

DETERMINAREA RIGIDITĂȚII UNOR ROBOȚI INDUSTRIALI

Ing. Mihaela SIMION, Șef lucr. dr. ing. Ioan Adrian BOTEAN,
Prof. em. dr. ing. Mircea BEJAN

Universitatea Tehnică din Cluj Napoca

REZUMAT. Construcția roboților industriali trebuie să răspundă cerințelor funcționale de realizare a cinematicii impuse (precizia de poziționare, viteza de deplasare), a preluării sarcinii în condiții dinamice, a unei bune fiabilități, a lucrului în medii nocive pentru om. Creșterea rigidității în lanțurile cinematice se poate obține prin eliminarea jocurilor și introducerea pretensionărilor la transmisii. Rigiditatea favorizează rapiditatea comenzilor și a acționărilor și precizia de poziționare. Articolul prezintă noțiuni vizând rigiditatea și posibilitatea determinării acesteia pe două tipuri de roboți industriali, robotul de tip SCARA și robotul industrial Fanuc LR Mate 100iB. S-au determinat experimental deplasările în unele puncte pentru două structuri de robot SCARA: robot 3D (prototip) și 2D (model plan) și analitic, pe baza legilor de similitudine, s-au calculat deplasările (și tensiunile) structurilor 3D, în funcție de valorile experimentale ale acestora obținute pentru modelul plan. Studiul numeric, pentru robotul industrial serial Fanuc LR MATE 100iB, s-a realizat în regim static, în scopul determinării deplasărilor (și tensiunilor von Mises maxime) pentru poziția luată în studiu la nivel global. Pentru realizarea studiului numeric finit se pleacă de la baza robotului, adăugând pe rând câte un modul din componența robotului, obținându-se în final, distribuția globală a deplasărilor (și a tensiunilor).

Cuvinte cheie: roboți industriali, rigiditate, deplasări, robotul de tip SCARA, robotul industrial Fanuc LR Mate 100iB.

ABSTRACT. Robots construction industry must respond to the functional achievement imposed on kinematics (precision positioning, speed), to take over the load in dynamic conditions, a good reliability, a work in environments which are harmful to humans. Increase stiffness the kinematic chains can be achieved through the elimination of the gaming and placing preloaders transmissions. Stiffness contributes to your keystrokes into the orders and the rapidity and precision positioning. Discusses issues to its rigidity and the possibility of determining on two types of industrial robots, SCARA-type robot and industrial robot Fanuc LR Mate 100iB. Have been determined experimentally in some points trips for two different robot SCARA robot: the prototype 3D and 2D (plane) and analytically, based on the laws of similarity, the trips were calculated (and tension) 3D structure, depending on the experimental values obtained for model of their plan. Numerical study for industrial robot Fanuc LR MATE 100iB serial, was static, in order to determine the movements (and maximum von Mises stresses) to the position taken in the global study. Numerical study on completion it is finished using the robot, adding one at a time from the robot mode, yielding to the speculations of movements (and tension).

Key words: industrial robots, stiffness/rigidity, movement, robot type SCARA, type robot Fanuc LR Mate 100iB. industrial.

1. GENERALITĂȚI

Roboții industriali (RI) sunt sisteme utilizate în procesul de producție în scopul realizării unor funcții de manipulare analoge cu cele realizate de mâna omului și conferă obiectului manipulat orice mișcare programată liber, în cadrul unui proces tehnologic ce se desfășoară într-un mediu specific. RI reprezintă un sistem integrat mecano-electrono-informațional care execută mișcări după un program flexibil, modificabil, în funcție de sarcinile de producție și de condițiile de mediu. Schema unei mașini inteligente este prezentată în figura 1. Un scurt istoric prezintă: ● 1938 – inginerul american Wenslei (Westinghouse Electric Manufacturing Co.) prezintă prima încercare de realizare a unui robot în concepție antropomorfă; ● 1940 – se menționează utilizarea primelor manipuloare sincrone pentru manevrarea substanțelor radioactive; ● 1959 –

la firma Unimotion Inc., inginerul și antreprenorul Joseph Engelberger construiește primul robot UNIMATE; ● 1968 – firma Kawasaki Heavy Ind. preia spre fabricație pe scară largă roboții de tip UNIMATE; ● 1982 – se pune în exploatare primul robot industrial românesc, REMT-1, la Electromotor Timișoara.

