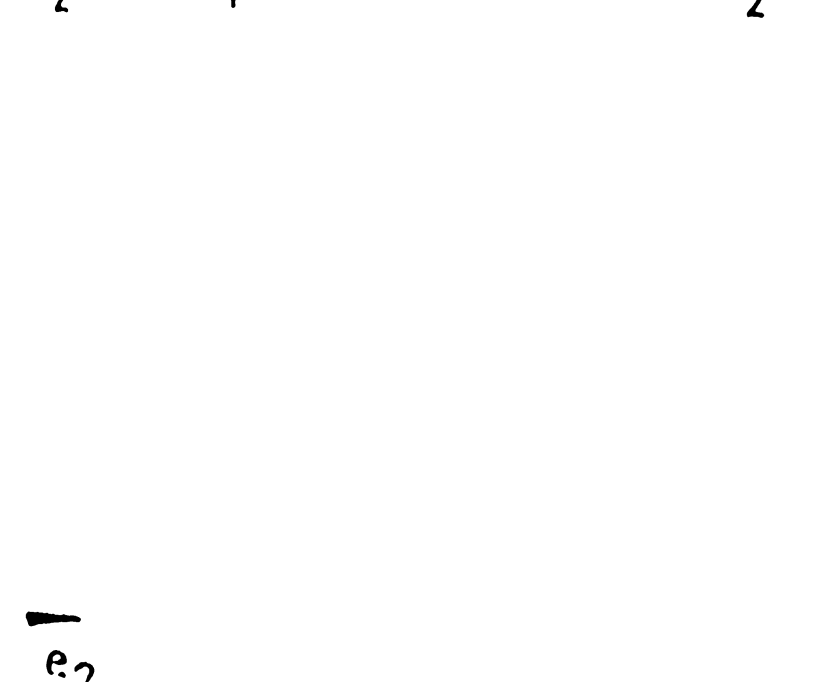
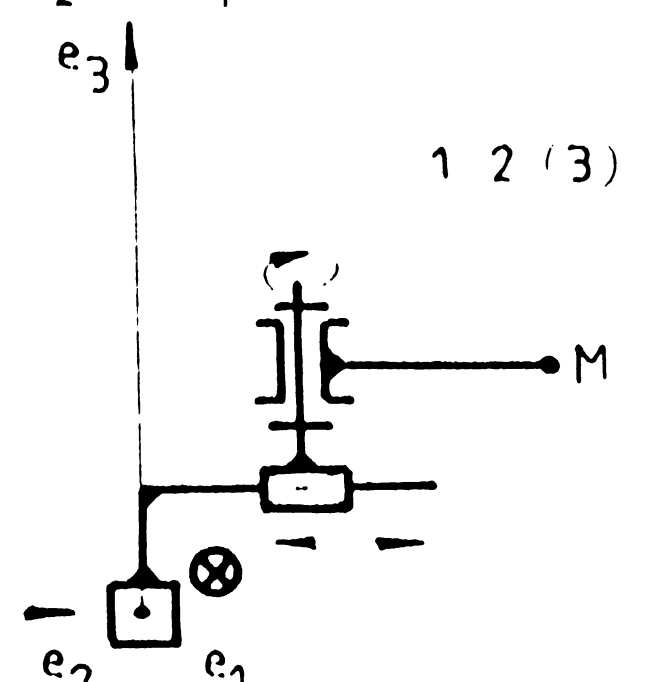
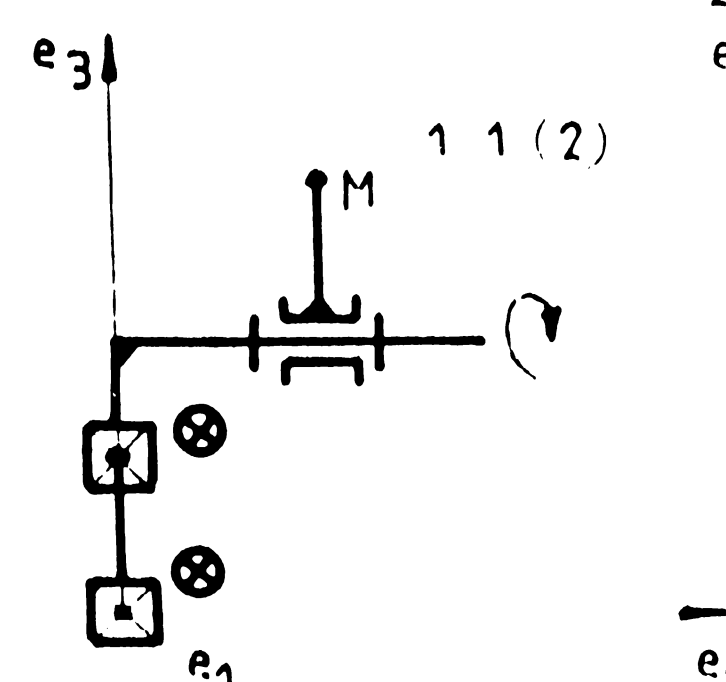
TRR →



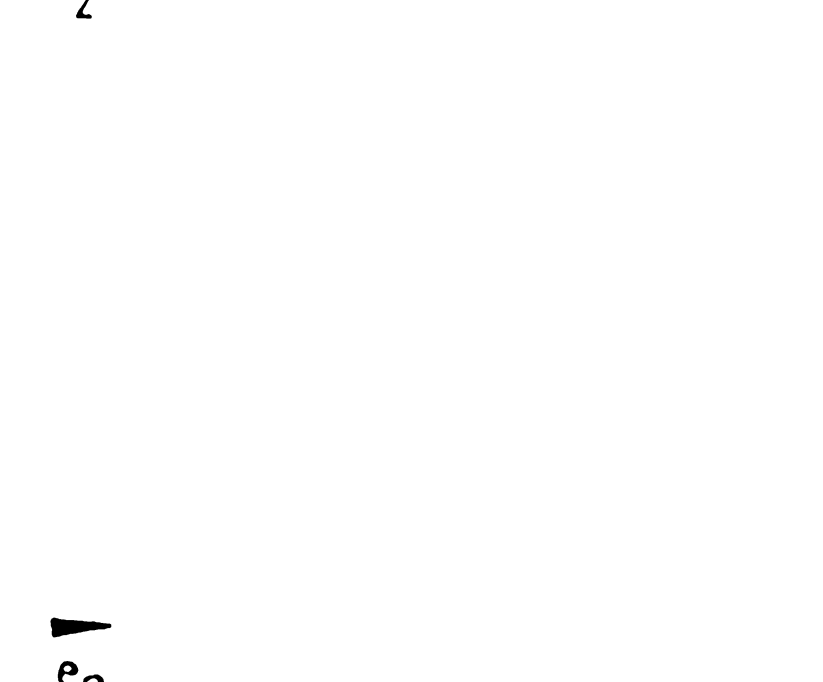
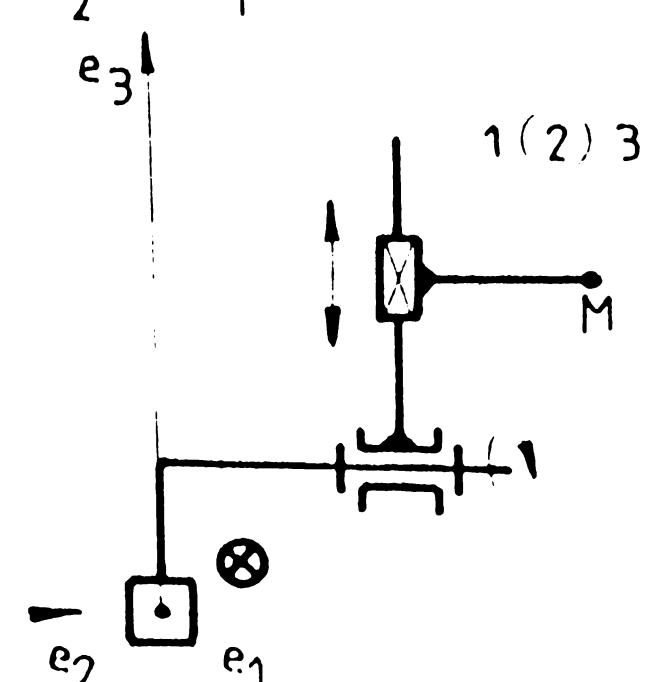
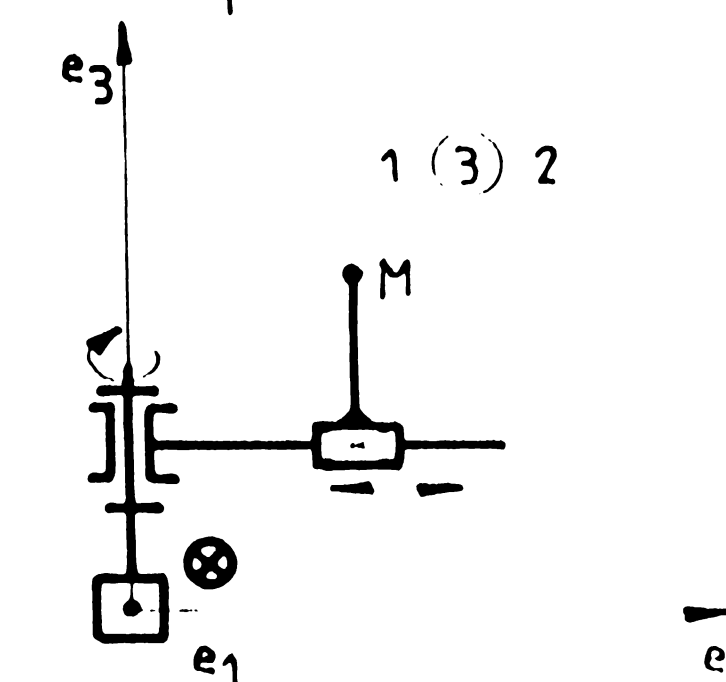
TTT →



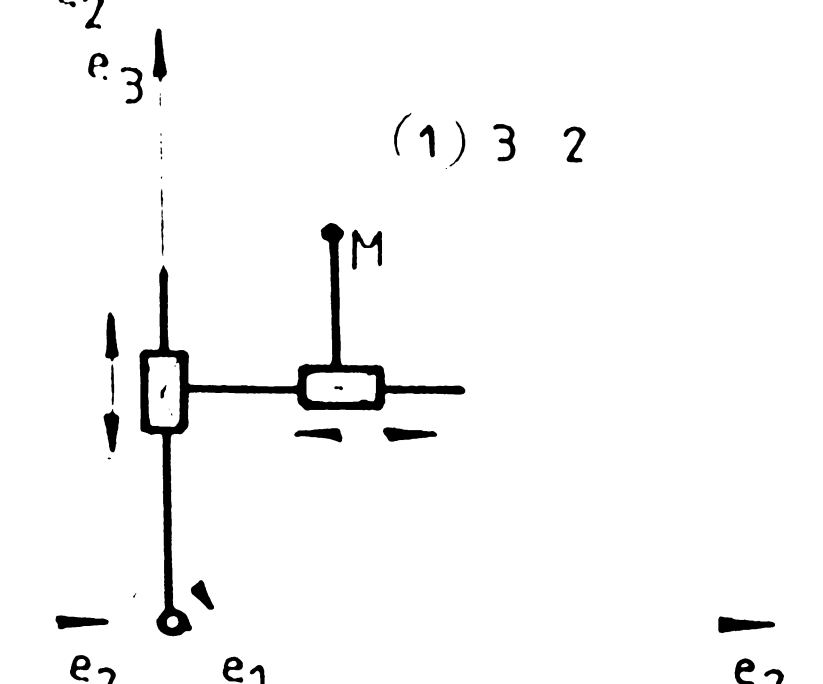
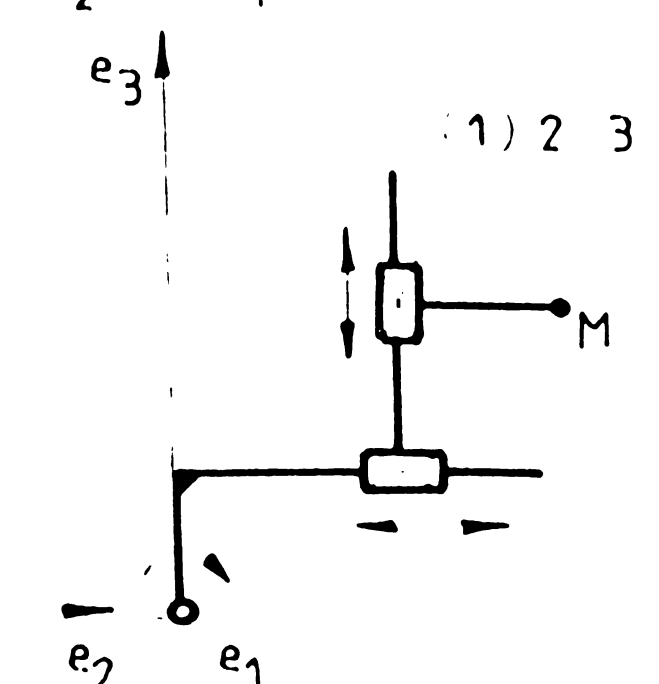
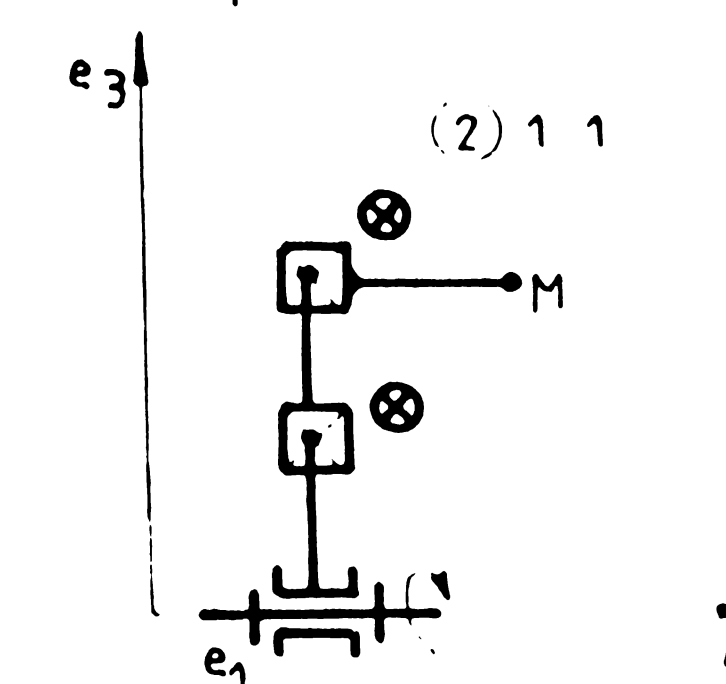
TTR →



TRT →



RTT →



Pe de altă parte, din ansamblul de variante existente, se desprinde un număr de 14 structuri distincte, care dau un spațiu de lucru degenerat (plan).

Acestea nu trebuie neglijate, mai ales că în foarte multe cazuri ele compun lanțuri cinematice din structura M.G.T. existente. În aceste cazuri se pot obține spații de lucru tridimensionale prin completarea acestor structuri cu cuple cinematice sau lanțuri cinematice suplimentare.

Asemenea situații necesită în mod deosebit variantele de roboți evoluți cu grad de manevrabilitate ridicată.

În tabelul 4.5 și figura 4.4 sînt prezentate variantele în discuție, precum și schemele cinematice aferente.

Tabelul 4.5

RRR	1 1 1	TTT	1 2 1	1 2 2	1 1 3
RRT	1 1 2	TTR	1 1 2	1 2 3	
RTR	1 2 1	TRT	1 3 2	1 2 3	
TRR	1 2 2	RTT	2 1 1	1 2 3	1 3 2

4.1.3. Sinteza structurală a lanțurilor cinematice componente a M.G.T. utilizînd noțiunea de conexiune

După cum este cunoscut, desmodromia mecanismelor se obține ca urmare unor constrîngerii impuse în mișcarea relativă a elementelor și cuplelor cinematice conducătoare și conduse. Constrîngerile amintite se realizează prin limitarea gradelor de libertate și mișcări relative ale elementelor respective, pe calea unor restricții geometrice impuse acestor mișcări. Totalitatea mijloacelor, care realizează constrîngerii în mișcare relativă elementelor unui mecanism, poartă denumirea de conexiune /K35/, /K36/

Conexiunile pot impune constrîngerile sus amintite, fie prin contactul direct dintre elemente - ele avînd în acest caz, natura unor cuple cinematice (conexiuni de tip A) - fie prin introducerea unui element, care se leagă de cele două în discuție prin intermediul a două cuple cinematice (conexiunea de tip B) sau printr-un

lanț cinematic cu mai multe elemente și cuple cinematice, introduse între elemente în mișcarea rotativă, cărora li se impun restricții (conexiunea de tip C).

Date fiind n_k - numărul de elemente, ci_k - numărul cuplelor cinematice de clasă i conținute în conexiune, Lp_k și Lid_k - numărul gradelor de libertate ale legăturilor pasive, respectiv cel al gradelor de libertate de prisos, introduse în mecanism prin intermediul conexiunii. Gradul de libertate al conexiunii se poate calcula cu relația :

$$L_k = 6 n_k - \sum_{i=1}^5 i \cdot ci_k - Lp_k - Lid_k \quad (4.17)$$

În cazul în care gradul de libertate al conexiunii este mai mic decât zero, conexiunea limitează cu acea valoare gradele de libertate în mișcare relativă ale elementelor între care se interpune. Dacă gradul de libertate al conexiunii este nul sau pozitiv, conexiunea nu limitează mișcarea relativă a elementelor între care se interpune, ci dimpotrivă, majorează cu o valoare gradul de libertate al lanțului cinematic, în care se introduce.

În vederea sintezei structurale a lanțurilor cinematice din componența M.G.T. se introduce noțiunea de conexiune tip K_{BD} incompletă sau deficientă.

Se adoptă notația $K_{BD}()$. O asemenea conexiune este compusă dintr-un element și o cuplă cinematică potențială (fig.4.5).

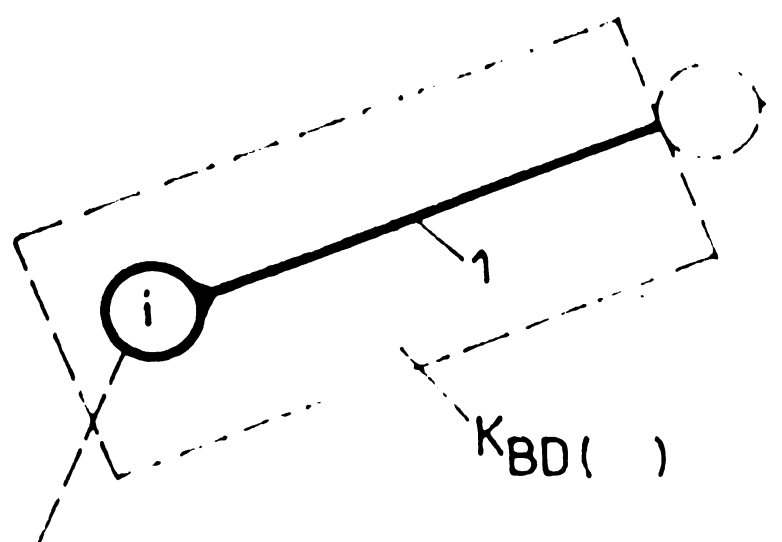


Fig.4.5

pentru conexiuni plane.

Particularizînd relația (4.17) pentru această situație, cînd :

$$\begin{aligned} n_k &= 1 \\ ci_k &= 1 \end{aligned}$$

obținem :

$$L_{K_{BD}} = 6 - i - Lp_k - Lid_k \quad (4.18)$$

pentru conexiuni spațiale și

$$L_{K_{BD}} = 3 - i - Lp_k - Lid_k \quad (4.18')$$

Desigur cupla cinematică componentă poate să fie de orice clasă : 1,2,3,4,5 și prin urmare, conexiunile K_{BD} pot avea grade de libertate corespunzător acestora (fig.4.6).

Relația gradului de libertate al conexiunii, pentru fiecare caz, va lua forma :

$$L_{K_{BD}} = (5), (4), (3), (2), (1) - Lp_k - Lid_k \quad (4.19)$$

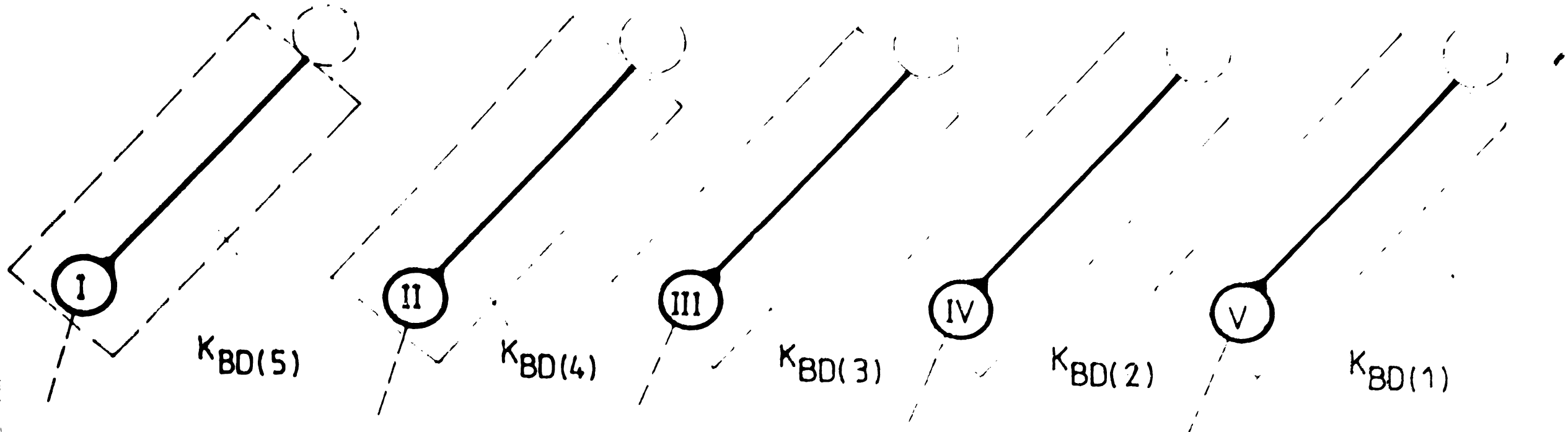


Fig.4.6

pentru conexiuni K_{BD} spațiale și :

$$L_{K_{BD}} = (2), (1) - L_{p_k} - L_{id_k} \quad (4.19')$$

pentru conexiuni plane.

Asamblarea unui număr de asemenea conexiuni poate conduce la lanțuri cinematice deschise, închise sau mixte, lanțuri care compun structura dispozitivului de ghidare, respectiv al mecanismului generator de traiectorie al R.I.

Gradul de libertate al unui lanț cinematic va fi obținut prin sumarea gradelor de libertate ale conexiunilor K_{BD} :

$$L_K = \sum_{j=1}^n L_{K_{BDj}} - L_{p_k} - L_{id_k} \quad (4.20)$$

Un asemenea tip de conexiune este deosebit de util în sinteza structurală a lanțurilor cinematice din componența D.G. a R.I. moderni, la construcția cărora există tendința de modularizare a structurilor.

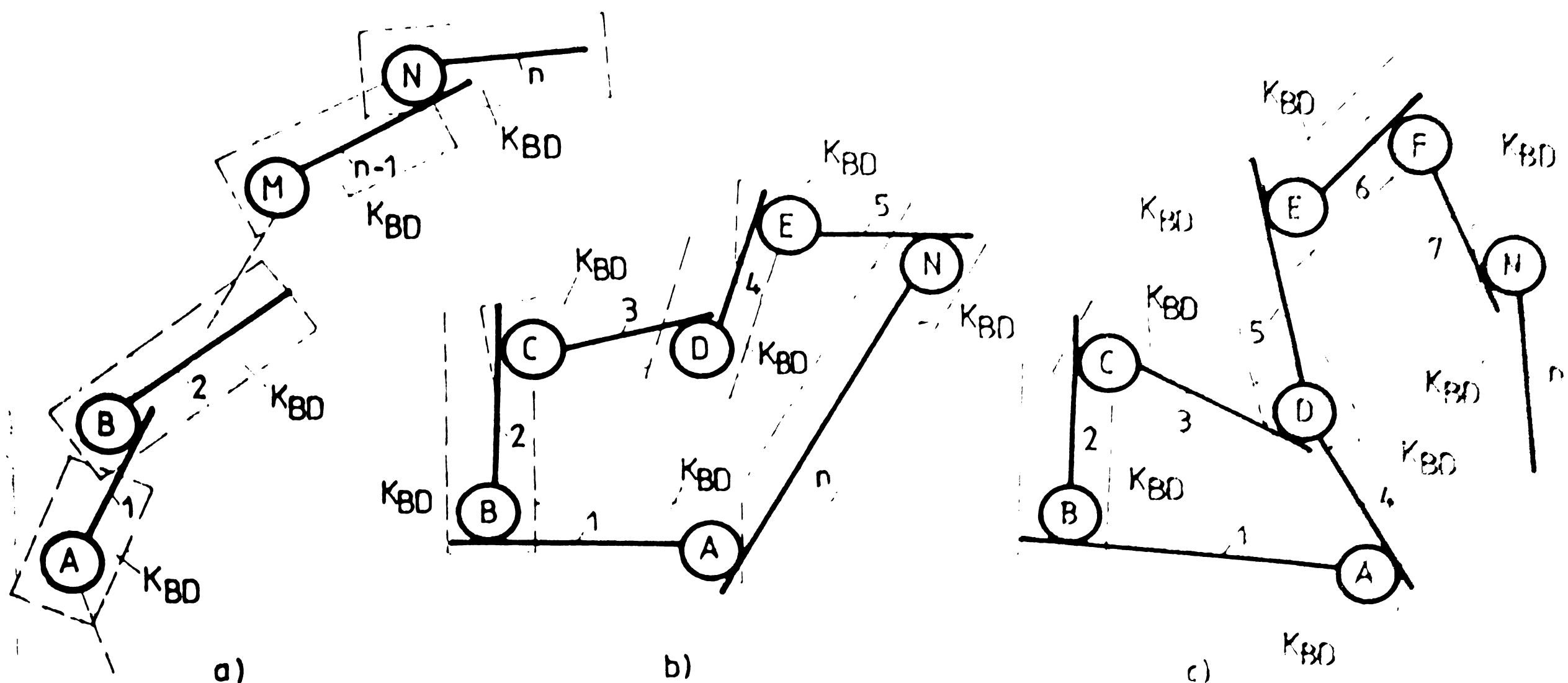


Fig.4.7

In figura 4.7 se prezintă câteva structuri de lanțuri cinematice obținute prin racordarea în diferite moduri a unui număr de conexiuni $K_{BD}()$

4.1.4. Analiza structurală a membrului superior uman

4.1.4.1. Structura anatomo-funcțională a scheletului membrului superior

In cercetările legate de structura și funcțiunile sistemului mecanic al roboților industriali, un deosebit interes îl prezintă analogiile cu membrele corpului uman. In mod deosebit se pune accent pe biomecanica membrului superior uman, între funcționalitățile căruia și cele ale dispozitivului de ghidare ale unui robot industrial există o serie de asemănări.

Un studiu asupra structurii membrului superior uman devine util, atât pentru cunoașterea caracteristicilor morfofuncționale ale organismului - interdependența dintre anatomie și biomecanică - precum și pentru obținerea de date necesare în procesul de modelare al operațiilor "humanoide" de către instalații de tip robot industrial sau de tip proteze funcționale.

Lanțul cinematic al "dispozitivului de ghidare" este compus din 14 "elemente", dintre care 13 cu rol funcțional în biomecanica membrului superior.

Acestea sînt prezentate în figura 4.8 a,b,c după cum urmează : coșul pieptului, sternul, coastele (elementul 0), omoplatul (1), clavicula (2), osul humerus (3), radius (4), cubitus (5).

Aceste "elemente" împreună cu cuplele aferente compun lanțul cinematic al "mecanismului generator de traiectorie" a membrului superior uman, respectiv brațul-antebrațul acestuia.

In continuare, antebrațul se continuă cu gîtul mîinii, care joacă rol de "mecanism de orientare".

Elementele componente sînt : osul scafoid (6), osul semilunar (7), osul piramidal (8), osul trapez (9), osul trapezoid (10) osul mare (11) și osul cu cîrlig (12).

Din enumerare a fost omis osul pisiform, amplasat pe osul piramidal, care nu prezintă rol cinematic.

Acest ansamblu de elemente participă la un număr de 21 cuple cinematice. Natura a efectuat în decursul sutelor de mii de

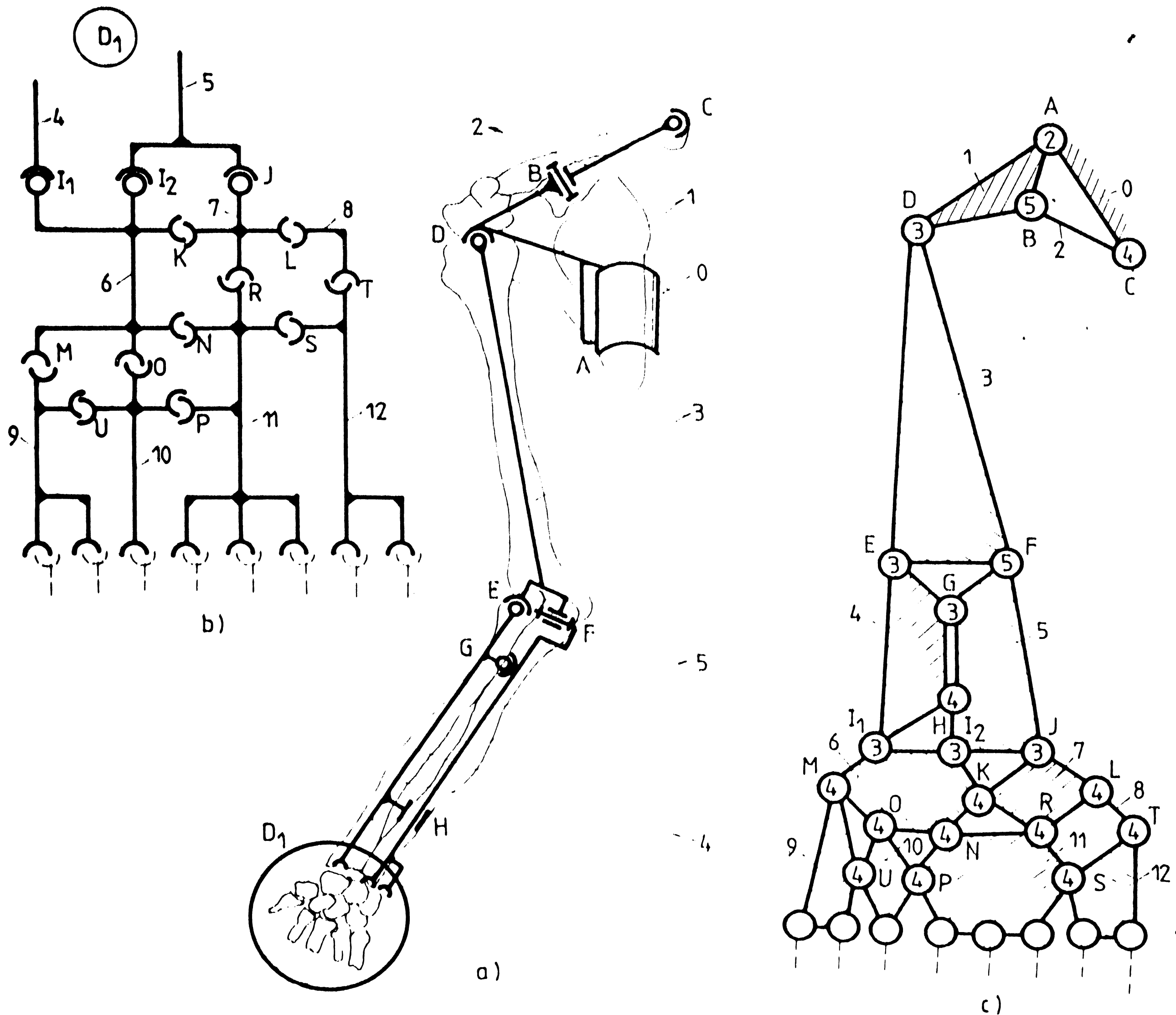


Fig.4.8

ani de existență a speciei umane, o remarcabilă "tipizare a formei geometrice" a zonelor de contact ale cuplelor cinematice.

Cuplele participante la lanțul cinematic sînt :

- articulația (joncțiunea) scapulotoracică (A), care nu este o cuplă cinematică în accepțiunea clasică, dar dată fiind importanța funcțională a acesteia, ea este încadrată în grupa articulațiilor de tip sissarcoze, adică a articulațiilor fără elemente articulare tipice. Ea asigură patru grade de libertate ,

- articulația acromioclaviculară (B) este o articulație plană, care permite omoplatului să realizeze basculări cu amplitudini mai mari. Asigură un grad de libertate ,

- articulația sternocostoclaviculară (C) este o diartroză prin dublă imbucare (o articulație selară), care permite claviculei două grade de libertate ;

- articulația scapulohumerală sau articulația propriu-zisă a umărului (D) este o articulație sferică (o enartroză), fiind articulația cea mai mobilă a corpului uman /B6/. Cele trei grade de libertate se materializează prin mișcări de abducție-adducție (în planul frontal F - fig.4.9), proiecție înainte și înapoi (în planul sagital S) și rotație internă și externă (în planul transversal T). Amplitudinile maxime normale ale acestor mișcări sînt prezentate în tabelul 4.6.

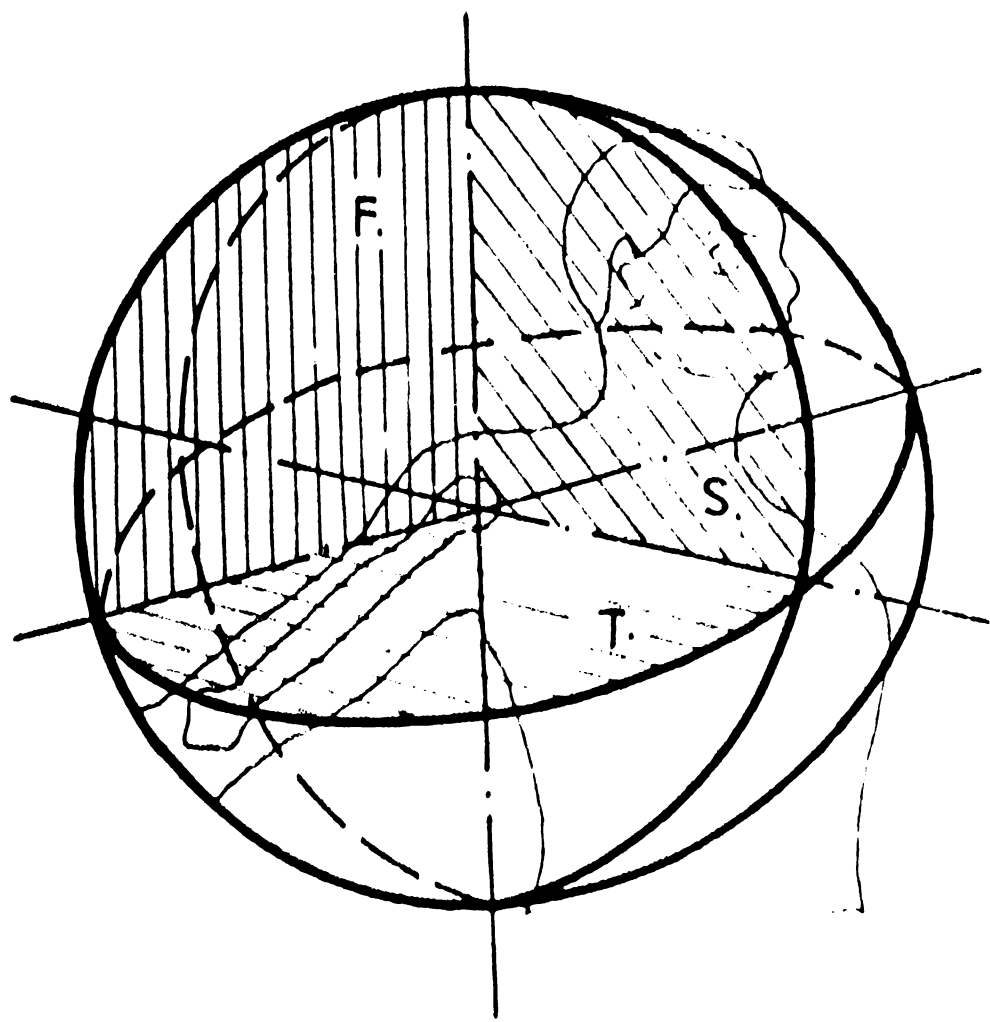


Fig.4.9

sînt reprezentate de trohlee și condilul humeral, marea cavitate sigmoidă a cubitusului și cupșoara radială.

Extremitatea superioară a radiusului (cupșoara radială), formează împreună cu condilul humeral o articulație sferică (E), iar extremitatea superioară a cubitusului (cavitatea sigmoidă) formează împreună cu trohleea humerală o articulație (F) cu un grad de libertate. Mișcările posibile realizate la nivelul articulației humerocubitoradiale sînt cele de flexie și extensie ale antebrațului față de braț.

- Articulațiile radiocubitale - superioară (G) și inferioară (H) - sînt articulații cilindroide de tip trohoid, care prezintă fiecare cîte un grad de libertate. Datorită faptului că radiusul și cubitusul nu-și dispun extremitățile în același punct (radiusul prelungindu-se mai jos, iar cubitusul mai sus) mișcarea radiocubitală necesită ca articulația G să posede trei grade de libertate (sferică), iar articulația H două grade de libertate (rototranslație). Aceste articulații participă la realizarea

Urmărind în continuare lanțul cinematic al membrului superior uman, întîlnim :

- articulația humerocubitoradială, care este o trohleartroză, respectiv o cilindroidă cu un grad de libertate.

Suprafețele articulare

mişcărilor de supinație-pronație (tabel 4.6) ;

- articulația radiocarpiană este o diartroză condiliană și este compusă la nivelul cavității glenoide antebrațiale de formă elipsoidală a antebrațului cu osul scafoid (articulațiile sferice I_1, I_2) și cu osul semilunar (articulația sferică J) ;

Tabelul 4.6

Articulația	Mișcarea	Amplitudinea maximă
Scapulohumerală (umăr)	Abducție-adducție	$72^\circ - 0^\circ - 72^\circ$
	Proiecție înainte- înapoi	$95^\circ - 0^\circ - 20^\circ$
	rotație internă - externă	$95^\circ - 0^\circ - 80^\circ$
Humero-cubito- radială (cot)	Flexie-extensie	$150^\circ - 0^\circ - 150^\circ$
Antebraț-gâtul mîinii	Supinație-pronație	$150^\circ(180^\circ) - 0^\circ - 150^\circ$
	Flexie-extensie	$90^\circ - 0^\circ - 75^\circ$
	Abducție-adducție	$40^\circ - 0^\circ - 15^\circ$

- articulațiile intercarpiene se formează între părțile laterale ale oaselor carpiene. Sînt caze asemenea articulației (K, L, N, P, S, U), fiecare prezentînd două grade de libertate ;

- articulația mediocarpiană unește primul rînd al oaselor carpiene cu rîndul al doilea și este compusă din patru cuple cinematice (M, O, R, T), fiecare cu două grade de libertate.

Ansamblul "gâtului mîinii", respectiv oasele carpiene împreună cu cuplele aferente, asigură celelalte două perechi de mișcări posibile de realizat a mîinii propriu-zise și anume : flexie-extensie și abducție-adducție (tabel 4.6).

Analizînd în ansamblu gradul de mobilitate al lanțului cinematic al "dispozitivului de ghidare" al membrului superior uman, se constată că are valoarea $M = 13 / K3/$ și prin urmare, gradul de manevrabilitate $M_g = 7$, ceea ce explică deosebita dexteritate a omului în efectuarea unor "operații humanoide".

Așa cum s-a arătat, acest studiu privind structura anatomo-funcțională a membrului superior uman, poate fi utilizat cu succes în tentativele de modelare a mișcărilor acestuia - în cazul unor dispozitive de protezare (proteze funcționale, orteze) - sau pentru realizarea unor lanțuri cinematice (structuri mecanice) din

componența manipuletoarelor sau roboților industriali.

4.1.4.2. Analiza structurală a lanțului cinematic
component al membrului superior uman
Lanț cinematic echivalent

Urmărind schema structurală a lanțului cinematic component al membrului superior uman (fig.4.8,c), se remarcă faptul că ansamblul de cuple cinematice lucrează ca un tot unitar impunând restricții asupra posibilităților de mișcare ale celor 12 elemente mobile.

Lanțul cinematic respectiv poate fi analizat numai dacă se are în vedere posibilitățile de mișcare (mișcările finale) efectuate de segmentele componente ale membrului superior (braț-antebraț-gîtul mîinii). Fiecare element, fiecare cuplă cinematică execută sau permite astfel de mișcări, înfapt să se asigure mișcări cu amplitudini impuse segmentelor amintite.

Prin urmare, un studiu asupra membrului superior poate fi efectuat pe un lanț cinematic, care asigură mișcările existente ale acestuia.

În figura 4.10 se prezintă acest lanț cinematic echivalent. Întrucît mișcările executate de omoplat și claviculă sînt foarte greu de modelat, în practica de protezare, acestea împreună cu cuplele aferente se înglobează în elementul fix. Deci prima cuplă cinematică a lanțului cinematic echivalent este articulația propriu-zisă a umărului, respectiv articulația sferică scapulo-humerală. În studiul cinematic, această cuplă se poate înlocui cu trei cuple inferioare, cu axele concurente. Cele trei mișcări în această cuplă se efectuează după axele perpendiculare pe planurile caracteristice (sagital, frontal și transversal).

Articulația cotului sau humero-cubito-radială permite, în realitate, doar mișcări de flexie-extensie și prin urmare, se asimilează cu o cuplă cinematică inferioară.

Mișcările gîtului mîinii (tab.4.6) pot fi executate, fiecare, pe cîte o cuplă cinematică inferioară.

Prin urmare, lanțul cinematic echivalent se continuă cu trei cuple cinematice inferioare cu axele perpendiculare.

Concluzionăm că lanțul cinematic echivalent este compus din 11 elemente și cinci cuple cinematice.

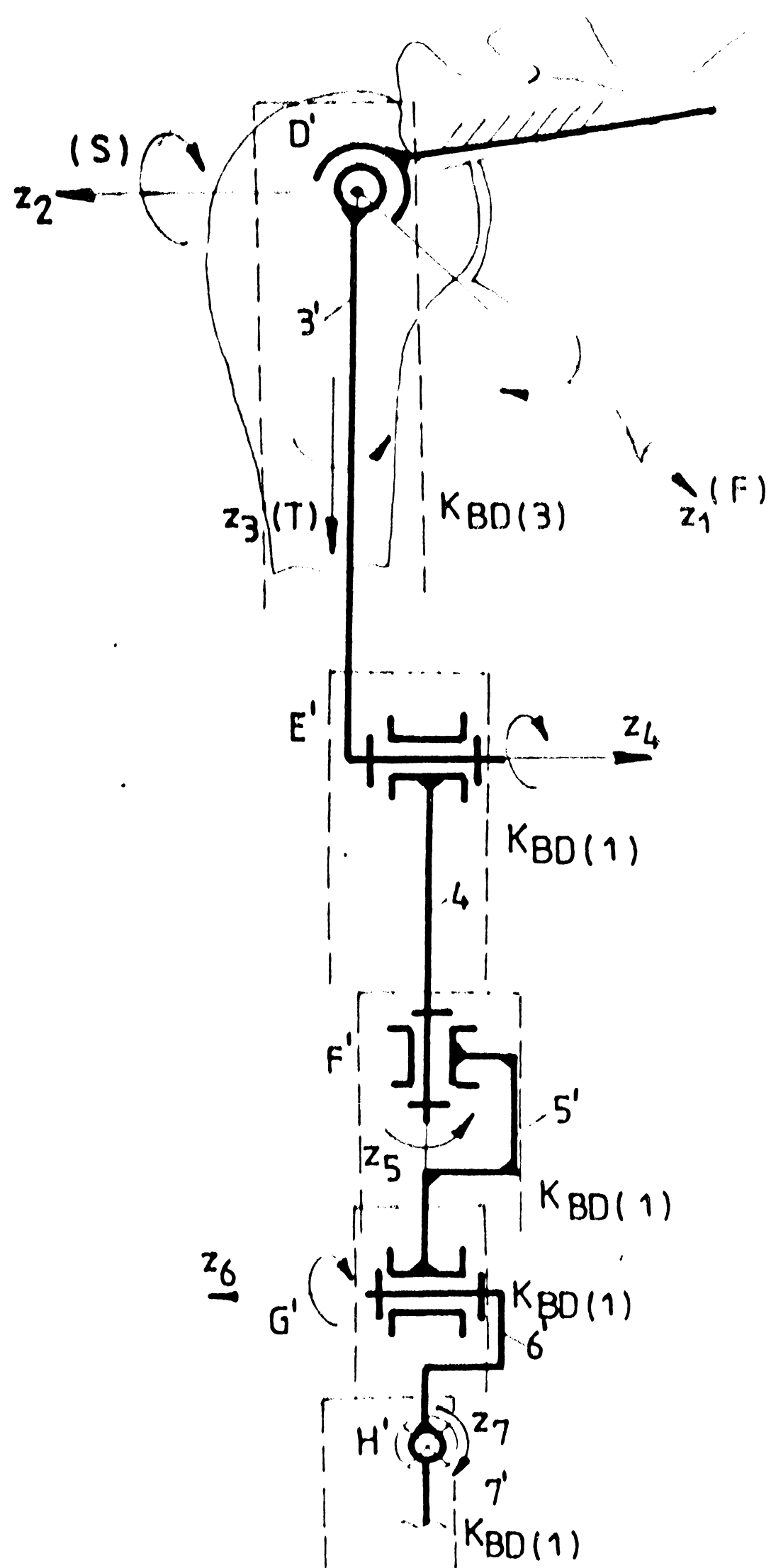


Fig. 4.10

Impărțind în conexiuni K_{BD} , se observă imediat gradul de mobilitate al lanțului cinematic echivalent $M_e = 7$.

4.2. Considerații asupra matricilor de transformare

4.2.1. Matrici de transformare funcționale și constructive

În capitolul 3 au fost prezentate matricile de transformare (A_n) utilizate în vederea scrierii parametrilor cinematici în cadrul lanțurilor cinematice deschise, conținând cuple cinematice inferioare.

Criteriul sau convenția Hartenberg-Denavit, vine să simplifice ecuațiile de legătură, care pot fi scrise între mișcările diferitelor elemente ale lanțului.

Expresiile matricilor de transformare (3.12), respectiv (3.13) sînt scrise utilizînd convenția enunțată mai sus.

Ele sînt deosebit de utile și pot fi utilizate cu succes pentru orice tip de lanț cinematic deschis, din structura roboților industriali.

Cu toate acestea, în situațiile în care forma spațială a elementelor cinematice componente ale lanțurilor este complexă, este foarte dificil de urmărit, concomitent, atât parametri constructivi legați de amplasarea spațială a cuplelor cinematice, precum și parametri funcționali, ce rezultă din mișcările

relative in cuplele cinematice.

In cele ce urmează, se propune o metodă de separare ale acestor două categorii de parametri, cu implicații în scrierea matricilor de transformare.

S-a văzut că matricea (3.12) a rezultat ca produsul a patru matrici simple, care definesc trecerea de la un sistem de referință la următorul, în sensul desfășurării lanțului cinematic. Ele definesc matematic mișcările de translație dintr-un sistem de re-

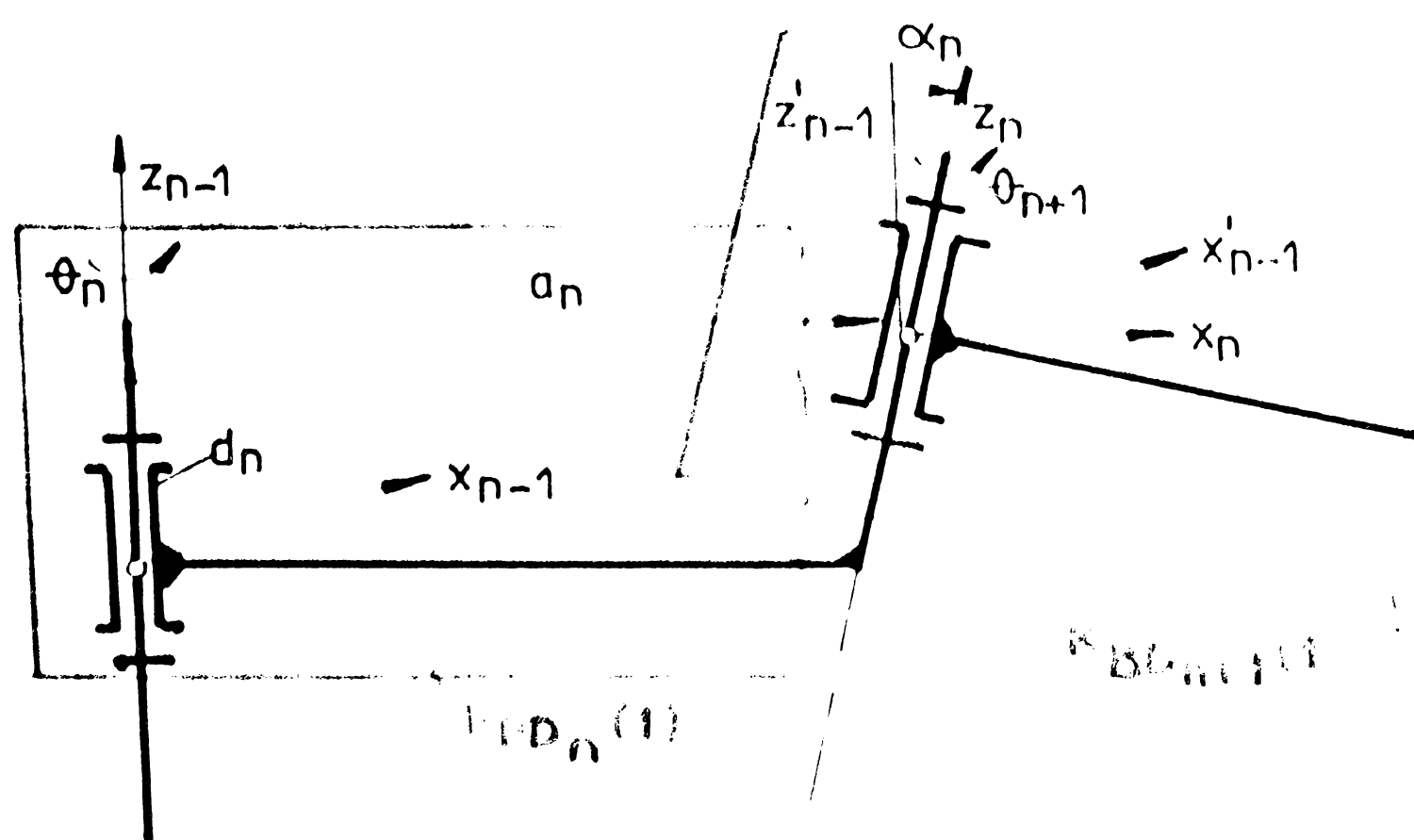


Fig.4.11

ferință în următorul, după cum urmează (fig.3.8 și 4.11) :

$$\text{Rot}(z_{n-1}, \theta_n) = \begin{vmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.21)$$

$$\text{Trans}(0, 0, z_{n-1} \rightarrow d_n) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.22)$$

$$\text{Transl}(x_n \rightarrow a_n, 0, 0) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.23)$$

$$\text{Rot}(x_n, \alpha_n) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.24)$$

Analizându-le pe rând, se constată că matricea (4.21) este legată de funcționalitatea cuplei cinematice. Această matrice se notează cu $Af_n(r)$ și se va numi, în continuare, matrice funcțională de transformare.

Prin urmare :

$$Af_n(r) = \begin{vmatrix} \cos \vartheta_n & -\sin \vartheta_n & 0 & 0 \\ \sin \vartheta_n & \cos \vartheta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.25)$$

Matricile 4.22, 4.23 și 4.24 reprezintă expresiile matematice legate de deplasările liniare (în lungul axei z_n și x_n) și respectiv unghiulare (rotire în jurul axei x_n), dictate de configurația constructivă a elementului interpus între cele două cuple în vederea poziționării cuplei următoare față de precedenta, precum și axa acesteia față de precedenta.

Intr-un cuvânt, se poate spune că toate aceste matrici exprimă parametri care țin seama de configurația geometrică a elementelor, respectiv amplasarea spațială a cuplelor cinematice ale lanțului cinematic.

Matricea produs de forma :

$$Ac_n(r) = \text{Transl}(0,0,d_n) \cdot \text{Transl}(a_n,0,0) \cdot \text{Rot}(x_n, \alpha_n) \quad (4.26)$$

se va numi, în continuare, matrice constructivă de transformare și va avea expresia :

$$Ac_n(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.27)$$

În aceste condiții, matricea (3.12) poate fi scrisă ca produs al matricilor (4.25) și (4.27)

$$A_n(r) = Af_n(r) \cdot Ac_n(r) \quad (4.28)$$

Cele două matrici de transformare se pot scrie pentru fiecare conexiune K_{BD} a lanțului cinematic, care conține cuplă cinematică de rotație.

Matricea (3.13), care definește transformarea de coordonate în situația interpunerii între două elemente a unei cuple cinematice de translație (fig.3.19 și 4.12), poate fi divizată în baza

aceluiasi raționament, în următoarele două matrici :

$$A_{fn}(t) = \text{Transl}(0,0,z_{n-1} \rightarrow d_n) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.29)$$

matricea de transformare funcțională și

$$A_{cn}(t) = \text{Rot}(z_{n-1}, \theta_n) \cdot \text{Rot}(x_n, \alpha_n) =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cdot \cos \alpha_n & \sin \theta_n \cdot \sin \alpha_n & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cdot \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \cdot \sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.30)$$

matricea de transformare constructivă.

Cele două matrici de transformare se pot scrie pentru fiecare conexiune $K_{BD}(1)$ a lanțului cinematic, care conține cuplă cinematică de translație.

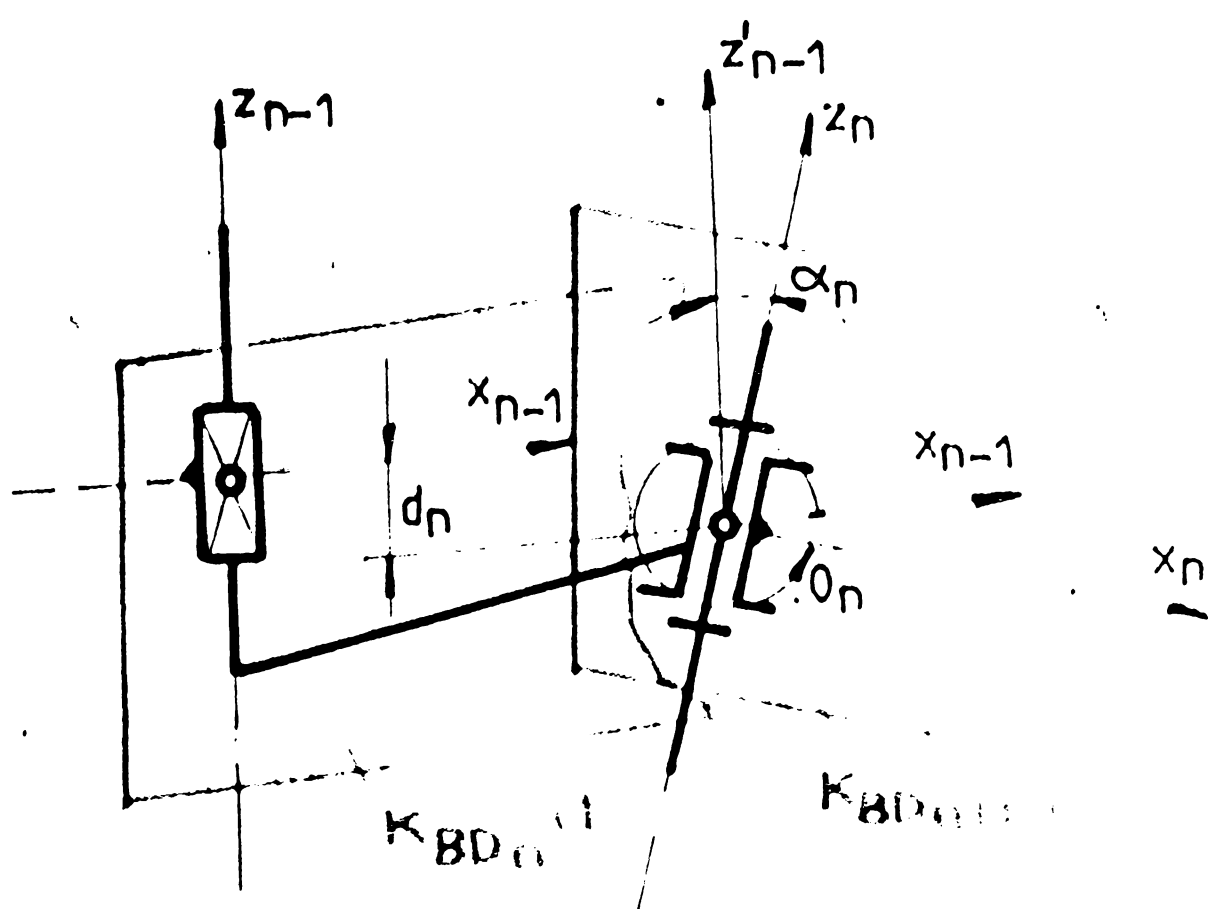


Fig.4.12

țul cinematic echivalent (fig.4.13). Se remarcă faptul că articulația umărului (scapulohumerală), care prezintă în ansamblu trei grade de libertate (cuplă sferică - cl.III), în prezentul studiu se înlocuiește cu trei cuple cinematice inferioare (de rotație) cu axe concurente în centrul mecanic al articulației.

Prin urmare, matricea de transformare din conexiunea $K_{BDn}(1)$ se obține din produsul :

$$A_n(t) = A_{fn}(t) \cdot A_{cn}(t) \quad (4.31)$$

4.2.2. Analiza pozițională a lanțului cinematic component al membrului superior uman

Problema analizei poziționale a membrului superior uman, se va efectua pe lan-

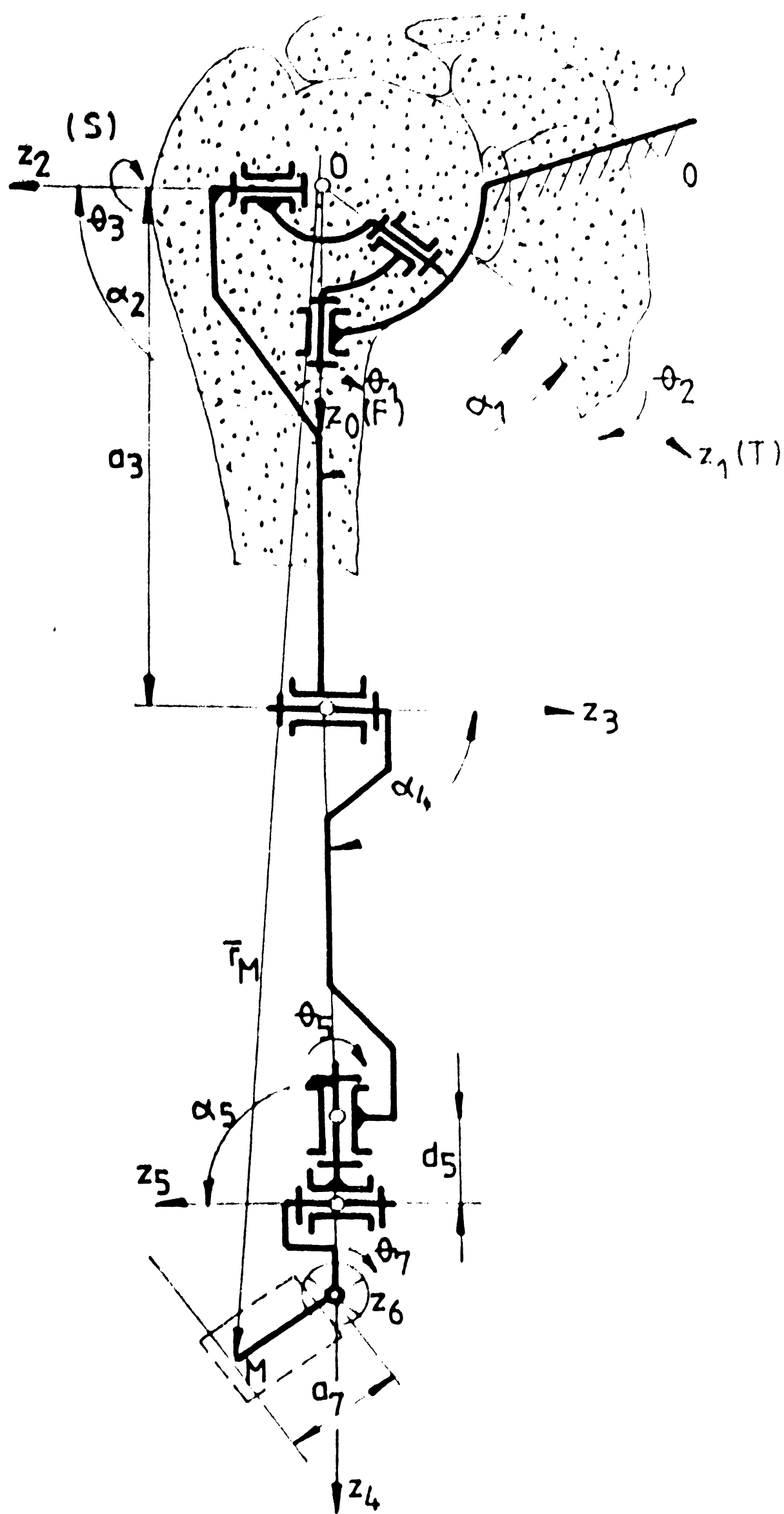


Fig.4.13

Direcțiile celor trei axe ale cuplelor cinematice, formează un triedru dextru și sînt orientate după direcția frontală, transversală și sagitală a articulației umărului. Alegînd în mod corespunzător axele celorlalte cuple ale lanțului cinematic, se pot scrie matricile de transformare de tip \$A^n_f, A^n_c\$ și respectiv \$A^n\$, în vederea determinării vectorului de poziție \$\vec{r}_M\$ al unui punct caracteristic, amplasat pe mina propriu-zisă (efector final). Urzîrind sistemele de axe acceptate, ansamblul parametrilor lanțului cinematic poate fi compus în tabelul 4.7.

