



Universitatea
Transilvania
din Brașov

TEZĂ DE ABILITARE

Titlu: Modelarea și analiza dinamică a structurilor mecanice
de tip paralel cu jocuri și elemente elastice

Domeniul: Inginerie mecanică

Autor: Conf. Dr. Ing. Nadia Ramona CREȚESCU
Universitatea Transilvania din Brașov

BRAȘOV, 2025

CUPRINS

Mulțumiri	4
A1. Rezumat.....	5
A2. Summary	7
 B. Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	9
B1. Realizări științifice și profesionale	9
Introducere	9
 Capitolul 1: Stadiul actual al cercetărilor privind roboții paraleli de tip Delta	29
Capitolul 2: Modelarea și analiza dinamică a unui robot paralel Delta existent	36
2.1. Analiza robotului cu considerarea frecării în cuplele sferice.....	43
2.2. Analiza robotului cu elemente elastice	44
2.3. Analiza robotului cu jocuri în cuplele sferice	49
2.4. Analiza robotului cu frecări în cuplele sferice și elemente elastice	50
2.5. Analiza robotului cu frecări și jocuri în cuplele sferice	52
2.6. Analiza robotului cu jocuri în cuplele sferice și elemente elastice	53
2.7. Analiza robotului cu elemente elastice și frecări în cuplele sferice și elemente elastice	54
2.8. Concluzii.....	55
Capitolul 3: Analiza parametrică a efectului dinamic al jocurilor din cuplele sferice ale robotului paralel Delta.....	57
3.1. Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu jocuri în cuplele sferice superioare	61
3.2. Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu jocuri în cuplele sferice inferioare	67

3.3. Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu jocuri în cuplele sferice superioare și inferioare	71
3.4. Studiul aditivității efectului jocurilor în cuplele superioare și inferioare	75
3.5. Concluzii.....	83
Capitolul 4: Optimizarea dimensională a robotului paralel Delta	84
4.1. Analiza efectului diametrelor barelor asupra comportamentului dinamic al robotului paralel Delta	87
4.2. Analiza robotului cu elemente elastice și jocuri în cuplele sferice	95
4.3. Concluzii.....	127
 B2. Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei.....	130
 B3. Bibliografie	140

Mulțumiri

Teza de abilitare cuprinde cercetările din perioada de după susținerea publică a tezei de doctorat, mai exact perioada 2011-2025, și drept urmare țin să aduc mulțumiri celor care au contribuit la evoluția mea atât pe plan didactic, cât și de cercetare.

Mulțumiri deosebite aduc conducatorului de doctorat, domnului prof. dr. HC ing. Florea DUDIȚĂ, pentru tot sprijinul acordat de-a lungul elaborării tezei de doctorat, teză care mi-a deschis orizonturile în domeniul cercetării roboților paraleli.

De asemenea, doresc să aduc mulțumiri domnului prof. dr. ing. Grigore GOGU, pentru toate sfaturile competente primite de-a lungul timpului și pentru acordarea sprijinului necesar pentru a realiza experimente pe un robot paralel.

Mulțumiri speciale doresc să aduc domnului prof. dr. ing. Mircea NEAGOE, coleg care m-a ajutat și m-a susținut în evoluția mea academică, încă de la începutul carierei mele și până în prezent, fără de care nu aș fi reușit să ajung azi la acest nivel de performanță, atât pe plan didactic, cât și pe cel științific.

De asemenea, mulțumesc colegului prof. dr. ing. Mihai LATEȘ, pentru toată colaborarea pe plan didactic din această perioadă.

Mulțumiri țin să aduc și colegilor prof. dr. ing. Radu SĂULESCU și conf. dr. ing. Bogdan Gabriel BURDUHOS, pentru buna colaborare la nivel didactic și pe partea de cercetare științifică.

Doresc să le mulțumesc doamnelor prof. dr. ing. Codruța JALIU și prof. dr. ing. Luciana CRISTEA pentru colaborare și sfaturile competente pe care mi le-au dat de-a lungul timpului.

A1. Rezumat

Teza de abilitare prezintă rezultatele cercetărilor subsemnatei obținute după susținerea publică a tezei de doctorat, adică din perioada 2011-2025, cercetări realizate în principal în domeniul roboților paraleli, și în special asupra robotului paralel Delta. Aceste cercetări au urmărit stabilirea influenței elasticităților elementelor, a frecărilor și a jocurilor din cuplele sferice asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului Delta, precum și identificarea unei soluții geometrice optimizate ale unui astfel de robot paralel care să conducă la performanțe cinematice și dinamice mai bune.

În acest sens, cercetarea prezentată în teza de abilitare este orientată pe două direcții:

- identificarea efectelor elasticităților elementelor, frecărilor și jocurilor din cuplele sferice asupra comportamentului unui robot Delta existent, pe o traiectorie spațială reprezentativă din spațiul de lucru al acestuia;
- identificarea unei soluții optimizate a geometriei robotului Delta pe baza unor criterii cinematice și dinamice.

Prima direcție de cercetare urmărește verificarea efectului aditiv al elasticităților elementelor de tip bară, frecărilor și jocurilor din cuplele sferice ale robotului Delta. În acest sens, studiul a fost efectuat utilizând softul ADAMS, respectiv modulul ADAMS Autoflex pentru analiza cu elemente elastice, punând în evidență efectul acestora luat în considerare atât separat, cât și cumulat.

A doua direcție de cercetare abordează problematica identificării unei soluții optimizate din punct de vedere geometric a unui robot Delta, prin realizarea de modelări și simulări numerice în softul ADAMS. Analizele au fost efectuate considerând diametrul elementelor de tip bară ca variabilă independentă, în final identificând o variantă optimă a diametrului acestora. De asemenea, s-a mai urmărit identificarea unei soluții admisibile pentru jocurilor din cuplele sferice; în acest sens, au fost testate mai multe variante dimensionale și s-a identificat comportamentul cinematic și dinamic al robotului Delta.

Toate aceste cercetări sunt prezentate detaliat în capitolele tezei de abilitare.

În introducere sunt prezentate principalele structuri mecanice de tip roboți paraleli utilizați în diverse domenii (industrie, medicină etc.).

În primul capitol este prezentat un stadiu actual al cercetărilor efectuate asupra roboților paraleli de tip Delta, cu identificarea principalelor probleme tratate în diverse studii, de la modelări analitice și până la analiza efectelor elasticităților elementelor, atât analitic cât și prin simulări numerice utilizând diverse softuri.

Capitolul 2 este dedicat analizei efectului elasticităților elementelor, a frecărilor și a jocurilor din cuplele sferice asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta, evidențiind influența acestora atât luate separat, cât și împreună.

Capitolul 3 analizează efectului dinamic al jocurilor din cuplele sferice ale robotului paralel Delta. În acest sens, au fost considerate mai multe valori ale jocurilor în cuplele sferice superioare și inferioare.

Capitolul 4 prezintă o analiză a efectului modificării diametrului elementelor de tip bară ale robotului paralel Delta, dar și a efectului jocului din cuplele sferice asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta, în vederea identificării unei soluții geometrice optimizate a robotului Delta.

A2. Sumary

This habilitation thesis presents the research conducted by the undersigned following the public defense of the doctoral thesis, that is, during the period 2011-2025. The research was primarily conducted in the field of parallel robots, more specifically on the Delta parallel robot. This research aimed at determining the influence of link flexibility, as well as friction and clearances in spherical joints on its kinematic and dynamic behavior, as well as identifying an optimized solution for such a Delta parallel robot that would lead to better kinematic and dynamic performance.

The research presented in the habilitation thesis is oriented in two directions:

- Identifying the effects of link flexibility, frictions, and clearances in spherical joints on the kinematic and dynamic behavior of the robot;
- Identifying an optimized solution that would lead to better performance of the robot.

The first research direction aims to verify the additive effect of the bar-type link flexibility of the Delta parallel robot, frictions, and clearances in the robot's spherical joints. Thus, the analyses were performed using the ADAMS software, respectively the ADAMS Autoflex module for analysis with elastic elements, highlighting their effect, considered both separately and cumulatively.

The second research direction addresses the problem of identifying an optimized geometric solution of a Delta parallel robot, by performing modeling and numerical simulations in the ADAMS software. The analyses were performed by changing the diameter of the bar-type elements, identifying an optimal variant of their diameter. At the same time, another analysis was to identify an admissible optimal solution of the clearances in the spherical joints; therefore, several variants were tested to analyze the kinematic and dynamic behavior of the Delta parallel robot.

All these research results are presented in detail in the chapters of the habilitation thesis. The introduction presents the main mechanical structures of parallel robots used in various fields (industry, medicine, etc.).

The first chapter presents a current state of research conducted on Delta-type parallel robots, identifying the main problems addressed in various studies, from analytical modeling to the analysis of the effects of element elasticity, both analytically and through numerical simulations using various software.

Chapter 2 is dedicated to the analysis of the effect of link flexibility, friction and clearances in the spherical joints on the kinematic and dynamic behavior of the Delta parallel robot, highlighting their influence both separately and together.

Chapter 3 analyzes the dynamic effect of the clearance in the spherical joints of the Delta parallel robot. In this regard, several values of clearance in the upper and lower spherical joints were considered.

Chapter 4 presents an analysis of the effect of changing the diameter value of the bar-type elements of the Delta parallel robot, as well as the effect of the clearance in the spherical joints on the kinematic and dynamic behavior of the Delta parallel robot, in order to identify a geometrically optimized solution of the Delta robot.

B. Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

B1. Realizări științifice și profesionale

Introducere

Structurile mecanice sunt elemente fundamentale în industria modernă, având o dinamică accelerată datorită tehnologiilor tot mai avansate utilizate.

Structurile mecanice paralele (ale roboților paraleli) au o arhitectură cinematică unică, care conduce la proprietăți operaționale distincte în comparație cu structurile seriale.

Termenul "robot" a fost introdus pentru prima dată în 1921 de către dramaturgul ceh Karel Čapek, în piesa sa de teatru "R.U.R." (Rossum's Universal Robots) [1]. Cuvântul provine din "robota", un termen ceh care reprezintă "muncă forțată" sau "sclavie" [1]. Inițial, Čapek a definit robotul ca o mașină care, la nivel vizual, seamăna cu o ființă umană [1]. Această definiție timpurie scoate în evidență o preocupare pentru aspectul său și capacitatea de a prelua sarcini umane, inclusiv pe cele dificile sau repetitive.

Pe măsura ce tehnologia a avansat, definiția a căpătat o orientare către industrie, Asociația Industriilor Robotice (RIA) descriind un robot ca un manipulator multifuncțional, reprogramabil, proiectat să poată muta materiale, piese, unelte sau dispozitive specializate prin mișcări programate pentru îndeplinirea unor sarcini variabile.

Această evoluție, de la o mașinărie cu aspect uman la un instrument industrial automatizat, a condus la dezvoltarea unor sisteme robotice specializate, precum roboții paraleli, care prioritizează performanța și utilitatea în detrimentul formelor umane.

Roboții paraleli sunt sisteme mecanice complexe, cu o structură cinematică în buclă închisă, compuși dintr-o bază fixă și o platformă mobilă, conectate între ele prin două sau multe lanțuri cinematice independente [3].

Interesul pentru manipuloarele paralele are rădăcini adânci în istorie, explorarea lor teoretică începând cu mult înainte de materializarea lor practică la scară largă [4].

Primele mențiuni ale problemelor teoretice asociate cu structurile paralele apar în secolul al XVII-lea, fiind atribuite arhitectului englez Sir Christopher Wren în anul 1645 [4]. Ulterior, în

secolul al XIX-lea și la începutul secolului XX, ingineri și matematicieni, precum Cauchy (1813) sau Lebesgue (1867), au publicat lucrări cu scopul de aprofundare și înțelegere a mecanismelor paralele [4].

Prima aplicație practică cunoscută a unui manipulator paralel nu a apărut în domeniul industrial, așa cum era de așteptat, ci în cel al divertismentului. În 1931, James E. Gwinnett a obținut un brevet de invenție pentru o platformă de mișcare bazată pe un mecanism paralel sferic, concepută pentru industria de divertisment [4]. Această implementare timpurie este cu remarcabilă datorită capacității de a crea mișcări controlate complexe, cum ar fi cele ale simulatoarelor de zbor sau ale diverselor atracții din parcuri.

Acest pas, deși timpuriu, a fost semnificativ pentru evoluția ulterioară a manipuletoarelor paralele. Astfel, în 1942, Willard L. V. Pollard a brevetat ceea ce este considerat la scară largă primul robot paralel industrial destinat vopsirii prin pulverizare, robot cu cinci grade de mobilitate. Cu toate acestea, el nu a fost niciodată construit, dar reprezintă un salt conceptual esențial în aplicarea cinematicii paralele la sarcinile industriale [5].

Diferențele structurale dintre roboții paraleli și cei seriali conduc la o serie de avantaje și dezavantaje, care au ghidat dezvoltarea și aplicarea lor de-a lungul timpului.

Avantajele roboților paraleli:

- **Rigiditate și stabilitate:** structura în buclă închisă și capacitatea de distribuție a sarcinii conferă roboților paraleli o rigiditate și stabilitate semnificativ mai mari decât în cazul roboților seriali.
- **Precizie:** rigiditatea superioară se traduce direct printr-o precizie de poziționare și o repetabilitate îmbunătățite, esențiale pentru aplicațiile care necesită un control precis al mișcării.
- **Viteză de lucru mare:** un avantaj de proiectare este posibilitatea de a monta actuatorii pe baza fixă. Acest lucru minimizează inerția părților mobile, permițând roboților paraleli să atingă viteze și accelerații mari.
- **Eficiență energetică:** cu o inerție mai mică și mai puține componente grele care necesită accelerare, manipuletoarele paralele conduc la o eficiență energetică mai mare.

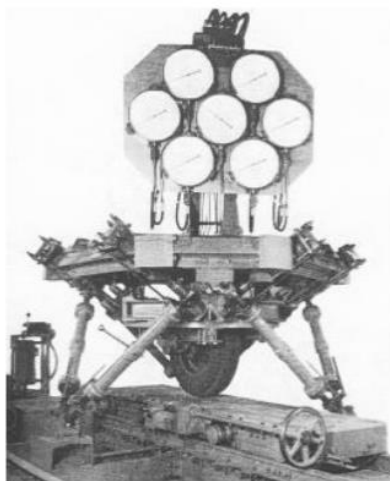
Dezavantajele roboților paraleli:

- **Spațiu de lucru limitat și apariția singularităților:** spațiul de lucru al unui robot paralel este semnificativ mai mic și adesea mai complex, neliniar, comparativ cu cel al manipuletoarelor seriale, iar apariția pozițiilor singulare pot conduce la reducerea acestuia.
- **Cinematică și control complexe:** arhitectura mecanică în buclă închisă și prezența articulațiilor pasive (neacționate) sunt caracterizate prin modele cinematice și dinamice neliniare, ceea ce conduce la algoritmi de control mai complecși.
- **Complexitate în proiectare:** proiectarea mecanică complexă, care implică un număr mai mare de corpuri rigide și articulații, necesită toleranțe de fabricație mai stricte, ceea ce poate conduce la o asamblare mai complexă a acestora și implicit la costuri de producție mai mari.

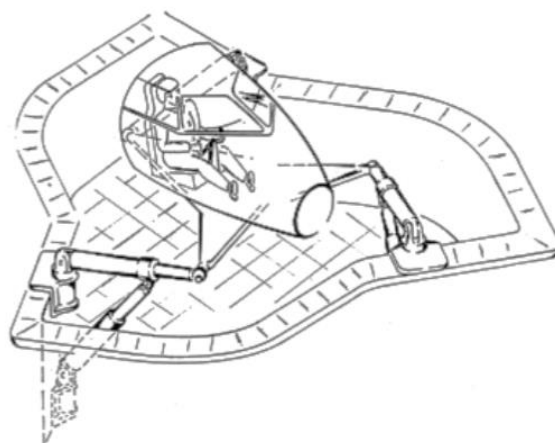
Printre cele mai cunoscute arhitecturi de roboți paraleli sunt Platforma Stewart, robotul paralel Delta, robotul paralel Triglide sau robotul paralel Orthoglide, fiecare dintre ei având utilizări și caracteristici diferite. În continuare, se vor analiza succint acești roboți, cu evidențierea aplicativităților acestora.

A. Platforma Stewart (Hexapod)

Platforma Stewart a fost dezvoltată de V.E. Gough din Marea Britanie, un inginer auto de la fabrica Dunlop Tyres, utilizată pentru prima dată în 1954. A fost dezvoltată ca o „Mașină Universală de Testare a Anvelopelor” sau „Instalație Universală” [6]. Recunoașterea la scară largă a apărut atunci când D. Stewart a publicat o lucrare despre acesta în anul 1965 la Instituția Inginerilor Mecanici din Marea Britanie, propunând aplicarea sa ca platformă pentru un simulator de zbor (fig. 1.1) [6].



(a)



(b)

Fig. 1.1. Platforma Stewart : (a) varianta originală [7, 8]; (b) prima schiță utilizată pentru platforma de zbor [9].

Inginerul american Klaus L. Cappel a dezvoltat independent un design similar de hexapod în 1962 (fig. 1.2), pe care l-a brevetat în 1967 și ulterior a construit primele simulatoare comerciale de mișcare hexapodale octaedrice [6].

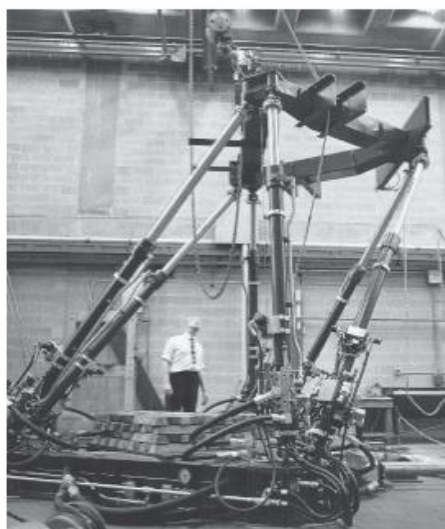


Fig. 1.2. Primul simulator de zbor bazat pe un hexapod octaedral al lui K.L. Cappel [7].

Platforma Gough-Stewart este un sistem robotic paralel cu 6 grade de mobilitate, compus dintr-o platformă mobilă conectată la o bază fixă prin șase actuatoare liniare [10-12]. Aceste actuatoare, de obicei hidraulice sau electrice, permit modificarea individuală a

lungimii, permițând platformei deplasări cu trei grade de mobilitate pentru poziționare (X, Y, Z) și trei pentru orientare (tangaj, ruluu, girație) [10-12]. Dincolo de utilizarea sa inițială în testarea anvelopelor, platforma Stewart a găsit rapid o aplicație semnificativă în simulatoarele de zbor. Până în 1962, Redifon dezvoltase simulatoare care încorporau această tehnologie pentru aeronave, precum Boeing 707 și Douglas DC-8. Datorită versatilității sale, această platformă a fost ulterior adaptată în chirurgia ortopedică, în special în dezvoltarea cadrului spațial Taylor pentru corectarea deformărilor osoase [11].

Platforma Stewart este utilizată pentru simulări realiste pe cele șase axe, având o sensibilitate ridicată a celor 6 actuatoare liniare și beneficiind și de integrarea senzorilor, precum giroscopice și accelerometre [10].

Performanțele acestor platforme sunt remarcabile, precum:

- **Precizie de poziționare:** poate atinge o precizie de $\pm 100 \mu\text{m}$ în configurația standard, cu opțiuni de personalizare care pot reduce eroarea până la $\pm 25 \mu\text{m}$ [10].
- **Precizie unghiulară:** oferă o precizie unghiulară de $0,2^\circ$ în modul standard, care poate fi îmbunătățită la $0,1^\circ$ prin personalizare [10].
- **Viteză ridicată:** poate ajunge la 40 mm/s în configurația standard și până la 80 mm/s în variante personalizate [10].
- **Sarcină utilă mare:** capacitatea de sarcină variază de la 12 kg (standard) până la 150 kg în configurații personalizate [10].

Platforma Stewart, datorită avantajelor sale, are aplicabilitate într-o multitudine de sectoare, precum:

- **Aerospațial și apărare:** simulatoare de zbor, structuri spațiale, dispozitive de poziționare de înaltă precizie (telescoape) (fig. 1.3).
- **Medical și reabilitare:** chirurgie ortopedică (cadrul spațial Taylor, fixatoare externe), medii de reabilitare asistată de calculator (CAREN), testare biomedicală (studii spinale). În fig. 1.4 este prezentat un minirobot paralel de tip Stewart utilizat în medicină.
- **Auto și transporturi:** simulatoare de conducere (fig. 1.5), mașini de testat anvelope, mentenanță vehicule, construcții navale, construcții de poduri.
- **Producție și testare:** tehnologia mașinilor-unelte (hexapode), testarea materialelor și structurilor (propagarea fisurilor, simulări seismice), sisteme de compensare a mișcării.

- **Divertisment și simulare:** animatronica, tauri mecanici.
- **Cercetare și robotică avansată:** poziționare de înaltă precizie (antene satelit), robocrane (manipulatoare acționate prin cablu), cercetare subacvatică, simulare cutremure etc.

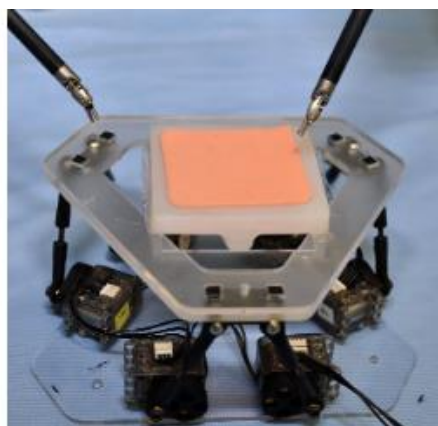


(a)



(b)

Fig. 1.3. Utilizarea platformei Stewart la: (a) un radiotelescop cosmic [13]; (b) un simulator de zbor de la Lufthansa [13].



(a)



(b)

Fig. 1.4. Utilizarea unei platforme în miniatură de tip Stewart (a) care simulează mișcările anatomice în timpul operațiilor cu robotul da Vinci și modelul CAD al acestuia (b) [14].



Fig. 1.5. Utilizarea unei platforme de tip Stewart în domeniul auto pentru un simulator de mișcare [15].

B. Robotul paralel Delta

Un alt robot paralel foarte cunoscut și utilizat la scară largă este robotul paralel Delta, alcătuit dintr-un cadru fix (bază) și brațele sale paralele, conectate la o platforma mobilă prin intermediul articulațiilor sferice acționate de actuatore rotative.

Acesta are un design ingenios, având paralelograme înglobate în brațele sale, ceea ce conduce doar la mișcări de translație ale end-efectorului, asigurând o mișcare liniară precisă și o eficientizare a controlului mișcării. Designul acestuia include amplasarea tuturor actuatorelor pe platforma fixă, ceea ce permite ca brațele robotului să poată fi realizate din materiale compozite ușoare, motiv pentru care robotul paralel Delta poate atinge valori ridicate ale vitezelor și a accelerațiilor pe traiectorie.

Parcursul comercial al robotului Delta a început în 1987, când compania elvețiană Demarex a achiziționat o licență de la EPFL și a început producția în mod special pentru industria ambalajelor [16]. Demarex s-a impus cu succes ca un jucător major pe această piață în creștere, vânzând în cele din urmă aproximativ 500 de roboți Delta la nivel global [17].



Fig. 1.6. Utilizarea roboților Delta în: (a) industria de asamblare [18]; (b) industria de ambalare [19].

Robotul paralel Delta este proiectat pentru a realiza mișcări rapide și precise în spațiu, cu o gamă mare de viteze; acesta poate fi utilizat în aplicații precum preluarea și plasarea obiectelor, asamblarea (fig. 1.6.a), ambalarea, inspecția vizuală (fig. 1.6.b), în domeniul farmaceutic sau alimentar (fig. 1.7), medicină (fig. 1.8), dar și în domeniul divertismentului, cum ar fi în jocurile video sau simulatoare.