Structura de bază a oricărui RI, principalele componente ale structurii mecanice sunt: elementul efector, brațul și baza robotului. Sistemele de acționare ale RI au anumite particularități, dintre care: masa inertială, respectiv momentul de inerție propriu cât mai reduse; să asigure stabilitatea sistemului la eventuale perturbații externe; să nu fie generatoare de vibrații și oscilații neamortizate; să dezvolte un cuplu sau o forță motoare nominală mai mare decât suma celor rezistente, a celor de frecare, de energie; să prezinte o fiabilitate cât mai bună iar depanarea sau înlocuirea lor să fie ușoară.

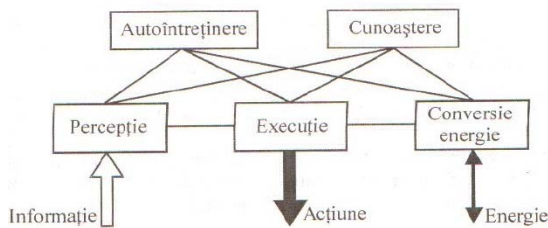


Fig. 1. Arhitectura unei mașini inteligente..

2. NOȚIUNI PRIVIND RIGIDITATEA

Construcția RI trebuie să răspundă cerințelor funcționale de realizare a cinematicii impuse (precizia de poziționare, viteza de deplasare), a preluării sarcinii în condiții dinamice, a unei bune fiabilități, a lucrului în medii nocive pentru om. Aceste cerințe determină folosirea unor elemente mecanice care introduc în locul frecării de alunecare frecarea de rostogolire și care permit totodată și o rigiditate mai bună, pe lângă forțe de frecare de două-trei ori mai mici. Creșterea rigidității în lanțurile cinematice se poate obține prin eliminarea jocurilor și introducerea pretensionărilor la transmisii. Ea favorizează rapiditatea comenzilor și a acționărilor și precizia de poziționare. De asemenea, condițiile arătate mai înainte impun construcții robuste, dar cu o masă proprie (în special a elementelor periferice) cât mai redusă. În mare măsură soluțiile constructive vor depinde de mărimea sarcinii manipulate, de tipul acționării și de amplasarea motoarelor de antrenare. În ansamblul roboților industriali, forțele de lucru determină deformații elastice, deformații determinate atât de partea metalică, cât și de lichidul de lucru.

Noțiunea de *rigiditate* este definită prin proprietatea pe care o au corpurile solide de a nu se deforma sub acțiunea sarcinilor exterioare. Proprietatea nu există riguros în realitate, dar e folosită pentru simplificarea studiului într-o primă aproximație, care uneori se dovedește a fi foarte satisfăcătoare. Dictionarele precizează:

RIGIDITATE *s.f.* 1. Starea a tot ce este rigid, lipsă de flexibilitate; întepeneală; redoare. ♦ Proprietate a unui corp de a nu se deforma sub acțiunea forțelor care acționează asupra lui. 2. Severitate excesivă; asprime; formalism. [Cf. fr. *rigidité*, lat. *rigiditas*].

În general, rigiditatea se întâlnește la piese mecanice sau structuri mecanice, cum ar fi prese deoarece poate influența negativ funcționarea acestora sau chiar a produselor finite (spre exemplu, în cazul roboților industriali o rigiditate redusă poate afecta precizia de lucru). Se întâlnesc:

1) *Rigidități statice* – când forța de deformare se aplică cu viteze reduse. Rigiditatea statică se definește ca fiind raportul dintre forța cu care este solicitat robotul (sau parte din acesta) și deformația δ ce rezultă sub acțiunea forței, pe direcția și suportul

acesteia, $C = F/\delta$. Dacă se iau în considerare deformațiile elastice δ_i ale diferitelor componente ale robotului, supuse în serie aceleași forțe F , se poate scrie:

$$\delta_1 = F/C_1; \quad \delta_2 = F/C_2; \quad \dots; \quad \delta_i = F/C_i,$$

deformația totală fiind $\delta = \Sigma \delta_i$.