Pe baza acestor date, utilizînd relații de tip (4.25) și (4.27) și notînd \$\sin\theta_n = S_n\$ și \$\cos\theta_n = C_n\$ se obține :

$$A^n_f(r) = \begin{vmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.32)$$

$$A^n_f(r) = \begin{vmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.34)$$

$$A^n_c(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.33)$$

$$A^n_c(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.35)$$

$$A^f_3(r) = \begin{vmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.36)$$

$$Ac_3(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.37)$$

$$A^f_4(r) = \begin{vmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.38)$$

$$Ac_4(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.39)$$

$$A^f_5(r) = \begin{vmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.40)$$

$$Ac_5(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.41)$$

$$A^f_6(r) = \begin{vmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.42)$$

$$Ac_6(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.43)$$

$$A^f_7(r) = \begin{vmatrix} C_7 & -S_7 & 0 & 0 \\ S_7 & C_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.44)$$

$$Ac_7(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_7 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.45)$$

Produsele acestor matrici, de forma :

$$\prod_{n=1}^7 A^f_n(r) \cdot Ac_n(r) \quad (4.46)$$

conduc la matricea de transformare generală $T = {}^0T_7$, ai cărei termeni (din 3.22) au următoarele valori :

$$\begin{aligned} a_x &= C_1 C_2 [(C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7)(C_3 C_4 + S_3 S_4) + S_6 S_7 (C_3 S_4 - S_3 C_4)] - C_1 S_2 (S_5 C_6 C_7 - \\ & - C_1 S_2 (S_5 C_6 C_7 - C_5 S_7) - S_1 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7)(S_3 C_4 - C_3 S_4) - S_1 S_6 S_7 (S_3 S_4 - C_3 C_4) \\ a_y &= S_1 C_2 [(C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7)(C_3 C_4 + S_3 S_4) + S_6 S_7 (C_3 S_4 - S_3 C_4)] - S_1 S_2 (S_5 C_6 C_7 - \\ & - C_5 S_7) + C_1 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7)(S_3 C_4 - C_3 S_4) + C_1 S_6 S_7 (S_3 S_4 - C_3 C_4) \\ a_z &= S_2 [(C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7)(C_3 C_4 + S_3 S_4) + S_6 S_7 (C_3 S_4 - S_3 C_4)] + C_2 (S_5 C_6 C_7 - C_5 S_7) \\ e_x &= C_1 C_2 [-C_5 S_6 (C_3 C_4 + S_3 S_4) + C_6 (C_3 S_4 - S_3 C_4)] + C_1 S_2 S_5 S_6 - S_1 C_5 S_6 (C_3 S_4 - \\ & - S_3 C_4) - S_1 C_6 (C_3 C_4 + S_3 S_4) \\ e_y &= S_1 C_2 [-C_5 S_6 (C_3 C_4 + S_3 S_4) + C_6 (C_3 S_4 - S_3 C_4)] + S_1 S_2 S_5 S_6 + C_1 C_5 S_6 (C_3 S_4 - \\ & - S_3 C_4) + C_1 C_6 (C_3 C_4 + S_3 S_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 o_x &= s_2 \left[-c_5 s_6 (c_3 c_4 + s_3 s_4) + c_6 (c_3 s_4 - s_3 c_4) \right] - c_2 s_5 s_6 \\
 a_x &= c_1 c_2 \left[(c_5 c_6 s_7 - s_5 c_7) (c_3 c_4 + s_3 s_4) + s_6 s_7 (c_3 s_4 - s_3 c_4) \right] - c_1 s_2 (s_5 c_6 s_7 + \\
 &\quad + c_5 c_7) - s_1 (c_5 c_6 c_7 - s_5 c_7) (s_3 c_4 - c_3 s_4) - s_1 s_6 s_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) \\
 a_y &= s_1 c_2 \left[(c_5 c_6 s_7 - s_5 c_7) (c_3 c_4 + s_3 s_4) + s_6 s_7 (c_3 s_4 - s_3 c_4) \right] - s_1 s_2 (s_5 c_6 s_7 + \\
 &\quad + c_5 c_7) + c_1 (c_5 c_6 c_7 - s_5 c_7) (s_3 c_4 - c_3 s_4) + c_1 s_6 s_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) \\
 a_z &= s_2 \left[(c_5 c_6 s_7 - s_5 c_7) (c_3 c_4 + s_3 s_4) + s_6 s_7 (c_3 s_4 - s_3 c_4) \right] + c_2 (s_5 c_6 s_7 + c_5 c_7) \\
 p_x &= c_1 c_2 \left[a_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + s_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + \right. \\
 &\quad \left. + a_3 c_3 \right] - c_1 s_2 a_7 (s_5 c_6 c_7 - c_5 s_7) - a_7 s_1 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + \\
 &\quad + s_1 (s_3 s_4 - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 s_1 s_3 \\
 p_y &= s_1 c_2 \left[a_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + s_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + \right. \\
 &\quad \left. + a_3 c_3 \right] - s_1 s_2 a_7 (s_5 c_6 c_7 - c_5 s_7) + a_7 c_1 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) - \\
 &\quad - c_1 (s_3 s_4 - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) - a_3 c_1 s_3 \\
 p_z &= s_2 \left[a_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + s_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + \right. \\
 &\quad \left. + a_3 c_3 \right] + c_2 a_7 (s_5 c_6 c_7 - c_5 s_7) \quad (4.47)
 \end{aligned}$$

Odată matricea de transformare fiind determinată, vectorul de poziție \bar{r}_{M_0} este definit cu relația :

$$\bar{r}_{M_0} = {}^0T_7 \cdot \bar{r}_{M_7} \quad (4.48)$$

4.2.3. Analiza pozițională a lanțului cinematic component al robotului REMT-5

Robotul industrial REMT-5 (fig.4.14) este un robot de transfer în coordonate cilindrice, destinat automatizării flexibile a unor procese tehnologice, servirii de mașini-unelte, montaj etc. Dispozitivul de ghidare (D.G.) este compus din M.G.T. de tip RTT și M.O. cu un grad de libertate (R).

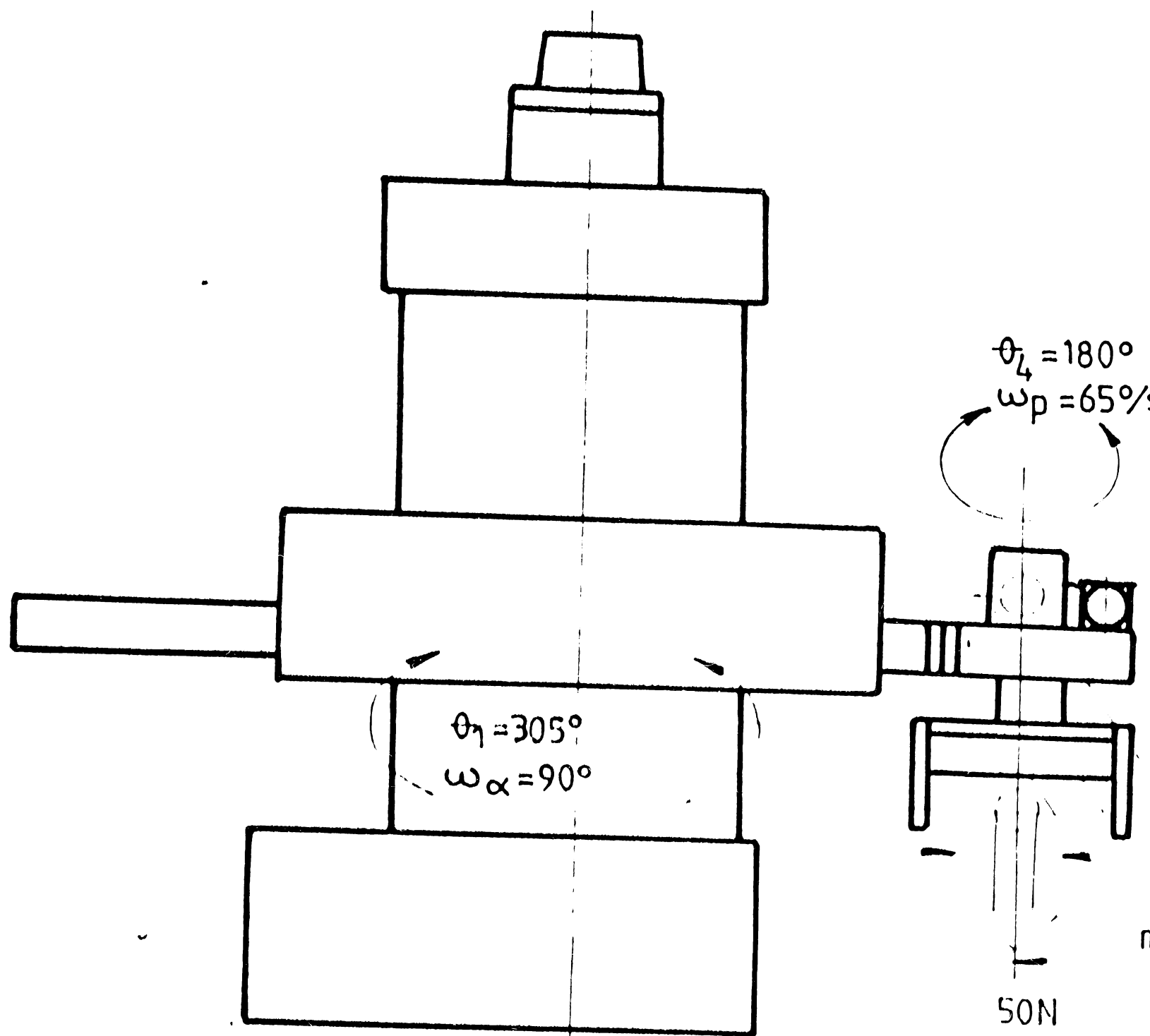
Schema cinematică a D.G. este prezentată în figura 4.15.

Sistemele de axe de coordonate s-au ales după aceleași criterii, enunțate în capitolul 3.

Urmărindu-se situația concretă, pe schema cinematică se pot determina valorile parametrilor geometrici ai construcției (tabel 4.d).

Dacă se notează și în acest caz $\sin \theta_{n_f} = S_n$ și $\cos \theta_{n_f} = C_n$

max. 1050



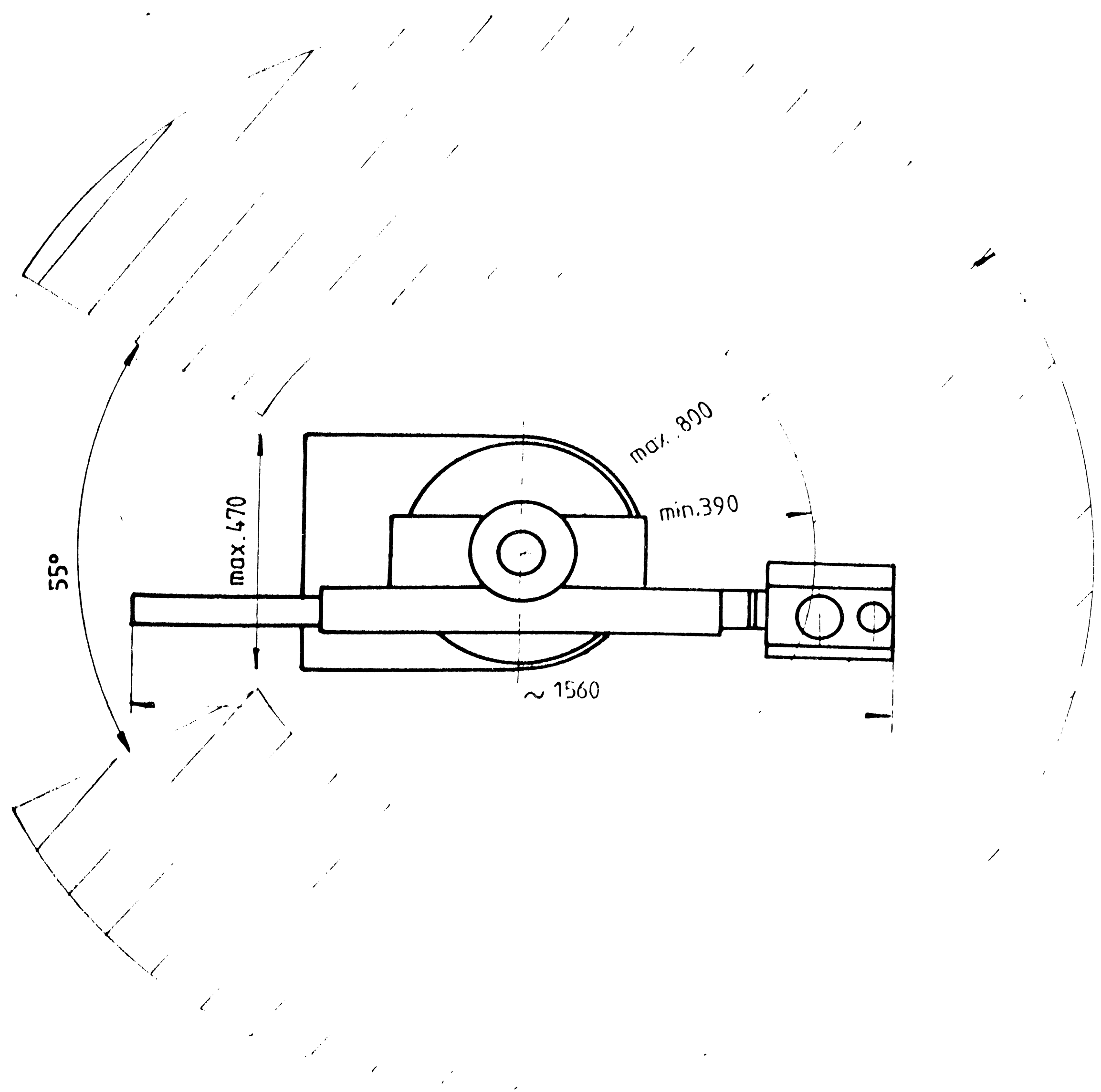
$v_R = 0,128 \text{ m/s}$

max. 155

$v_B = 0,06 \text{ m/s}$

max. 410

50N



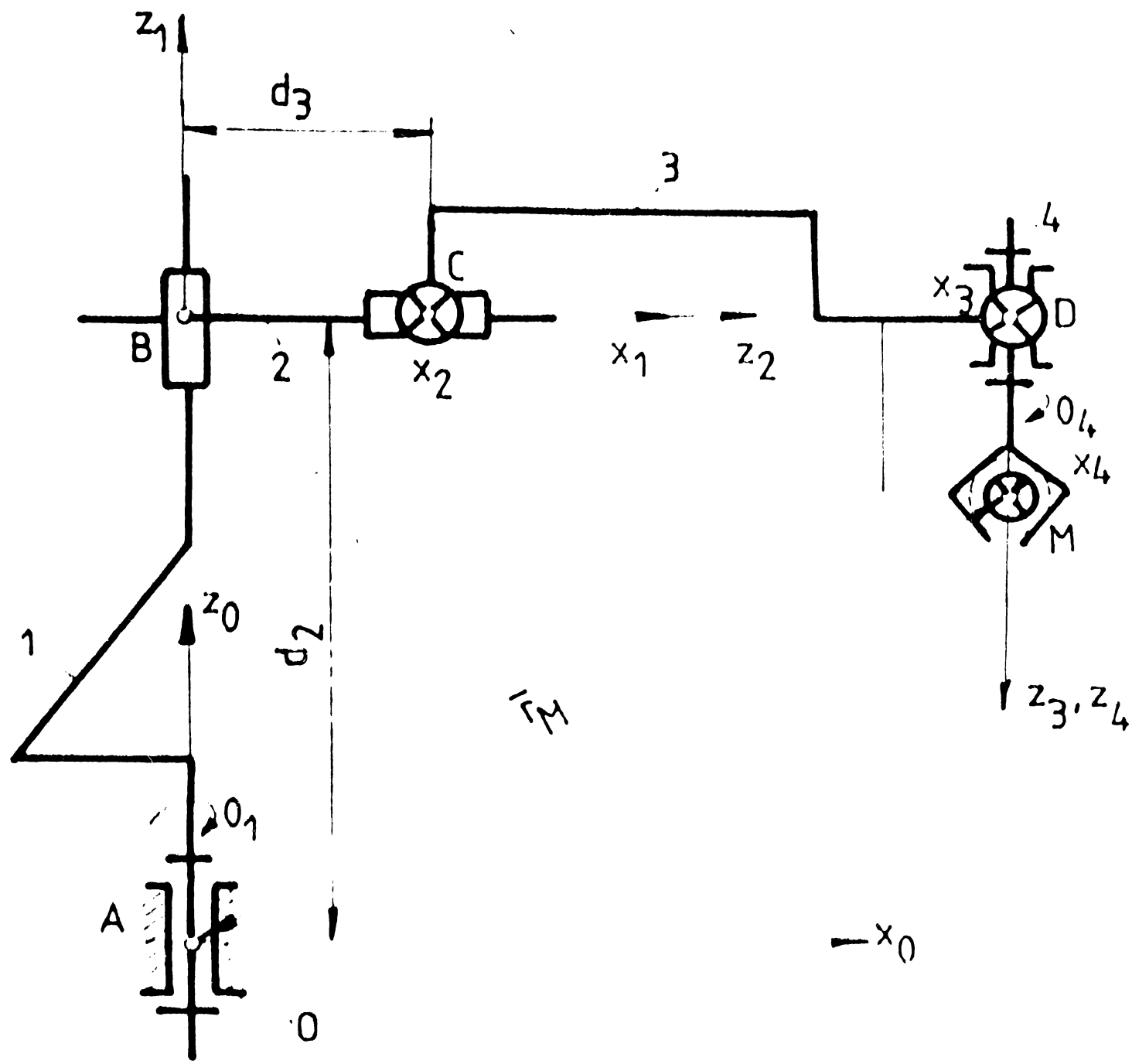


Fig.4.15

Tabelul 4.8

Element	θ_{nf}	θ_{nc}	d_n	a_n	d_n	Variabile
0						
1	θ_{1f}	$\theta_{1c}=0$	0°	0	0	θ_1
2	$\theta_{2f}=0$	$\theta_{2c}=+90^\circ$	-90°	0	d_2	d_2
3	$\theta_{3f}=0$	$\theta_{3c}=0$	-90°	0	d_3	d_3
4	θ_{4f}	$\theta_{4c}=0$	0°	0	d_4	θ_4

matricile de tip $Af_n(r,t)$ și $Ac_n(r,t)$ vor lua următoarele forme :

$$Af_1(r) = \begin{vmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.49)$$

$$Ac_1(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.50)$$

$$Af_2(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.51)$$

$$Ac_2(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.52)$$

$$Af_3(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.53)$$

$$Ac_3(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.54)$$

$$Af_4(r) = \begin{vmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.55)$$

$$Ac_4(r) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.56)$$

Efectuându-se în continuare produsul acestor matrici, rezultă matricea de transformare generală $T = {}^0T_4$, care are următoarea formă :

$$T = Af_1(r) \cdot Ac_1(r) \cdot Af_2(t) \cdot Ac_2(t) \cdot Af_3(t) \cdot Ac_3(t) \cdot Af_4(r) \cdot Ac_4(r) =$$

$$= \begin{vmatrix} C_1 C_4 + S_1 S_4 & C_1 S_4 + S_1 C_4 & 0 & -s_1 d_3 \\ S_1 C_4 - S_1 S_4 & S_1 S_4 - C_1 C_4 & 0 & c_1 d_3 \\ 0 & 0 & -1 & d_2 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.57)$$

Vectorul de poziție al punctului caracteristic M va putea fi scris sub forma :

$$\bar{r}_{M_{40}} = {}^0T_4 \cdot \bar{r}_{M_{44}} \quad (4.58)$$

4.3. Componentele vitezelor liniare și unghiulare

4.3.1. Relațiile vitezelor utilizând matrici de forma A_{fn} și A_{cn}

Utilizarea matricilor de transformare, funcționale și constructive, conduce la obținerea unor relații noi pentru determinarea termenilor matricei iacobian (3.58).

După cum s-a arătat în capitolul 3 al prezentei lucrări, componentele vitezei liniare ale P.C., pot fi scrise utilizând relații de forma (3.46).

În noua situație, acestea se vor scrie :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = (Af_1 \cdot Ac_1 \cdot Af_2 \cdot Ac_2 \dots Af_{i-1} \cdot Ac_{i-1}) \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot d_i \quad (4.59)$$

unde :

A_{i-1}^i sînt matrici de forma (4.25) sau (4.29), după cum ele caracterizează mișcări de rotație sau de translație, A_{i-1}^i sînt matrici de forma (4.27) sau (4.30), pentru aceleași tipuri de mișcări.

Efectuînd și în acest caz produsul matricilor, se obține :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} n_{fcx} & o_{fcx} & a_{fcx} \\ n_{fcy} & o_{fcy} & a_{fcy} \\ n_{fcz} & o_{fcz} & a_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot d_i \quad (4.59')$$

sau :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} a_{fcx} \\ a_{fcy} \\ a_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot d_i \quad (4.59'')$$

în P.C.

În final, componentele vitezei liniare și ale vitezei unghiulare - a obiectului manipulat - rezultă din următoarea matrice :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} a_{fcx} \\ a_{fcy} \\ a_{fcz} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{i-1} \cdot d_i \quad (4.60)$$

În caz că sînt mișcări relative în cuplele de rotație, relația (3.52) se transformă luînd următoarea formă :

$${}^0 v_{Mi} = ({}^0 R_{f1} \cdot {}^0 R_{c1} \cdot {}^1 R_{f2} \cdot {}^1 R_{c2} \dots {}^{i-2} R_{fi-1} \cdot {}^{i-2} R_{ci-1}) \begin{vmatrix} -p_{fcy} \\ p_{fcx} \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \theta_i \quad (4.61)$$

sau :

$${}^0 v_{Mi} = \begin{vmatrix} n_{fcx} & o_{fcx} & a_{fcx} \\ n_{fcy} & o_{fcy} & a_{fcy} \\ n_{fcz} & o_{fcz} & a_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot \begin{vmatrix} -p_{fcy} \\ p_{fcx} \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \theta_i \quad (4.62)$$

rezultînd noua formă finală a matricii, care dă componentele vitezei liniare :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \end{vmatrix}_i = - \begin{vmatrix} n_{fcx} \\ n_{fcy} \\ n_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot {}^{i-1}(p_{fcy})_n + \begin{vmatrix} o_{fcx} \\ o_{fcy} \\ o_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot {}^{i-1}(p_{fcx})_n \cdot \dot{\theta}_i \quad (4.63)$$

și componentele vitezei unghiulare :

$$\begin{vmatrix} \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} a_{fcx} \\ a_{fcy} \\ a_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot \dot{\theta}_i \quad (4.64)$$

Prin urmare, matricea generală cu care se calculează componentele vitezei liniare și ale vitezei unghiulare - în P.C. - va avea forma :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_i = \begin{vmatrix} n_{fcx} \\ n_{fcy} \\ n_{fcz} \\ a_{fcx} \\ a_{fcy} \\ a_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot {}^{i-1}(p_{fcy})_n + \begin{vmatrix} o_{fcx} \\ o_{fcy} \\ o_{fcz} \end{vmatrix}_{i-1} \cdot {}^{i-1}(p_{fcx})_n \cdot \dot{\theta}_i \quad (4.65)$$

Matricile de tip (4.65), scrise pentru fiecare cuplă cinematică a lanțului cinematic, se constituie în coloane ale matricei iacobian de forma (3.58).

Cu ajutorul ei avem posibilitatea determinării componentelor vitezei liniare și unghiulare în P.C. (sau în orice alt punct al unui element al lanțului cinematic), ținând seama de vitezele generalizate în cuplele întregului lanț cinematic.

4.3.2. Componentele vitezelor în P.C. din lanțul cinematic al membrului superior uman

În cazul membrului superior uman, fiind vorba de un lanț cinematic (echivalent) numai cu cuple cinematice de rotație, se apelează la relația (4.65).

Cu ajutorul acesteia se determină coloanele matricei iacobian (3.58).

Mărimile componente ale matricei (4.65) se obțin din matricile de transformare (4.32 - 4.65) și produsele corespunzătoare ale acestora :

$$\begin{array}{l}
 \circ \begin{array}{l} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{array} \Big|_1 \\
 = \begin{array}{l} -s_1 c_2 [a_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + \\ + s_3 s_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 c_3] + s_1 s_2 a_7 (s_5 c_6 c_7 - \\ - c_5 s_7) - a_7 c_1 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + \\ + c_1 (s_3 s_4 - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 c_1 s_3 \\ c_1 c_2 [a_7 (c_3 c_4 + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + \\ + s_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 c_3] - c_1 s_2 a_7 (s_5 c_6 c_7 - \\ - c_5 s_7) - a_7 s_1 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + \\ + s_1 (s_3 s_4 - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 s_1 s_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \cdot \theta_1' \quad (4.66)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \circ \begin{array}{l} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{array} \Big|_2 \\
 = \begin{array}{l} -(c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3) [s_4 a_7 (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + \\ + c_4 (-a_7 s_6 c_7 + d_5)] + (c_1 c_2 s_3 + s_1 c_3) [c_4 a_7 (c_5 c_6 c_7 + \\ + s_5 s_7) + s_4 (-a_7 s_6 c_7 + d_5)] \\ -(s_1 c_2 c_3 + c_1 s_3) [s_4 a_7 (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + \\ + c_4 (-a_7 s_6 c_7 + d_5)] + (s_1 c_2 s_3 - c_1 c_3) [c_4 a_7 (c_5 c_6 c_7 + \\ + s_5 s_7) + s_4 (-a_7 s_6 c_7 + d_5)] \\ -s_2 c_3 [s_4 a_7 (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + c_4 (-a_7 s_6 c_7 + d_5)] + \\ + s_2 s_3 [c_4 a_7 (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + s_4 (-a_7 s_6 c_7 + d_5)] \\ c_1 s_2 \\ s_1 s_2 \\ -c_2 \end{array} \cdot \theta_2' \quad (4.67)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \circ \begin{array}{l} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{array} \Big|_3 \\
 = \begin{array}{l} -c_1 c_2 [a_7 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (s_3 s_4 - \\ - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 s_3] - s_1 [a_7 (c_3 c_4 + \\ + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + s_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + \\ + d_5) + a_3 c_3] \\ -s_1 c_2 [a_7 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (s_3 s_4 - \\ - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 s_3] + c_1 [a_7 (c_3 c_4 + \\ + s_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + (c_3 s_4 + s_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + \\ + d_5) + a_3 c_3] \\ -s_2 [a_7 (s_3 c_4 - c_3 s_4) (c_5 c_6 c_7 + s_5 s_7) + \\ + (s_3 s_4 - c_3 c_4) (-s_6 c_7 a_7 + d_5) + a_3 s_3] \\ -c_1 s_2 \\ -s_1 s_2 \\ c_2 \end{array} \cdot \theta_3' \quad (4.68)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \circ \\
 \left. \begin{array}{l}
 v_{Mx} \\
 v_{My} \\
 v_{Mz} \\
 \omega_{Mx} \\
 \omega_{My} \\
 \omega_{Mz}
 \end{array} \right|_4
 \end{array}
 =
 \left. \begin{array}{l}
 -(C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) [S_4 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) + C_4 (-a_7 S_6 C_7 + \\
 + d_5)] + (C_1 C_2 C_3 + S_1 C_3) [C_4 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) + \\
 + S_4 (-a_7 S_6 C_7 + d_5)] \\
 \\
 -(S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) [S_4 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) + C_4 (-a_7 S_6 C_7 + \\
 + d_5)] + (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3) [C_4 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) + \\
 + S_4 (-a_7 S_6 C_7 + d_5)] \\
 \\
 -S_2 C_3 [S_4 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) + C_4 (-a_7 S_6 C_7 + d_5)] + \\
 + S_2 S_3 [C_4 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) + S_4 (-a_7 S_6 C_7 + d_5)] \\
 \\
 C_1 S_2 \\
 S_1 S_2 \\
 -C_2
 \end{array} \right| \cdot \dot{\theta}_4 \quad (4.69)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \circ \\
 \left. \begin{array}{l}
 v_{Mx} \\
 v_{My} \\
 v_{Mz} \\
 \omega_{Mx} \\
 \omega_{My} \\
 \omega_{Mz}
 \end{array} \right|_5
 \end{array}
 =
 \left. \begin{array}{l}
 -[C_4 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) + S_4 (C_1 C_2 C_3 + S_1 C_3)] a_7 (S_5 C_6 C_7 - \\
 - C_5 S_7) - C_1 S_2 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) \\
 \\
 -[C_4 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) + S_4 (S_1 C_2 C_3 - C_1 C_3)] a_7 (S_5 C_6 C_7 - \\
 - C_5 S_7) - S_1 S_2 a_7 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) \\
 \\
 -(S_2 C_3 C_4 + S_2 S_3 S_4) (S_5 C_6 C_7 - C_5 S_7) a_7 + \\
 + C_2 (C_5 C_6 C_7 + S_5 S_7) a_7 \\
 \\
 -S_4 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) + C_4 (C_1 C_2 C_3 + S_1 C_3) \\
 \\
 -S_4 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) + C_4 (S_1 C_2 C_3 - C_1 C_3) \\
 \\
 -S_2 C_3 S_4 + S_2 S_3 C_4
 \end{array} \right| \cdot \dot{\theta}_5 \quad (4.70)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \circ \\
 v_{Mx} \\
 v_{My} \\
 v_{Mz} \\
 \omega_{Mx} \\
 \omega_{My} \\
 \omega_{Mz}
 \end{array} \Big|_6 = \begin{array}{l}
 -a_7 S_6 C_7 [C_4 C_5 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) + S_4 C_5 (C_1 C_2 C_3 + \\
 + S_1 C_3) - C_1 S_2 S_5] + a_7 C_6 C_7 [S_4 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) - \\
 - C_4 (C_1 C_2 S_3 + S_1 C_3)] \\
 -a_7 S_6 C_7 [C_4 C_5 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) + S_4 C_5 (S_1 C_2 S_3 - \\
 - C_1 C_3) - S_1 S_2 S_5] + a_7 C_6 C_7 [S_4 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) - \\
 - C_4 (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3)] \\
 -a_7 S_6 C_7 [C_5 (S_2 C_3 C_4 + S_2 S_3 S_4) + C_2 C_5] + \\
 + a_7 C_6 C_7 (S_2 C_3 S_4 + S_2 S_3 C_4) \\
 -C_4 S_5 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) - S_4 S_5 (C_1 C_2 C_3 + S_1 C_3) - \\
 -C_1 S_2 C_5 \\
 C_4 S_5 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) - S_4 S_5 (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3) - \\
 -S_1 S_2 C_5 \\
 -S_5 (S_2 C_3 C_4 + S_2 S_3 S_4) + C_2 C_5
 \end{array} \cdot \theta_6' \quad (4.71)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \circ \\
 v_{Mx} \\
 v_{My} \\
 v_{Mz} \\
 \omega_{Mx} \\
 \omega_{My} \\
 \omega_{Mz}
 \end{array} \Big|_7 = \begin{array}{l}
 -a_7 S_7 [C_4 C_5 C_6 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) + S_4 C_5 C_6 (C_1 C_2 C_3 + \\
 + S_1 C_3) - C_1 S_2 S_5 C_6 + S_4 S_6 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) - \\
 - C_4 S_6 (C_1 C_2 S_3 + S_1 C_3)] + a_7 C_7 [C_4 S_5 (C_1 C_2 C_3 - \\
 - S_1 S_3) + S_4 S_5 (C_1 C_2 C_3 + S_1 C_3) + C_1 S_2 C_5] \\
 -a_7 S_7 [C_4 C_5 C_6 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) + S_4 C_5 C_6 (S_1 C_2 S_3 - \\
 - C_1 C_3) - S_1 S_2 S_5 C_6 + S_4 S_6 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) - \\
 - C_4 S_6 (C_1 C_2 S_3 + S_1 C_3)] + a_7 C_7 [C_4 S_5 (S_1 C_2 C_3 + \\
 + C_1 S_3) + S_4 S_5 (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3) + S_1 S_2 C_5] \\
 -a_7 S_7 [C_5 C_6 (S_2 C_3 C_4 + S_2 S_3 S_4) + C_2 C_5 C_6 + S_2 C_3 S_4 S_6 - \\
 - S_2 S_3 C_4 S_6] + a_7 C_7 [S_5 (S_2 C_3 C_4 + S_2 S_3 S_4) - C_2 C_5] \\
 -C_4 C_5 S_6 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) - S_4 C_5 S_6 (C_1 C_2 C_3 + S_1 C_3) + \\
 + C_1 S_2 S_5 S_6 + S_4 C_6 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) - C_4 C_6 (C_1 C_2 S_3 + \\
 + S_1 C_3) \\
 -C_4 C_5 S_6 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) - S_4 C_5 S_6 (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3) + \\
 + S_1 S_2 S_5 S_6 + S_4 C_6 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) - C_4 C_6 (S_1 C_2 S_3 - \\
 - C_1 C_3) \\
 -C_5 S_6 (S_2 C_3 C_4 + S_2 S_3 S_4) - C_2 C_5 S_6 + S_2 C_3 S_4 C_6 - \\
 -S_2 S_3 C_4 C_6
 \end{array} \cdot \theta_7' \quad (4.72)
 \end{array}$$

Matricea iacobian din relația (3.58) se obține prin combinarea matricilor coloană (4.66 + 4.72). S-a obținut astfel corespondența directă între vitezele liniară și respectiv unghiulară a elementului de execuție în I.C. (amplasat pe mîna propriu-zisă), funcție de vitezele unghiulare de rotație din cuplele cinematice ale mem-

brului superior uman.

4.3.3. Componentele vitezelor în R.C. al robotului

REMT-5

Urmărind lanțul cinematic al D.G. al robotului REMT-5 (fig. 4.14) se observă ordinea de dispunere a cuplelor cinematice de la suport (elementul fix) spre efectorul terminal. Ea este RTTR. În aceste condiții, pentru obținerea coloanelor matricei iacobian (3.58) recurgem la relațiile (4.60) și (4.65).

Pentru sistemul de axe cu originea în cupla cinematică A₅, respectiv prima coloană a iacobianului, avem :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_1 = \begin{vmatrix} -C_1 \cdot d_3 \\ -S_1 \cdot d_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \dot{\theta}_1 \quad (4.73)$$

Pentru sistemele de axe cu originea în cuplele cinematice de translație B₅ și C₅, respectiv a doua și a treia coloană a iacobianului avem :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \dot{d}_2 \quad (4.74)$$

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_3 = \begin{vmatrix} -S_1 \\ C_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \dot{d}_3 \quad (4.75)$$

Ultima coloană a matricei iacobian se obține pentru sistemul de axe cu originea în cupla cinematică de rotație D₅ :

$${}^0 \begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mx} \\ \omega_{My} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix}_4 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{vmatrix} \cdot \dot{\theta}_4 \quad (4.76)$$

Se obține astfel matricea iacobian :

$$J = \begin{vmatrix} -c_1 d_3 & 0 & -s_1 & 0 \\ -s_1 d_3 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (4.77)$$

și prin urmare, componentele vitezei liniare și unghiulare în P.C. de pe elementul condus :

$$\begin{vmatrix} v_{Mx} \\ v_{My} \\ v_{Mz} \\ \omega_{Mz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -c_1 d_3 & 0 & -s_1 & 0 \\ -s_1 d_3 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \theta_1' \\ d_2' \\ d_3' \\ \theta_4' \end{vmatrix} \quad (4.78)$$

4.4. Simplificarea ecuațiilor dinamice ale lanțului cinematic component al M.G.T.

4.4.1. Model dinamic simplificat al M.G.T.

Un model matematic capabil să descrie în mod eficient comportamentul dinamic al unui sistem mecanic trebuie să prezinte anumite calități pentru a fi acceptat ca suport teoretic al sistemului de comandă al acestuia.

Din acestea amintim :

- exactitate, respectiv erorile de calcul să fie minime,
- flexibilitate, adică schimbări facile în calcule, în situații în care apar schimbări în datele problemelor,
- eficiență, din punct de vedere al timpului de execuție al calculelor, precum și al capacității de memorie afectată de acestea,
- universalitate, adică posibilitatea de rezolvare a celor două probleme ridicate de comanda automată a R.I. (analiza și sinteza mișcărilor comandate), pentru orice tip de structură mecanică.

Formalismul Lagrange, prin însăși natura lui, simplifică substanțial calculele în scrierea ecuațiilor dinamice de mișcare.

Relațiile de forma (3.82), reprezentând ecuațiile dinamice ale sistemelor mecanice, cuprind în limbaj matematic întreg ansamblul de factori, care influențează mișcarea acestora.

În vederea rezolvării acestor ecuații, diferiți autori au propus diferite simplificări, care să conducă la o rezolvare facilă a acestora.

În continuare, se scriu - într-o formă simplificată - factorii care intervin în termenii ecuațiilor (3.82), în așa fel, încât să poată fi utilizat calculul automatizat la prelucrarea acestora.

Dacă se analizează expresiile (3.83), (3.84), (3.85), se remarcă prezența factorilor derivate parțiale de ordinul 1 sau 2, funcție de coordonatele generalizate, de tip $\partial T_p / \partial q_i$ sau $\partial^2 T_p / \partial q_j \cdot \partial q_k$.

Pentru a identifica în calcule cuplele de rotație (R) și respectiv de translație (T), se introduce un coeficient binar de forma :

$$\begin{aligned} c_i &= 0 && \text{(pentru cuple de rotație)} \\ c_i &= 1 && \text{(pentru cuple de translație)} \end{aligned} \quad (4.79)$$

și respectiv un coeficient :

$$\bar{c}_i = 1 - c_i \quad (4.80)$$

care are valoarea :

$$\begin{aligned} \bar{c}_i &= 1 && \text{(pentru cuple de rotație)} \\ \bar{c}_i &= 0 && \text{(pentru cuple de translație)} \end{aligned} \quad (4.81)$$

Este cunoscut faptul că dacă M reprezintă matricea componentelor unui vector \vec{a} într-un sistem de axe oarecare :

$$M = (a_1, a_2, a_3)^T \quad (4.82)$$

componentele unui tensor \hat{a} sînt date de o matrice de forma, /I4/ :

$$\hat{M} = \begin{vmatrix} 0 & a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{vmatrix} \quad (4.83)$$

În baza celor expuse, dacă se acceptă vectori unitate în lungul axelor cuplelor cinematice de rotație sau de translație :

$$z_i = (0, 0, 1)^T \quad (4.84)$$

se pot scrie două matrici de forma :

$$\bar{Q} = \begin{vmatrix} 2 & | & 0 \\ - & | & - \\ 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.85)$$

$$Q = \begin{vmatrix} 0 & | & z \\ - & | & - \\ 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.86)$$

prima pentru cazul cuplelor cinematice de rotație și respectiv a doua, pentru cuple cinematice de translație.

Explicitate, cele două matrici au forma :

$$\bar{Q} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & | & 0 \\ 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.85') \quad Q = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.86')$$

Având cele două matrici și coeficientul binar c_i și \bar{c}_i , se poate scrie, global, o singură matrice cu posibilitate de particularizare pentru cele două tipuri de cuple cinematice :

$$Q_i = \bar{c}_i \cdot \bar{Q} + c_i \cdot Q \quad (4.87)$$

Aceasta poate fi utilizată în calculul derivatelor parțiale, amintite inițial. Pe baza ei, derivata unei matrici de transformare, dintr-un sistem de axe în următorul, se poate scrie /M15/:

$$\frac{\partial {}^i T_{i+1}}{\partial q_i} = Q_i \cdot {}^i T_{i+1} \quad (4.88)$$

În cazul derivatelor noastre, relațiile vor lua forma :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_p}{\partial q_i} &= \frac{\partial {}^0 T_p}{\partial q_i} = {}^0 T_i \cdot \frac{\partial {}^i T_{i+1}}{\partial q_i} \cdot {}^{i+1} T_p = {}^0 T_i \cdot Q_i \cdot {}^i T_{i+1} \cdot {}^{i+1} T_p = \\ &= ({}^0 T_i \cdot Q_i \cdot {}^i T_0) \cdot {}^0 T_p = \Omega_i \cdot {}^0 T_p \end{aligned} \quad (4.89)$$

Matricii de transformare ${}^0 T_p$ se scriu conform relației (3.21) sub forma :

$${}^0 T_p = \begin{vmatrix} {}^0 R_p & | & {}^0 P_p \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.90)$$

Prin urmare, matricea Ω_i va lua forma :

$$\Omega_i = \begin{vmatrix} {}^0 R_p & | & {}^0 P_p \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \hat{z} & | & 0 \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} {}^p R_0 & | & {}^p P_0 \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} {}^0 \hat{z}_p & | & -{}^0 \hat{z}_p \cdot {}^0 P_p \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.91)$$

pentru cuple cinematice de rotație și :

$$\Omega_i = \begin{vmatrix} {}^0 R_p & | & {}^0 P_p \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 & | & z \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} {}^p R_0 & | & {}^p P_0 \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & | & {}^0 z_p \\ \hline 0 & | & 0 \end{vmatrix} \quad (4.92)$$

pentru cuple cinematice de translație.

$$\text{Derivata : } \frac{\partial T_p}{\partial q_i} = \begin{vmatrix} -\Omega_i \\ \hline 0 \end{vmatrix} \cdot T_p \quad (4.93)$$

În mod similar, se calculează derivatele parțiale de ordinul

doi :

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial q_j \partial q_k} = \begin{vmatrix} \Omega_j \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Omega_k \\ 0 \end{vmatrix} \cdot T_p \quad (4.94)$$

Pe baza celor expuse se pot scrie termenii ecuațiilor (3.82).
Astfel :

$$D_{ij} = \sum_{p=\max_{i,j}}^6 \text{Diag.} (\Omega_j \cdot T_p \cdot J_p \cdot \Omega_i^T \cdot T_p^T) = \text{Diag.} \Omega_j \cdot s_p \cdot \Omega_i^T = \text{Diag } M_{ij} \quad (4.95)$$

In relație s-a notat :

$$s_p = \sum_{p=\max_{i,j}}^6 T_p \cdot J_p \cdot T_p^T \quad (4.96)$$

și

$$M_{ij} = \Omega_j \cdot s_p \cdot \Omega_i^T \quad (4.97)$$

Similar :

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max_{i,j,k}}^6 \text{Diag} (\Omega_j \cdot \Omega_k \cdot T_p \cdot J_p \cdot \Omega_i^T \cdot T_p^T) = \text{Diag } \Omega_j \cdot M_{ik} \quad (4.98)$$

și

$$D_i = \sum_{p=1}^6 (-m_p \cdot g^T \cdot \Omega_i \cdot T_p \cdot P_{r_p}^-) = \sum_{p=1}^6 g^T \cdot \Omega_i \cdot T_p \cdot (-m_p P_{r_p}^-) \quad (4.99)$$

Prin urmare, expresia ecuațiilor dinamice ale mișcării pot fi scrise sub următoarea formă :

$$F_i = \sum_{j=1}^6 \text{Diag } M_{ij} \cdot \ddot{q}_j + I \cdot a_i \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + D_i \quad (4.100)$$

sau :

$$F_i = |A(q)| \cdot \ddot{q} + 2|B(q)| \cdot \dot{q} \cdot \dot{q} + |C(q)| \dot{q}^2 + D_i(q) \quad (4.101)$$

unde :

$|A(q)|$; $|B(q)|$; $|C(q)|$ sînt matrici care depind de coordonatele generalizate și au ca termeni, coeficienții D_{ij} și respectiv D_{ijk} , rezolvați anterior.

$$|A(q)| = \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \dots & D_{nn} \end{vmatrix} \quad (4.102)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})|^T = \begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccc}
 D_{112} & 0 & -D_{213} & \dots & -D_{21n-1} & -D_{21n} \\
 D_{113} & D_{213} & 0 & \dots & -D_{31n-1} & -D_{31n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 D_{11n} & D_{21n} & D_{31n} & \dots & D_{n-11n} & 0 \\
 \hline
 D_{123} & D_{223} & 0 & \dots & D_{32n-1} & -D_{32n} \\
 D_{124} & D_{224} & D_{324} & \dots & -D_{42n-1} & -D_{42n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 D_{12n} & D_{22n} & D_{32n} & \dots & D_{n-12n} & 0 \\
 \hline
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 \hline
 D_{1n-2n-1} & D_{2n-2n-1} & D_{3n-2n-1} & \dots & 0 & -D_{n-1n-2n} \\
 D_{1n-2n} & D_{2n-2n} & D_{3n-2n} & \dots & D_{n-1n-2n} & 0 \\
 \hline
 D_{1n-1n} & D_{2n-1n} & D_{3n-1n} & \dots & D_{n-1n-1n} & 0
 \end{array}
 \end{array} \quad (4.103)$$

$$|\mathbf{C}(\mathbf{q})| = \begin{vmatrix}
 0 & D_{122} & \dots & D_{11n} \\
 -D_{112} & 0 & \dots & D_{2nn} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots \\
 -D_{11n} & -D_{22n} & \dots & 0
 \end{vmatrix} \quad (4.104)$$

Se remarcă faptul că matricile $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ și $\mathbf{C}(\mathbf{q})$ sînt de dimensiune $n \times n$, iar matricea $\mathbf{B}(\mathbf{q})$ de dimensiune $n \times n(n-1)/2$

Matricile coloană ale accelerațiilor generalizate ($\ddot{\mathbf{q}}_j$), ale produselor vitezelor generalizate ($\dot{\mathbf{q}}_j \cdot \dot{\mathbf{q}}_k$) și ale patratului vitezelor generalizate ($\dot{\mathbf{q}}_{jj}^2$) sînt de dimensiune $n \times 1$, $n \cdot (n-1)/2 \times 1$ și respectiv $n \times 1$:

$$\ddot{\mathbf{q}}_j = |\ddot{q}_1 \ \ddot{q}_2 \ \dots \ \ddot{q}_n|^T$$

$$\dot{\mathbf{q}}_j \dot{\mathbf{q}}_k = |\dot{q}_1 \dot{q}_2 \ \dot{q}_1 \dot{q}_3 \ \dots \ \dot{q}_1 \dot{q}_n \ \dot{q}_2 \dot{q}_3 \ \dot{q}_2 \dot{q}_4 \ \dots \ \dot{q}_2 \dot{q}_n \ \dots \ \dot{q}_{n-1} \dot{q}_n|^T$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{jj}^2 = |\dot{q}_1^2 \ \dot{q}_2^2 \ \dots \ \dot{q}_n^2|^T$$

O prezentare succintă a ansamblului de calcule necesare pentru

determinarea forțelor generalizate, este redată în figura 4.16.

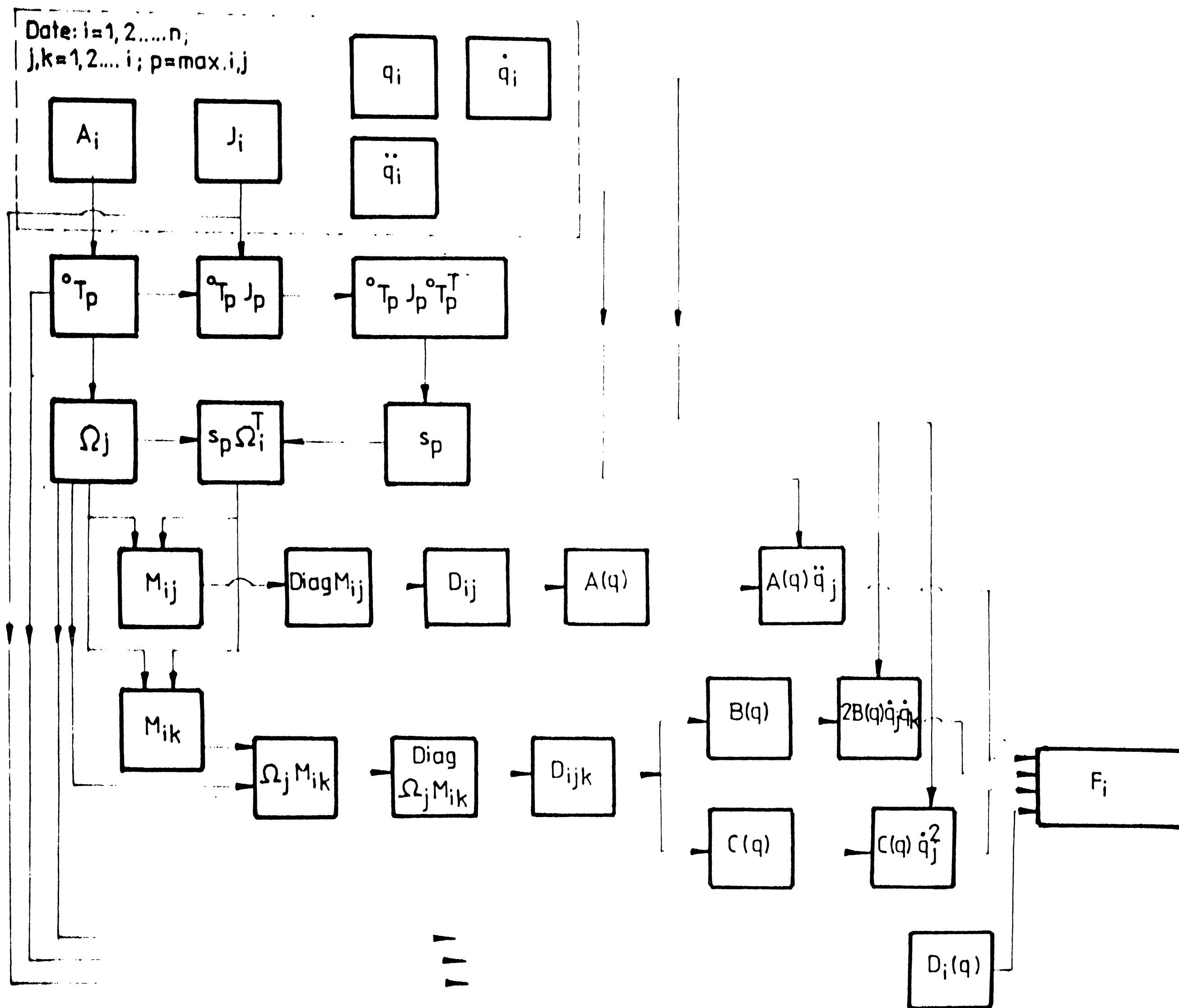


Fig.4.16

Capitolul 5

OPTIMIZAREA TRAIECTORIEI SI A LEGILOR DE MISCARE A PUNCTULUI CARACTERISTIC

5.1. Probleme privind deplasarea P.C.

Dună cum se cunoaște, spațiul de lucru al unui mecanism generator de traiectorie, reprezintă mulțimea pozițiilor pe care le poate ocupa punctul caracteristic (P.C.).

Datorită unor restricții impuse prin materializarea cuplelor cinematice, datorită prezenței unor trasee de cabluri de alimentare, conducte etc., spațiul de lucru se restrânge, rămânând un spațiu de lucru util, în interiorul căruia se poate desfășura operația de deplasare a punctului caracteristic.

Spațiul de lucru util este un spațiu teoretic, pentru că în realitate, datorită inerției unor componente ale sistemului de comandă, anumite puncte ale acestuia nu pot fi atinse în regim de funcționare automat.

Totodată, utilizarea roboților industriali în diferite aplicații, presupune prezența unor utilaje cu care acesta colaborează. Acestea ocupă anumite zone ale spațiului de lucru util.

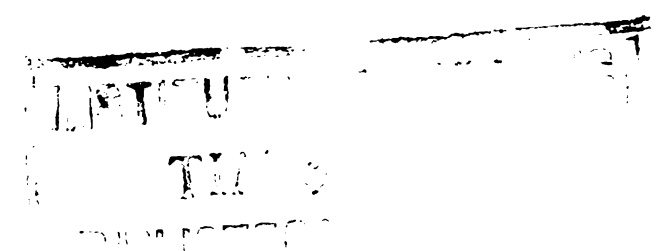
Apare deci, un spațiu de lucru real prin excluderea din spațiul de lucru util a acestor zone și puncte.

Analizând posibilitățile de deplasare ale mecanismului generator de traiectorie al unui robot industrial, se va folosi însă spațiul de lucru util, considerând că robotul nu este introdus într-o aplicație.

În situațiile în care se vor analiza aplicații cu roboți industriali, se va apela doar la spațiul de lucru real pe care P.C. îl dezvoltă.

Problema deplasării P.C. în spațiul de lucru, este o problemă complexă, a cărei rezolvare se consideră că necesită următoarele etape :

- 1) Determinarea sau alegerea traiectoriei P.C.
- 2) Stabilirea configurațiilor lanțului cinematic al M.C.T. în



diferitele puncte ale traiectoriei, respectiv problema cinematică inversă a lanțului cinematic.

3) Adoptarea legilor de mișcare ale P.C. pe traiectorie.

4) Optimizarea legilor de mișcare pe traiectorie și determinarea unor traiectorii optime.

5.2. Determinarea traiectoriei P.C.

5.2.1. Condiții și criterii de alegere a traiectoriei P.C.

Sarcina M.G.T. este de a deplasa P.C. dintr-o poziție inițială (start), într-o poziție finală (țintă).

Deplasarea poate fi efectuată, fie prin impunerea drumului (a traiectoriei) care trebuie urmat, fie fără să intereseze acesta.

Primul mod de conducere a P.C. se utilizează într-o serie de aplicații de sudare continuă, tăiere după șablon etc.

Cel de-al doilea mod de conducere a P.C. se utilizează în aplicații de servire a mașinilor de prelucrat, operații de transfer, operații de montaj- asamblare etc.

În primul caz, în mod deosebit, dar și în cel de al doilea, se pune problema realizării de deplasări în spațiul de lucru util pe traiectorii, care asigură valori extreme (minime sau maxime), ale parametrilor funcționali (cinematici și dinamici).

Astfel, în situații când se vehiculează în spațiu mase mari (mase utile sau mase proprii ale robotului), sînt indicate traiectorii și bineînțeles regimuri de funcționare, care să minimizeze accelerațiile în punctul caracteristic.

Alți parametri, care interesează în mod deosebit, ar fi : timpii de deplasare (minimi sau limitați la anumite valori), vitezele de deplasare (maxime), consumul energetic (minim) etc.

Trajectoria parcursă de P.C. este uneori influențată și de o serie de alți factori, cum ar fi :

- necesitatea ocolirii unor obstacole interpuase în spațiul de lucru util,
- necesitatea evitării impactului cu propria structură,
- evitarea pe cît posibil a deplasărilor inverse (reversarea mișcării în una sau mai multe cuple ale lanțului cinematic) etc.

În plus, cu precădere la primul caz - în anumite situații - se impun condiții cinematice suplimentare, cum ar fi asigurarea unei viteze de deplasare constantă pe traiectorie sau un alt profil al acesteia, condiții impuse de regimurile de lucru din poli-

cația în care este implicat robotul.

Toate aceste observații ne conduc la concluzia că este necesar să abordăm, în mod sistematic, problema traiectoriilor P.C. pentru diferitele structuri ale M.G.T. și pentru diferite aplicații în care se folosesc.

Problema determinării traiectoriei P.C. în interiorul spațiului de lucru util sau real este de o deosebită importanță, atât pentru stabilirea și îmbunătățirea performanțelor structurilor mecanice, precum și ale sistemelor de comandă ale roboților industriali.

În cazul roboților cu program de lucru rigid, când traiectoria P.C. se poate obține prin "învățare", problema optimizării unuia sau mai multor parametri funcționali nu se pune - sau chiar dacă se pune - rezolvarea nu ajunge la soluțiile cele mai bune.

Se înțelege că pentru roboții cu sisteme de comandă evoluate sau care funcționează în condiții de nedeterminare apriorică și în prezența unor perturbații (obstacole), un astfel de procedeu de tratare a problemei devine neeficient. În mod practic el poate să ducă la o pierdere a preciziei, inadmisibilă, sau chiar la situații de avarie.

Toate acestea impun necesitatea elaborării unor mijloace algoritmice de programare automată și optimizare a acțiunii roboților, care să asigure adaptarea la condițiile concrete ale spațiului de lucru real.

Modelul dinamic al unui lanț cinematic al M.G.T. exprimat prin expresia (4.101) este valabil pe tot parcursul mișcării, în spațiul de lucru util, respectiv pe intervalul $t \in [t_s, t_f]$. Datorită limitărilor impuse de spațiul de lucru util, coordonatele generalizate, respectiv vitezele generalizate, vor trebui să respecte următoarele condiții :

$$q(t) \in Q_q ; \quad \dot{q}(t) \in Q_{\dot{q}} \quad (5.1)$$

pentru orice $t \in [t_s, t_f]$

unde :

$Q_q, Q_{\dot{q}}$ sînt mulțimi date, ale căror extensie este impusă prin construcția lanțului cinematic și prin restricțiile funcționale ale acestuia.

Rezolvarea ecuațiilor diferențiale rezultate din expresia (4.101), ținînd seama de restricțiile (5.1), conduce la determinarea legilor de variație (funcție de timp) ale coordonatelor și

vitezelor generalizate, dacă se cunosc :

- parametri constructivi ai lanțului cinematic al M.G.T.,
- legile de variație (funcție de timp) ale forțelor motoare (generalizate), precum și
- condițiile inițiale ale mișcării lanțului cinematic.

În situația în care se cunosc legile de variație (funcție de timp) ale coordonatelor și vitezelor generalizate, precum și parametri constructivi ai lanțului cinematic și condițiile inițiale ale mișcării lanțului cinematic, din aceleași ecuații diferențiale se pot determina legile de variație (funcție de timp) ale forțelor motoare generalizate.

În primul caz expus, putem aprecia că însăși coordonatele generalizate găsite, exprimă configurațiile M.G.T. și respectiv, poziția P.C. în timp și prin urmare, traiectoria acestuia.

Să analizăm câteva tipuri de traiectorii ale P.C., pentru diferite structuri ale lanțului cinematic din componența M.G.T.

5.2.2. Traiectorie-linie dreaptă, în spațiul de lucru al roboților industriali

Traietoria linie dreaptă a P.C. este frecvent întâlnită în aplicațiile R.I., atât în situațiile în care se sau nu se impune inițial traiectoria.

Aceasta, datorită faptului că oferă o serie de avantaje în comanda sistemului mecanic al R.I. și totodată facilitează în controlul eventualelor ciocniri cu diferite obstacole interpușe în spațiul de lucru etc.

Pentru a se putea deplasa P.C. pe o traiectorie linie dreaptă, utilizându-se lanțuri cinematice de orice configurație, fiecare pas între două puncte spațiale învecinate, de pe traiectorie, trebuie interpolat prin funcții, care în majoritatea cazurilor nu sînt liniare (excepție fac lanțurile cinematice T.T.T. cu spațiu de lucru cartezian). Prin urmare, P.C. nu va urmări în totalitate linia dreaptă, ci o va ataca doar în puncte de precizie, respectiv în punctele de intersecție a traiectoriei reale a P.C. și a traiectoriei teoretice (ideale). Urmărind figura 5.1, unde se reprezintă structura unui M.G.T. în coordonate carteziane, se poate constata că vectorul de poziție al P.C. este definit de funcția :

$$\vec{r} = f(x(t), y(t), z(t)) \quad (5.2)$$

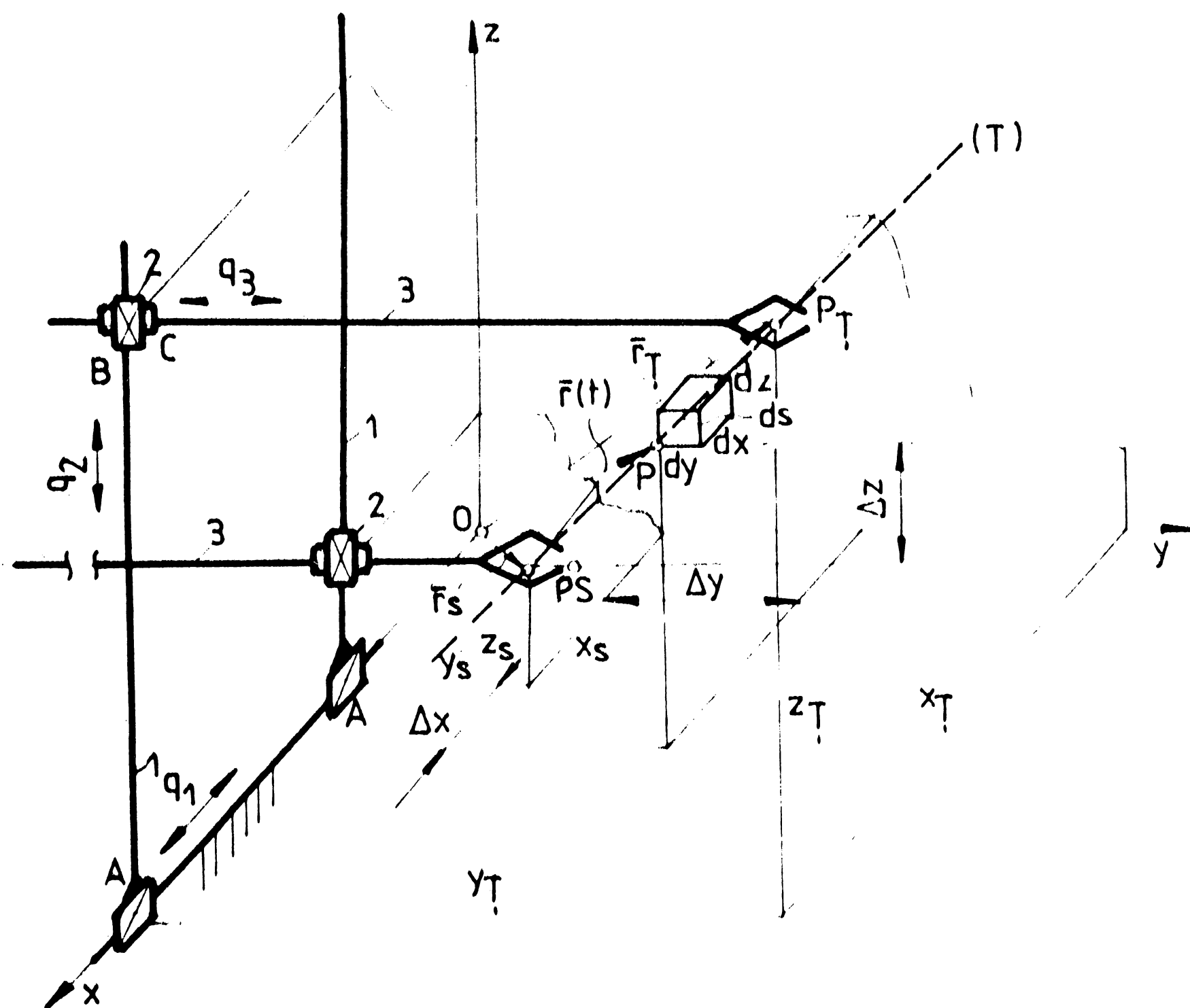


Fig.5.1

Ecuatia dreptei-traietorie poate fi scrisa sub urmatoarea formă :

$$(\bar{r}(t) - \bar{r}_S) \times (\bar{r}_T - \bar{r}_S) = 0 \quad (5.3)$$

sau :

$$\begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ x-x_S & y-y_S & z-z_S \\ x_T-x_S & y_T-y_S & z_T-z_S \end{vmatrix} = 0 \quad (5.4)$$

Intrucit sistemul de referinta al spatiului de lucru coincide cu sistemul de coordonate a lanțului cinematic, ecuațiile de mișcare pentru deplasarea P.C. pe traiectorie se pot deduce direct. Dacă se notează :

$$\Delta x = x - x_S ; \quad \Delta y = y - y_S ; \quad \Delta z = z - z_S \quad (5.5)$$

atunci :

$$(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 = S(t)^2 \quad (5.6)$$

unde, prin S(t) s-a notat spațiul parcurs de P.C. pe traiectorie la un moment dat, caracterizat de vectorul de poziție r(t).

Variația vectorului $\bar{r}(t)$, prin deplasarea P.C. pe traiectoria (T) cu o valoare ds se poate obține din expresia :

$$(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 = (ds)^2 \quad (5.7)$$

adică :

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = (ds)^2 \quad (5.8)$$

existând posibilitatea ca fiecare termen al sumei să poată fi scris astfel :

$$x - x_1 = \frac{(ds)}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (5.9)$$

$$y - y_1 = \frac{(ds)}{\left[1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (5.10)$$

$$z - z_1 = \frac{(ds)}{\left[1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (5.11)$$

Valorile respective pot constitui pași în procesul de interpolare a traiectoriei teoretice (T).

În cazul unui M.G.T. format dintr-un lanț cinematic, care lucrează în coordonate cilindrice (fig.5.2), ecuația (5.3) a dreptei-traietorie ia forma următoare :

$$\begin{vmatrix} \bar{I} & \bar{J} & \bar{K} \\ R \cos \varphi - R_B \cos \varphi & R \sin \varphi - R_B \sin \varphi & z - z_B \\ R_T \cos \varphi_T - R_B \cos \varphi_B & R_T \sin \varphi_T - R_B \sin \varphi_B & z_T - z_B \end{vmatrix} = 0 \quad (5.12)$$

Vectorul $\bar{r}(t)$ se poate scrie :

$$\bar{r}(t) = \bar{r}_B + \bar{u}(t) \quad (5.13)$$

sau :

$$|\bar{r}(t)| = \left[h^2 + (s_0 + s(t))^2 \right]^{1/2} \quad (5.14)$$

unde :

h reprezintă lungimea perpendiculararei din O pe traiectorie,
 s_0 - spațiul pe traiectorie dintre vîrful perpendiculararei și P_B

Pe baza acestor considerații, se pot scrie coordonatele generalizate ce caracterizează mișcarea în cuplurile cinematice ale lanțului cinematic :

$$\begin{aligned} \varphi &= q_1(t) = \alpha + \arctg \left[(s_0 + s(t)) / h \right] \\ z &= q_2(t) = (1 - m_T^2) \cdot s(t) \\ R &= q_3(t) = \left[h^2 + (s_0 + s(t))^2 \cdot m_T^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (5.15)$$

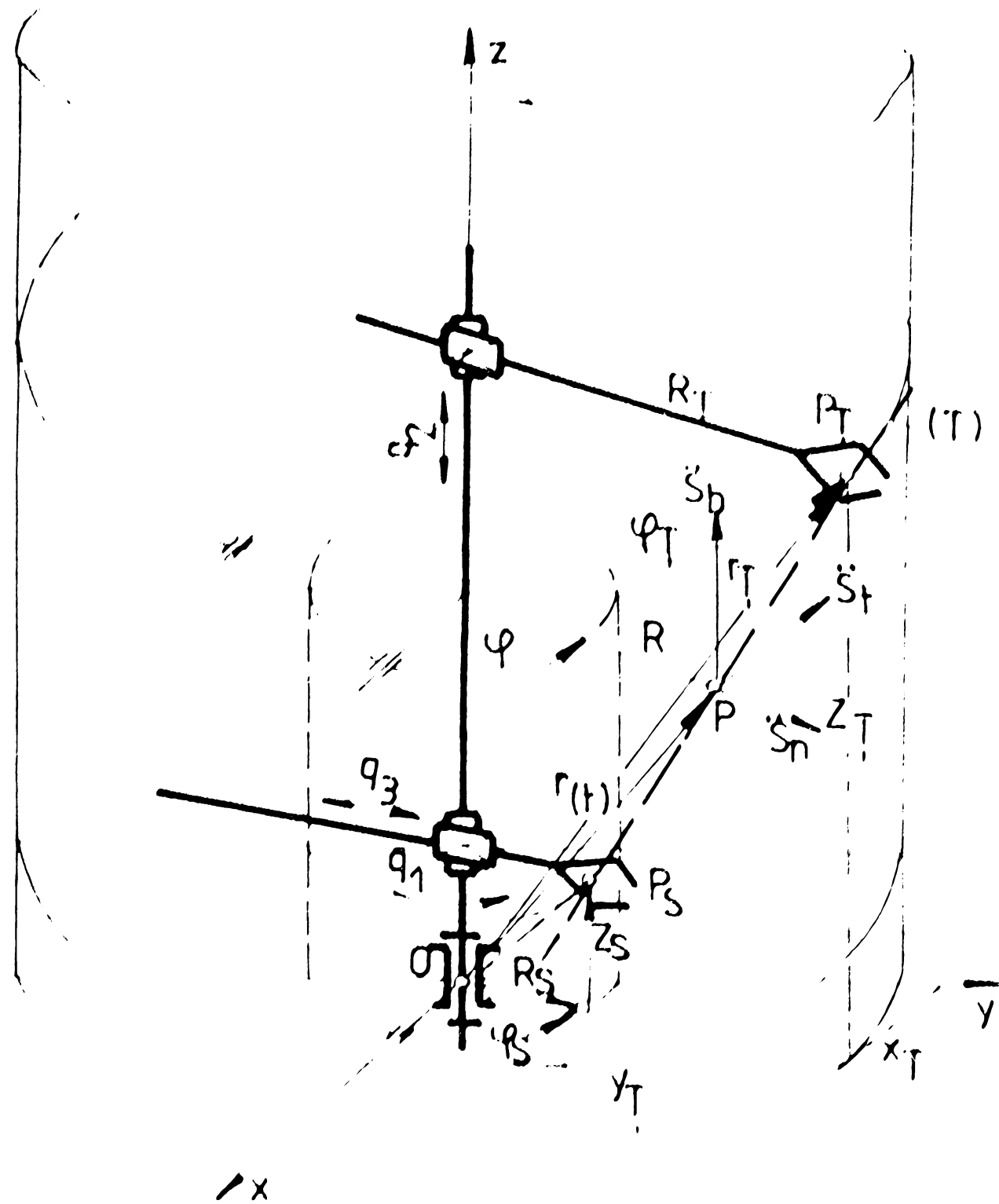


Fig.5.2

α -a notat cu m_T următoarea expresie :

$$m_T = \cos \left[\arctg \frac{z_T - z_B}{[(y_T - y_B)^2 + (x_T - x_B)^2]^{1/2}} \right] \quad (5.16)$$

ce caracterizează direcția traiectoriei în spațiu.