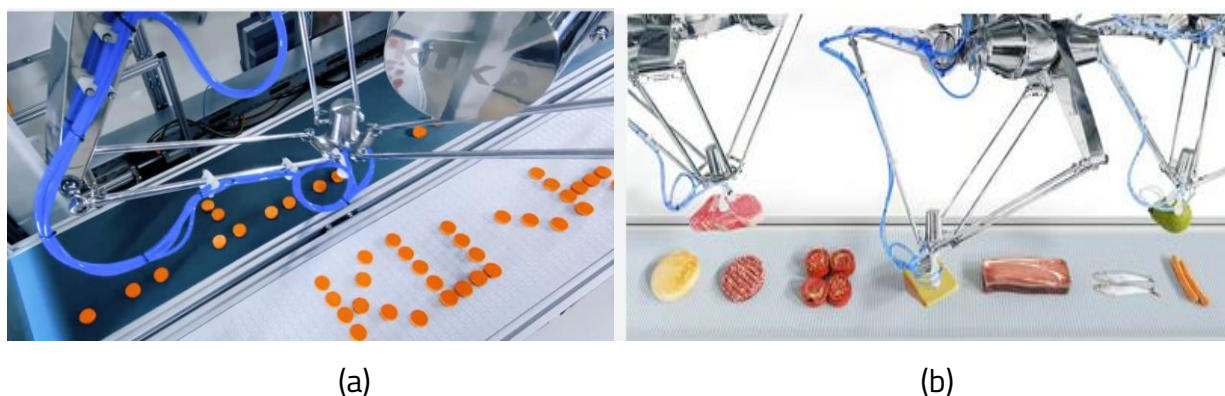


Fig. 1.7. Utilizarea roboților Delta în industria: (a) farmaceutică [20]; (b) alimentară [21]

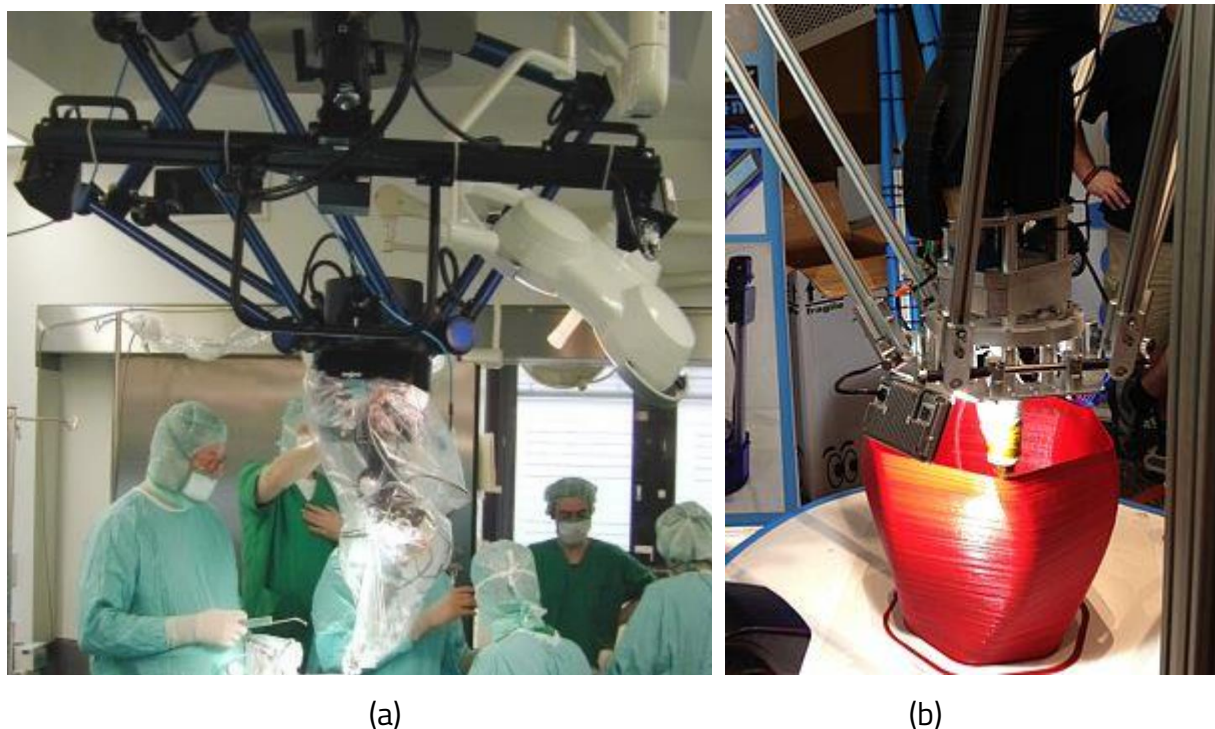


Fig. 1.8. Utilizarea roboților Delta în: (a) chirurgie [22]; (b) domeniul imprimantelor 3D [23]

O abordare a acestui tip de roboți paralel se regasește în [24], unde o analiză comparativă rigid-elastic a fost analizată, iar în [25] o analiză completă a tuturor efectelor ce poate influența comportamentul acestui tip robot a fost anaizată (frecări și jocuri în cuplele sferice, dar și elasticitățile elementelor supple).

C. Robotul paralel Tricept

Dezvoltat de Karl-Erik Neumann în 1987, Tricept include o structură cinematică paralelă semnificativă, fiind un exemplu concludent de mașină cinematică hibridă paralel – serială [26]. Dezvoltarea roboților hibridi precum Tricept reprezintă o evoluție strategică în robotică, depășind conceptul tradițional a soluțiilor pur seriale sau pur paralele, pentru a optimiza o gamă mai largă de criterii de performanță.

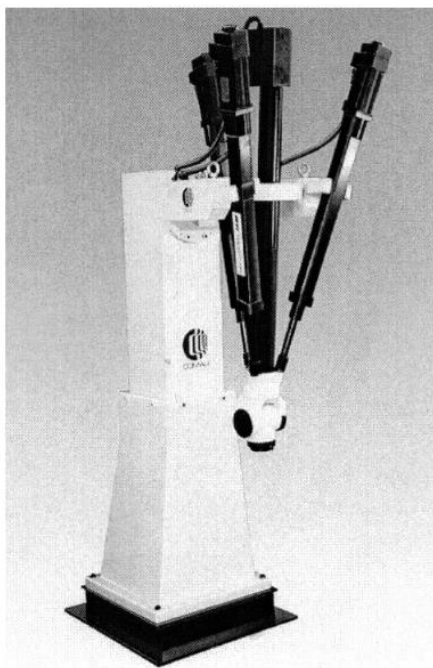


Fig. 1.9. Robotul paralel Comau Tricept HP1 [26].

"Tricept" se referă de fapt la o familie de roboți, regăsindu-se atât variante cu 6 grade de mobilitate (DOF), cât și cu 5 grade de mobilitate, pentru nevoi specifice de aplicație.

Varianta cu 6 DOF: o configurație comună, exemplificată de Comau Tricept HP1 (fig. 1.9), include o structură paralelă cu 3 DOF combinată cu un braț sferic cu 3 DOF [26, 27]. Această configurație îi oferă robotului șase grade de mobilitate (trei de translație și trei de rotație), permițându-i să atingă orice poziție și orientare în spațiul său de lucru.

Varianta cu 5 DOF: alte modele Tricept, cum ar fi Tricept 805 de la Neos robotics (fig. 1.10) sau anumite versiuni LOXIN PKM Tricept (fig. 1.11.a), sunt proiectate cu o structură paralelă cu 3 DOF completată de un braț cu 2 axe (2 DOF). Aceasta rezultă într-un total de cinci grade de mobilitate (trei de translație și două de rotație), ceea ce este suficient pentru multe sarcini de prelucrare și asamblare care nu necesită o orientare completă 3D. Combinația între un braț cu 2 DOF și unul cu 3 DOF influențează direct capabilitățile de orientare ale robotului. Astfel, producătorii pot adapta designul robotului paralel Tricept pentru a satisface cerințe specifice ale pieței, obținând un echilibru între complexitate, cost și cerințe funcționale.



Fig. 1.10. Robotul paralel Tricept 805 de la Neos robotics [28].



(a)



(b)

Fig. 1.11. Robot paralel Tricept : (a) dezvoltat de LOXIN [27]; (b) utilizat la sudare prin frecare (FSW) [29].

Printre avantajele cel mai importante ale roboților Tricept se numără:

- **Rigiditate ridicată:** de exemplu, Tricept 805 [28] este remarcat pentru capacitatea sa de a aplica o forță considerabilă de 45 kN în jos, un aspect esențial pentru operațiuni grele. Rigiditatea superioară a roboților Tricept se traduce direct printr-o precizie și stabilitate a procesului ridicată, în special în procesele de prelucrare prin așchiere.

- **Performanță dinamică îmbunătățită:** prin montarea motoarelor cât mai aproape sau chiar pe baza fixă, se reduc semnificativ masele mobile, ducând la o performanță dinamică ridicată. De exemplu, la robotul paralel LOXIN Tricept T9000 este cunoscut pentru performanța sa dinamică ridicată, conducând la timpi reduși între operațiuni, crescând randamentul producției.

- **Precizie și acuratețe:** roboții Tricept sunt concepuți pentru o precizie ridicată a poziției. Pentru a îmbunătăți și mai mult precizia și repetabilitatea, modelele moderne Tricept, cum ar fi LOXIN Tricept T9000, încorporează de asemenea și sisteme sofisticate de măsurare directă.

- **Sarcină utilă ridicată:** roboții Tricept sunt adaptați pentru manipularea sarcinilor utile mari cu precizie ridicată, fiind o consecință directă a rigidității ridicate a cadrului. Această caracteristică îi face deosebit de valoroși pentru aplicațiile industriale care necesită aplicarea unei forțe substanțiale, cum ar fi operațiunile de asamblare care implică forțe mari, în special în industria automobilelor.

- **Modularitate și flexibilitate:** Tricept este proiectat ca un sistem robotic modular. De exemplu, Tricept-IV este identificat ca fiind un robot hibrid reconfigurabil [29], demonstrând potențialul pentru modificări pentru a se potrivi diferitelor nevoi operaționale.

Versatilitatea și performanța superioară a roboților Tricept îl fac o soluție preferată într-o gamă largă de aplicații industriale, precum:

- **Prelucrarea de mare viteză:** roboții Tricept sunt utilizați pe scară largă ca mașini-unelte cinematice paralele (MUCP) pentru operațiuni de prelucrare de mare viteză. Aceasta include aplicații de prelucrare, precum ar fi frezarea de mare viteză, debavurarea și prelucrarea lemnului.

- **Operațiuni de asamblare:** robotul Tricept, în special modele precum Comau Tricept HP1 [26], este disponibil comercial și își găsește aplicația principală de lucru pentru asamblare, de exemplu în industria automobilelor, unde este adesea necesară aplicarea robustă și precisă a forței pentru asamblarea componentelor.

- **Procese de fabricație avansate:** pe lângă prelucrarea generală și asamblare, roboții Tricept sunt utilizați în tehnici mai specializate și avansate de fabricație, valorificând precizia, rigiditatea și capabilitățile lor dinamice. Aceste aplicații includ tăierea cu laser, tăierea cu jet

de apă, sudarea în puncte și sudarea cu laser, și în mod remarcabil, sudarea prin frecare (FSW), un proces de îmbinare în stare solidă care necesită forță și precizie ridicate - dezvoltat și implementat cu succes pe Tricept 805.

D. Robotul paralel Orthoglide

Robotul paralel Orthoglide de tip 3TRPaR (3 Translații, Rotație, Paralelogram, Rotație) este un robot trimobil, cu 3 intrări și 3 ieșiri, care are 3 mișcări cuplate; este compus dintr-o platformă mobilă (fig. 1.12 și fig. 1.13) conectată la bază prin 3 lanțuri cinematice de tip paralelogram, compuse din câte 5 elemente și câte 6 cuple de rotație nemotoare.

Numele de Orthoglide vine de la faptul că cuplele de translație motoare sunt montate ortogonal, fiind un robot paralel dezvoltat de laboratorul IRCCyN, Nantes, Franța în anii 2000-2001.



Fig. 1.12. Robotul paralel Orthoglide [30].

Robotul Orthoglide se distinge prin performanțe superioare, în special în aplicațiile de prelucrare de mare viteză.

Rigiditatea structurală mare conduce la performanțe dinamice îmbunătățite, inclusiv viteze de avans ridicate (până la 100 m/min) și accelerații considerabile (de la 1 la 5g), esențiale pentru aplicațiile de prelucrare de mare viteză [31].

Orthoglide oferă, de asemenea, o precizie ridicată, iar simplitatea lanțurilor sale cinematice cu design simetric conduce la reducerea costurilor de fabricație [32].



Fig. 1.13. Robotul paralel Orthoglide în 5 axe –machetă digitală [33].

Robotul Orthoglide se concentrează pe mișcarea de translație cu 3 axe, oferind un spațiu de lucru cubic regulat și performanțe uniforme. Astfel, Orthoglide prioritizează precizia și uniformitatea în mișcarea de translație, în timp ce Tricept oferă o gamă mai largă de mișcări (translație și orientare) prin arhitectura sa hibridă. Astfel, alegerea între aceste două arhitecturi depinde strict de cerințele specifice ale aplicației.



Fig. 1.14. Robotul paralel Orthoglide in 5 axe semindustrial pentru operații de prelucrare [33].

Deși Orthoglide este optimizat pentru prelucrare, roboții paraleli în general, și prin extensie variantele Orthoglide, pot fi aplicate în diverse alte industrii:

- **Asamblare și prelucrare:** pentru sarcini care necesită forțe mari de inserție, cum ar fi în industria auto (fig. 1.14).
- **Pick-and-place:** aplicații de mare viteză.
- **Sudură:** inclusiv sudură cu laser și jet de apă.
- **Reabilitare medicală și chirurgie:** datorită preciziei și capacității de a gestiona interacțiunea cu mediul.
- **Alte aplicații:** debavurare.

Roboții prezentați sunt cei mai reprezentativi roboți paraleli utilizați la scară largă în diverse domenii. Dintre aceștia, se remarcă în mod deosebit robotul paralel **Delta**, cu caracteristici superioare, făcându-l preferabil în mai multe domenii de utilizare, de la industria de prelucrare sau asamblare (datorită vitezei și preciziei ridicate cu care operează), dar și în domenii mult mai pretențioase din punct de vedere al preciziei de lucru, cum ar fi domeniul medical.

Un alt avantaj al acestora este viteza și accelerația mare la care pot lucra, făcându-i ideali în aplicații industriale, precum asamblare sau ambalare.

Printre dezavantaje se numără spațiul de lucru limitat datorat interconectării în paralel a lanțurilor cinematice, dar și o modelare matematică mai complexă, ce conduce uneori la imposibilitatea obținerii de modele matematice analitice, fiind posibilă doar utilizarea unor modele rezolvate numeric (de exemplu, prin metoda Newton-Raphson). Un alt dezavantaj este costul ridicat de achiziționare și de întreținere.

Metode de modelare a roboților paraleli

Metodele de modelare (geometrică, cinematică, dinamică) pot fi atât analitice, cât și numerice.

Modelarea cinematică poate fi directă sau inversă. Problema cinematicii directe constă în determinarea poziției și orientării efectorului final (platforma mobilă) în spațiu, precum și a vitezelor și accelerațiilor acestuia, cunoscând configurația articulațiilor motorizate și parametrii geometrici ai robotului.

Pentru roboții paraleli, rezolvarea cinematicii directe este în general complexă și adesea conduce la soluții multiple.

Există mai multe metode pentru rezolvarea cinematicii directe, printre care [34]:

- **Metoda operatorilor omogeni:** această metodă utilizează matrice 4×4 pentru a reprezenta poziția și orientarea fiecărui element al robotului în raport cu un sistem de referință.
- **Metoda geometrică:** se bazează pe relațiile geometrice și trigonometrice directe între elementele robotului pentru a determina poziția și orientarea platformei mobile.
- **Metoda cinematică:** implică utilizarea matricei Jacobi, care exprimă legătura dintre viteza platformei mobile și vitezele din spațiul articular. Cinematica directă poate fi obținută prin integrarea numerică sau analitică a ecuațiilor vitezei, derivate din cinematica inversă.

Problema cinematicii inverse are ca soluție configurația articulațiilor motorizate (deplasări, viteze și accelerații) necesară pentru a atinge o poziție și orientare dorită a efectorului final.

O particularitate a roboților paraleli este că problema cinematicii inverse este, în general, mult mai simplă de rezolvat în comparație cu cea a roboților seriali.

Metode de rezolvare a cinematicii inverse include [35]:

- **Metoda geometrică:** utilizează relațiile geometrice directe pentru a calcula deplasările unghiulare sau liniare din cuple necesare pentru a atinge poziția și orientarea dorită a platformei mobile.
- **Metoda operatorilor omogeni:** similar cu abordarea directă, dar implică inversarea matricelor de transformare pentru a obține soluțiile pentru deplasările articulare.
- **Metoda matricei Jacobiene:** inversarea acestei matrici permite determinarea vitezelor articulațiilor necesare pentru o mișcare specifică a platformei mobile.
- **Metode de programare numerică:** conțin algoritmi iterativi pentru rezolvarea ecuațiilor neliniare sau a sistemelor de ecuații, cum ar fi de exemplu metoda Newton-Raphson.

Modelarea dinamică a roboților paraleli conduce la înțelegerea comportamentului lor sub influența forțelor și a maselor, fiind esențială pentru proiectarea sistemelor de control.

Obiectivul principal al modelării dinamice este calcularea forțelor generalizate din articulațiile motorizate (forțele motoare) în funcție de mișcările relative ale acestora (deplasări, viteze și accelerații relative), luând în considerare proprietățile inerțiale ale robotului. Modelele dinamice sunt adesea deduse în ipoteze simplificatoare, cum ar fi articulații fără frecare sau deformații elastice și elemente cu rigiditate perfectă. Cu toate acestea, pentru aplicații de înaltă performanță, aceste simplificări pot fi insuficiente, necesitând modele mai complexe care să includă fenomene reale.

Există două abordări principale pentru modelarea dinamică: metoda Lagrange-Euler și metoda Newton-Euler, fiecare cu particularitățile și etapele ei caracteristice.

Ipoteza corpului rigid, deși simplificatoare și utilă pentru modelele inițiale, este adesea insuficientă.

Flexibilitatea elementelor, jocurile din cuple sau frecările afectează semnificativ precizia de poziționare, stabilitatea sistemului și comportamentul dinamic, introducând vibrații sau oscilații neașteptate.

Pentru a aborda aceste aspecte, se recurge la modelare avansată:

- **Ipoteza corpului elastic/deformabil:** aceasta necesită modele matematice complexe, cum ar fi modelele cu elemente finite (FEM), pentru a descrie comportamentul elastic al materialelor și a estima deformările și forțele asociate. O astfel de modelare permite o reprezentare mai realistă a comportamentului robotului în condiții de sarcină și viteză ridicate.

- **Interacțiuni complexe:** modelarea trebuie să țină cont de interacțiunile complexe dintre mișcările decuplate și deformabilitatea elementelor, care se pot influența reciproc, conducând la fenomene dinamice neașteptate.

- **Validare experimentală:** datorită complexității și variabilității comportamentului sistemului, validarea experimentală a modelelor dezvoltate este esențială pentru a asigura consistența și acuratețea rezultatelor. Aceasta implică teste de laborator și în condiții reale pentru a calibra și a confirma validitatea modelelor.

O altă modalitate de a modela, simula și valida comportamentul cinematic și dinamic al roboților paraleli, se referă la utilizarea de instrumente software avansate. O gamă variată de software-uri sunt utilizate pentru modelarea și simularea roboților paraleli:

- **MATLAB/Simulink (cu Simscape Multibody):** acest mediu este considerat unul dintre cele mai rapide și eficiente instrumente pentru simularea roboților paraleli. Permite modelarea structurii robotului prin diagrame bloc, facilitând reprezentarea componentelor fizice, sinteza controlerelor și simularea performanței în buclă închisă a sistemelor complexe.

- **ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems):** un software de simulare numerică multifizică, utilizat pe scară largă pentru validarea modelelor dinamice. Studiile arată o concordanță excelentă între rezultatele obținute cu ADAMS și cele analitice, confirmând acuratețea modelelor.

- **MAPLE:** un alt software puternic de calcul simbolic, folosit pentru dezvoltarea și validarea modelelor cinematice și dinamice analitice, conducând la rezultate analitice care pot fi validate prin simulări numerice.

O altă abordare privind analiza roboților paraleli se concentrează pe sinteza structurală și dimensională combinată pentru a optimiza roboții paraleli. Scopul este de a îmbunătăți performanța robotului în funcție de criterii specifice, cum ar fi siguranța, capacitatea de

răspuns și eficiența energetică. Acest lucru implică găsirea celor mai bune dimensiuni pentru un design existent, și chiar identificarea de soluții noi.

Arhitectura roboților paraleli conferă o rigiditate, precizie și dinamică superioară, făcându-i ideali pentru aplicații de înaltă performanță. Cu toate acestea, beneficiile vin la pachet cu provocări semnificative, precum complexitatea cinematicii directe, spațiul de lucru limitat și prezența singularităților.

Modelarea detaliată, în ipotezele simplificatoare ale corpului rigid și ale cuplelor ideale, este esențială în modelarea cinematică și dinamică a roboților paraleli. Simplitatea relativă a cinematicii inverse, completată de abordări dinamice precum metodele Lagrange-Euler și Newton-Euler, permit calculul rapid al comenzilor actuatorilor și o analiză aprofundată a comportamentului robotului.

Instrumentele software avansate permit proiectarea, validarea și optimizarea eficientă a roboților, reducând costurile și timpul de dezvoltare, iar direcțiile de cercetare actuale se concentrează pe optimizarea structurală și dimensională și integrarea inteligenței artificiale.

O astfel de analiză detaliată a unor familii de roboți paraleli, în care modelarea analitică este combinată cu simulări numerice ale unui model CAD obținut în ADAMS, este prezentată în [36], pentru o structură paralelă în care s-a analizat efectul elasticităților elementelor de tip bară asupra comportamentului cinematic și dinamic.

De asemenea, o analiză similară este prezentată în [37, 38], pentru o altă structură mecanică de tip paralel utilizându-se de asemenea softul ADAMS, iar în [39,40] este prezentată o analiză dinamică a unei structuri mecanice de tip paralel cu simulări în ADAMS.

O altă variantă de analiză este de a utiliza instrumente de realitate virtuală pentru a simula comportamentul unei structuri mecanice de tip paralel. Astfel, în [41] este prezentată o astfel de simulare a unei structuri mecanice de tip paralel utilizând softul SOLIDWORKS (structură ce poate fi utilizată și în medicină ca și domeniu de aplicabilitate).

În cadrul acestei teze de abilitare este abordat un alt tip de robot paralel, și anume robotul paralel Delta. În continuare, se va analiza în detaliu acest tip de robot paralel, luând în considerare spre analiză un exemplu concret de robot Delta comercial.

Teza de abilitare este structurată pe 4 capitole:

- **Capitolul 1** este dedicat stadiului actual al cercetărilor roboților paraleli de tip Delta, privind modelarea și simularea comportamentului cinematic și dinamic, cu și fără considerarea frecărilor și jocurilor din cuple, a elasticităților elementelor cinematice.
- În **capitolul 2** este analizat efectul elasticităților, a jocurilor și a frecărilor din cuplele sferice asupra comportamentului cinematic și dinamic al unui robot paralel de tip Delta.
- **Capitolul 3** prezintă o analiză a erorilor în ceea ce privește comportamentul cinematic și dinamic al robotului Delta cu diverse diametre ale barelor paralelogramelor din structura robotului, dar și cu diverse valori ale jocurilor din cuplele sferice.
- **Capitolul 4** prezintă o optimizare geometrică a robotului paralel Delta analizat, prin modificarea diametrelor elementelor de tip bară ale robotului paralel Delta, dar și prin luarea în considerare a efectului jocului din cuplele sferice asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta; toate acestea au rolul de a identifica o soluție geometrică optimizată a robotului paralel Delta analizat.

Capitolul 1

Stadiul actual al cercetărilor privind roboții paraleli de tip Delta

Robotul paralel Delta a fost inventat de către profesorul Reymond Clavel [42] la începutul anilor 1980 (1987) la Institutul Federal de Tehnologie din Lausanne (EPFL) din Elveția.

Numele "Delta" vine de la forma sa geometrică, care constă în brațe paralele dispuse sub forma literei grecești delta (Δ). Acest design paralel permite robotului să fie rigid, să lucreze la viteze și accelerații mari, dar și să poată manevra mase relativ mari (în comparație cu masa lui totală).

Roboții paraleli de tip Delta au cunoscut o evoluție semnificativă în ultimii ani, fiind din ce în ce mai utilizați în numeroase aplicații industriale, cu precădere datorită vitezelor și accelerațiilor mari la care lucrează cu precizie ridicată pe traiectorie.

Datorită avantajelor sale în ceea ce privește performanțele sale, robotul paralel Delta a devenit tot mai utilizat în industrie și continuă să fie un subiect de cercetare și dezvoltare important în domeniul roboților paraleli, fiind analizat atât din punct de vedere a modelării cinematice și dinamice, dar și din punct de vedere al spațiului de lucru, al controlului, precum și privind elasticitățile elementelor sau a vibrațiilor ce apar în sistem în timpul funcționării.

O abordare în ceea ce privește modelarea robotului paralel Delta, o combinație între metode analitice și metode numerice, este prezentată în [43], unde este obținut analitic un model cinematic direct, iar modelul invers este dezvoltat în softul ADAMS.

O modelare analitică directă și inversă a unui robot paralel Delta existent la Institutul Tehnologic din Lausanne este prezentată în [44]. Robotul Delta analizat conține o placă triunghiulară articulată prin intermediul unor cuple sferice, precum și 3 biele articulate prin cuple sferice ale căror axe formează un triunghi echilateral.

O modelare cinematică și dinamică a robotului paralel Delta este prezentată în [45], modelul dinamic fiind obținut prin metoda Newton-Euler. Se propune un prim model numit

"în cele două spații", deoarece parametrizarea se face atât în spațiul de lucru, cât și în spațiul articular. Modelul propus, cu mici modificări, se poate aplica și altor structuri de tip paralel.

O altă abordare în ceea ce privește modelarea dinamică inversă este prezentată în [46]. Modelarea Euler-Lagrange este utilizată pentru dezvoltarea modelului analitic, validat cu succes pe o structură paralelă de tip Delta existentă pe piață (Delta D3-1200 de la SIPRO).

O modelare cinematică și dinamică a unui robot paralel de tip Delta utilizând softul ADAMS este prezentată în [47], model obținut fiind validat pe un prototip din aluminiu având o rigiditate structurală bună la o masă relativ scăzută.

Cu scopul de a implementa un control precis în timp real pentru un robot Delta, în lucrarea [48] s-a elaborat un model dinamic simplificat și ușor de calculat folosind ecuațiile lui Lagrange de speța I. Modelul analitic a fost validat prin simulări numerice în ADAMS.

O abordare bazată pe principiul lucrului virtual a unui robot paralel de tip Delta, cu actuatore liniare, este prezentată în [49], stabilind un model recursiv direct al variației în timp real a forțelor și puterilor actuatorelor, model utilizabil pentru controlul automat al robotului analizat.

În ceea ce privește spațiul de lucru al acestui tip de robot paralel, care de altfel este un aspect relativ sensibil în aplicații practice, au fost efectuate mai multe analize de-a lungul timpului. Astfel, un nou concept de robot este prezentat în [50], care să permită obținerea unui spațiu de lucru mărit. Abordarea de proiectare, care ia în considerare raza de oscilație a unei articulații sferice și care duce la o distribuție eficientă a indicelui de condiționare, arată că proiectarea propusă poate evita punctele sau zonele de singularitate.