Deci, în cazul legăturii în serie, rigiditatea totală în funcție de rigiditățile parțiale, C_i , este:

$$1/C = \Sigma 1/C_i,$$

rigiditățile elementelor în serie compunându-se ca rezistențele electrice montate în derivație sau ca și condensatorii montați în serie.

Pentru calculul rigidității elementelor așezate în paralel, scriind o ecuație de compunere a forțelor, $F_i = C_i \cdot \delta$, se obține:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_i = \Sigma C_i.$$

Precizia de lucru poate fi afectată și de deformarea elastică a produselor manipulate, astfel că rigiditatea ansamblului robot (de rigiditate C_r) – produs (de rigiditate C_p) va fi:

$$C = C_r \cdot C_p / (C_r + C_p)$$

2) *Rigidități normale* – când deformația elastică se produce în sensul de acționare a forței care o produce;

3) *După caracterul solicitării*, rigiditățile pot fi la încovoiere, la întindere sau compresiune și la torsiune, parametrii de definire a acestora fiind: EI_z la încovoiere, EA la solicitări axiale, și GI_p la torsiune.

3. DETERMINAREA RIGIDITĂȚII UNOR ROBOȚI INDUSTRIALI

Studiul rigidității unor roboți industriali a vizat robotul de tip SCARA și robotul industrial Fanuc LR Mate 100iB.

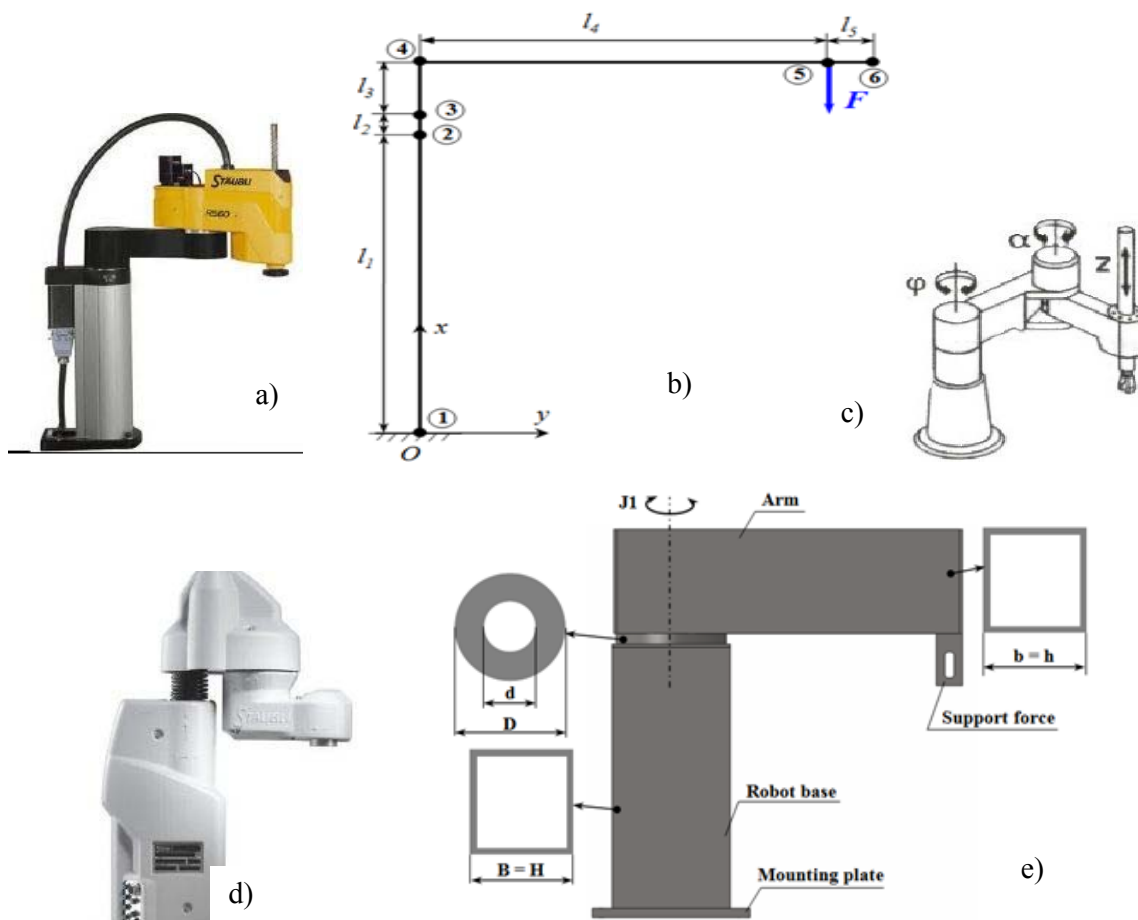
■ Roboții industriali tip SCARA (fig. 2) au fost realizați pentru prima dată la Universitatea Yamanashi din Japonia. Acronimul SCARA provine de la „Selective Compliant Articulated Robot Arm”. Roboții SCARA sunt roboți al căror mecanism generator de traiectorie are două cuple motoare de rotație cu axele paralele în plan vertical, iar a treia cuplă motoare este de translație pe o direcție paralelă cu cea a axelor cuplelor motoare de rotație. Avantajul folosirii acestor roboți se obține prin manipularea obiectelor cu greutate mai mare de 30 kg.