Totodată, ținînd seama de coordonatele generalizate ale lanțului cinematic, vectorul $r(t)$ mai poate fi scris și sub următoarea formă :

$$\bar{r}(t) = \begin{vmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} q_3 \cos q_1 \\ q_3 \sin q_1 \\ q_2 \end{vmatrix} \quad (5.17)$$

În mod identic cu cazul precedent, la o variație cu ds a spațiului parcurs de r.c. de traiectorie, rezultă noile valori ale celor trei coordonate generalizate, respectiv (R_1, φ_1, z_1) :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg \left[R \sin \varphi + \frac{ds}{a_y} \right] / \left[R \cos \varphi + \frac{ds}{a_x} \right] \\ z_1 &= z + \frac{ds}{a_z} \\ R_1 &= \left[\left(R \cos \varphi + \frac{ds}{a_x} \right)^2 + \left(R \sin \varphi + \frac{ds}{a_y} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (5.18)$$

unde :

$$a_x = \left[1 + \frac{(z_T - z_S)^2}{(R_T \cos \varphi_T - R_S \cos \varphi_S)^2} + \frac{(R_T \sin \varphi_T - R_S \sin \varphi_S)^2}{(R_T \cos \varphi_T - R_S \cos \varphi_S)^2} \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

și similar a_y și a_z .

Expresiile respective sînt utile în procesul de interpolare a traiectoriei.

5.3. Stabilirea configurațiilor momentane ale lanțului cinematic (M.G.T.)

Determinarea mulțimilor configurațiilor admise constă deci din rezolvarea problemei cinematice inverse, pentru o succesiune dată a pozițiilor pe o traiectorie impusă în spațiul de lucru.

Spre deosebire de problema directă, unde vectorul de poziție se determină univoc, funcție de valoarea coordonatelor generalizate ale lanțului cinematic, problema cinematică inversă nu este univocă; respectiv, unei anumite poziții în spațiul de lucru (pe traiectorie) îi corespund o mulțime de configurații $Q_k = Q_k(q_i)$.

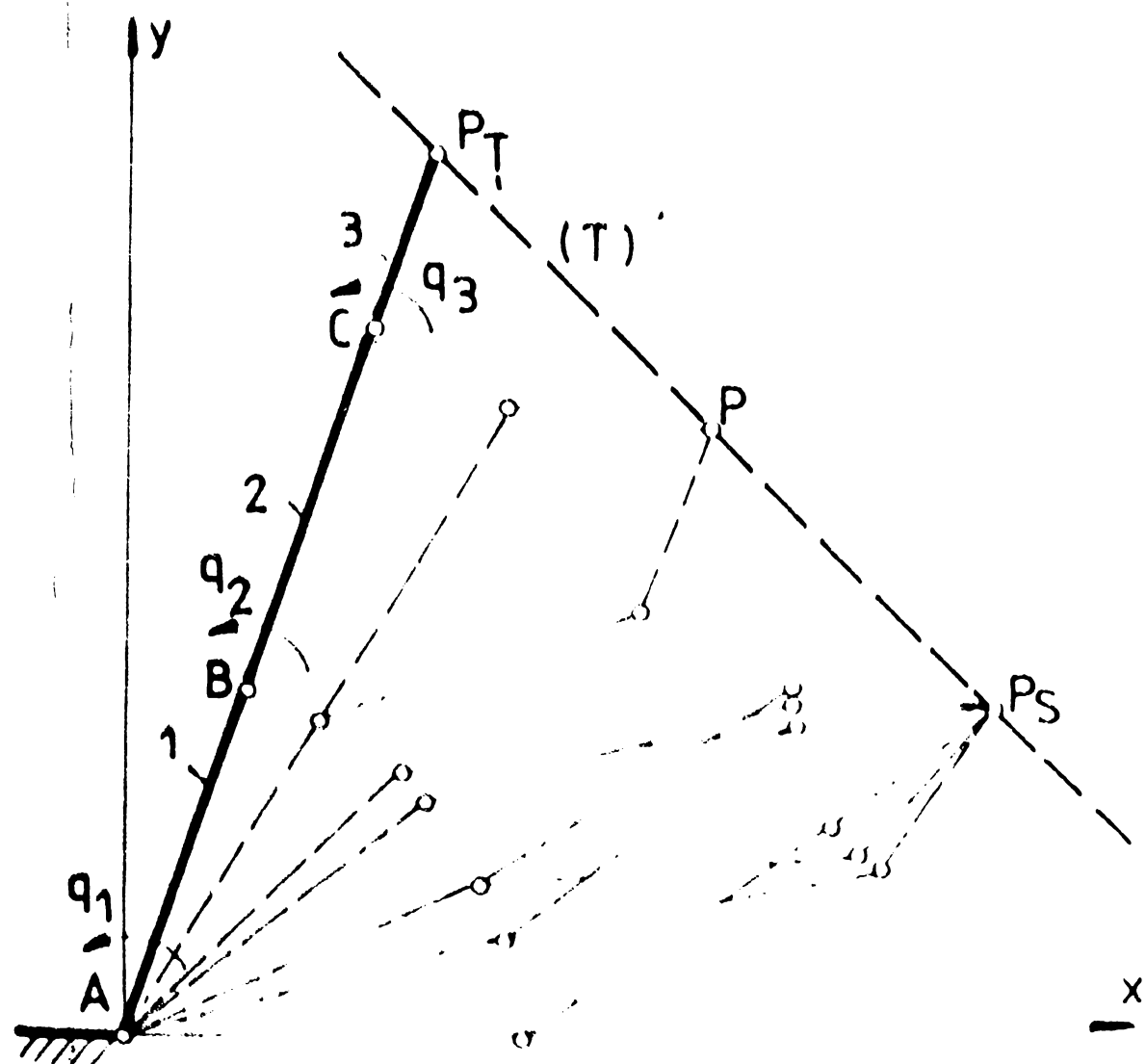


Fig.5.3

Altfel, în situația lanțului cinematic din figura 5.3, pentru traiectoria linie dreaptă acceptată, rezultă un număr de configurații diferite raportate la același punct de pe traiectorie, respectiv câte un vector de poziție al fiecăruia :

$$\bar{R}_n = \bar{R}_n(1); \bar{R}_n(2); \dots \bar{R}_n(k); \dots \dots \bar{R}_n(m) \quad (5.20)$$

obținuți cu matricile de transformare :

$${}^0T_n = {}^0T_n(1), {}^0T_n(2) \dots {}^0T_n(k) \dots \dots {}^0T_n(m) \quad (5.21)$$

$k = 1, 2, \dots, m$ - numărul punctelor de precizie pe traiectorie.

Configurația momentană a lanțului cinematic este definită de matricea coordonatelor generalizate q_i a cuplelor cinematice componente :

$$q_i = |q_1, q_2, \dots, q_n|^T \quad (5.22)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ - numărul cuplelor cinematice

O configurație se consideră admisibilă dacă valorile coordonatelor generalizate satisfac limitele constructive și funcționale (în limitele domeniului de variație), adică dacă :

$$q_i \min \leq q_i \leq q_i \max \quad (5.23)$$

În fond, pentru lanțurile cinematice deschise, rezolvarea problemei cinematice inverse se reduce la rezolvarea sistemului de ecuații neliniare cu "n" necunoscute, prezentate în relația (3.33) :

$$f_1(q_i) = \lambda_1 \quad (5.24)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații conduce la soluții distincte, în cazul în care determinantul matricei iacobian este diferit de zero :

$$\det J = \det \left| \frac{\partial f_1}{\partial q_i} \right| \neq 0 \quad (5.25)$$

Pentru situațiile când acesta este nul, se obțin valori nedeterminate ale coordonatelor generalizate, prin urmare, configurații degenerate, care nu pot fi accentate.

În cazurile în care la deplasarea pe traiectorie nu sînt impuse condiții suplimentare de mișcare, se pot accepta configurații care răspund la următoarele condiții :

- acționarea - la un moment dat - a cît mai multe sau cît mai puține cuple cinematice ;
- acționarea - în principal - a cuplelor cinematice mai apropiate de I.C. sau invers, mai depărtate de acesta ;
- acționarea cuplelor cinematice de rotație sau de translație sau ambele tipuri de cuple concomitent ;
- acceptarea sau interzicerea inversării sensului de mișcare în cuplele cinematice etc.

Ca rezultat se obține mulțimea $G_K \subset Q_K$ ($K = 1, m$) a configurațiilor acceptate, pentru punctele de precizie ale traiectoriei.

În situația punctelor, în care se obțin numai configurații degenerate, se pot lua, cu aproximație relativ bună, valorile coordonatelor generalizate din punctele precedente, deci q_{K-1} .

Astfel, fiecare din mulțimile G_K va conține un număr finit de configurații ale lanțului cinematic.

Trecerea dintr-un punct "k" în următorul "k+1", pe traiectorie, nu trebuie să se întâmple cu modificări exagerate ale coordonatelor generalizate. Prin urmare, dacă se adoptă o funcție de formă aditivă $P_{K,K+1}$ care să exprime calitatea transformărilor configurațiilor între puncte, aceasta va trebui să fie :

$$P_{K,K+1} = \sum_{i=1}^n [\min \Delta q_i(k, k+1)] \quad (5.26)$$

Dacă se reprezintă valorile coordonatelor generalizate acceptate sub forma grafului din figura 5.4, se pot determina valorile

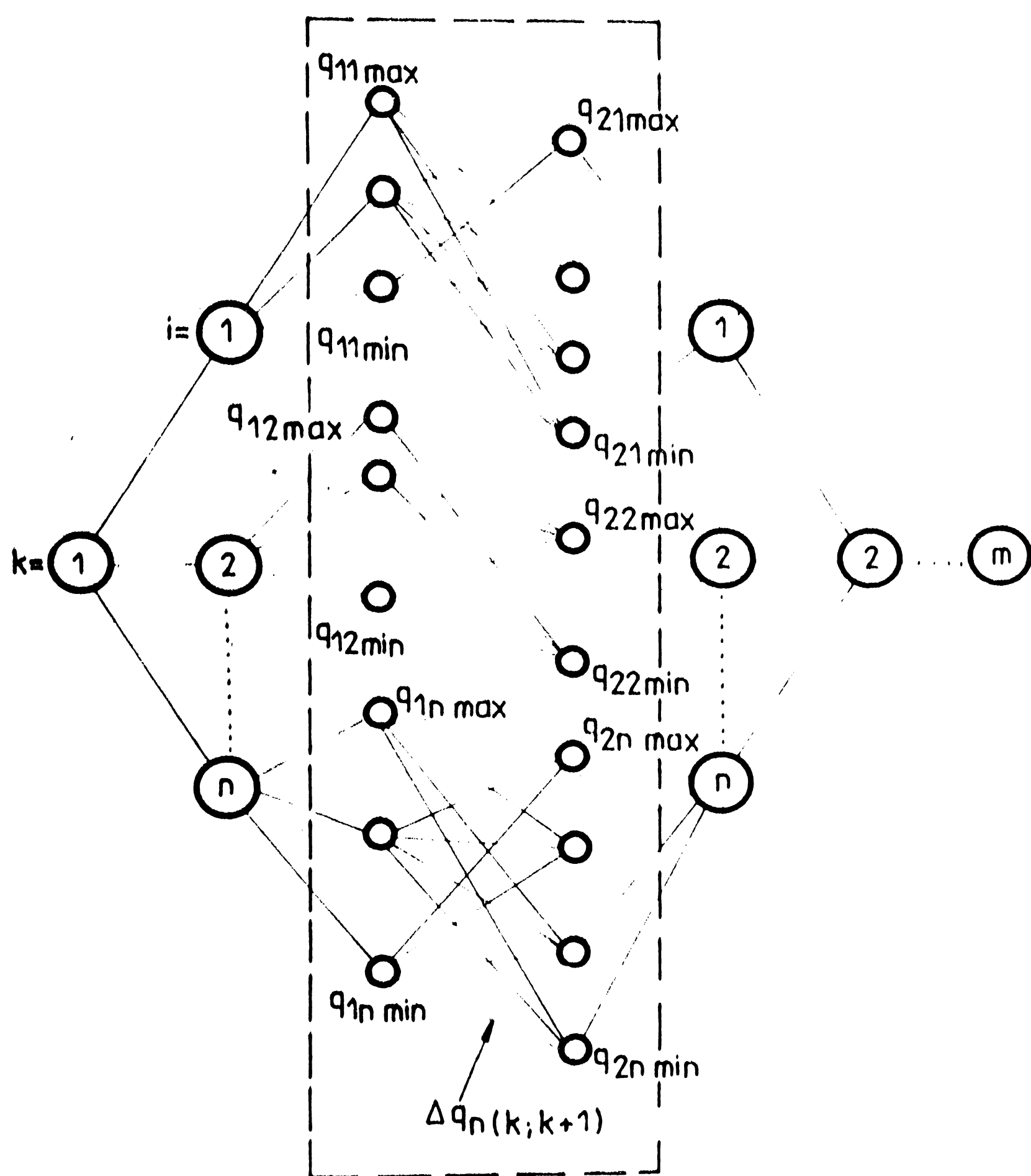


Fig. 5.4

minime ale variațiilor acestora pentru fiecare cuplă cinematică - între punctele nodale ale traiectoriei P.C. - bineînțeles funcție de numărul configurațiilor rezultate.

Pe baza grafului prezentat, utilizând algoritmul Roy-Warshall /14/, se poate determina matricea drumurilor M^* pornind de la matricea de adiacență M a grafului, rezultând valoarea minimă căutată.

Concluzionăm că, în urma acestui studiu se pot adopta

configurațiile momentane ale lanțului cinematic, în situații în care nu se adoptă legea de mișcare pe traiectorie a P.C. Pentru situația în care legea de mișcare este impusă, coordonatele generalizate se obțin pe baza acesteia.

5.4. Legi de mișcare ale P.C. pe traiectorie

Problema determinării legilor de mișcare a P.C. pe traiecto-

rie este o problemă deosebită, legată direct de dinamica R.I. și implicit, de sistemul de acționare și comandă al acestora. Desigur că impunerea unor anumite legi de mișcare a P.C. decurge și din aplicațiile concrete, în care este implicat R.I., cum ar fi :

- procese, în care se necesită sincronizarea între mișcările efectuate de R.I. și mișcările unor obiecte sau utilaje servite de acesta ;
- procese de mînuire optimă de către R.I. a unor obiecte foarte grele sau obiecte fragile ;
- procese de tăiere sau sudare, în situația cărora se impun viteze constante electrodului sau sculei de tăiat (P.C.) pe traiectorie ;
- deplasări diferite la curse active și la curse de mers în gol, în diferite procese de servire sau prelucrare etc.

Între legile de mișcare ale P.C. pe traiectorie și legile de mișcare în cuplele cinematice ale lanțului cinematic există corelațiile specificate în capitolele precedente.

Problema se poate pune sub două aspecte :

- fie se aleg legile de mișcare în cuplele cinematice, rezultînd legile de mișcare ale P.C.,
- fie se impun legile de mișcare ale P.C., rezultînd legile de mișcare în cuplele cinematice.

Abordarea unuia sau altuia din procedee este dictată de aplicațiile expuse anterior, coroborat cu posibilitățile și limitele sistemului de acționare al R.I.

Se vor analiza, în continuare - din punct de vedere al legilor de mișcare pe traiectorie - lanțurile cinematice expuse în § 5.2, pentru deplasări ale P.C. pe traiectorie-linie dreaptă.

Pentru lanțul cinematic T.T.T. (fig. 5.1) se pot determina expresiile coordonatelor generalizate $q_i(t)$, ($i=1,2,3$), funcție de spațiul $S(t)$ parcurs de P.C. pe traiectorie :

$$x(t) = q_1(t) = \cos \left[\arctg \frac{[(y_T - y_S)^2 + (z_T - z_S)^2]^{1/2}}{x_T - x_S} \right] \cdot S(t) = M_x \cdot S(t)$$

$$y(t) = q_2(t) = M_y \cdot S(t) \quad (5.27)$$

$$z(t) = q_3(t) = M_z \cdot S(t)$$

respectiv :

$$q_i(t) = \begin{vmatrix} M_x & M_y & M_z \end{vmatrix}^T \cdot S(t) \quad (5.27')$$

unde : M_x, M_y, M_z sînt coeficienți care definesc poziția traiectoriei în spațiu.

Derivînd expresiile (5.27) odată sau de două ori, se obțin vitezele, respectiv accelerațiile generalizate în cuplurile cinematice, funcție de viteza, respectiv accelerația r.C. pe traiectorie :

$$\dot{q}_1(t) = |M_x.M_y.M_z|^T . \dot{S}(t) \quad (5.28)$$

și :

$$\ddot{q}_1(t) = |M_x.M_y.M_z|^T . \ddot{S}(t) \quad (5.29)$$

Acceptînd diferite legi de mișcare a P.C., respectiv legi de variație a lui $S(t)$, se obțin legile de variație în timp a coordonatelor, vitezelor și respectiv, accelerațiilor generalizate în cuplurile cinematice.

Dacă se procedează în mod similar pentru lanțul cinematic a cărui structură este prezentată în figura 5.2, se obțin coordonatele generalizate $q_i(t)$, ($i=1,2,3$), cu expresiile (5.15) și în continuare, vitezele și accelerațiile generalizate :

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) = \dot{q}_1(t) &= \frac{h \cdot \dot{S}(t)}{h^2 + (S_0 + S(t))^2} \\ \dot{z}(t) = \dot{q}_2(t) &= (1 - m_T^2) \cdot \dot{S}(t) \end{aligned} \quad (5.30)$$

$$\dot{R}(t) = \dot{q}_3(t) = \frac{(S_0 + S(t)) \cdot m_T^2 \cdot \dot{S}(t)}{h^2 + [(S_0 + S(t))^2 \cdot m_T^2]^{1/2}}$$

și :

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1(t) &= h \cdot \frac{[h^2 + (S_0 + S(t))^2] \cdot \ddot{S}(t) - 2(S_0 + S(t)) \cdot \dot{S}^2(t)}{[h^2 + (S_0 + S(t))^2]^2} \\ \ddot{q}_2(t) &= (1 - m_T^2) \cdot \ddot{S}(t) \\ \ddot{q}_3(t) &= \frac{h^2 m_T^2 \cdot \dot{S}^2(t) + (S_0 + S(t)) \cdot m_T^2 [h^2 + (S_0 + S(t))^2 \cdot m_T^2] \ddot{S}(t)}{[h^2 + (S_0 + S(t))^2 \cdot m_T^2]^{3/2}} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Prin impunerea inițială a legilor de mișcare ale r.C. pe traiectorie, rezultă în cuplurile cinematice legi de mișcare relativ complexe, care în practică pot fi asigurate sau nu de către sistemul de acționare. Prin urmare, este necesară o analiză completă a ansamblului de factori, care concurează la funcționarea întregului ansamblu, sistem mecanic - sistem de acționare.

Dacă posibilitățile de lucru ale sistemului de acționare sînt

limitate, atunci este necesar să se accepte legile de mișcare în cuplele cinematice, rezultând legile de mișcare ale P.C. pe traiectorie. În figura 5.5 se prezintă câteva din legile de mișcare, care pot fi acceptate în cuplele cinematice.

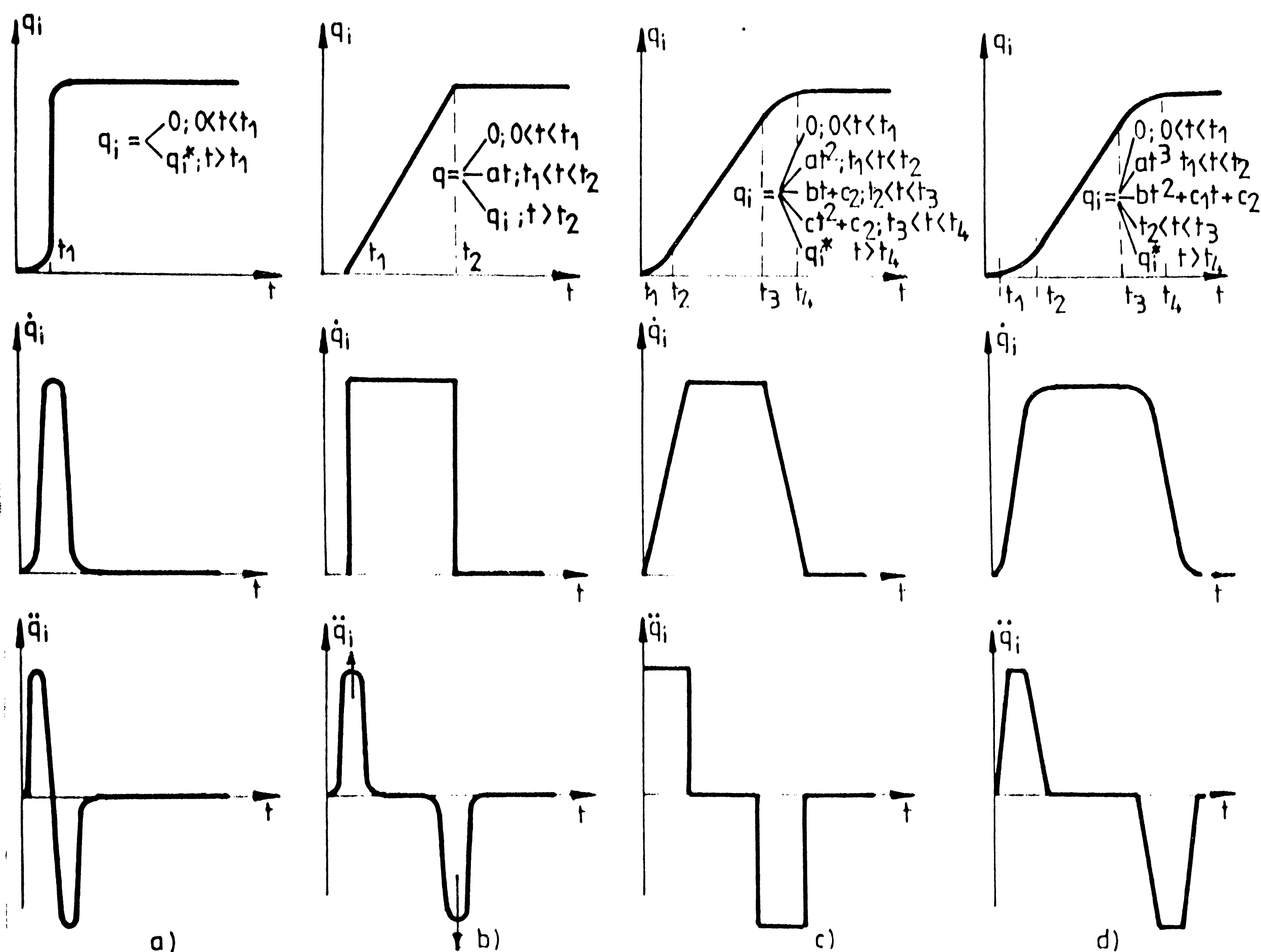


Fig.5.5

Dintre aceste variante, cea notată cu "c" este cea mai frecvent întâlnită în practică.

5.5. Optimizarea legilor de mișcare ale P.C. și determinarea unor traiectorii optime

5.5.1. Parametri funcționali analizați

Optimizarea legilor de mișcare ale P.C. și în general al funcționării M.G.T. este o problemă deosebit de importantă, care are drept scop sporirea substanțială a eficienței aplicațiilor acestora. Problemele și metodologia de optimizare pentru diferite tipuri de M.G.T. deși au specificul lor, în multe privințe sînt a-

semănătoare. Prin urmare, o abordare globală a problemelor generale, în continuare, este justificată.

Abordarea sub această formă este rațională și prin faptul că rezultatele generale obținute se pot transpune în particular pentru diferitele tipuri de M.G.T.

În procesul de optimizare al legilor de mișcare a M.G.T. se tinde spre atingerea unor obiective diferite, după cum unul sau altul din scopurile propuse sînt prioritare la un moment dat.

Din punct de vedere funcțional, se poate aprecia că un regim optim, în care lucrează un M.G.T. asigură unul sau mai mulți parametri funcționali la valori maxime, respectiv minime, cerute de proces.

Dintre aceștia amintim următorii :

- solicitările dinamice provocate de vîrfurile de accelerație,
- precizia de deplasare pe traiectorie,
- timpii de deplasare pe traiectorie,
- mărimea spațiului parcurs,
- consumul energetic etc.

Desigur că o analiză aprofundată a acestor parametri, în diferite situații, cînd unul sau altul primează față de ceilalți, va conduce la regimuri de funcționare optime a M.G.T.

În cele ce urmează vom analiza influența acestora asupra bunei funcționalități a M.G.T.

5.5.2. Reducerea accelerației în P.C.

5.5.2.1. Parametri care influențează accelerația P.C.

Un M.G.T. care în funcționare este un sistem dinamic, nu poate fi exploatat în mod optim, dacă nu se adoptă măsuri de diminuare a accelerațiilor, care acționează fie asupra elementelor componente, prin cuplele cinematice motoare, fie final asupra obiectului manipulat, respectiv în P.C.

Pentru diminuarea accelerațiilor este necesar să acționăm asupra mărimilor care o influențează.

Astfel, vitezele și accelerațiile unghiulare, vitezele și accelerațiile liniare, împreună cu dimensiunile elementelor componente, precum și situațiile conjuncturale de suprapunere a mișcărilor în jurul sau în lungul axelor de rotație, conduc la vîrfuri de accelerații uneori nepermise, care produc suprasolicitări a

componentelor lanțului cinematic și - prin aceasta - abateri de la funcționalitatea normală.

Se consideră că pentru reducerea accelerației se poate acționa pe următoarele căi :

- limitarea valorilor maxime ale vitezelor în unele cuple cinematice (vitezele generalizate) ;
- influențarea directă a accelerației P.C. prin adoptarea unor legi de mișcare corespunzătoare, pe traiectorie ;
- deplasarea în spațiul de lucru pe traiectorii de accelerație minimă.

5.5.2.2. Limitarea valorii maxime a vitezelor generalizate

Dacă se analizează relațiile (5.26) și (5.29), se poate remarca faptul că ele reprezintă corelații între coordonatele, vitezele și respectiv, accelerațiile generalizate și parametri cinematici ai P.C. (respectiv spațiul parcurs, viteze și accelerația acestuia). Vectorul accelerație $\ddot{S}(t)$ al P.C. se poate prezenta prin trei componente, dirijate după cele trei direcții : normală ($\ddot{S}_n(t)$), tangențială ($\ddot{S}_t(t)$) și axială ($\ddot{S}_z(t)$), (fig.5.2).

Expresiile acestor componente se pot scrie sub următoarea formă :

$$\ddot{S}(t) = \left| \begin{array}{l} \ddot{S}_n(t) = \dot{q}_3(t) - q_3(t) \cdot \dot{q}_1^2(t) \\ \ddot{S}_z(t) = \ddot{q}_2(t) \\ \ddot{S}_t(t) = 2\dot{q}_1(t)\dot{q}_3(t) + \ddot{q}_1(t)q_3(t) \end{array} \right| \quad (5.32)$$

Mărimea vectorului accelerație absolută a P.C. se obține :

$$\ddot{S}(t) = \left[\ddot{S}_n^2(t) + \ddot{S}_z^2(t) + \ddot{S}_t^2(t) \right]^{1/2} \quad (5.33)$$

Problema care se pune este de a determina funcțiile $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ în așa fel ca vectorul accelerație absolută a P.C. să atingă un minim relativ.

Această problemă însă, conduce la o ecuație diferențială neliniară, care nu se poate rezolva analitic.

În vederea depășirii acestui inconvenient se procedează la adoptarea unor legi de variație a coordonatelor generalizate și a derivatelor acestora, care să conducă la valori reduse ale accelerației absolute a P.C.

Astfel, dacă am accepta o lege de variație de forma celei pre-

zentate în figura 5.5, b și dacă deplasarea P.C. s-ar desfășura pe o traiectorie-linie dreaptă, accelerația în P.C. se anulează. Desigur că acceptarea unei asemenea legi ar neglija situația reală când apar faze de accelerare și decelerare extinse, pe perioade de timp mai lungi sau mai scurte, deci legi de variație ca în figura 5.5, c. Pentru compensarea pierderilor de timp este necesar ca în cel de al doilea caz, viteza maximă să ia valori mai ridicate decât în primul. Sigur că acceptarea aceluiași tip de lege de variație pentru parametri cinematici ai tuturor cuplele cinematice motoare, va conduce la timpi diferiți de desfășurare a mișcărilor în cuplele cinematice.

În cele ce urmează se va determina valoarea timpului cel mai

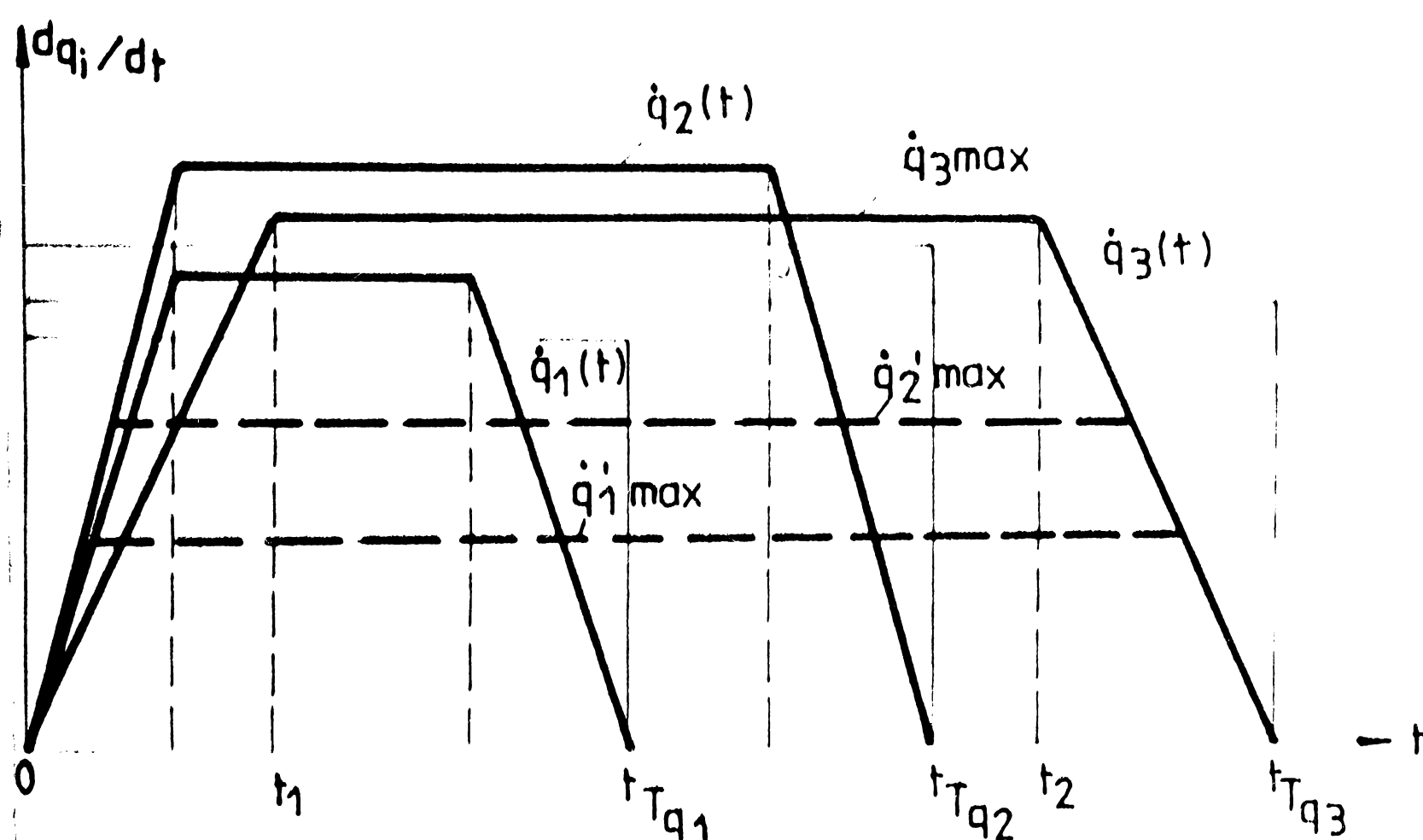


Fig. 5.6

extins, respectiv conform figurii 5.6 t_{Tq_3} .

Urmărind figura se poate aprecia că :

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_{i1} \cdot t$$

pentru $t = 0 + t_1$

$$\dot{q}_i = \dot{q}_{i \max}$$

pentru $t = t_1 + t_2$

$$\dot{q}_i = \dot{q}_{i \max} - \ddot{q}_{i2} \cdot t$$

pentru $t = t_2 + t_{Tq_i}$

$$(5.34)$$

Prin urmare :

$$q_i(t) = \int_0^{t_{Tq_i}} \dot{q}_i \cdot dt = \int_0^{t_1} \ddot{q}_{i1} \cdot t \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{q}_{i \max} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_{Tq_i}} (\dot{q}_{i \max} - \ddot{q}_{i2} \cdot t) \cdot dt \quad (5.35)$$

sau pentru situația concretă prezentată :

$$\Delta q_3 = q_3(t=t_{Tq_3}) - q_3(t=0) =$$

$$= \frac{1}{2} \dot{q}_{3 \max}^2 / \ddot{q}_{31} + \dot{q}_{3 \max} (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \dot{q}_{3 \max}^2 / \ddot{q}_{32} \quad (5.36)$$

Rezultă :

$$t_2 - t_1 = \Delta q_3 / \dot{q}_{3 \max} - \frac{1}{2} \dot{q}_{3 \max} (1/\ddot{q}_{31} + 1/\ddot{q}_{32}) \quad (5.37)$$

Cum :

$$t_1 = \dot{q}_3 \max / \ddot{q}_{31} \quad (5.38)$$

se poate scrie :

$$t_{Tq_3} = \Delta q_3 / \dot{q}_3 \max + \frac{1}{2} \dot{q}_3 \max (1/\ddot{q}_{31} + 1/\ddot{q}_{32}) \quad (5.39)$$

Cu valoarea " t_{Tq_3} " se pot calcula noile valori maxime ale vitezelor generalizate pentru celelalte două cuple cinematice, respectiv $\dot{q}'_1 \max$ și $\dot{q}'_2 \max$:

$$\dot{q}'_1 \max = \frac{1}{2} \left[q_{1\max} \cdot t_{Tq_3} - (q_{1\max} \cdot t_{Tq_3} - 4 \Delta q_1 \cdot q_{1\max})^{1/2} \right] \quad (5.40)$$

$$\dot{q}'_2 \max = \frac{1}{2} \left[q_{2\max} \cdot t_{Tq_3} - (q_{2\max} \cdot t_{Tq_3} - 4 \Delta q_2 \cdot q_{2\max})^{1/2} \right] \quad (5.41)$$

Categoric această măsură contribuie la diminuarea valorilor accelerației P.C.; bineînțeles fără ca timpul de manevră între punctul start și punctul țintă să se modifice.

Metoda este utilizabilă pentru situații în care nu interesează traiectoria care leagă cele două puncte extreme.

În caz contrar se recurge la alte metode.

5.5.2.3. Legi de mișcare optime

O altă metodă de diminuare a solicitărilor dinamice a ansamblului R.I., respectiv a reducerii valorilor maxime ale accelerației în P.C., constă în adoptarea unor asemenea legi de mișcare pe traiectorie, care conduc la valori ale accelerațiilor cât mai reduse.

Evident o asemenea metodă este limitată de anumite situații concrete cerute de diferitele aplicații, în care poate fi implicat R.I. Legile de mișcare se pot accepta deci, fie în concordanță cu cerințele aplicației propuse, fie din considerente legate de diminuarea solicitărilor dinamice ale R.I. În cel de-al doilea caz, există libertatea de a adopta acea lege, care ne conduce la rezultatele scontate. În figura 5.7 sînt prezentate trei variante posibile de legi de mișcare a P.C. pe traiectorie ($v = ct$, $a = ct$;

$$a = c_1 \sin c_2 t)$$

În primul caz, cînd viteza P.C. este constantă pe traiectorie $v(t) = v_0 = \text{constant}$, se realizează o deplasare pe traiectorie fără solicitări dinamice, cu excepția punctelor de pornire (start) și oprire (țintă), cînd accelerația în P.C. atinge valori deosebit de

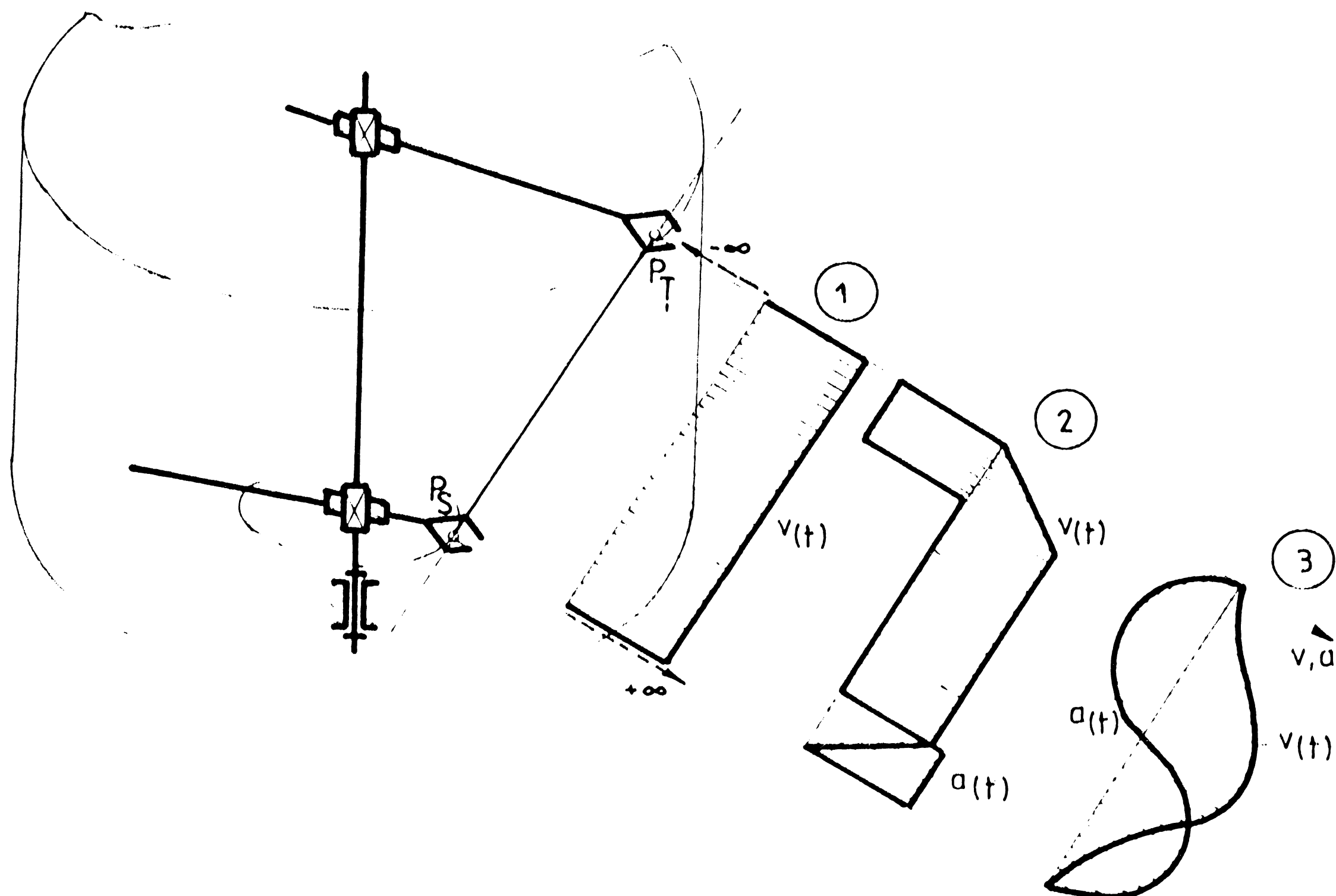


Fig.5.7

mari, valori care conduc la șocuri, vibrații și prin aceasta la degradarea preciziei de poziționare în aceste puncte. În punctul start, această situație conduce la deformări funcționale, care se repercutează și în continuare pe traiectorie, în vecinătatea acestui punct.

În particular, pentru M.G.T. prezentat în figura 5.7, au fost scrise relațiile (5.15), (5.30), (5.31), relații care exprimă coordonatele, vitezele și accelerațiile generalizate ale cuplelor cinematice componente. Ele pot fi concretizate pentru legea de mișcare cu viteză constantă :

$$\begin{aligned} \varphi = q_1(t) &= \alpha + \operatorname{arctg}[(s_0 + v_0 \cdot t)/h] \\ z = q_2(t) &= (1 - m_T^2) \cdot v_0 \cdot t \\ R = q_3(t) &= [h^2 + (s_0 + v_0 \cdot t)^2 \cdot m_T^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} = \dot{q}_1(t) &= \frac{h \cdot v_0}{h^2 + (s_0 + v_0 \cdot t)^2} \\ z = \dot{q}_2(t) &= (1 - m_T^2) \cdot v_0 \\ R = \dot{q}_3(t) &= \frac{(s_0 + v_0 \cdot t) \cdot m_T^2 \cdot v_0}{[h^2 + (s_0 + v_0 \cdot t)^2 \cdot m_T^2]^{1/2}} \end{aligned} \quad (5.43)$$

și :

$$\begin{aligned}\ddot{\varphi} = \ddot{q}_1(t) &= -h \cdot \frac{2(S_0 + v_0 \cdot t) \cdot v_0^2 \cdot t^2}{[h^2 + (S_0 + v_0 \cdot t)^2]^2} \\ \ddot{z} = \ddot{q}_2(t) &= 0 \\ \ddot{R} = \ddot{q}_3(t) &= \frac{h^2 \cdot m_T^2 \cdot v_0^2}{[h^2 + (S_0 + v_0 \cdot t)^2 \cdot m_T^2]^{3/2}}\end{aligned}\quad (5.44)$$

Relațiile prezentate sînt valabile și pentru cazul al doilea, bineînțeles fac excepție perioadele de accelerare și respectiv, decelerare. Acest tip de lege de mișcare are dezavantajul apariției unor forțe de inerție rezultante în I.C. pe perioadele de accelerare și decelerare. Relațiile care dau coordonatele, vitezele și accelerațiile generalizate pentru perioadele respective sînt prezentate în continuare :

$$\begin{aligned}\varphi = q_1(t) &= \alpha + \operatorname{arctg}[(S_0 + \frac{1}{2} a_0 t^2)/h] \\ z = q_2(t) &= \frac{1}{2}(1 - m_T^2) \cdot a_0 \cdot t^2\end{aligned}\quad (5.45)$$

$$R = q_3(t) = [h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2)^2 \cdot m_T^2]^{1/2}$$

$$\dot{\varphi} = \dot{q}_1(t) = \frac{h \cdot a_0 \cdot t}{h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2)^2}$$

$$\dot{z} = \dot{q}_2(t) = (1 - m_T^2) \cdot a_0 \cdot t \quad (5.46)$$

$$\dot{R} = \dot{q}_3(t) = \frac{(S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2) \cdot m_T^2 \cdot a_0 \cdot t}{[h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2)^2 \cdot m_T^2]^{1/2}}$$

și :

$$\ddot{\varphi} = \ddot{q}_1(t) = h \cdot \frac{[h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2)^2] \cdot a_0 - 2(S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2) \cdot a_0^2 \cdot t^2}{[h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2)^2]^2}$$

$$\ddot{z} = \ddot{q}_2(t) = (1 - m_T^2) \cdot a_0 \quad (5.47)$$

$$\ddot{R} = \ddot{q}_3(t) = \frac{h^2 \cdot m_T^2 \cdot a_0^2 \cdot t^2 + (S_0 + \frac{1}{2} a_0 t^2) \cdot m_T \cdot [h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} a_0 t^2)^2 m_T^2] a_0}{[h^2 + (S_0 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2)^2 \cdot m_T^2]^{3/2}}$$

Pentru evitarea șocurilor provocate de schimbări bruște a-

le valorilor accelerațiilor, se recomandă alegerea unei legi de mișcare, la care - în perioada de accelerare, respectiv decelerare - valoarea accelerației crește treptat de la valoarea zero la valoarea maximă și invers. Această cerință este îndeplinită când accelerația variază după o sinusoidă.

Pentru acest tip de lege de mișcare, relațiile (5.15), (5.30) și respectiv (5.31) se vor concretiza prin acceptarea expresiilor $S(t)$, $\dot{S}(t)$ și $\ddot{S}(t)$:

$$S(t) = \frac{S_{\max} \cdot t}{2 t_1} - \frac{1}{2\pi} \cdot S_{\max} \cdot \sin \frac{\pi}{t_1} \cdot t \quad (5.48)$$

$$\dot{S}(t) = \frac{S_{\max}}{2 t_1} - \frac{1}{2 t_1} \cdot S_{\max} \cdot \cos \frac{\pi}{t_1} \cdot t \quad (5.49)$$

$$\ddot{S}(t) = \frac{S_{\max}}{2 t_1^2} \cdot \pi \cdot \sin \frac{\pi}{t_1} \cdot t \quad (5.50)$$

5.5.2.4. Trajectorii de accelerație minimă

Ca și în cazurile precedente, metoda expusă în continuare, conduce la diminuarea, respectiv limitarea efectelor dinamice asupra structurii mecanice a R.I.

În ansamblu, problema se pune în următorul mod : dată fiind valoarea maximă a accelerației/decelerației în R.C., care poate - eventual - fi atinsă pe toată durata deplasării, să se determine care traiectorie (sau traiectorii) leagă cele două puncte (start și țintă) fără să existe pericolul depășirii valorii impuse.

Vitezele și accelerațiile admisibile, de-a lungul unei traiectorii, depind de ansamblul forțelor care acționează în lungul acesteia asupra efectivelor finale, asupra structurii R.I. în ansamblu, cât și de constrângerile date de geometria traiectoriei și a forțelor generalizate în cuplurile cinematice ale lanțului cinematic.

Deși este cunoscut caracterul puternic nelinier al ecuațiilor dinamice ale R.I., totuși prin simplificări acceptabile, cele "n" ecuații diferențiale neliniare, ordinare, ale unui lanț cinematic, pot fi aduse la o formă în care ele să depindă liniar de accelerația în R.C.

Urmărind ecuațiile (4.101) se remarcă faptul că matricile coeficienți $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ și $D_i(q)$ depind de coordonatele generalizate ale lanțului cinematic.

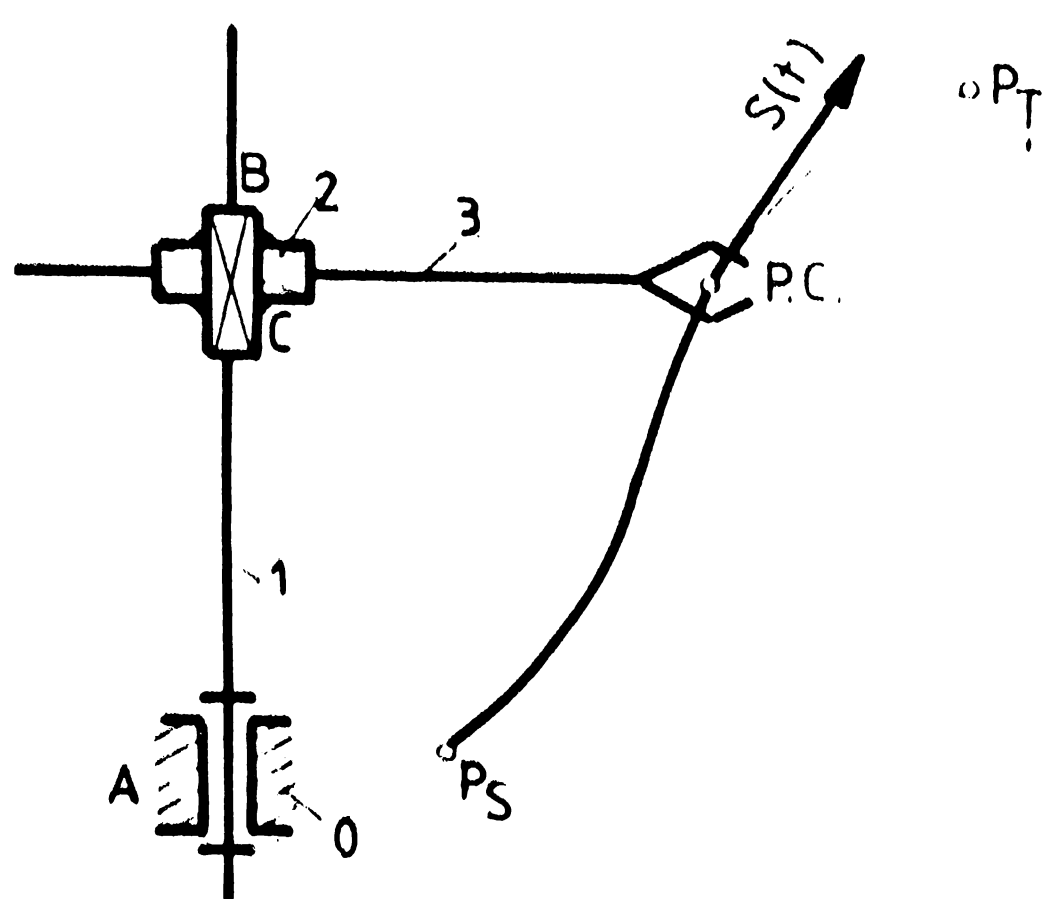


Fig. 5.8

După cum s-a menționat deja în paragrafele precedente, o traiectorie a r.c. poate fi exprimată în funcție de un parametru variabil, reprezentat de coordonata $s(t)$ a acesteia, care reprezintă spațiul parcurs din t_0 la un moment dat.

În urmare, valoarea coordonatei $s(t)$, (fig. 5.8), va lua valori :

$$0 \leq s(t) \leq s_p \quad (5.51)$$

unde :

s_p reprezintă valoarea spațiului în punctul țintă (P_T) al traiectoriei

Dacă se ține seama de următoarele relații :

$$\dot{q}(t) = q' \cdot \dot{s}(t) ; \quad \ddot{q}(t) = q' \cdot \ddot{s}(t) + q'' \cdot \dot{s}^2(t) \quad (5.52)$$

unde s-a notat cu :

$$(\quad)' = d/ds ; \quad (\quad) \cdot = d/dt \quad (5.53)$$

atunci ecuațiile (4.101) pot fi scrise sub forma :

$$a_i(s) \cdot \ddot{s}(t) + b_i(s) \cdot \dot{s}^2(t) + c_i(s) = F_i(s) \quad (5.54)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

unde :

$$\begin{aligned} a_i(s) &= A(q) \cdot q' \\ b_i(s) &= A(q) \cdot q'' + q' \cdot \left[\frac{\partial A(q)}{\partial q} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial A(q)}{\partial q_i} \right) \right] \cdot q' \quad (5.55) \\ c_i(s) &= D_i(q) \end{aligned}$$

Derivatele q' , q'' pot fi evaluate din expresia $r = r(q)$ a traiectoriei, din care, în cadrul problemei cinematice inverse rezultă $q = q(r)$, pentru diferite configurații de r.c.

Deci se pot calcula :

$$q' = \left(\frac{\partial r}{\partial q} \right)^{-1} \cdot r'$$

$$q' = \left(\frac{\partial r}{\partial q}\right)^T \cdot \left[\left(\frac{\partial r}{\partial q}\right) \cdot \left(\frac{\partial r}{\partial q}\right)^T\right]^{-1} \cdot r' \quad (5.56)$$

$$q'' = \left(\frac{\partial r}{\partial q}\right)^{-1} \cdot \left[r'' - \left(\frac{\partial r}{\partial q}\right)' \cdot q'\right]$$

Dacă în ecuațiile (5.54) limităm valoarea forțelor generalizate $F_i(s)$:

$$F_{i \text{ min}} \leq F_i(s) \leq F_{i \text{ max}} \quad (5.57)$$

se va obține :

$$a_i(s) \cdot \ddot{s}(t) + b_i(s) \cdot \dot{s}^2(t) \leq F_{i \text{ max}} - c_i(s)$$

$$a_i(s) \cdot \ddot{s}(t) + b_i(s) \cdot \dot{s}^2(t) \geq F_{i \text{ min}} - c_i(s) \quad (5.58)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

Considerând numai semnul egal pentru situația limită, inegalitățile (5.58) pot fi considerate ca ecuații a două drepte în planul $\ddot{s} - \dot{s}^2$ pentru $s = \text{constant}$ /P21/

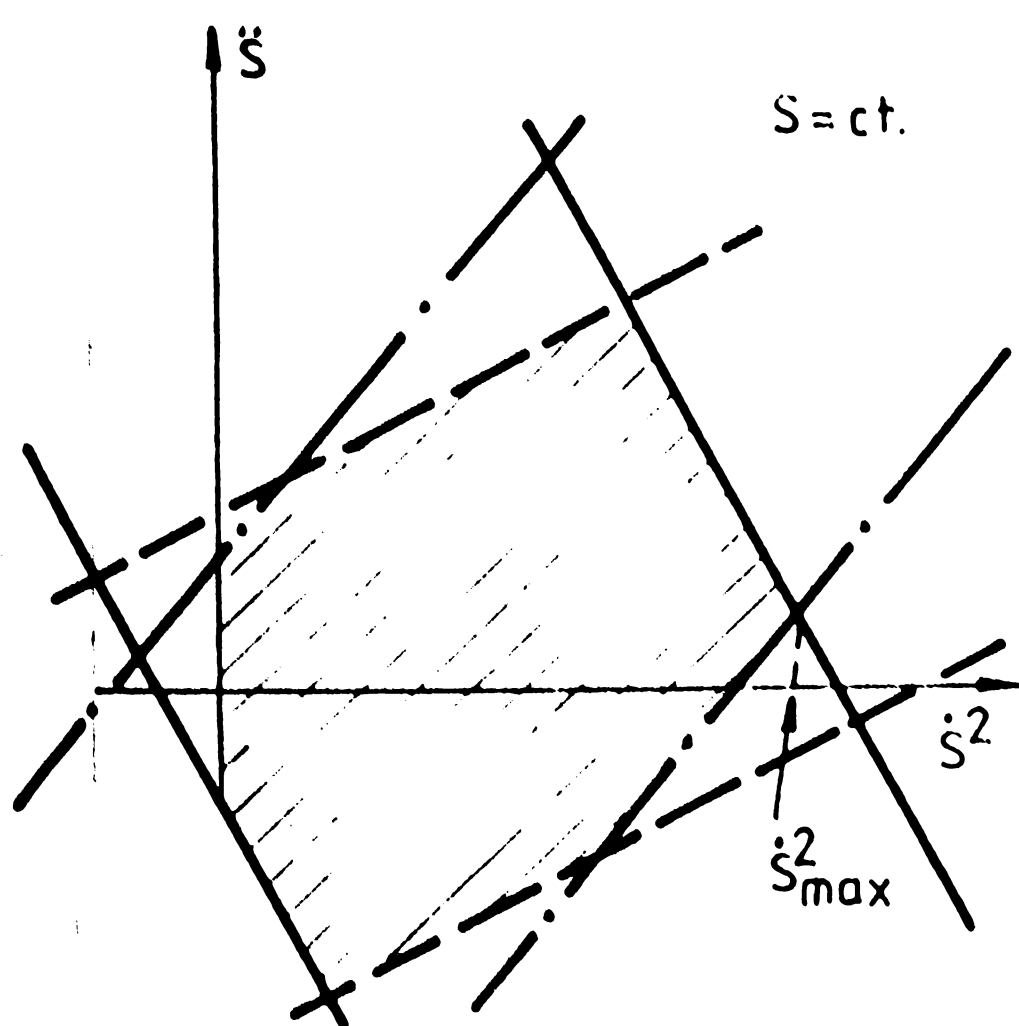


Fig. 5.9

Dacă se repetă operațiunea pentru toate cuplele lanțului cinematic, rezultă de fiecare dată este o pereche de asemenea drepte, care în final vor contura un poligon (fig. 5.9), în interiorul căruia valorile lui \ddot{s} și \dot{s}^2 permit deplasări pe traiectorie în condițiile impuse inițial. Pentru fiecare punct "s" de pe traiectorie se obțin poligoane de forme diferite, astfel că aranjînd întregul ansamblu de-a lungul traiectoriei se obține spațiul permis în domeniul $(s - \dot{s}^2 - \ddot{s})$

limitat de $2n$ suprafețe rezultate din constrîngerile impuse în relațiile (5.58).

Analizînd figura 5.10 se poate observa că în domeniul acceptat, valoarea accelerației/decelerației r.c. este limitată în diferitele puncte ale traiectoriei. Oricum acest spațiu restrîns conține informații utile cu privire la posibilitățile de deplasare pe traiectorie.

Revenind la figura 5.9, care reprezintă o secțiune prin figu-

ra 5.10, viteza maximă posibilă într-un punct de pe traiectorie (\dot{S}_{\max}) este dată de punctul extrem al poligonului caracterizat de o singură valoare a lui \ddot{S} . Insumarea acestor puncte extreme de-a

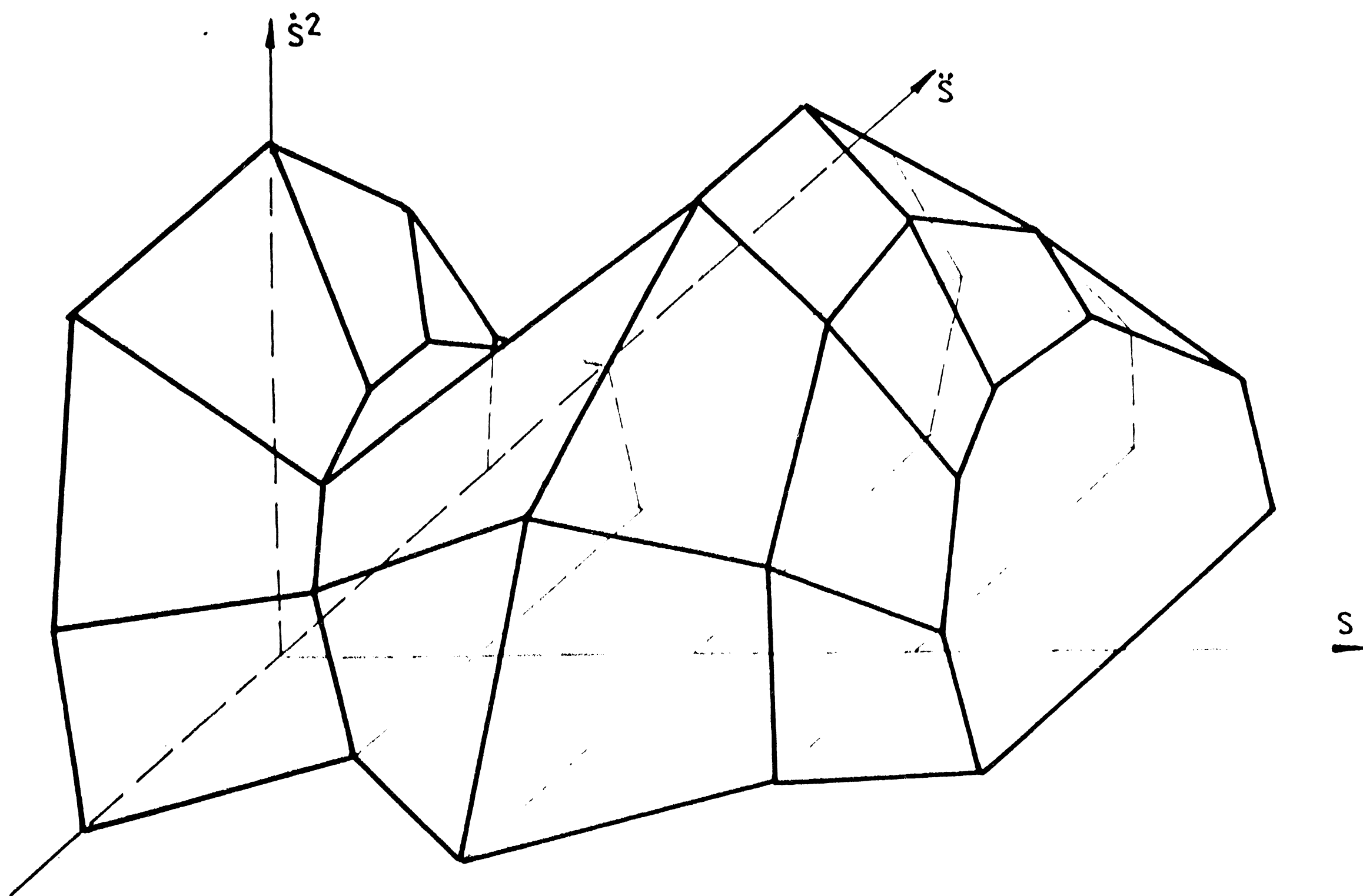


Fig. 5.10

lungul lui S , conduce la curbe limită de tipul celor din figura 5.13. Pentru fiecare $\dot{S} < \dot{S}_{\max}$ din poligon se obțin două valori extreme pentru \ddot{S} , valori care reprezintă accelerația/decelerația maximă și minimă posibilă în limitele constrângerilor impuse inițial mișcării.

5.5.3. Precizia de deplasare pe traiectorie

Deplasarea r.C. pe o traiectorie impusă inițial, între punctul start (r.S.) și punctul țintă (r.T.) este o problemă impusă de cele mai multe ori de aplicațiile propuse R.I. În procesele de vopsire sau sudare, este necesar ca r.C. să parcurgă traiectorii impuse de configurația unui obiect. În alte aplicații, când în spațiul de lucru al R.I. apar obstacole de forme și dimensiuni diferite, apare necesitatea evitării acestora, prin urmare impunerea unor traiectorii ale r.C. adecvate.

Precizia cu care un mecanism reproduce o traiectorie (o cur-

bă) dată are două componente majore /15/: precizia geometrică (numită și structurală) a schemei cinematice a M.G.T. și precizia tehnică (sau tehnologică) a M.G.T. materializat. Prima componentă se referă la situația ideală în care dimensiunile geometrice ale M.G.T. sînt riguros respectate și cuplele cinematice au jocul nul, iar cea de a doua privește situația reală, cînd M.G.T. se obține cu o anumită precizie tehnologică, relativ la cotele de bază și la jocurile din cuplele cinematice.

Lanțurile cinematice, din componența M.G.T. asigură deplasarea P.C. pe o traiectorie, care reproduce doar cu aproximație o traiectorie ideală /K36/. Cele două curbe se intersectează într-un

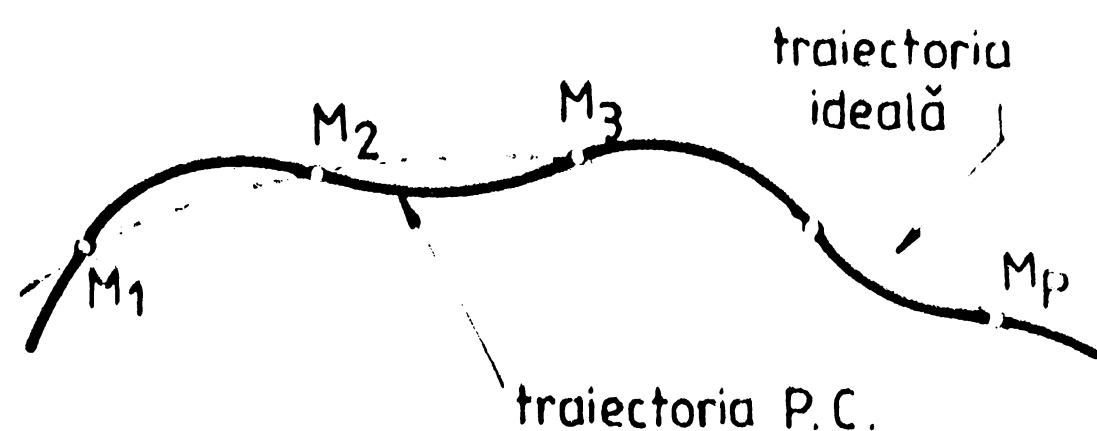


Fig. 5.11

număr finit de puncte, numite "puncte de precizie" (fig. 5.11).