O altă abordare, în care se analizează spațiul de lucru și capacitatea de încărcare a unui robot paralel de tip Delta reconfigurabil (prin ajustarea simultană și simetrică a lungimii lanțurilor cinematice), este prezentată în [51]. Astfel, este prezentată o analiză numerică a variației formei și a volumului spațiului de lucru, dar și a spațiului de încărcare a robotului, reconfigurarea permițând manipularea de sarcini diferite în același punct al spațiului de lucru.

O analiză a spațiului de lucru, dar și a singularităților unei familii de roboți paraleli Delta, utilizând instrumente algebrice este prezentat în [52]. În cadrul acestei analize sunt folosite funcții ale bibliotecii SIROPA, pentru a putea duce la o estimare despre complexitatea reprezentării singularităților atât în spațiul de lucru, cât și în cel articular.

Tot o analiză a spațiului de lucru al roboților paraleli de tip Delta este prezentată și în [53], obținându-se o soluție analitică pentru determinarea spațiului de lucru și chiar o optimizare dimensională utilizând metoda multiplicatorilor lui Lagrange. Această soluție poate fi extinsă și la alte tipuri de roboți paraleli, cum ar fi de exemplu platforma Gough-Stewart.

O metodă pentru sinteză dimensională optimă a unui robot paralel de tip Delta este prezentată în [54], folosind algoritmi genetice. Astfel, metoda folosită s-a dovedit a fi eficientă în găsirea dimensiunilor optime ale robotului Delta care să aibă cel mai mic spațiu de lucru ce conține o regiune predefinită în spațiu.

Un studiu ce evaluează precizia pozițională a robotului Delta este prezentat în [55], luând în considerare diferite combinații de toleranțe pentru a estima eroarea de poziție. Abordarea propusă este utilă și în analiza altor roboți paraleli spațiali; în plus, oferă o metodă utilizabilă pentru simularea manipulărilor complexe.

O abordare a controlului în spațiul de lucru al robotului paralel Delta este prezentată în [56]. O metodologie de control bazată pe senzori pentru a proiecta controlul unui robot paralel de tip Delta este prezentat în [57], obținându-se datorită controlului, parametrii geometrici optimi ai robotului.

Un algoritm de control de liniarizare a feedback-ului unui robot Delta în coordonate operaționale este prezentat în [58], fiind prezentată utilizarea acestuia pe un prototip folosit pentru o demonstrație de șah. Rezultatele astfel obținute pot fi utile în dezvoltarea de roboți cu masă, inerție și frecare mai reduse, utili în aplicații care presupun contact și coliziune, precum asamblarea.

Aplicarea unui controller proporțional-integrativ-derivativ (PID) de ordin fracționar cu strategie de control al momentelor aplicate este descrisă în [59]. Pentru identificarea modelului dinamic și validarea strategiilor de control a fost utilizat un model de cosimulare SOLIDWORKS/MSC-ADAMS/MATLAB, rezultatele arătând o reducere semnificativă a efectului perturbațiilor.

Un controler robust de tip back-stepping a fost propus în [60], cu scopul de a compensa perturbațiile, a maximiza performanțelor de urmărire și a reduce șocurile din actuatorile robotului paralel Delta.

Un model de control și identificare simultană pentru sisteme MIMO cu variație în timp a fost implementat pe un robot Delta cu 3 grade de libertate pentru operațiuni de pick-and-place, garantând stabilitatea în buclă închisă [61]. Rezultatele obținute atât în simulare, cât și în implementare practică relevă performanțe remarcabile pentru metoda sugerată în comparație cu alți algoritmi, ca de exemplu PID sau metoda adaptivă.

Un algoritm de control adaptiv și un control cu filtru de comandă pentru problemele de urmărire în spațiul de lucru al manipuloarelor cu articulații flexibile este prezentat în [62]. Astfel, problemele sistemelor dinamice incerte și complexitatea derivatelor de ordin superior sunt rezolvate cu succes deoarece controlul cu filtru de comandă nu necesită feedback, se folosește de tehnica Lyapunov pentru a demonstra stabilitatea sistemelor (cu buclă închisă).

În ceea ce privește modelarea elasticității elementelor roboților paraleli în general și a roboților paraleli de tip Delta, în literatura de specialitate se regăsesc mai multe abordări.

De exemplu, în [63] s-a vizat analiza dinamică a mecanismelor paralele spațiale cu legături flexibile care suferă deformări mari. Pentru a face față neliniarităților geometrice care apar din cauza deformărilor mari, au fost prezentate două formulări bazate pe CRFEM (co-rotational finite element method) și RFEM (rigid finite element method), ambele metode fiind implementate pe un robot paralel de tip Delta. La final, se concluzionează că în analiza dinamică a mecanismelor paralele flexibile, formularea RFEM este mai eficientă în ceea ce privește costul computațional, reducând timpul de simulare cu 31-46%.

Un model dinamic pentru o structură paralelă planară cu elemente flexibile este prezentată în [64]. Modelele legăturilor flexibile sunt obținute utilizând metoda Lagrange, iar metoda Craig Bampton este utilizată pentru a reduce ordinul modelului și asamblarea modelul dinamic al platformei. De asemenea, un algoritm de control de mișcare PID este utilizat pentru a efectua simularea dinamică a sistemului.

O analiză a comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta cu luarea în considerare a elasticităților elementelor de tip bară este prezentată în [25], folosind softul Adams pentru simulare, respectiv modulul Adams AutoFlex pentru modelarea elementelor elastice.

În [65] se prezintă o modelare și o simulare a unui robot Delta cu elemente flexibile. Modelarea flexibilității elementelor este realizată prin aplicarea metodei elementului finit,

stabilind un element de tip grindă cu mișcări de translație și rotație pe un cadru de referință flotant, unde se presupune că deformările legăturilor sunt mici. Ecuațiile cu element finit ale robotului formează un set de ecuații diferențiale liniare cu timp variabil, astfel încât acestea pot fi rezolvate cu ușurință prin integrări numerice.

O metodologie pentru analiza dinamică structurală a unui robot paralel Delta folosind softurile SOLID EDGE și ANSYS 11, ținând cont de forțele dinamice de inerție care intervin în model, este prezentată în [66]. Această metodologie permite selectarea celui mai bun motor, cu cel mai mic consum de energie, cea mai mare eficiență în raportul greutate-putere pentru a reduce costurile, permițând astfel optimizarea structurii mecanice a robotului în ceea ce privește materialele, geometria și costurile de fabricație.

Câteva soluții noi de echilibrare statică prin sisteme elastice a roboților paraleli Delta sunt prezentate în [67], o soluție de echilibrare complete cvasi-exactă și una aproximativă; rezultatele obținute conduc la scăderi ale momentului maxim de antrenare de aproximativ 20 de ori față de versiunea neechilibrată.

O abordare de reducere a consumului de energie a unui robot Delta echipat cu elemente elastice utilizat în aplicațiile de imprimare 3D este prezentată în [68]. Economia de energie (de până la 50%) se realizează prin introducerea și optimizarea arcurilor liniare montate pe robot în diferite configurații.

O metodă de proiectare a traiectoriilor pentru detectarea jocurilor excesive ale articulațiilor sferice pasive ale unui robot DELTA pe baza fenomenului ca formă de undă a momentului de acționare este prezentată în [69]. Dacă astfel de traiectorii pot fi proiectate pentru toate articulațiile pasive, problema identificării jocurilor poate fi convertită în problema cu o singură variabilă necunoscută (reducerea ordinului). Pe baza acestei ipoteze, în această lucrare s-a propus o metodă de proiectare a traiectoriilor țintă pentru detectarea jocurilor excesive în articulațiile sferice.

O altă problemă abordată în cadrul analizelor roboților paraleli în general și a celor de tip Delta în particular, este cea a calibrării.

Robotul Delta cu sistem de viziune poate controla automat efectorul final pentru a prehensa cu precizie obiecte în mișcare pe banda transportoare. Stabilirea relației de mapare între spațiul caracteristicilor imaginii și spațiul de lucru al robotului formează un circuit închis

pentru legătura transformațională între coordonata robotului, coordonata camerei și coordonata benzii transportatoare. Calibrarea sistemului de viziune este o problemă de bază a cercetării și implementării viziunii artificiale. Rețelele neuronale artificiale (ANN) care au capacitate de învățare, capacitate adaptivă și capacitate de aproximare a funcției neliniare pot stabili relația neliniară dintre punctele spațiale și punctele pixel pentru a finaliza calibrarea precisă a sistemului de viziune. Precizia de calibrare, capacitatea de generalizare și spațiul de calibrare al algoritmului influențează precizia de prehensare a robotului. Prin urmare, în [70] este prezentată o nouă tehnică de calibrare pentru sistemul de viziune al robotului Delta. Algoritmul combină ANN cu tehnologia de calibrare a sistemului de viziune Faugeras. Experimentele au dovedit că acest algoritm are o precizie de calibrare și o capacitate de generalizare mai ridicate în comparație cu algoritmul de calibrare convențional, precum și o viteză de convergență mai rapidă în comparație cu structura convențională a rețelei neuronale artificiale în cazul unei precizii de calibrare ridicate.

O abordare a calibrării robotului paralel Delta este prezentată și în [71], prin utilizarea a două metode de calibrare, intitulate Model 54 și Model 24. Model 24 ia în considerare doar erorile de poziție a end-efectorului, pe când Model 54 ia în considerare de asemenea și deviațiile de la paralelism între bază și end-efector.

În [72] sunt prezentate analiza sensibilității și calibrarea cinematică a unui robot paralel Delta modificat. Influența variațiilor legate de componentele manipulatorului și parametrii geometrici asupra preciziei de mișcare, inclusiv mecanismul paralelogram, este studiată prin metoda variațională. Procesul de calibrare a fost efectuat împreună cu un tracker laser pentru a măsura pozițiile efectorului final, pentru a identifica parametrii prin utilizarea metodei de minimizare a celor mai mici pătrate urmărind minimizarea reziduurilor pătratice dintre pozițiile prezise și cele măsurate.

O altă problemă analizată în cadrul studiului roboților paraleli de tip Delta este cea a vibrațiilor. De exemplu, planificarea traiectoriei este generată din condiția de limitare a vibrației robotului Delta [73]. În acest sens, se construiește un model elastodinamic al robotului Delta bazat pe metoda KED (Kineto-Elastic-Dynamic). În al doilea rând, planificarea traiectoriei se realizează folosind funcția polinomială în spațiul de operare, iar influența sa asupra momentului de ieșire al celor trei motoare și deformația elastică a platformei mobile

este analizată. În final, o traiectorie optimă cu vibrație minimă este rezolvată în spațiul de operare, rezultatele arătând că traiectoria optimă poate reduce eficient deformația elastică a platformei mobile.

După cum se poate observa din analiza efectuată, robotul paralel Delta este unul din cei mai studiați roboți paraleli de pe piață. Analizele efectuate sunt diverse, de la analize privind modelarea cinematică și dinamică a robotului, până la analize privind spațiul de lucru al robotului, echilibrarea statică, controlul, calibrarea, elasticitatea elementelor, jocurilor din cuple, sau analiza vibrațiilor ce apar în sistem.

În continuare, studiile prezentate în cadrul acestei teze sunt concentrate pe analiza efectelor elasticităților elementelor de tip bară erorilor pe traiectorie și a momentelor motoare, dar și a efectelor jocurilor și a frecărilor din cuplele sferice. De asemenea, o altă direcție a acestei teze este de a identifica o soluție optimizată a dimensiunilor robotului paralel Delta în vederea limitării erorilor apărute pe traiectorie și a erorilor momentelor din cuplele motoare.

Având în vedere faptul că este un robot care lucrează la viteze și accelerații mari cu precizie ridicată, în simulările efectuate se va căuta identificarea unei traiectorii care să permită atingerea de viteze și accelerații mari (cât mai apropiate de cele maxim posibile) într-un interval scurt de timp.

Având în vedere cercetările efectuate la teza de doctorat, de unde a rezultat o validare a modelelor analitice cu modelările și simulările numerice efectuate cu ajutorul softului ADAMS, cercetarea actuală se va axa doar pe modelări și simulări ADAMS, fără o modelare analitică în prealabil efectuată.

Capitolul 2

Modelarea și analiza dinamică a unui robot paralel Delta existent

Robotul ales spre analiză este un robot existent pe piață, și anume robotul paralel Delta SIAX D3 1600 [74].

Efectul flexibilității elementelor, frecărilor și jocurilor din cuple poate fi studiat numeric prin dezvoltarea, într-o primă etapă, a unui model CAD al robotului analizat, utilizând de exemplu softul CATIA, urmat în a doua etapă de analiza în ADAMS. Deoarece ADAMS nu permite cu ușurință crearea de elemente cu forme complexe, s-a decis dezvoltarea modelului CAD în CATIA și apoi exportarea corpurilor 3D (în format IGES) în softul ADAMS. Astfel, se poate obține în ADAMS un model CAD care să reflecte cât mai exact proprietățile robotului fizic existent.

În această analiză se consideră studiul de caz al unui robot paralel Delta Siaux D3-1600 (fig. 2.1.a) [74]. Modelul său CAD simplificat (fără motoare), la scara 1:1, a fost reprezentat în softul CATIA (fig. 2.1.b) și apoi transferat în ADAMS (fig. 2.1.c).

Robotul Delta Siaux D3-1600 este un robot cu trei grade de mobilitate (3-DOF), efectorul final executând trei translații independente. Este compus dintr-o platformă fixă (0) și o platformă mobilă (4), interconectate prin trei brațe, A, B și C, fiecare dintre ele cu un element de acționare (1) conectat la bază printr-o cuplă motoare (R). Fiecare braț are un lanț cinematic de tip paralelogram cu două elemente flexibile (2 și 3) și patru cuple sferice pasive (S_{2k1} , S_{2k2} and S_{3k1} , S_{3k2} , unde $k = A, B, C$ —fig. 2.1.d). Cele trei brațe sunt distribuite echilateral (fig. 2.1.e) în raport cu sistemul global de coordonate ($X_0Y_0Z_0$) al robotului, având originea în punctul O (fig 2.1.d). Robotul Delta are atașată la efectorul final (4) o sarcină utilă în formă de cilindru (5) cu masa de 5 kg. Punctul caracteristic P este originea sistemului de coordonate mobil al efectorului final și parcurge o traiectorie spațială stabilită pentru a atinge viteza și accelerația maximă, conform valorilor specificate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Robotul paralel Delta SIAX D3-1600: caracteristici principale.

Parametru	Valoare
Masă totală	80 kg
Sarcină maximă	5 kg
Viteza maximă a end-efectorului	8 m/s
Accelerația maximă a end-efectorului	120 m/s ²

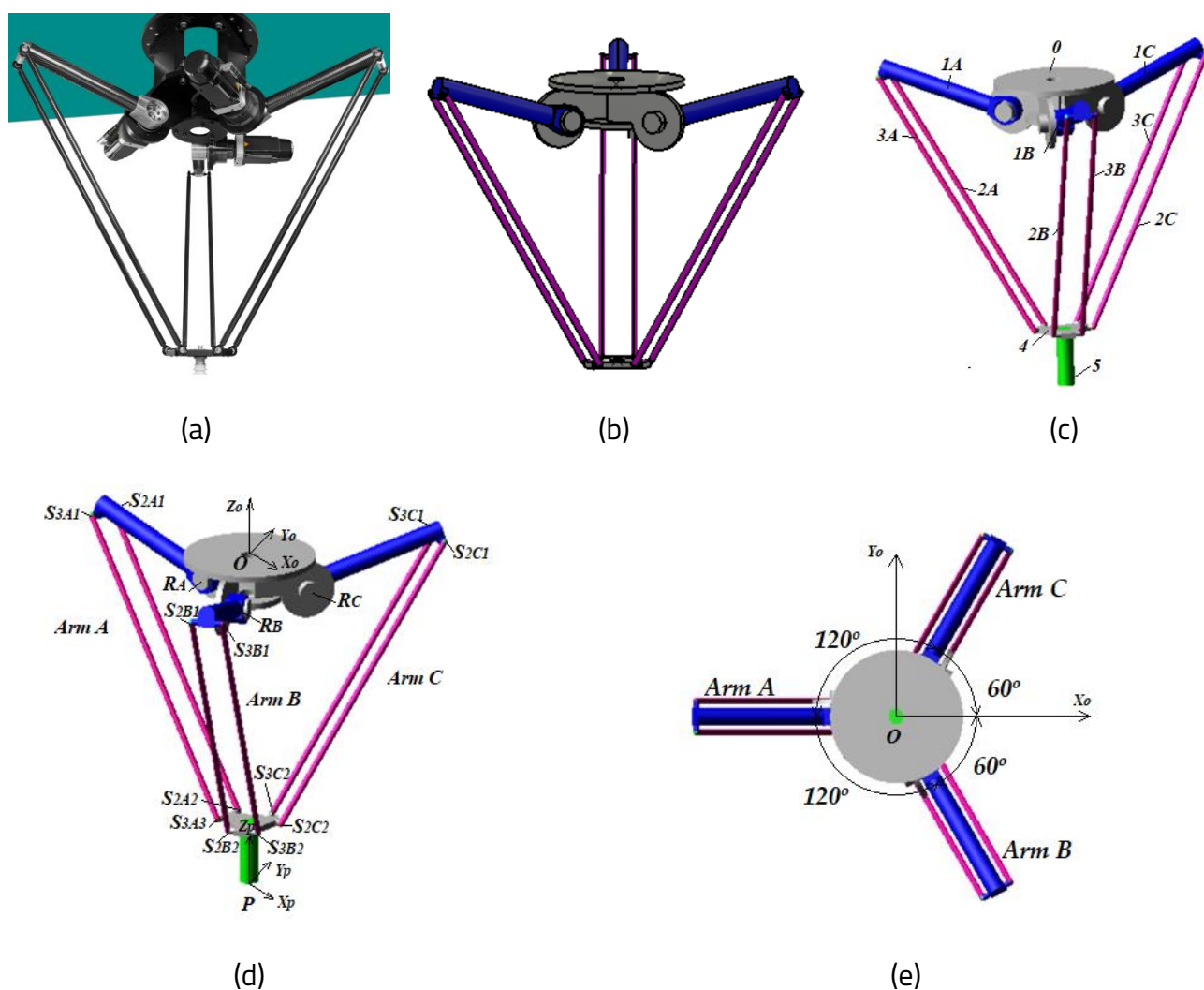
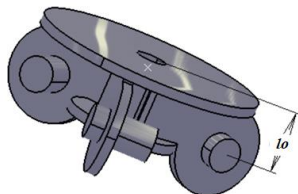
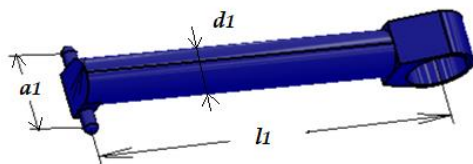
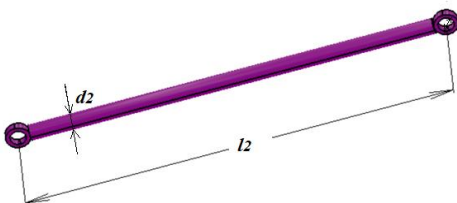
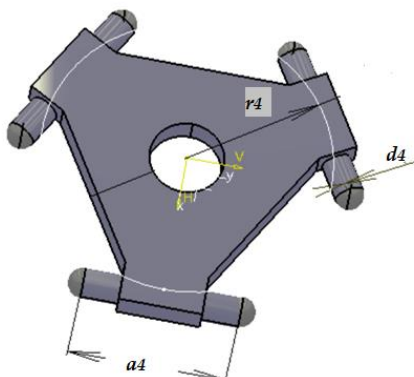
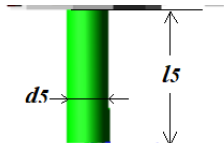


Fig. 2.1. Robotul paralel Delta: (a) robotul Delta SiAx D3-1600; (b) modelul CATIA fără masă suplimentară; (c) modelul ADAMS cu masă suplimentară; (d) parametrizarea modelului ADAMS; (e) dispunerea brațelor.

Tabelul 2.2. Detalii geometrice și de masă ale elementelor robotului Delta.

Element	Model CAD	Parametrii
Platforma fixă (0)		$l_0 = 125 \text{ mm}$
Elementul (1)		$l_1 = 500 \text{ mm}$ $m_1 = 1,58 \text{ kg}$ $d_1 = 62 \text{ mm}$ $a_1 = 106 \text{ mm}$
Elementele (2) și (3)		$l_2 = l_3 = 1106 \text{ mm}$ $m_2 = m_3 = 0,34 \text{ kg}$ $d_2 = d_3 = 20 \text{ mm}$
Platforma mobilă (4)		$m_4 = 0,46 \text{ kg}$ $d_4 = 20 \text{ mm}$ $a_4 = 106 \text{ mm}$ $r_4 = 97 \text{ mm}$
Masă suplimentară (5)		$l_5 = 212 \text{ mm}$ $m_5 = 5 \text{ kg}$ $d_5 = 50 \text{ mm}$

Proprietățile geometrice, de masă și material ale elementelor componente ale robotului sunt factori cheie în determinarea comportamentului său dinamic. În analiza propusă, s-au făcut următoarele ipoteze:

- Elementele 0, 1, 4 și 5 sunt corpuri solide rigide;
- Elementele de tip tijă 2 și 3 au caracteristici elastice mai mari decât celelalte elemente datorită dimensiunilor lor (vezi tabelul 2.2);
- Toate elementele sunt din oțel.

Modelul de referință al robotului Delta se bazează pe ipotezele unui mecanism ideal, unde toate corpurile sunt solide rigide, toate articulațiile cinematice sunt ideale (fără joc, fără frecare) și punctul caracteristic P urmează o traiectorie care atinge valorile maxime admisibile de viteză și accelerație. Astfel, a fost aleasă funcția polinomială de gradul cinci pentru a genera traiectoria de mișcare în spațiul articulațiilor, precum și un timp scurt de parcurs al traiectoriei de 0.2 s, timp rezultat din asigurarea simultană a condițiilor pentru ca robotul să atingă traiectoria P_0P_1 (fig. 2.2), viteza maximă a efectorului final $v_{P_{max}} = 8 \text{ m/s}$ și accelerația maximă $a_{P_{max}} = 120 \text{ m/s}^2$ (vezi tabelul 1).

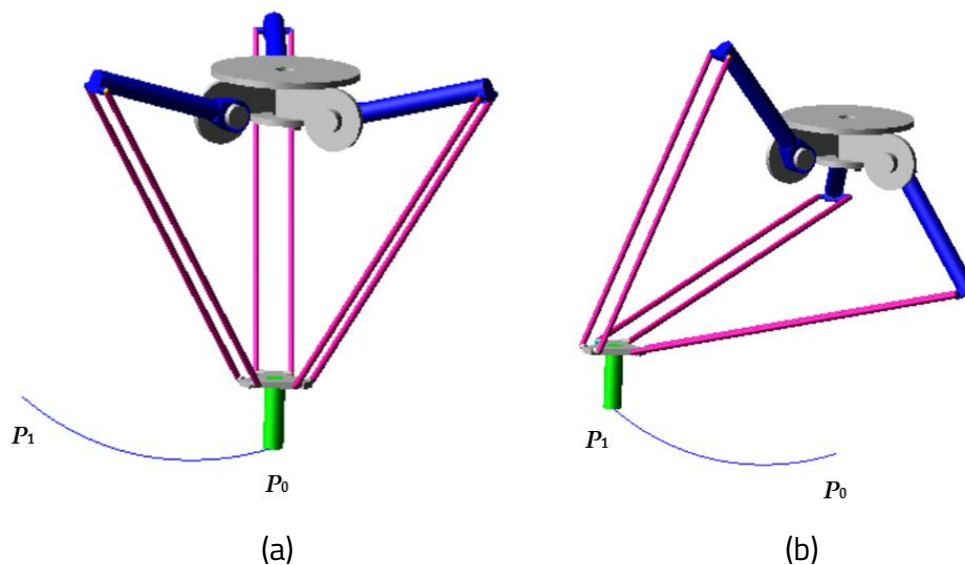


Fig. 2.2. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta: (a) poziția inițială; (b) poziția finală.

Poziția de start a traiectoriei carteziene (P_0) corespunde poziției inițiale a robotului unde toate cele trei cuple motoare R_A , R_B și R_C sunt în poziția zero, iar elementele 1 sunt aranjate într-un plan orizontal (paralel cu X_0Y_0 , vezi fig.2.1.d). Traiectoria în spațiul cartezian P_0P_1 este

o curbă spațială obținută prin aplicarea unei deplasări unghiulare de 70° în direcția pozitivă a axei cuplei R_A , 41° în direcția pozitivă a axei cuplei R_B și de 36° în direcția negativă a axei cuplei R_C (fig. 2.3.a). De-a lungul acestei traiectorii se atinge viteza unghiulară maximă de $656^\circ/\text{s}$ în cupla A, $384^\circ/\text{s}$ în cupla B și $292^\circ/\text{s}$ în cupla C (fig. 2.3.b), precum și accelerațiile unghiulare maxime de $10103^\circ/\text{s}^2$ (motor A), $5124^\circ/\text{s}^2$ (motor B) și $4500^\circ/\text{s}^2$ (motor C), așa cum arată în fig. 2.3.c.