■ Robotul industrial Fanuc LR Mate 100iB (figura 3) este un robot de construcție serială cu cinci grade de libertate (rotații), acționat de motoare electrice fiind proiectat pentru a realiza sarcini elementare de tipul încărcare și descărcare, manipulare piese cu greutatea maximă de 5 kg. FANUC este un acronim pentru **F**actory **A**utomatic **N**umerical **C**ontrol. *FANUC Robotics America*, o filială deținută în întregi-

VARIAȚIILE VITEZEI VÂNTULUI ÎN ZONA PODIȘULUI CENTRAL AL REPUBLICII MOLDOVA

me de *FANUC Corporation din Japonia* (sediul central este la baza muntelui Fuji lângă lacul Yamanaka), este liderul industrial în robotică industrială, cu peste

100 000 de roboți instalați în America și 250 000 de roboți instalați la nivel mondial. Roboții au capacități variind de la 0,5 kg sarcină utilă până la 1350 kg.



Mărimile dimensionale cunoscute pentru construirea modelului:

$l_1 = 209,5$ mm; $l_2 = 7$ mm; $l_3 = 40$ mm; $l_4 = 207,5$ mm; $l_5 = 12,5$ mm; $B = H = 90$ mm;
 $b = h = 80$ mm; $D = 84$ mm; $d = 30$ mm.

Fig. 2. Roboți industriali tip SCARA:

a – robot RS60 SCARA; *b* – modul de rezemare și solicitare a robotului SCARA într-o manieră simplificată; *c* – mecanism de poziționare cu trei grade de libertate, care are în componență trei elemente cinematice și trei cuple cinematice; *d* – Robot RS20 SCARA produs de firma „Stäubli Faverges SCA” din Franța; *e* – modelul CAD.

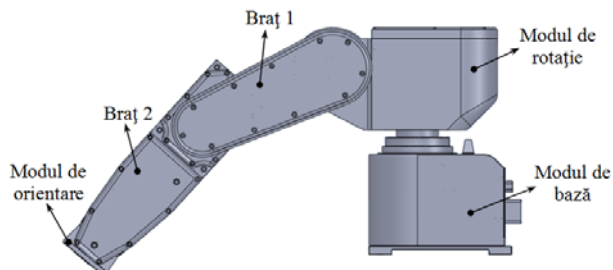


Fig. 3. Robotul Fanuc și elementele componente.

Pe lângă roboți industriali, FANUC Robotics oferă produse software și suport complet pentru formare, piese și servicii. Sediul companiei este situat în Rochester Hills, Michigan. *Fanuc Robotics Japan*, FANUC Limited, a fost înființată în 1972 și are peste 2000 de angajați. Fabrica utilizează peste 1000 de

roboți pentru producerea a peste 24 000 de roboți anual. Numărul total de roboți produși de Fanuc este de peste 200 000, Fanuc Robotics Japan fiind singura companie din domeniul roboților industriali care fabrică toate componentele majore ale roboților in-house. Fiecare detaliu hardware și software este ținut sub

control pe întreg lanțul de fabricație și asamblare; rezultatele sunt clienți satisfăcuți, funcționalitate și fiabilitate la nivele ridicate.