Sistemul de coordonate în care se precizează de obicei traiectoria P.C. este cartezian. Totuși sistemul de comandă al R.I. înțelege doar coordonatele generalizate, punîndu-se deci problema conversiei, fie a coordonatelor generalizate în coordo-

nate carteziane, fie a coordonatelor carteziane în coordonate generalizate. Transformarea unei funcții din coordonate carteziane în coordonatele generalizate ale R.I. nu poate fi făcută decît în puncte discrete. De aceea se utilizează metoda aproximării unei curbe ideale impuse ca traiectorie a P.C., cu o curbă intercalată a cărei valori să coincidă cu ale precedentei în cît mai multe puncte pentru ca precizia de aproximare să fie cît mai bună. Aproximarea funcției (traiectoriei) carteziane se poate face prin acceptarea a "n" funcții de aproximare, cîte una pentru fiecare cuplă cinematică (coordonată generalizată). Cele "n" funcții de aproximare trebuie să conducă la valorile impuse ale traiectoriei în toate punctele de precizie, în plus trebuie să asigure continuitatea vitezelor, respectiv ale accelerațiilor generalizate.

Asemenea condiții pot fi obținute de funcții polinomiale, funcții care pot conduce la abateri inadmisibile de la traiectoria ideală.

O soluție mai bună se obține prin acceptarea cîte unei funcții polinomiale, separat pentru fiecare segment al traiectoriei.

Această metodă necesită funcții polinomiale de gradul trei, pe fiecare segment, cu excepția primului și ultimului segment de traiectorie, deoarece în punctul start și respectiv țintă, se dorește ca viteza și accelerația P.C. să fie nule. Astfel dezvoltarea unei traiectorii prin "n" puncte necesită "n-1" funcții polinomiale : două polinoame de gradul patru, pentru primul și ultimul segment al traiectoriei și "n-3" polinoame de gradul trei pentru restul segmentelor.

În /R3/ se utilizează - în scopul prezentat - funcții spline care asigură traiectoria cea mai scurtă între două puncte și asigură condițiile de continuitate.

Coordonata generalizată $q_1(t)$ pe o porțiune (segment) de traiectorie este descrisă de o funcție polinomială $F(t)$:

$$q_1(t) = F(t) = B_1 + B_2 t + B_3 t^2 + B_4 t^3 \quad (5.59)$$

Pentru un segment "k" al traiectoriei, considerînd variația timpului de la valoarea 0 la valoarea t_{k+1} , se pot exprima condițiile limită pe segmentul respectiv :

$$\begin{aligned} F(0) &= F_k & F(t_{k+1}) &= F_{k+1} \\ F'(0) &= F'_k & F'(t_{k+1}) &= F'_{k+1} \end{aligned} \quad (5.60)$$

unde F'_k și F'_{k+1} reprezintă vitezele generalizate în punctele k și k+1.

Folosind condițiile la limită (5.60), se pot determina coeficienții $B_1 \dots B_4$ din expresia (5.59), obținîndu-se valori unice pentru aceștia pe fiecare segment al traiectoriei.

Pentru primul și ultimul segment al traiectoriei se acceptă funcții de forma :

$$F(t) = B_1 + B_2 \cdot t + B_3 \cdot t^2 + B_4 t^3 + B_5 \cdot t^4 \quad (5.61)$$

căroră li se impun condiții suplimentare :

$$F'_1 = F''_1 = F'_n = F''_n = 0 \quad (5.62)$$

cu ajutorul căroră se determină și de această dată coeficienții $B_1 \dots B_5$.

Problema divizării în segmente a traiectoriei P.C. este rezolvată prin acceptarea timpului de parcurs al fiecărui segment. Astfel

$$t = \frac{l}{S} \quad (5.63)$$

unde :

T reprezintă timpul în care r.c. ajunge din punctul start în punctul țintă al traiectoriei,

S un scalar, a cărui valoare trebuie acceptată în așa fel încât să nu se depășească valorile maxime ale vitezelor, respectiv ale accelerațiilor generalizate, pentru fiecare cuplă cinematică.

$$S = \max (S_v, S_a) \quad (5.64)$$

unde :

$$S_v = [\max_j \max_i (|F'_{ij}(t)| \text{ pentru } 0 \leq t \leq t_{i+1}) / v_{\max j}] \quad (5.65)$$

și :

$$S_a^2 = \max_j [\max_i (|F''_{ij}(t)| \text{ pentru } 0 \leq t \leq t_{i+1}) / a_{\max j}] \quad (5.66)$$

Pentru o structură dată a lanțului cinematic al R.I. poziția r.c. la un moment dat (poziția reală) și poziția ideală a acestuia (r.c.) sînt raportate la sistemul de referință inițial

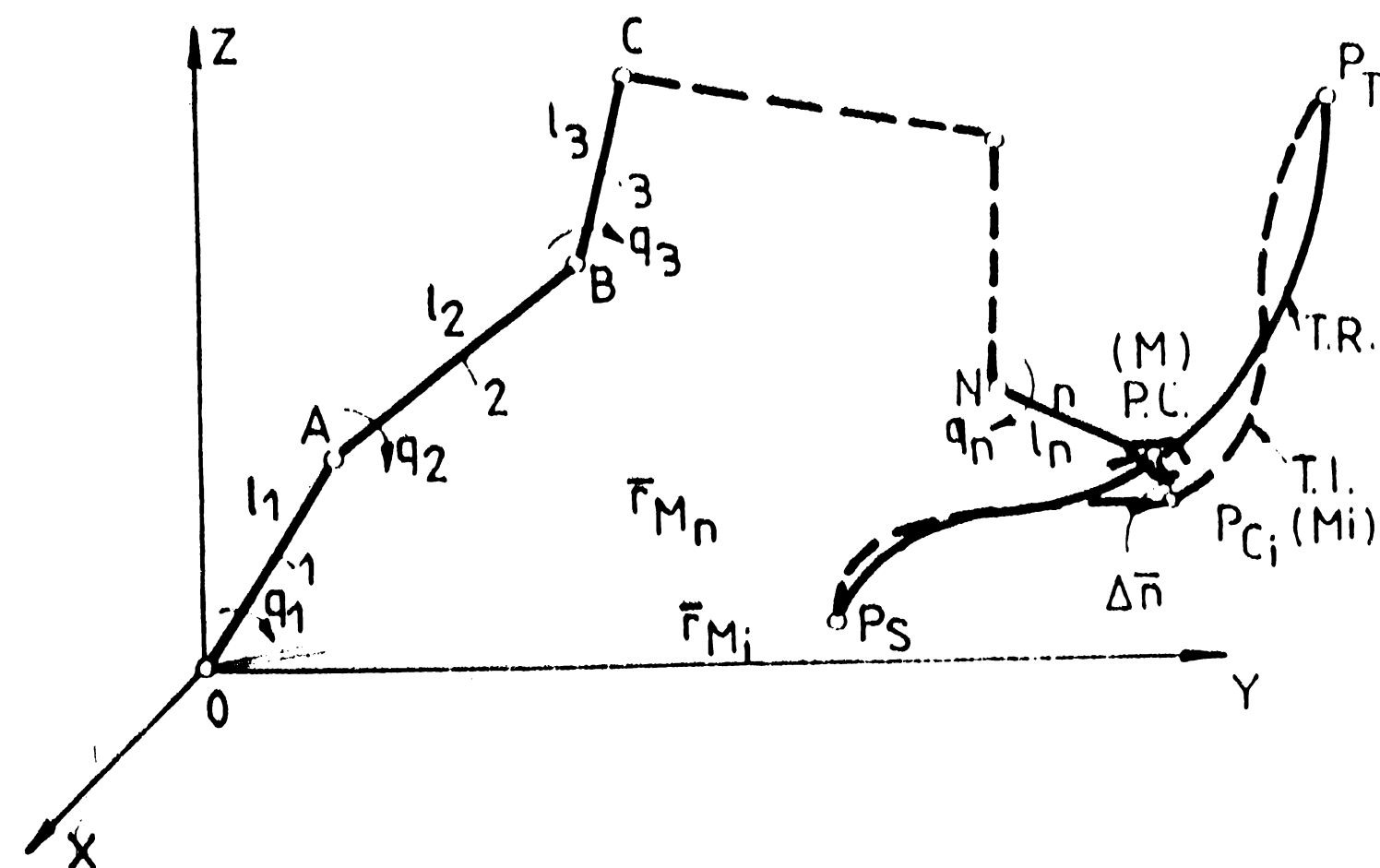


Fig. 5.12

prin vectorii \bar{r}_{Mn} și \bar{r}_{Mi} . Cei doi vectori obținuți, primul prin măsurători, cel de al doilea prin calcul, conduc la determinarea mărimei vectorului $\Delta \bar{r}$, vector ce reprezintă deviația traiectoriei reale față de curba ideală.

Așa cum s-a arătat, mărimea deviației traiectoriei este funcție de parametri constructivi,

respectiv " l_i " și parametri funcționali, respectiv q_i . Fiecare dintre acestea prezintă abateri în limite admise :

$$\begin{aligned} l_i^* &\leq l_i \leq l_i^{**} \\ q_i^* &\leq q_i \leq q_i^{**} \end{aligned} \quad (5.67)$$

Prima inegalitate se referă la aspecte constructive ale lanțului cinematic, iar cea de a doua la aspecte funcționale.

În matricea generală de transformare au fost puse în eviden-

și matricile de tip A_{fn} și respectiv cele de tip A_{cn} .

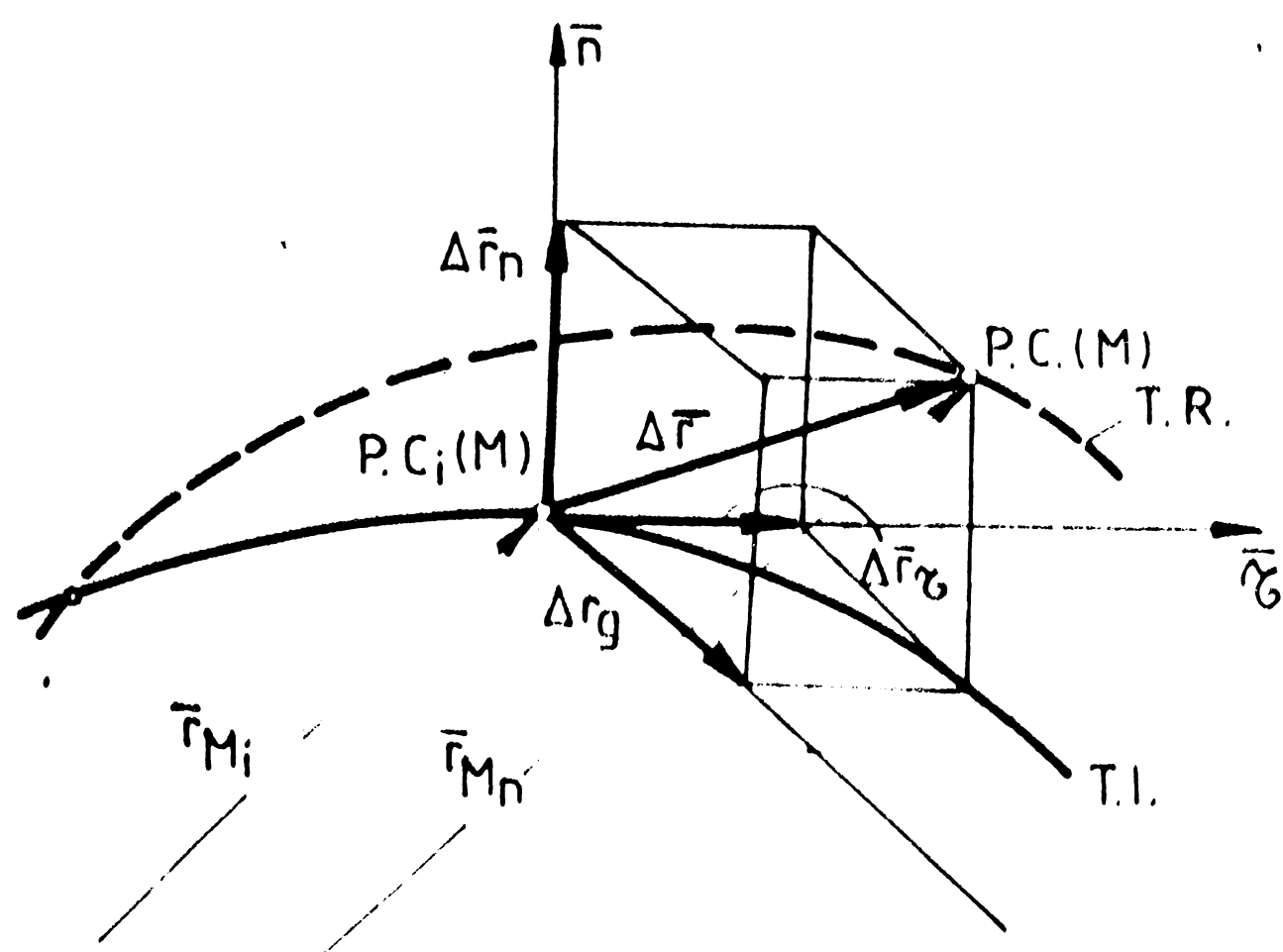


Fig. 5.13

Cele două tipuri de matrici pot fi folosite la punerea în evidență a abaterilor de ordin constructiv și respectiv de ordin funcțional.

Dacă se acceptă un triedru Darboux cu originea în $P.C_i$ și cu cele trei axe dirijate după tangentă, normală și geodezică, vectorul $\Delta \bar{r}$ poate fi scris sub forma :

$$\Delta \bar{r} = \Delta \bar{r}_g + \Delta \bar{r}_n + \bar{r}_g \quad (5.68)$$

De asemenea :

$$\Delta \bar{r} = \bar{r}_{M_r} - \bar{r}_{M_i} \quad (5.69)$$

Expresia lui \bar{r}_{M_i} este :

$$\bar{r}_{M_i} = A_{f_1} \cdot A_{c_1} \cdot A_{f_2} \cdot A_{c_2} \cdot \dots \cdot A_{f_n} \cdot A_{c_n} \cdot \bar{r}_{M_{nn}} \quad (5.70)$$

și se determină, fără să se ia în considerare erorile de execuție a elementelor componente ale lanțului cinematic și a jocurilor din cuplurile cinematice. Vectorul \bar{r}_{M_r} se determină experimental. Există prin urmare posibilitatea determinării deviației traiectoriei reale.

Vectorul $\Delta \bar{r}$ poate fi scris :

$$\Delta \bar{r} = \left[\frac{\partial \bar{r}}{\partial \bar{q}} \right]^T \cdot \Delta \bar{q} \quad (5.71)$$

și :

$$|\Delta \bar{r}|^2 = \Delta \bar{q}^T \cdot \left[\frac{\partial \bar{r}}{\partial \bar{q}} \right]^T \cdot \left[\frac{\partial \bar{r}}{\partial \bar{q}} \right] \cdot \Delta \bar{q} \quad (5.72)$$

valoare ce poate fi utilizată la calculul dispersiei erorilor de la traiectoria ideală.

5.5.4. Minimizarea timpului de deplasare pe traiectorie

Revenindu-se la poligonul din figura 5.9, care așa cum s-a arătat, reprezintă o secțiune prin configurația tridimensio-

nală din figura 5.10, se remarcă faptul că viteza posibilă a unui punct de pe traiectorie \dot{S}_{\max} este dată în punctul extrem al poligonului, punct caracterizat de o singură valoare a accelerației \ddot{S} .

Pentru fiecare $\dot{S} < \dot{S}_{\max}$ din poligon, se obțin două valori ale accelerației, valori ce reprezintă accelerația/decelerația maximă și minimă posibilă pe traiectorie.

Se remarcă faptul că \ddot{S} , care este derivata lui \dot{S} în raport cu timpul, corespunde derivatei \dot{S} în raport cu S .

Problema timpului minim se poate reduce la problema găsirii unei curbe în planul $S-\dot{S}$, în ale cărei puncte nu se depășește valoarea extremă a lui \ddot{S} .

Transferind aceste valori în planul $S-\dot{S}$ pentru toate combinațiile $S-\dot{S}$ posibile, se obține un câmp-gradient de extreme, care reprezintă curbele cu accelerație/decelerație maximă posibilă și cu viteze maxime (fig. 5.14).

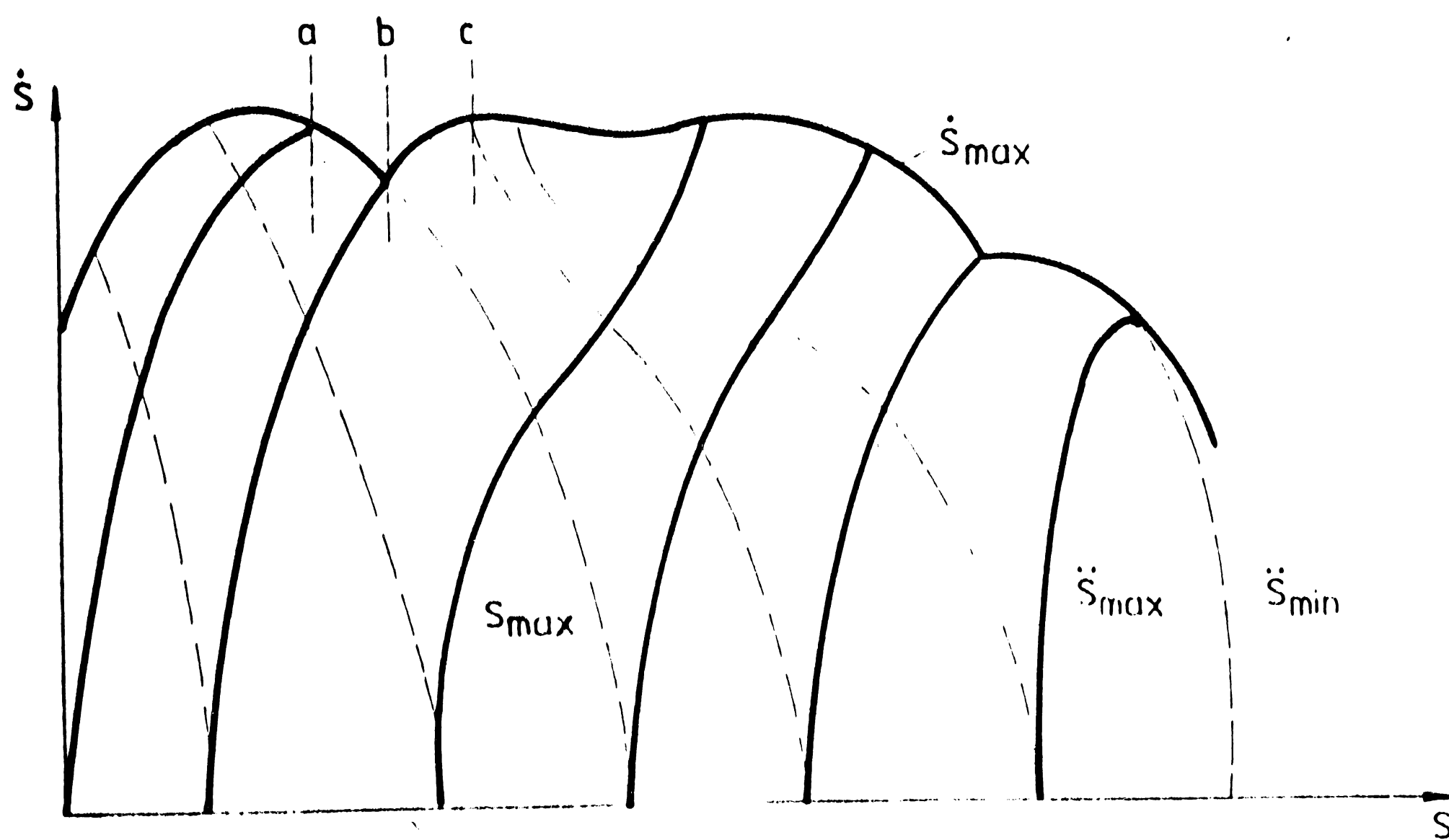


Fig. 5.14

Câmpul extremelor este limitat de curba \dot{S}_{\max} .

Pentru poligoane de forma celor din figura 5.12, punctul \dot{S}_{\max} posedă o singură accelerație atîta timp cît dreptele $\ddot{S}-\dot{S}^2$ ce se intersectează în punctul extrem nu sînt paralele cu ordonata (fig. 5.15a,c). Dacă una din aceste drepte devine paralelă cu axa \ddot{S} , accelerația la viteza maximă nu este unic determinată (fig. 5.15,b).

Acest lucru se întâmplă când unul din coeficienții $a_i(s)$, din relațiile (5.58) se anulează.

În orice alt loc, curba limită este crescătoare sau descrescătoare, după cum derivata acesteia este mai mare sau mai mică de-

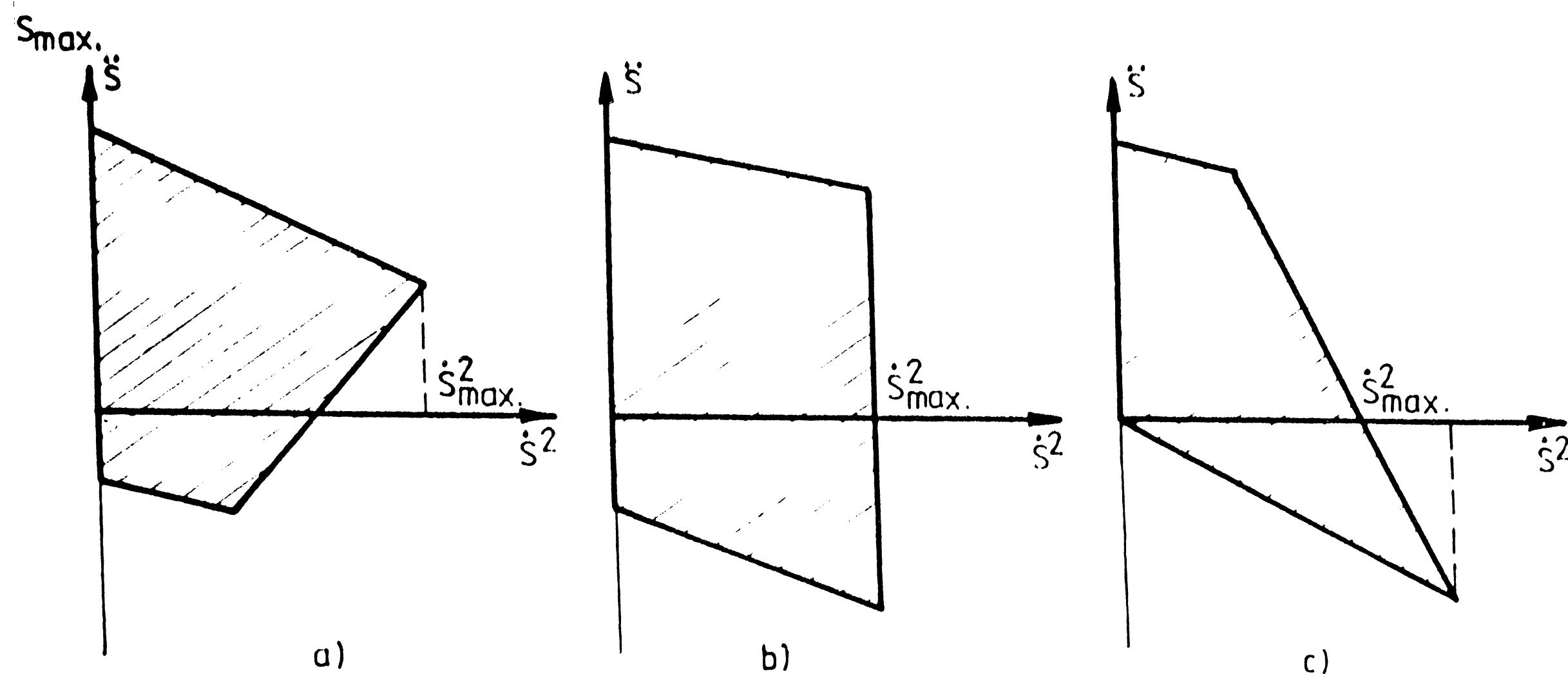


Fig. 5.15

cît valoarea unică a lui \ddot{s} pentru curba \dot{s}_{max} .

Prin urmare, singurele puncte în care se poate atinge valoarea vitezei maxime sînt punctele de inflexiune de pe curba frontieră. Acestea sînt fie puncte în care $a_i(s) = 0$ sau \ddot{s} în \dot{s}_{max} este identică cu derivata curbei frontieră.

Pe baza celor expuse, se poate determina traiectoria timpului minim (optim) în planul $s-\dot{s}$, după cum urmează :

- se trasează curba corespunzătoare accelerației maxime admisibile, din punctul inițial al traiectoriei și curba de decelerație maximă, din punctul final al traiectoriei.

Dacă cele două curbe se intersectează, rezultă traiectoria care dă valoarea timpului optim de deplasare în condițiile impuse anterior.

- În situația în care cele două curbe nu se intersectează, se acceptă unul din punctele de inflexiune de pe curba frontieră b (fig. 5.14), din care se trasează curba de accelerație maximă spre punctul inițial al traiectoriei și curba de decelerație maximă spre punctul final al acesteia.

Avînd determinată traiectoria timpului optim în planul $s-\dot{s}$ sub forma $S_{opt} = S_{opt}(s)$, este posibil calculul timpului funcție de s , prin relația:

$$t(s) = \int_0^{S_F} 1/v(s) \cdot ds \quad (5.73)$$

sau invers, se poate obține traiectoria optimă $S_{opt} = S_{opt}(t)$.

METRU
 T
 PUNCTUA
 T

Capitolul 6

SINTEZA DIMENSIONALA OPTIMALA A LANTURILOR CINEMATICE DIN COMPONENTA M.G.T.

6.1. Criterii de optimizare

Procesul de decizie este acțiunea de a alege o anumită variantă, din mai multe posibile, atașate unui anumit proces sau fenomen. Această acțiune trebuie adoptată pentru ca fenomenul sau procesul studiat să evolueze în sensul stabilit dinainte /A2/, /L5/.

În general, există mai multe posibilități de acțiune la un moment dat, denumite variante. Din mulțimea V a variantelor posibile, trebuie aleasă varianta cea mai bună, varianta optimă. Calitatea de optimalitate a variantei se stabilește în raport cu una sau mai multe măsuri stabilite, sau criterii.

În capitolul precedent au fost prezentate câteva din criteriile ce țin de funcționalitatea M.G.T. Evident că alături de acestea, se cuplează criterii legate de construcția efectivă a M.G.T., cum ar fi : greutatea proprie, sarcina vehiculată, cost, fiabilitate, mentenabilitate etc.

Întreg acest ansamblu de criterii nu sînt toate la fel de importante la un moment dat.

Importanța criteriilor este evaluată prin coeficienții de importanță p_j , $j = 1, 2, \dots, n$, care sînt numere ce exprimă importanța ce se acordă fiecărui criteriu în parte.

Acești coeficienți formează vectorul $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$.

De obicei se presupune că :

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1 \quad (6.1)$$

Pentru determinarea soluției problemei deciziilor multiatribut, există o serie de metode.

În cadrul lor, ordonarea variantelor se face pe baza unor funcții care măsoară utilitatea fiecărei variante în raport cu toate criteriile. Aceste funcții se numesc funcții de utilitate /A2/.

O serie de autori definesc funcția de utilitate prin funcții aditive de forma :

$$u(V_i) = \sum_{j=1}^m p_j \cdot a'_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (6.2)$$

Criteriile existente în cadrul deciziilor multiatribut apar sub formă cantitativă și calitativă. Pentru a se putea compara între ele, criteriile se omogenizează, operația care poartă denumirea de scalare. În cadrul acesteia se realizează o corespondență între mulțimea valorilor criteriilor și o anumită mulțime.

Odată criteriile stabilite, se întocmește matricea consecințelor A, pe baza căreia, utilizând scara de importanță, se stabilește matricea importanțelor relative B.

Pe baza coeficienților de importanță p_j se determină matricea normalizată, din care rezultă soluția ideală și soluția ideală negativă.

6.2. Precizări privind performanțele M.G.T.

Pe baza concluziilor rezultate în capitolele precedente, se poate aprecia că traiectorii în spațiul de lucru se pot obține prin numeroase combinații ale coordonatelor generalizate q_i ale lanțului cinematic al M.G.T. Desigur că alegerea celor mai potrivite mișcări, obținute, așa cum s-a prezentat în urma unor studii de optimizare, este condiționată de scopul acțiunii propuse, fiind unul sau altul din parametri prezentați sînt preponderenți.

În orice caz, indiferent de scopul mișcării în acțiunea de sinteză dimensională și mai tîrziu la comanda lanțului cinematic al M.G.T., este necesar să se aibă în vedere următoarele deziderate :

- comanda simultană a cît mai multe sau cît mai puține cuple cinematice ;
- amplasarea cuplelor cinematice în lanțul cinematic ;
- alegerea tipului de cuple cinematice ;
- acceptarea sau neacceptarea întoarcerilor în mișcările cuplelor cinematice etc.

Acționarea simultană a mai multor cuple cinematice, din cauza însumării vitezelor generalizate la nivelul fiecăreia, conduce la viteze absolute pe traiectoria a P.C. mari și prin accas-

ta, la timpi de deplasare reduși. Totodată puterile de antrenare pe fiecare axă, pot fi menținute la valori scăzute.

În situația aceasta, însă, apar abateri relative de poziție pentru fiecare cuplă cinematică, care însumate dau o abatere totală mare. Acționarea simultană a cât mai puține cuple cinematice conduce la precizie de poziționare ridicată. Precizia de poziționare bună se obține în cazul când acționăm cupla cinematică cu axa amplasată pe direcția mișcării dorite.

Dacă lanțul cinematic conține cu preponderență cuple cinematice de rotație și dacă acestea sînt amplasate aproape de elementul fix, atunci se obțin viteze ridicate ale P.C., dar precizie de poziționare scăzută. Pentru creșterea preciziei cuplele de rotație trebuie amplasate mai aproape de P.C., lucru care conduce însă la micșorarea vitezei absolute a acestuia.

Cuplele cinematice de translație conduc la precizie ridicată dacă sînt aranjate aproximativ în direcția principală de deplasare. Totodată, la acest tip de cuple cinematice precizie de poziționare este cvasiconstantă pe tot domeniul de deplasare și mai ridicată decît la cuplele cinematice de rotație.

La poziționări pe traiectoria P.C. există situații când același punct poate fi atins prin mișcări unisens în cuplele cinematice sau mișcări în ambele sensuri (**Inversarea mișcării**). Desigur primul caz este de preferat întrucît timpul de întoarcere (histerza mecanică) nu este activă și introduce erori, care se repercutează asupra preciziei de poziționare.

6.3. Elemente de sinteză dimensională a lanțurilor cinematice din componența M.G.T.

Odată componența structurală a M.G.T. stabilită, se pune problema determinării dimensiunilor elementelor și formei zonelor de contact ale cuplelor cinematice componente ale acestora, în condițiile în care se necesită optimizarea principalilor parametri funcționali și totodată, încadrarea în anumite limite de gabarit al întregului ansamblu. Cu alte cuvinte, se pune problema unei sinteze dimensionale optimale a M.G.T.

În rezolvarea acestei probleme se pornește de la minimizarea lungimii unor normale comune între diferite drepte din spațiu, drepte ce reprezintă axele de rotație sau translație a cuplelor

cinematice componente ale M.G.T. Este cunoscut faptul că situația ideală, în construcția lanțurilor cinematice componente ale M.G.T este atunci când normalele comune ale axelor cuplelor cinematice se anulează. Acest caz nu se poate realiza întocmai, datorită gabariturii modulelor, care materializează cuplele cinematice.

În capitolul 4 s-au determinat matricile de transformare funcționale (4.25), (4.29) și matricile de transformare constructive (4.27), (4.30) cu ajutorul cărora s-a putut scrie, pentru un lanț cinematic, matricea generală de transformare (3.16)

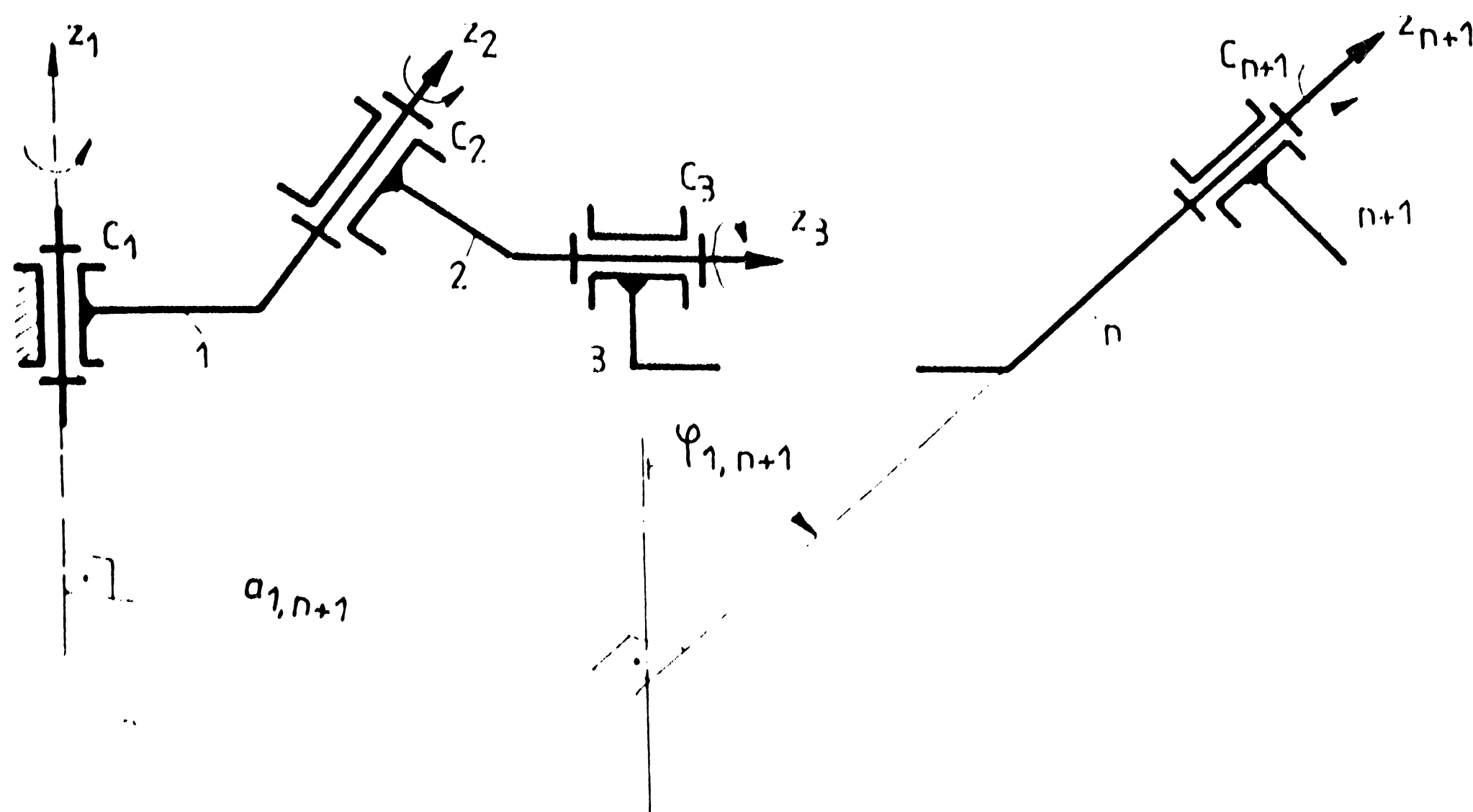


Fig.6.1

Pentru un lanț cinematic general (fig.6.1) matricea de transformare generală (3.16) poate fi scrisă sub următoarea formă :

$${}^0T_n = \begin{vmatrix} T_{11}^n & T_{12}^n & T_{13}^n & T_{14}^n \\ T_{21}^n & T_{22}^n & T_{23}^n & T_{24}^n \\ T_{31}^n & T_{32}^n & T_{33}^n & T_{34}^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.3)$$

Dacă se ia în considerare axa z_1 și respectiv axa z_{n+1} , normala comună a celor două este $a_{1,n+1}$ (fig.6.1), iar unghiul de încrucișare în spațiu $\varphi_{1,n+1}$.

Valorile acestor mărimi sînt date, fie de pozițiile extreme

impuse ale P.C. și ale D.C., fie în urma unui studiu de optimizare, când funcție de parametri funcționali ai lanțului cinematic se determină valorile extreme ale normalei comune $n_{1,n+1}$. Pentru a scrie normala comună între cele două axe, este necesar ca acestea să fie definite.

În acest sens, se folosesc coordonatele plückeriene /S8/, /S9/, /G6/, scrise pentru două puncte plasate pe axe la distanță egală cu unitatea.

Astfel, pentru axa Z_1 , coordonatele omogene ale celor două puncte acceptate sînt :

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & w_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & w_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.4)$$

și respectiv coordonatele plückeriene :

$$\begin{aligned} \alpha_1^1 &= w_1 x_2 - w_2 x_1 = 0 \\ \alpha_2^1 &= w_1 y_2 - w_2 y_1 = 0 \\ \alpha_3^1 &= w_1 z_2 - w_2 z_1 = 1 \\ p_1^1 &= z_1 y_2 - z_2 y_1 = 0 \\ p_2^1 &= x_1 z_2 - x_2 z_1 = 0 \\ p_3^1 &= y_1 x_2 - y_2 x_1 = 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Similar, pentru axa Z_{n+1} , pe baza coordonatelor omogene a două puncte acceptate :

$$\begin{vmatrix} x_1^i & y_1^i & z_1^i & w_1^i \\ x_2^i & y_2^i & z_2^i & w_2^i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_{14}^n & T_{24}^n & T_{34}^n & 1 \\ T_{14}^n + T_{13}^n & T_{24}^n + T_{23}^n & T_{34}^n + T_{33}^n & 1 \end{vmatrix} \quad (6.6)$$

se pot de asemenea scrie coordonatele plückeriene, ce definesc axa respectivă :

$$\begin{aligned} \alpha_1^{n+1} &= T_{14}^n + T_{13}^n - T_{14}^n &= T_{13}^n \\ \alpha_2^{n+1} &= T_{24}^n + T_{23}^n - T_{24}^n &= T_{23}^n \\ \alpha_3^{n+1} &= T_{34}^n + T_{33}^n - T_{34}^n &= T_{33}^n \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned}
 p_1^{n+1} &= T_{34}^n (T_{23}^n + T_{24}^n) - T_{24}^n (T_{33}^n + T_{34}^n) = T_{23}^n \cdot T_{34}^n - T_{33}^n \cdot T_{24}^n \\
 p_2^{n+1} &= T_{14}^n (T_{33}^n + T_{34}^n) - T_{34}^n (T_{33}^n + T_{14}^n) = T_{33}^n \cdot T_{14}^n - T_{13}^n \cdot T_{34}^n \\
 p_3^{n+1} &= T_{24}^n (T_{13}^n + T_{14}^n) - T_{14}^n (T_{23}^n + T_{24}^n) = T_{13}^n \cdot T_{24}^n - T_{23}^n \cdot T_{14}^n
 \end{aligned} \quad (6.7)$$

Se observă că la definirea axelor s-a acceptat unul dintre puncte, ca fiind piciorul perpendicularei comune, cu scopul simplificării ecuațiilor, fără să se diminueze generalitatea problemei.

Cu ajutorul coordonatelor plückeriene scrise, se poate determina lungimea normalei comune :

$$\begin{aligned}
 a_{1,n+1} \cdot \sin \varphi_{1,n+1} &= \alpha_1 \cdot p_1^{n+1} + \alpha_2 \cdot p_2^{n+1} + \alpha_3 \cdot p_3^{n+1} + \\
 &+ p_1 \cdot \alpha_1^{n+1} + p_2 \cdot \alpha_2^{n+1} + p_3 \cdot \alpha_3^{n+1} = \\
 &= p_3^{n+1} = \\
 &= T_{13}^n \cdot T_{24}^n - T_{23}^n \cdot T_{14}^n
 \end{aligned} \quad (6.8)$$

respectiv :

$$\begin{aligned}
 a_{1,n+1} &= \frac{a_{1,n+1} \cdot \sin \varphi_{1,n+1}}{\sin \varphi_{1,n+1}} = \\
 &= \frac{p_3^{n+1}}{[(\alpha_1 \cdot \alpha_2^{n+1} - \alpha_2 \cdot \alpha_1^{n+1})^2 + (\alpha_2 \cdot \alpha_3^{n+1} - \alpha_3 \cdot \alpha_2^{n+1})^2 + (\alpha_1 \cdot \alpha_3^{n+1} - \alpha_3 \cdot \alpha_1^{n+1})^2]^{1/2}}
 \end{aligned} \quad (6.9)$$

sau :

$$a_{1,n+1} = \frac{T_{13}^n \cdot T_{24}^n - T_{23}^n \cdot T_{14}^n}{[1 - (T_{33}^n)^2]^{1/2}} \quad (6.10)$$

Dacă se particularizează această expresie pentru cazul normalei comune între Z_1 și Z_3 când termenii T_{ij}^2 au valorile :

$$\begin{aligned}
 T_{13}^2 &= \sin \beta_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + \cos \beta_1 \cdot \sin \beta_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \\
 &+ \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \theta_1 ; \\
 T_{23}^2 &= \sin \beta_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - \cos \beta_1 \cdot \sin \beta_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - \\
 &- \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \theta_1 ;
 \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned}
 T_{33}^2 &= -\sin \beta_1 \cdot \sin \beta_2 \cdot \cos \theta_2 + \cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \\
 T_{14}^2 &= a_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - a_2 \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + \\
 &\quad + d_2 \cdot \sin \beta_2 \cdot \sin \theta_1 + a_1 \cdot \cos \theta_1 \\
 T_{24}^2 &= a_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + a_2 \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - \\
 &\quad - d_2 \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos \theta_1 + a_1 \cdot \sin \theta_1
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

se obține :

$$a_{1,3} = \frac{[(a_1 \cos \beta_1 \sin \beta_2 + a_2 \sin \beta_1 \cos \beta_2) \cos \theta_2 - d_2 \sin \beta_1 \sin \beta_2 \sin \theta_2] + a_1 \sin \beta_1 \cos \beta_2 + a_2 \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \beta_2}{[1 - (\cos \beta_1 \cos \beta_2 - \sin \beta_1 \sin \beta_2 \cos \theta_2)^2]^{1/2}}
 \tag{6.12}$$

Relația generală (6.10) și relația particulară (6.12), reprezintă corespondența între parametri constructivi locali ai lanțului cinematic și dimensiunile de gabarit al întregului lanț cinematic. Desigur, așa cum s-a specificat de cele mai multe ori, în proiectarea M.G.T. se impune spațiul de lucru, deci dimensiunile maxime ale gabariturii M.G.T. În aceste condiții, valoarea extremă a normalei comune ($a_{1,n+1}$, $a_{1,3}$) este impusă. Problema se reduce în acest caz, la situația inversă de determinare a parametrilor constructivi locali ai lanțului cinematic (de fapt problema propriu zisă a sintezei dimensionale).

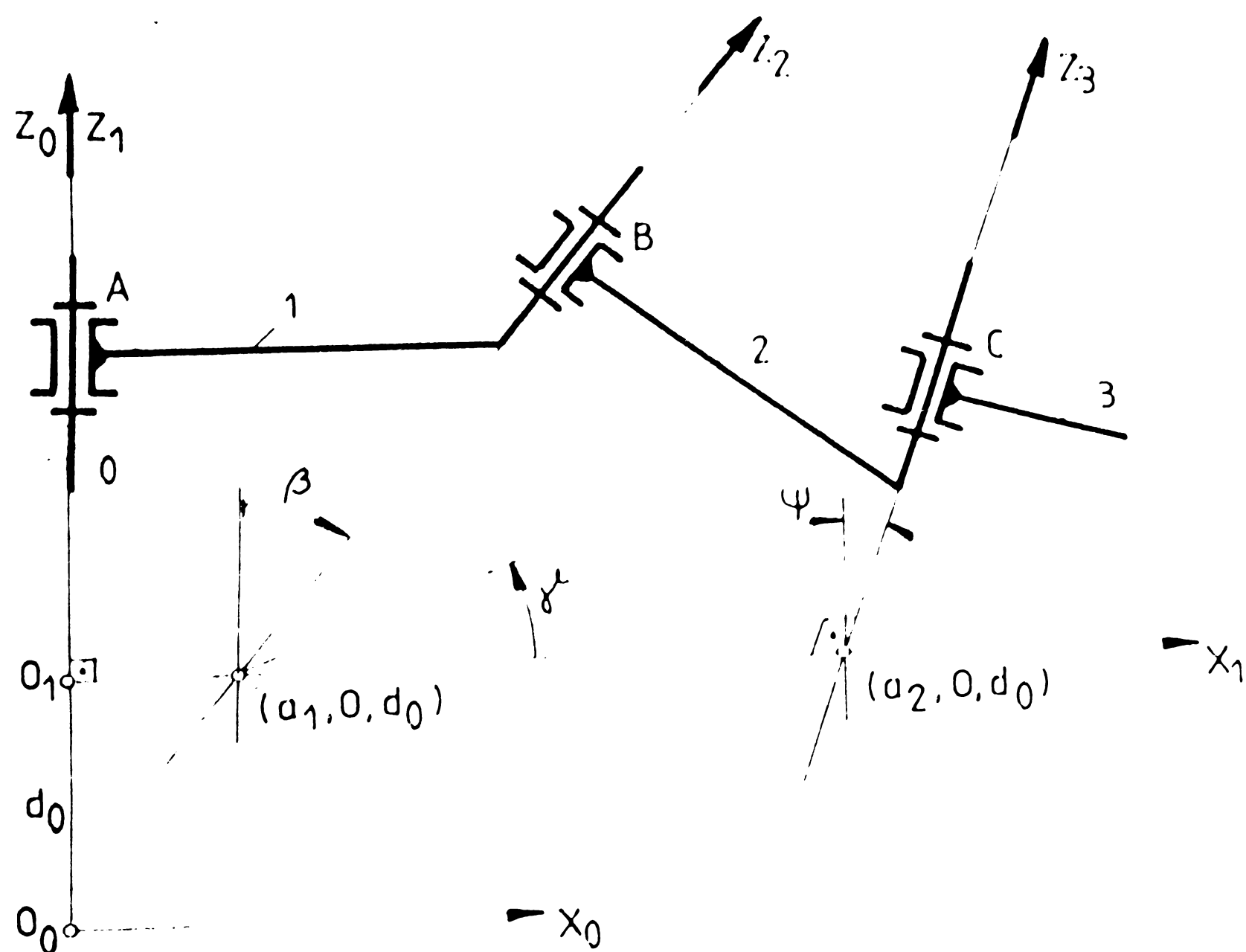


Fig.6.2

Este clar că normala între oricare două axe ale cuplelor cinematice este intersectată pentru o anumită poziție a cuplelor intermediare de axa acestora. Dacă se consideră această poziție ca fiind extremă pentru cupla cinematică respectivă /S9/, putem aprecia că axele Z_2 și Z_3 sînt determinate față de Z_1 prin parametri :

- d_1 - distanța pe axa Z_1 de la originea sistemului de axe inițial și piciorul perpendicularei comune Z_1-Z_3
- a_2, a_3 - distanța pe normala comună pînă la intersecția cu axa Z_2 și respectiv Z_3
- γ - unghiul format de proiecția axei Z_2 pe planul $x_1O_1y_1$ și axa x_1
- β - unghiul dintre Z_1 și Z_2 (la poziție extremă)
- ψ - unghiul dintre Z_1 și Z_3 (la poziție extremă)

Cei 6 parametri ce definesc axele Z_2 și Z_3 față de Z_1 , a_1 , a_2 , d_1 , d_2 , φ_1 , φ_2 se pot scrie în coordonate plückeriene și totodată funcție de parametri ce definesc poziția extremă acceptată a axelor.

Astfel :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= - \frac{\hat{z}_1 \cdot \bar{z}_2 + \bar{z}_1 \cdot \hat{z}_2}{|\hat{z}_1 \times \hat{z}_2|} ; & a_2 &= - \frac{\hat{z}_2 \cdot \bar{z}_3 - \bar{z}_2 \cdot \hat{z}_3}{|\hat{z}_2 \times \hat{z}_3|} ; \\
 \varphi_1 &= \arcsin |\hat{z}_1 \times \hat{z}_2| ; & \varphi_2 &= \arcsin |\hat{z}_2 \times \hat{z}_3| \\
 b_1 &= - \frac{\hat{N}_{01} \cdot \bar{N}_{12} + \bar{N}_{01} \cdot \hat{N}_{12}}{|\hat{N}_{01} \times \hat{N}_{12}|} ; & b_2 &= \frac{\hat{N}_{12} \cdot \bar{N}_{23} + \bar{N}_{12} \cdot \hat{N}_{23}}{|\hat{N}_{12} \times \hat{N}_{23}|}
 \end{aligned}
 \tag{6.13}$$

(\hat{z}_1, \bar{z}_1) ; (\hat{z}_2, \bar{z}_2) ; (\hat{z}_3, \bar{z}_3) - coordonatele plückeriene ale axelor Z_1, Z_2, Z_3 ;

$(\hat{N}_{01}, \bar{N}_{01})$; $(\hat{N}_{12}, \bar{N}_{12})$; $(\hat{N}_{23}, \bar{N}_{23})$ - coordonatele plückeriene ale normalelor comune între Z_0 și Z_1 , Z_1 și Z_2 , Z_2 și Z_3

Toate aceste coordonate pot fi exprimate funcție de parametri poziției extreme, după cum urmează :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -\lambda_2 \cdot \sin \gamma ; & a_2 &= \frac{(\lambda_3 - \lambda_2)(\sin \beta \sin \gamma \cos \psi + \cos \beta \sin \psi)}{[1 - (\sin \beta \sin \gamma \sin \psi - \cos \beta \cos \psi)^2]^{1/2}} \\
 \varphi_1 &= \arcsin(\sin \beta) ; & \varphi_2 &= [1 - (\sin \beta \sin \psi \sin \psi - \cos \beta \cos \psi)]^{1/2} \\
 d_1 &= \frac{d_2 \sin \beta - \lambda_2 \cos \beta \cos \gamma}{\sin \beta} ; \\
 d_2 &= \frac{(\lambda_2 - \lambda_3) \sin \beta \cos \gamma}{1 - (\sin \beta \sin \gamma \sin \psi - \cos \beta \cos \psi)^2} - \frac{\lambda_2 \cdot \cos \gamma}{\sin \beta} \quad (6.14)
 \end{aligned}$$

Pentru sinteză, dând valori pentru cei șase parametri ai poziției extreme, cu relațiile (6.14) se poate determina poziția relativă a celor două axe Z_2 și Z_3 față de Z_1 .

Relațiile respective pot fi particularizate și pentru situații în care în lanțul cinematic al M.C.T. se interpun cuple cinematice de translație.

În concluzie, se poate specifica faptul că utilizând relații de forma (6.14) se pot obține dimensiuni ale elementelor componentelor ale lanțului cinematic al M.C.T., în situația în care poziția extremă (marcată prin lungimea normalei comune celei mai îndepărtate) este impusă.

Pe de altă parte, trebuie specificat că acceptarea valorii minime a lungimii normalelor comune trebuie privită în strînsă legătură cu posibilitățile constructive, respectiv gabaritul fiecărei cuple cinematice componente ale lanțului cinematic.

Capitolul 7

CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND PERFORMANTELE ROBOTULUI INDUSTRIAL REMT-5. APLICATII INDUSTRIALE

7.1. Robotul industrial REMT-5

Robotul REMT-5 face parte din seria de roboți executați de către Intreprinderea Electromotor din Timișoara. El este un robot de transfer, destinat automatizării flexibile a unor procese tehnologice, servirii mașinilor-unelte, montaj etc, în special în domeniul industriei electrotehnice și electronice.

Așa după cum se remarcă din figura 7.1, dispozitivul de ghidare al robotului REMT-5 este un lanț cinematic deschis, de tip RTTR, din care M.G.T. are structura RTT, iar M.O. are o singură rotație (R). Efectorul terminal (mecanismul de prehensiune - E.T.) este prevăzut cu două bacuri a căror mișcare de translație are cursa maximă de 5 mm, putând prelua obiecte cu greutatea maximă de 50 N.

Urmărind structura lanțului cinematic al M.G.T. se observă faptul că spațiul de lucru al robotului este cilindric.

Cursele, precum și regimurile maxime ale vitezelor unghiulare și liniare sînt prezentate în tabelul 7.1, pentru fiecare cuplă cinematică (modul component).

Datorită traseelor de cabluri electrice de alimentare, precum și a conductei pneumatice, spațiul de lucru se restrînge cu un sector care se desfășoară pe 55° la axa spațiului de lucru cilindric.

Acționarea robotului REMT-5 este electrică, cu excepția dispozitivului de prehensiune, care este acționat pneumatic.

Se utilizează servomotoare electrice cu intrefier axial tip SRD 350.

Sistemul de comandă al R.I. este asigurat de un calculator ECAROM-881, completat cu echipamentele periferice necesare și interfața cu sistemul de acționare.

7.2. Program al cercetărilor experimentale

În cadrul acestui program se va avea în vedere, determinarea parametrilor funcționali, precum și valorile optime ale acestora în procesul de lucru efectiv al robotului. Se va urmări influența acestora asupra funcționalității normale a robotului.

Desigur că numărul parametrilor care influențează funcționarea unui robot industrial este relativ ridicat.

De asemenea suprapunerea influențelor, ponderea acestora și intensitatea lor, determină funcționarea în ansamblu a robotului.

În cadrul cercetărilor efectuate s-a încercat să se selecteze acei parametri, acele caracteristici, care se consideră că au o preponderență determinantă în funcționarea R.I.

Ansamblul caracteristicilor luate în studiu sînt prezentate în figura 7.2. Se remarcă divizarea în cele trei categorii : geometrice, cinematice și dinamice.

Acestatea vor fi analizate fie separat, fie în interdependență, după cum valorile lor se condiționează reciproc.

Măsurătorile au fost efectuate în limitele intervalului nominal de funcționare. Cu toate acestea, atunci cînd a fost nevoie s-a depășit limita superioară, cu scopul de a urmări comportamentul întregului ansamblu în situații limită, sigur fără a afecta integritatea componentelor robotului.

Pe baza celor relatate, s-a conceput un program concret de măsurări, program prezentat în tabelul 7.2.

În conceperea programului de măsurări s-au avut în vedere parametri care au influență asupra valorilor mărimilor de măsurat. Valorile parametrilor cursă, sarcină, viteză au fost astfel acceptate încît să rezulte cît mai pregnant influența acestora asupra mărimilor luate în studiu ale R.I. Dacă se urmărește tabelul 7.2, se remarcă faptul că incertitudinea de poziționare (respectiv exactitatea de poziționare), mărimi deosebit de importante, s-a determinat pentru cinci valori ale sarcinii utile, ultima depășind limita superioară acceptată a acesteia (125%), tocmai cu scopul de a urmări posibilitățile extreme ale lanțului cinematic component al R.I., în ceea ce privește exactitatea de atingere a punctului țintă (final).

Tabel 7.2

Nr. crt.	Caracteristici	U.M.	Regim de lucru	Parametrii		
				Cursa [%]	Sarcina utilă [%]	Viteza [%]
1	Geometrice	mm	comandă manuală	-	-	-
2		mm ³	comandă manuală	-	-	-
3	Săgeata în P.C. sub acțiunea sarcinii	mm	static	0	25	50
4		μm	static	0	25	50
5	Variatia săgeții statice în timp	μm	ciclu automat	-	25	50
6		μm	ciclu automat	0 ÷ 100	25	50
7	Incertitudinea de poziționare	μm	ciclu automat	-	25	50
8		μm	ciclu automat	-	25	50
9	Excitația traiectoriei P.C.	s	ciclu de programare	0 ÷ 100	25	50
10		ms ⁻¹	ciclu automat	-	25	50
11	Depășirea după acționarea întrerupătorului de sig.	ms ⁻¹	ciclu automat	-	25	50
12		ms ⁻²	ciclu automat	-	25	50
13	Depășirea minimă programabilă	ms ⁻²	ciclu automat	-	25	50
14		A	ciclu automat	0 ÷ 100	25	50
15	Dinamice	V	ciclu automat	0 ÷ 100	25	50
16		N	ciclu automat	0 ÷ 100	25	50
17	Putere consumată	W	ciclu automat	0 ÷ 100	25	50

Tabel 7.1

Modul rotație ①			Modul translație verticală ②			Modul braț ③			Modul orientare ④			Modul prehensiune		
Viteza unghiulară maximă	Unghi maxim de rotație	Acționare	Viteza maximă	Cursa maximă	Acționare	Viteza maximă	Cursa maximă	Acționare	Viteza unghiulară maximă	Unghi maxim de rotație	Acționare	Sarcină maximă	Cursă cârăgului	Acționare
[rad/s]	[°]	-	[m/s]	[m]	-	[m/s]	[m]	-	[rad/s]	[°]	-	[N]	[mm]	-
1,57	305	servomotor SRC-350	0,06	0,155	servomotor SRC-350	0,128	0,410	servomotor SRC-350	1,14	180	electrică	50	5	pneumatică

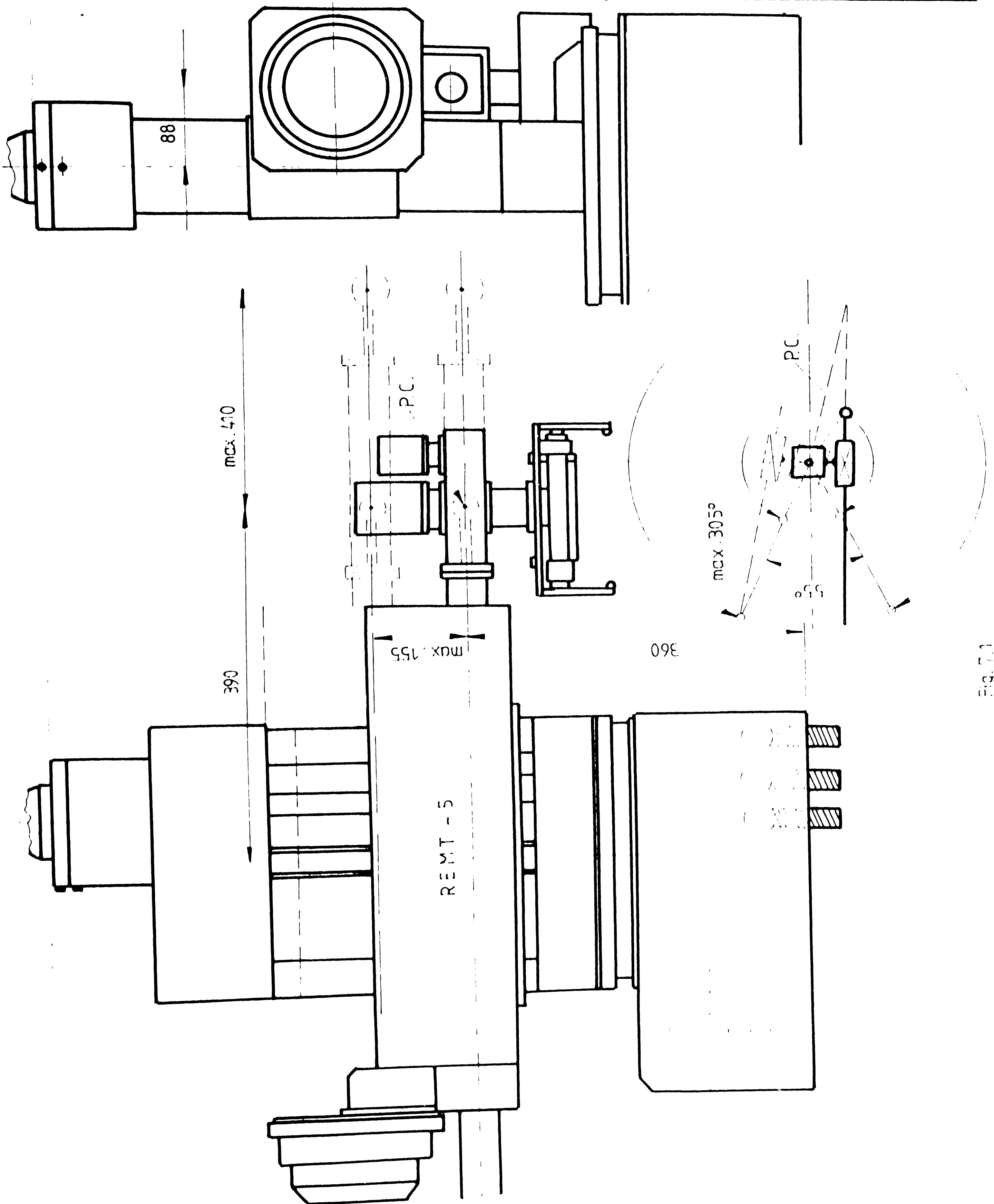


Fig. 7.1

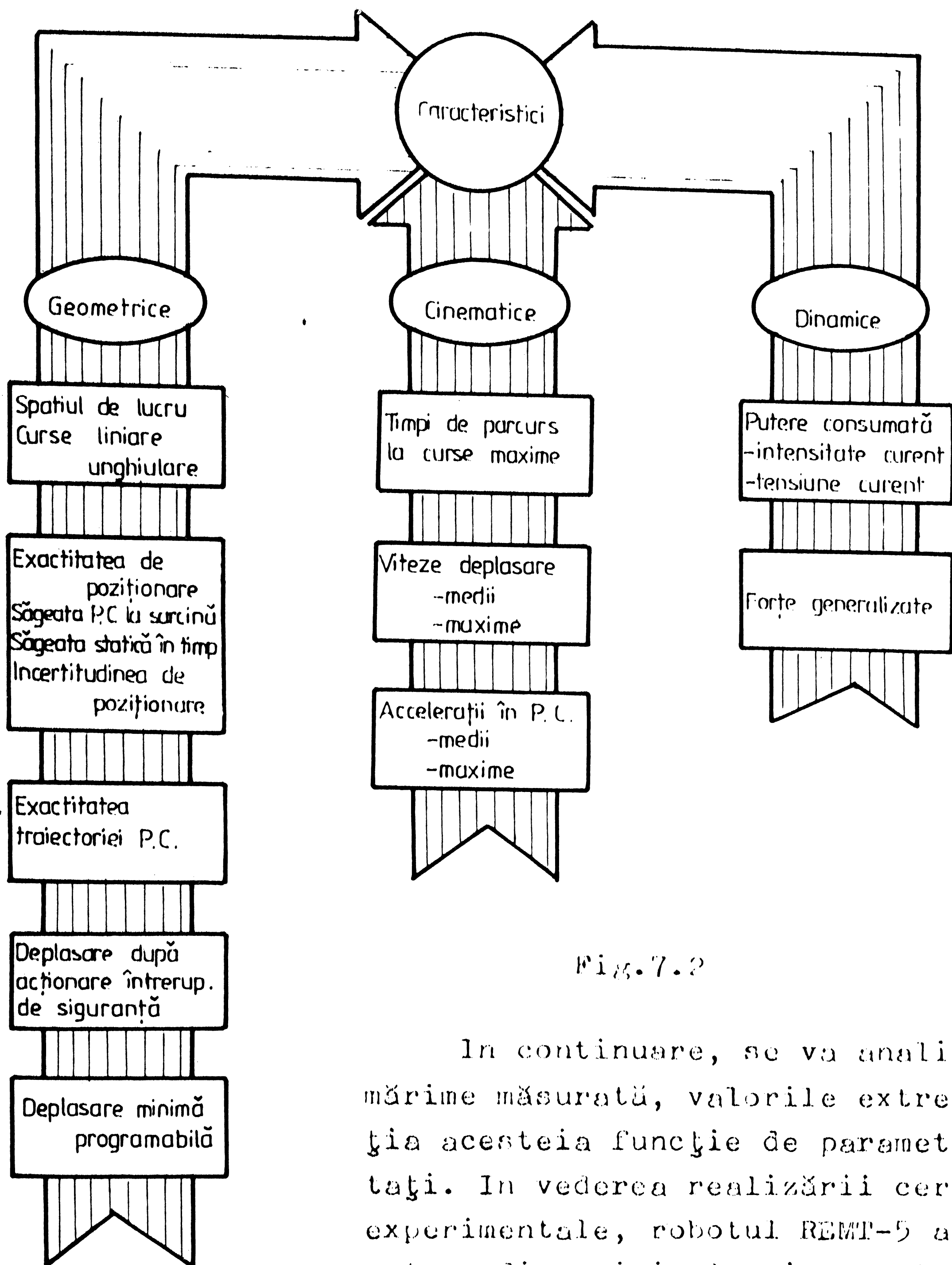


Fig.7.2

In continuare, se va analiza fiecare mărime măsurată, valorile extreme, variația acesteia funcție de parametri acceptați. In vederea realizării cercetărilor experimentale, robotul REMT-5 a fost echipat cu dispozitivele și aparatura necesară culegerii informațiilor dorite. Au fost astfel concepute instalațiile experimentale, funcție de tipul mărimilor care urmau să fie determinate.