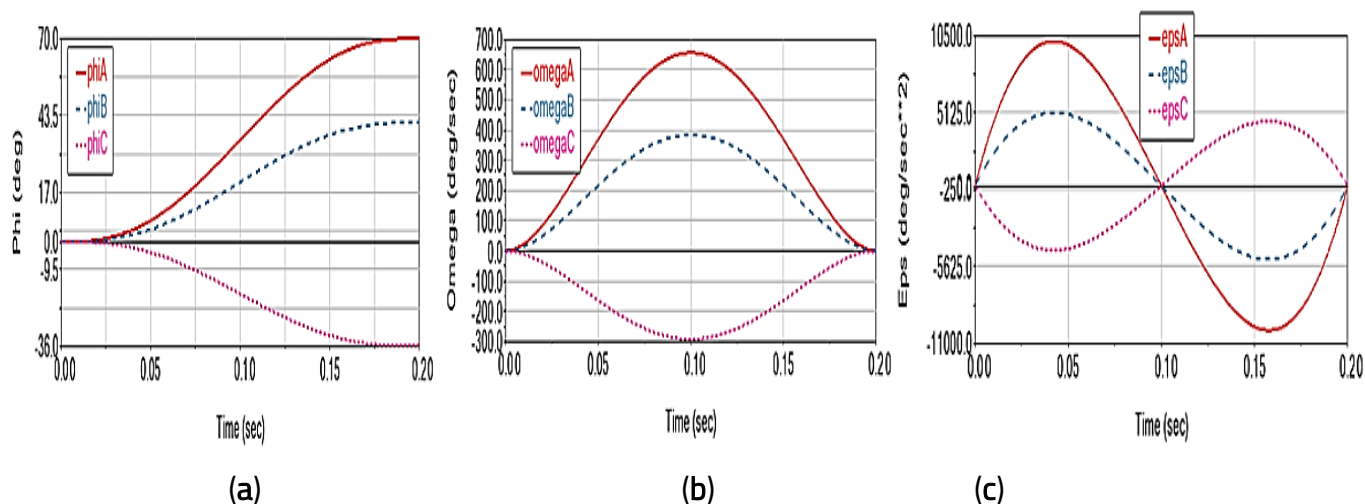


Fig. 2.3. Traiectoriile de mișcare în spațiul cuplelor active (R_A , R_B și R_C): (a) deplasare unghiulară; (b) viteză unghiulară și (c) accelerație unghiulară.

Atunci când se aplică traiectorii de mișcare polinomiale de gradul cinci articulațiilor active, se obține o traiectorie carteziană P_0P_1 . Această traiectorie este caracterizată prin deplasarea punctului caracteristic P de-a lungul tuturor celor trei axe ale sistemului global de coordonate $X_0Y_0Z_0$ (fig. 2.4) și atinge o poziție finală de $r_P = 1,245$ m (fig. 2.5.a). De asemenea, traiectoria atinge o viteză maximă de $v_P = 8$ m/s la 0,1 s (fig. 2.5b) și o accelerație maximă de $a_P = 120$ m/s² la aproximativ 0,052 s și 0,158 s (fig. 2.5.c).

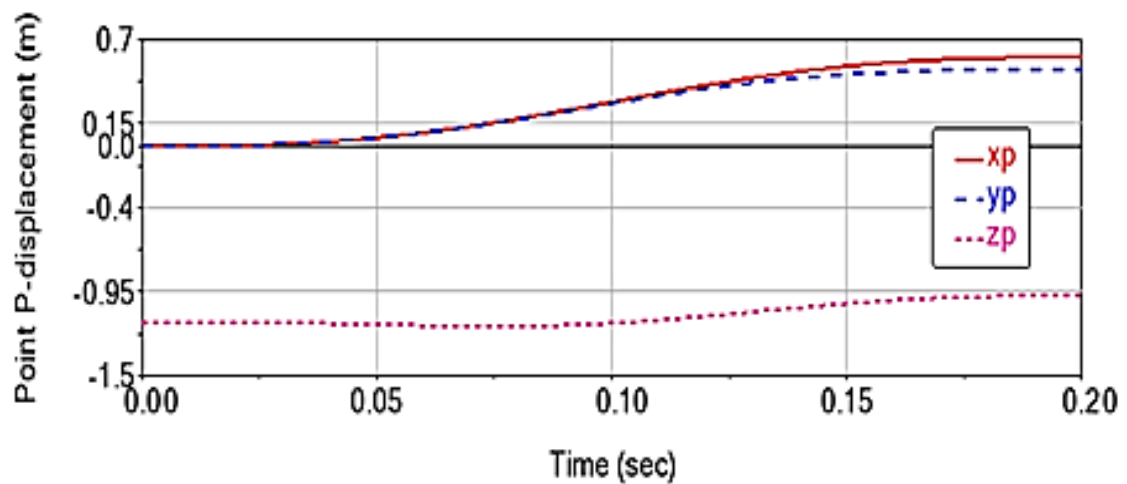


Fig. 2. 4. Deplasarea end-effectorului robotului paralel Delta.

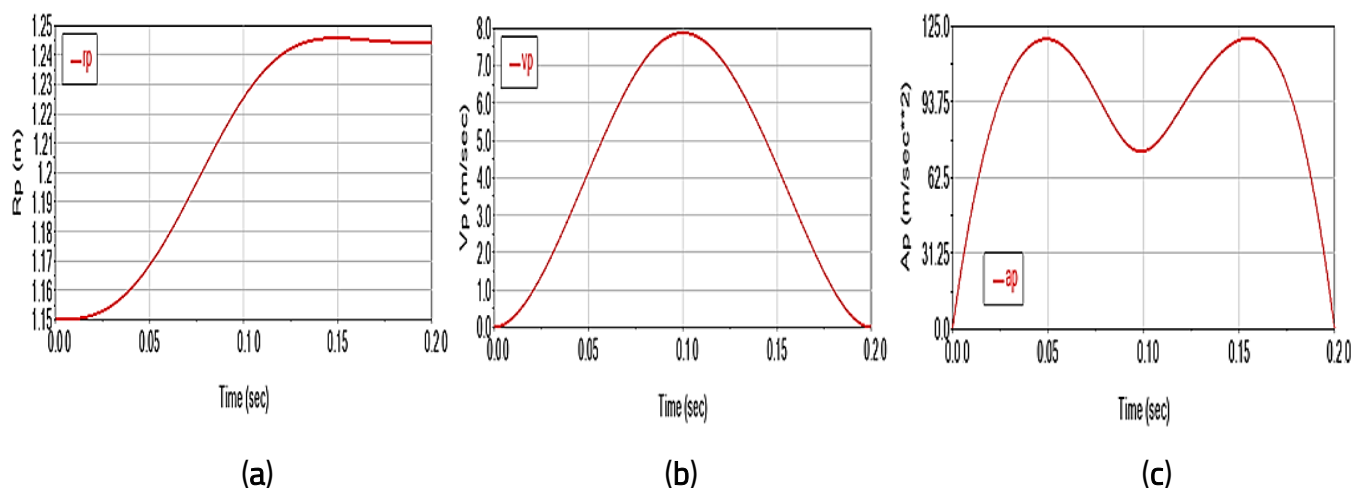


Fig. 2.5. Mișcarea end-efectorului robotului paralel Delta: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerația.

Momentele în cuplele active (fig. 2.6) pe traiectoria menționată are alura accelerației unghiulare (vezi fig. 2.3.c); se observă valori mai mari ale momentului TA datorate accelerațiilor unghiulare mai mari (și în consecință valori mai mari ale vitezelor și deplasărilor unghiulare) comparativ cu celelalte două momente motoare active.

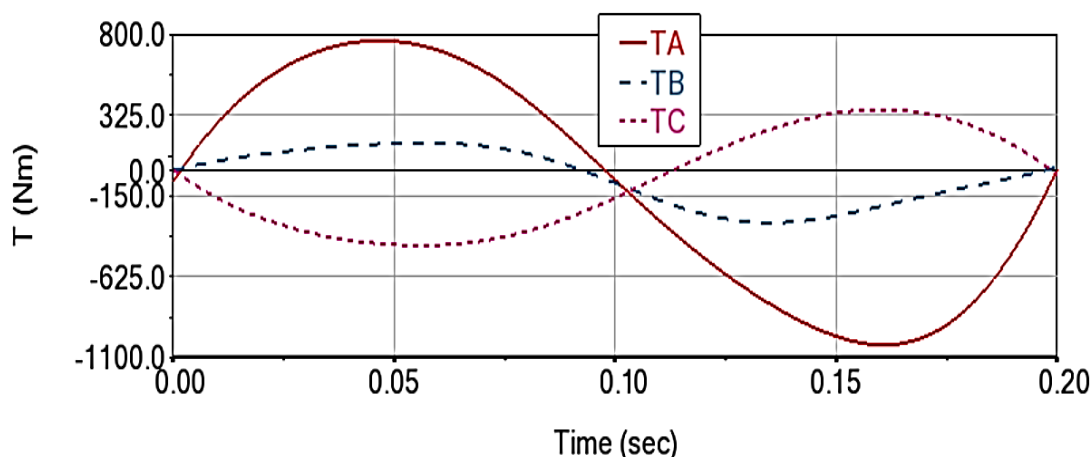


Fig. 2.6. Momentele motoare (TA, TB și TC) pentru robotul paralel Delta.

În aceste condiții, obiectivul acestui studiu este de a analiza efectele cinematice și dinamice ale acestor trei factori, atât individual, cât și în combinație: · frecarea în articulațiile sferice; · jocul în articulațiile sferice; · elasticitatea elementelor de tip bară (2 și 3). Astfel, analiza comparativă a structurii robotice de tip Delta este prezentată în șapte scenarii de simulare dinamică, luând ca referință modelul ideal definit anterior.

Studiul are la bază următoarele ipoteze: ·

- **Cazul 1:** ia în considerare doar frecarea din articulațiile sferice pasive (S_2k_1 , S_2k_2 și S_3k_1 , S_3k_2 , $k = A, B, C$) presupunând frecare oțel/oțel cu lubrifiant.
- **Cazul 2:** ia în considerare doar elasticitatea elementelor 2 și 3, în ipoteza considerării frecvențelor naturale mai mici de 250 Hz.
- **Cazul 3:** ia în considerare doar jocul în articulațiile sferice pasive cu valoarea de 0,1 mm.
- **Cazul 4:** combină cazul 1 și cazul 2.
- **Cazul 5:** combină cazul 1 și cazul 3.
- **Cazul 6:** combină cazul 2 și cazul 3.
- **Cazul 7:** combină cazul 1, cazul 2 și cazul 3.

Influența fiecăruia dintre cei trei factori considerați (Cazurile 1-3), precum și combinația lor (Cazurile 4-7), a fost analizată prin comparație cu modelul de referință (cazul ideal) în vederea identificării:

(a) deviațiilor cinematice (deplasări, viteze și accelerații ale punctului caracteristic) și dinamice (momente motoare) generate de acești factori. Aceste erori sunt notate generic cu e : $e_{X_p} = X_p - X$, unde $X = r_p, v_p, a_p, TA, TB, TC$, p este parametrul considerat (μ —frecare, e —elasticitate, c —joc), iar X_p este valoarea variabilei X în ipoteza considerării factorului p , X obținut în cazul ideal;

(b) efectului de cuplare al factorilor, adică măsura în care aceștia sunt variabile independente și dacă efectele lor pot fi considerate fenomene aditive.

2.1. Analiza robotului cu luarea în considerare a frecării în cuplele sferice

În acest scenariu, se pornește de la cazul ideal al structurii robotului, la care se adaugă frecarea în articulațiile sferice S_{2k1}, S_{2k2} and S_{3k1}, S_{3k2} , $k = A, B, C$, luând în considerare frecarea oțel/oțel cu lubrifianț ulei de in cu coeficientul de frecare static de 0,11 și coeficientul de frecare dinamic de 0,084 [75]. După cum se cunoaște, frecarea în cuplele cinematice nu influențează funcția de transmitere a mișcării, dar are efect asupra comportamentului dinamic al robotului. Frecarea din cuplele sferice are un efect moderat asupra momentelor motoare (aproximativ 0,007%), rezultând deviații de până la 0,508 N·m pentru TA (fig. 2.7.a), 0,207 N·m pentru TB (fig. 2.7.b) și 0,241 N·m pentru TC (fig. 2.7.c).

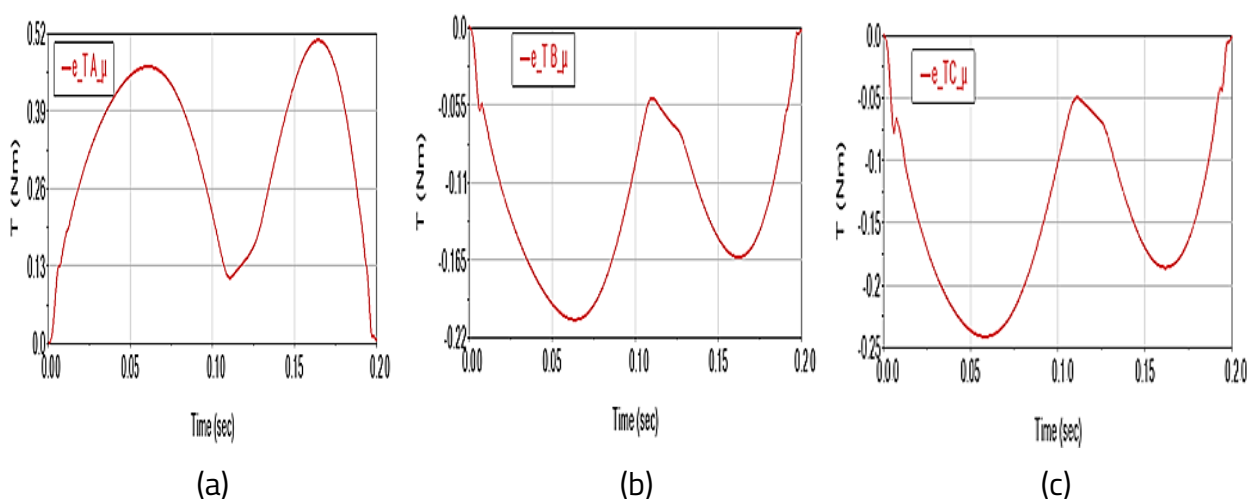


Fig. 2.7. Eroarea momentelor motoare în ipoteza luării în considerare a frecărilor din cuplele sferice (Cazul 1): (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

O variație a acestor erori este observată pentru toate cele trei momente motoare, cu un profil similar al accelerației a_p (vezi fig. 2.5.c) și în corelație cu variația momentului (fig. 2.6):

valorile deviației e_{Tk_μ} , $k = A, B, C$ sunt direct proporționale cu valorile absolute ale momentelor Tk ; frecarea duce la o creștere a valorii momentelor motoare în faza de accelerare (interval 0,0-0,1 s) și ajută motoarele la frânare în faza de decelerare (0,1-0,2 s).

2.2. Analiza robotului cu elemente elastice

În ipoteza considerării flexibilității elementelor elastice ale robotului paralel Delta (elementele 2 și 3 pe fiecare braț, vezi fig. 2.8) și limitând analiza la primele 10 moduri de vibrație (cu frecvențe naturale mai mici de 250 Hz, deoarece efectul frecvențelor mai mari este neglijabil - caracteristicile principale sunt prezentate în fig. 2.9-2.11), se obțin rezultatele reprezentate în fig. 2.12 (erori de mișcare) și fig. 2.13 (erori de momente).

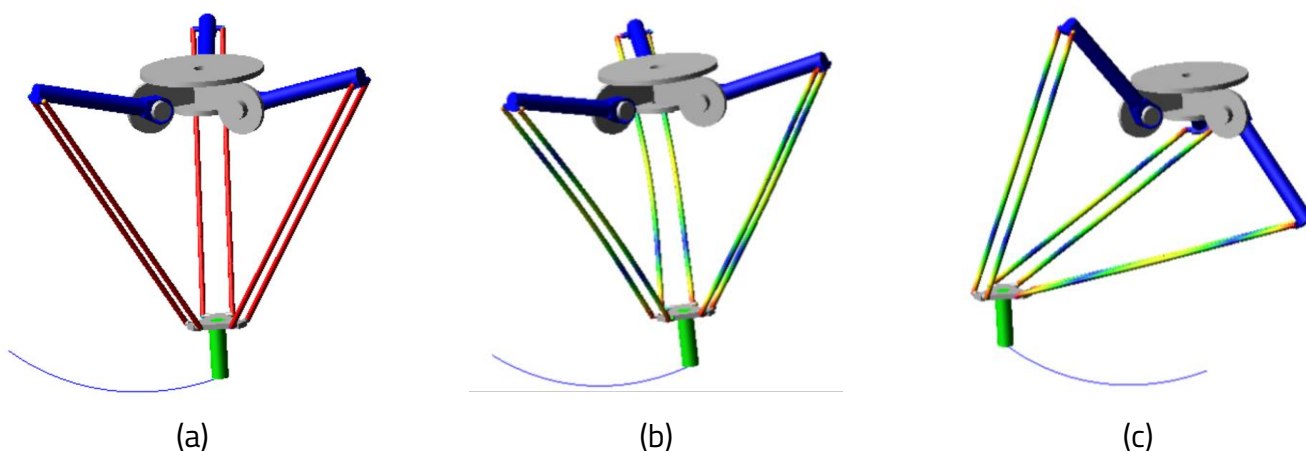
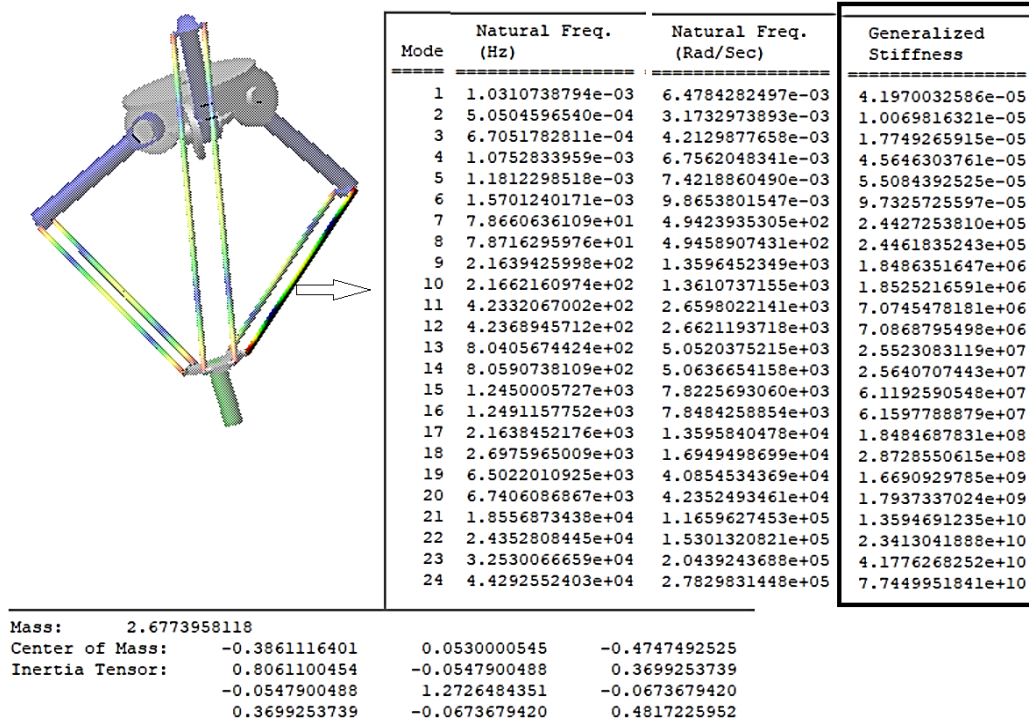
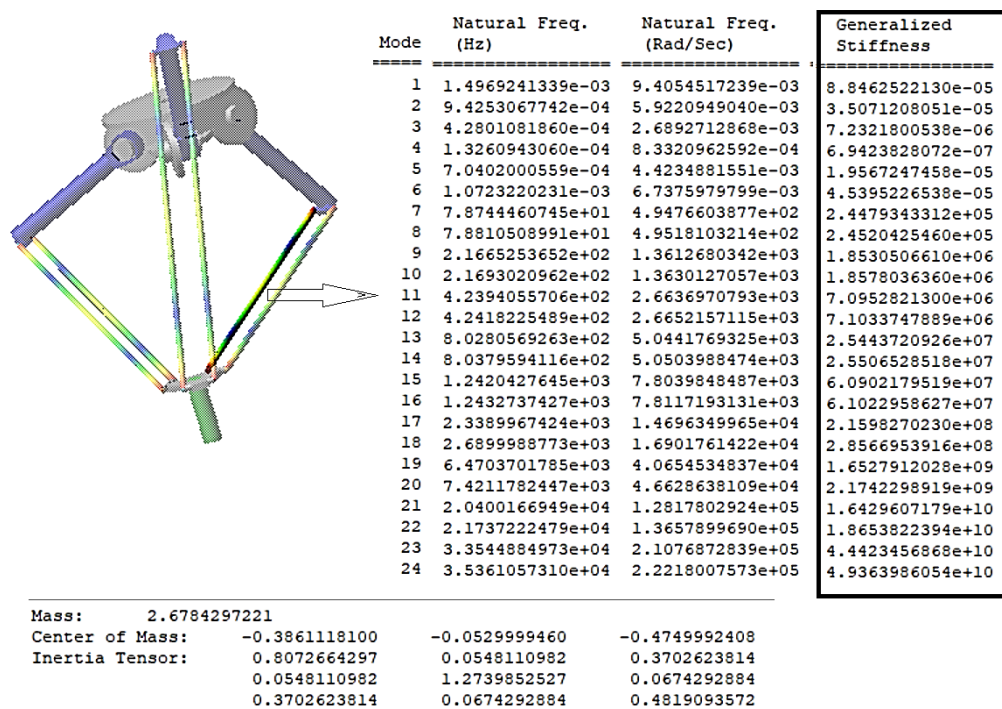


Fig. 2.8. Modelul CAD al robotului paralel Delta: (a) în ipoteza elementelor rigide și (b) în ipoteza elementelor elastice, la început de traiectorie, respectiv (c) la sfârșitul traiectoriei.

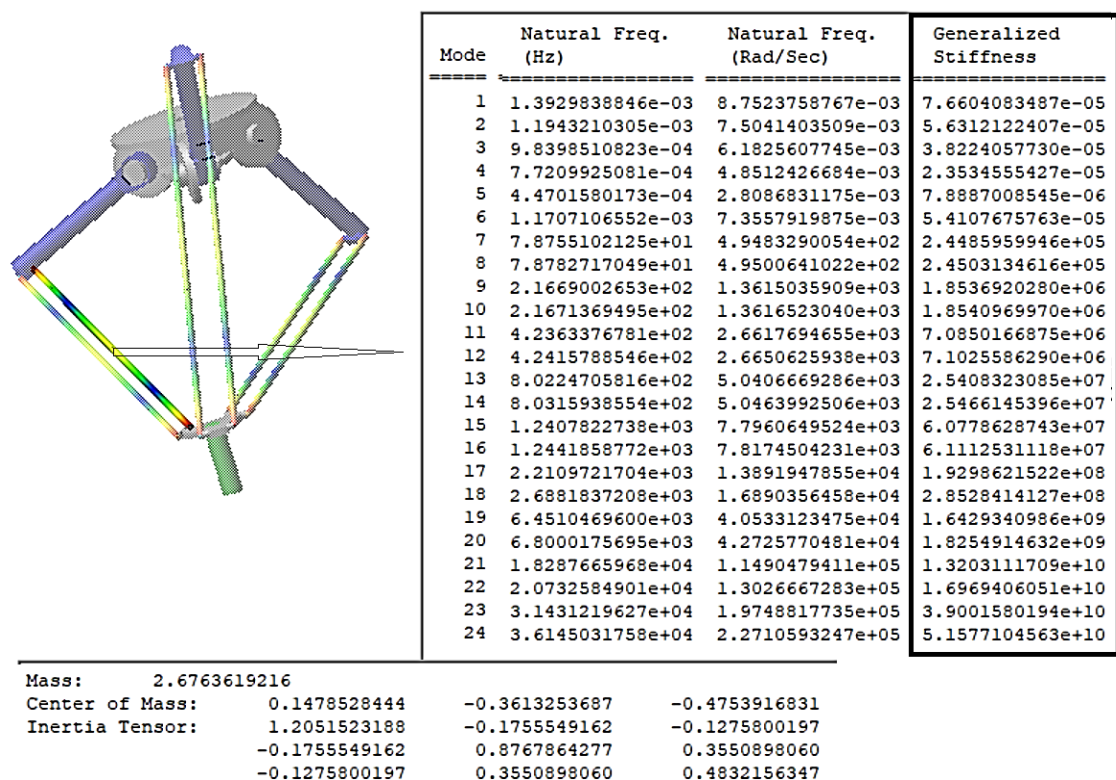


(a)

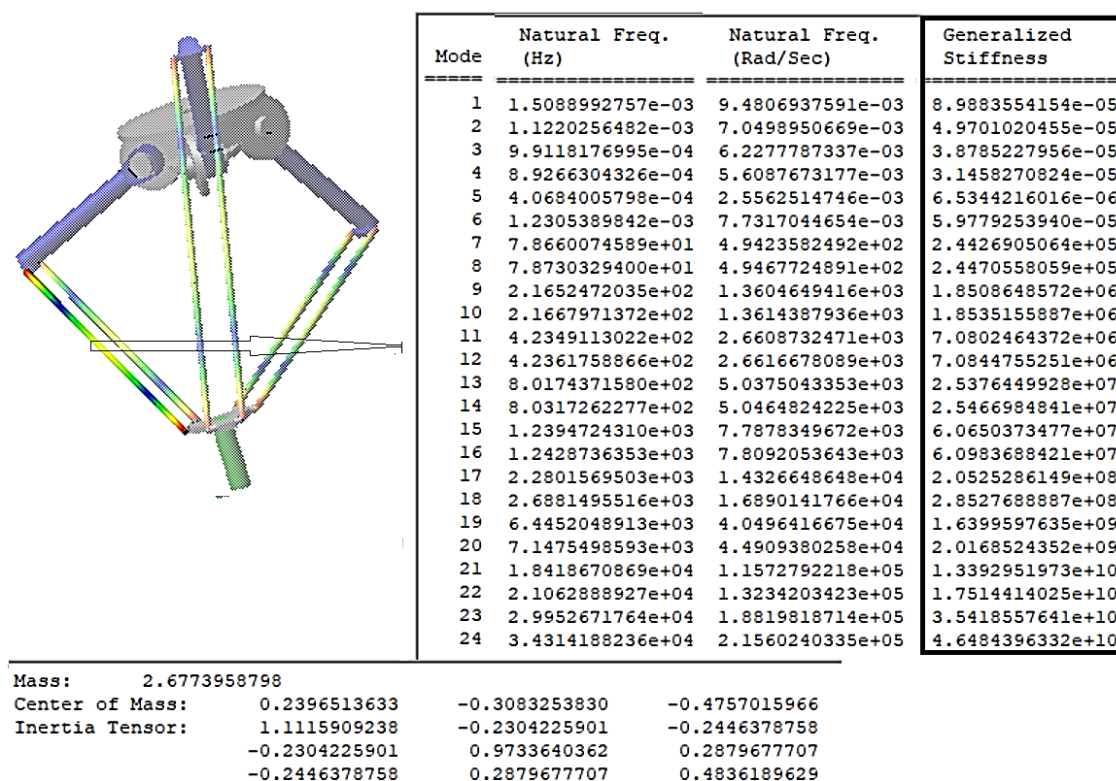


(b)

Fig. 2. 9. Principalele proprietăți modale și de masă ale barelor de la brațul A: (a) elementul 2A; (b) elementul 3A.