4. DETERMINAREA ANALITICĂ A DEPLASĂRILOR (ȘI TENSIUNILOR)

Notații: δ – deplasarea, [mm]; σ – tensiunea normală, [N/mm²]; F – forța, [N]; N – efort axial, [N]; E, G – modulul de elasticitate longitudinal (modulul lui Young), respectiv transversal, [N/mm²]; $l_{2,3}$ – lungimea elementului 2, respectiv 3, [mm]; A – aria secțiunii, [mm²]; I_z, I_p – moment de inerție axial, respectiv polar, [mm⁴]; W_z – modul de rezistență axial, [mm³]; p, m – indice utilizat pentru structura prototip (3D), respectiv model (2D).

■ În vederea studierii rigidității unui robot industrial tip SCARA, s-au determinat experimental deplasările în trei puncte pentru două structuri de robot SCARA: robot 3D, prototip și 2D, model plan (idem tensiunile, la modulul de bază a modelului plan). Analitic, pe baza legilor de similitudine, s-au calculat deplasările (și tensiunile) structurii 3D, în funcție de valorile experimentale ale acestora obținute pentru modelul plan. Lucrarea prezintă parte din aceste rezultate și deschiderea posibilităților de studiu și aplicare și asupra altor construcții inginerești.

Pentru studiul analitic s-au realizat structurile CAD a celor două modele (3D și 2D). În figura 2, *b* și *e* se prezintă cele două structuri SCARA, formate din două elemente (bază și braț), cu secțiuni și dimensiuni diferite, ceea ce înseamnă că modulul de rigiditate este diferit pentru fiecare element structural. Se cunosc: $B_p = H_p = B_m = 90$ mm; $b_p = h_p = b_m = 80$ mm; $t_p = 2,5$ mm; $D_p = 84$ mm; $d_p = 30$ mm; $t_m = 6$ mm.

Pentru acest tip de robot, utilizând teorema lui Castigliano [6], deplasarea după direcția forței aplicate, se poate determina cu relația:

$$\delta = F \left(\frac{k_2}{EI_{z2}} + \frac{k_3}{EI_{z3}} \right) \quad (1)$$

în care, k_1, k_2 sunt constante și au expresiile:

$$k_2 = l_2^2 \cdot l_3; \quad k_3 = \frac{l_3^3}{3} \quad (2)$$

Având în vedere relația (1) și utilizând principiul de similitudine dintre cele două modele (3D și 2D) exprimată în deplasări [6, 8], s-a obținut expresia:

$$\delta_p = \delta_m \cdot \frac{F_p}{F_m} \cdot \left(\frac{\frac{k_2}{E_p I_{z2p}} + \frac{k_3}{E_p I_{z3p}}}{\frac{k_2}{E_m I_{z2m}} + \frac{k_3}{E_m I_{z3m}}} \right) \quad (3)$$

Observație: Aplicând același raționament utilizat în cazul deplasărilor, tensiunile normale se pot calcula utilizând formula:

$$\sigma_p = \sigma_m \cdot \left(\frac{\frac{N_{2p}}{A_{2p}} + \frac{F_p \cdot l_3}{W_{z2p}}}{\frac{N_{2m}}{A_{2m}} + \frac{F_m \cdot l_3}{W_{z2m}}} \right) \quad (4)$$

Relațiile (3) și (4) permit determinarea deplasărilor în orice punct a structurii prototip, respectiv a tensiunilor normale pe elementul 2 a robotului, în funcție de valorile deplasărilor și tensiunilor determinate experimental a structurii model (2D).

■ Pentru robotul industrial serial Fanuc LR MATE 100iB (fig. 3), studiul numeric s-a realizat în regim static, în scopul determinării deplasărilor (și a tensiunilor von Mises maxime) pentru poziția luată în studiu la nivel global. Pentru efectuarea studiului numeric s-au utilizat rezultatele și, implicit diagramele de eforturi din [2, 3].