7.3. Instalații pentru determinări experimentale

7.3.1. Instalații pentru determinarea mărimilor geometrice

In scopul determinării mărimilor geometrice, ce caracterizează funcționalitatea de ansamblu a robotului REMT-5, acesta a fost echipat cu traductori de măsură și aparatură de înregistrare.

Trebuie subliniat faptul că toate măsurătorile geometrice se referă la M.G.T. al robotului REMT-5. Prin urmare, pe tot parcursul măsurătorilor M.O. este blocat.

Pentru determinarea cursei unghiulare (axa 1), a curselor liniare (axa 2, axa 3), s-au folosit traductoare TIRO 1000 cu înregistrare directă prin calculatorul robotului. Totodată fiecare axă a fost echipată cu câte un traductor de poziție. Astfel, pe axa 1 s-a amplasat un traductor potențiomtric de rotație (poz.1, fig.7.3). Pe axele 2 și 3 au fost amplasate două traductoare in-



Fig.7.3

ductive liniare, tip T.I.C. 35-100, cu interval de măsurare ± 100 mm. Ca aparatură de înregistrare s-a utilizat imprimanta tip DZM-180 RO și un înregistrator cu hîrtie fotosensibilă cu 12 canale.

Pentru determinarea influenței sarcinii asupra caracteristicilor geometrice s-au utilizat patru obiecte prechenante de 12,5 N (25% din valoarea nominală), 25 N (50%), 50 N (100%) și 62,5 (125%).

Pentru determinarea exactității de poziționare, respectiv a săgeții în I.C. sub acțiunea sarcinii, variația săgeții statice în timp, precum și a incertitudinii de poziționare, standul conține un cap tridimensional, prevăzut pe cele trei fețe cu traductoare inductive de poziție (microlimit) cu interval de măsurare 0 ± 5 mm. Capul tridimensional palpenază o sferă, solidar fixată de M.G.T., al cărui centru materializează P.C. al R.I. (fig.7.4).

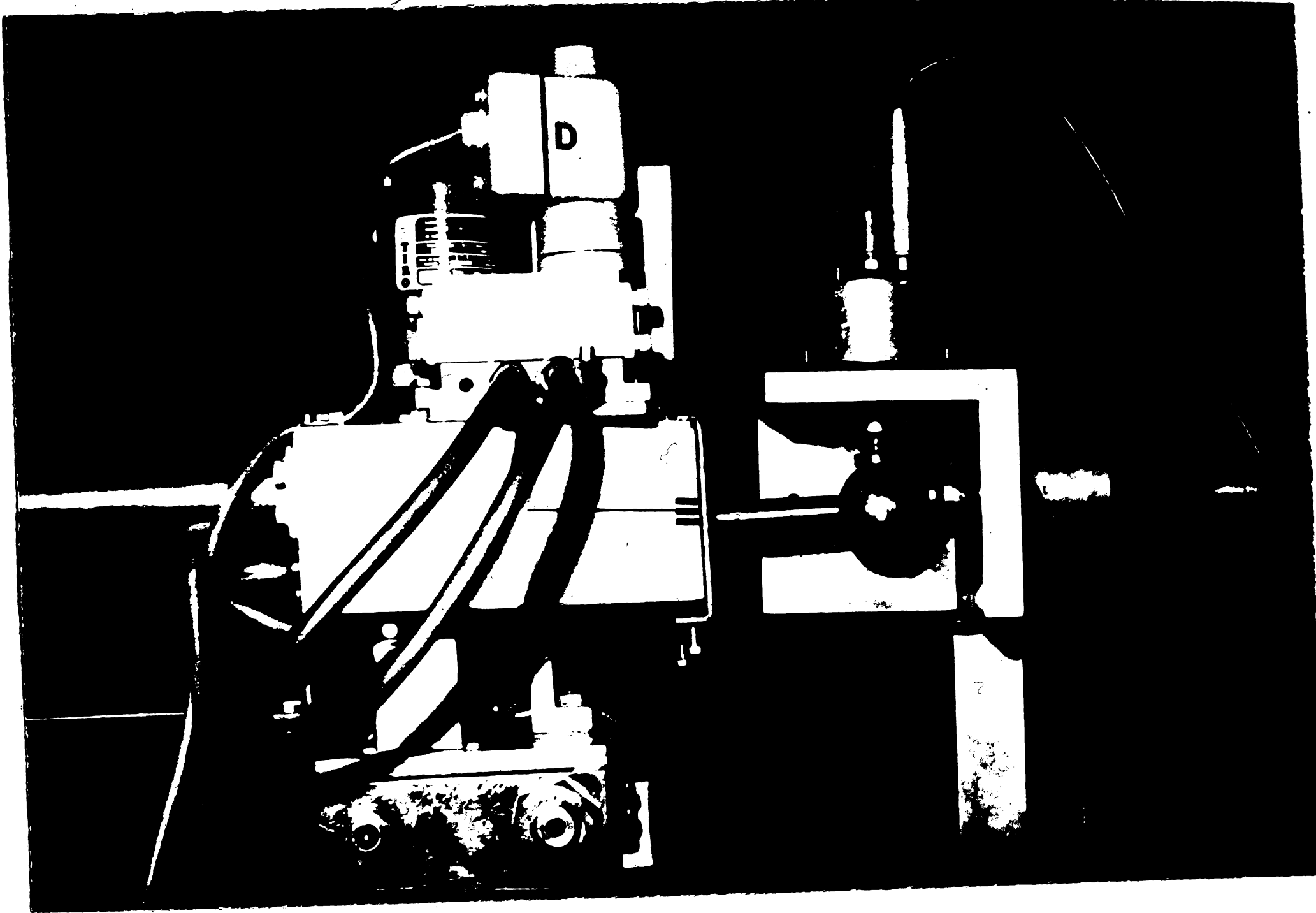


Fig. 7.4

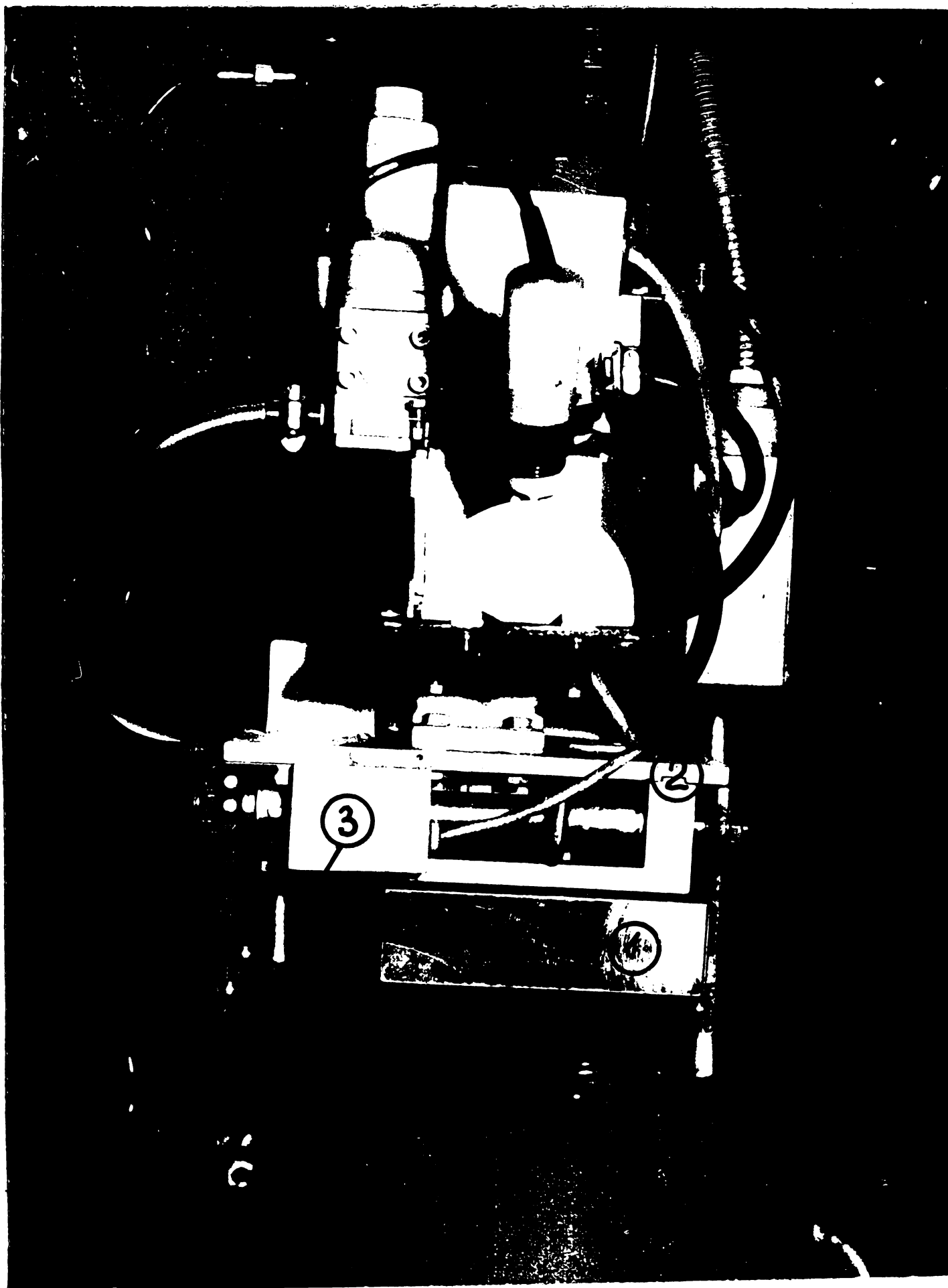


Fig. 7.5

Pentru determinarea exactității traiectoriei, instalația este echipată cu o riglă metalică etalon (poz.1, fig.7.5), iar pe M.G.T. al robotului REMT-5 sînt amplasate două traductoare inductive (poz.2,3, fig.7.5) dispuse la 90° , într-un plan perpendicular pe riglă.

Fixarea tuturor traductorilor pe axele robotului, precum și în P.C. considerat al robotului s-a făcut prin dispozitive demontabile (cu guruburi sau magnetice), după cum configurația robotului a permis-o.

De asemenea, racordu-

rile la aparatura de măsurare au fost astfel alese încât să existe acces cu R.C. în orice punct al spațiului de lucru al robotului.

7.3.2. Instalație pentru determinarea mărimilor cinematice și dinamice

Mărimile cinematice și dinamice, ce caracterizează funcționarea robotului REMT-5, au fost puse în evidență prin echiparea cu aparatură corespunzătoare a structurii mecanice a acestuia. Astfel, în vederea determinării funcțiilor de comandă ale M.G.T.,

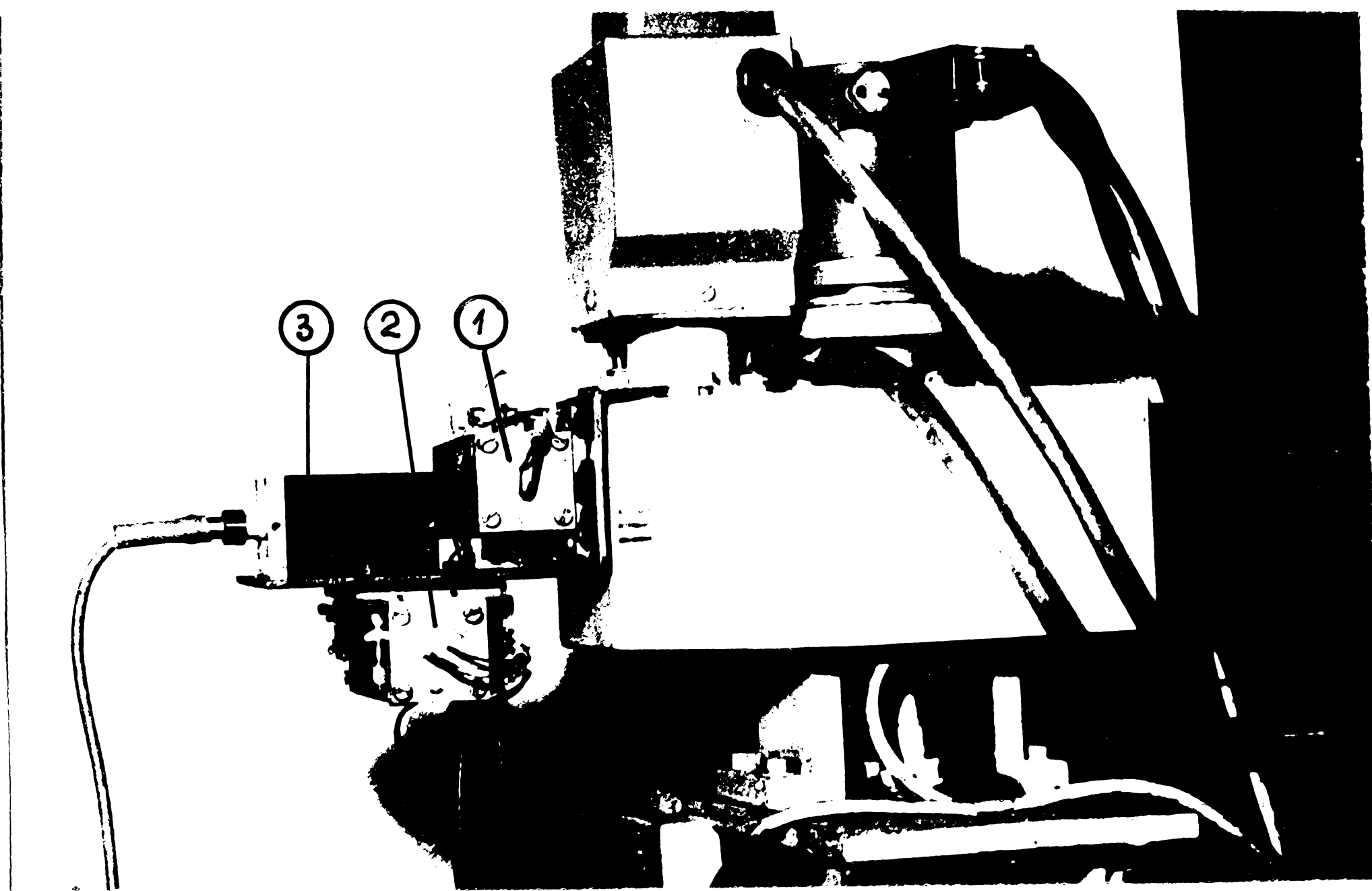


Fig. 7.6

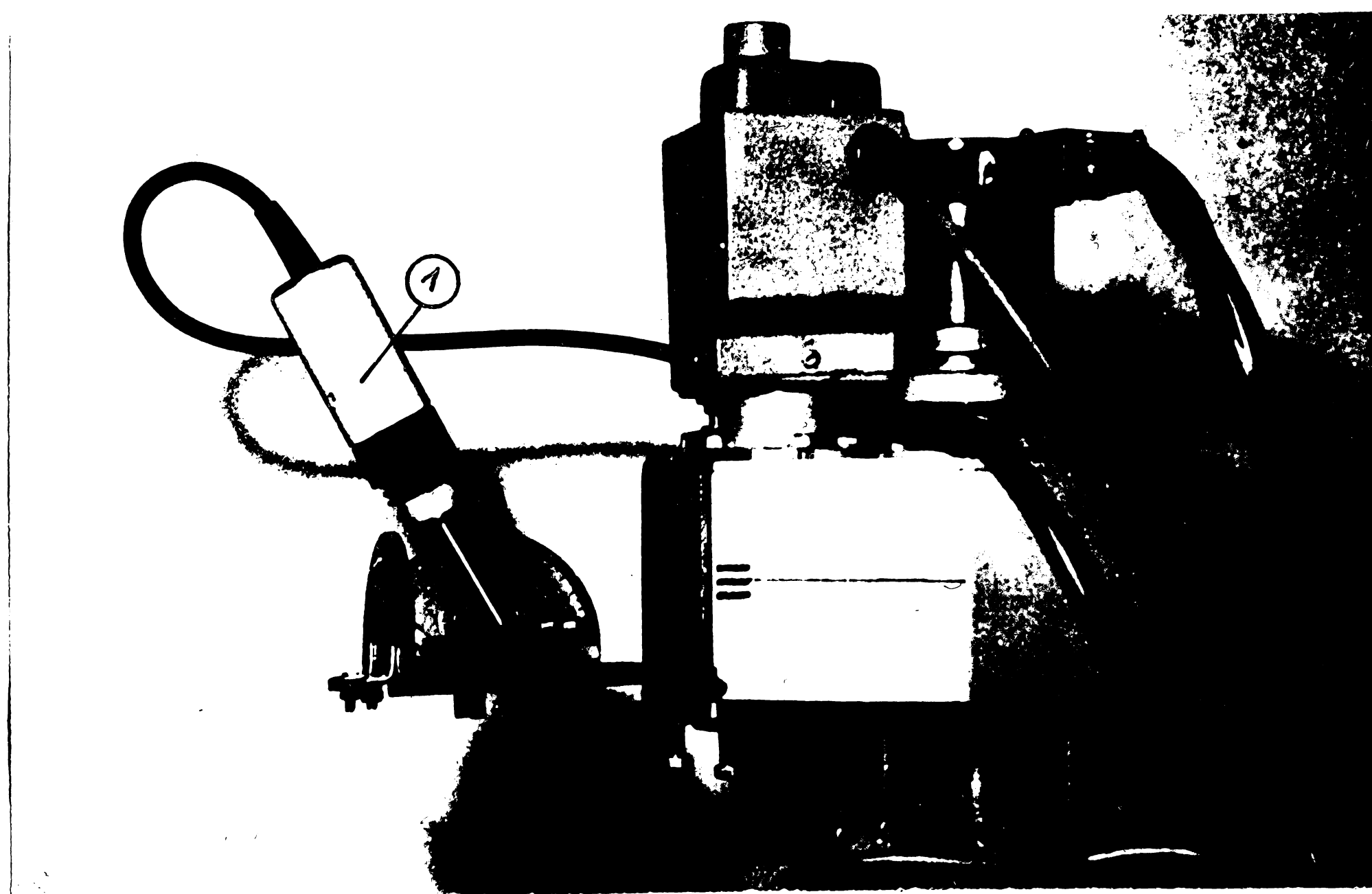


Fig. 7.7

INSTITUTUL DE RECHIZIȚI
TIMBOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

precum și a funcției de ghidare de ordinul 2, efectatorul final al R.I. a fost echipat cu accelerometre inductive (fig.7.6, poz.1,2, 3) pentru fiecare axă a robotului și respectiv cu un traductor piezoelectric (fig.7.7, poz.1). Mărimile electrice ce caracterizează sistemul de acționare al R.I. au fost preluate direct din

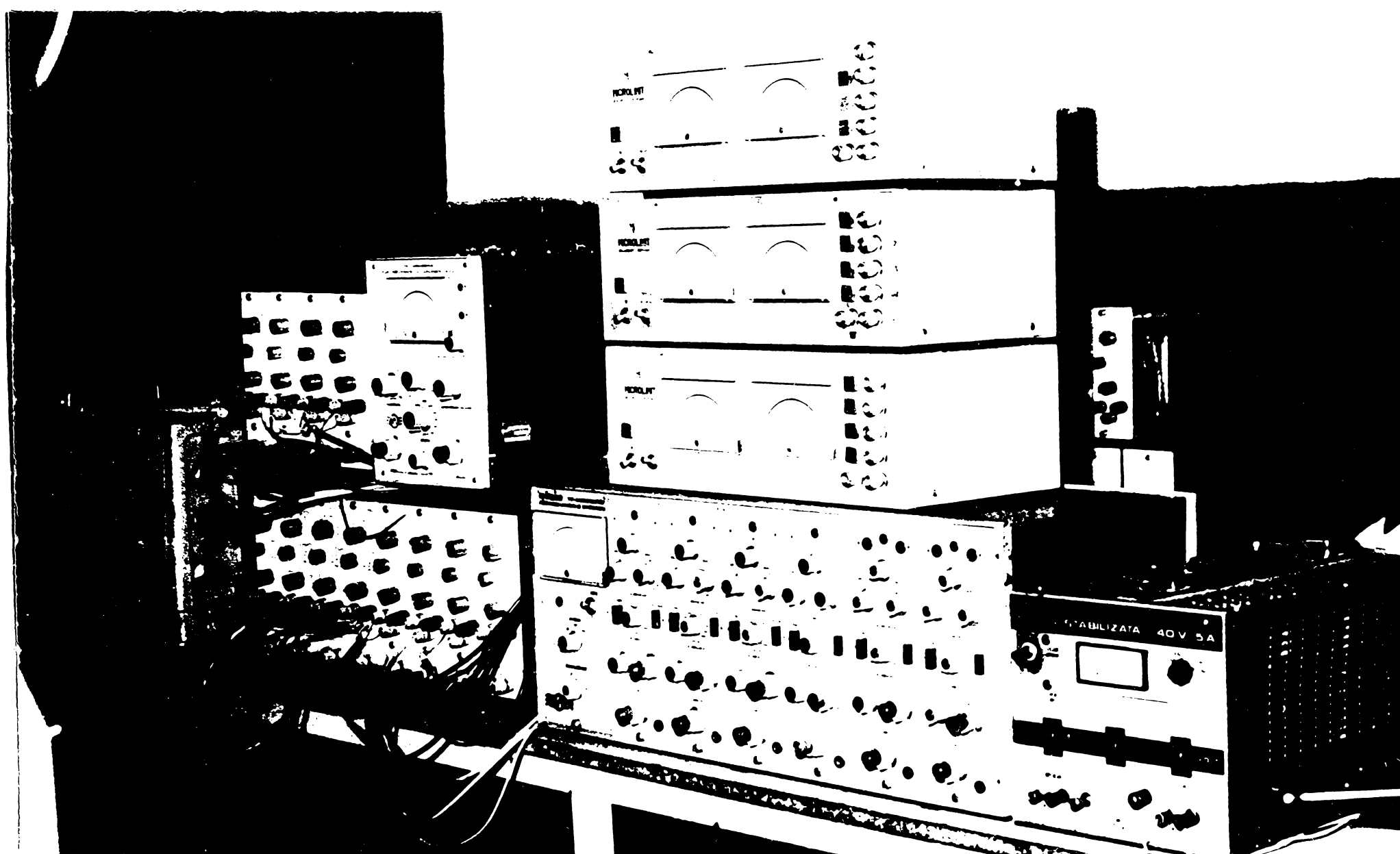


Fig.7.8

circuitele de alimentare ale motoarelor de acționare prin adaptări corespunzătoare. Ansamblul mărimilor măsurate, în diferitele regimuri de funcționare a R.I. au fost preluate, prelucrate și înregistrate prin aparatura prezentată în figura 7.8, precum și prin calculatorul propriu al robotului (fig.7.9).



Fig.7.9

7.4. Determinarea caracteristicilor geometrice

7.4.1. Curse liniare-unghiulare. Spațiul de lucru real

Deplasările maxime pe fiecare axă a robotului, asigură realizarea spațiului de lucru real al robotului. Prezentînd o importanță deosebită, literatura consultată /K6/, /K8/, /W4/, /W5/, /W6/, indică diferite metode de măsurare. În cadrul cercetărilor experimentale efectuate, s-au folosit traductorii unghiulari și liniari de deplasare (poz.1,2,3 - fig.7.3). Valorile măsurate au fost comparate cu valorile înregistrate de calculator de la traductorii TIRO-1000 ai fiecărei axe a robotului. Măsurările au fost efectuate în regim de mers în gol ($S = \emptyset N$). Ca viteză de deplasare a fost acceptată viteza maximă pentru fiecare axă.

Pentru a realiza condiții de repetabilitate, cele 5 măsurători s-au făcut la intervale egale de timp. Valoarea cursei maxime pentru o axă a fost măsurată în condițiile în care poziția celorlalte două module era la 50% din cursa maximă (poziția mediană).

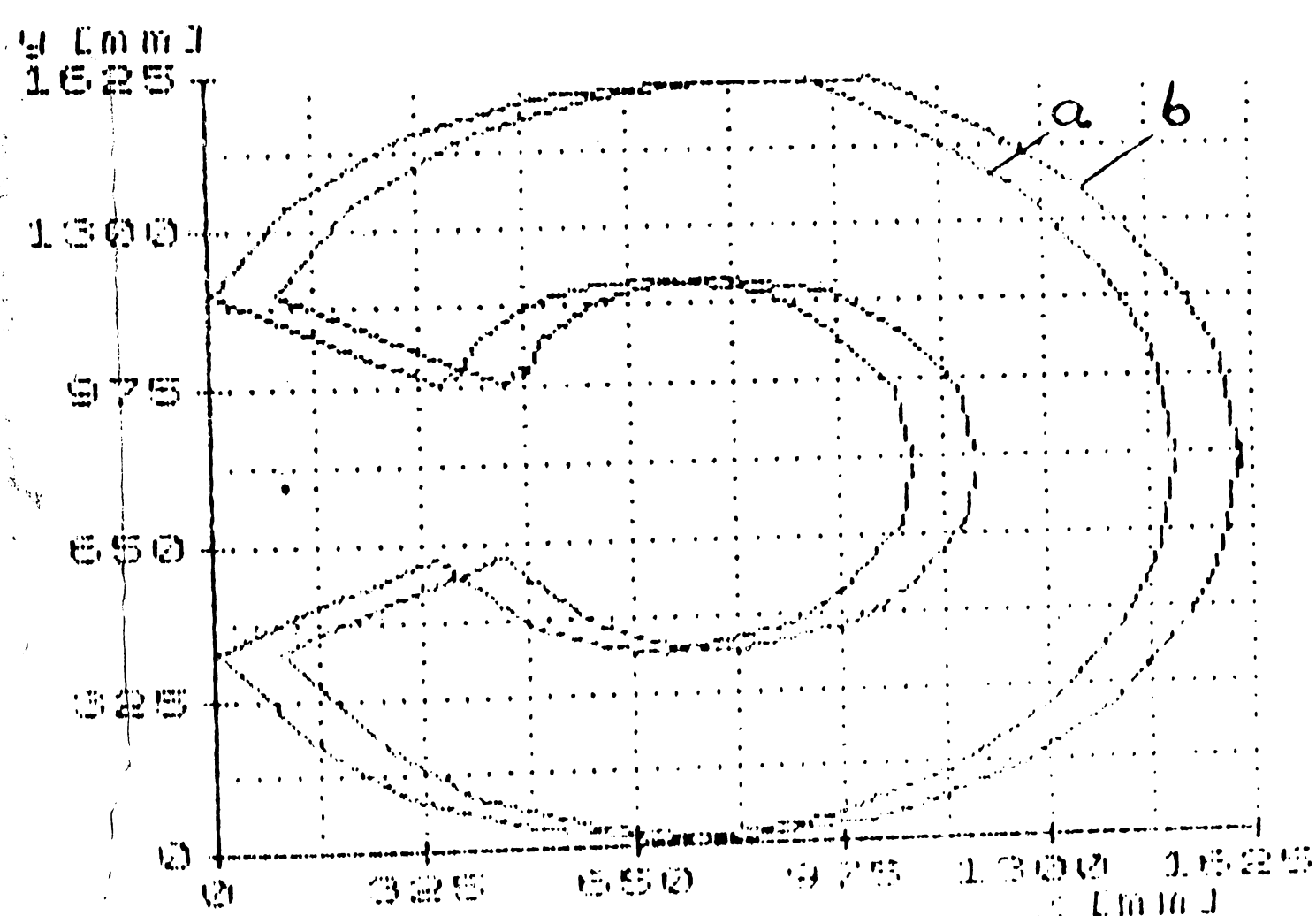


Fig.7.10

cu plane perpendiculare pe axa Oz a robotului.

Secțiunea "a" corespunde poziției de zero pentru modulul-translație verticală, iar secțiunea "b" corespunde poziției - cursă maximă pentru același modul.

În figura 7.11 sînt prezentate secțiuni prin spațiul de

Rezultatele măsurărilor sînt prezentate în tabelul 7.3.

În vederea determinării spațiului de lucru real al robotului, măsurările respective au fost completate cu serii de măsurări la poziția de zero și la cursa maximă, pentru fiecare axă.

În figura 7.10 sînt prezentate două secțiuni ale spațiului de lucru

Tabel 7.3

	Axa 1 - Rotatie						Axa 2 - Translatie						Axa 3 - Translatie								
	Traductor poz.			TIRO - 1000			\bar{C}_1 [grd]	Traductor poz.			TIRO - 1000			\bar{C}_2 [mm]	Traductor poz.			TIRO - 1000			\bar{C}_3 [mm]
	Start [grd]	Tintă [grd]	Cursa \bar{C}_1 [grd]	Start [grd]	Tintă [grd]	Cursa \bar{C}_1 [grd]		Start [mm]	Tintă [mm]	Cursa \bar{C}_2 [mm]	Start [mm]	Tintă [mm]	Cursa \bar{C}_2 [mm]		Start [mm]	Tintă [mm]	Cursa \bar{C}_3 [mm]				
1	0	305,08	305,08	0,05	305,1	305,05	304,995	0	153,5	153,5	-0,3	154,5	154,8	0	409	409	0,1	410	409,9	58'60"	
2	-0,07	304,9	304,97	-0,05	304,9	304,95	304,995	0,5	155,8	153,3	-0,6	154,5	155,1	1,5	41	409,5	0,5	41	409,5	58'60"	
3	0,05	304,9	304,85	-0,09	304,15	304,95	304,995	0,6	155,5	154,9	-0,4	154,8	155,2	-1,2	407,5	408,7	0,4	411,5	411,1	58'60"	
4	0,06	305,03	305,03	-0,07	304,8	304,87	304,995	-0,5	156	156,5	0,5	150	155,5	-0,5	410,1	409,6	-0,3	409,5	409,8	58'60"	
5	-0,09	305,0	305,09	0,05	305,07	305,12	304,995	-0,4	156,1	156,5	0,5	156,7	156,2	0,3	410,5	410,2	-1,0	409,2	410,2	58'60"	

lucru real al robotului cu plane conținând axa Oz a robotului, la diferite unghiuri de poziție ale modulului rotație de bază (axa 1).

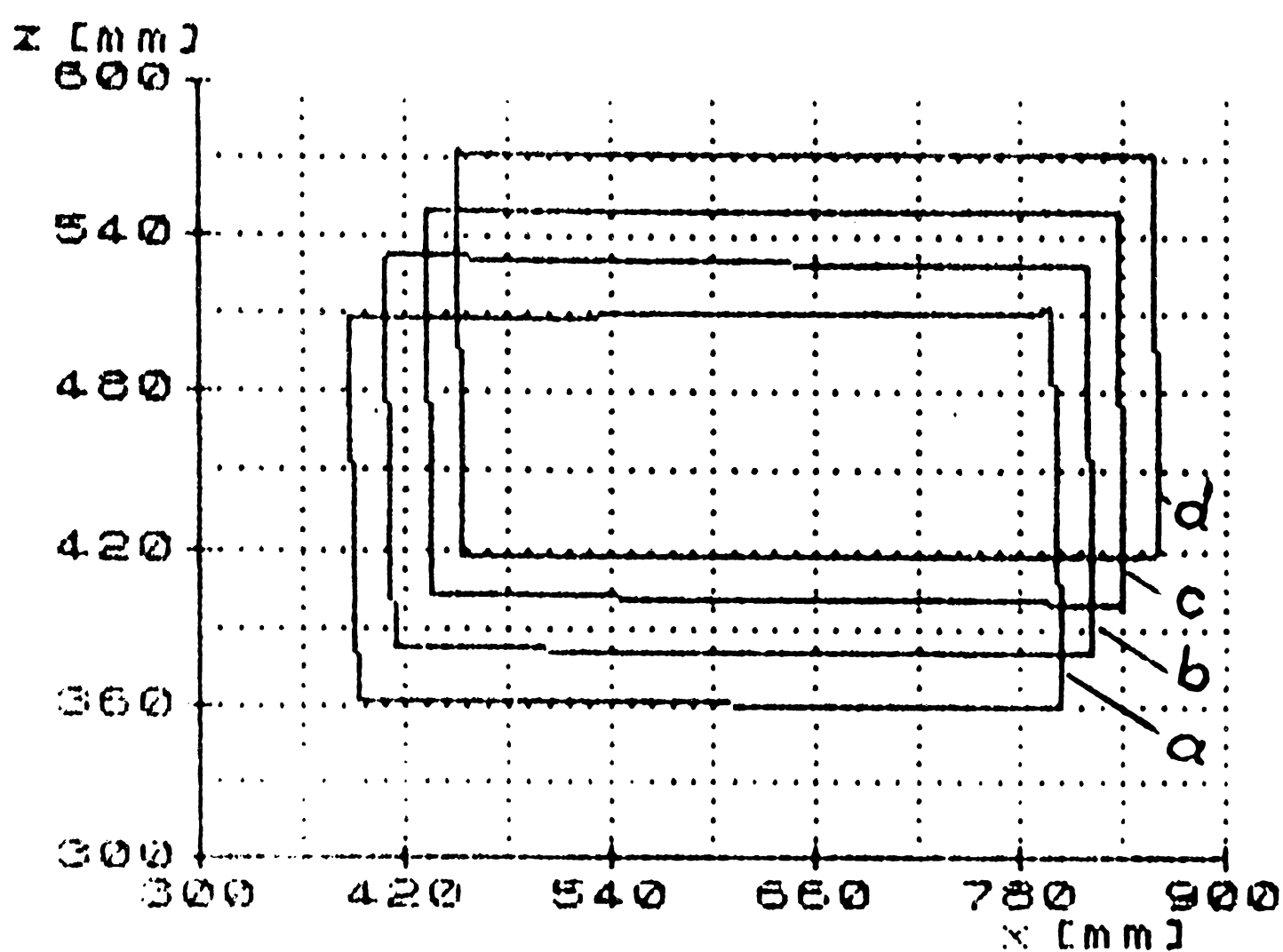


Fig. 7.11

În ambele figuri, pentru a fi puse în evidență, secțiunile au fost decalate după axa Ox și respectiv Oz cu câte 50 mm.

7.4.2. Săgeata în P.C. sub acțiunea sarcinii

Datorită elasticității elementelor componente ale M.G.T. al robotului, precum și al jocurilor din cuplele cinematice, sub acțiunea sarcinii, se produc deplasări chiar și în repaus.

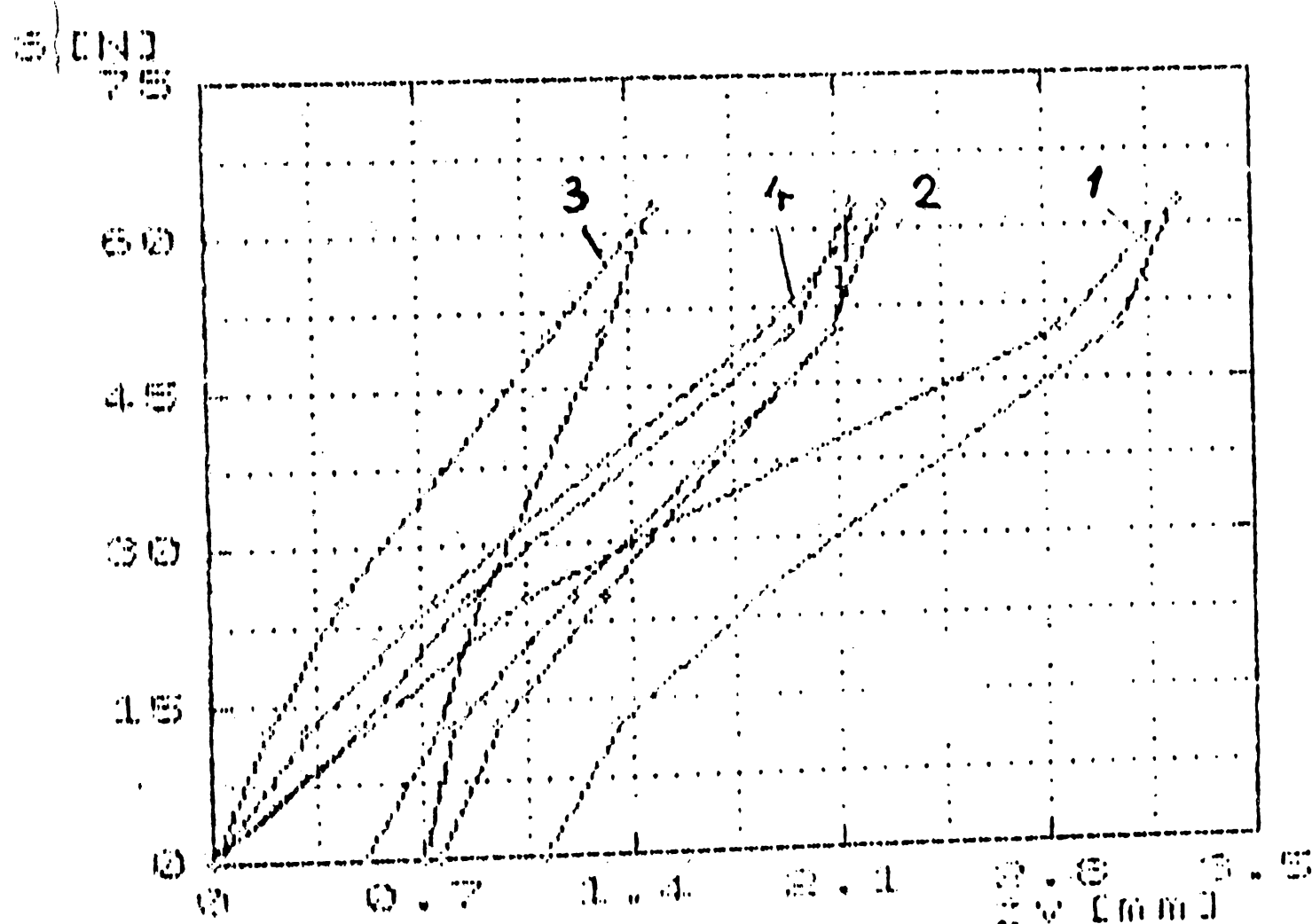
Pentru punerea în evidență a acestor săgeți, s-au plasat în dispozitivul de prehensiune al robotului sarcini de 12,5 N, 25 N, 50 N și 62,5 N, reprezentând 25%, 50%,

100% și respectiv 125% din sarcina nominală. S-a utilizat montajul prezentat în figura 7.4, plasat în spațiul de lucru.

Tabel 7.4

\bar{Z}_v [mm]		Î N C Ă R C A R E								
Sarcina		Axa 1: 50%	1: 50	1: 50	1: 50	1: 50	1: 50	1: 50	1: 50	1: 50
[N]	[%]	① 2: 100%	② 2: 100	③ 2: 100	④ 2: 50	⑤ 2: 50	⑥ 2: 50	⑦ 2: 0	⑧ 2: 0	⑨ 2: 0
		3: 100%	3: 50	3: 0	3: 100	3: 50	3: 0	3: 100	3: 50	3: 0
12,5	25	0,505	0,320	0,185	0,480	0,185	0,250	0,435	0,410	0,405
25	50	1,058	0,750	0,430	0,850	0,525	0,345	0,820	0,750	0,550
50	100	2,855	1,845	1,135	1,150	1,550	1,350	1,150	1,052	0,875
62,5	125	3,250	2,255	1,48	2,250	2,025	2,000	2,555	2,475	2,035

\bar{Z}_v [mm]		D E S C Ă R C A R E								
12,5	25	1,355	0,950	0,750	1,255	0,750	0,550	1,052	0,950	0,635
25	50	1,853	1,305	0,900	1,755	0,855	0,695	1,550	1,325	0,675
50	100	3,050	2,080	1,320	1,950	1,750	1,535	1,668	1,545	0,975
62,5	125	3,250	2,255	1,480	2,250	2,025	2,000	2,555	2,475	2,035



1-axa1- 50%; axa2-100%; axa3-100%;
 2- 1- 50%; 2-100%; 3- 50%;
 3- 1- 50%; 2-100%; 3- 0%;
 4- 1- 50%; 2- 50%; 3-100%;

Fig.7.12

Măsurările au fost făcute la 0, 50% și 100% din cursa fievării modul component atât în regim de încărcare, cât și de descărcare.

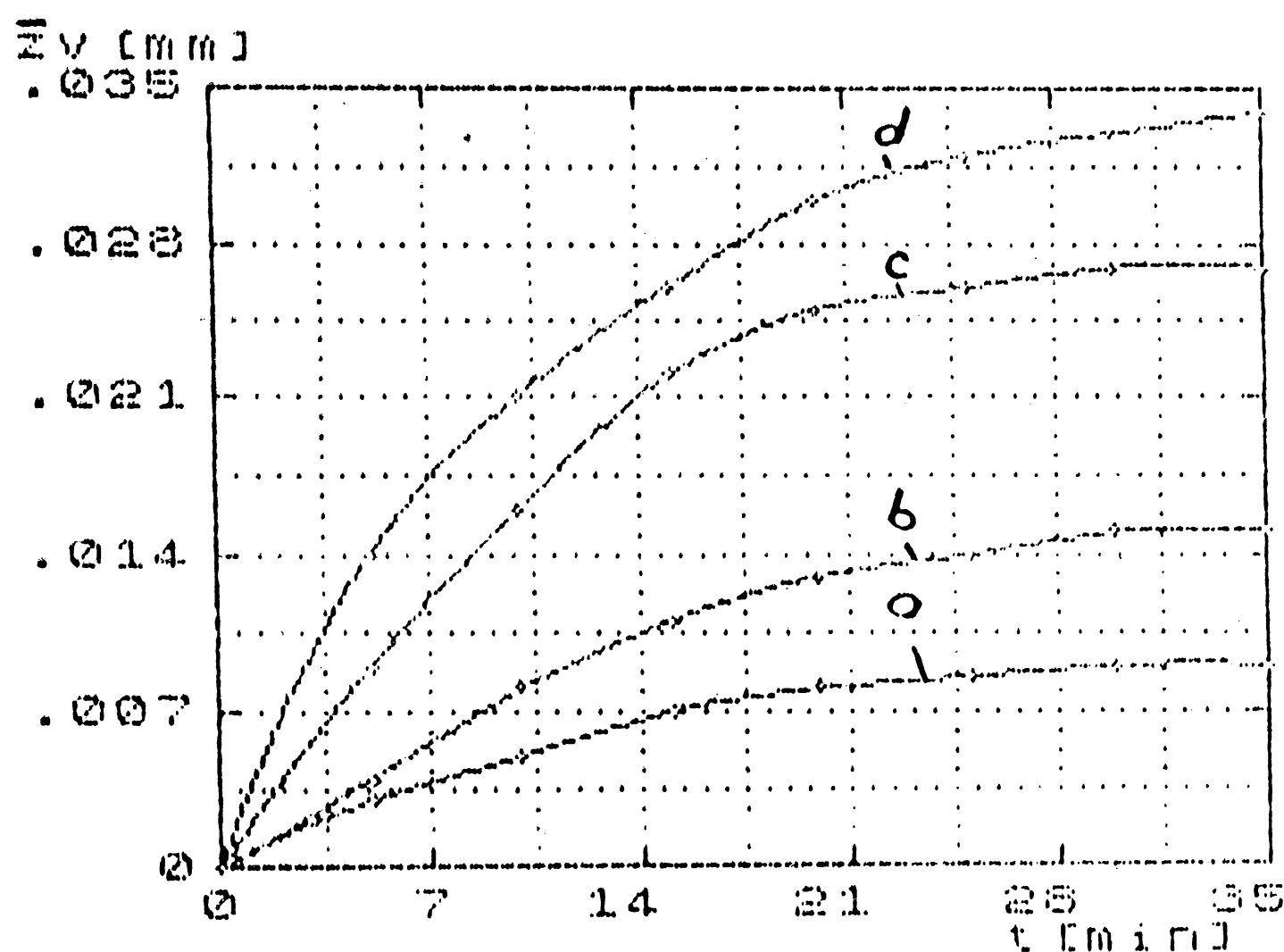
Rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 7.4 și parțial în figura 7.12.

Se remarcă cei doi factori care influențează exactitatea de poziționare a P.C. și anume jocurile din cuplele cinematice, (punctele de inflexiune de pe curbe) și elasticitatea elementelor (porțiunile liniare de pe ace-

leagi curbe). Este pusă în evidență și histereza lanțului cinematic în fază de descărcare a acestuia.

7.4.3. Variația săgeții statice în timp

Comportarea în stare de repaus a M.G.T. este pusă în evidență într-un punct al spațiului de lucru considerat a fi frecventat



a-25%; b-50%; c-100%; d-125%

Fig.7.13

stabilizare a valorilor \bar{Z}_v .

Măsurările au fost efectuate la intervale de 5 minute, utilizând același montaj ca și în paragraful 7.4.2.

7.4.4. Incertitudinea de poziționare

Această caracteristică, considerată printre cele mai importante în funcționalitatea M.G.T. este pusă în evidență pe instalația prezentată în paragraful 7.3.1.

Se determină abaterile de poziție a P.C. față de o situație inițială. P.C., respectiv centrul sferei plasate pe efectorul final al R.I. este adus de fiecare dată în zona de acțiune a capului tridimensional (fig.7.3; 7.4) fixat în spațiul de lucru.

Evident că incertitudinea de poziționare este influențată de o serie de factori cum sînt :

- numărul cuplelor cinematice, care participă la mișcare ;

- sarcina vehiculată ;
- viteza de deplasare în cuplele cinematice și implicit, viteza P.C.

Măsurările au fost efectuate prin acționarea câte unei cuple cinematice, a două cuple cinematice și respectiv cele trei cuple cinematice ale M.G.T. Ansamblul rezultatelor obținute este cuprins în tabelele 7.5 și 7.6.

Măsurările au fost efectuate în două etape. În prima etapă s-au testat posibilitățile de poziționare ale fiecărui modul component al M.G.T. În acest sens s-a considerat revelatoare poziția P.C. dispusă la 50% din cursa maximă a fiecărui modul și totodată viteza de deplasare în jurul și în lungul fiecărei axe, 50% din viteza maximă a modulelor componente. Cu privire la sarcina utilă (vehiculată), a fost aleasă valoarea nominală (S.U. - 50 N). Au fost efectuate 16 măsurări pentru fiecare modul, cu readucere de fiecare dată a modulului în poziția inițială.

Înregistrările au fost efectuate utilizând montajul prezentat în figura 7.3 (paragraf 7.3.1) și totodată sistemul propriu de înregistrare a robotului (traductoarele de poziție TIRO-1000 montate pe fiecare axă). Se remarcă în tabelul 7.5 o concordanță între cele două serii de înregistrări.

În etapa a doua a măsurărilor, poziția finală a P.C. a fost atacată din diferite direcții prin deplasarea celor trei module ale M.G.T. (exactitate de poziționare multidirecțională).

Zonele de amplasare a capului tridimensional (respectiv poziția țintă a P.C.) au fost obținute prin divizarea curselor maxime de deplasare (25%, 50% și 100% din cursa maximă posibilă).

În fiecare dintre aceste situații s-a urmărit influența diferențelor parametri funcționali (viteză, sarcină utilă) asupra incertitudinii de poziționare. Au fost efectuate câte 15 măsurări pentru fiecare caz în parte.

Caracterul aleator al valorilor determinate, impune necesitatea unui calcul statistic privind încadrarea în limitele incertitudinii acceptate a robotului. Acest lucru este absolut necesar a fi realizat, indiferent de valorile parametrilor funcționali ai R.I.

Pentru viteze de deplasare $v_i \in [v_{i \min}, v_{i \max}]$ și sarcini utile $S.U. \in [0, S.U._{\max}]$, condiția de exactitate a R.I. impune ca probabilitatea abaterii a la medie cu o cantitate $u > 0$,

Table 7.5

Nr. crt.	Cotă afişaj		Imprecizie afişaj		Cotă afişaj		Imprecizie afişaj	
	Imprecizie		microlimit		Imprecizie		microlimit	
	impulsuri	mm	mm	impulsuri	mm	mm	mm	
0	1	2	3	4	5	6	7	8

(1) MODUL rotație - C - 152,5° (50%); S.U. - 50 N (100%); ω - 0,785 rad/s (50%)

	Sens direct ↺				Sens invers ↻			
1	58611	0	0	0	824	0	0	0
2	623	+12	+0,624	-0,400	824	0	0	+0,010
3	610	-1	-0,052	-0,030	825	+1	+0,052	-0,040
4	620	+9	+0,468	-0,520	825	+1	+0,052	-0,030
5	607	-4	-0,208	-0,150	827	+3	+0,156	-0,080
6	613	+2	+0,104	+0,150	824	0	0	+0,040
7	605	-6	-0,312	-0,250	815	-9	-0,468	-0,400
8	605	-6	-0,312	-0,100	825	+1	+0,052	+0,010
9	605	-6	-0,312	-0,250	826	+2	+0,104	-0,040
10	605	-6	-0,312	-0,250	825	+1	+0,052	-0,040
11	610	-1	-0,052	-0,070	826	+2	+0,104	-0,060
12	605	-6	-0,312	-0,250	818	-6	-0,312	+0,290
13	605	-6	-0,312	-0,230	825	+1	+0,052	-0,010
14	610	-1	-0,052	-0,050	815	-9	-0,468	+0,430
15	624	+13	+0,676	-0,300	816	-8	-0,416	+0,370
16	616	+5	+0,260	-0,070	825	+1	+0,052	+0,020
17	606	-5	-0,260	-0,070	817	-7	-0,364	+0,360
18	621	+10	+0,520	-0,500	818	-6	-0,312	+0,300

2) MODUL TRANSLAȚIE VERTICALĂ - C - 0,0775 mm (50%); S.U. - (100%); v - 0,03 m/s (50%)

	Urcare				Coborîre			
1	29645	0	0	0	2684	0	0	0
2	642	-3	-0,015	-0,090	2625	-59	-0,290	+0,020
3	654	+9	+0,045	-0,040	2635	-49	-0,295	0
4	647	+2	+0,010	0	2629	-55	-0,245	+0,060
5	638	-7	-0,035	-0,06	2633	-51	-0,275	+0,020
6	649	+4	+0,020	-0,03	2641	-43	-0,255	-0,060

label 7 5 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8
7	29647	+2	+0,010	-0,140	2650	-34	-0,170	+0,040
8	641	-4	-0,020	-0,040	2644	-40	-0,200	+0,020
9	648	+3	+0,015	0	2639	-45	-0,225	0
10	647	+2	+0,010	-0,080	2632	-52	-0,260	+0,060
11	636	-9	-0,045	-0,070	2639	-45	-0,225	+0,020
12	662	+17	+0,085	+0,020	2631	-53	-0,265	-0,060
13	639	-6	-0,030	-0,130	2625	-59	-0,295	-0,070
14	650	+5	+0,025	-0,140	2632	-52	-0,260	-0,110
15	649	+4	+0,020	-0,090	2629	-55	-0,275	-0,040
16	657	+12	+0,060	+0,010	2629	-55	-0,275	+0,050
17	649	+4	+0,020	-0,040	2635	-49	-0,245	-0,070
18	649	+4	+0,020	-0,060	2631	-53	-0,265	-0,020

(3) MODUL BRAT - C - 0,205 mm (50%); S.U. - (100%); v - 0,064 m/s (50%)

	Extensie				Retragere			
1	39104	0	0	0	3177	0	0	0
2	101	-3	-0,030	-0,020	3169	-8	-0,080	+0,100
3	099	-5	-0,050	-0,050	3164	-13	-0,130	+0,070
4	100	-4	-0,040	0	3157	-20	-0,200	+0,210
5	099	-5	-0,050	-0,010	3166	-11	-0,110	+0,080
6	097	-7	-0,070	-0,030	3166	-11	-0,110	+0,260
7	100	-4	-0,040	0	3166	-11	-0,110	-0,040
8	102	-2	-0,020	-0,050	3158	-19	-0,190	-0,050
9	097	-7	-0,070	0	3164	-13	-0,130	0
10	100	-4	-0,040	-0,010	3166	-11	-0,110	-0,030
11	098	-6	-0,060	0	3159	-18	-0,180	+0,050
12	098	-6	-0,060	-0,010	3167	-10	-0,100	+0,090
13	101	-3	-0,030	0	3166	-11	-0,110	0
14	100	-4	-0,040	-0,010	3167	-10	-0,100	+0,020
15	094	-10	-0,100	-0,020	3164	-13	-0,130	-0,040
16	099	-5	-0,050	+0,020	3162	-15	-0,150	+0,050
17	097	-7	-0,070	+0,050	3167	-10	-0,100	-0,090
18	097	-7	-0,070	+0,040	3166	-11	-0,110	-0,080

Tabel 7.6

VITEZELE DE DEPLASARE A MODULELOR - $v = 0,25 \cdot v_{max}$; cursa $c = 0,25 c_{max}$

Nr. crt.	S.U. - 0N (%)			S.U. - 12,5N (25%)			S.U. - 25N (50%)			S.U. - 50N (100%)			S.U. - 62,5N (125%)		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-0,260	+0,150	-0,250	+0,280	+0,468	+0,150	-0,020	-0,110	-0,290	-0,030	-0,020	+0,100	-0,280	+0,300	+0,020
2	+0,416	-0,250	-0,230	0	-0,416	+0,110	-0,015	-0,090	-0,295	-0,025	-0,015	-0,080	+0,400	-0,280	-0,135
3	+0,520	-0,100	-0,050	-0,120	+0,052	-0,100	-0,035	-0,040	+0,060	+0,020	+0,010	-0,110	+0,530	-0,180	-0,140
4	-0,260	+0,104	-0,300	+0,010	-0,416	-0,250	+0,010	0	-0,070	-0,312	-0,030	-0,050	-0,260	+0,180	-0,190
5	+0,260	-0,110	+0,070	-0,040	+0,052	0	+0,015	-0,060	-0,275	+0,052	-0,140	-0,020	0	-0,125	+0,010
6	-0,670	-0,250	-0,070	-0,040	-0,364	+0,104	+0,010	-0,030	-0,275	-0,468	-0,070	+0,010	-0,500	-0,350	-0,040
7	-0,052	-0,020	-0,500	-0,060	-0,312	+0,370	-0,090	-0,014	-0,265	-0,416	-0,080	-0,265	-0,127	-0,550	-0,060
8	-0,312	-0,250	-0,550	+0,290	+0,052	+0,020	+0,010	0	-0,010	+0,515	-0,320	-0,295	-0,420	-0,620	-0,120
...															
15	-0,312	-0,300	-0,070	-0,060	+0,156	+0,360	-0,040	-0,014	-0,240	-0,370	+0,050	-0,070	-0,120	+0,140	-0,180

 $v = 0,25 v_{max}$; $c = 0,5 c_{max}$:

1	+0,050	-0,030	0	-0,100	+0,110	-0,120	-0,020	+0,300	-0,060	-0,120	+0,100	-0,120	+0,330	+0,100	-0,340
2	+0,010	-0,040	0	-0,089	+0,050	-0,050	-0,050	+0,200	+0,470	-0,190	+0,075	-0,210	+0,080	+0,072	-0,200
3	+0,040	+0,020	+0,040	-0,130	+0,070	+0,080	+0,063	+0,045	+0,400	-0,250	-0,330	-0,160	+0,090	+0,330	+0,400
4	0	-0,060	+0,060	+0,360	-0,050	+0,070	+0,025	-0,060	+0,070	-0,250	-0,630	-0,230	+0,092	+0,670	-0,230
5	+0,040	-0,550	+0,055	+0,440	-0,600	-0,020	+0,220	-0,047	+0,300	-0,250	+0,170	-0,140	+0,170	+0,170	-0,580
6	-0,040	-0,020	+0,090	+0,405	-0,120	+0,110	-0,635	-0,040	-0,070	+0,080	+0,590	+0,070	-0,074	+0,590	-0,080
7	+0,180	+0,030	+0,630	-0,160	-0,050	+0,420	+0,080	+0,560	+0,150	+0,570	-0,040	-0,290	+0,100	+0,520	-0,570
8	+0,050	+0,035	-0,010	-0,100	+0,075	-0,170	+0,045	+0,300	+0,330	+0,680	-0,140	-0,390	+0,075	+0,080	-0,300
...															
15	+0,060	+0,120	+0,060	-0,350	+0,150	+0,090	+0,270	+0,060	+0,380	+0,080	-0,180	-0,280	+0,330	+0,070	+0,140

 $v = 0,25 v_{max}$; $c = c_{max}$:

1	+0,090	0	+0,025	+0,092	+0,040	+0,110	+0,330	+0,260	+0,510	+0,280	+0,130	+0,350	-0,100	+0,330	-0,265
2	+0,010	+0,200	+0,125	+0,125	+0,460	+0,090	+0,160	+0,320	+0,470	+0,170	+0,270	+0,320	+0,275	+0,420	-0,325
3	-0,040	+0,470	+0,280	-0,060	+0,380	+0,360	+0,220	+0,330	+0,320	+0,155	+0,330	+0,300	+0,370	0	+0,140
4	+0,210	-0,040	+0,210	-0,040	-0,210	+0,210	+0,225	-0,050	+0,560	-0,060	-0,060	+0,295	+0,475	-0,650	+0,040
5	+0,080	-0,080	+0,160	-0,060	-0,060	+0,080	+0,165	-0,030	+0,310	0	+0,080	+0,420	-0,095	-0,375	-0,080
6	+0,160	+0,170	-0,090	-0,055	-0,050	-0,090	+0,160	+0,220	-0,160	-0,050	+0,335	+0,375	-0,275	-0,265	-0,090
7	+0,100	+0,150	-0,085	+0,140	+0,235	-0,070	-0,095	+0,185	-0,180	+0,185	-0,080	-0,265	+0,200	-0,040	+0,170
8	-0,070	-0,030	+0,060	+0,220	+0,200	-0,075	-0,065	+0,165	+0,220	+0,245	+0,625	-0,125	-0,110	+0,800	+0,450
...															
15	-0,050	-0,080	+0,090	+0,380	+0,165	+0,120	-0,030	+0,310	+0,515	+0,320	+0,635	-0,060	-0,175	+0,650	+0,620

 $v = 0,5 v_{max}$; $c = 0,25 c_{max}$:

1	+0,170	+0,200	-0,320	+0,175	-0,080	+0,165	-0,420	+0,410	+0,500	+0,220	+0,140	+0,400	+0,202	-0,300	+0,400
2	+0,180	-0,180	-0,180	+0,260	-0,420	+0,130	-0,370	+0,375	+0,420	+0,375	+0,300	+0,420	-0,105	-0,300	+0,420
3	+0,180	+0,160	-0,320	+0,320	-0,385	+0,215	+0,100	+0,550	+0,300	+0,240	+0,330	-0,270	-0,200	+0,320	+0,430
4	+0,050	-0,910	+0,300	+0,155	+0,250	+0,205	+0,080	+0,500	+0,375	-0,185	+0,100	-0,200	+0,300	-0,450	+0,600
5	+0,620	0	+0,375	+0,080	+0,220	+0,205	+0,090	+0,510	+0,510	-0,060	+0,090	+0,350	+0,040	-0,800	+0,750
6	-0,040	-0,720	-0,275	-0,060	+0,260	+0,310	+0,375	+0,510	+0,185	+0,285	-0,080	+0,450	+0,050	+0,150	+0,620
7	-0,620	+0,460	-0,330	-0,330	-0,160	+0,305	+0,275	+0,200	-0,135	+0,320	-0,230	+0,320	+0,620	+0,250	-0,320
8	-0,570	+0,310	-0,270	+0,270	-0,180	-0,140	-0,150	+0,220	-0,145	+0,440	+0,600	+0,330	+0,600	+0,330	-0,420
...															
15	-0,220	-0,080	+0,300	+0,310	+0,235	-0,135	0,155	-0,135	-0,130	-0,010	+0,700	-0,020	-0,300	+0,200	+0,330

 $v = 0,5 v_{max}$; $c = 0,5 c_{max}$:

1	+0,200	+0,300	+0,420	+0,275	+0,100	+0,200	-0,500	+0,420	+0,600	+0,300	+0,200	+0,500	+0,300	-0,100	+0,300
2	+0,220	+0,100	+0,100	+0,260	+0,420	+0,230	0,450	+0,380	+0,500	+0,475	+0,350	+0,520	+0,250	-0,420	+0,350

Tabel 7.6 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	+0,330	+0,330	+0,020	+0,670	+0,475	-0,320	+0,675	-0,375	+0,450	+0,550	+0,450	+0,480	+0,620	-0,850	+0,500
4	+0,470	+0,120	+0,520	-0,230	+0,375	-0,350	+0,250	+0,660	+0,650	+0,620	+0,475	+0,375	+0,650	+0,520	+0,420
5	+0,520	+0,570	+0,480	+0,780	-0,200	-0,370	+0,700	+0,650	-0,660	+0,670	+0,480	+0,475	+0,785	+0,520	+0,375
6	-0,300	+0,620	+0,370	-0,440	+0,420	+0,560	+0,500	+0,480	+0,750	+0,690	+0,520	+0,820	+0,850	+0,640	+0,750
7	+0,620	-0,870	-0,200	+0,550	+0,440	+0,620	+0,550	+0,300	-0,330	+0,650	+0,650	+0,950	+0,880	+0,600	+0,880
8	+0,750	-0,890	+1,150	+0,650	+0,370	+0,630	+0,510	+0,480	-0,480	+0,580	+0,675	-0,850	+0,950	+0,605	+0,785
15	-0,320	-0,600	+0,900	+0,660	+0,215	+0,550	+0,710	-0,670	-0,670	+0,650	+0,520	-0,750	+0,995	-0,350	+0,385

$$v = 0,5 v_{\max}; c = c_{\max};$$

1	+0,300	-0,420	+0,500	+0,435	+0,255	+0,610	+0,550	-0,400	+0,480	+0,620	+0,550	+0,500	+0,750	-0,620	+0,650
2	-0,200	-0,840	+0,250	+0,430	-0,110	+0,710	+0,560	-0,620	+0,670	+0,650	+0,620	-0,480	+0,650	-0,750	+0,650
3	-0,220	+0,620	+0,320	+0,630	+0,445	+0,320	+0,620	-0,750	+0,680	+0,575	+0,750	-0,375	+0,630	-0,660	+0,430
4	-0,100	+0,330	+0,440	+0,320	+0,507	+0,480	+0,670	+0,620	+0,730	+0,750	+0,820	-0,620	-0,820	-0,755	+0,780
5	+0,520	-0,430	0	+0,840	+0,560	+0,470	-0,150	+0,670	+0,830	-0,820	+0,505	+0,620	-0,800	+0,430	+0,785
6	+0,630	-0,220	+0,280	-0,920	+0,620	+0,280	-0,850	+0,750	+0,650	-0,750	+0,420	+0,670	-0,905	+0,445	+0,320
7	+0,550	0	+0,260	-0,420	-0,080	+0,330	-0,330	+0,450	+0,750	+0,820	+0,650	+0,750	+0,410	+0,620	+0,475
8	+0,200	+0,010	-0,070	-0,550	-0,320	+0,380	-0,650	+0,325	+0,620	+0,555	+0,750	+0,670	+0,480	+0,720	+0,950
15	-0,220	-0,150	+0,440	+0,650	-0,450	+0,480	+0,600	+0,650	+0,850	+0,620	+0,820	+0,660	+0,520	+0,720	+0,900

$$v = v_{\max}; c = 0,25 c_{\max};$$

1	+0,200	+0,350	-0,280	+0,430	-0,470	-0,680	+0,450	+0,320	+0,500	+0,550	+0,475	+0,305	+0,665	+0,700	-0,800
2	+0,550	+0,420	-0,285	+0,450	-0,385	+0,520	+0,460	+0,420	+0,525	+0,600	+0,520	+0,320	+0,720	+0,670	+0,850
3	+0,320	-0,010	+0,455	-0,650	-0,485	+0,475	-0,380	+0,480	+0,515	+0,620	+0,655	+0,570	+0,775	+0,580	+0,920
4	+0,300	0	+0,555	-0,330	-0,620	+0,425	-0,375	+0,475	+0,480	+0,480	-0,475	+0,650	+0,800	+0,950	+1,550
5	+0,285	+0,570	+0,620	-0,255	+0,650	+0,375	-0,675	+0,350	+0,650	+0,820	-0,650	+0,620	+0,825	+0,990	+1,420
6	+0,280	+0,330	+0,280	+0,355	+0,620	+0,405	+0,850	+0,660	+0,660	+0,795	-0,675	+0,550	+0,550	+0,870	+1,350
7	-0,140	+0,420	-0,330	+0,700	+0,680	+0,320	+0,350	+0,755	+0,830	+0,650	+0,680	+0,650	-0,650	+0,880	+1,660
8	+0,750	-0,320	-0,320	+0,820	+0,750	+0,620	+0,725	-0,905	+0,930	-0,820	+0,750	+0,625	-0,625	+0,450	+0,920
15	+0,850	-0,480	-0,860	+0,850	+0,680	+0,680	+0,705	-0,320	+0,470	-0,850	+0,950	+0,675	-0,670	+0,670	+0,980

$$v = v_{\max}; c = 0,5 c_{\max};$$

1	+0,550	+0,350	+0,480	+0,425	+0,465	-0,785	-0,875	+0,550	-0,650	+0,750	+0,500	+0,445	+0,800	+0,750	-0,920
2	+1,030	-0,320	+0,460	+0,450	+0,470	-0,875	-0,800	+0,530	+0,350	+0,720	+0,350	+0,475	+0,820	+0,820	-0,990
3	+0,880	-0,080	+0,360	+0,850	+0,420	+0,630	-0,750	-0,230	+0,680	+0,820	+0,420	+0,520	+0,800	-0,870	-0,990
4	+0,750	+0,160	+0,670	+0,920	+0,470	+0,550	-0,820	+0,350	+0,670	+0,875	-0,550	+0,525	+0,880	-0,880	-0,875
5	-0,620	-0,150	+0,820	+1,320	+0,620	-0,475	+0,750	+0,620	+0,650	+0,920	-0,875	+0,650	+1,050	-0,860	-1,250
6	+0,320	+0,750	+0,450	+0,650	+0,625	+0,620	+0,550	+0,650	+0,690	+0,650	+0,820	+0,875	+1,150	+1,250	-1,320
7	+0,575	+0,320	+0,330	-0,230	+0,630	-0,625	+0,450	+0,670	+0,710	+0,630	+0,805	+0,820	-0,850	+1,220	-1,375
8	+0,850	+0,640	+0,420	-0,430	-0,330	+0,725	+0,430	+0,830	+0,780	+0,550	+0,920	+0,805	+0,950	+1,450	-1,150
15	+0,910	-0,080	-0,660	-0,330	-0,480	+0,875	+0,380	+0,880	+0,820	+0,475	+0,375	+0,795	-0,995	+1,420	-1,225

$$v = v_{\max}; c = c_{\max};$$

1	+0,820	+0,650	-1,550	-0,275	+0,550	+0,820	+0,850	+0,670	+0,750	-0,875	+0,680	+0,620	+0,920	+0,850	+1,325
2	-0,620	-0,080	-1,020	-0,382	+0,650	+0,650	+0,620	+0,750	-0,820	-0,805	+0,690	+0,725	+1,080	+0,880	+1,475
3	+0,750	+0,620	-0,880	-0,305	+0,785	+0,650	+1,450	+0,920	-0,975	-0,820	+0,875	+0,650	+1,420	+1,750	+1,330
4	+1,080	+0,750	+0,670	-1,505	+0,775	+0,680	+1,550	+0,980	-1,275	-0,650	+0,820	+0,675	+1,150	+1,650	+1,250
5	+1,120	-0,550	+1,620	-1,480	+0,775	+1,020	+0,920	+1,000	-0,375	-0,750	+0,830	-0,825	+1,250	+1,450	+1,750
6	+0,330	-0,500	+1,650	+0,620	-0,625	+0,750	-0,900	+1,410	+0,450	+1,250	+0,795	-0,785	-1,320	+1,330	+1,220
7	-0,220	-0,040	+0,320	+0,750	+1,025	+0,750	-0,875	+1,420	+0,670	+1,050	+1,505	+1,425	-1,420	+1,455	-1,650
8	-0,180	-0,080	+0,520	+0,350	+1,125	-0,660	+1,020	+0,980	+0,875	+0,920	+1,475	+1,205	-1,150	-0,950	-1,475
15	+0,450	+0,920	+0,640	+0,480	+0,920	+0,880	+1,090	-0,300	+0,805	+0,980	+1,320	+1,550	+1,420	-0,875	-1,330

să tindă spre unitate (± 1).