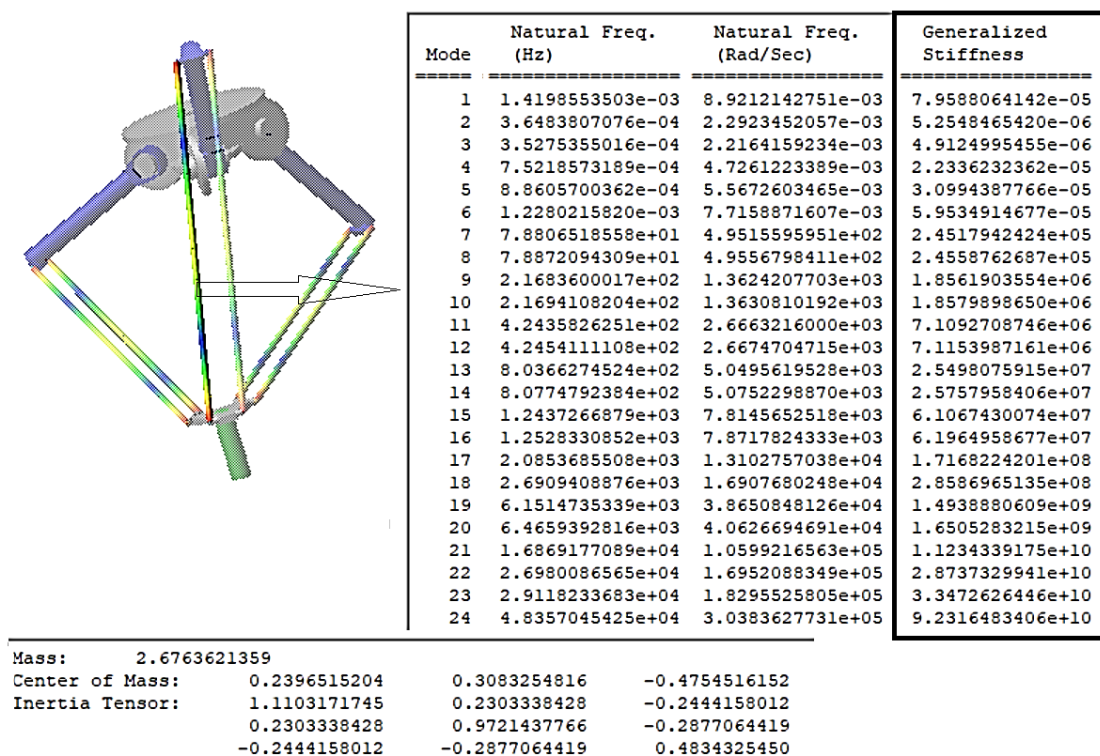


(a)

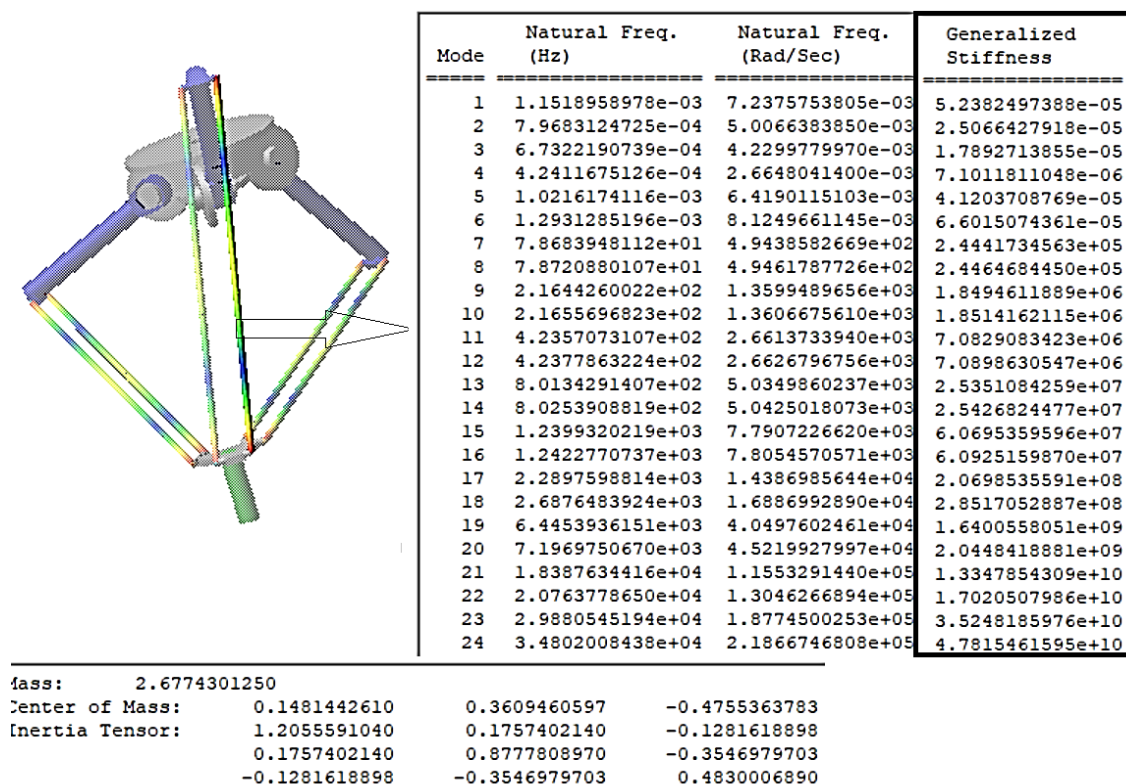


(b)

Fig. 2. 10. Principalele proprietăți modale și de masă ale barelor de la brațul B: (a) elementul 2B; (b) elementul 3B.



(a)



(b)

Fig. 2. 11. Principalele proprietăți modale și de masă ale barelor de la brațul C: (a) elementul 2C; (b) elementul 3C.

Luând în considerare frecvențele naturale ale elementelor de tip bară (tabelul 2), simularea dinamică ADAMS conduce la erori mici față de traiectoria teoretică a efectorului ($e_{rp} < 4,2 \cdot 10^{-6}$ m, fig. 2.12.a), erori de viteză de până la $3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s pentru (fig. 2.12.b) și erori de până la 5 m/s^2 pentru accelerație (adică, max. 4,2%, fig. 2.12.c). Cele mai mari erori e_{vp} și e_{ap} apar în jurul valorii de 0,042 s, respectiv 0,158 s, momentele de timp la care accelerația ap este la valoarea maximă (vezi fig. 2.5.c).

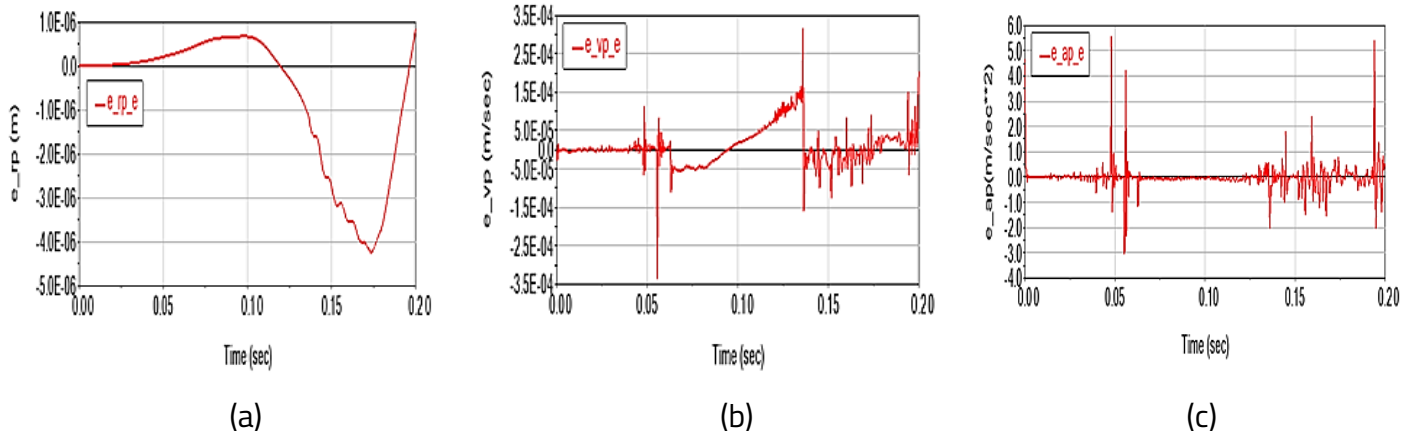


Fig. 2.12. Erorile cinematice ale mișcării end-efectorului în cazul 2 pentru (a) deplasări; (b) viteze and (c) accelerație.

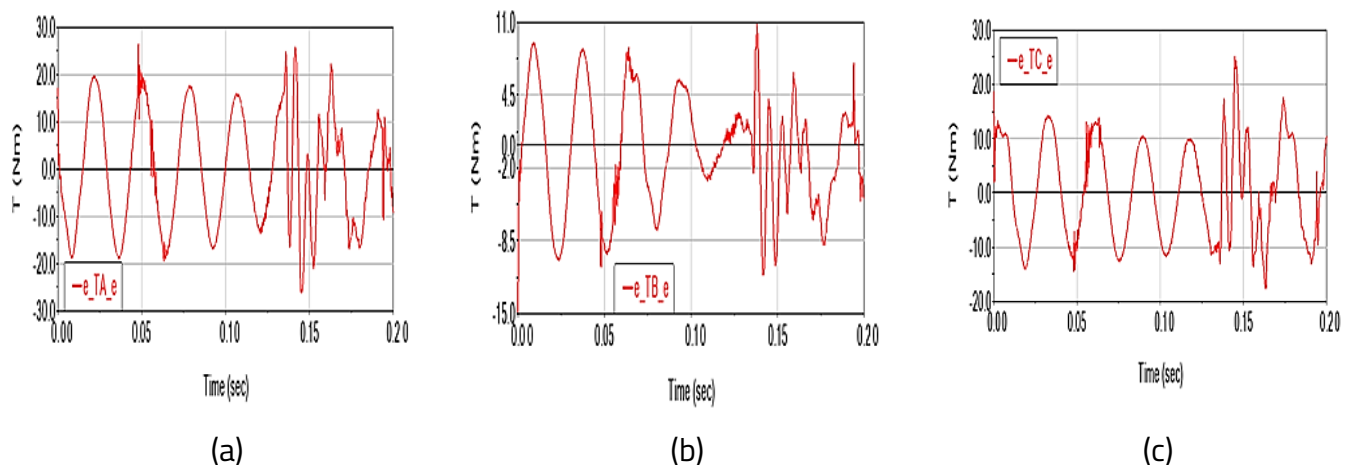


Fig. 2.13. Erorile momentelor motoare în cazul 2 pentru (a) brațul A; (b) brațul B și (c) brațul C.

Erorilor momentelor motoare prezintă o evoluție oscilatorie (șapte oscilații cu o perioadă de aproximativ 0,025 s) caracterizată prin valori maxime de aproximativ 26,4 N·m pentru TA (fig. 2.13.a), 10,8 N·m pentru TB (fig. 2.13.b) și 25,3 N·m pentru TC (fig. 2.13.c). Deviațiile

maxime sunt înregistrate în cazul motorului din cupla A (~0,035%). Un fenomen de instabilitate apare în jurul timpului de ~0,15 s, corespunzător zonei de accelerație maximă a punctului caracteristic.

2.3. Analiza robotului cu jocuri în cuplele sferice

În acest subcapitol se analizează influența jocului în cuplele sferice, utilizând o singură valoare de 0,1 mm pentru toate cele 12 articulații S_{2k1} , S_{2k2} and S_{3k1} , S_{3k2} , $k = A, B, C$. În aceste condiții, deviația punctului caracteristic în poziția inițială este de 0,2 mm. Deviația de la traiectoria punctului caracteristic este de până la $1,18 \cdot 10^{-4}$ m (fig. 2.14.a), cu o eroare a vitezei de până la 0,0035 m/s (fig. 2.14.b) și o eroare a accelerației de până la $0,068 \text{ m/s}^2$ (fig. 2.14.c). Comparativ cu cazul anterior analizat, eroarea de deplasare pe traiectorie este semnificativ mai mare (~ de 20 de ori mai mare), dar deviația accelerației pe traiectorie este mult mai mică (~ de 70 de ori mai mică).

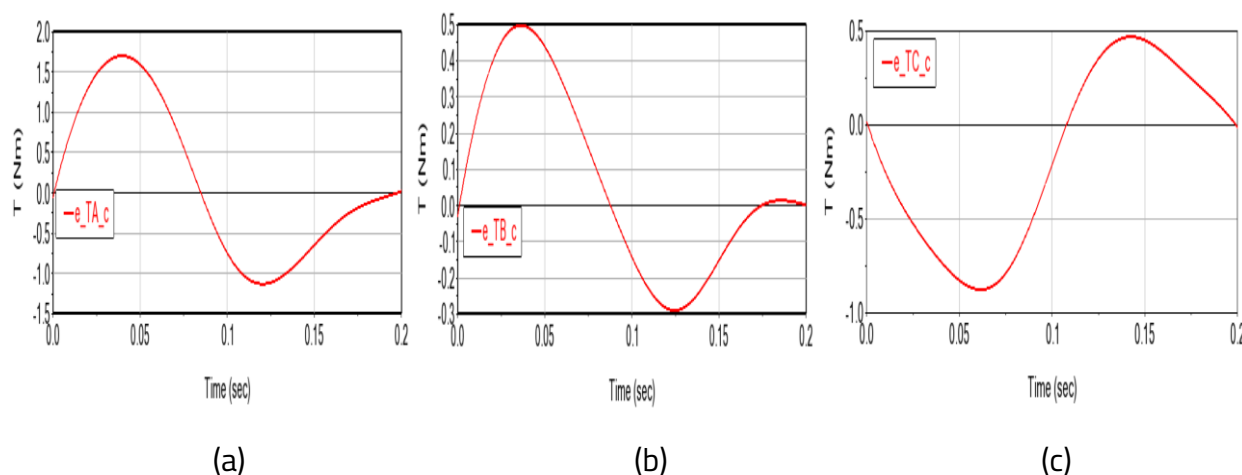


Fig. 2.14. Eroarea mișcării end-efectorului în cazul 3 pentru (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație.

Influența jocurilor din cuplele sferice asupra momentelor motoare este moderată, de aproximativ 10-20 de ori mai mică decât în Cazul 2, dar de 2-3 ori mai mare decât în Cazul 1. Poate fi evidențiată o eroare de până la 1,7 N·m pentru TA (fig.2.15.a), până la 0,49 N·m pentru TB (fig. 2.15.b) și până la 0,47 N·m pentru TC (fig. 2.15.c). Valorile extreme ale deviațiilor sunt înregistrate și în jurul valorilor de 0,042 s și 0,158 s, care sunt responsabile pentru valorile extreme ale momentelor motoarelor (fig. 2. 6).

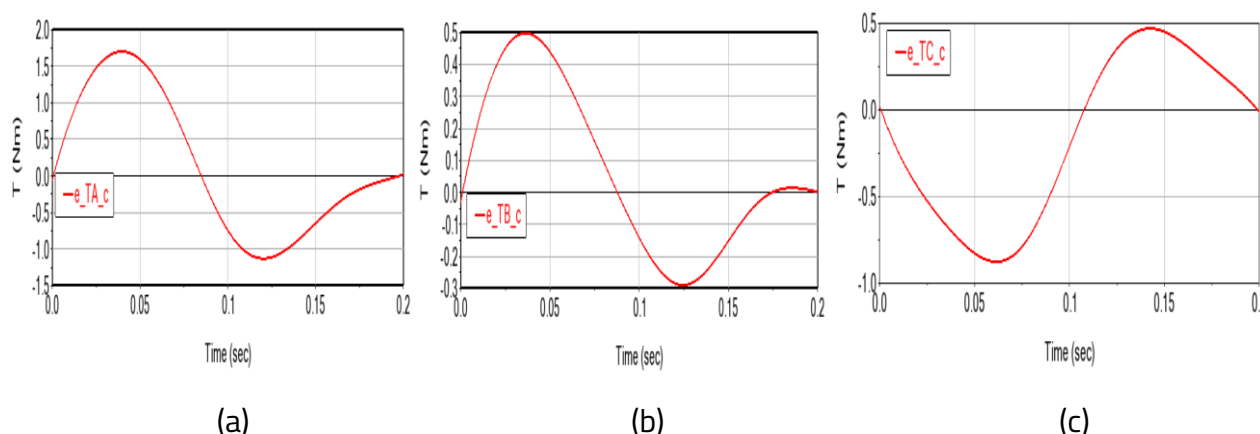


Fig. 2.15. Eroarea momentelor motoare în cazul 3: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

2.4. Analiza robotului cu frecări în cuplele sferice și elemente elastice

În această parte, se analizează influența cumulativă a frecării în cuplele sferice și a elasticității elementelor de tip bară. Se compară și se analizează erorile cumulative rezultate cu suma erorilor identificate în Cazurile 1 și 2 pentru a identifica efectul de cuplare dintre acești doi factori.

Fig. 2.16 prezintă comportamentul cinematic al robotului Delta cu elemente elastice și luarea în considerare a frecării în articulațiile sferice, evidențiind atât erorile mișcării efectorului față de cazul ideal (linie continuă roșie), cât și diferențele față de cazul însumării efectelor separate ale celor doi factori (linie punctată albastră). Pentru deplasarea punctului caracteristic (fig. 2.16.a), se poate observa că efectul cumulativ al factorilor duce la o eroare (în valoare absolută) de până la maxim $4,23 \cdot 10^{-6}$ m (comparativ cu un maxim de aproximativ $4,10^{-6}$ m pentru cazul însumării efectelor), până la $4,2 \cdot 10^{-4}$ m/s pentru viteză (fig. 2.16.b) comparativ cu maximul de $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s pentru cazul aditiv și până la aproximativ 6 m/s^2 pentru accelerație (fig. 2.16.c) comparativ cu maximul de aproximativ 6 m/s^2 pentru cazul însumării efectelor. Aceste rezultate evidențiază faptul că efectele cinematice ale celor doi factori (frecarea în cuplele sferice și elasticitatea elementelor) nu sunt aditive.

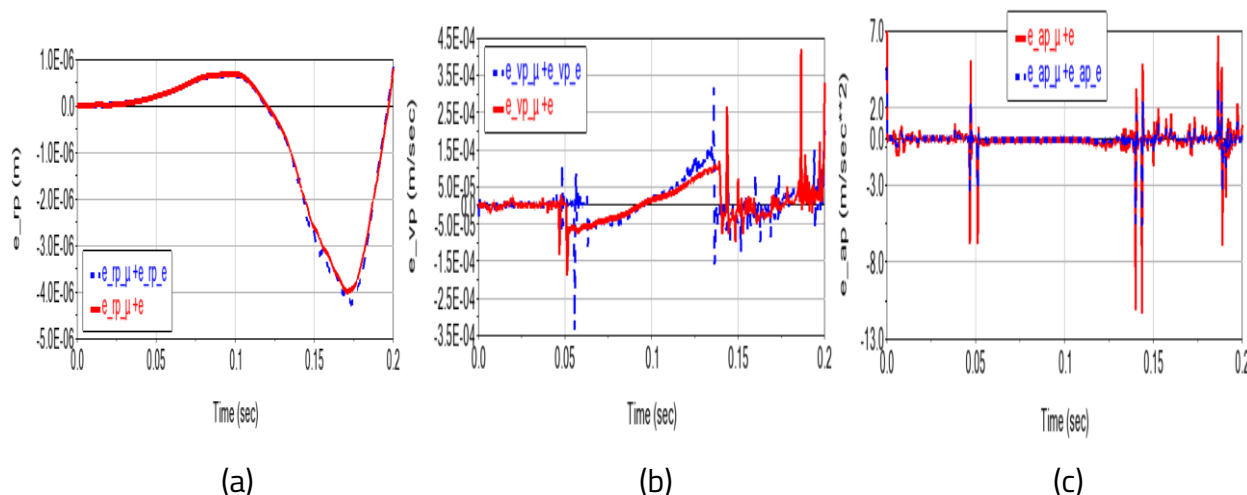


Fig. 2.16. Erorile de mișcare în Cazul 4 (linie continuă roșie) și efectul aditiv al factorilor de frecare și elasticitate (linie punctată albastră) pentru: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație a punctului caracteristic.

Similar cazului mișcării, efectul cumulativ al celor doi factori duce la o scădere a valorilor maxime ale erorilor momentului motor comparativ cu cazul aditiv (fig. 2.17). Prin urmare, se poate concluziona că acești factori nu au un efect de cuplare semnificativ. Frecarea (cu o semnificație mai mică) nu afectează forma curbei de deviație, ci contribuie la îmbunătățirea formelor curbelor pentru valorile erorilor momentului motor.

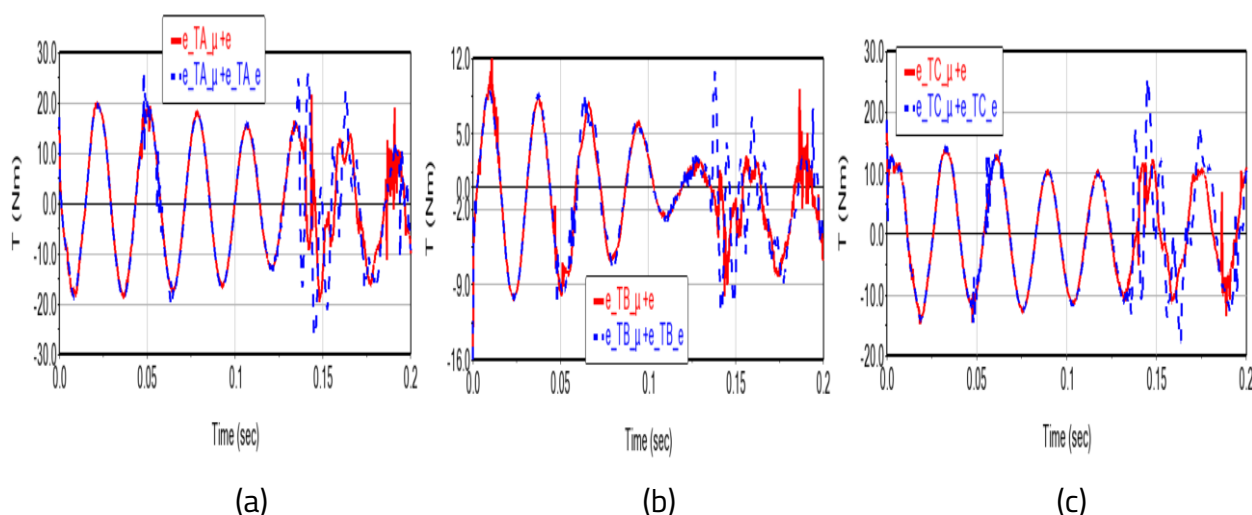


Fig. 2.17. Eroarea momentelor motoare în cazul 4 (linie roșie continuă) și efectul aditiv al frecărilor din cuple și al elasticităților elementelor (linie albastră întreruptă) pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

2.5. Analiza robotului cu frecări și jocuri în cuplele sferice

În această parte este analizat efectul cumulativ a frecărilor și a jocurilor din cuplele sferice. Erorile cinematice față de traiectoria teoretică de mișcare sunt prezentate în fig. 2.18. În cazul deplasării, se poate observa că efectul cumulativ al acestor doi factori duce la o deviație similară celei observate în cazul cumulativ. Ca urmare, efectele celor doi factori asupra comportamentului cinematic al robotului paralel Delta sunt independente și cuplarea lor duce la aceleași deviații.

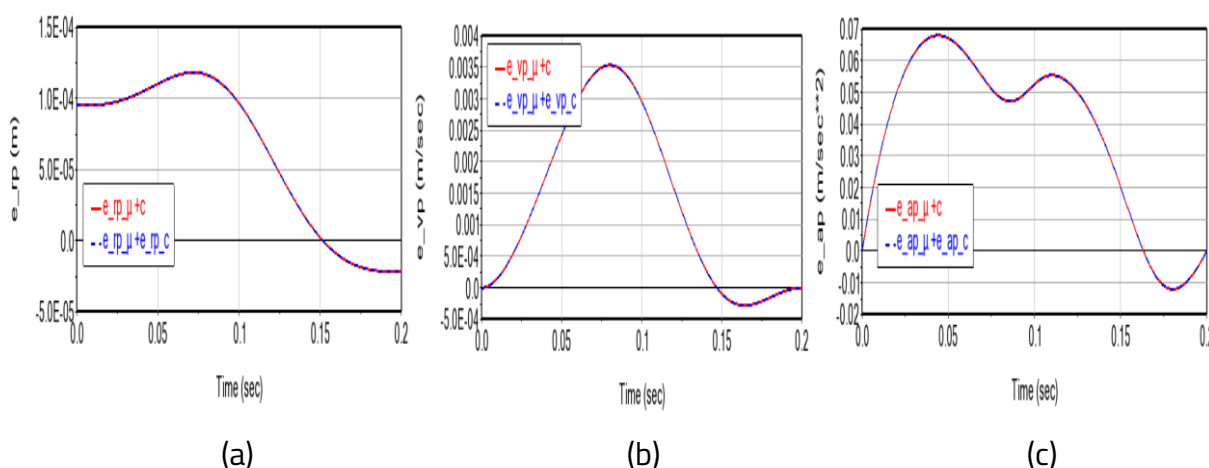


Fig. 2.18. Erorile de mișcare în Cazul 5 (linie continuă roșie) și efectul aditiv al factorilor de frecare și joc (linie punctată albastră) pentru: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație a punctului caracteristic.