Deoarece structura de rezistență a robotului prezintă o secțiune asimetrică, complexă, îngreunând aplicarea relațiilor de calcul analitic uzuale, pentru determinarea deplasărilor (și tensiunilor) pe întreaga structură a robotului s-a realizat un studiu numeric în regim static, cu metoda Elementelor Finite (MEF), utilizând programul Ansys 12.1 (modulul de lucru - Static Structural).

Studiul numeric în regim static s-a realizat pe baza modelului CAD din figura 3 construit în programul SolidWorks, iar materialul din care este confecționată structura de rezistență a robotului (carcasa) este din aliaj de fontă, având următoarele caracteristici mecanice: ▪ densitatea materialului: $\rho = 7200$ kg/m³; ▪ modulul lui Young: $E = 1,1 \cdot 10^5$ N/mm²; ▪ coeficientul de contracție transversală (a lui Poisson): $\nu = 0,28$; ▪ limita de rupere la întindere, σ_{ri} : $\sigma_{ri} = 280$ N/mm²;

Pentru a se efectua studiul numeric s-a ținut seama de următoarele constrângeri și ipoteze simplificatoare: ▪ nu s-au luat în considerare cuplele de rotație, reductoarele și rulmenții acestora, precum și șuruburile de prindere ale capacelor; ▪ capacele și elementele structurale ale structurii robotului s-au considerat un singur corp; ▪ fixarea (încastrarea) robotului s-a realizat pe tălpile modulului de bază; ▪ robotul s-a încărcat cu forțele și/sau momentele corespunzătoare nodurilor numerotate cu 2, 3, 6, 7 și 8, reprezentând centrele de greutate ale motoarelor de acționare, la care se adaugă și greutatea de manipulare $F_3 = 50$ N; ▪ discretizarea s-a efectuat automat, alegându-se dimensiunea elementului finit de 30 mm, rezultând un număr de 170 241 elemente și 288 561 noduri.

Pentru realizarea studiului numeric finit se pleacă de la baza robotului, adăugând pe rând câte un modul din componența robotului, obținându-se în final, distribuția globală a deplasărilor (și a tensiunilor).

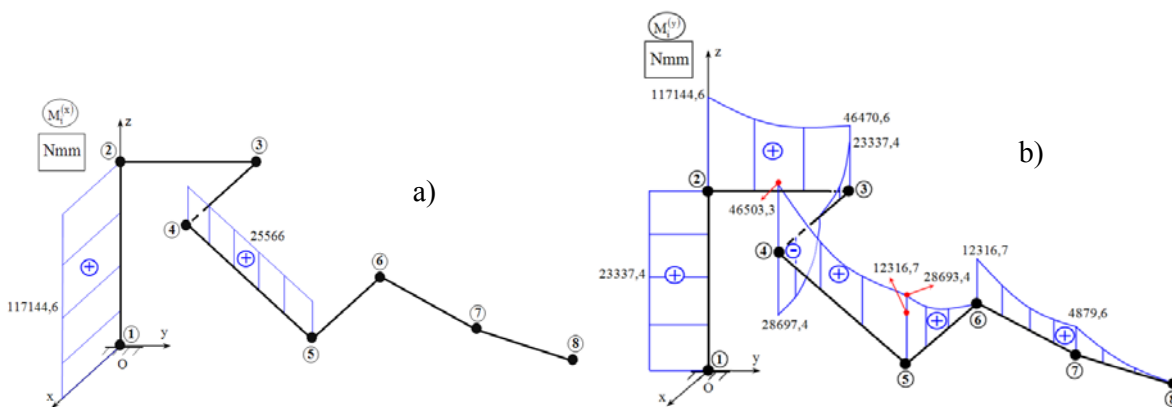


Fig. 4. Diagrame de eforturi:
a – momente de încovoire după axa x; b – momente de încovoire după axa y.

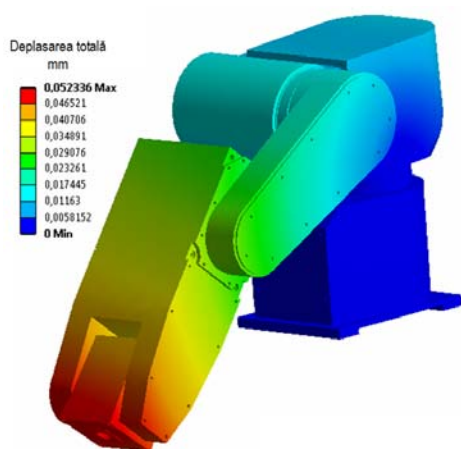


Fig. 5. Distribuția deformațiilor structurii de rezistență.