Pentru girul de măsurări efectuate :

$$\begin{aligned} \Delta X_i &= / \Delta x_{i1}, \Delta x_{i2}, \dots, \Delta x_{in} / \\ \Delta Y_i &= / \Delta y_{i1}, \Delta y_{i2}, \dots, \Delta y_{in} / \\ \Delta Z_i &= / \Delta z_{i1}, \Delta z_{i2}, \dots, \Delta z_{in} / \end{aligned} \quad (7.1)$$

au fost determinate valorile medii și abaterea medie pătratică în condițiile unei repartiții normale.

Practica arată că abaterile aleatoare de semne diferite (plus și minus) au aceeași probabilitate de apariție, iar pe de altă parte abaterile aleatoare de valoare absolută mică apar mai frecvent decât abaterile aleatoare de valoare absolută mare /S14/ /P7/. Abaterile aleatoare au proprietatea de simetrie și proprietatea de concentrare, ceea ce confirmă justetea alegerii distribuției normale pentru aprecierea incertitudinii de poziționare.

Cele două proprietăți sînt caracterizate deci de legea normală de repartiție (Gauss-Laplace sau Moivre).

Densitatea de probabilitate este dată de expresia :

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \quad (7.2)$$

unde :

$\sigma > 0$ - abaterea medie pătratică,

z - abaterea aleatoare

$\varphi(z)$ - curba de densitate de repartiție

Probabilitatea este dată de expresia :

$$P(-z_1 < z < z_1) = P(|z| < z_1) = 2 \cdot \phi\left(\frac{z_1}{\sigma}\right) \quad (7.3)$$

unde :

$\phi(c)$ - funcția de probabilitate Gauss-Laplace,

$$\phi(c) = (2\pi)^{-1/2} \cdot \int_0^c e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt = \frac{1}{2} P(|z| < c \cdot \sigma) \quad (7.4)$$

Valorile $\phi(c)$ au fost extrase din (S14/.

Dacă se iau drept limite $\pm 3\sigma$, ceea ce înseamnă $\pm = 99,73\%$ adică $c = \pm 3$, atunci relația pentru calculul probabilității este :

$$P(|z| > 3\sigma) = 1 - 2 \cdot \Phi(3) \quad (7.5)$$

Relația 7.2 poate fi scrisă și sub următoarea formă :

$$P(x, m, \sigma) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (7.6)$$

σ - avînd următoarea expresie :

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n \frac{(x_k - m)^2}{n} \right)^{1/2} \right] \quad (7.7)$$

m fiind valoarea medie ideală a șirului x_k de măsurări :

$$m = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \right] \quad (7.8)$$

care se aproximează cu media șirului de măsurări :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (7.8')$$

Pentru un număr mai redus de măsurări ($n = 10 \dots 15$) relația (7.7) poate fi înlocuită cu abaterea medie patratică experimentală :

$$s = (n-1)^{-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (7.9)$$

ă acelorși n determinări cu care s-a făcut și valoarea medie \bar{x} . În acest caz, incertitudinea nu se mai poate determina cu repartiția Gauss, ci se folosește repartiția Student avînd ca parametru gradul de libertate $\nu = n-1$. Pentru un număr de măsurări $n = 15$, la o probabilitate acceptată $1 = 25\%$, rezultă din distribuția Student valoarea lui $t = 2,145$ și cu acesta valoarea incertitudinii de poziționare :

$$u_x = \frac{1}{n} t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7.10)$$

Cu aceste considerații teoretice, utilizînd programul "P- DP - v.1." s-au determinat probabilitatea de depășire a incertitudinii acceptate pe cele trei direcții X, Y, Z ale capului tridimensional de măsurare.

În tabelul 7.7 se prezintă (pentru un singur caz - $v = v_{\max}$, $c = c_{\max}$) valorile probabilității de depășire a valorii maxime

admisibile (u_{adm}) impusă inițial pentru M.G.T. Urmărind datele din tabel se remarcă faptul că în direcțiile X,Z există probabilitatea mai ridicată ca valoarea admisibilă să fie depășită.

Acest lucru se datorește cumulării jocurilor din cupla cinematică de rotație și cea de translație în lungul brațului. Probabilitatea minimă de depășire a lui u este după direcția Y. Practic în această direcție este imposibil ca valoarea acceptată să fie depășită.

Urmărind rezultatele din tabelul 7.7 se poate aprecia că viteza de deplasare în cuplele cinematice, sarcina utilă vehiculată, precum și cursa în jurul și în lungul axelor influențează exactitatea de poziționare :

$$\Delta = \left[(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2 + (\bar{z} - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (7.11)$$

cu $x_0 = y_0 = z_0 = 0$

Pentru a urmări influența acestor parametri asupra exactității de poziționare, se utilizează metoda regresiei liniare de reprezentare grafică a dependenței dintre valorile medii ale abaterilor măsurate pe cele trei direcții X,Y,Z și sarcina vehiculată.

Dacă notăm cu s_i sarcina vehiculată și cu t_i valoarea medie a mărimilor măsurate ($\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$), atunci dependența liniară :

$$t_i = a + b \cdot s_i \quad (7.12)$$

reprezintă ecuațiile dreptelor de regresie.

Pentru trasarea acestora se determină valorile lui a și b , folosind notațiile lui Gauss :

$$[p] = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$[px] = \sum_{i=1}^n p_i x_i$$

$$[px^2] = \sum_{i=1}^n p_i x_i^2$$

$$[pa] = \sum_{i=1}^n p_i a_i ; \quad pax = \sum_{i=1}^n p_i a_i x_i \quad (7.13)$$

($i = 1, 2, \dots, n$) - numărul măsurărilor cu aceeași precizie,
($p_i = 1$)

Cu aceste notații se calculează :

Mărimi	S.U. - φN (0 %)			S.U. - 12,5N (25 %)			S.U. - 25N (50 %)			S.U. - 50N (100 %)			S.U. - 62,5N (125 %)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
\bar{x} [mm]	0,441	0,187	0,218	-0,194	-0,686	-0,342	0,636	0,870	0,012	0,033	0,998	0,582	0,372	0,837	0,433
s [mm]	0,558	0,260	0,375	0,427	0,230	0,594	0,406	0,180	0,485	0,633	0,168	0,504	0,517	0,133	0,572
u_{adm} [mm]	±1,000														
c	1,792	3,846	2,656	2,342	4,328	1,683	2,463	4,58	2,062	1,579	4,870	1,984	1,934	4,292	1,748
$\phi(c)/S_{14}$	0,4625	0,4999	0,4961	0,4904	0,4999	0,4535	0,4931	0,4999	0,4803	0,4429	0,4999	0,4761	0,4726	0,4999	0,4591
P [%]	7,5	0,02	0,78	1,92	0,02	9,3	1,38	0,02	3,94	11,42	0,02	4,78	5,48	0,02	8,18
Δ [mm]	0,2769			0,6252			1,1615			1,3358			1,0264		
$t = f(\lambda=14; P=95\%)$	2,145														
$\pm u_x$	0,309	0,143	0,207	0,236	0,127	0,329	0,225	0,0997	0,269	0,350	0,093	0,279	0,286	0,074	0,317

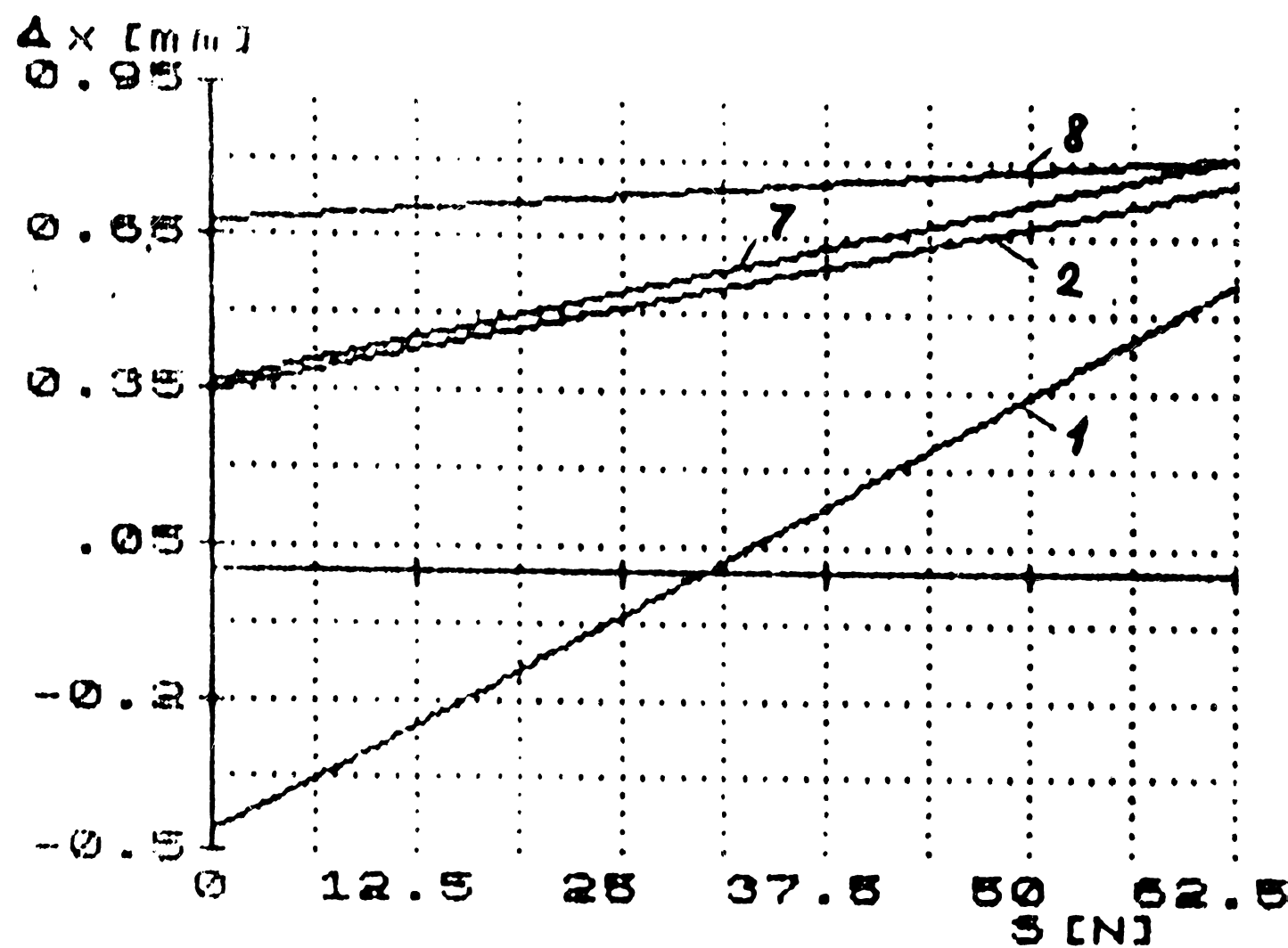


Fig.7.14

$$\sigma = \frac{[pa]}{[p]} - \bar{b} \cdot \frac{[px]}{[p]} ; \tag{7.14}$$

$$\sigma^2 = \frac{[pax] \cdot [p] - [pa] \cdot [px]}{[px^2] \cdot [p] - [px]^2}$$

și

$$\bar{t}_i = \bar{a} + \bar{b} \cdot a_i \tag{7.15}$$

Calculînd incertitudinile estimațiilor \bar{a} și \bar{b} , cu relațiile :

$$m_{\bar{a}} = \left[\frac{[px^2]}{[p] \cdot ([px^2] - [px]^2)} \right]^{1/2} \tag{7.16}$$

$$m_{\bar{b}} = \left[\frac{[p]}{[p] \cdot [px^2] - [px]^2} \right]^{1/2}$$

se determină valorile aproximative ale coeficienților a și b, din expresiile dreptelor de regresie.

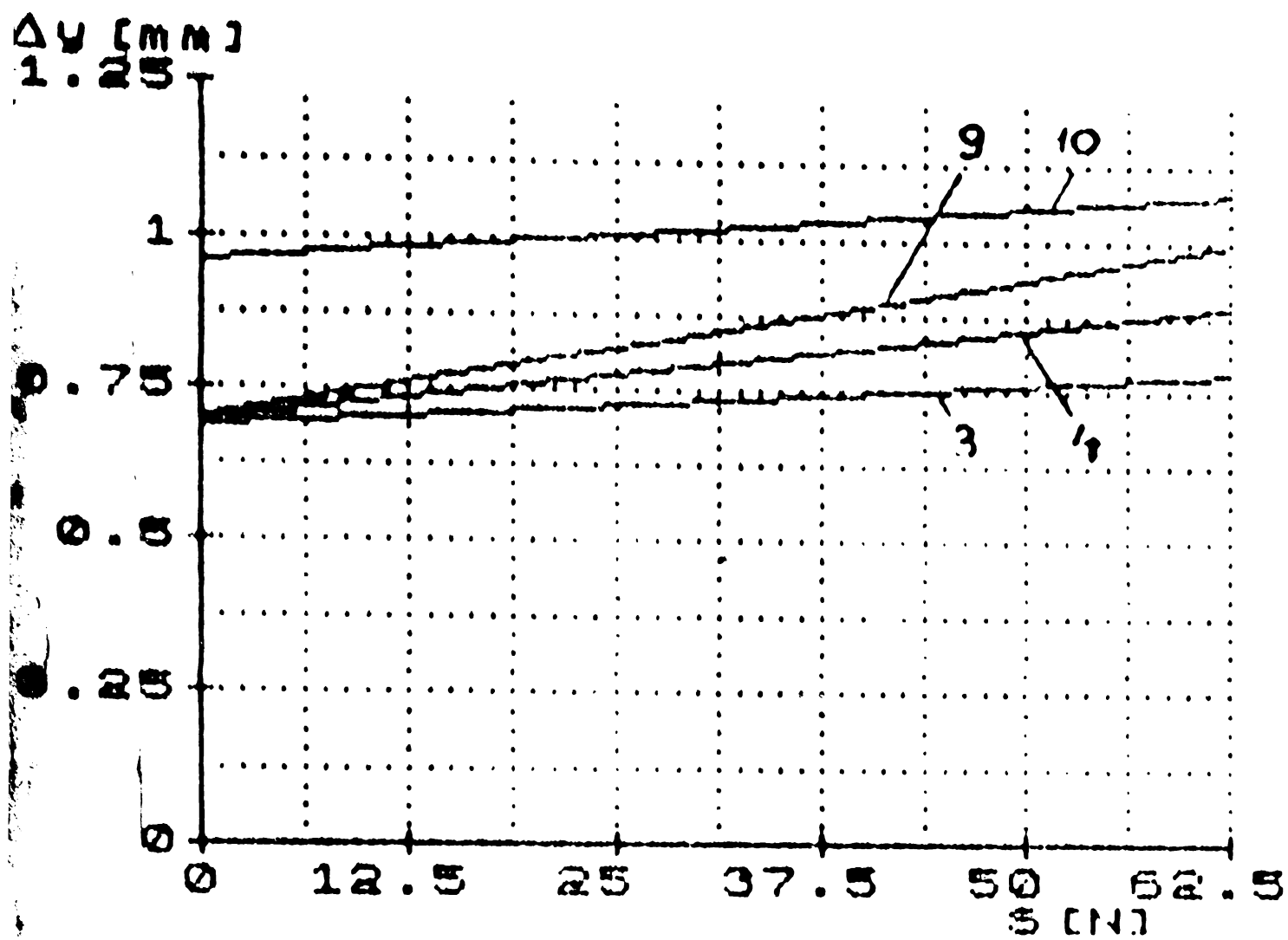


Fig. 7.15

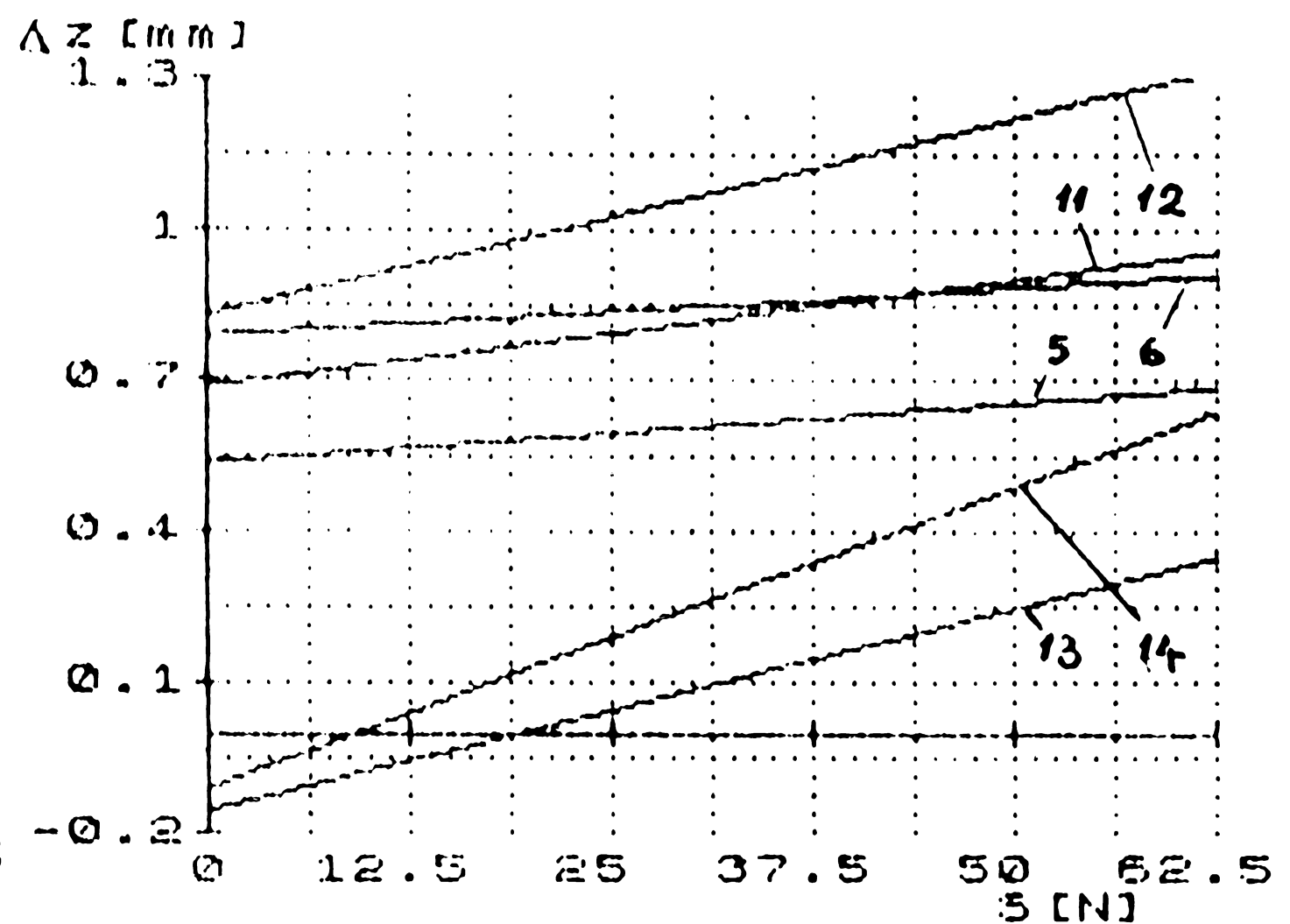


Fig. 7.16

Ansamblul calculelor propuse sînt cuprinse în tabelul 7.8 și figurile 7.14, 7.15 și 7.16.

Analizînd datele din tabel și urmărind graficele trase, se pot trage următoarele concluzii :

- cele mai mari valori ale abaterilor de poziționare se produc după direcția Z a capului tridimensional de măsurare. Acest lucru se datorește rigidității scăzute a structurii robotului pe această direcție, precum și a influenței abaterilor de la forma ideală a ghidajelor modulelor de translație ;

- creșterea curselor pe direcțiile axelor 2 și 3 ale M.G.T. de la 50% la 100%, conduce la creșterea abaterilor medii pe toate cele trei axe.

Valori maxime ale creșterilor se observă pe direcția X la sarcină zero (de la -0,51228 la +0,34636). Diferența se atenuează spre valori ridicate ale sarcinii (0,754735 față de 0,559595, la sarcina S.U. = 62,5 N).

Valorile minime se remarcă pe direcția Y (0,0009 față de 0,0964 la sarcină zero și 0,7790375 față de 0,892025 la sarcină S.U. = 62,5 N) ;

- creșterea sarcinii vehiculate de R.I. influențează negativ exactitatea de poziționare. Pe toate cele trei direcții se observă creșteri ale incertitudinilor de poziționare.

Tabel 7.8

Viteza v		Saržina utišā [N] A_i	$\begin{matrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{matrix}$ $\begin{matrix} a_i \\ \end{matrix}$	t_i	[p] [p _s] [p _s ²]	[pa]	[pas]	a	b	m	m_{Δ}	m_{σ}	a	b
0	1													
$v = v_{max}$	1) Δx 1: 0,5 · C _{1max} 2: 0,5 · C _{2max} 3: 0,5 · C _{3max}	0	0,330	0,260	5	1,815	59,00	0,2066	0,005413	0,0433	0,14576	0,00121	0,34636	0,006534
		12,5	0,160	0,320										
		25	0,295	0,475										
		50	0,380	0,360										
		62,5	0,650	0,475										
	2) Δx 1: 0,5 · C _{1max} 2: 1,0 · C _{2max} 3: 1,0 · C _{3max}	0	-0,468	-0,416										
		12,5	-0,515	-0,295										
25		-0,420	-0,560											
50		0,405	0,420											
62,5		0,045	0,020											
3) Δy 1: 0,5 · C _{1max} 2: 0,5 · C _{2max} 3: 0,5 · C _{3max}	0	0,430	0,470											
	12,5	0,450	0,385											
	25	0,650	0,485											
	50	0,330	0,610											
	62,5	0,355	0,620											
4) Δy 1: 0,5 · C _{1max} 2: 1,0 · C _{2max} 3: 1,0 · C _{3max}	0	0,550	0,400											
	12,5	0,560	0,620											
	25	0,670	0,650											
	50	0,750	0,470											
	62,5	0,620	0,280											
5) Δz 1: 0,5 · C _{1max} 2: 0,5 · C _{2max} 3: 0,5 · C _{3max}	0	0,441	0,350											
	12,5	-0,194	0,280											
	25	0,636	0,620											
	50	0,033	0,330											
	62,5	0,837	0,550											
6) Δz 1: 0,5 · C _{1max} 2: 1,0 · C _{2max} 3: 1,0 · C _{3max}	0	0,425	0,465											
	12,5	-0,450	0,470											
	25	0,850	0,430											
	50	1,320	0,620											
	62,5	-0,430	-0,330											
7) Δx 1: 0,5 · C _{1max} 2: 0,5 · C _{2max} 3: 0,5 · C _{3max}	0	0,475	0,450											
	12,5	0,375	0,020											
	25	0,200	0,300											
	50	0,550	0,620											
	62,5	0,650	0,870											
$v = 0,5 \cdot v_{max}$					7187,5	2,215	60,560	0,5087	-0,00219	0,0623	0,1782	0,000715	0,6869	0,001475
$v = 0,150$					150	3,150	100,000	0,5988	-0,00204	0,07568	0,0976	0,00157	0,6964	0,00361
$v = 0,05$					5	1,753	52,310	0,3537	-0,0001041	0,00825	0,1833	0,002456	0,5370	0,00235
$v = 0,015$					15	2,615	56,00	0,66190	-0,00463	0,006256	0,1265	0,006672	0,7884	0,001943
$v = 0,005$					5	2,050	77,810	0,2279	0,005068	0,001328	0,0314	0,001068	0,3623	0,001136

Tabel 7.8 (continue)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\nu = \nu_{max}$	(8) Δx	0	0,550	0,450	7187,5	3,180	99,625	0,58890	0,00157	0,06234	0,08923	0,000523	0,67822	0,002093
		12,5	0,620	0,475										
		25	0,670	0,420										
		50	0,690	0,520										
	(9) Δy	0	0,620	0,550	3,115	111,25	0,58490	0,00327	0,06575	0,0175	0,001432	0,7024	0,004702	
		12,5	0,650	0,620										
		25	0,575	0,750										
		50	0,750	0,420										
	(10) Δy	0	0,650	0,520	3,510	98,375	0,77928	-0,002576	0,06375	0,03243	0,000752	0,9571	0,01824	
		12,5	0,760	0,770										
		25	0,830	0,380										
		50	0,400	0,170										
(11) Δz	0	0,425	0,465	3,075	99,750	0,53130	0,00279	0,04256	0,15336	0,001563	0,68466	0,004353		
	12,5	0,450	0,470											
	25	0,450	0,420											
	50	0,920	0,470											
(12) Δz	0	0,475	0,380	3,67	127,187	0,5435	0,00635	0,03475	0,28653	0,001475	0,83003	0,007825		
	12,5	0,580	0,750											
	25	0,820	0,180											
	50	1,020	0,750											
(13) Δz	0	0,05	0,090	4,265	219,500	-0,157	0,0338	0,01742	0,001325	0,00625	-0,155675	0,04005		
	12,5	0,185	0,155											
	25	0,525	0,420											
	50	1,550	0,975											
(14) Δz	0	0	0,125	7,668	378,637	-0,1224	0,05520	0,02378	0,01325	0	-0,10915	0,05995		
	12,5	0,505	0,450											
	25	1,058	0,925											
	50	2,855	1,960											
	62,5	3,250	2,755											

Dacă pe direcția Z, proporția de majorare rămâne aproximativ constantă, pe direcțiile X și Y se observă o scădere a proporției de majorare, odată cu creșterea sarcinii vehiculate ;

- față de situația statică, în regim dinamic incertitudinea de poziționare se majorează. Pe direcția Z (fig.7.16) la sarcină zero, valoarea lui z se modifică de la $-0,10915$ la $+0,5370$ pentru $c_i = 0,5 c_{i \max}$ și $-0,155675$ la $+0,7884$ pentru curse maxime ;

- creșterea vitezelor de deplasare în modulele M.G.T., conduce la creșterea incertitudinii de poziționare.

7.4.5. Exactitatea traiectoriei P.C.

Exactitatea traiectoriei P.C., respectiv incertitudinea traiectoriei P.C. sînt mărimi ce devin deosebit de importante la M.G.T. ale R.I. de sudare, vopsire etc.

Ca și exactitatea de poziționare, exactitatea traiectoriei P.C. este o mărime complexă ce este influențată de aceeași parametri. În cadrul experimentărilor s-au urmărit traiectorii linie dreaptă, materializate printr-o riglă etalon (fig.7.5).

Instalația prezentată în paragraful 7.3.1, permite realizarea traiectoriilor - linie dreaptă prin programarea corespunzătoare a R.I. Aceste traiectorii au fost realizate prin acționarea a două, respectiv trei cuple cinematice componente ale M.G.T., rigla etalon fiind amplasată corespunzător în spațiul de lucru. Așa cum este prezentat în tabelul 7.2, exactitatea traiectoriei a fost determinată în relație cu viteza de deplasare a P.C. și sarcina vehiculată.

Expresia exactității traiectoriei :

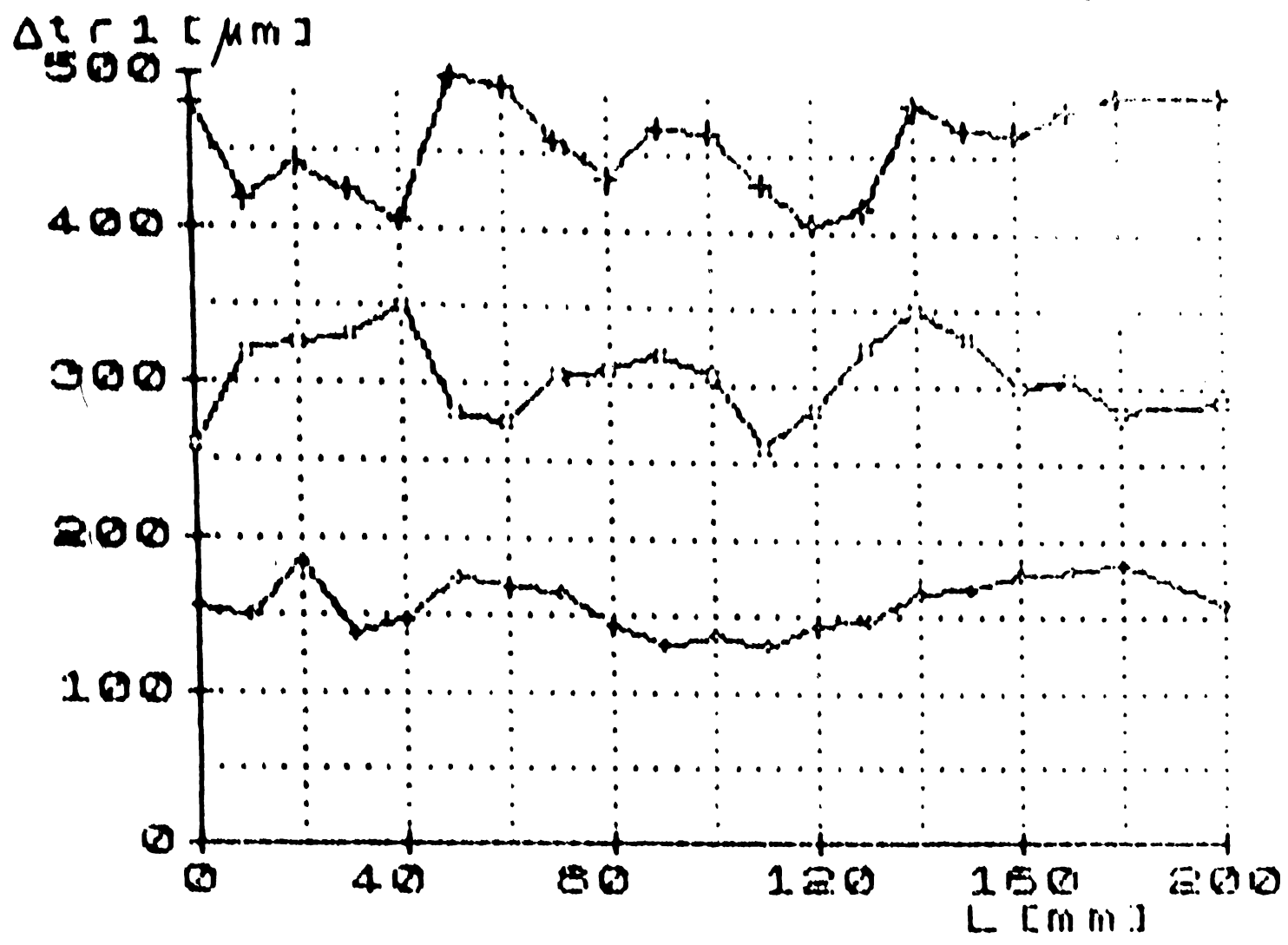
$$\Delta_{tr} = [(\bar{z} - z_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2]^{1/2} \quad (7.17)$$

pentru $z_0 = y_0 = 0$

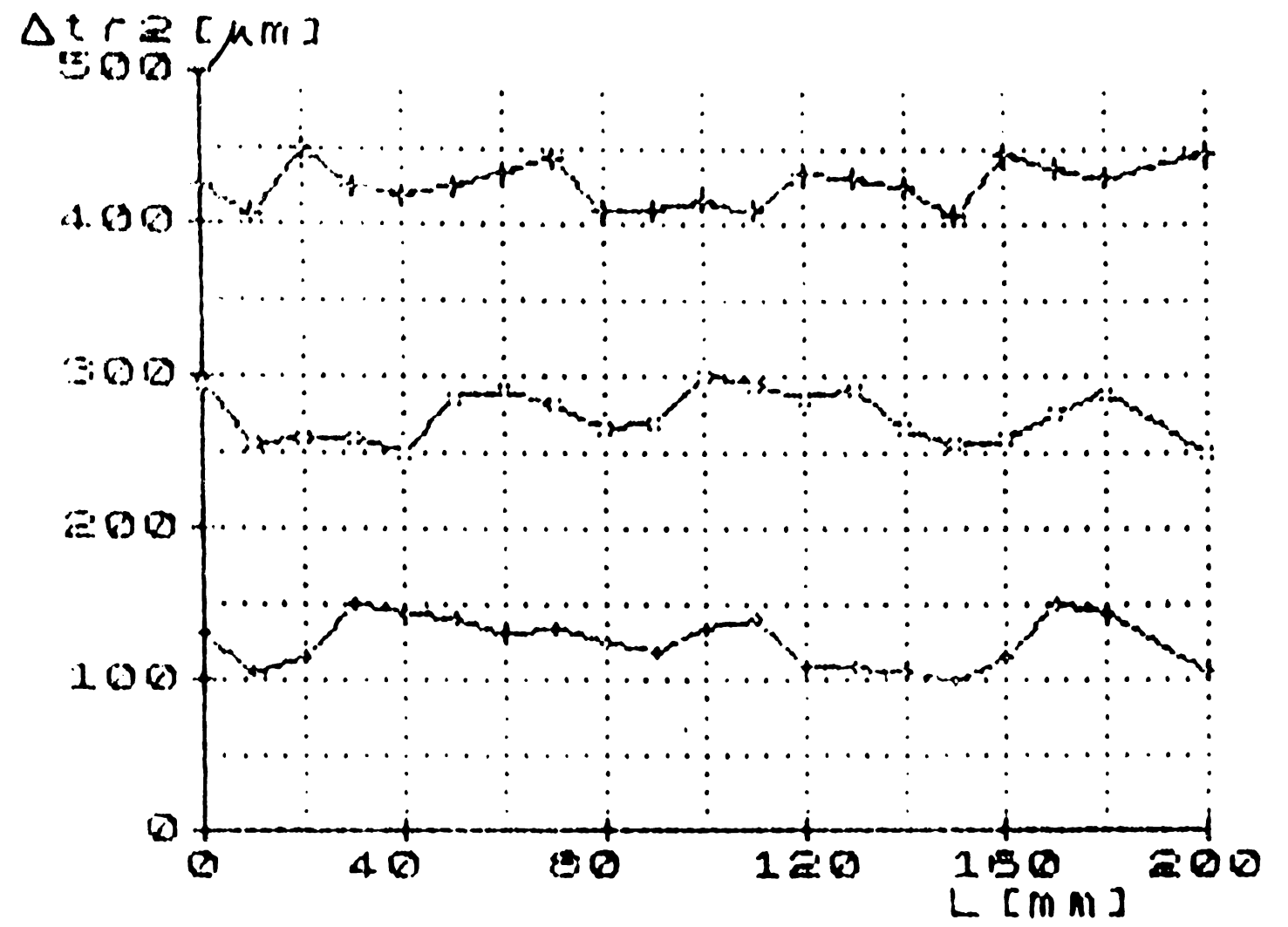
folosește abaterile medii ale măsurărilor la cei doi traductori inductivi plasați pe efectatorul final.

În figurile 7.17 + 7.19 se prezintă exactitatea traiectoriei în funcție de viteza de deplasare a P.C. la sarcina vehiculată S.U. = 50 N.

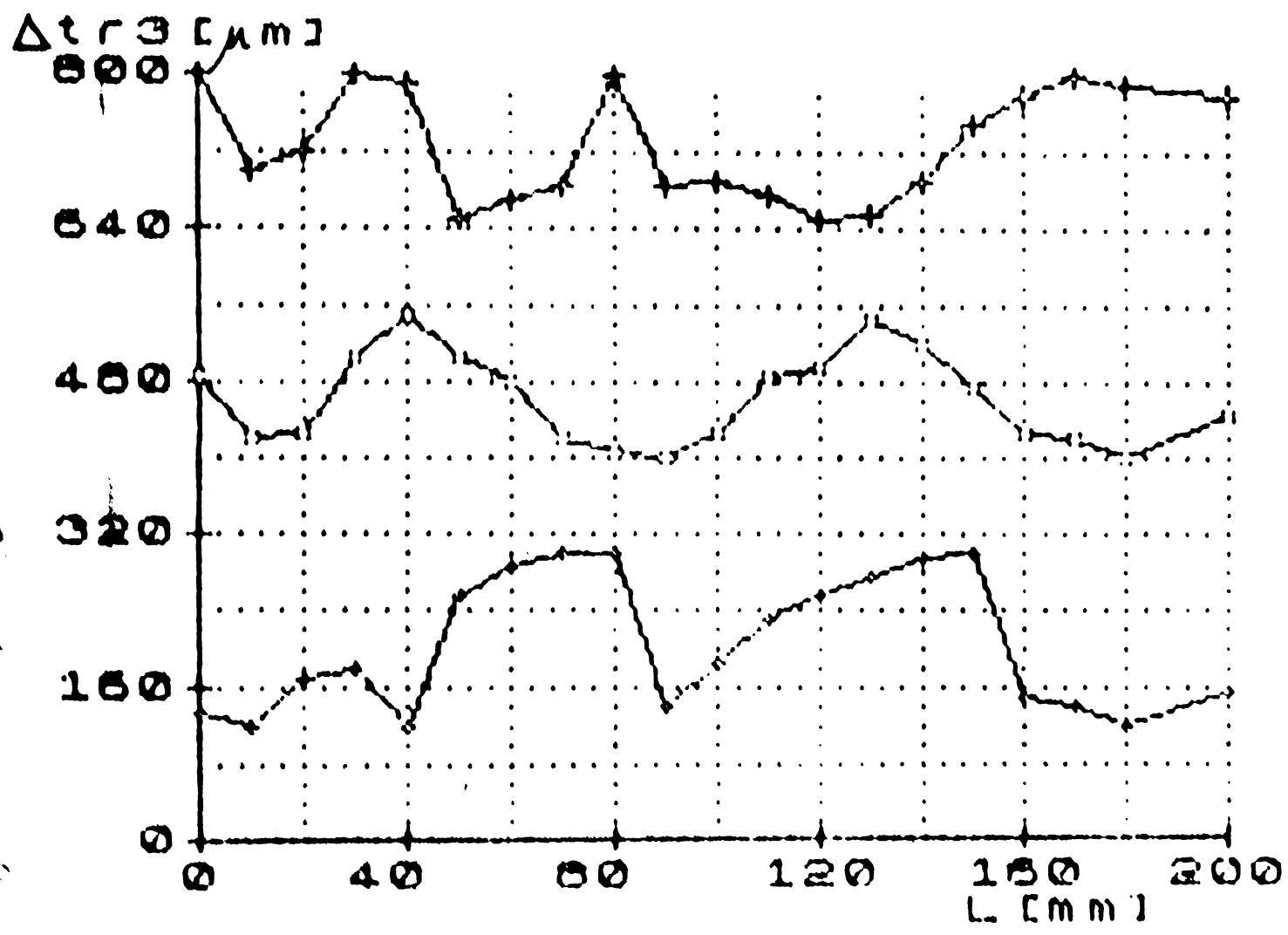
Domeniul incertitudinii traiectoriei este mai mare pentru celeași valori ale vitezei P.C., în cazul cînd se realizează traiectoria cu o cuplă cinematică de rotație și una de transla-



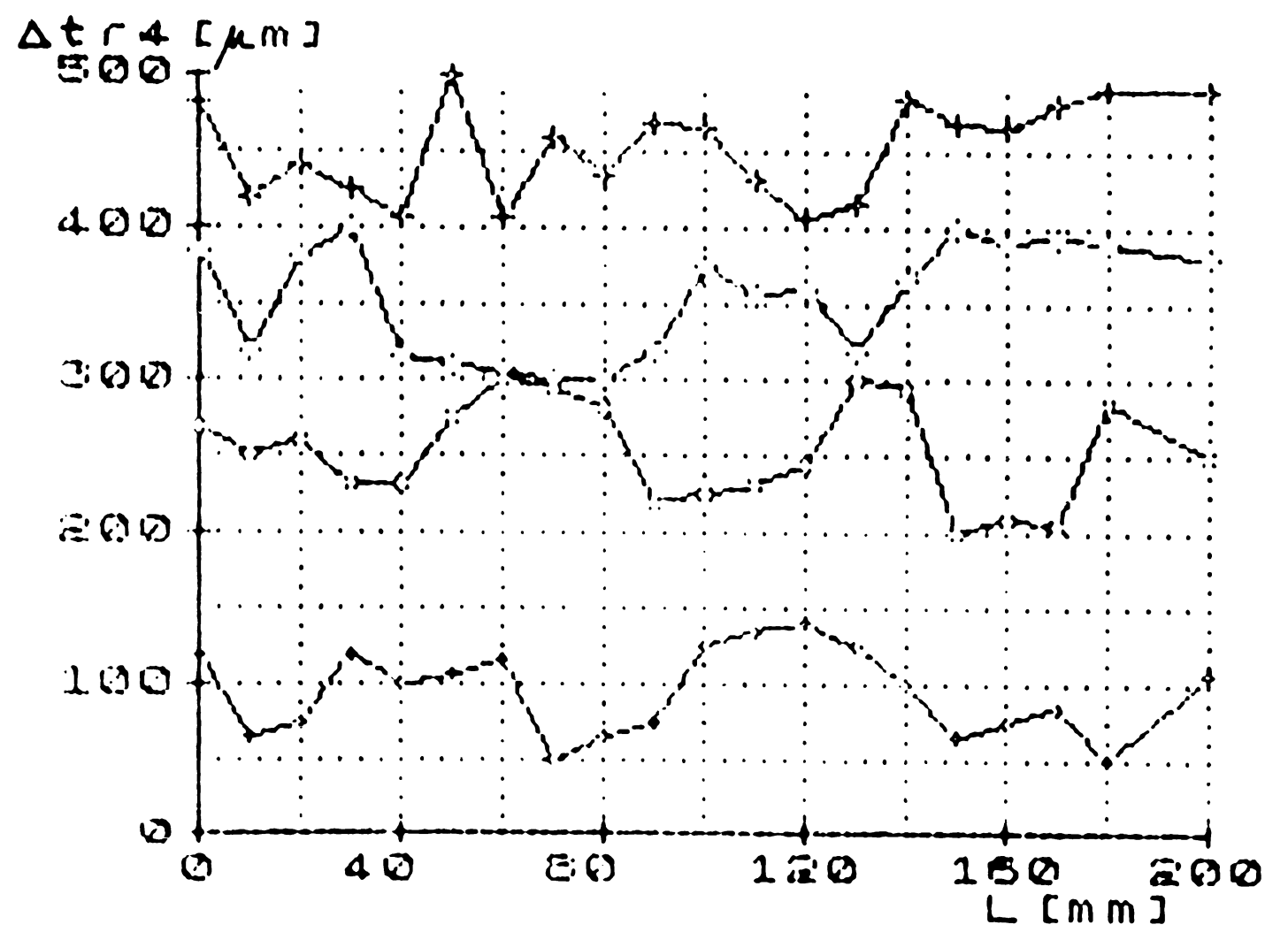
plan Oxy [axa1, axa3] SU-50;
Fig.7.17



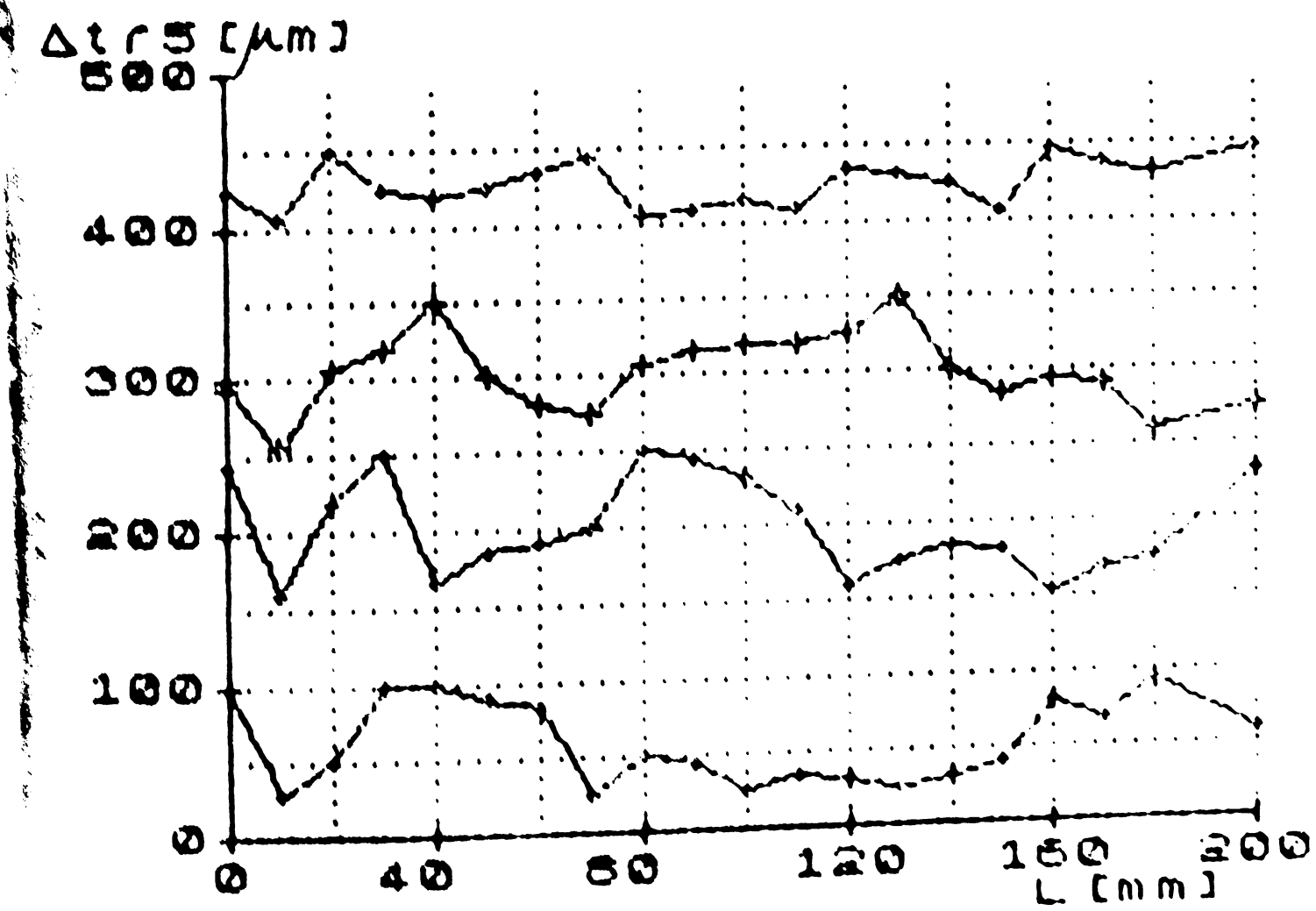
plan Oxz [axa2, axa3] SU-50N;
Fig.7.18



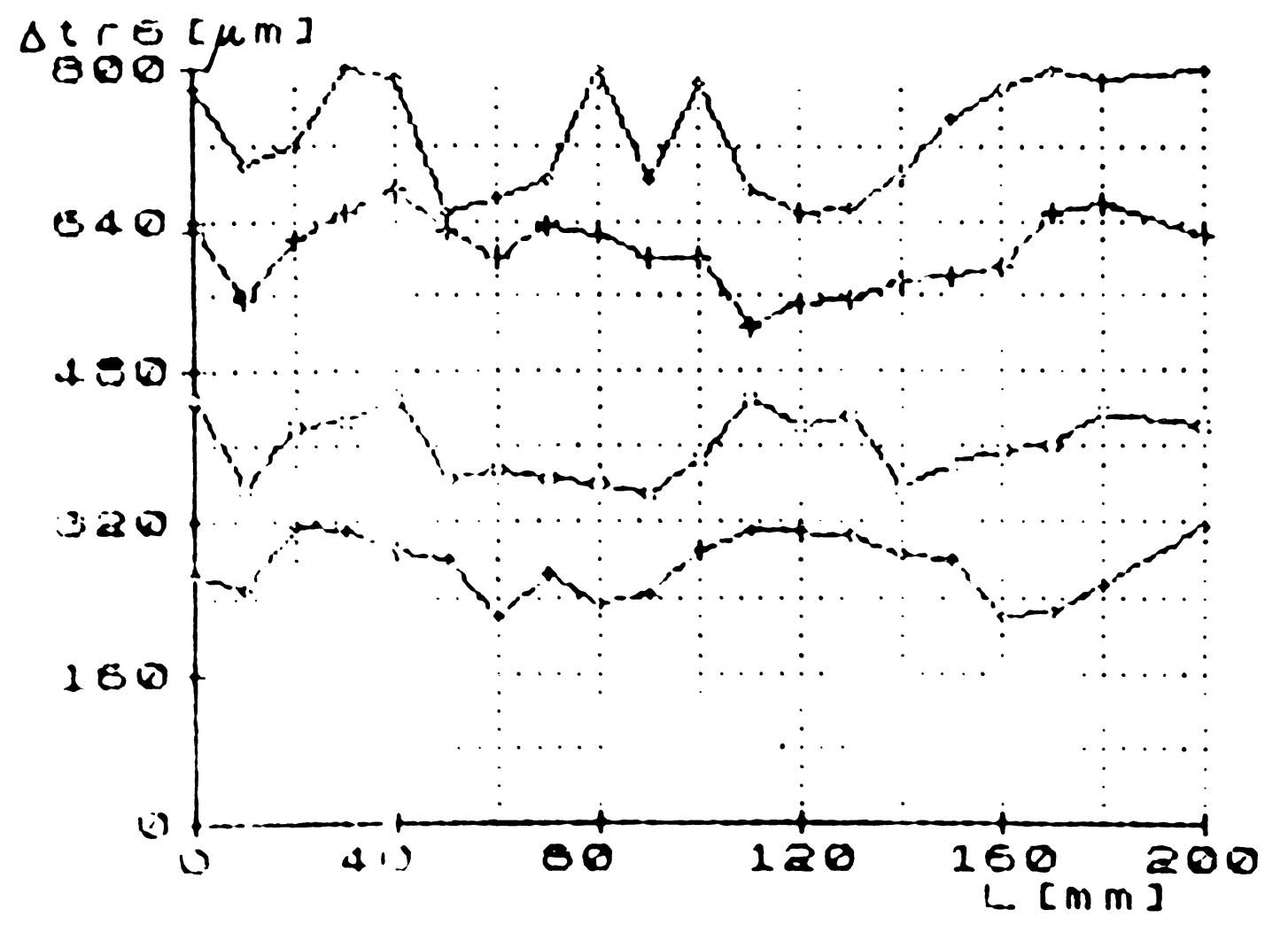
Oxyz [axa1, axa2, axa3] SU-50N;
Fig.7.19



plan Oxy [axa1, axa3] v=0.150m/s.
Fig.7.20



plan Oxz [axa2, axa3] v=0.150m/s.
Fig.7.21



Spatial Oxyz [axa1, 2, 3] v=0.150m/s.
Fig.7.22

ție (fig.7.17), față de situația când traiectoria este realizată cu două cuple cinematice de translație (fig.7.18).

Pentru traiectorii realizate în spațiu, utilizând toate cele trei cuple cinematice, domeniul incertitudinii traiectoriei este mai extins ca și în cazurile precedente, întrucât intervin erorile întregului lanț cinematic (fig.7.19).

În figurile 7.20 + 7.22 se prezintă influența sarcinii vehiculate asupra exactității, respectiv impreciziei traiectoriei P.C. Măsurările au fost făcute la o viteză a P.C. $v = 0,150$ m/s.

7.5. Determinarea caracteristicilor cinematice

În vederea determinării caracteristicilor cinematice s-a utilizat instalația prezentată în paragraful 7.3.2.

Așa cum s-a arătat, instalația a fost echipată în așa fel încât să poată prelua direct valorile momentane ale funcțiilor de comandă ale robotului REMF-5. Astfel, valorile spațiului parcurs de cuplele cinematice ale M.G.T. s-a înregistrat, ca și în paragraful anterior, utilizând traductori de poziție (de rotație și liniari); valorile vitezelor au fost obținute prin prelucrare de către sistemul propriu al calculatorului, iar valorile accelerațiilor au fost înregistrate cu ajutorul traductoarelor inductive de accelerație poz.1,2,3 (fig.7.6). Și în acest caz s-au explorat posibilitățile funcționale ale robotului, utilizându-se diferite valori ale curselor, sarcinii vehiculate și ale vitezelor.

În figurile 7.23, 7.25 și 7.27 sînt prezentate diagramele de variație ale spațiului parcurs în cele trei cuple cinematice ale M.G.T.

În figurile 7.24, 7.26 și 7.28 sînt prezentate diagramele de variație ale vitezelor (unghiulare și liniare) a obiectului manipulat și respectiv în PC al M.G.T.

Și într-un caz și în celălalt s-au prezentat două situații și anume pentru valoarea maximă a vitezei și pentru 50% din aceasta, din cele patru efectuate.

În figurile 7.29, 7.30 și 7.31 sînt prezentate diagramele de variație ale accelerațiilor liniare preluate de la traductoarele inductive în P.C. al M.G.T. obținute în aceleași condiții.

Trebuie specificat că toate diagramele prezentate au fost efectuate pentru sarcina $S.O = 50$ N (100%).