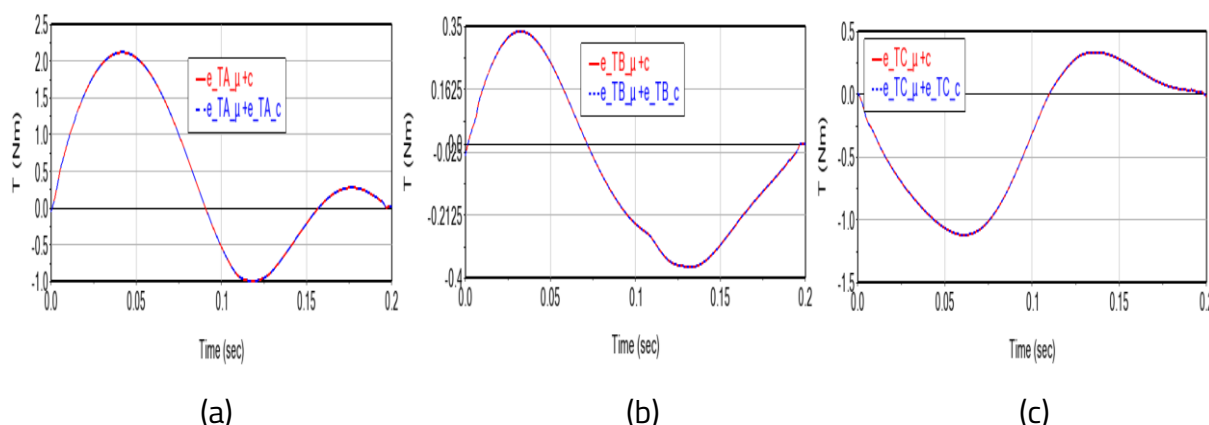


Fig. 2.19. Eroarea momentelor motoare în cazul 5 (linie roșie continuă) și efectul aditiv al frecărilor și al jocurilor din cuple (linie albastră întreruptă) pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Efectul cumulativ al celor doi factori se manifestă similar și în cazul momentelor motoare: duce la creșterea deviațiilor de până la 2,12 N·m (caz aditiv) pentru momentul TA (fig. 2.19.a), până la 0,36 N·m (momentul TB, fig. 2.19.b), 1,11 N·m (momentul TC, fig. 2.19.c). Deviațiile de moment au aceeași valoare și în cazul însumării efectelor, atunci când valorile lor sunt aceleași comparativ cu cazul însumării efectelor, fără a afecta forma curbelor.

2.6. Analiza robotului cu jocuri în cuplele sferice și elemente elastice

Combinarea dintre flexibilitatea elementelor de tip bară și jocurile din cuplele sferice (0,1 mm) este aproape fără efect asupra deplasării și vitezei punctului caracteristic. Cu toate acestea, „vârfurile” în accelerație sunt mai reduse când efectul cumulativ este luat în considerare (fig. 2.20).

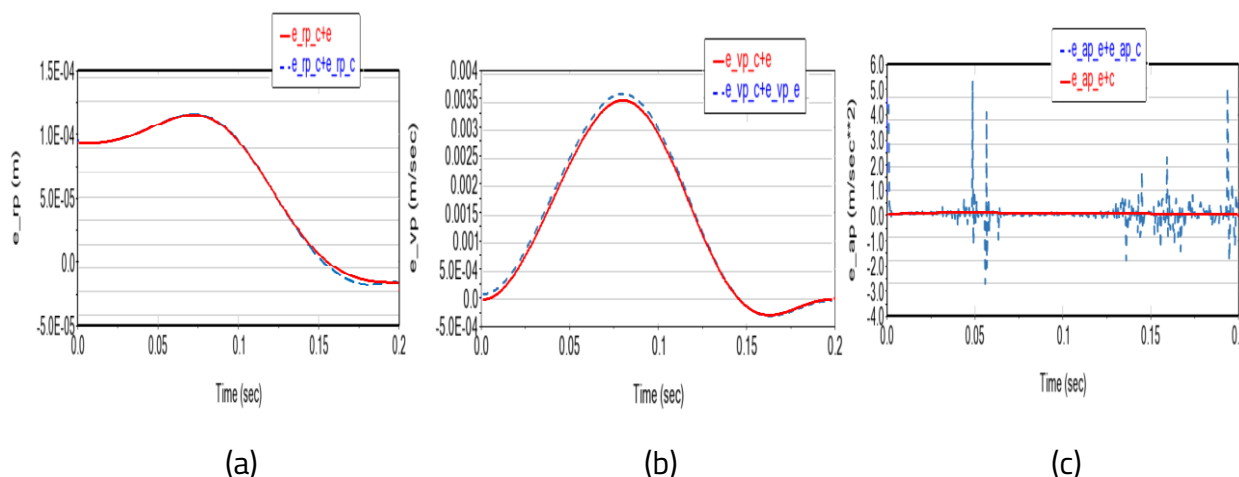


Fig. 2.20. Eroarea mișcărilor end-effectorului în cazul 6 (linie roșie continuă) și efectul aditiv al jocurilor din cuple și al elasticităților elementelor (linie albastră întreruptă) pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație a punctului caracteristic.

În acest scenariu, deviațiile de moment au o variație armonică relativ constantă a amplitudinii, valorile maxime atingând aproximativ ~50 N·m față de ~20 N·m (în cazul aditiv) pentru TA (fig. 2.21.a), până la ~30 N·m față de ~10 N·m (în cazul aditiv) pentru TB (fig. 2.21.b), 20 N·m față de 22 N·m (în cazul aditiv) pentru TC (fig. 2.21.c).

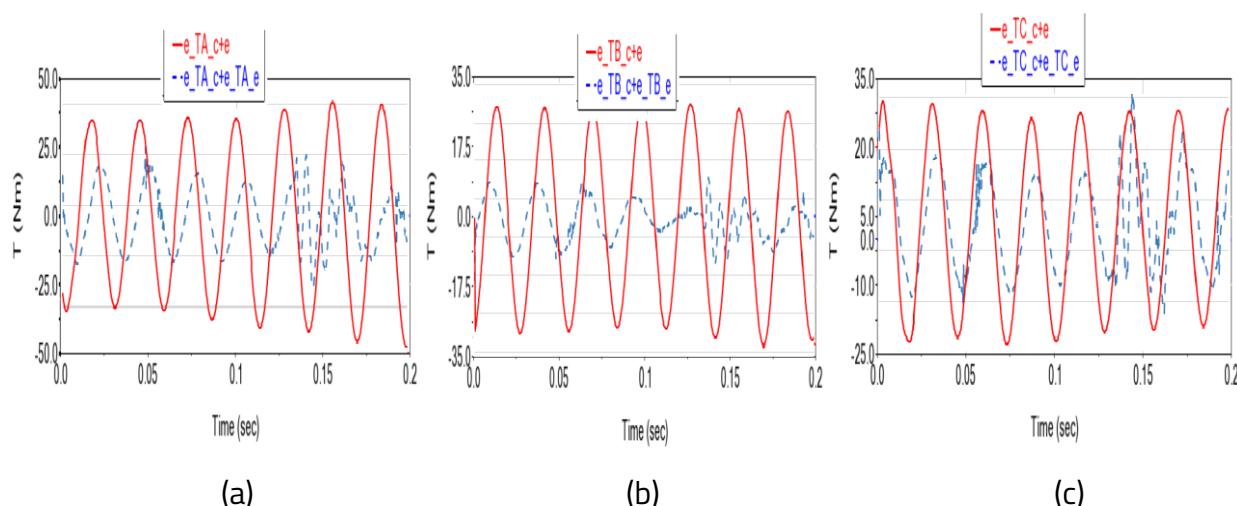


Fig. 2.21. Eroarea momentelor motoare în cazul 6 (linie roșie continuă) și efectul aditiv al jocurilor din cuple și al elasticităților elementelor (linie albastră întreruptă) pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

2.7. Analiza robotului cu jocuri și frecărilor în cuplele sferice și elemente elastice

În acest scenariu sunt luate în considerare efectele cumulative ale celor 3 factori (frecare, flexibilitate și joc) asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta.

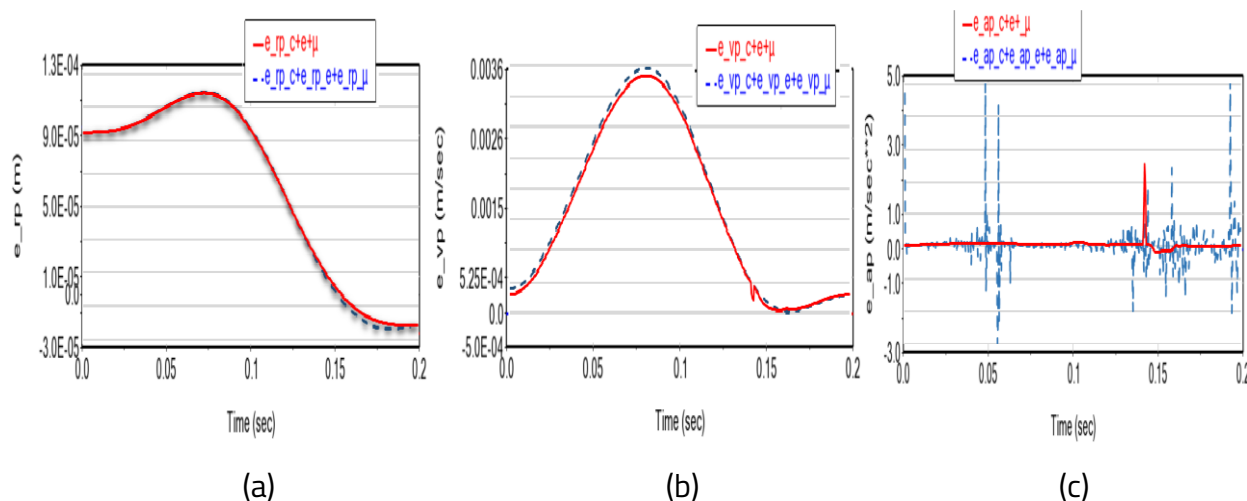


Fig. 2.22. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul 6 (linie roșie continuă) și efectul aditiv al jocurilor din cuple și al elasticităților elementelor (linie albastră întreruptă) pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație a punctului caracteristic.

Din simulările ADAMS, care consideră acțiunea simultană a acestor trei factori, au rezultat valori ale deviațiilor cinematice aproximativ aceleași pentru deplăări și viteze (fig. 2.22.a, b). Cu toate acestea, pentru accelerație, sunt evidențiate valori mai mici datorită

unei integrări numerice mai bune în ADAMS comparativ cu însumarea deviațiilor generate individual de fiecare factor (fig. 2.22.c).

Deviația maximă a momentelor motoare prezintă același tip de variație armonică ca în scenariile în care se consideră factorul de elasticitate. Atinge aproximativ ~ 120 N·m față de ~ 20 N·m (în cazul aditiv) pentru TA (fig. 2.23.a), ~ 80 N·m față de ~ 10 N·m (în cazul aditiv) pentru TB (fig. 2.23.b) și ~ 70 N·m față de ~ 10 N·m (în cazul aditiv) pentru TC (fig. 2.23.c).

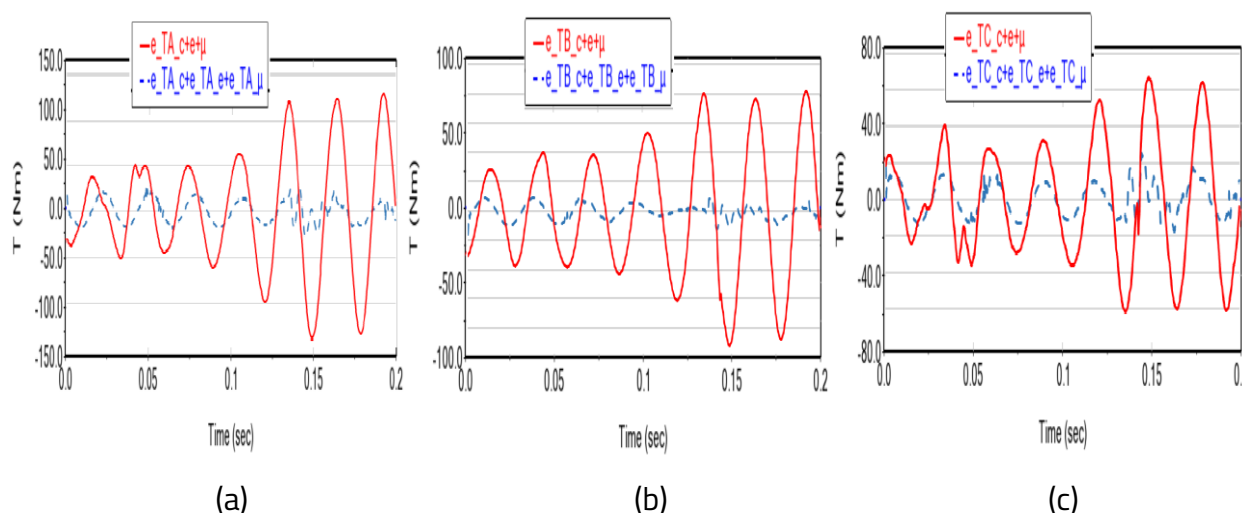


Fig. 2.23. Eroarea momentelor motoare în cazul 7 (linie roșie continuă) și efectul aditiv al jocurilor și frecărilor din cuple și al elasticităților elementelor suple (linie albastră întreruptă) pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

2.8. Concluzii

În acest capitol este prezentată o nouă abordare privind analiza impactului a trei factori asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta: elasticitatea elementelor flexibile ale robotului (elementele de tip bară), frecarea și jocul în articulațiile sferice. În acest scop, analiza a fost realizată pentru studiul de caz al unui robot de tip Delta SIAX 3-1600 bazat pe modelele 3D dezvoltate în CATIA și simulate în software-ul ADAMS. Următoarele concluzii finale privind efectele acestor factori asupra traiectoriei de mișcare se pot formula:

- Frecarea și elasticitatea în articulații au o influență nesemnificativă asupra parametrilor de mișcare ai punctului caracteristic (deplasare, viteză, accelerație), cu excepția cazului elasticității pentru accelerație, unde deviația atinge până la 5 m/s^2 .

- Jocurile în articulații (considerate la valoarea de 0,1 mm) au un efect substanțial asupra deplasării punctului caracteristic (deviații de ordinul 10^{-4} m), moderat asupra vitezei (de ordinul 10^{-3} m/s) și relativ neglijabil asupra accelerației (de ordinul 10^{-2} m/s²);
- Cuplarea oricăror doi dintre acești factori duce la efecte cumulative asupra cinematicii și dinamicii, cu excepția cazului 6, unde deviațiile ating valori de trei ori mai mari decât în cazul însumării efectelor individuale;
- Cuplarea celor 3 factori duce, din punct de vedere cinematic, la o ușoară reducere a deviațiilor, cu excepția accelerației, unde se poate observa o reducere semnificativă a deviațiilor și în special a vârfurilor.

În ceea ce privește comportamentul dinamic, efectele celor trei factori sunt:

- Frecarea în articulații provoacă o variație practic nesemnificativă a momentelor motoare (de ordinul 10^{-1} N·m), comparativ cu valorile lor nominale de ordinul 103 N·m (< 750 N·m);
- Elasticitatea elementelor are un impact substanțial asupra momentelor motoare (deviații de până la 25 N·m, adică 3,3%, cu o evoluție armonică);
- Jocurile în articulații au un efect moderat asupra momentelor motoare (< 2 N·m);
- Atunci când se combină doi factori (cu excepția cazului 6), deviațiile pot ajunge la valori de până două ori mai mari comparativ cu cazul însumării efectelor individuale și de până la de trei ori valori mai mari atunci când se combină toți cei trei factori. Pentru toate scenariile de cuplare a factorilor (S4-S7), studiul a observat că efectele individuale nu sunt întotdeauna cumulative. Cuplarea factorilor poate crește valorile deviațiilor atunci când jocurile și elasticitățile în articulații sunt considerate simultan.

În consecință, nu este recomandat să se simuleze separat acești factori și să se însumeze efectele lor, deoarece fenomenele nu sunt liniare. Este necesară o abordare combinată a factorilor pentru a obține rezultate relevante.

Capitolul 3

Analiza parametrică a efectului dinamic al jocurilor din cuplele sferice ale robotului paralel Delta

Având în vedere influența jocurile din cuplele din cuplele sferice (inferioare și superioare), în cadrul acestui capitol este aprofundat efectul jocurilor din cuplelor sferice ale robotului paralel Delta, considerându-se următoarele ipoteze de lucru:

- Elementele sunt corpuri solide rigide;
- Toate elementele sunt din oțel;
- Jocurile din cuplele sferice (distanța dintre centrele sferelor) au valori discrete cuprinse între 0,1 mm și 0,6 mm, cu pas de 0,1 mm (rezultă șase cazuri) în trei scenarii: a) jocuri doar în cuplele sferice superioare, b) doar în cele inferioare și c) varianta combinată a)+b).

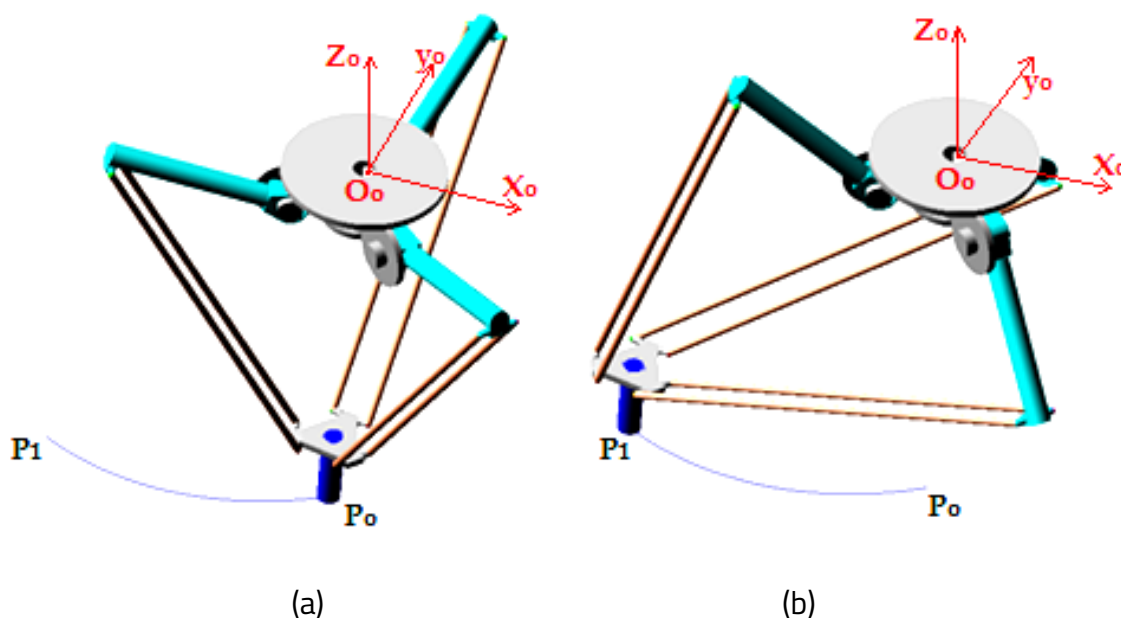
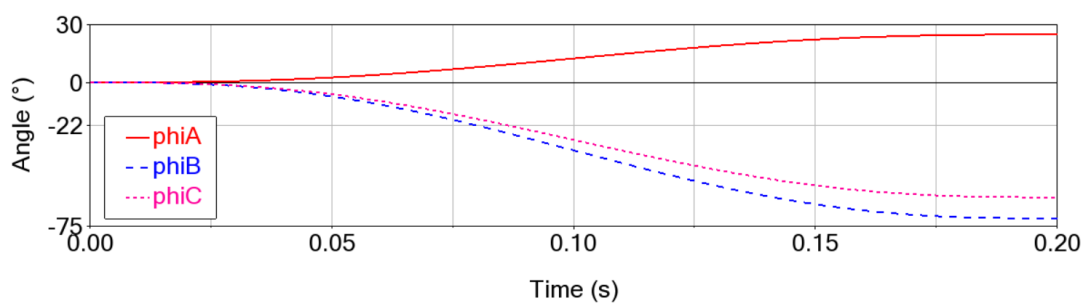
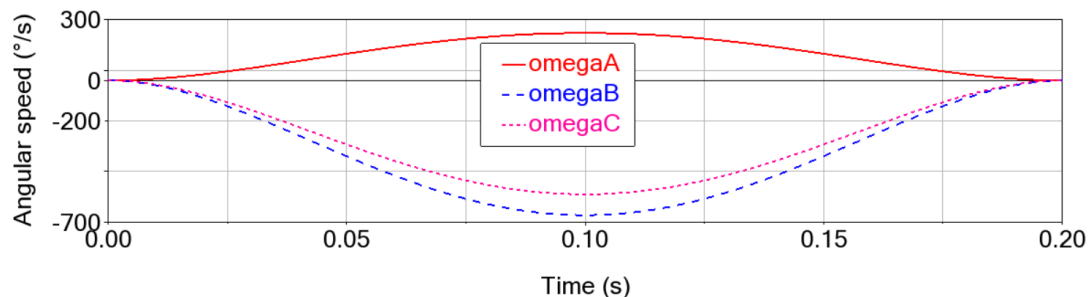


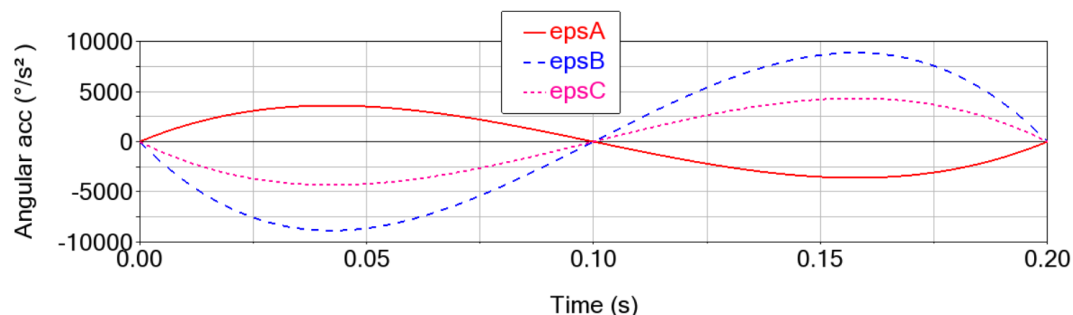
Fig. 3.1. Traectoria carteziană a robotului paralel Delta: (a) poziția inițială; (b) poziția finală.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.2. Traiectoriile de mișcare în spațiul articular al cuplelor active (RA, RB și RC): (a) deplasare unghiulară; (b) viteză unghiulară și (c) accelerație unghiulară.

Poziția de start a traiectoriei carteziene (P_0) corespunde poziției inițiale a robotului unde toate cele trei cuple motoare R_A , R_B și R_C sunt în poziția zero, iar elementele 1 sunt aranjate în același plan orizontal (paralel cu X_0Y_0), fig. 3.1. Traiectoria P_0P_1 în spațiul cartezian este o curbă spațială obținută prin aplicarea unei deplasări unghiulare de 25° în direcția pozitivă a axei cuplei R_A , 70° în direcția negativă a axei cuplei R_B și de 60° în direcția negativă a axei cuplei R_C (fig. 3.2a). De-a lungul acestei traiectorii se ating valorile maxime ale vitezei și accelerației liniare (8 m/s și respectiv 120 m/s²), care se asigură prin comanda vitezei unghiulare de $242^\circ/\text{s}$ în cupla motoare A, $554^\circ/\text{s}$ în cupla motoare B și $656^\circ/\text{s}$ în cupla

motoare C (fig. 3.2b), precum și accelerațiile unghiulare de $3003^\circ/\text{s}^2$ (cupla A), $8824^\circ/\text{s}^2$ (cupla B) și $4123^\circ/\text{s}^2$ (cupla C), așa cum rezultă din fig. 3.2c.

Traietorie carteziană P_0P_1 (fig. 3.3) este descrisă pentru cazul aplicării în cuplele active a unor traiectorii de mișcare polinomiale de gradul cinci. Această traiectorie este caracterizată prin deplasarea punctului caracteristic P de-a lungul tuturor celor trei axe ale sistemului global de coordonate $X_0Y_0Z_0$ (fig. 3.4) și atinge o poziție finală $r_P = 1,245$ m (fig. 3.4a). De asemenea, punctul caracteristic P atinge viteza maximă $v_{P\max} = 8$ m/s la 0.1 s (fig. 3.4b) și o accelerația maximă $a_{P\max} = 120$ m/s² la aproximativ 0,052 s și 0,158 s (fig. 3.4c).