5. CONCLUZII

- Pentru ambele structuri (prototip (3D) și model (2D)), a robotului industrial tip SCARA (figura 6), deplasările s-au determinat în punctele notate cu

$P_i, i=1 \div 3$, fiind solicitate cu forțe diferite $F_i, i=1 \div 8$ [N]. Studiul experimental a deplasărilor s-a realizat prin metoda corelării digitale a imaginii (Dantec Dynamics).

Validarea rezultatelor experimentale s-a realizat cu metoda elementelor finite, utilizând programul Ansys 12. În figura 7 s-au reprezentat sub formă grafică variația deplasărilor în cele trei puncte, în funcție de forțele aplicate în cazul structurilor 2D, prin cele trei metode de investigare.

- S-a realizat un studiu analitic [3] pentru determinarea eforturilor, construindu-se apoi diagramele de eforturi pentru robotul industrial serial Fanuc LR Mate 100iB (parte prezentate în figura 4) și analiza numerică pentru determinarea stării de deformații (și tensiuni) a structurii de rezistență a robotului, considerându-se o poziție particulară de lucru.

Din diagramele de eforturi rezultă că valorile cele mai ridicate se obțin pentru momentele de încovoire după axa x (intervalul 1-2) și după axa y (intervalul 2-3), ce corespund modulelor de la bază și de rotație (figura 4, a, b).

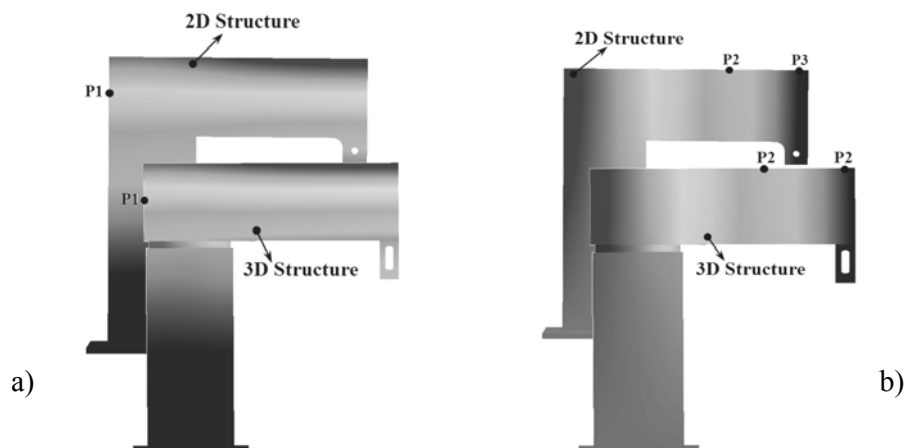


Fig. 6. Distribuția deplasărilor pentru structurile 2D și 3D a robotului industrial tip SCARA:
a – după axa x – punctul P1; b – după axa y – punctele P2, P3.

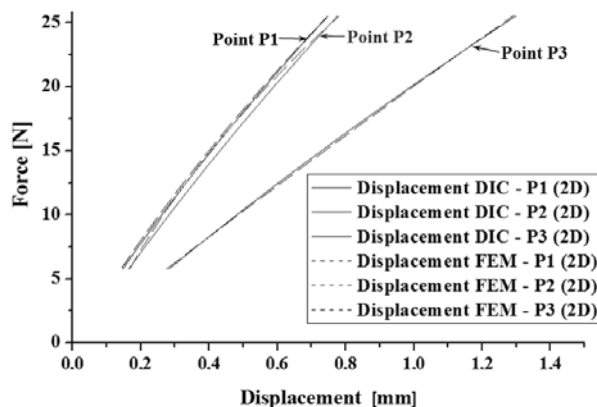


Fig. 7. Graficul deplasărilor structurii 2D.