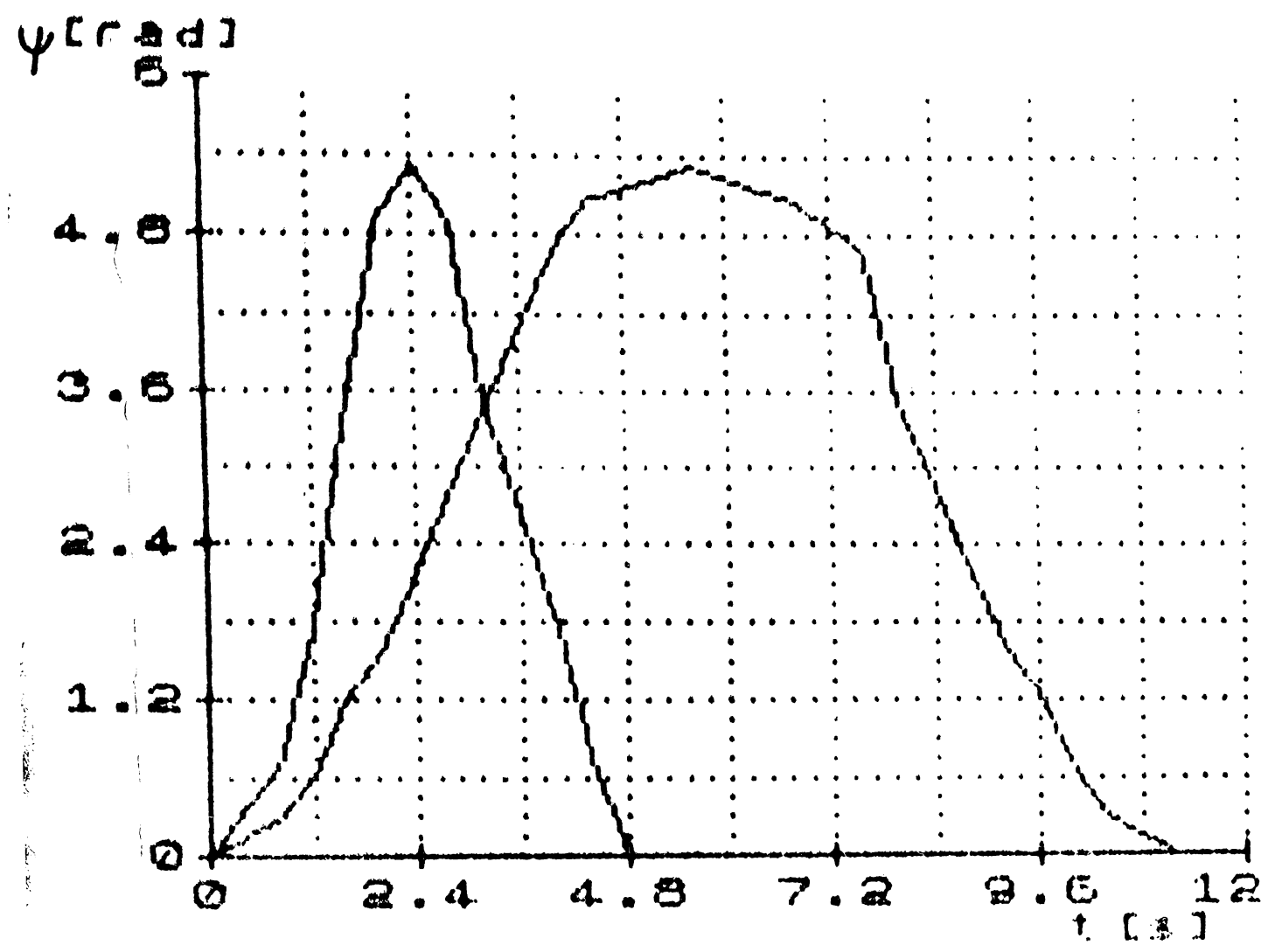


Fig.7.23

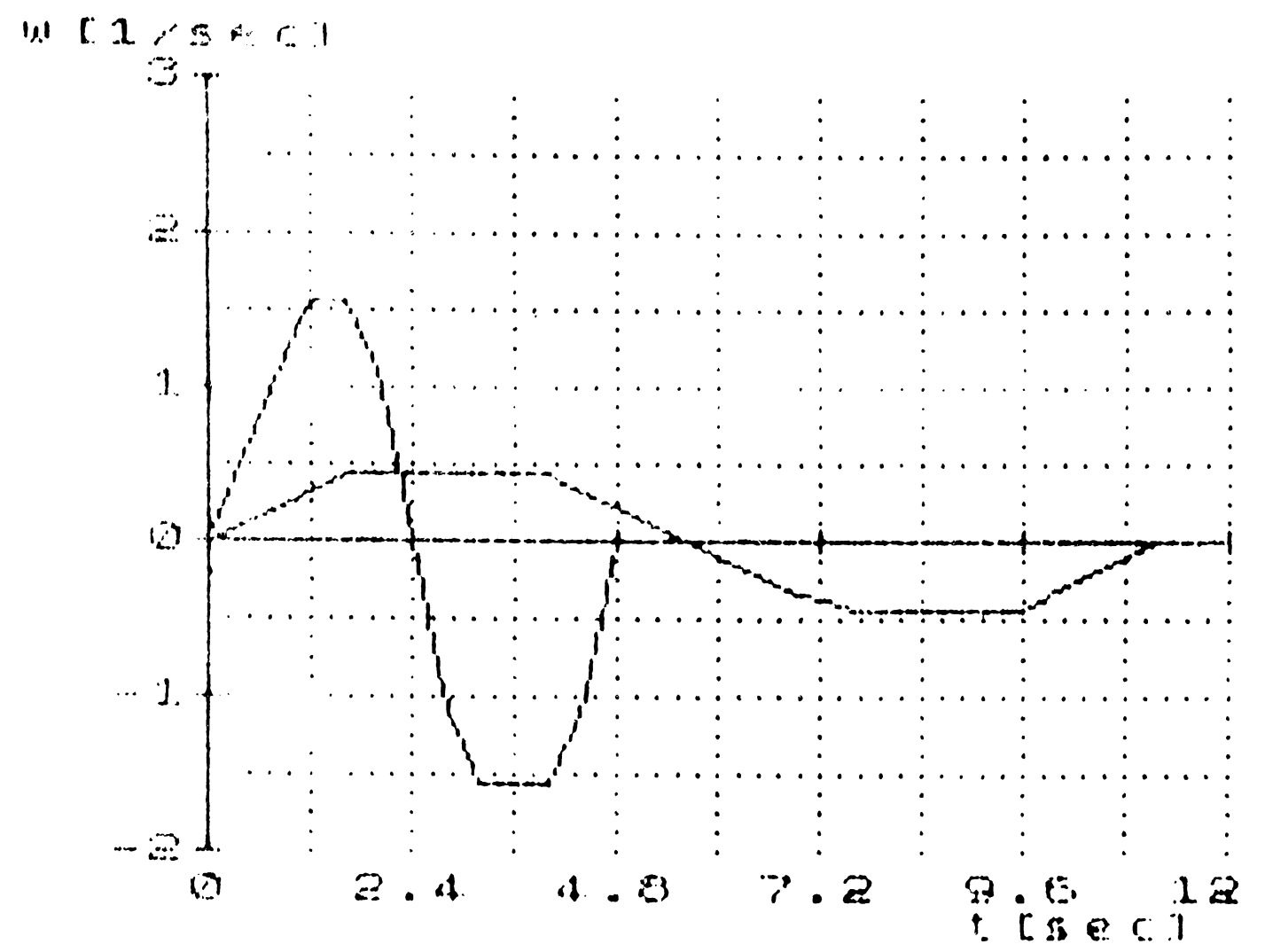


Fig.7.24

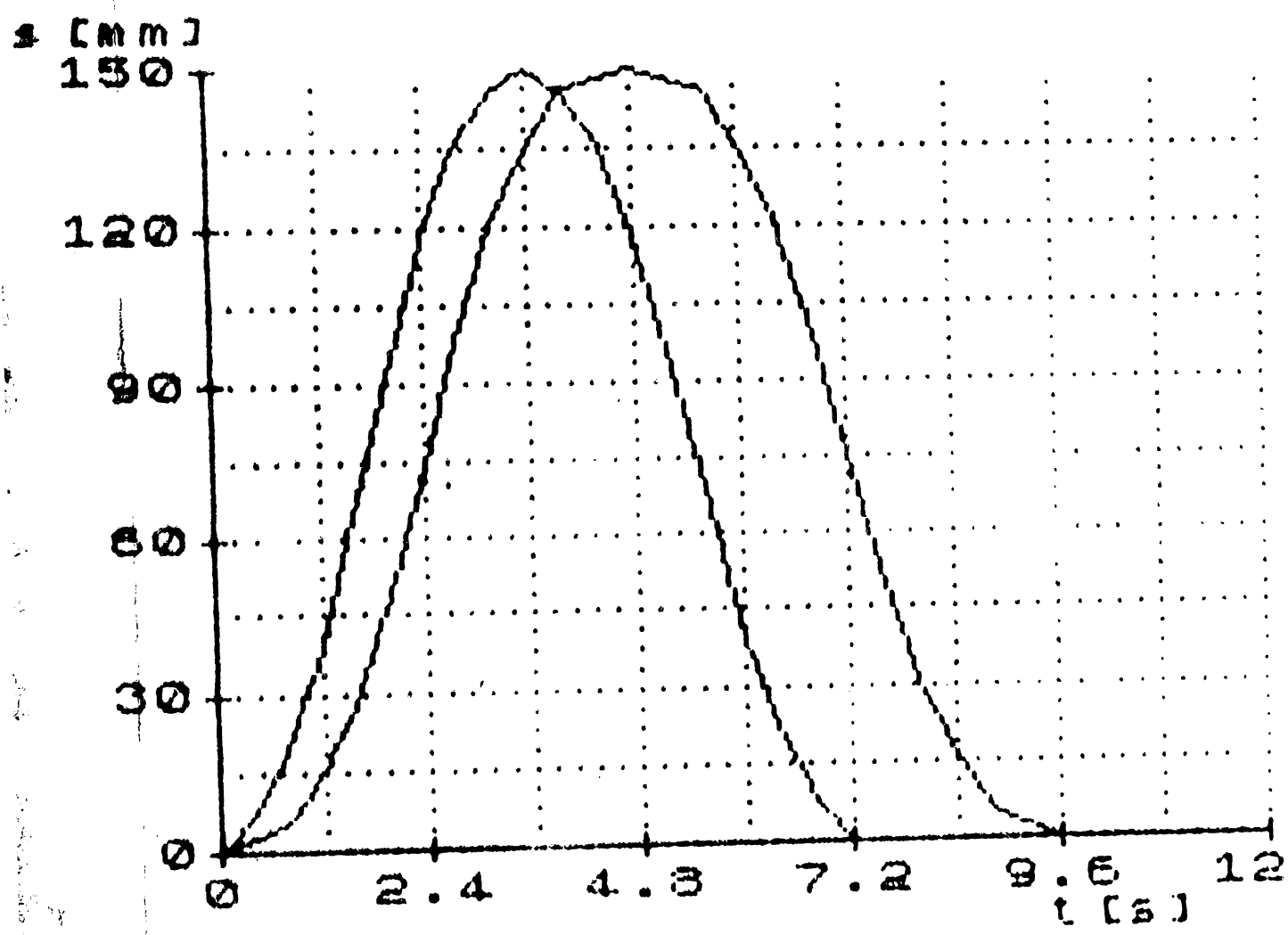


Fig.7.25

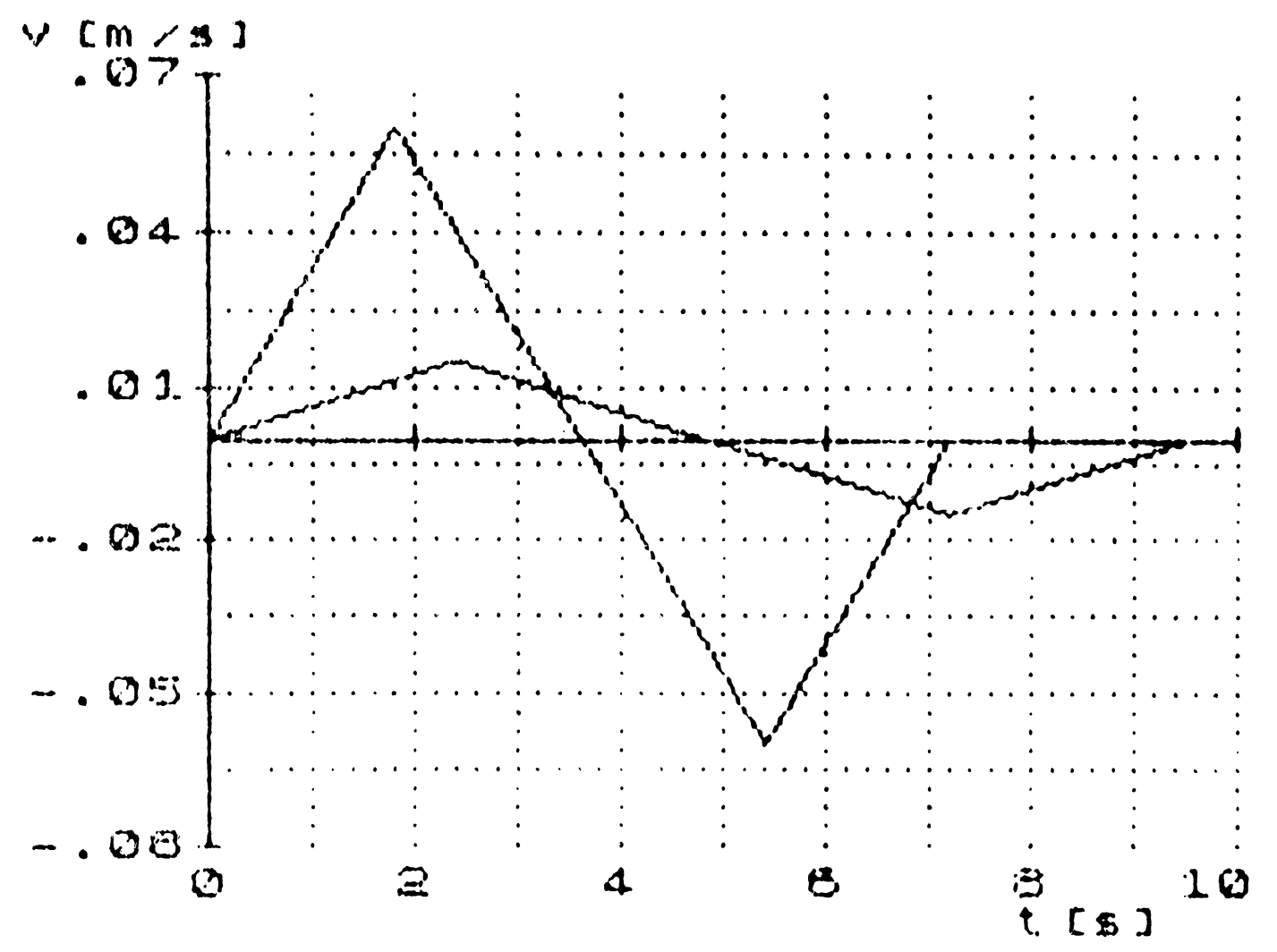


Fig.7.26

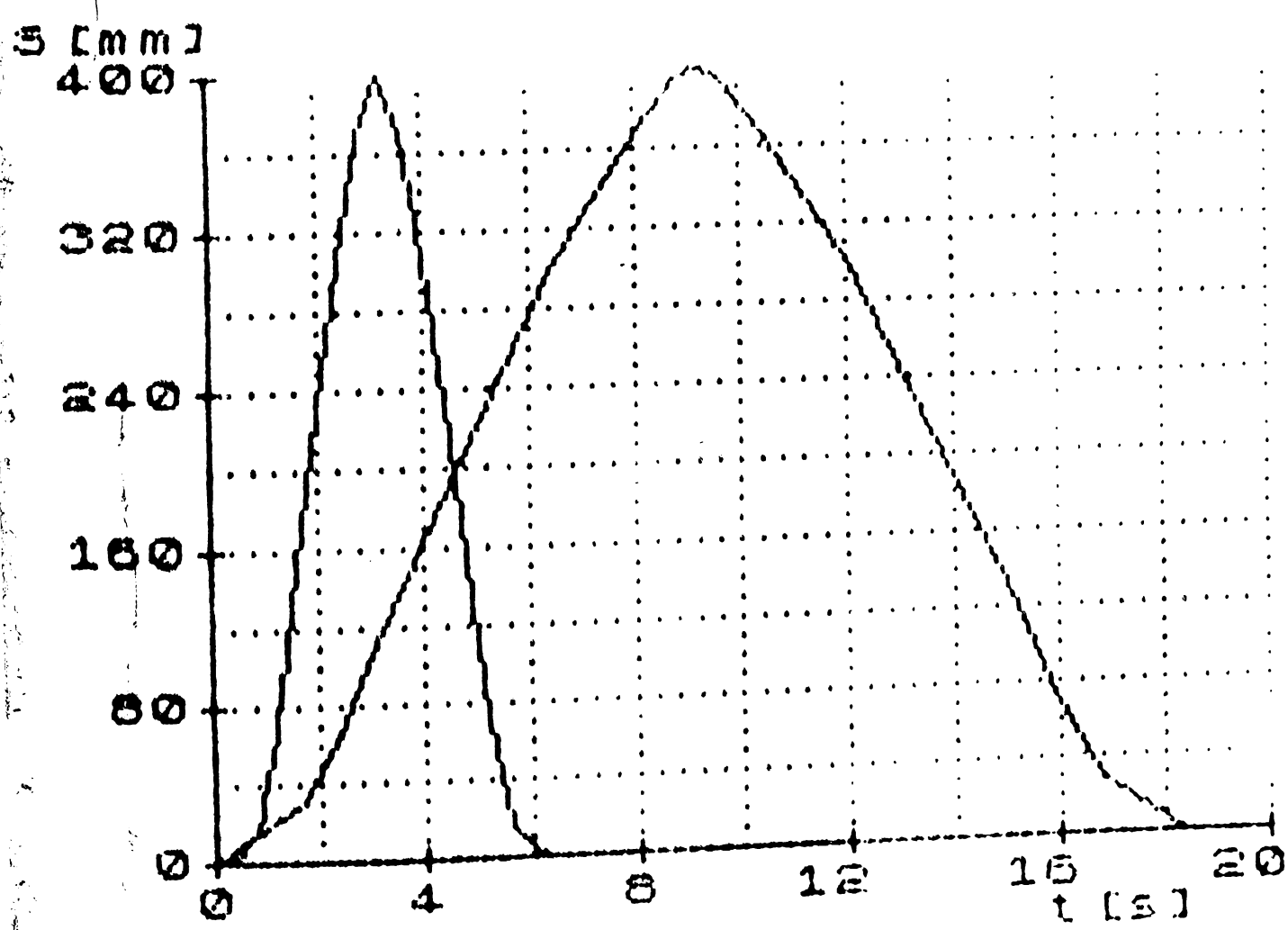


Fig.7.27

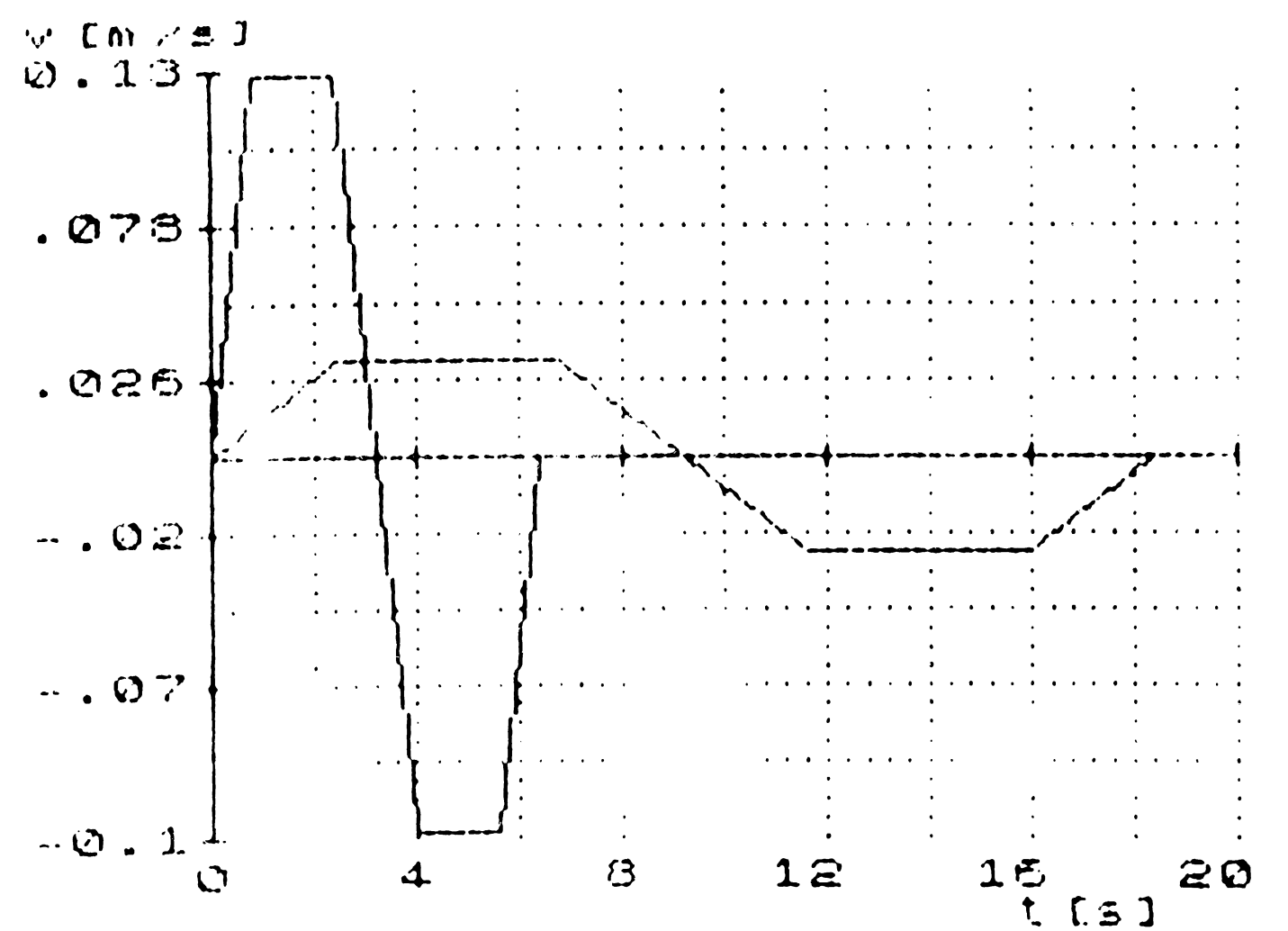
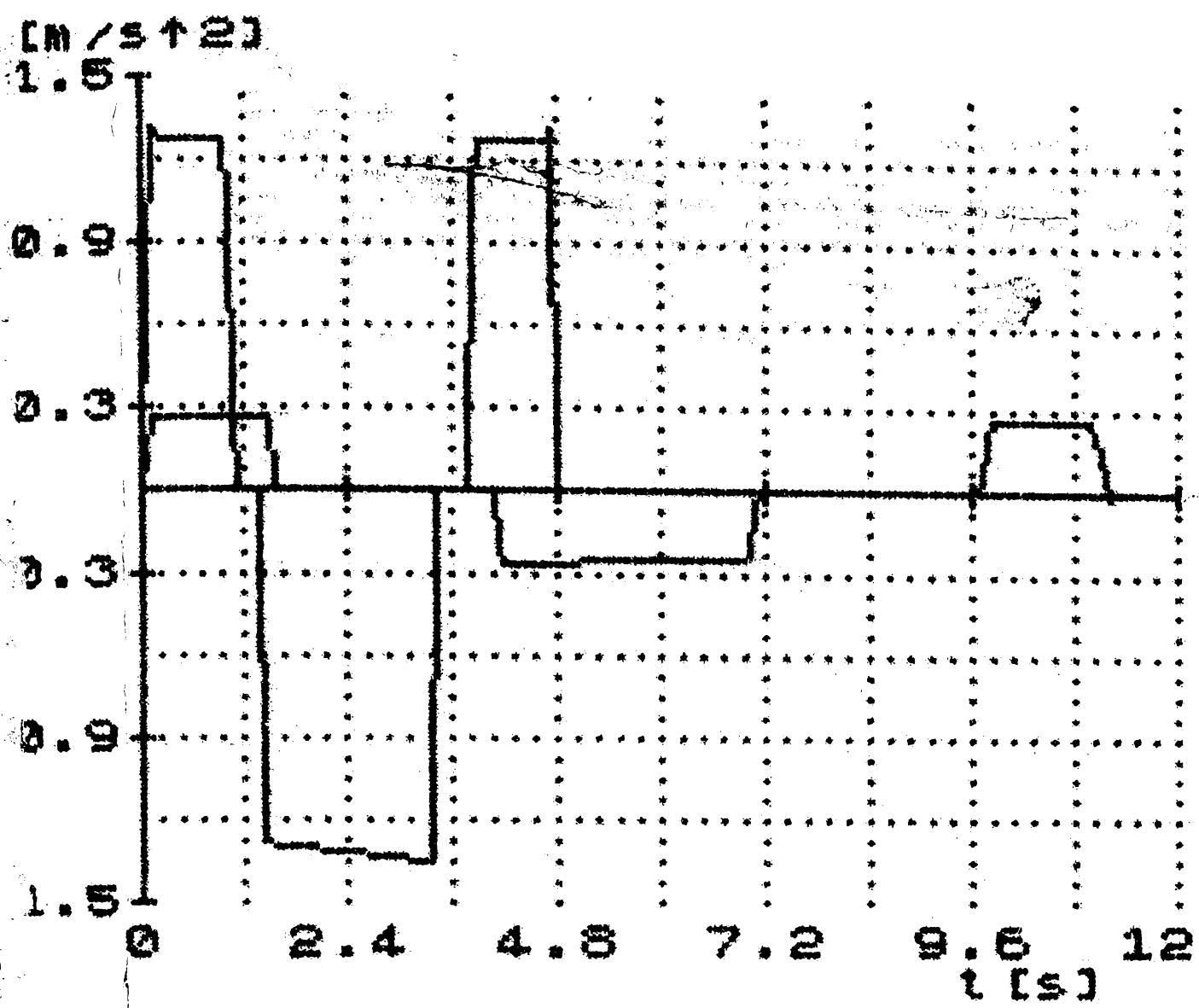


Fig.7.28



bratul extins la cursa maxima

Fig.7.29

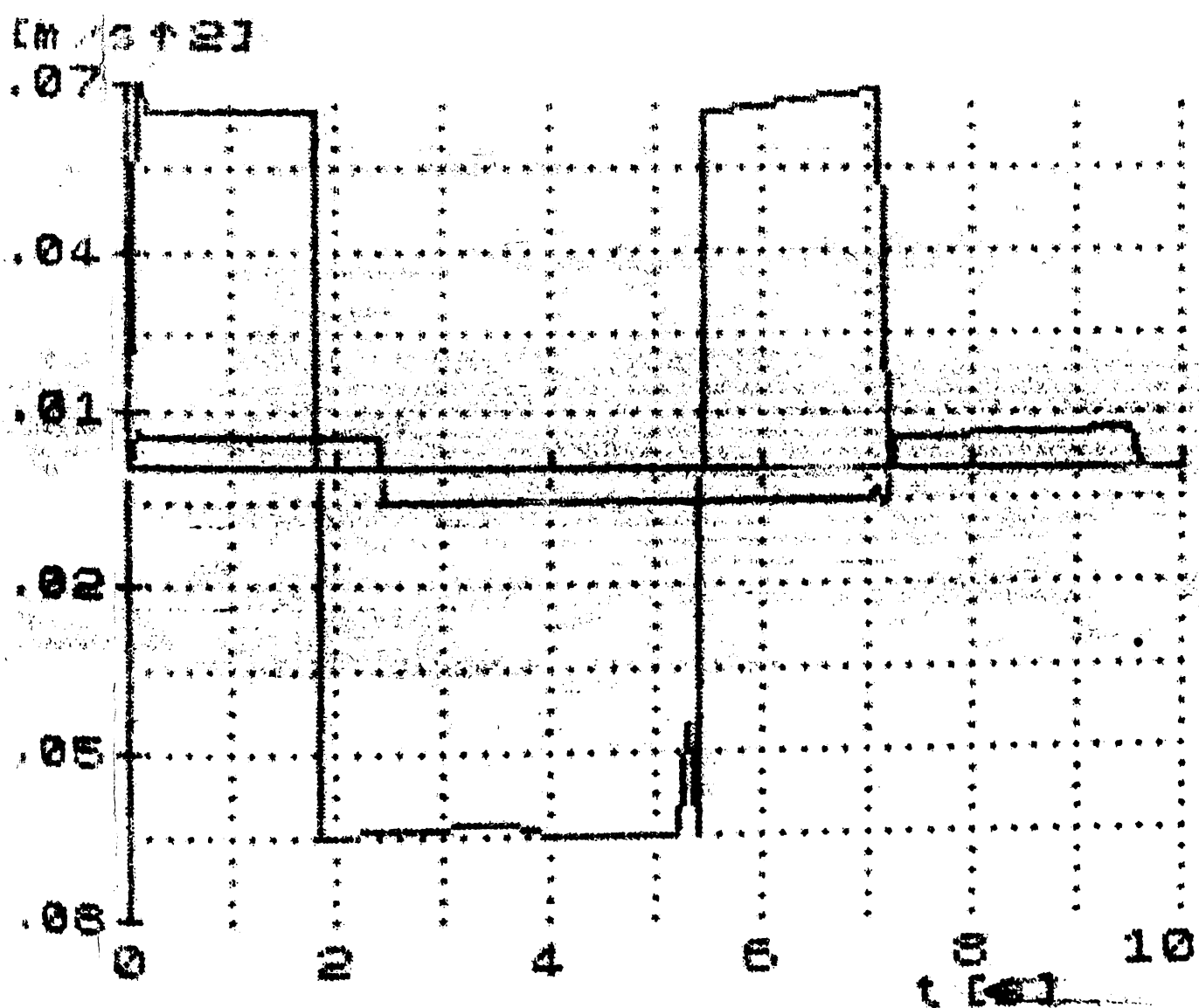


Fig.7.30

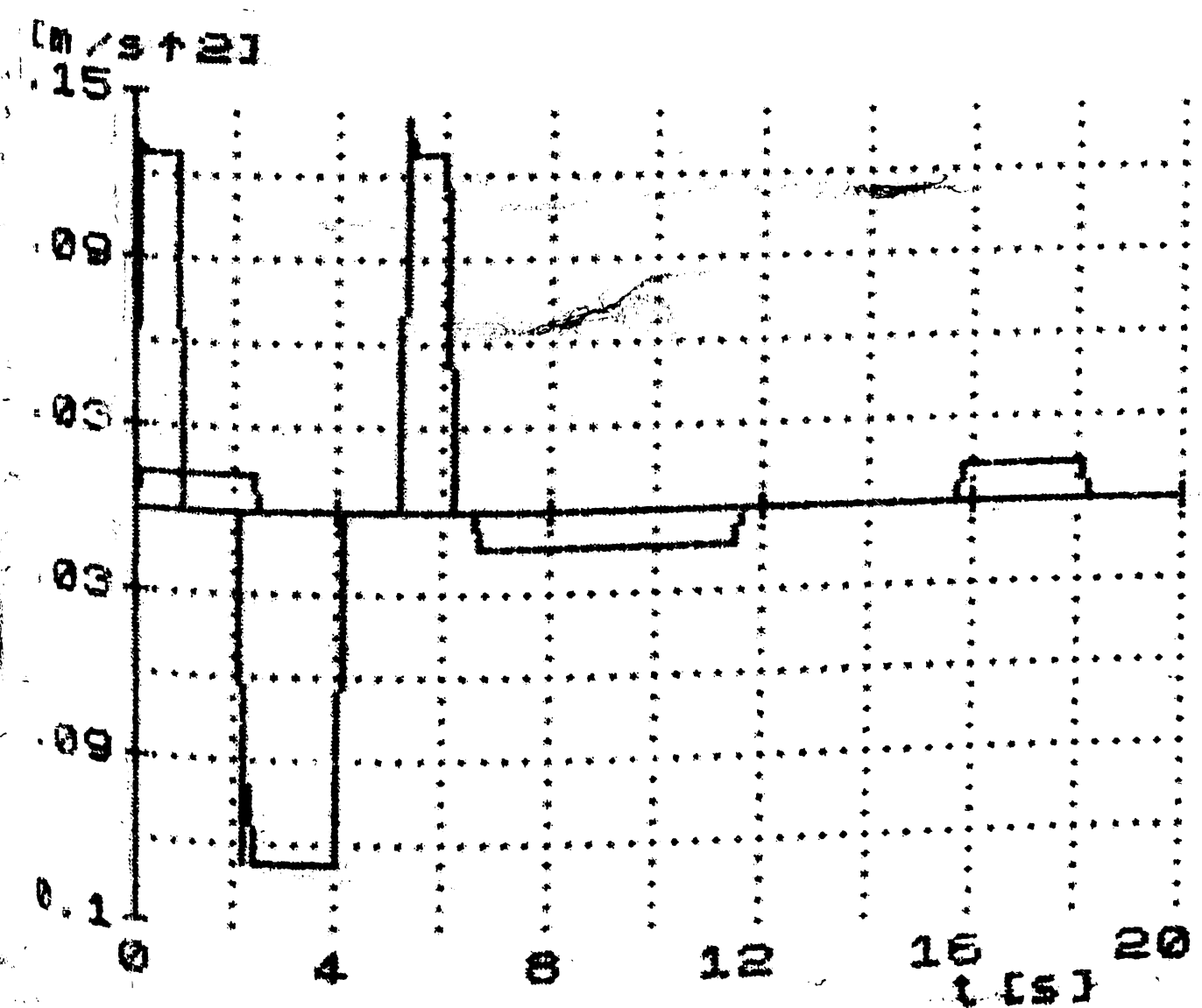


Fig.7.31

Analizând diagramele de variație ale funcțiilor de comandă, se poate concluziona :

- valorile maxime ale vitezelor, pentru toate regimurile de funcționare, nu diferă cu mai mult de aproximativ 10% față de valoarea proiectată. Abaterea maximă se remarcă pentru modulul de rotație (1,50 rad/s față de 1,57 rad/s impus prin proiect) ;

- valoarea maximă a accelerației (0,15 m/s^2) se produce la viteza maximă în lungul brațului robotului (modul braț 3) ;

- la toate regimurile de funcționare apar oscilații ale valorilor accelerațiilor, care se datoresc lipsei de rigiditate a unor componente, precum și a jocurilor neanulate din cuplele cinematice.

7.6. Determinarea caracteristicilor dinamice

Caracteristicile dinamice au fost determinate și înregistrate prin calculatorul robotului, utilizând instalația prezentată în paragraful 7.3.2. Măsurările au fost efectuate pentru regimurile de funcționare ale robotului, prezentate în tabelul 7.2.

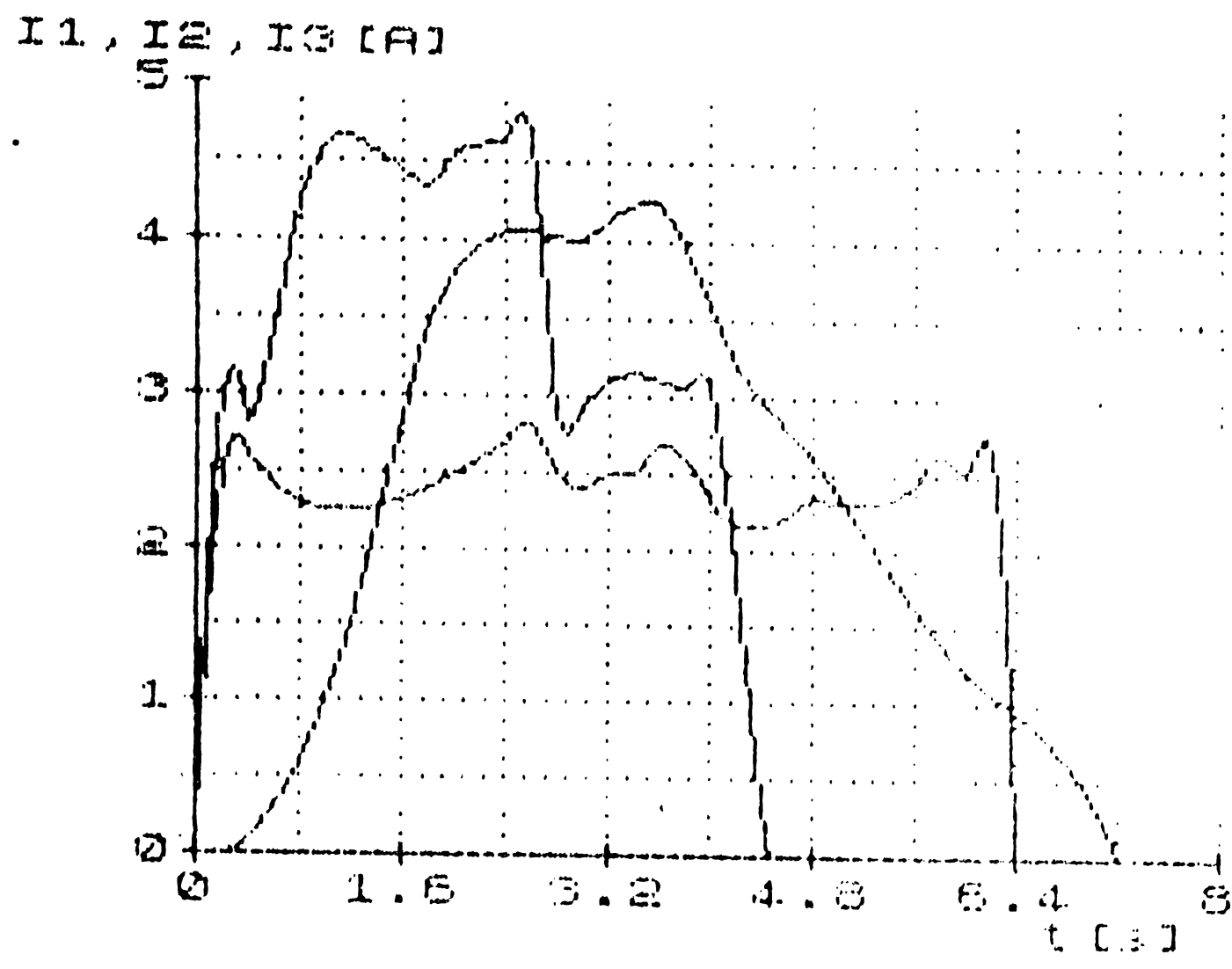


Fig.7.32

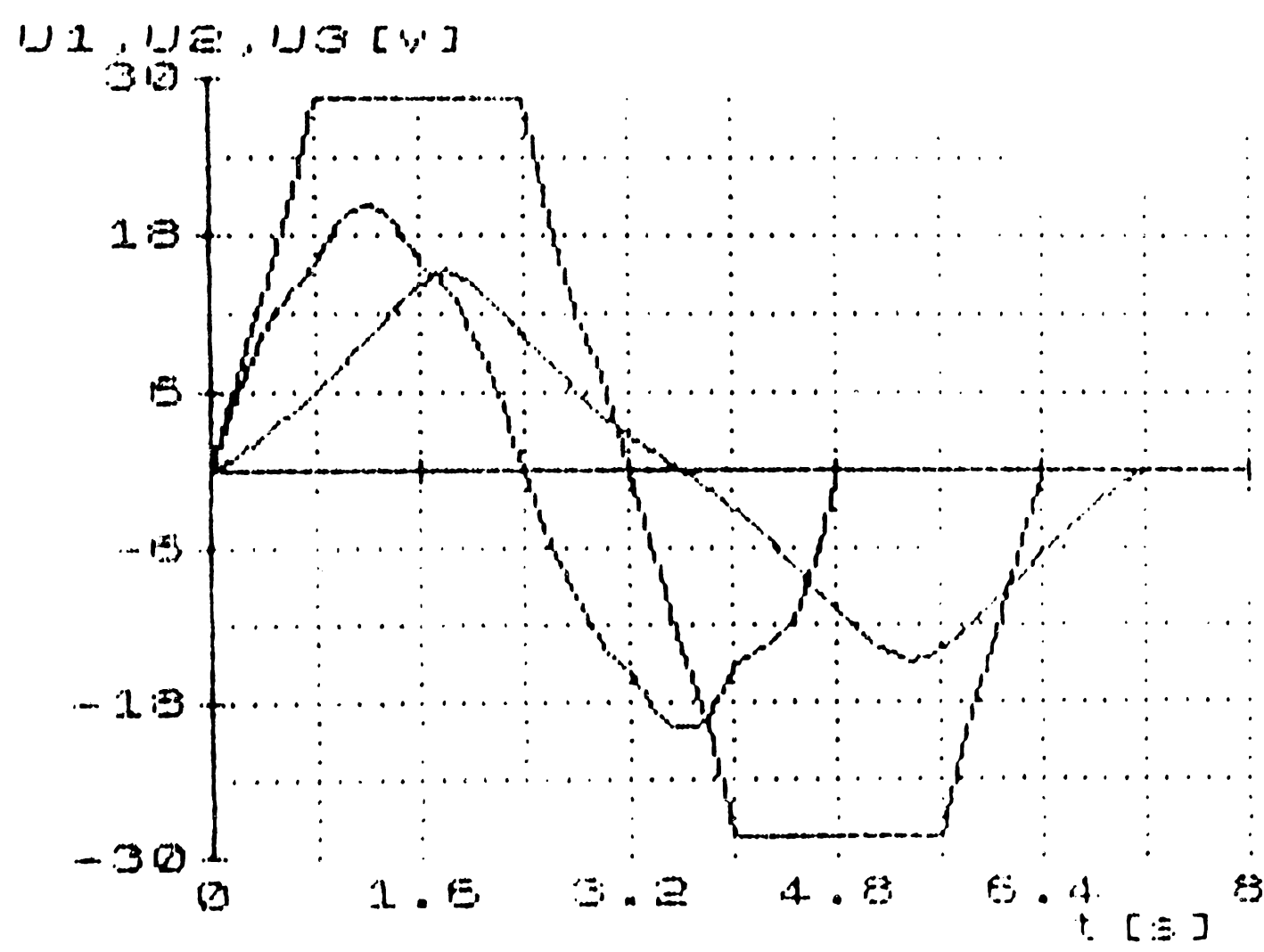


Fig.7.33

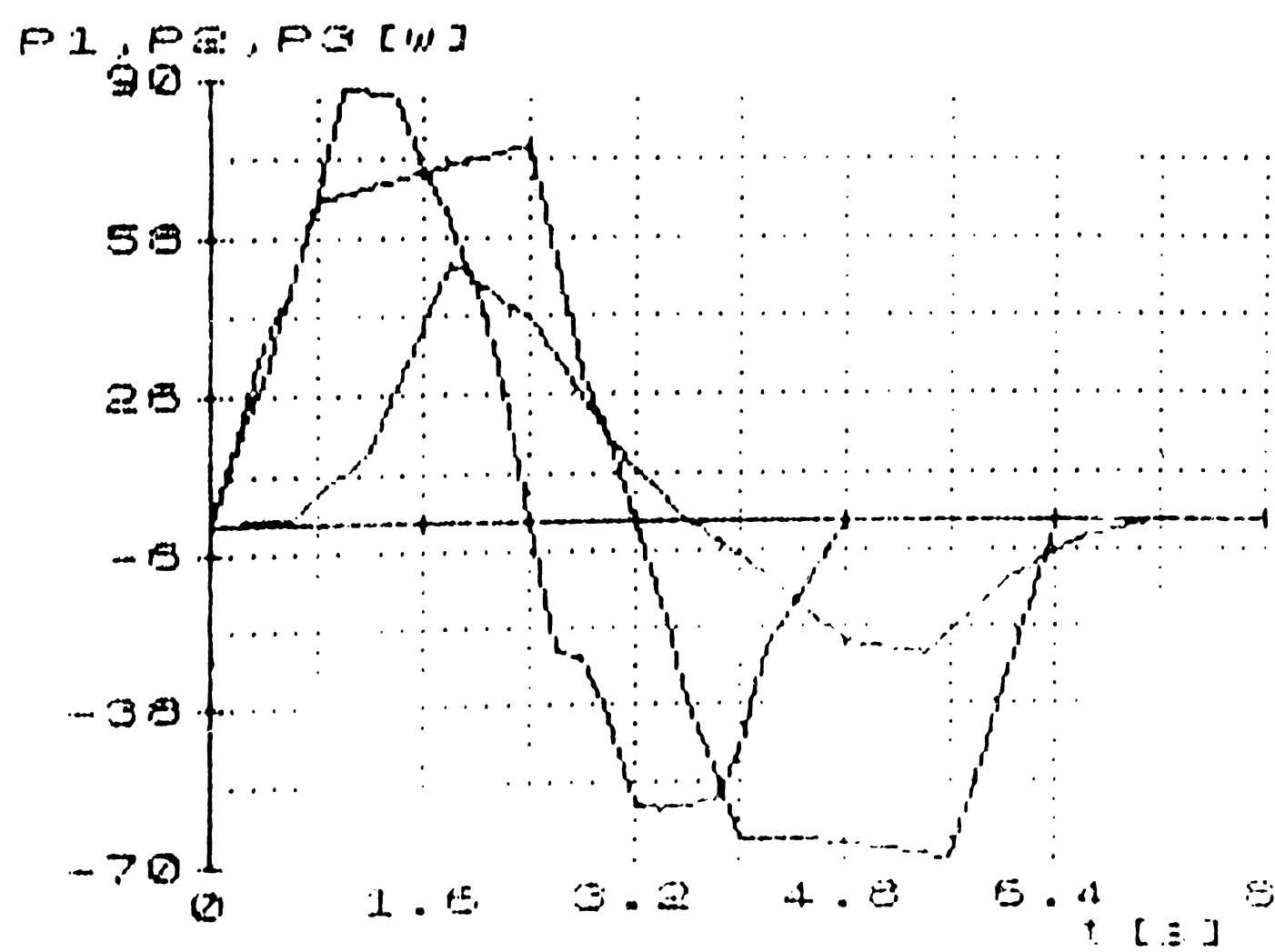


Fig.7.34

Din ansamblul acestor măsurări, în figura 7.32 + 7.34 se prezintă diagramele de variație ale tensiunilor la bornele motoarelor de antrenare, intensitățile curenților și prin wattmetrul sistemului de comandă puterea consumată la nivelul fiecărui modul al M.G.T.

Analizând valorile acestor parametri, se poate concluziona că, din punct de vedere dinamic, robotul se comportă normal. La sollicitări maxime ($S.U = 62,5 \text{ N}$, la cursă maximă pe brațul 3 și viteza maximă în toate cele trei module) nu s-a depășit valoarea admisibilă a puterii motoarelor de antrenare.

7.7. Aplicații industriale

7.7.1. Robotul industrial REMT-1. Modul - translație de bază

Robotul industrial REMT-1 (fig.7.35) a fost proiectat în

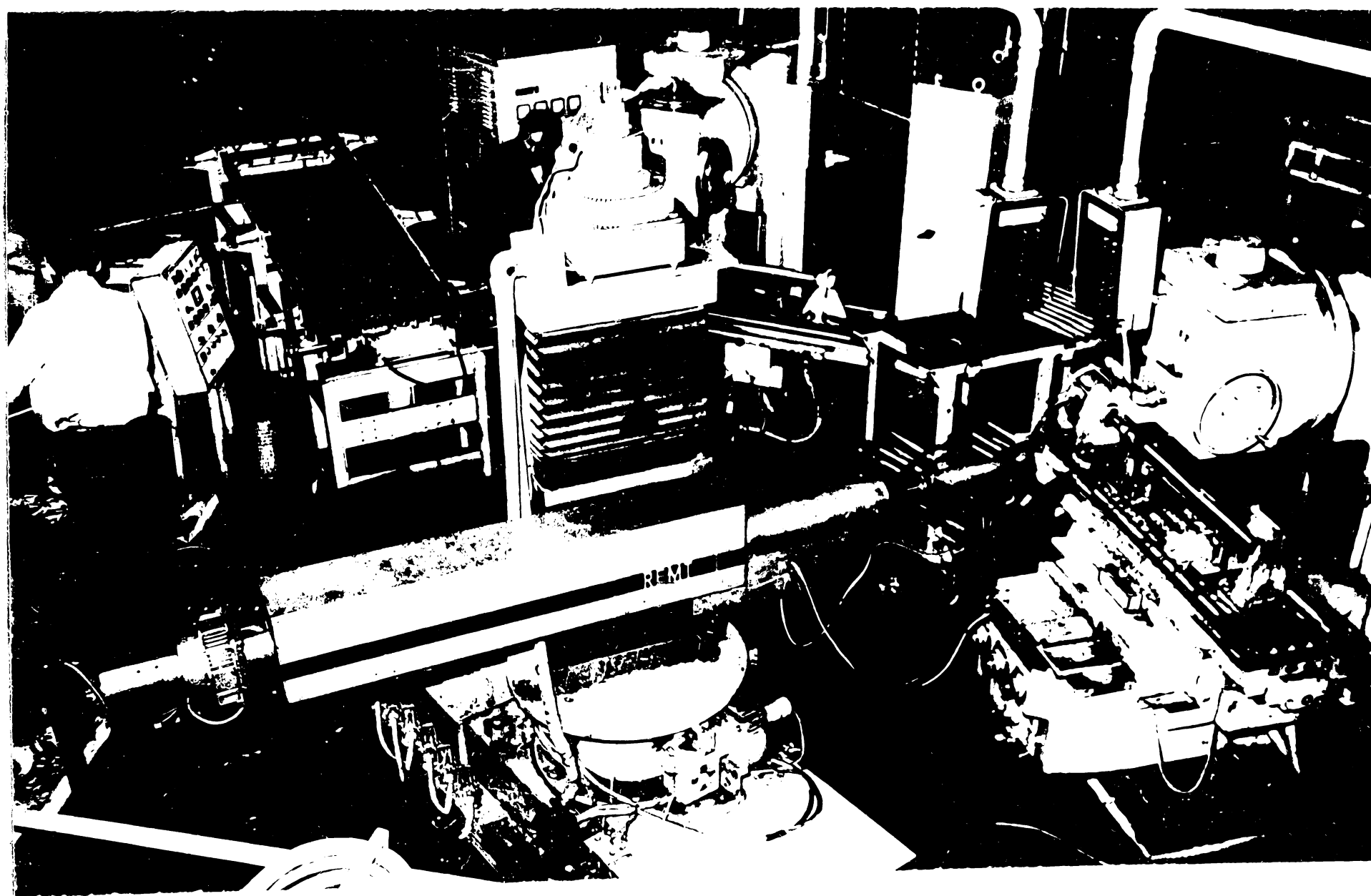


Fig.7.35

cașrul Colectivului interdisciplinar de roboți industriali din U.P.T.V.Timișoara, colectiv din care face parte și autorul, și este executat la Întreprinderea "Electromotor" Timișoara, unde a fost implementat în prima aplicație industrială și anume într-o celulă flexibilă de prelucrat arbori pentru motoarele electrice.

Mecanismul generator de traiectorie (M.G.T.) al robotului este de tipul TRTP, având deci patru grade de mobilitate.

În cașrul proiectului, autorului i-a revenit sarcina proiectării modului de translație de bază, ce constituie materialul

zarea primei cuple cinematice a R.T.T. Schema de principiu a acestuia este prezentată în figura 7.36.

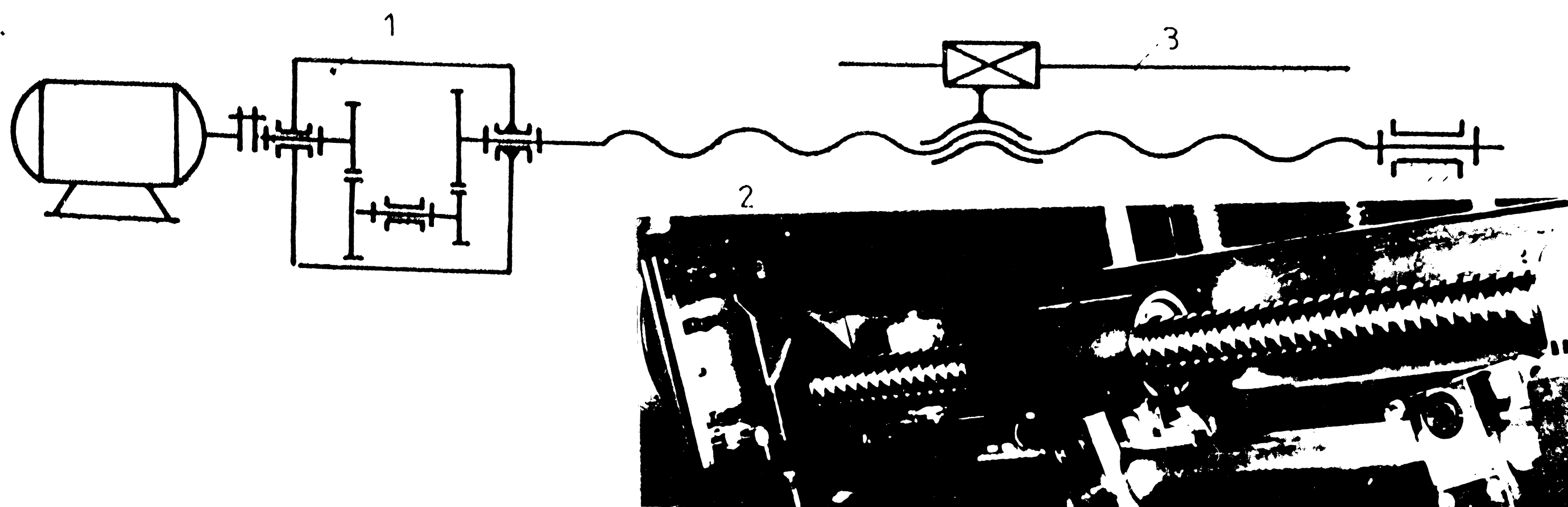


Fig. 7.36

Elementul mobil translatează pe două coloane-ghidaj tubulare, orizontale, cu suprafața călită prin CIF. Ansamblul de ghidare este prevăzut cu sistem de preluare a jocurilor, prin deplasarea excentrică a bușelor de ghidare.

Deplasarea elementului mobil este asigurată de către un grup motoreductor prin intermediul unui șurub cu bile.

Cursa liniară a acestui modul este de 1600 mm, iar viteza de deplasare este de 0,25 m/s.

Robotul industrial R&M-1 este primul robot din țară implementat într-o aplicație industrială. Datorită acestui fapt, colectivului interdisciplinar Roboți industriali, deci și autorului, i-a fost decernat Premiul "Traian Vuia" al Academiei R.S.R. pe anul 1982.

7.7.2. Robot (reciprocator) de vopsire vapoare

Procesul de vopsire reprezintă operația cu cea mai mare pondere în finisarea produselor în toate ramurile industriale. În acest context, în industria constructoare de mașini, asemenea operații ocupă un mare număr de operatori umani. Munca vopsitorilor manuali este o operație grea, atât din cauza mișcărilor de mare amplitudine și a pozițiilor incomode, cât și din cauza noxelor toxice din atmosfera unde lucrează.

Cele de mai sus explică preocupările pentru automatizarea operațiilor de vopsire.

După estimările din literatură, proporția suprafețelor plane în ansamblul suprafețelor produselor de vopsit este în jur de 60%.

Din automatizare a acestui proces conduce la o creștere, atât a productivității muncii, în calitate - prin depunerea unor pelicule uniforme de vopsea - cât și la îmbunătățirea condițiilor de muncă a muncitorilor implicați.

Instalații de tip robot, care să automatizeze un asemenea proces, au sarcina de a deplasa unul sau mai multe capete active (pistoale de vopsire) într-un plan, cu viteze prestabilite, funcție de grosimea peliculei depuse. În literatură instalațiile de acest tip sînt cunoscute și sub denumirea de "reciprocator".

Reciprocatorul de vopsire prezentat în continuare a fost proiectat și executat în vederea acoperirii cu pelicule de vopsea a unor suprafețe plane mari, care constituie părțile exterioare ale vagoanelor de marfă și călători.

Reciprocatorul de vopsire se compune din următoarele părți :

- mecanism generator de traiectorie (M.G.T.) compus din modulul de translație verticală și modulul de translație orizontală ;
- sistem de comandă.

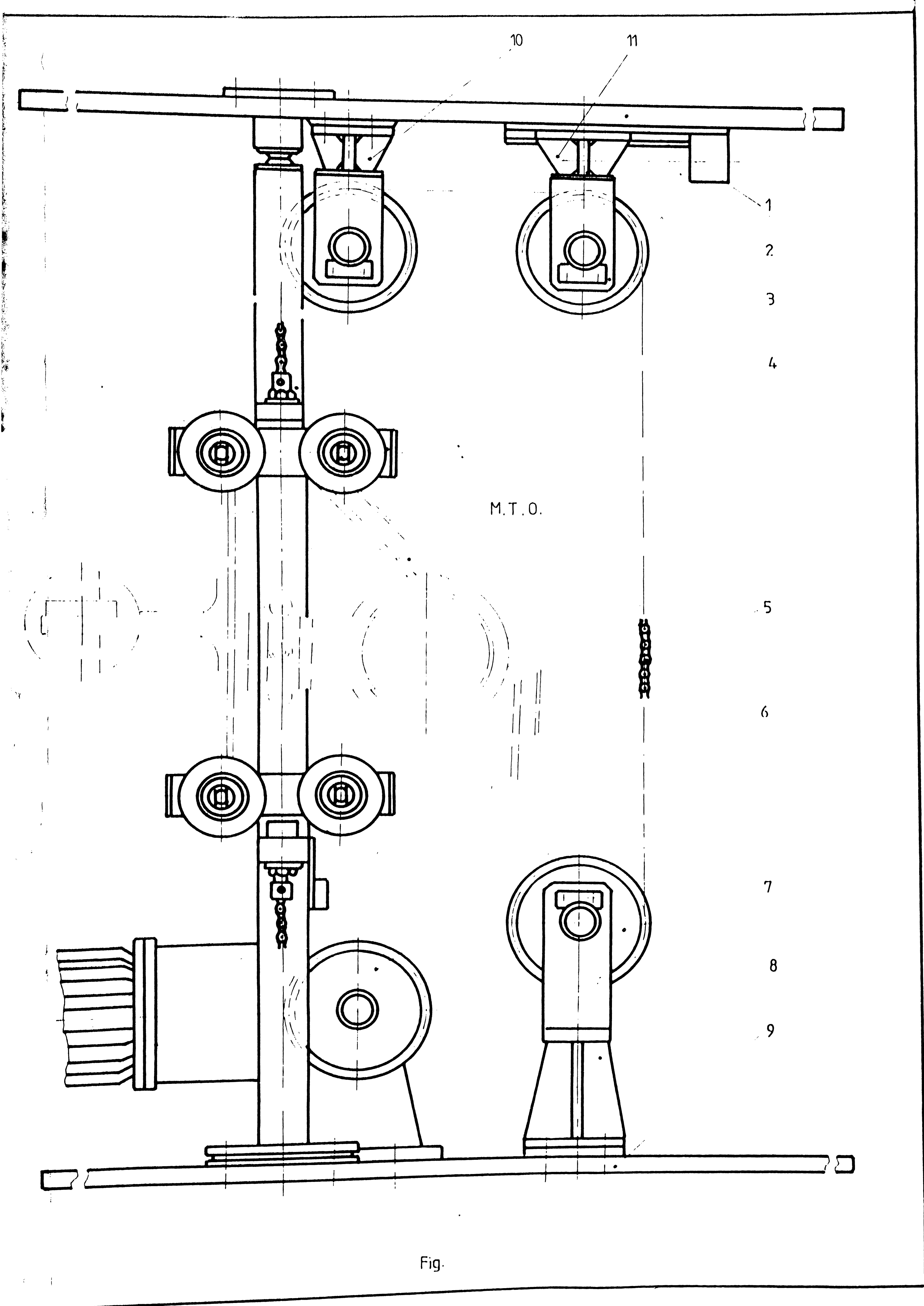
Modulul de translație verticală (fig.7.37) are structura de rezistență compusă din două coloane verticale (poz.3) confecționate din țevă calibrată, coloane ce constituie și calea de rulare pentru căruciorul (poz.4) purtător al modulului de translație orizontală. Coloanele de ghidare (poz.3) sînt fixate demontabil pe două plăci (poz.1 și 9), plăci ce se fixează pe structura de rezistență a unei cabine portreciprocator ce rulează în lungul vagonului.

Sistemul de acționare (poz.6) al modulului este compus din motor electric - reductor - cuplaj și frînă electromagnetice.

De la sistemul de acționare, prin intermediul a două ramuri de lanț Gall (poz.5) se asigură deplasarea căruciorului de verticală și odată cu el modulul de translație orizontală.

Reciprocatorul a fost executat în două variante. Prima, cu coloane de ghidare drepte, pentru acoperirea suprafețelor laterale ale vagoanelor și a doua cu coloane de ghidare în arc de cerc pentru acoperirea suprafețelor cilindrice (vagon sisternă, acoperiș de vagon etc.)

Modulul de translație orizontală (fig.7.38), realizează



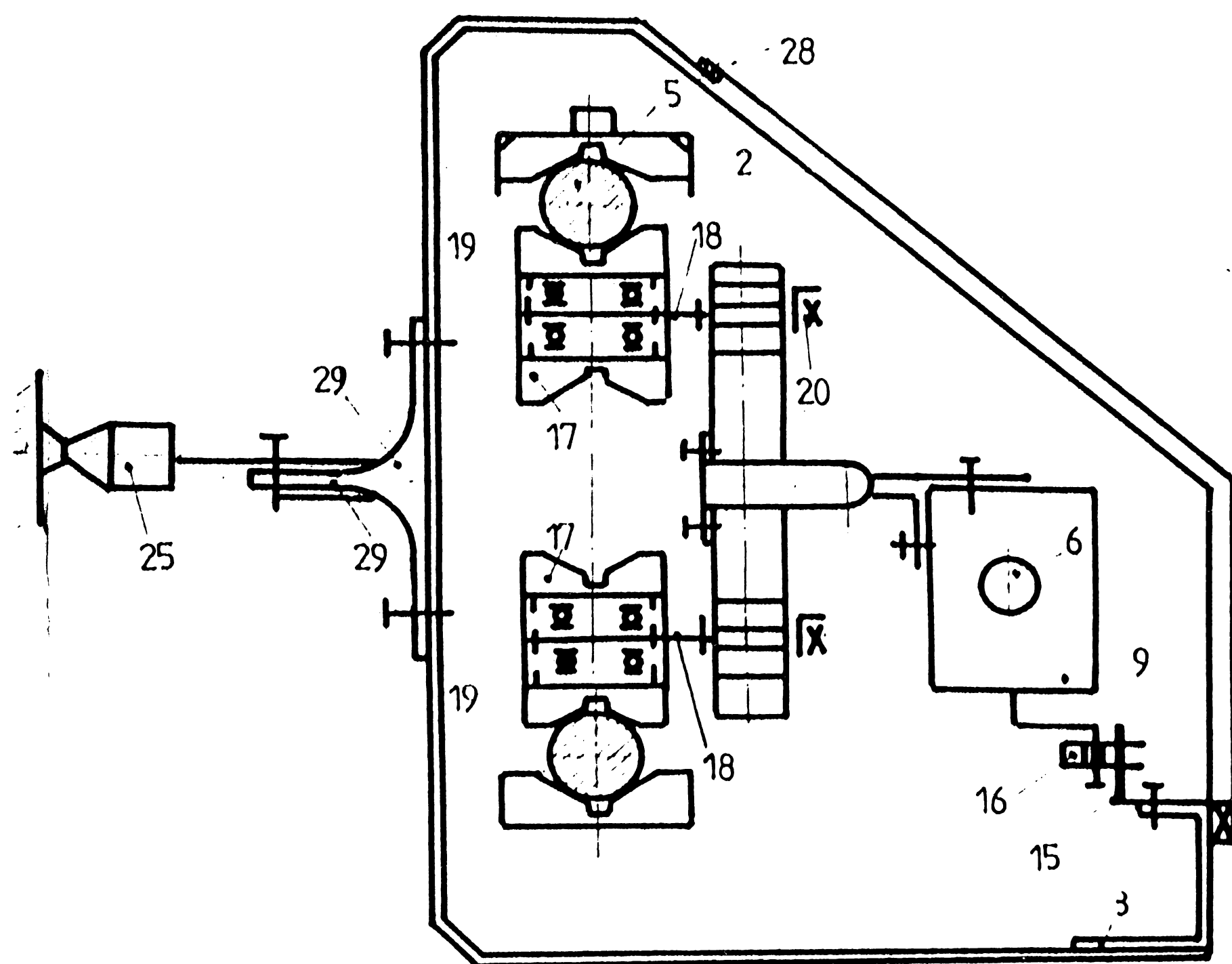


Fig.7.38

variarea vitezei de deplasare, precum și reversarea mișcării la capăt de cursă.

Mecanismul reversibil este protejat de o carcasă (poz.27) prin intermediul căreia se și fixează de căruciorul modulului precedent.

Sistemul de comandă este asigurat de un automat de programare; cu ajutorul căruia se asigură coordonarea regimurilor de viteză, asigurarea alimentării cu vopsea și funcționarea sistemelor de protecție.

7.7.3. Proteză a membrului superior uman

Proteza membrului superior uman prezentată (fig.7.39), constituie obiectul brevetului de invenție nr.95377 al autorului.

Degetele protezei (poz.1 și 2) sînt rigide, acționate concomitent prin intermediul pieselor (poz.3 și 4). Piesa (poz.3) articulată pe gîtul mîinii este acționată printr-un sistem șurub - piuliță de către un micromotoreductor (poz.7). Operația de închidere a degetelor, respectiv de prinderea unui obiect și operația de deschidere sau desprindere se realizează prin reversarea mișcării la micromotorul de acționare. Intreg ansamblul protezei, mai precis structura mecanică este îmbrăcată într-o mănușă estetică din material plastic de forma mîinii naturale.

deplasarea pistoalelor de vopsea pe orizontală.

Deplasarea acestora se realizează cu ajutorul unui mecanism reversibil (poz.20). Acesta este un mecanism de tip cuplă elicoidală cu frecare, la care rolul piuliței este preluat de 3 rulmenți radiali cu bile. Prin poziționarea corespunzătoare a acestora se asigură

De remarcat că doar două din degete (poz.1) sînt acționate ultimele fiind modelate de mînușă estetică. Degetele sînt echipa-

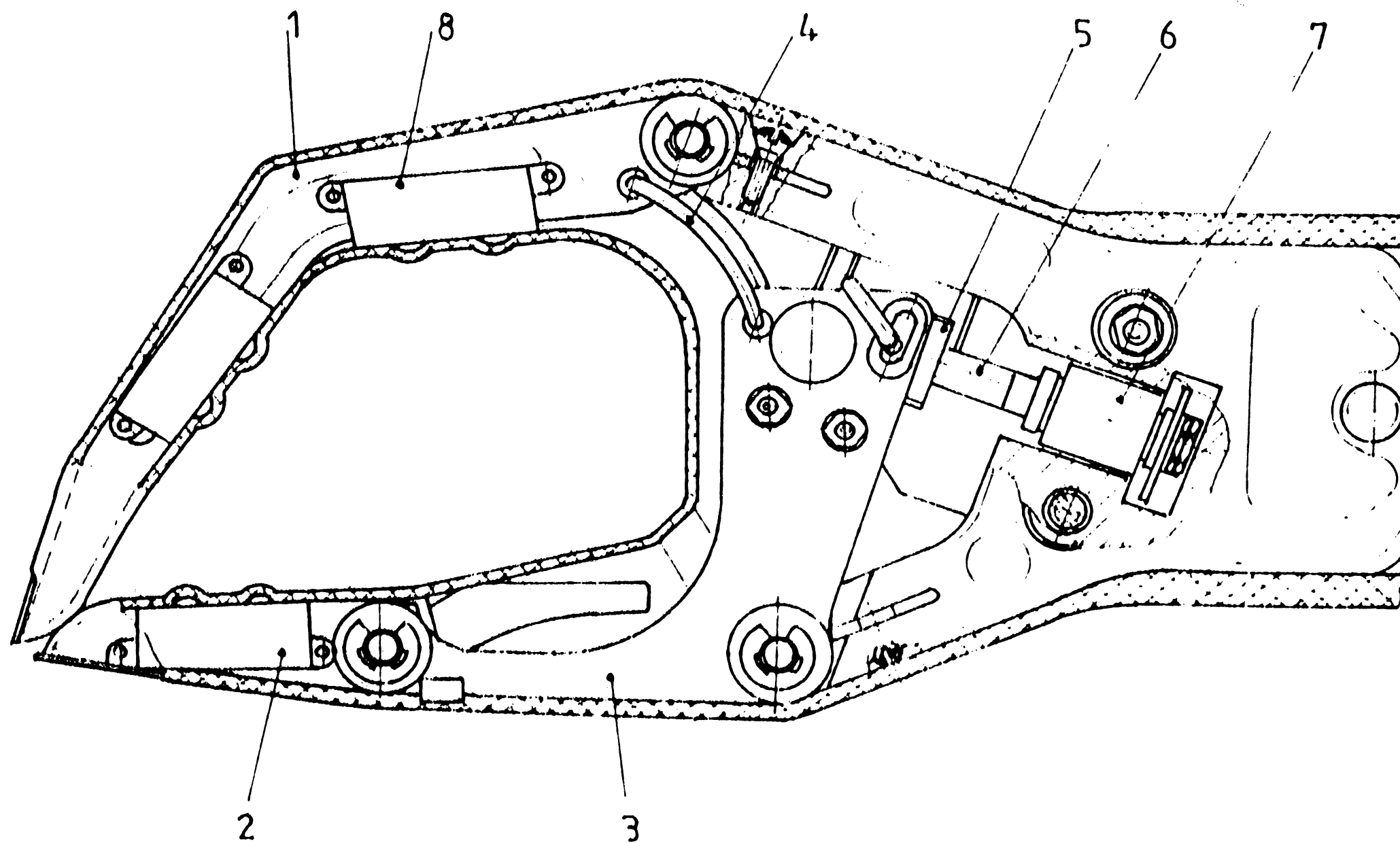


Fig.7.39

te cu senzori de forță (poz.3) de construcție specială, amplasați cu scopul limitării forței de strîngere (a presiunii superficiale de strîngere) la valori prescrise. Circuitul electronic de prelucrare a semnalelor primite de la sistemul senzorial este amplasat împreună cu sistemul de alimentare în corpul protezei (anteprăț).