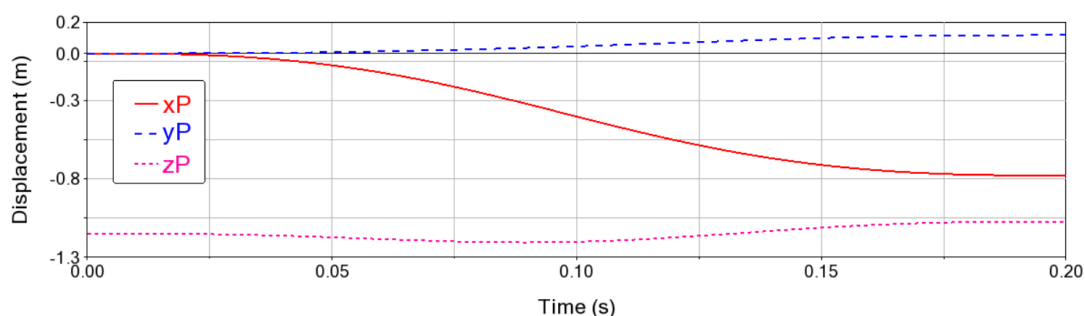
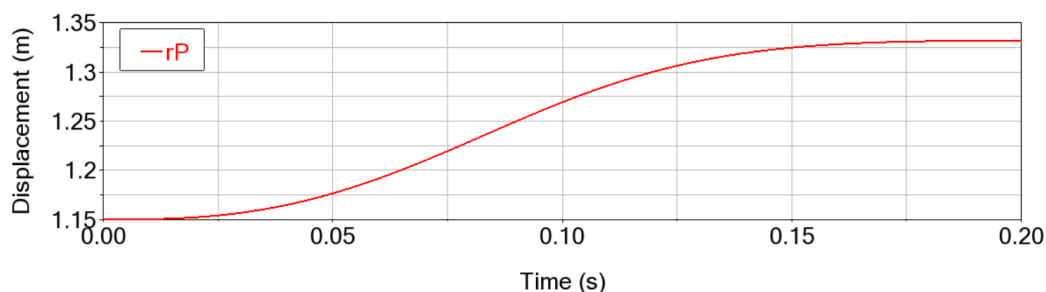
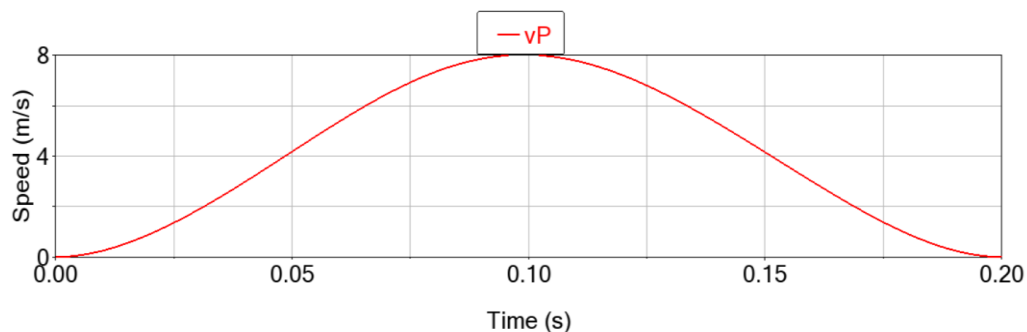


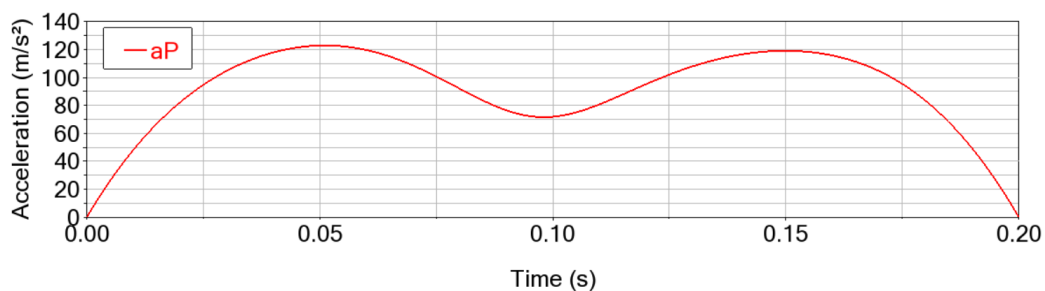
Fig. 3.3. Deplasarea end-efectorului proiectată pe axele sistemului de coordonate global $0_x0_y0_z$.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.4. Mișcarea end-efectorului robotului paralel Delta: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație.

Momentele în cuplele active pe traiectoria menționată (fig. 3.5) au alura accelerației unghiulare (vezi fig. 3.3c); se observă valori mai mari ale momentului TA și TB (de până la 898 N·m) datorate accelerațiilor unghiulare mai mari (și în consecință valori mai mari ale vitezelor și deplasărilor unghiulare) comparativ cu momentul motor activ TC (de până la 358 N·m).

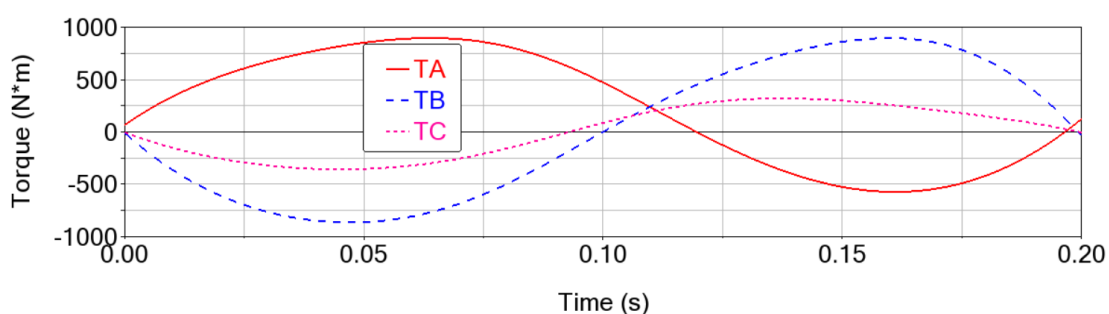


Fig. 3.5. Momentele motoare (TA, TB și TC) pe traiectoria considerată pentru robotul paralel Delta fără jocuri.

Influența dinamică a jocurilor din cuplele sferice este analizată considerând setul de valori $\Delta r = [0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6]$ mm, definit ca distanța dintre centrele sferelor O_1 și O_2 pe direcția axei z_0 – fig. 3.6).

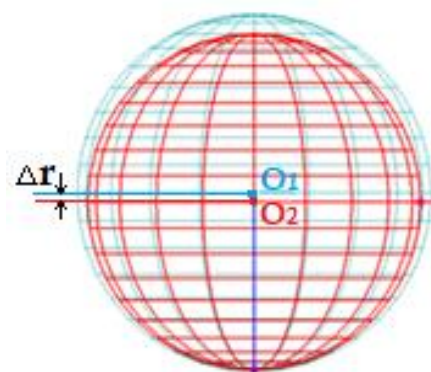


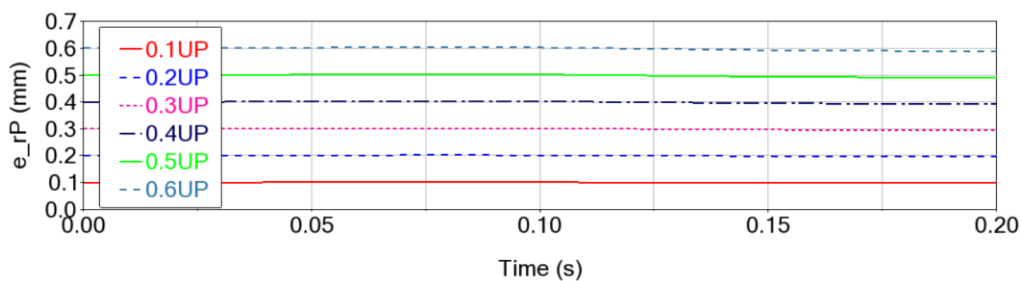
Fig. 3.6. Jocul din cuplele sferice ale robotului paralel Delta în poziția inițială.

În continuare se prezintă și se comentează rezultatele numerice obținute în cele trei scenarii: jocuri numai în cuplele superioare (&3.1), numai în cele inferioare (&3.2) și în ambele categorii de cuple sferice (&3.3).

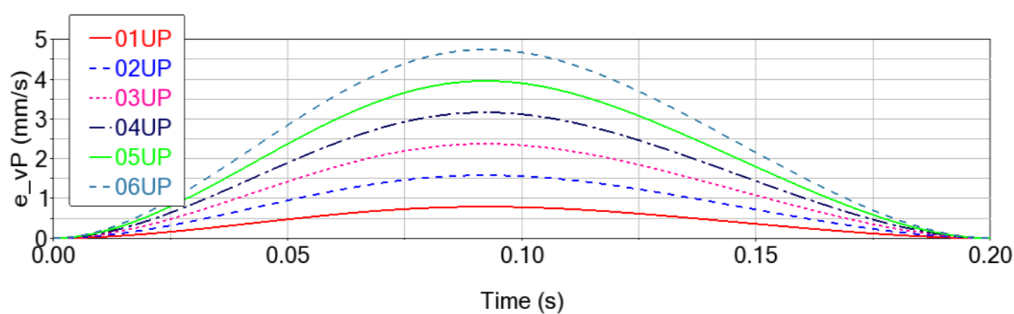
3.1. Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu jocuri în cuplele sferice superioare

Primul caz analizat este cel al jocurilor din cuplele sferice superioare, analizându-se influența jocurilor din cuplele sferice superioare asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta.

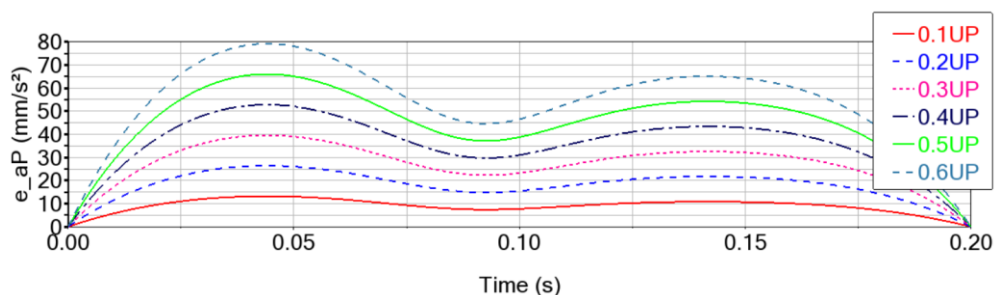
Referitor la erorile traiectoriei de mișcare a end-effectorului, pentru jocuri Δr între 0,1 și 0,6 mm în cuplele sferice superioare, erorile pe traiectoria end-effectorului înregistrează valori de până la 0,0147 mm pentru deplasări, de până la 4,744 mm/s la nivel de viteze și 79,204 mm/s² la nivel de accelerații (fig. 3.7 și tabelul 3.1).



(a)



(b)



(c)

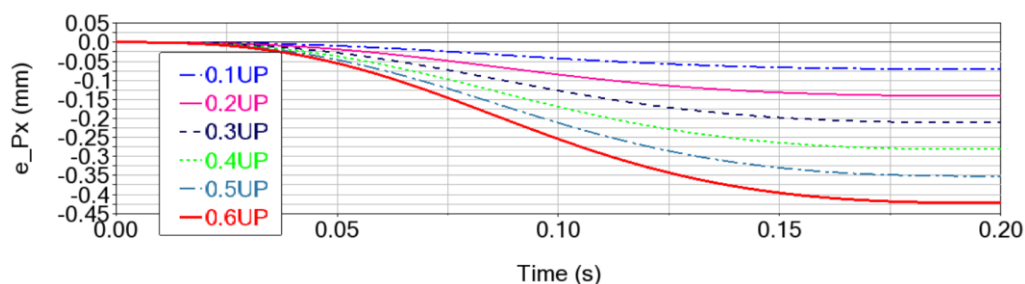
Fig. 3.7. Eroarea mișcărilor end-effectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare de 0,1 mm (red, solid line), 0,2 mm (blue, dash line), 0,3 mm (magenta, dot line), 0,4 mm (midnight_blue DotDash line), 0,5 mm (green, solid line) și 0,6 mm (blue gray, DotDash line), pentru: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Tabelul 3.1. Erorile cinematice maxime pe traiectorie (valori absolute și procente din valoarea maximă a parametrului cinematic) datorate jocurilor din cuplele sferice superioare ale robotului Delta.

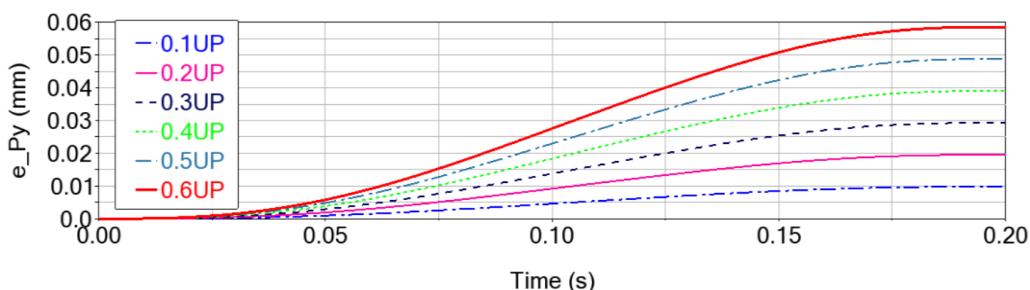
Jocul [mm]	e_{rPmax} [mm]	Δe_{rPmax} [mm]	e_{vPmax} [mm/s]	e_{aPmax} [mm/s ²]
0,1	0,1008	0,0025	0,791 (0,009%)	13,201 (0,011%)
0,2	0,2015	0,0049	1,581 (0,019%)	26,402 (0,022%)
0,3	0,3023	0,0074	2,372 (0,029%)	39,602 (0,033%)
0,4	0,403	0,0098	3,163 (0,039%)	52,803 (0,044%)
0,5	0,5038	0,0123	3,953 (0,049%)	66,004 (0,055%)
0,6	0,6045	0,0147	4,744 (0,059%)	79,204 (0,066%)

Așa cum se poate observa din fig. 3.7, se obține o creștere a erorilor pe traiectorie odată cu creșterea jocului, dar cu păstrarea alurii graficelor.

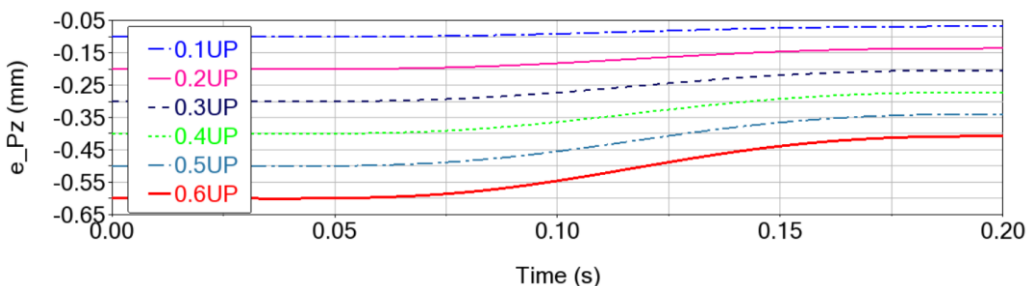
Pentru a putea compara rezultatele obținute și prezentate anterior (ca și rezultante), sunt prezentate și componentele după cele trei axe (X, Y și Z) pentru deplasări (fig. 3.8), viteze (fig. 3.9) și accelerații (fig. 3.10). Astfel, din analiza rezultatelor obținute, erorile apar pe toate cele trei axe, pornesc din 0 pentru axa X și Y, și din valoarea egală cu jocul pentru axa Z; acestea cresc odată cu creșterea jocurilor, dar efectul începe să se vadă după o scurtă perioadă de timp, datorită șocului inerțial.



(a)

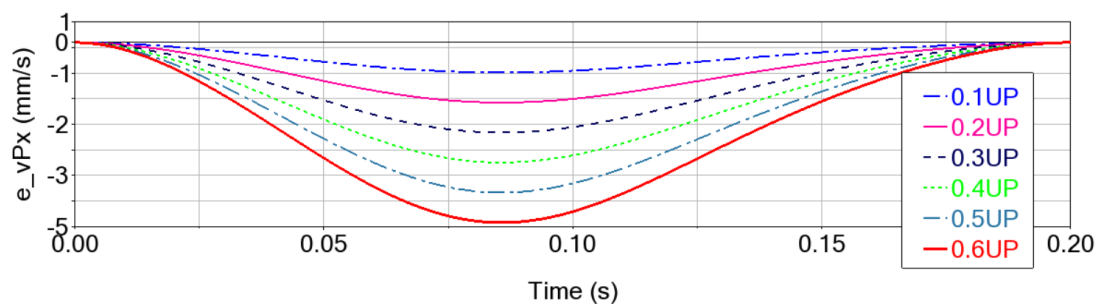


(b)

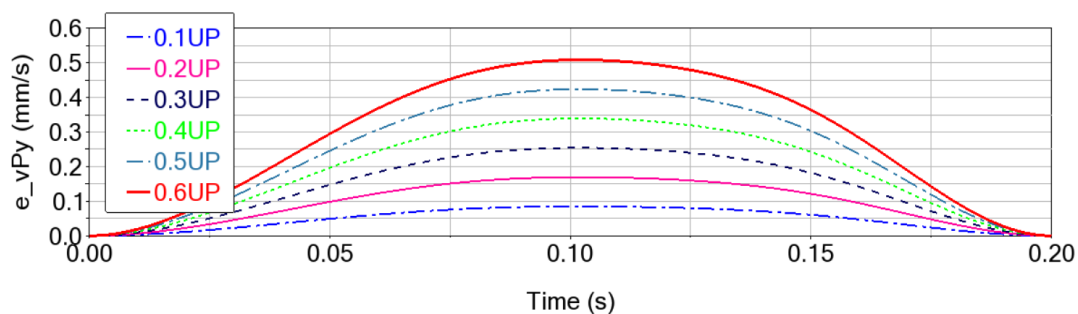


(c)

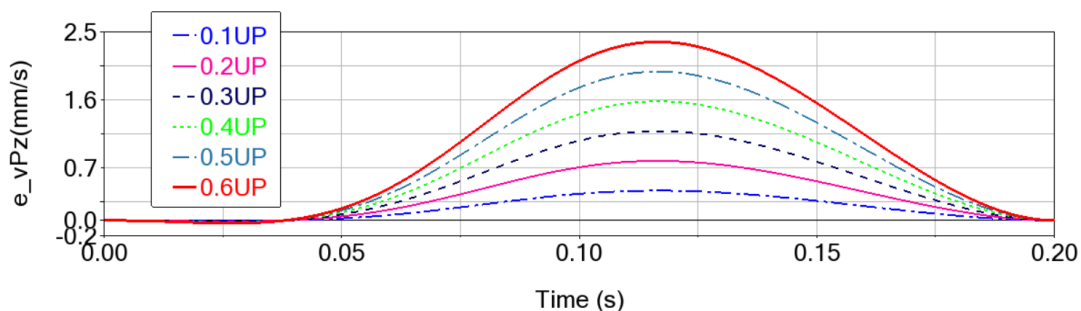
Fig. 3.8. Eroarea deplasărilor end-efectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare de 0,1 mm (blue, dotdash line), 0,2 mm (magenta, solid line), 0,3 mm (midnight_blue, dash line), 0,4 mm (green, dot line), 0,5 mm (blue gray, dotdash line) și 0,6 mm (red, solid line), pe: (a) axa X; (b) pe axa Y și (c) pe axa Z a punctului caracteristic P.



(a)

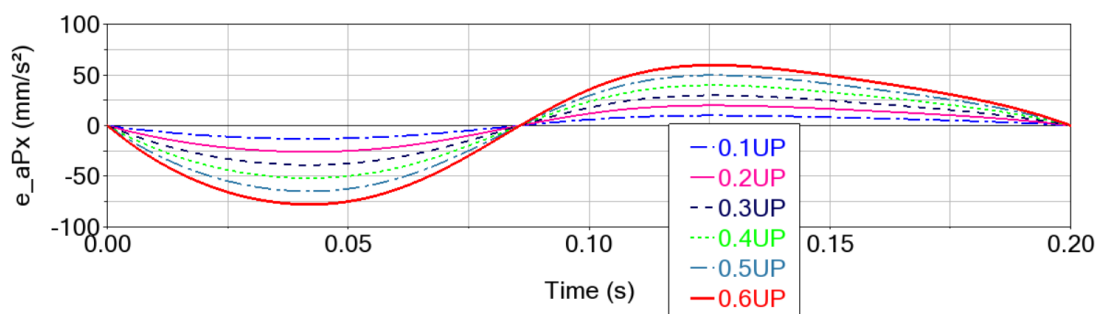


(b)

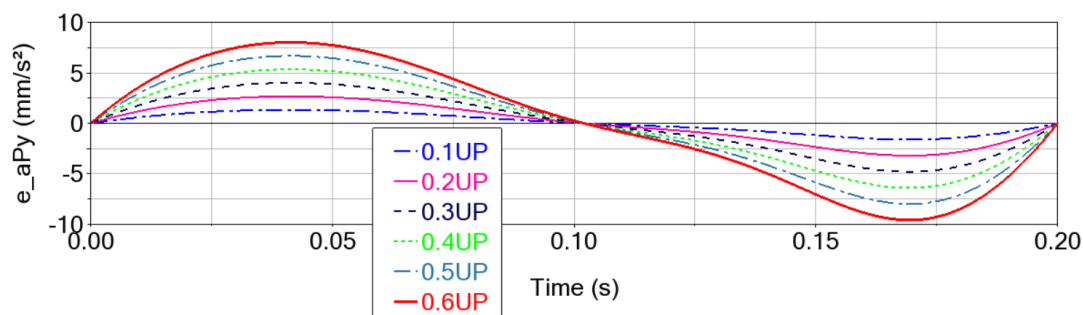


(c)

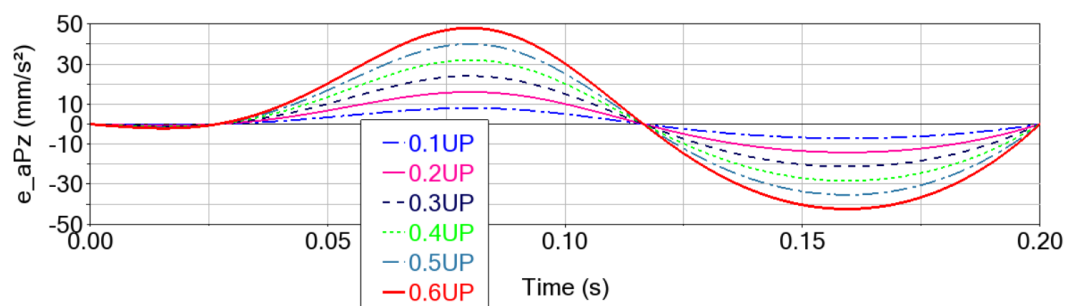
Fig. 3.9. Eroarea vitezelor end-efectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare de 0,1 mm (blue, dotdash line), 0,2 mm (magenta, solid line), 0,3 mm (midnight_blue, dash line), 0,4 mm (green, dot line), 0,5 mm (blue gray, dotdash line) și 0,6 mm (red, solid line), pe: (a) axa X; (b) pe axa Y și (c) pe axa Z a punctului caracteristic P.



(a)



(b)

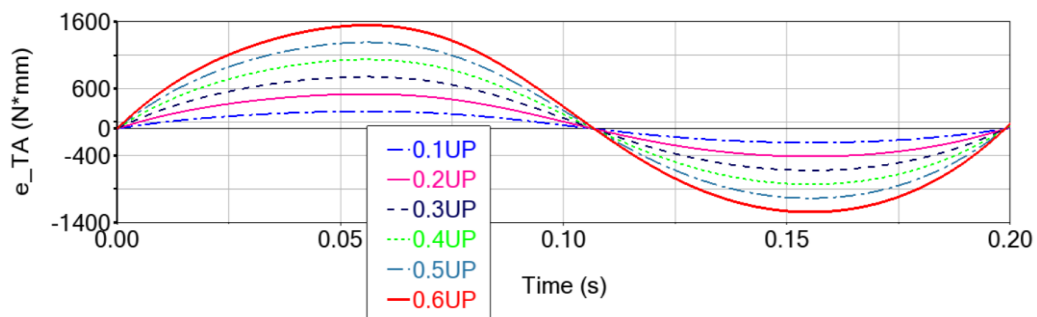


(c)

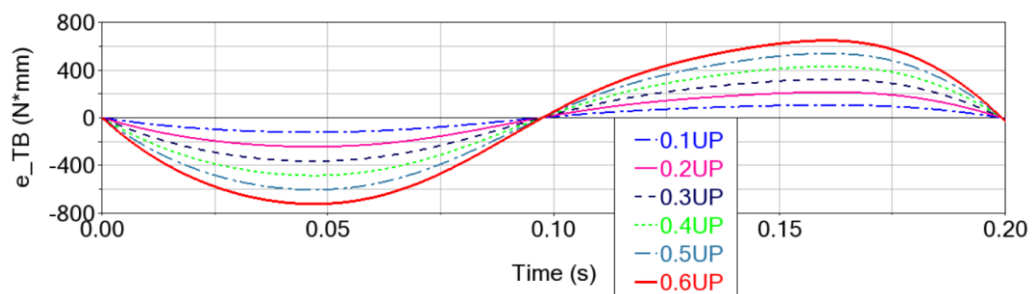
Fig. 3.10. Eroarea accelerațiilor end-efectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare de 0,1 mm (blue, dotdash line), 0,2 mm (magenta, solid line), 0,3 mm (midnight_blue, dash line), 0,4 mm (green, dot line), 0,5 mm (blue gray, dotdash line) și 0,6 mm (red, solid line), pe: (a) axa X; (b) pe axa Y și (c) pe axa Z a punctului caracteristic P.

Erorile momentelor motoare cresc odată cu creșterea jocului din cuplele sferice superioare, așa cum se poate observa în fig. 3.11 și în tabelul 3.2.