Studiul numeric efectuat indică că valoarea cea mai ridicată a deplasării se obține în cazul modulului de rotație. Calculul de rigiditate vizează însă valoarea deplasării de la capătul liber a structurii de rezistență, atunci când robotul este solicitat de forța maximă de manipulare/lucru (figura 5). Robotul fiind proiectat pentru a lucra la precizii cât mai ridicate, valoarea deplasării obținută numeric poate afecta rigiditatea și implicit precizia de lucru a robotului, în cazul poziției particulare alese.

În cazul structurilor de rezistență a roboților industriali seriali, se constată că zonele maxim solicitate sunt cuplurile cinematice în care se regăsesc angrenaje cu roți dințate, lagăre și alte piese mecanice de legătură dintre modulele din lanțul cinematic al acestora (în studiile efectuate, cupla de rotație s-a „simbolizat” simplist printr-o piesă cu secțiune circulară).

Pentru obținerea unor date cât mai reale cu privire la starea de deformații (și tensiuni) pentru roboții industriali tip SCARA și Fanuc LR Mate 100iB, se vor realiza încercări experimentale și studii numerice în regim static și dinamic.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Simion, Mihaela, Botean, A.I., Bejan, M., *Utilizarea fotoelasticității în analiza stării de tensiuni pentru o structură de robot industrial. Considerații generale*, Știință și Inginerie, vol. 21, Editura AGIR, București, 2012, ISSN 2067-7138, pag. 621-628.
- [2] Simion, Mihaela, *Tensiuni și deformații în structura de rezistență a unui robot industrial serial*, Raport de Cercetare nr. 2, Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, iunie 2011.
- [3] Simion, Mihaela, Botean, A.I., Bejan, M., *Analytic study of efforts from the structure of a industrial serial robot 5R*, Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics, vol. 54, Issue 1, ISSN 1221-5872, pag. 225-228, 2011.
- [4] Simion, Mihaela, Botean, A.I., Bejan, M., *Studiul analitic și numeric al deplasărilor pentru o grindă articulată*, Știință și Inginerie, vol. 19, Editura AGIR, București, 2011, ISSN 2067 – 7138, pag. 657-666.
- [5] Botean, A.I., Simion, M., *Study of state of stresses using photoelasticity in case of an industrial robot SCARA*, Conferința Internațională 11th YSESM, 30 Mai–2 Iunie, Brașov, România, 2012.
- [6] Bejan, M., *Rezistența materialelor*, vol. 1, 2, ediția a V-a și a IV-a. Editura AGIR, București și Editura Mega, Cluj-Napoca, 2009.
- [7] Cloud, G., *Optical Methods in Experimental Mechanics – Part 30: Photoelasticity II – Birefringence in materials*, Experimental Techniques, pag. 13-16, 2008.
- [8] Dally, J.W., Riley, W.F., *Experimental stresses analysis*, Ediția a 3-a, ISBN 0-07-0152187, 1992.
- [9] *** tutoriale ANSYS 12.1
- [10] *** www.fanucrobotics.com
- [11] *** www.angelfire.com/ma/ameyavaidya/c_matrix.htm
- [12] *** www.micro-measurements.com

Notă. Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul „Studii doctorale în științe inginerești în scopul dezvoltării societății bazate pe cunoaștere - SIDOC”, contract: POSDRU/88/1.5/S/60078, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.”

Despre autori

Ing. **Mihaela SIMION**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Absolventă a Universității Tehnice din Cluj Napoca. Doctorand al Facultății de Mecanică – Departamentul de Inginerie Mecanică a Universității Tehnice din Cluj Napoca. Articole științifice în domeniul tezei.

Șef lucr. dr. ing. **Ioan Adrian BOTEAN**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Șef de lucrări în cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică (Rezistența Materialelor), Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. 1 lucrare didactică, unic autor, 15 articole publicate, autor unic; 9 articole publicate, autor principal; 23 articole publicate, coautor; director în 3 contracte de cercetare.

Prof. em. dr. ing. **Mircea BEJAN**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Profesor la Universitatea Tehnică din Cluj Napoca. Membru fondator, președintele Filialei Cluj a AGIR și membru al Consiliului Director al AGIR. Autor a numeroase cărți, studii și articole de specialitate publicate pe plan național și internațional.