Proteza a fost realizată în cadrul Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara. Determinările experimentale au fost efectuate de autor în cadrul Laboratorului de aparatură biomedicală a IPTVT.


```

LS 5 BORDER 0: PAPER 0: INK 7: C
10 GO SUB 4000
15 GO SUB 4055
20 GO SUB 4100
25 PRINT AT 6,21;"MODUL ROT.";
AT 8,22;"T=";: INPUT T1: PRINT
T1
27 PRINT AT 10,21;"T1=";: INF
UT T11: PRINT T11
29 PRINT AT 12,21;"T2=";: INF
UT T12: PRINT T12
31 PRINT AT 14,22;"V=";: INPU
T V1: PRINT V1
33 LET A1=V1/T11: PRINT AT 16,
22;"A=";:A1
35 IF T11>T12 OR T11>T1 OR T12
>T1 THEN PRINT AT 18,20;"DATE GR
ESITE!"; GO SUB 9900: GO TO 20
37 GO SUB 9900
40 GO SUB 4100
45 PRINT AT 6,21;"MODUL COL.";
AT 8,22;"T=";: INPUT T2: PRINT
T2
47 PRINT AT 10,21;"T1=";: INF
UT T21: PRINT T21
49 PRINT AT 12,21;"T2=";: INF
UT T22: PRINT T22
51 PRINT AT 14,22;"V=";: INPU
T V2: PRINT V2
53 LET A2=V2/T21: PRINT AT 16,
22;"A=";:A2
55 IF T21>T22 OR T21>T2 OR T22
>T2 THEN PRINT AT 18,20;"DATE GR
ESITE!"; GO SUB 9900: GO TO 40
57 GO SUB 9900
60 GO SUB 4100
65 PRINT AT 6,21;"MODUL BRAT";
AT 8,22;"T=";: INPUT T3: PRINT
T3
67 PRINT AT 10,21;"T1=";: INF
UT T31: PRINT T31
69 PRINT AT 12,21;"T2=";: INF
UT T32: PRINT T32
71 PRINT AT 14,22;"V=";: INPU
T V3: PRINT V3
73 LET A3=V3/T31: PRINT AT 16,
22;"A=";:A3
75 IF T31>T32 OR T31>T3 OR T32
>T3 THEN PRINT AT 18,20;"DATE GR
ESITE!"; GO SUB 9900: GO TO 60
77 GO SUB 9900
80 GO SUB 4065
85 GO SUB 4200
90 GO SUB 4600
95 LET GR=2.81
100 REM *BLOCUL DE CALCUL*
110 DIM A(4,4): DIM B(4,4): DIM
R(4,4)
120 GO SUB 5000
125 GO SUB 9900
140 PRINT AT 2,0;"REZULTATE:"
145 PRINT AT 4,5;"FX=";:O;AT 6,
5;"FY=";:O;AT 8,5;"FZ=";:FZ1;" N"
150 GO SUB 9900
154 PRINT AT 2,0;"PENTRU MZ AVE
M O VAL. CONST. PE PORT. DE ACC.
: MZ=";:INT MZA;" Nmm"
155 PRINT AT 5,0;" MZ ESTE O PE
NTRU";AT 6,3;"t=";:T11;" ";T12;
"3"
156 PRINT AT 8,0;"PENTRU MZ AVE
M O VAL. CONST. PE PORT. DE FR.
: MZ=";:INT MZF;" Nmm"
160 GO SUB 9900: PRINT AT 2,0;"
MX SI MY AU ALURA:"; GO SUB 9900
165 PRINT AT 9,13;"PENTRU MX:";
GO SUB 9900
170 LET P=1: GO SUB 8000
175 GO SUB 9900: PRINT AT 8,8;"
MY DE FORMA:"; GO SUB 9900: LET
P=2: GO SUB 8000
180 GO SUB 9900
200 REM *MODUL COLOANE*

```

```

210 DIM A(4,4): DIM B(4,4): DIM
R(4,4)
220 GO SUB 6000
225 GO SUB 9900
240 PRINT AT 2,0;"REZULTATE:"
245 PRINT AT 4,5;"FX=";:O;AT 6,
5;"FY=";:O;AT 8,5;"FZ=";:FZA;" N"
t=";:O;" ";T21;"3"
246 PRINT AT 11,5;"FZ=";:FZC;"
N t=";:T21;" ";T22;"3"
247 PRINT AT 13,5;"FZ=";:FZF;"
N t=";:T22;" ";T2;"3"
250 GO SUB 9900
255 PRINT AT 2,0;"PENTRU MZ AVE
M O VAL. CONST. :";AT 3,5;"MZ="
";Mz;" Nmm"
260 GO SUB 9900: PRINT AT 2,0;"
MX SI MY SINT CONSTANTE:"; GO SU
B 9900
265 PRINT AT 9,13;" MX = ";MX:A
T 11,13;"MY = ";MY: GO SUB 9900
300 REM *MODUL BRAT*
310 DIM A(4,4): DIM B(4,4): DIM
R(4,4)
320 GO SUB 7000
325 GO SUB 9900
340 PRINT AT 2,0;"REZULTATE:"
345 PRINT AT 4,5;"FX=";:FXA;" N"
;:AT 6,5;"FY=";:FYA;" N";AT 8,5;"
";t=";:O;" ";T31;"3"
346 PRINT AT 8,5;"FZ=";:FZ
347 GO SUB 9900
349 PRINT AT 4,3;"FX=";:O;" N";
AT 6,3;"FY=";:O;" N";AT 8,13;"t="
";T31;" ";T32;"3"
350 PRINT AT 8,3;"FZ=";:FZ: GO
SUB 9900
351 PRINT AT 4,3;"FX=";:FXF;" N"
;:AT 6,3;"FY=";:FYF;" N";AT 8,13;"
";t=";:T32;" ";T3;"3"
352 PRINT AT 8,3;"FZ=";:FZ: GO
SUB 9900
360 GO SUB 9900: PRINT AT 2,0;"
MX SI MY AU ALURA:"; GO SUB 9900
365 PRINT AT 9,13;"PENTRU MX:";
GO SUB 9900
370 LET P=3: GO SUB 8000
375 GO SUB 9900: PRINT AT 8,8;"
MY ESTE CONSTANT:";AT 10,8;"MY
";MY: GO SUB 9900
376 PRINT AT 2,0;"PENTRU MZ AVE
M O VAL. CONST. :";AT 3,5;"MZ="
";Mz;" Nmm"
377 GO SUB 9900
500 STOP
4000 REM *POZITIA SIST. DE AXE*
4005 PLOT 50,50: DRAW 30,0: PLO
50,50: DRAW 0,30: PLOT 50,50:
RAW -15,-15
4010 PLOT 50,110: DRAW 30,0: PLO
T 50,110: DRAW 0,30: PLOT 50,110
: DRAW -15,-15
4015 PLOT 150,110: DRAW 30,0:
OT 150,110: DRAW 0,30: PLOT 150
110: DRAW -15,-15
4020 PRINT AT 15,6;1;AT 7,6;2;
7,19;3
4025 PRINT AT 2,1;"SISTEMELE DE
AXE LEGATE DE MOD."
4030 PRINT AT 12,11;"1 MODUL RA
ATIE";AT 14,11;"2 MODUL COLOANE
;AT 16,11;"3 MODUL BRAT"
4040 GO SUB 9900
4050 RETURN
4055 REM *INSTRUCTIUNI*
4060 PRINT AT 2,2;"CONSIDERAM
GI DE MISCARE DE FORMA :"; GO
SUB 9900: RETURN
4065 REM *POZ ROBOT*
4067 PRINT AT 2,0;"POZITIA IN
A ROBOTULUI:";AT 4,2;"UNGHIIUL
ETA O=";: INPUT TETA: PRINT T
A: LET TO=TETA*PI/180

```



```

4069 PRINT AT 6,2;"DEPL. PE COLO
ANA Q2= ";; INPUT C: PRINT C
4071 PRINT AT 8,2;"DEPL. PE BRAT
Q3= ";; INPUT B: PRINT B
4077 GO SUB 9900: RETURN
4100 REM *ALURA LEGILOR DE MISC*
4110 PLOT 30,0: DRAW 0,175: PLOT
30,30: DRAW 130,0: PLOT 30,30:
DRAW 130,0: PLOT 30,130: DRAW 13
0,0
4115 PRINT AT 0,4;"DEPLASARE": AT
7,4;"VITEZA": AT 13,4;"ACELERATI
A"
4120 PLOT 30,50: DRAW 20,0: DRAW
0,-20: PLOT 140,30: DRAW 0,-20:
DRAW 20,0: DRAW 0,20
4125 PLOT 30,80: DRAW 20,30: DRA
W 30,0: DRAW 20,-30
4130 PLOT 30,130: DRAW 20,8,PI/9
: DRAW 30,22: DRAW 20,8,-PI/9
4135 PRINT AT 16,6;"T1": AT 17,16
;"T2": AT 17,19;"T": AT 7,11;"V":
4140 PRINT AT 14,6;"A": AT 20,14:
"R": AT 12,19;"t": AT 6,19;"t"
4150 RETURN
4200 REM *CENTRE G *
4210 PRINT AT 2,0;"SE CUNOSC MAS
ELE MODULELOR SI COORD. C: DE
G. FATA DE SIST. PROPRIU:"
4215 PRINT AT 5,3;"MODUL ROTATIE
:"
4220 PRINT AT 7,3;"MASA = ";; IN
PUT M1: PRINT M1
4225 PRINT AT 9,3;"IN SIST 1:"
4230 PRINT AT 11,3;"XG = ";; INP
UT XG1: PRINT XG1
4235 PRINT AT 13,3;"YG = ";; INP
UT YG1: PRINT YG1
4240 PRINT AT 15,3;"ZG = ";; INP
UT ZG1: PRINT ZG1
4245 PRINT AT 21,0;"CORECT?": PA
USE 0: IF INKEY#="N" OR INKEY#="
n" THEN LET I=5: GO SUB 9912: GO
TO 4210
4250 LET I=4: GO SUB 9912
4315 PRINT AT 5,3;"MODUL COLOANE
:"
4320 PRINT AT 7,3;"MASA = ";; IN
PUT M2: PRINT M2
4325 PRINT AT 9,3;"IN SIST 2:"
4330 PRINT AT 11,3;"XG = ";; INP
UT XG2: PRINT XG2
4335 PRINT AT 13,3;"YG = ";; INP
UT YG2: PRINT YG2
4340 PRINT AT 15,3;"ZG = ";; INP
UT ZG2: PRINT ZG2
4345 PRINT AT 21,0;"CORECT?": PA
USE 0: IF INKEY#="N" OR INKEY#="
n" THEN LET I=5: GO SUB 9912: GO
TO 4310
4350 LET I=4: GO SUB 9912
4415 PRINT AT 5,3;"MODUL BRAT:"
4420 PRINT AT 7,3;"MASA = ";; IN
PUT M3: PRINT M3
4425 PRINT AT 9,3;"IN SIST 3:"
4430 PRINT AT 11,3;"XG = ";; INP
UT XG3: PRINT XG3
4435 PRINT AT 13,3;"YG = ";; INP
UT YG3: PRINT YG3
4440 PRINT AT 15,3;"ZG = ";; INP
UT ZG3: PRINT ZG3
4445 PRINT AT 21,0;"CORECT?": PA
USE 0: IF INKEY#="N" OR INKEY#="
n" THEN LET I=5: GO SUB 9912: GO
TO 4410
4450 GO SUB 9900: RETURN
4600 REM *MOMENTE DE INERTIE*
4610 PRINT AT 2,0;"MOMENTELE DE
INERTIE SINT CALCU-LATE PENTRU P
OZITIA INITIALA A ROBOTULUI, FAT
A DE AXA DE ROT."

```

```

4620 PRINT AT 6,2;"J MODUL BRAT=
":: INPUT J3: PRINT J3
4630 PRINT AT 8,2;"J MODUL COL=
":: INPUT J2: PRINT J2
4640 PRINT AT 10,2;"J MODUL ROT=
":: INPUT J1: PRINT J1
4650 GO SUB 9900: RETURN
5000 REM *CALCUL DIN. M. ROT.*
5010 PRINT AT 2,0;"CONSIDERAM MI
SCAREA DE ROTATIE A MODULULUI, B
RATUL FIIND LA DIS-TANTA MAXIMA
DE AXA."
5020 PRINT AT 6,0;"PENTRU CICLUL
DE MISCARE, SE CAL-CULEAZA EFECT
UL DINAMIC, CONSIDERIND SOLICITA
RILE STATICE IN E-CHILIBRU CU R
EACT. DIN. CUPLE."
5030 PRINT AT 11,0;"COMPONENTELE
SINT DATE IN SISTE-MUL FIX:"
5040 PRINT AT 19,5;"CALCULEZ"
5050 FOR I=1 TO 4: LET A(I,1)=1:
LET B(I,1)=1
5051 NEXT I
5052 RESTORE 5054: DIM X(4,4): D
IM Y(4,3): DIM Z(4,2)
5053 FOR I=1 TO 4: READ X(I,4):
READ Y(I,3): READ Z(I,2): NEXT I
5054 DATA XG3, XG2, XG1, YG3, YG2, YG
1, ZG3, ZG2, ZG1, 1, 1, 1
5055 LET Q3=B+V3*T32: LET A(2,4)
=Q3
5056 LET Q2=C: LET B(3,4)=Q2
5057 LET R(3,3)=1: LET R(4,4)=1
5100 LET MZA=(J1+J2+J3+M3*(ABS V
3*T32)^2)*V1/T11
5101 LET MZC=C
5102 LET MZF=- (J1+J2+J3+M3*(ABS
V3*T32)^2)*V1/T11
5110 LET FZ1=- (M1+M2+M3)*GR
5120 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
5125 LET X(I,3)=X(I,3)+A(I,J)*X(
J,4): NEXT J: NEXT I
5130 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
5135 LET X(I,2)=X(I,2)+B(I,J)*X(
J,3)
5137 LET Y(I,2)=Y(I,2)+B(I,J)*Y(
J,3)
5140 NEXT J: NEXT I
5150 DIM D(202,3)
5151 LET D=1
5200 FOR K=0 TO T1 STEP T1/100
5210 IF KK=T11 THEN LET T=T0+V1*
K/2
5220 IF KK=T11 AND KK=T12 THEN LE
T T=T0+V1*(K-T11)/2
5230 IF KK=T12 AND KK=T1 THEN LET
T=T0+V1*(K+T12-T11)/2
5240 LET R(1,1)=COS T: LET R(2,2
)=COS T: LET R(1,2)=-SIN T: LET
R(2,1)=SIN T
5250 FOR I=1 TO 2: FOR J=1 TO 4
5255 LET X(I,1)=X(I,1)+R(I,J)*X(
J,2)
5257 LET Y(I,1)=Y(I,1)+R(I,J)*Y(
J,2)
5259 LET Z(I,1)=Z(I,1)+R(I,J)*Z(
J,2)
5260 NEXT J: NEXT I
5275 LET D(D,1)=(M3*X(2,1)+M2*Y(
2,1)+M1*Z(2,1))*GR
5280 LET D(D,2)=(M3*X(1,1)+M2*Y(
1,1)+M1*Z(1,1))*GR
5285 LET D=D+1
5290 NEXT K
5350 RETURN
6000 REM *CALCUL DIN. M. COL.*
6010 PRINT AT 2,0;"CONSIDERAM MI
SCAREA DE TRANSL. A MODULULUI, B
RATUL FIIND LA DIS-TANTA MAXIMA
DE AXA."
6020 PRINT AT 6,0;"PENTRU CICLUL
DE MISCARE, SE CAL-CULEAZA EFECT
UL DINAMIC, CONSIDERIND SOLICITA
RILE STATICE IN E-CHILIBRU CU R
EACT. DIN. CUPLE."

```



```

6040 PRINT AT 19,5;"CALCULEZ"
6050 FOR I=1 TO 4: LET A(I,1)=1:
  LET B(I,1)=1
6051 NEXT I
6052 RESTORE 6054: DIM X(4,4): D
IM Y(4,3): DIM Z(4,2)
6053 FOR I=1 TO 4: READ X(I,4):
READ Y(I,3): READ Z(I,2): NEXT I
6054 DATA XG3,XG2,XG1,YG3,YG2,YG
1,ZG3,ZG2,ZG1,1,1,1
6055 LET Q3=B+V3*T32: LET A(2,4)
=Q3
6056 LET Q1=T0+V1*T12: LET R(1,1
)=COS Q1: LET R(2,2)=COS Q1: LET
R(2,1)=SIN Q1: LET R(1,2)=-SIN
Q1
6057 LET R(3,3)=1: LET R(4,4)=1
6120 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
6125 LET X(I,3)=X(I,3)+A(I,J)*X(
J,4): NEXT J: NEXT I
6130 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
6135 LET X(I,2)=X(I,2)+B(I,J)*X(
J,3)
6137 LET Y(I,2)=Y(I,2)+B(I,J)*Y(
J,3)
6140 NEXT J: NEXT I
6200 LET FZA=-(M1+M2+M3)*GR-V2/T
21*(M2+M3)
6210 LET FZC=-(M1+M2+M3)*GR
6220 LET FZF=-(M1+M2+M3)*GR+V2/T
21*(M2+M3)
6250 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
6255 LET X(I,1)=X(I,1)+R(I,J)*X(
J,2)
6257 LET Y(I,1)=Y(I,1)+R(I,J)*Y(
J,2)
6259 LET Z(I,1)=Z(I,1)+R(I,J)*Z(
J,2)
6260 NEXT J: NEXT I
6280 LET MX=-(M3*X(2,1)+M2*Y(2,1
)+M1*Z(2,1))*GR
6290 LET MY=(M3*X(1,1)+M2*Y(1,1)
+M1*Z(1,1))*GR
6295 LET MZ=0
6350 RETURN
7000 REM *CALCUL DIN. M. BRAT*
7010 PRINT AT 2,0;"CONSIDERAM MI
SCAREA DE TRANSL. A MODULULUI, B
RATUL FIIND LA DIS-TANTA DATA DE
MISC. ACESTUIA"
7020 PRINT AT 6,0;"PENTRU CICLUL
DE MISCARE, SE CAL-CULEAZA EFECT
UL DINAMIC, CONSIDERE-RIND SOLICITA
RILE STATICE IN E-CHILIBRU CU R
EACT. DIN CUPLE."
7030 PRINT AT 11,0;"COMPONENTELE
SINT DATE IN SISTE-MUL FIX:"
7040 PRINT AT 19,5;"CALCULEZ"
7050 FOR I=1 TO 4: LET A(I,1)=1:
  LET B(I,1)=1: NEXT I
7052 RESTORE 7054: DIM X(4,4): D
IM Y(4,3): DIM Z(4,2)
7053 FOR I=1 TO 4: READ X(I,4):
READ Y(I,3): READ Z(I,2): NEXT I
7054 DATA XG3,XG2,XG1,YG3,YG2,YG
1,ZG3,ZG2,ZG1,1,1,1
7055 LET Q2=C+V2*T22: LET B(3,4)
=Q2
7056 LET Q1=T0+V1*T12: LET R(1,1
)=COS Q1: LET R(2,2)=COS Q1: LET
R(2,1)=SIN Q1: LET R(1,2)=-SIN
Q1
7057 LET R(3,3)=1: LET R(4,4)=1
7130 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
7137 LET Y(I,2)=Y(I,2)+B(I,J)*Y(
J,3)
7140 NEXT J: NEXT I
7150 LET FZ=-(M1+M2+M3)*GR
7160 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
7167 LET Y(I,1)=Y(I,1)+R(I,J)*Y(
J,2)
7169 LET Z(I,1)=Z(I,1)+R(I,J)*Z(
J,2)

```

```

6030 PRINT AT 11,0;"COMPONENTEL
SINT DATE IN SISTE-MUL FIX:"
6040 PRINT AT 19,5;"CALCULEZ"
6050 FOR I=1 TO 4: LET A(I,1)=1
  LET B(I,1)=1
6051 NEXT I
6052 RESTORE 6054: DIM X(4,4):
IM Y(4,3): DIM Z(4,2)
6053 FOR I=1 TO 4: READ X(I,4):
READ Y(I,3): READ Z(I,2): NEXT
I
6054 DATA XG3,XG2,XG1,YG3,YG2,Y
1,ZG3,ZG2,ZG1,1,1,1
6055 LET Q3=B+V3*T32: LET A(2,4)
=Q3
6056 LET Q1=T0+V1*T12: LET R(1,
)=COS Q1: LET R(2,2)=COS Q1: LE
R(2,1)=SIN Q1: LET R(1,2)=-SIN
Q1
6057 LET R(3,3)=1: LET R(4,4)=1
6120 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
6125 LET X(I,3)=X(I,3)+A(I,J)*X
J,4): NEXT J: NEXT I
6130 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
6135 LET X(I,2)=X(I,2)+B(I,J)*X
J,3)
6137 LET Y(I,2)=Y(I,2)+B(I,J)*Y
J,3)
6140 NEXT J: NEXT I
6200 LET FZA=-(M1+M2+M3)*GR-V2/
21*(M2+M3)
6210 LET FZC=-(M1+M2+M3)*GR
6220 LET FZF=-(M1+M2+M3)*GR+V2/
21*(M2+M3)
6250 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
6255 LET X(I,1)=X(I,1)+R(I,J)*X
J,2)
6257 LET Y(I,1)=Y(I,1)+R(I,J)*Y
J,2)
6259 LET Z(I,1)=Z(I,1)+R(I,J)*Z
J,2)
6260 NEXT J: NEXT I
6280 LET MX=-(M3*X(2,1)+M2*Y(2,
)+M1*Z(2,1))*GR
6290 LET MY=(M3*X(1,1)+M2*Y(1,1)
+M1*Z(1,1))*GR
6295 LET MZ=0
6350 RETURN
7000 REM *CALCUL DIN. M. BRAT*
7010 PRINT AT 2,0;"CONSIDERAM M
SCAREA DE TRANSL. A MODULULUI,
RATUL FIIND LA DIS-TANTA DATA D
MISC. ACESTUIA"
7020 PRINT AT 6,0;"PENTRU CICLU
DE MISCARE, SE CAL-CULEAZA EFEC
UL DINAMIC, CONSIDERE-RIND SOLICIT
RILE STATICE IN E-CHILIBRU CU
EACT. DIN CUPLE."
7030 PRINT AT 11,0;"COMPONENTEL
SINT DATE IN SISTE-MUL FIX:"
7040 PRINT AT 19,5;"CALCULEZ"
7050 FOR I=1 TO 4: LET A(I,1)=1
  LET B(I,1)=1: NEXT I
7052 RESTORE 7054: DIM X(4,4):
IM Y(4,3): DIM Z(4,2)
7053 FOR I=1 TO 4: READ X(I,4):
READ Y(I,3): READ Z(I,2): NEXT
I
7054 DATA XG3,XG2,XG1,YG3,YG2,Y
1,ZG3,ZG2,ZG1,1,1,1
7055 LET Q2=C+V2*T22: LET B(3,4)
=Q2
7056 LET Q1=T0+V1*T12: LET R(1,
)=COS Q1: LET R(2,2)=COS Q1: LE
R(2,1)=SIN Q1: LET R(1,2)=-SIN
Q1
7057 LET R(3,3)=1: LET R(4,4)=1
7130 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
7137 LET Y(I,2)=Y(I,2)+B(I,J)*Y
J,3)
7140 NEXT J: NEXT I
7150 LET FZ=-(M1+M2+M3)*GR
7160 FOR I=1 TO 4: FOR J=1 TO 4
7167 LET Y(I,1)=Y(I,1)+R(I,J)*Y
J,2)

```


Capitolul 8

CONCLUZII ASUPRA CONTRIBUȚIILOR ORIGINALE ALE LUCRĂRII

3.1. Considerații finale

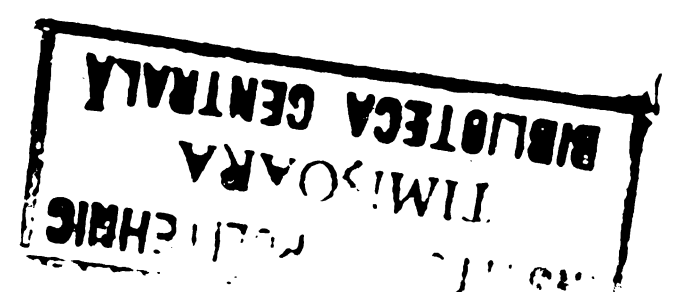
Procesul de robotizare, ca parte integrantă a ansamblului proces de modernizare a industriei și promovare a progresului tehnic, se plasează în prim-planul revoluției tehnico-științifice contemporane.

Robotizarea, automatizarea, electronizarea sînt direcțiile prin care se asigură creșterea productivității muncii în toate sectoarele industriale. Avînd în vedere importanța robotizării în ansamblu, a implementării în procesele de fabricație, a celulelor flexibile robotizate, apare necesitatea unor preocupări concertate pentru studii teoretice și concretizări practice, care să constituie linii directoare pentru proiectarea și execuția unor asemenea utilaje.

Lucrarea de față își propune să aducă modeste contribuții, atât în ceea ce privește unele aspecte teoretice ale domeniului, dublate și confirmate de rezultate experimentale. În lucrare se sintetizează rezultate ale cercetărilor teoretice și experimentale ale autorului efectuate în cadrul Colectivului multidisciplinar de roboți industriali din Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, din care face parte încă de la înființare.

În calitate de membru al acestui colectiv, autorul a participat, pe parcursul anilor, la rezolvarea unor lucrări contractuale de cercetare-proiectare cu o serie de întreprinderi din țară, cum sînt : întreprinderea "Electromotor" Timișoara, întreprinderea de vagoane "MEVA" Drobeta Turnu Severin, întreprinderea mecanică Bocșa, întreprinderea IMUM Baia Mare, I.C.S.I.T.M.U. "Titan" București etc.

În baza acestor lucrări, s-au proiectat și executat seria de roboți industriali tip RENT, roboții de vopsire pentru vagoane de



marfă și pentru virole mari cilindrice etc.

Rezultatele teoretice și experimentale sintetizate în lucrare, au fost utilizate în procesul de elaborare a proiectelor roboților industriali amintiți.

Autorul este membru al colectivului de concepție și implementare în celulă de fabricație a robotului REMT-1, colectiv care a fost distins cu premiul "Traian Vuia" al Academiei Republicii Socialiste România pe anul 1982.

3.2. Contribuții teoretice

Dintre contribuțiile teoretice originale ale lucrării amintim :

Pe baza coeficienților propuși în /KB/ și pe baza analizei unui număr mare (cca 400) de tipuri de R.I. existenți în funcțiune :

1) Se stabilește o corespondență optimă între spațiul de lucru al R.I. și coeficientul specific al capacității provizionale de manipulare K_2 ;

2) Se determină ponderea (sau formă de histogramă) a R.I. ce prezintă valori ridicate ale coeficientului de calitate K_3 ;

3) Se determină o corespondență între greutatea de serviciu a R.I., sarcina vehiculată și tipul acționării R.I., rezultând domenii prioritare pentru fiecare tip de acționare.

În domeniul analizei structurale ale lanțurilor cinematice componente ale M.D.P. :

4) Se obține totalitatea variantelor posibile de structuri de lanțuri cinematice deschise cu 6 grade de libertate, conținând cuple cinematice de clasele 3, 4 și 5.

5) Se stabilește, utilizând calculul automatizat, numărul exact al variantelor distincte de lanțuri cinematice deschise, formate din patru elemente și trei cuple cinematice inferioare.

6) Se recomandă variantele formate din patru elemente și trei cuple cinematice inferioare, care dau spațiu de lucru plan fiind utilizate în structuri redundante de R.I.

7) Se utilizează pentru prima dată noțiunea de conexiune tip B, incompletă sau deficientă ($K_{BD}(\)$), noțiune deosebit de utilă în analiza structurală a R.I. moderni modularizați.

În domeniul analizei cinematice ale lanțurilor cinematice

deschise, utilizând criteriul Hertenberg-Dennvit :

8) Se introduce pentru prima dată, noțiunile de matrici de transformare funcționale (A_{fn}) și matrici de transformare constructive (A_{cn}), care simplifică modul de scriere al matricilor generale de transformare.

9) Se determină expresiile componentelor vitezelor liniare și unghiulare în P.C. pe baza matricilor A_{fn} și A_{cn}

10) Se determină și se analizează lanțul cinematic echivalent al membrului superior uman utilizând noțiunea de conexiune $K_{BD}(\)$.

11) Se stabilesc valorile parametrilor cinematici ai P.C. dintr-un obiect manipulant de membrul superior uman, utile în procesul de protezare sau pentru echivalarea cu lanțurile cinematice ale R.I.

12) Se determină componentele vitezelor liniare și unghiulare în P.C. pentru robotul industrial REMT-5.

În domeniul analizei dinamice ale lanțurilor cinematice deschise, utilizând formalismul Lagrange :

13) Se obțin relații simplificate pentru determinarea forțelor generalizate, utilizând expresii simplificate pentru derivatele parțiale din componența coeficienților funcției Lagrange.

14) Se concretizează rezultatele teoretice, în vederea determinării forțelor generalizate în cuplele cinematice ale lanțului cinematic al robotului REMT-5, utilizând calculul automatizat.

8.3. Contribuții în domeniul cercetării experimentale

Prin cercetările experimentale efectuate de autor, s-a încercat să se verifice o serie de chestiuni teoretice sau să se completeze acestea cu date noi neelucidate cu ocazia studiilor teoretice făcute. Lucrarea prezintă în detalii rezultatele experimentale efectuate pe un robot din seria REMT și anume varianta REMT-5. Dintre contribuțiile originale ale lucrării, în acest domeniu, se remarcă :

1) Conceperea și execuția unui stand pentru determinarea parametrilor geometrici ai robotului REMT-5. Standul constituie propunerea de inovație, înregistrată la Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara.

2) Conceperea și execuția unui stand pentru determinarea parametrilor cinematici și dinamici ai robotului REMT-5. Standul constituie propunere de inovație, înregistrată la Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara.

3) Cercetări experimentale privind determinarea curselor pe cele trei axe ale M.C.T. al robotului REMT-5, precum și determinarea spațiului de lucru real al acestuia.

4) Cercetări experimentale privind comportarea în regim static sub acțiunea sarcinii, precum și a comportării în poziție de repaus a robotului REMT-5.

5) Cercetări experimentale privind precizie de repetabilitate, influența asupra acesteia a vitezelor de deplasare în cuplele cinematice și în P.C., precum și a sarcinii vehiculate. Determinarea probabilității de încadrare a preciziei de repetabilitate în limite impuse.

6) Cercetări experimentale privind determinarea preciziei pe traiectorie și influența vitezelor de deplasare și a sarcinii vehiculate asupra acesteia.

7) Cercetări experimentale privind determinarea funcțiilor de comandă de ordinul zero, unu și doi pentru robotul REMT-5

8) Proiectarea și execuția unei proteze funcționale pentru membrul superior uman. Brevet de invenție nr.

9) Proiectarea modulului de translație de bază a robotului REMT-1. Lucrare premiată cu premiul "Traian Vuia" al Academiei R.S.R.

10) Proiectarea unui reciprocator de vopsire pentru vagoane de marfă. Lucrare premiată cu premiul I la faza județeană a Festivalului creației tehnice de masă "Cântarea României".

x x x

x

Nu se poate încheia această lucrare fără ca autorul să nu dea glas recunoștinței sale mulțumind tuturor aceluia care, într-o formă sau alta, l-au ajutat la realizarea acestei lucrări :

- Conducerii Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, conducerii Facultății de mecanică, tovarășului decan prof.dr.ing.Iosif Grosanu, pentru asigurarea celor mai bune condiții de lucru pe tot parcursul elaborării lucrării ;

- Profesorului dr.ing.Kovács Francisc, șeful Catedrei de organe de mașini și mecanisme, din I.I.T.v.T., conducătorul de doctorat al autorului, pentru îndrumările, sugestiile și recomandările de o înaltă competență primite pe tot parcursul elaborării lucrării ;

- Profesorului dr.doc.ing.Christian Telecudi, coordonatorul Colectivului interdisciplinar de cercetare-proiectare MERO din Institutul politehnic București, pentru sfaturile, încurajările și recomandările pe parcursul elaborării lucrării ;

- Profesorului dr.ing.Dan Berju, prorectorul Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, pentru sprijinul direct acordat pe tot parcursul elaborării lucrării ;

- Profesorului dr.ing.Nicolae Gheorghiu, șeful Colectivului de organe de mașini din Facultatea de mecanică a Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, a cărui sfaturi, deosebit de utile, au contribuit substanțial la conturarea ideilor autorului încă din faza inițială de elaborare a lucrării ;

- Conducerii Intreprinderii "Electromotor" Timișoara, tovarșul director Dorin Coșia, ing.A.Costi șeful Colectivului de roboți industriali, ing.Vasile Tanvuia și a celorlalți membri ai acestui colectiv, pentru sprijinul acordat în faza de realizare a cercetărilor experimentale ;

- Colegilor : șef lucrări dr.ing.Corneliu Rădulescu, asist. ing.Valer Dolga, șef lucrări ing.Voicu Mesaroș-Anchel, ing.Dan Opriga, precum și celorlalți colegi de catedră, care prin discuții directe au sprijinit munca autorului de elaborare a lucrării.

Mulțumirile autorului se adresează de asemenea tov.Dia Panaitescu pentru dactilografierea lucrării și tov.Irina Olariu pentru execuția materialului grafic.

În sfârșit, dar nu în ultimul rând, mulțumirile autorului se îndreaptă spre propria-i familie, soție și cele două fete, Lavinia și Cella, care au acceptat cu încredere încheierea acestei lucrări.

BIBLIOGRAFIE

- A.1. André, F., Kauffmann, J. L., Lhote, F., Taillard, J. L. : Les robots (tome 4), (Hermes publishing), I.S.B.N. 2-86-601-024-3, Rennequin 75.017, Paris
- A.2. Andreșiu, M., Băciu, A., Băscu, A., Pușcaș, B., Tăsnăduș, Al. : Metode de decizii multicriteriale, Ed. tehnică, 1980
- A.3. x x x : Axes Robotiques - Revue française de Robotique, Janvier 1987
- A.4. Andrianov, IU, D., i dr. : Upravliniucie sistemf promișlennih robotov, Moscova, Mașinostroenie, 1984
- A.5. Albu, A., Blebea, I., Tăciulescu, N. : Cercetări asupra robotului industrial REM-01 și performanțele obținute. Al 2-lea Simpozion național de roboți industriali, București, oct. 1982
- A.6. Albu, A., Blebea, I. ș.a. : Robotul industrial R.O.H-01. Al 3-lea Simpozion național de roboți industriali, București, octombrie, 1983
- A.7. Albu, A., Blebea, I. : Noi soluții în construcția roboților industriali aplicante la REM-02. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie" Timișoara, decembrie 1984

- A.8. Artobolevschi, I. I. : Teoria mehaniznov, Moskva, 1965
- A.9. Auer, B. H. : Beitrag zur Steigerung der Flexibilität von Handhabungseinrichtungen im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung (teză de doctorat), Glauchau
- B.1. Bolotnic, N. N. : Optimalne priamolineine peremeşçenia
Kaplunov, A. A. gruză pri pomoşçi dvuzvenovomanipulato-
tora (Tehniceskaia Kibernetika, Nr.1, 1982)
- B.2. Böhm, I. : Robotu Norda pro podávání plechů do
lišů (Strojirenska vyroba - prosinek, 1982)
- B.3. Burdakov, S. F. i dr. : Proectirovanie manipulatorov - pro-
mişlenih robotov i robotizirovannih
complexov, Moskva, "Vysşaia şkola", 1986
- B.4. Bazrov, B. M. : Rascet tocinosti maşin na E. V. M.,
Moskva "Maşinostroenie", 1984
- B.5. Baranov, G. G. : Kurs teorii mehanizov i maşin. Maş-
ghiz, 1958
- B.6. Bacui, C. C. : Aparatul locomotor. Ed. medicală, 1981
- B.7. Bessonov, A. P., Umnov, N. V. : Feature of kinematics of turn of
Walking vehicles. Third CISM-IFTOM In-
ternational Symposium of theory and
practica of Robots and Manipulators,
Udine, Italy, Sept. 1978
- B.8. Bolotiv, L. M., Tives, L. N. : Povşşenie tocinosti robotov na os-
nove modeli manipulatora s zazorami v
kinematiceskih tpeiah privodov. Vesnik
maşinostroenie, nr.4, 1988
- B.9. x x x : Bussiness Week, sept. 1980
- B.10. Balestrino, A., De Maria, G., Sciavicco, L. : Adaptive Control
of Manipulators in the Task Oriented
Space. 13-th International Symposium
on Industrial Robots and Robots, April
1983, Chicago, Illinois

- B.11. Bejczy, A.K. : Robot arm dynamics and control Yet Propulsion Laboratory, nov.1979
- C.1. Cojocaru, G., Kovács, Fr. : Roboții în acțiune, Vol.I,II, Editura Facla, Timișoara, 1985
- C.2. Cîrțu, N.D., Popescu, Gh. : Roboții industriali în sisteme flexibile, AMC 52-55. Ciclul "Roboți și inteligență artificială" Ed.tehnică, București, 1986
- C.3. x x x : Contract de cercetare științifică (c.c.g) nr.163/1980. Beneficiar CCSITMUAMFS Titan, București.
- C.4. x x x : C.c.g. nr.372/8.10.1979. Beneficiar I.T. Timișoara
- C.5. x x x : C.c.g. nr.197/81. Beneficiar I.A.E.M. Timișoara
- C.6. x x x : C.c.g. nr.224/1981. Beneficiar I.Electromotor Timișoara
- C.7. x x x : C.c.g. nr.192/1982. Beneficiar I.Electrotimiș Timișoara
- C.8. x x x : C.c.g. nr.132/1985, Beneficiar I.Electrotimiș Timișoara
- C.9. x x x : C.c.g. nr.170/1985. Beneficiar I.MEVA Drobeta Turnu-Severin
- C.10. x x x : C.c.g. nr.136/1986. Beneficiar I.Unio Satu Mare
- C.11. x x x : C.c.g. nr.6/10.01.1989. Beneficiar I.M.U.M. Baia Mare
- C.12. Coiffer, r. : Les Robots, vol.1,2,4, Hermes Publishing (France, 1981)
- C.13. Colson, I.C., Ferreira, H. : Kinematic Arrangements Used in Industrial Robots. 13-th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7

- C.14. Cernoruțkii, G.C., Sibrin, A.P., Iabreev, V.C. : Slediażcie sistemŭ avtomaticeških manipulatorov. Moskva "Nauka" Glavnoia redakcia fizico-matematiceşcoi literaturŭ, 1987
- D.1. Dostine, G. : Système technologique robotis e de transport (The Industrial Robot, dec.1982)
- D.2. Davidovici, A., Dr g noiu, Gh., Moang , A. : Modelarea, simularea  i comanda manipuloarelor  i roboţilor industriali. Ed. tehnică, Bucureşti, 1986
- D.3. Duffy, I. : Analysis of Mechanisms and robot manipulators. Edward Arnold (Publishers), Ltd. Co. librairie Lavoisier, 11, rue Lavoisier 75384, Paris, Cedex 08
- D.4. Dilling, H.J., Rauschenbach, Th. : Industrial Handling am industriellen Alltag orientiert, Werkstatt und Betrieb 109 (1976) 6
- D.5. Drimer, D., ş.a. : Roboţi industriali  i manipuloare. Ed. tehnică, Bucureşti, 1985
- D.6. Dobrovolski, V.V. : Teoria mehanizov, Moskva, 1951
- D.7. Dudiţ , F., Diaconescu, D. : Optimizarea structurală a mecanismelor, Ed. tehnică, Bucureşti, 1987
- D.8. Dolga, V., Rădulescu, C., Văcărescu, I. : Asupra ecuaţiilor dinamice  i a supleţei industrial de tip cartezian. Simpozionul M.T.M. Timi oara, 1980
- D.9. Dolga, V., Văcărescu, I. : Principii de calcul al sistemului motor cu motoare pas cu pas  i şuruburi cu bile pentru R.I. Al 3-lea simpozion MTM, Timi oara, 1980
- D.10. Dolga, V., Văcărescu, I., Văcărescu, V., Dolga, L. : Alegerea mecanismului generator de traiectorie optim pentru un robot industrial de montaj. Al 6-lea Simpozion naţional de R.I., Braşov, decembrie 1986
- E.1. Eberhardt, E., M rtel, G. : Sensoranr stung und Regelung von Greifern f r Industrieroboter (V.D.I.-Z 125 (1983) nr.5 - M rz (I))

- E.2. Engelberger, I. : Industrie Roboter in der praktischen Anwendung C. Hauser Verlag, München - Wien
- F.1. Fomin, A.V., Racov, IA, A., Agafonov, IU, T. : Controli za robotoi privodov avtomatocescovo manipulatora "Universal-15", U.D.K.A62 - 85.621.7.077
- F.2. x x x : Function-To-Function-Architecture (FFA) is a novel architecture for building programmable electronic systems which uses multiple processors and unique distributed executive. (The Industrial Robot-December 1982)
- F.3. Fohanno, T. : Evaluation des performances mecanique des robots industriels. Etat de la Robotique en France, 1982, Tome 2, Industrie
- G.1. x x x : GOST 25685-83
- G.2. Germann, W. : I.R.B.95 - ein Industrieroboter - Baukasten für die Rationalisierung stationärer Montageprozesse. Fernmeldetechnik, Berlin 23 (1983) 2
- G.3. Gheorghiu, N., Rădulescu, C., Văcărescu, I. g. a. : Modul de rotație al robotului industrial REMT-1. Al 3-lea Simpozion MTM, Timișoara 1980
- G.4. Gheorghiu, N. g. a. : Manipulatoare dozatoare pentru alimentarea mașinilor de turnat sub presiune. Al 6-lea Simpozion național de R.I. Brașov, 1986
- G.5. Gheorghiu, N., Perju, D. : Aspecte funcțional-constructive ale controlului poziției la roboți industriali. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, 1984
- G.6. Gheorghiu, N., Parju, D. : Unele aspecte ale structurii și funcționării robotului industrial "Messer-Grisheim" specializat în sudarea în puncte. Al 6-lea simpozion național de R.I., Brașov, decembrie 1986

- G.7. Groganu, I., Văduva, Gh. : Studiul dinamic al roboților industriali prin metoda Newton Euler, utilizând calculatorul electronic. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie" Timișoara, decembrie 1984
- G.8. Groganu, I. : Mecanică, Statica și cinematica. Vol. I, Litografia IPTVT, 1985
- G.9. Groganu, I. : Mecanică. Dinamica, vol. II, Litografia IPTVT, 1985
- H.1. HF1, A. : Industrierobotereinsatz in Festigungssystemen, Festigungstechnik u. Betrieb, Berlin 32 (1982) 12
- H.2. Hermann, H. : Der Schweißroboter in der modernen Produktion (Fernmeldetechnik, Berlin 23 (1983) 2)
- H.3. Herden, G. : Roboterfreundlichkeit von Auftrags-schweißungen an Verscheissteilen von Eimerkettensecbaggern. (Schweißtechnik 33 (1983) 1)
- H.4. Hartley, I. : More robots aimed at different jobs on offer as 'robot fever' subsides; more flexibility in assembly and welding. (The Industrial Robot - dec. 1982)
- H.5. Hesse, G., Kiese, S. : Gestaltung von Roboterschweißplätzen. (Zis-Mitteilungen 11/1982)
- H.6. Heise, L. : Technologisches Konzept der Foto-setztechnik (Papier und Druck 32 (1983) 10)
- H.7. Hartenberg, R.S., Denavit, I. : Kynematic Synthesis of linkages. Mc Graw-Hill Book Company. New York, 1964
- H.8. Handra-Luca, V. : Funcții de transmitere în studiul mecanismelor. Ed. Academiei RSR, București, 1983

- H.9. Huang, H.P., Mc Clamroch, N.H. : Time - optimal control for robotic, contour following problem, I.E.E.E. J. Rob. and Autom., 1988, 4, nr.2
- I.1. Iglinschi, A.I.U. : Zadaci mehaniciki v svete regenii XXVI siezda comunisticesci partii sovetskovo soiuza. (Prkladnaia matematika i mehanica, tom 46, vip.2, 1982)
- I.2. Ioanov, A., Rathmill, F. : Data base provides tool for robot selection. (The Industrial Robot, september 1982)
- I.3. Ispas, V., Pop, I.I., Bocu, M. : Roboți industriali, Ed. Dacia din Cluj-Napoca, 1985
- I.4. Iacob, C., ș.a. : Matematici clasice și moderne. Vol. I și II Ed. tehnică, București, 1979
- I.5. Iampolschii, L.C. : Promișlennaia robotehnica, Kiev-Tehnica 1984
- I.6. Ioniță, N. : Elemente de mecanica automatelor și dinamica automatizării proceselor industriale, Ed. tehnică, București, 1985
- I.7. Ispas, V., Ursu, N., Itul, P., Negrean, I. : Aspecte ale studiului dinamic al unui R.I. modular posedînd cinci grade de libertate. Al III-lea Simpozion național de R.I. Robot-88, Cluj-Napoca, 1988
- J.1. x x x : J.I.S.-B O 134/1979 (normă japoneză)
- J.2. Jabotinscaia, T.N., Iușenco, A.C. : Upravlenie adaptivnîm promișlennîm robotov s silovoi obratnoi sviazin (Priborî i sistemî upravlenia 1982, nr.9)
- J.3. Joni, N. : Răspîndirea actuală a roboților industriali și prognoza dezvoltării numărului de R.I. Al 5-lea Simpozion național de roboți industriali, București 17-19 oct. 1985
- J.4. Julliere, M., Marce, L., Place, H. : A Guidance System for a Mobile Robot. 13-th International Symposium on Industrial Robots and Robots, 7 april 17-21 1983, Chicago-Illinois

- K.8. Kovács, Fr., Cojocaru, G. : Manipulatoare, roboți și aplicațiile lor industriale, Ed. Facla, Timișoara, 1982
- K.15. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Mehedințeanu, M. : Posibilități de realizare pe baza robotului REMT-1 a două familii modularizate de roboți industriali. Primul simpozion național al R.I. București, 1981
- K.16. Kovács, Fr., Mureșan, T. : Robotul industrial REMT-1, SYROM-81, București, 1981
- K.17. Kovács, Fr., ș.a. : Celulă de fabricație experimentală pentru prelucrarea unei piese de formă disc. Al 3-lea Simpozion național de R.I., București, 1983
- K.19. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., ș.a. : Robotul industrial REMT-3. Al 3-lea Simpozion național de R.I., București, 1983
- K.20. Kovács, Fr. : Unele probleme ale corelării funcționării componentelor subsistemului de manipulare automată. Problema vitezelor. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie" Timișoara, dec. 1984
- K.21. Kovács, Fr., Groșanu, I., Gheorghiu, N., ș.a. : Microrobot industrial cu acționare electrică UR-2,5 N. Al 5-lea simpozion național de R.I., București, 1985
- K.22. Kovács, Fr., Groșanu, I., Gheorghiu, N., ș.a. : Minirobot cu acționare electrică MAE 100 N. Al 6-lea Simpozion național de R.I., Brașov 1986
- K.30. Kovács, Fr., Gheorghiu, N., Văcărescu, I., ș.a. : Robot (reciprocator) de vopsire. Al 6-lea Simpozion național de R.I., Brașov, 1986
- K.35. Kovács, Fr. : Contribuții la elaborarea unei metode unificate de sinteză a mecanismelor. Teză de doctorat, Timișoara, 1969

- K.36. Kovács, Fr., Perju, D., Savii, G. : Metode noi în sinteza mecanismelor. Ed. Facla, Timișoara, 1976
- K.37. Kovács, Fr., Perju, D., Crușu, M. : Mecanisme, vol. I, II, Litografia IPTV Timișoara, 1977
- K.38. Kovács, Fr., Dinulescu, V., Niculescu, V. : Beiträge zum Studium des menschlichen Oberarm-Unterarm-und Handskelettes als offene kinematische Kette. XVI Vědecká Konference, 11-13 červecne 1975, Brno, CSSR
- K.41. Kovács, Fr., Văcărescu, I., Văcărescu, V. : Considerații asupra matricilor de transformare în analiza pozițională a lanțurilor cinematice ale roboților industriali R.I., SYROM '89, București, iulie 1989
- K.1. Kasuga, E. : Current status and future trends of industrial robots for pressworking (Metalworking Engineering and Marketing, nov. 1981)
- K.2. Kergall, Y. : Algorithmes polynomiaux pour la recherche d'un chemin optimal dans une série planifiée. (R.A.I.R.O. Recherche opérationnelle. Operations Research vol. 16, nr. 2 mai, 1982)
- K.3. Kiese, S. : Arbeitsplätze mit Schweißrobotern. Schweißtechnik 33 (1983) 1)
- K.4. Krutico, P.D., Lacoța, N.A. : Sintez algoritmov upravlenia dvijeniem robotov po metodu obratnih zadaci dinamichi. Koordinatnaia forma zadania traiektorii (Technicescaia Kibernetica nr. 1, 1982)
- K.5. Kalás, V. : Robotický systém KOLKA 025 s mikroprocesorovým řízením (Mechanizace a automatizace administrativní 9/1982)
- K.6. Kravcenco, V.N., Lacoța, N.A. : Algoritm upravlenia i privod sborocinovo rabota (Priborí i sistemí upravlenia nr. 9, 1982)

- K.7. Krech, S.I. : "Animata" permits verification and debugging of robot programs written in Manufacturing Control Language. Mechanical Engineering 32/August 1982
- K.9. Kozfrev, I.U., G. : Promiŕlenie robotŕ-kpravocinik, Moskva Maginostroenie, 1983 g.
- K.10. Kozfrev, I.U., G. : Sovremennŕe promiŕlennŕe robotŕ. Catalog Sifrim, I.A., A. Moskva, Maginostroenie, 1984 g.
- K.11. Kamiya, Y., Yokoyama, Y., Takano, M. : Study on High-Speed Intermittent Motion of Robot Arm, Bull. Japan Soc. of Proc. Engg. Vol. 12, No. 1 (mar. 1978)
- K.12. Kamiya, Y., Yokoyama, Y., Takano, M. : High-Speed Accurate Positioning of Robot Arm, Bull. Japan Soc. of Proc. Engg. Vol. 14, No. 2 (iun. 1980)
- K.13. Kraskovschi, E., I.A., i. dr. : Rasŕect i construirovaniŕ mehanizmov priborov i vŕcisliteliniŕ sistem. Moskva, "Vŕsegnaia ŕcola", 1983
- K.14. Krasnicov, V.F. : Sintez structurŕi avtomaticeskih manipulatorov. Mehanizaciŕ i avtomatizaciŕ proizvodstva, 10.82
- K.39. Konstantinov, M., S. : Forŕele de inerŕie ale roboŕilor ŕi manipulatoroarelor. Third CISM-ITOMM Int. Symposium of theory and practice of Robots and Manipulators. Udine, Italy, sept. 1978
- K.40. King, J., O. : Lagrangian dynamics of flexible manipulators using angular velocities instead of transformation matrices I.E.E.E. Trans. Syst., Man and Cyb., 1987, 17, nr. 6
- L.1. Laffaille, A. : Robotics in France. Trends and Overview (16-th International Symposium on Industrial Robots) 30.09-2.10.1986 Brussels - Belgium

- L.2. Levin, V.I., Perelroizen, E.Z. : Modelirovanie trehmernoi vnezhnei sredy metodami dinamiceskoi teorii avtomatov (Electronnoe modelirovanie, 1982, nr.5)
- L.3. Limonov, I.U.M., Vodopian, L.I. : Issledovanie visocorosnovo pnevmaticheskovo slediagchevo privoda dlia avtomaticheskikh manipulatorov. U.D.K. 621.01.007.52
- L.4. Laffaille, A. : Robotics in France : Trends and Overview 16-th International Symposium on Industrial Robots, 30 sept.-20 oct.1986, Brussels - Belgium
- L.5. Lange, O. : Decizii optimale. Bazele programării. Ed. ştiinţifică, Bucureşti, 1970
- L.6. Loveikin, V.S. : Optimizaţia rejima dvijenia manipulaţionih sistem robotov po complexnom criteriu. (Vestnic maşinostroenie nr.2, 1988)
- L.7. Levenson, L.B. : Teoria mehanizov i maşin. Magghiz, 1948
- L.8. Liegeois, A., Khalil, W., Dumas, J.M., Renaud, M. : Mathematical and computer models of interconnected mechanical systems. Second International CISM-IFTOMM Symposium, Warsaw-Poland, sept. 14-17, 1976
- L.9. Lacota, N.A., ş.a. : Realizarea sistemului de execuţie a roboţilor pentru traiectorii de execuţie precise. Technicescaia Kibernetika, nr.5, 1979
- L.10. Lee, B.J., Nho, T.S. : Interpolation for 2-Dimensional Countouring Control. 13-th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7. April 17-21, 1983, Chicago-Illinois
- L.11. Lee, C.S.G., Ziegler, M. : A Geometric Approach in Solving the Inverse Kinematics of PUMA Robots. 13-th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7, April 17-21, 1983, Chicago-Illinois

- L.12. Lehrm, M., Scavarda, S. : Bond grapho et robotique. État de la Robotique en France, 1982, Tome 1 - Recherches
- M.1. Motiwalla, S. : The proposed model contains the elements of an operating system and facilities for robot program development and testing. Mechanical Engineering, 36 (august 1982)
- M.2. Müller, T. : Industrieroboter in der Kommissionier-technik. (f+h 33 (1983) nr.12)
- M.3. Mangeron, D., Irimiciuc, N. : Mecanica rigidelor cu aplicații în inginerie. Mecanica sistemelor rigide (Vol.II), Ed. tehnică, București, 1980
- M.4. Marchal, P., ș.a. : Organe terminal adaptif pour robot de soudage à l'arc. État de la Robotique en France, 1982, Tome 1, Recherches.
- M.5. Murgescu, C. : Japonia în economia mondială. Ed. științifică și enciclopedică, București, 1985
- M.6. Mădăraș, L., ș.a. : Aspecte ale comportării dinamice a modului de orientare din structura R.I. Al 3-lea Simpozion de mecanisme și transmisii mecanice, Timișoara, oct.1980
- M.7. Micșu, P., Kovács, Fr. : Linie tehnologică pentru prelucrarea arborilor și rotoarelor motoarelor electrice deservită de R.I. Al 2-lea Simpozion național de R.I., București, oct.1982
- M.8. Manolescu, N.I., Kovács, Fr., Orănescu, A. : Teoria mecanismelor și a mașinilor. Editura didactică și pedagogică, București, 1972
- M.9. Manolescu, N.I. : Teoria mecanismelor și mașinilor. Curs vol.I-IV, Litografia I.C.F. București, 1955-56

- M.10. Manolescu, N.I. : O metodă unitară de alcătuire a lanțurilor cinematice și a mecanismelor plane articulate de diferite grade de libertate și mobilitate. Studii și cercetări.
- M.11. Manolescu, N.I. : Metoda de alcătuire a grupelor asurice în funcție de numărul Z_g de contururi și rangul j al elementelor. Buletinul I.P.B Tom 28, nr.4/1966
- M.12. Manolescu, N.I. : Alcătuirea mecanismelor caracteristice plane cu zece elemente. Bul.I.P.B. nr.4 1966
- M.13. Manolescu, N.I. : De la grinzile "Baranov" cu ajutorul grafului la mecanismele cu articulații multiple. Sesiunea a XIII-a a I.P.B., mai 1970
- M.14. Mc Callion, H., g.a. : On measuring errors in a placement task. The Industrial Robot, vol.4, No.2 June 1977
- M.15. Megahed, S., Renaud, M. : Minimisation du temps de calcul pour la commande dynamique des robots manipulateurs. État de la Robotique en France, 1982, Tome 1 - Recherches
- M.16. Mohsen, S.M. : Ein Beitrag zur Dynamik des menschlichen Armes (dissertation), 1979
- N.1. x x x : N.F.E. 01-100 (normă franceză) aug.1983
- N.2. Nichiforov, C.O., Marhadav, B.E. : Veroiatnostnaia optimizația configurații manipulatora dlia zadannovo konecinovo polojenia zshvatnovo ustroistva. Vestnic maginostroenia 1988, nr.4
- O.1. Ottinger, V. : Evaluating Potential Robot Applications in a System Context. So I.E. January '82
- O.2. Otto, D. : Stand der Entwicklung und des Einsatzes von Industrierobotern. Schweisstechnik 26 (1976) 6.

- P.10. Pelecudi, Chr. : Bazele analizei mecanismelor. Ed. Academiei R.S.R. București, 1967
- P.11. Pelecudi, Chr. : Teoria mecanismelor spațiale. Ed. Academiei R.S.R. București, 1972
- P.12. Pelecudi, Chr. : Precizia mecanismelor. Ed. Academiei R.S.R. București, 1972
- P.13. Pelecudi, Chr., Simionescu, I., Moise, V., Ene, M. : Proiectarea mecanismelor, Litografia I.P.B. 1981
- P.14. Pelecudi, Chr., Simionescu, I., Ene, M., Moise, V., Candrea, A., Stoenescu, M. : Mecanisme cu cuple superioare, came și roți, Litografia I.P.B. 1983
- P.15. Pelecudi, Chr., Drăgănoiu, Gh., Simionescu, I. : Algoritmi și programe pentru analiza mecanismelor. Ed. tehnică, București, 1982
- P.16. Pelecudi, Chr., Simionescu, I., Ene, M., Moise, V., Candrea, A. : Probleme de mecanisme. Editura pedagogică și didactică, București, 1982
- P.17. Pelecudi, Chr., Maroș, D., Merticariu, V., Pandrea, N., Simionescu : Mecanisme. Editura didactică și pedagogică, București, 1985
- P.19. Pelecudi, Chr. : Metoda contururilor în sinteza numerică și structurală a lanțurilor cinematice. Studii și cercetări de mecanică aplicată. Tom XXV, nr.3/1967
- P.21. Pelecudi, Chr., Simionescu, I., Moise, V., Ion, N. : Algoritm matricial pentru sinteza "I" a mecanismelor cu bare. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara 29.11-2.12.1984
- P.18. Ferju, D. : Contribuții la sinteza mecanismelor plane pentru conducerea pe o curbă dată (teză de doctorat - I.P.B.1971)

- P.22. Perju, D., Văcărescu, I., Mesaroş, A.V., Savii G. : Cu privire la sinteza mecanismelor cu elemente articulate pentru aproximarea unei funcţii liniare SYROM '81, Bucureşti, 1981
- P.23. Perju, D., Mesaroş, A.V., Văcărescu, I., Varga, St., Savii, G. : Cu privire la sinteza mecanismelor generatoare de funcţiuni. Buletinul I.P.T.V.T. Tom 25(39) Fascicola 1-1980
- P.24. Perju, D., Văcărescu, I., Savii G. : Asupra sintezei mecanismelor generatoare de funcţiuni cu rapoarte de transmitere negative. Al 3-lea Simpozion de mecanisme şi transmisii mecanice. Timişoara, oct.1980
- P.25. Perju, D. : Mecanisme de mecanică fină. Litografia I.P.T.V.T. 1983
- P.5. Perju, D., Ciupală, V., Maniu, I. : Determinarea preciziei geometrice a mecanismelor generatoare de traiectorie. FRASIC-82, Braşov 1982
- P.26. Perju, D., Gheorghiu, N. : Analiza mecanismului unui braţ articulată (tip "trompă de elefant") cu bare şi sectoare dinţate. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie", Timişoara, decembrie 1984
- P.9. Perju, D., Gheorghiu, N., Kovács, Fr., Varga, St. : Manipulator sincron MS-200. Al 6-lea Simpozion naţional de roboţi industriali, Braşov, dec.1986
- P.1. Pollard, H.F. : Sound waves in solids (1977 Hion Limited London)
- P.2. Peterson, C.E. : Robots and Image Processing (Journal of Electrical and Electronics Engineering, Austria - I.E.Aust. et IREE Aust. Vol.2, nr.1, march 1982)
- P.3. Powell, I.L. : The kinematic analysis and simulation of the parallel topotogy manipulator (The Marconi review, vol.XLV number 226 third Quarter 1982)

- P.4. Paul, P.R. : Robot Manipulators : Mathematics, programming and Control. (The MIT Press Cambridge, Massachusetts and London, England, 1981)
- P.6. Petrov, B.A. : Manipulatori. Leningrad, Maşinostroe-
nie Leningradscoe otdelenia, 1984
- P.7. Popescu, I. : Optimizarea procesului de aşchiere. Ed.
Scrisul românesc, Craiova, 1987
- P.8. Fronin, M.A. : Proiectarea optimă a manipuloarelor
destinate lucrărilor pe suprafaţă. Ma-
şinovedenie 5, 1979
- P.20. Potkoniac, V., Vucobratovici, M., Hristic, D. : Interactive
Procedure for Computer-Aided Design
of Industrial Robots Mechanisms. 13-th
Intern. Symposium on I.R. and R 7,
April 17-21, 1983, Chicago-Illinois
- P.21. Pfeiffer, F., Reiner, J. : A concept for Manipulator Trajec-
tory Planning. I.E.E.E. Journal of
Robotics and Automation
- R.1. Robin, M. : Robots et ateliers flexibles en
Grande-Bretagne (Sciences et Techniques
No.89 oct./nov.1982)
- R.2. x x x : Robotica, vol.2,3. Oficiul de informa-
re documentară pentru Industria Cons-
trucţiilor de maşini, 1986
- R.3. Ranky, P.G., Ho, C.Y. : Robot modelling control and applicati-
ons with Software. I.F.S.(Publications)
Ltd, UK, Springer-Verlag, Berlin-Hei-
delberg-New York-Tokio, 1985
- R.4. Reshetov, L. : Self-aligning mechanisms. Mir Publi-
shers-Moscow, 1986
- R.5. Rădulescu, C., Văcărescu, I., Diaconu, A. : Robot industrial pen-
tru schimbarea levetei în filaturi. Se-
siunea de comunicări ştiinţifice "Elec-
tromotor '84" Timişoara, febr.1984

- R.6. Rădulescu, C. : Contribuții la sinteza structurală și dimensională optimă a mecanismelor sferice și cvasisferice cu aplicații la roboți industriali (teză de doctorat) I.P.T.V.T. 1987
- R.7. Rădulescu, C., Kovács, Fr. : Spațiul de lucru - indicator calitativ al posibilităților de utilizare concretă a R.I. Al 3-lea Simpozion național de R.I., București, oct.1983
- R.8. Rădulescu, C., Kovács, Fr. : Codul structural - indicator sintetic al structurii mecanice ale unui R.I. Al 4-lea simpozion "Robotizarea în industrie", Timișoara, dec.1984
- R.9. Rungitki, L.Z. : Prelucrarea matematică a datelor experimentale. Ed. tehnică, București, 1974
- S.1. Steinhilper, R., Schuler, J., Klug, H. : Selbstfahrender Industrieroboter zur Automatisierung vielfältiger Aufgaben in der Teilefertigung (V.D.I. Z 125 (1983), Nr.8 April (II))
- S.2. Semrad, H. : Was Anwender über moderne Steuerungen für numerisch gesteuerte Maschinen und Industrieroboter wissen sollten. (Festigungstechnik und Betrieb, Berlin 32 (1982) 12)
- S.3. Schraft, R.D., Schiele, G. : Les robots industriels de peinture (Galvano-organo-traitements de surface, août-septembre/82/528)
- S.4. Schweizer, M. : Flexible Automatisierung mit Industrierobotern (MTZ 44 (1983) 6)
- S.5. Sherby, F.A., Chmielewski, J.F. : Generalized Vector Derivatives for Systems with Multiple Relative Motion. Transactions of the A.S.M.E.-Journal of applied mechanics - march 1968
- S.6. Sandor, N.G. : Principles of a General Quaternion-Operator Method of Spatial Kinematics
- S.7. Snyder, W.E. : Industrial Robots. Computer Interfacing and Control Prentice/Hall International, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1985

- S.8. Shimano, B., Roth, B. : Ranges of motion of manipulators
- S.9. Shimano, B., Roth, B. : Dimensional Synthesis of manipulators
Third CISM-IFTOMM International Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. September 12-15, 1978, Udine, Italy
- S.10. Scott, P.B. : The Robotics Revolution. The complete guide for Managers and Engineers Basil Blackwell Publisher Ltd 108 Park Avenue South, Suite 1505 New York NY 10016 USA
- S.11 x x x : Special supplement, La Suisse Geneva 24 juin 1982
- S.12. Sherby, T.A., Chmielewski, J.F. : generalized Vector Derivatives for Systems with Multiple Relative Motion Transaction of the A.S.M.E Journal of Applied Mechanics, March 68
- S.13. Schweizer, M. : Roboterensatz wird zur Normalinvestition. Moderne Industrie ROBOTER, Landsberg, April 1988, Heft 2
- S.14. Stețiu, C.E., Oprean, C. : Măsurări geometrice în construcția de mașini. Ed. științifică și enciclopedică, București, 1988
- T.1. x x x : Their Role in Manufacturing Industry OECD, Paris 1983, Industrial Robots (cap. IV)
- V.1. x x x : V.D.I. 2860 BI 1 (normă germană)
- V.2. Vohner, I. : Industrie roboter. 2, durchgesehene Auflage (VEB 1981)
- V.3. Văduva, Gh., Orgovici, I., Groganu, I. j.a. : Robot cu acționare pneumatică R.P.-1. Al 3-lea Simpozion național de R.I., București, 27-29 oct. 1983
- V.7. Văduva, Gh., Groganu, I. : Studiul cinematic al unor R.I. Simpozionul "Robotizarea în industrie" Timișoara, 1984

- V.4. Vucobratović, M., Hristić, D., Stokić, D. : New method of motion synthesis and its application to artificial skeletal activity. Second International CISM IFToMM Symposium. Warsaw-Poland, Sept.14-17 1976
- V.5. Vucobratović, M., Stokić, D., Kirkovski, N. : Non Adaptive and Adaptive Control of Industrial Robots. 13-th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7, April 17-21, 1983, Chicago-Illinois
- V.6. Vucobratović, M., Potconiak, V. : Dynamics of Manipulation Robots Theory and Application, Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1982
- V.8. Văcărescu, I., Dolga, V., Rădulescu, C. : Robot industrial pentru schimbarea levatelor. Al 3-lea Simpozion M.T.M. Timișoara, oct.1980
- V.9. Văcărescu, I., Rădulescu, C., Luchin, M., Văcărescu, V. : Considerații tehnologice privind automatizarea procesului de vopsire a vagoanelor. Al 4-lea Simpozion M.T.M. "Robotizarea în industrie" Timișoara, 1984
- V.10. Văcărescu, I., Luchin, M., Văcărescu, V. : Vopsirea vagoanelor utilizând instalații automate tip "reciprocator". Al 4-lea Simpozion M.T.M. "Robotizarea în industrie" Timișoara, 1984
- V.11. Văcărescu, I., Văcărescu, V., Rădulescu, C. : Studiu cinematic asupra membrului superior uman. COMEFIN-2, București, 1986
- V.12. Văcărescu, I., Văcărescu, V. : Analiza cinematică a robotului REMT-5. Al 3-lea Simpozion național de R.I. Cluj-Napoca, octombrie 1988
- V.13. Văcărescu, I., Văcărescu, V., Tănăușă, V. : Robot industrial REMT-6. Al 5-lea Simpozion național de R.I. Cluj-Napoca, octombrie 1988
- V.14. Văcărescu, I., Văcărescu, V. : Considerații asupra sintezei structurale a lanțurilor cinematice compo-

nente ale mecanismelor generatoare de
traietorie. SYROM-89, București, iu-
lie 1989

- V.15. Văcărescu, I., Văcărescu, V. : Considerații asupra analizei
structurale și cinematice a lanțului
cinematic component al membrului super-
rior uman (Partea I). SYROM-89, Bucu-
rești, iulie 1989
- V.16. Văcărescu, I., Văcărescu, V. : Considerații asupra analizei
structurale și cinematice a lanțului
cinematic component al membrului supe-
rior uman (Partea II). SYROM-89, Bucu-
rești, iulie 1989
- V.17. Văcărescu, I., Galoș, D. : Proteză pentru membrul superior
(Brevet de invenție nr.95377-OSIM)
- W.1. Walter, J. : Automatisch Montieren (Industrie An-
zeiger, nr.96, V.1.12.82)
- W.2. Whalbin, C., Wallström, A. : Swedish industrial robot market-
comparison with U.K. (The Industrial
Robot - 12.82)
- W.3. Warnecke, H.I., Schraft, R.D. : Industrie-roboter. Zweite,
völlig neu bearbeitete Auflage, Mainz
1980 (Krausskopf-Verlag GmbH)
- W.4. Warnecke, H.I., Schraft, R.D. : Industrie-roboter, Katalogband
Krausskopf-Verlag GmbH, Mainz 1973
- W.5. Warnecke, H.I., Schraft, R.D. : Industrie-roboter, Katalogband
Krausskopf-Verlag GmbH, Mainz 1980
- W.6. Warnecke, H.I., Schraft, R.D. : Industrie-roboter, Katalogband
Krausskopf-Verlag GmbH, Mainz 1986
- W.7. Withney, D.E. : State Space Models of Remote Manipula-
tion Tasks, I.E.E.E. Transaction on
Automatic Control, Vol.A.C.-14, No.6
December, 1969
- W.8. Withney, D.E. : Discrete Parts Assembly Automation -
An Overview A.S.M.E.-publication 78
W.A./DSC-11