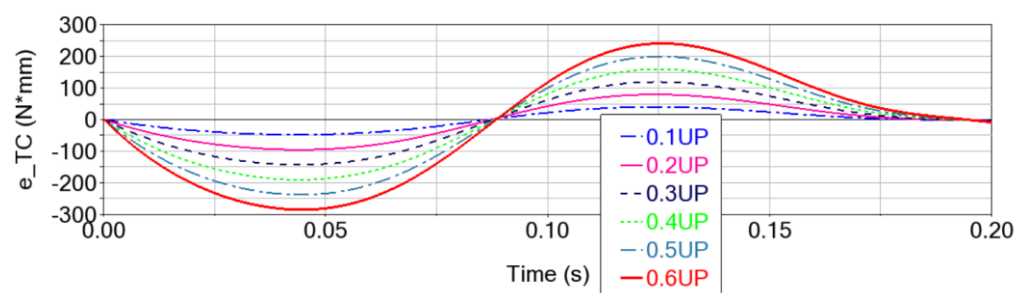
În concluzie, atunci când se iau în considerare jocuri în cuplele sferice superioare ale robotului Delta, se poate observa la erorile momentelor din cuplele motoare o tendință de creștere a valorilor odată cu creșterea jocurilor, creșterea fiind aproximativ constantă (se dublează, se triplează etc.) odată cu creșterea cu aceeași unitate (0,1 mm) a jocurilor.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.11. Eroarea momentelor motoare în cazul jocurilor din cuplele sferice superioare de 0,1 mm (red, solid line), 0,2 mm (blue, dash line), 0,3 mm (magenta, dot line), 0,4 mm (midnight_blue DotDash line), 0,5 mm (green, solid line) și 0,6 mm (blue gray, DotDash line), pentru: (a) bratul A; (b) bratul B și (c) bratul C.

Tabelul 3.2. Erorile dinamice maxime pe traiectorie (valori absolute și procente din valoarea maximă a parametrului cinematic) datorate jocurilor din cuplele sferice superioare ale robotului Delta.

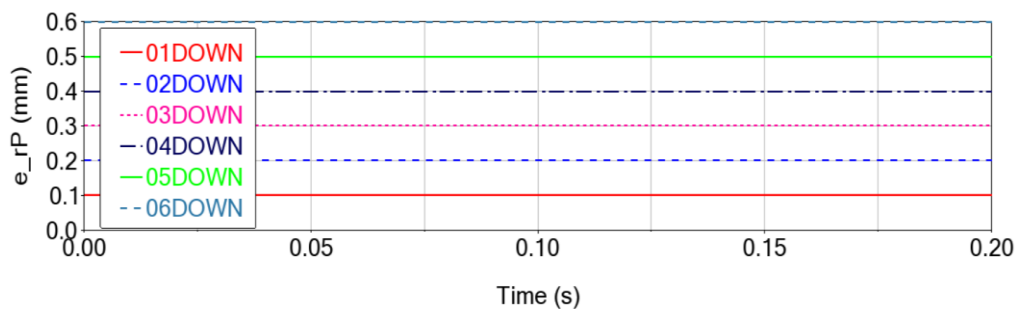
Jocul [mm]	e_TAmx [N·mm]	e_TBmax [N·mm]	e_TCmax [N·mm]
0,1	260,012 (0,0289%)	121,652 (0,0135%)	47,705 (0,013%)
0,2	519,157 (0,057%)	243,006 (0,027%)	95,394 (0,026%)
0,3	777,520 (0,086%)	364,009 (0,04%)	143,037 (0,039%)
0,4	1035,193 (0,1152%)	484,604 (0,053%)	190,619 (0,053%)
0,5	1292,307 (0,1439%)	604,734 (0,067%)	238,106 (0,066%)
0,6	1548,955 (0,1724%)	724,344 (0,08%)	285,469 (0,079%)

3.2. Analiza erorilor cinematice si dinamice ale robotului paralel Delta cu jocuri in cuplele sferice inferioare

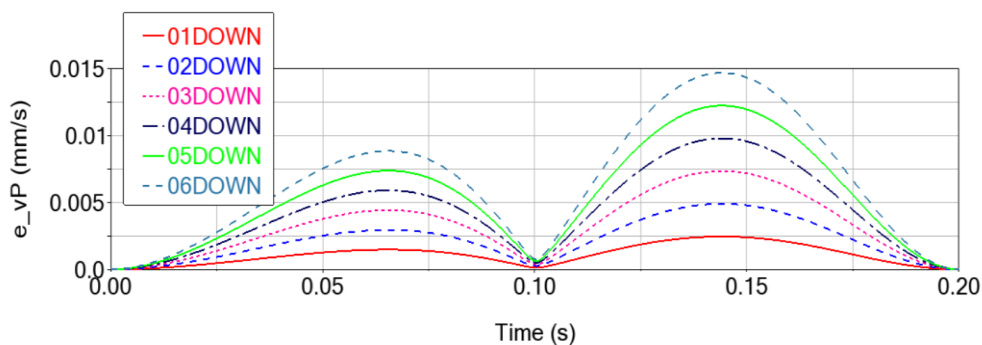
Următorul studiu efectuat consideră numai jocul din cuplele sferice inferioare ale robotului paralel Delta.

În acest sens, au fost analizate aceleași seturi de valori ale jocului de 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm și 0,6 mm ale cuplelor sferice inferioare ale robotului paralel Delta (pe axa Z).

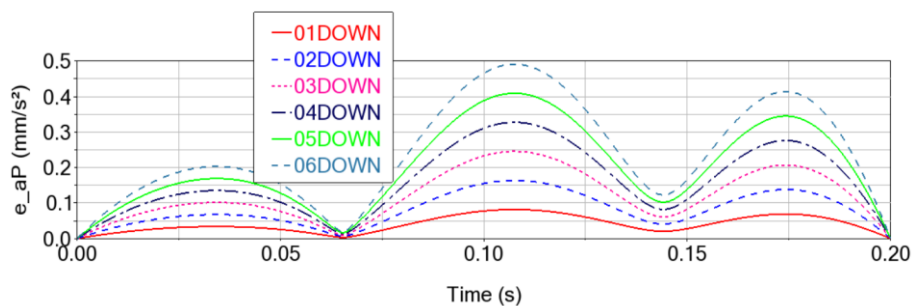
Din analiza rezultatelor obținute, se poate observa ca eroarea deplasării end-efectorului nu depășește valorile inițiale ale jocurilor, care conduc la o deplasare inițială după axa z cu o valoare egală cu cea a jocului din cuplele sferice inferioare (fig. 3.12a).



(a)



(b)



(c)

Figure 3.12. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice inferioare de 0,1 mm (red, solid line), 0,2 mm (blue, dash line), 0,3 mm (magenta, dot line), 0,4 mm (midnight_blue DotDash line), 0,5 mm (green, solid line) și 0,6 mm (blue gray, DotDash line), pentru: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Erorile vitezelor și accelerațiilor au valori mult mai mici decât în cazul jocurilor din cuplele superioare (de aproximativ 3 ori mai mici așa cum reiese și din tabelul 3.3).

Astfel, erorile vitezelor obținute cresc odată cu creșterea jocului, atingând valori de maxim 0,0147 mm/s pentru cazul jocului cel mai mare, și anume cel de 0,6 mm (fig. 3.12b).

Tabelul 3.3. Erorile cinematice maxime pe traiectorie (valori absolute și procente din valoarea maximă a parametrului cinematic) datorate jocurilor din cuplele sferice inferioare ale robotului Delta.

Jocul [mm]	e_rPmax [mm]	Δe_rPmax [mm]	e_vPmax [mm/s]	e_aPmax [mm/s ²]
0,1	0,1000	$0,1 \cdot 10^{-9}$	0,0025 (0,000031%)	0,0819 (0,000068%)
0,2	0,2000	$0,1 \cdot 10^{-9}$	0,0049 (0,000061%)	0,1637 (0,000136%)
0,3	0,3000	$0,1 \cdot 10^{-9}$	0,0074 (0,000092%)	0,2456 (0,000204%)
0,4	0,4000	$0,1 \cdot 10^{-9}$	0,0098 (0,000122%)	0,3274 (0,000272%)
0,5	0,5000	$0,1 \cdot 10^{-9}$	0,0123 (0,000153%)	0,4093 (0,000341%)
0,6	0,6000	$0,1 \cdot 10^{-9}$	0,0147 (0,000183%)	0,4911 (0,000409%)

În ceea ce privește eroarea de accelerație, aceasta de asemenea are valori crescătoare odată cu creșterea jocului din cuplele sferice inferioare, dar aceste valori ating valori mult inferioare celor datorate jocurilor din cuplele sferice superioare, ajungând la valori maxime de $0,4911 \text{ mm/s}^2$ (fig. 3.12c).

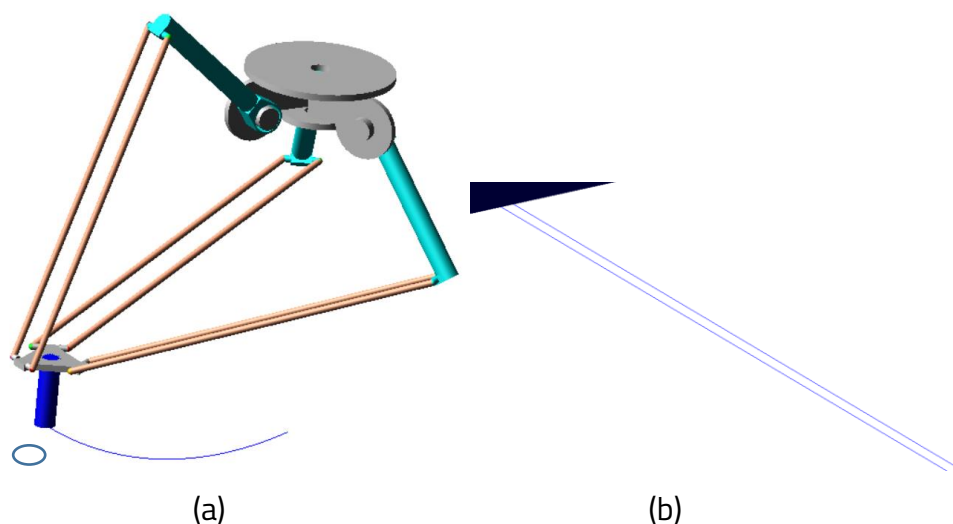
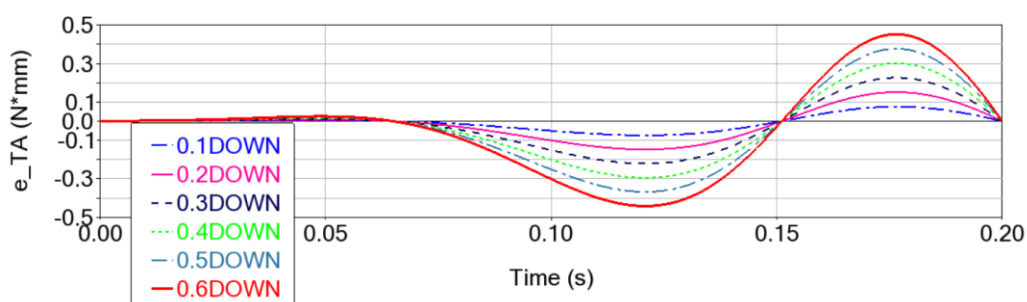


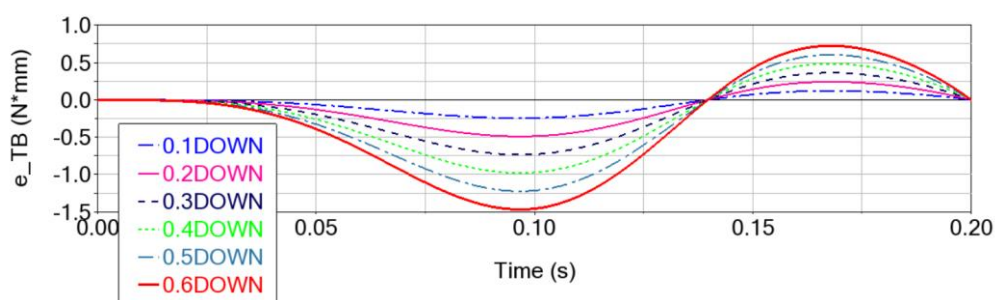
Fig. 3. 13. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta cu jocuri de 0,6 mm: (a) poziția finală; (b) detaliu al traiectoriei rigid-jocuri.

Pentru a putea analiza comparativ rezultatele obținute, în fig. 3.12 sunt reprezentate pe același grafic toate cele șase cazuri analizate anterior și în tabelul 3.3 sunt evidențiate

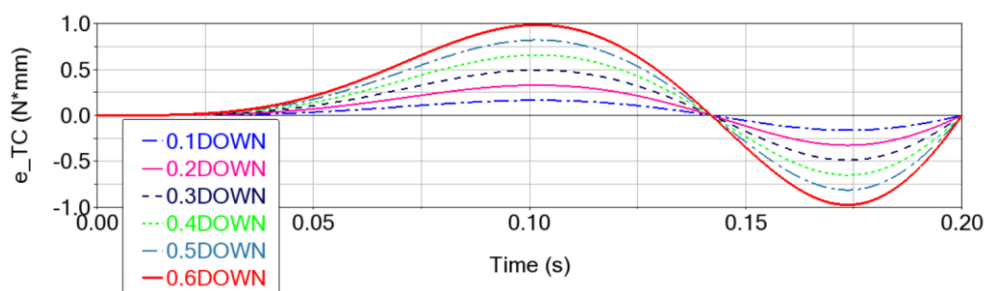
valorile maxime ale erorilor în funcție de valoarea jocului, iar în fig. 3.13 este evidențiată traiectoria paralelă obținută datorită jocului de 0,6 mm; astfel, se poate observa tendința de creștere a erorilor odată cu creșterea jocurilor din cuplele motoare, alura curbelor rămânând aceeași, dar atingând amplitudini mult mai mari, dar net inferioare celor obținute în cazul anterior.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.14. Eroarea momentelor motoare in cazul jocurilor in cuplele sferice inferioare de 0,1 mm (red, solid line), 0,2 mm (blue, dash line), 0,3 mm (magenta, dot line), 0,4 mm (midnight_blue DotDash line), 0,5 mm (green, solid line) și 0,6 mm (blue gray, DotDash line), pentru: (a) bratul A; (b) bratul B si (c) bratul C.

Erorile momentelor ating valori relativ mici, de până la maxim 1,4687 N·mm (fig. 3.14) pentru cazul erorii momentului motor din cupla B.

Din analiza rezultatelor obținute în fig. 3.14, se poate observa o întârziere datorită efectului inerțial asupra jocurilor din cuplele inferioare asupra comportamentului dinamic al robotului Delta.

Efectul creșterilor odată cu creșterea jocului din cuplele inferioare rămâne valabil și în acest caz, cu valori maxime de $\sim 0,45$ N·mm pentru TA, $\sim 1,47$ N·mm pentru TB și $\sim 0,98$ N·mm pentru TC (pentru cazul maxim al jocurilor și anume la o valoare de 0,6 mm, vezi tabel 3.4).

Pentru o mai bună evidențiere a valorilor maxime ale erorilor din cuplele motoare, în tabelul 3.4 sunt prezentate erorile maxim obținute pentru fiecare caz de joc în cuple luat în considerare; valorile maxim obținute cresc progresiv odată cu creșterea valorilor jocurilor din cuplele motoare.

Tabelul 3.4 Erorile dinamice maxime pe traiectorie (valori absolute și procente din valoarea maximă a parametrului cinematic) datorate jocurilor din cuplele sferice inferioare ale robotului Delta.

Jocul [mm]	e_TAmax [N·mm]	e_TBmax [N·mm]	e_TCmax [N·mm]
0,1	0,0754 (0,0000083%)	0,2448 (0,0000272%)	0,1644 (0,0000459%)
0,2	0,1509 (0,0000168%)	0,4896 (0,0000545%)	0,3289 (0,0000918%)
0,3	0,2209 (0,0000245%)	0,7344 (0,0000817%)	0,4933 (0,0000137%)
0,4	0,3018 (0,0000336%)	0,9792 (0,000109%)	0,6578 (0,0000183%)
0,5	0,3772 (0,0000420%)	1,2240 (0,000136%)	0,8222 (0,0000229%)
0,6	0,4526 (0,0000504%)	1,4687 (0,000163%)	0,9867 (0,0000275%)

3.3. Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu jocuri în cuplele sferice superioare și inferioare

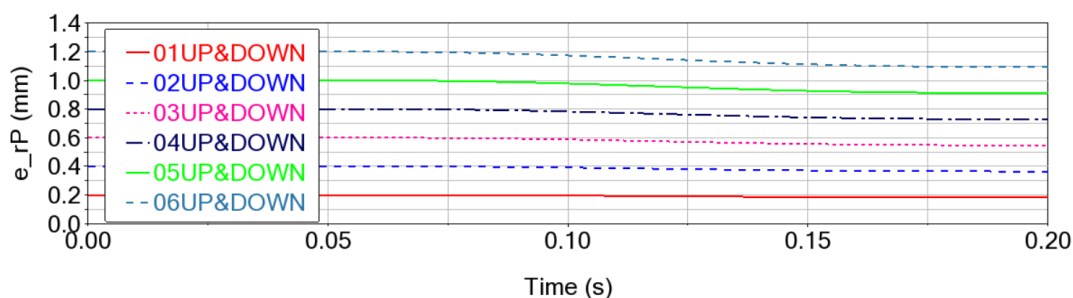
Ultimul caz analizat este cel al jocurilor din cuplele superioare și inferioare de la 0,1 mm până la 0,6 mm după axa Z. Abaterile așteptate pleacă de la o valoare însumată a erorilor (de exemplu 0,1 din cuplele superioare plus 0,1 din cuplele inferioare conduc la o eroare la început de traiectorie de 0,2 mm).

Astfel, la nivel de deplasări (fig. 3.15.a), erorile inițiale sunt dublu valorilor jocurilor din cuplele sferice (0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm și 1,2 mm), ulterior atingând valori relativ mici, cu abateri mai mici de 0,15 mm.

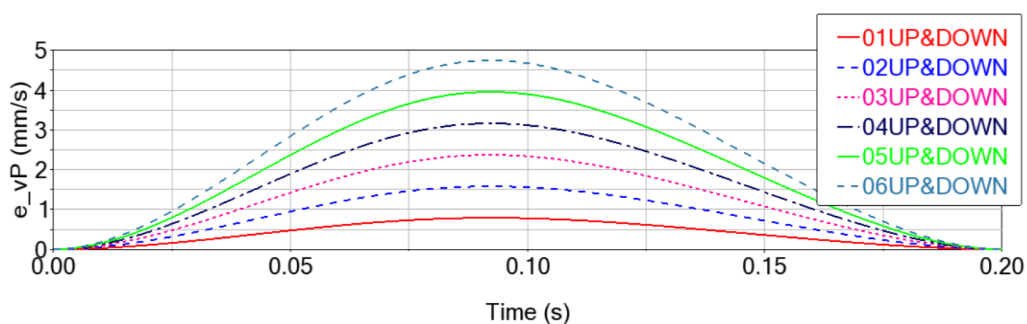
După cum se poate observa din rezultatele obținute, valorile maxime (tabel 3.5) sunt în creștere odată cu creșterea jocului din cuplele sferice, efectul jocului din cuplele sferice superioare fiind predominant.

La nivel de viteze ale punctului caracteristic P (fig. 3.15.b), eroarea are alura curbei obținută în cazul jocurilor din cuplele superioare, atingând un maxim de $\sim 4,75$ mm/s (pentru cazul jocului de 0,6 mm).

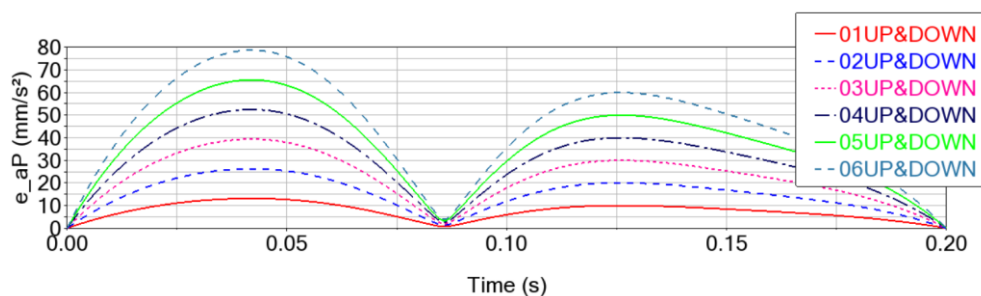
Din punctul de vedere al erorilor accelerației pe traiectoria punctului caracteristic P (fig. 3.15.c), valorile maxime cresc odată cu creșterea jocului din cuple, atingând un maxim de ~ 79 mm/s² (pentru cazul jocului de 0,6 mm).



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.15. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare și inferioare de 0,1 mm (red, solid line), 0,2 mm (blue, dash line), 0,3 mm (magenta, dot line), 0,4 mm (midnight_blue DotDash line), 0,5 mm (green, solid line) și 0,6 mm (blue gray, DotDash line), pentru: (a) deplasare; (b) viteză și (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Tabelul 3.5. Erorile cinematice maxime pe traiectorie (valori absolute și procente din valoarea maximă a parametrului cinematic) datorate jocurilor din cuplele sferice superioare și inferioare ale robotului Delta.

Jocul [mm]	e_rPmax [mm]	Δe_rPmax [mm]	e_vPmax [mm/s]	e_aPmax [mm/s ²]
0,1	0,2002	0,0178	0,791 (0,009%)	13,117 (0,0109%)
0,2	0,4004	0,0357	1,582 (0,019%)	26,234 (0,0218%)
0,3	0,6006	0,0535	2,372 (0,029%)	39,351 (0,0327%)
0,4	0,8008	0,0713	3,163 (0,039%)	52,468 (0,0437%)
0,5	1,0011	0,0893	3,954 (0,049%)	65,585 (0,0546%)
0,6	1,2013	0,1071	4,745 (0,059%)	78,702 (0,0655%)

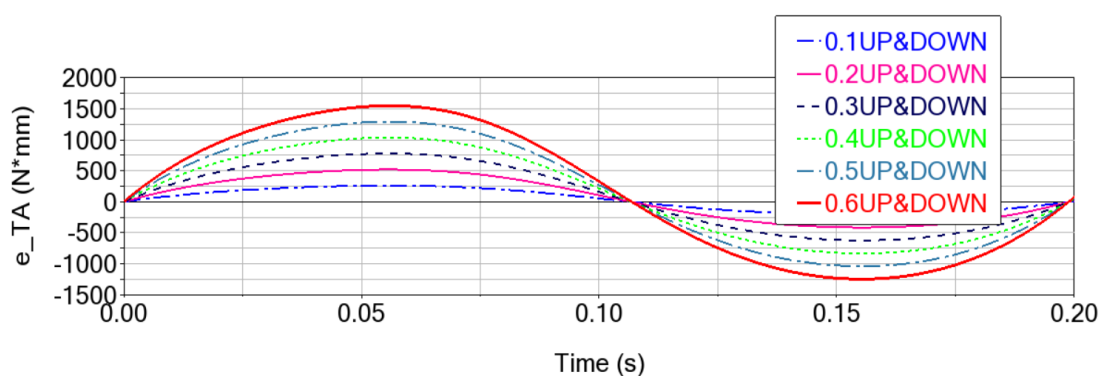
Erorile momentelor motoare în cazul luării în considerare a jocurilor din cuplele sferice (superioare și inferioare) sunt prezentate în fig. 3.16, iar valorile maxime sunt prezentate tabelar în tabelul 3.6.

Astfel, în ceea ce privește erorile momentelor motoare, valoarea maximă atinsă este de ~1549 N·mm pentru o eroare datorată jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice (superioare și inferioare), în cazul momentului motor TA .

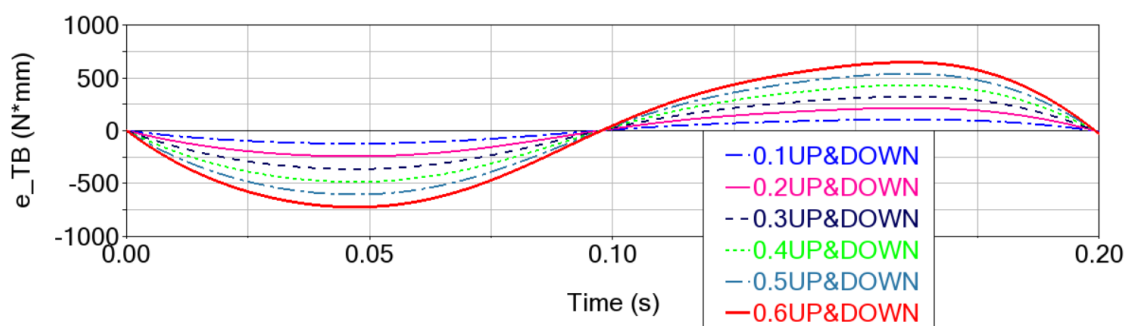
După cum se poate observa atât din fig. 3.16 (evoluția în timp), cât și din tabelul 3.6 (valori maxime), valorile cresc odată cu creșterea jocurilor, alura graficelor rămânând aceeași, dar cu variații de amplitudine ce cresc progresiv în funcție de valoarea jocului din cuplele sferice ale robotului Delta luat în considerare.

Tabelul 3.6. Erorile dinamice maxime pe traiectorie (valori absolute și procente din valoarea maximă a parametrului cinematic) datorate jocurilor din cuplele sferice superioare și inferioare ale robotului Delta.

Jocul [mm]	e_TAmax [N·mm]	e_TBmax [N·mm]	e_TCmax [N·mm]
0,1	260,089 (0,0289%)	121,704 (0,0135%)	47,682 (0,013%)
0,2	519,164 (0,057%)	243,113 (0,027%)	95,3467 (0,026%)
0,3	777,530 (0,086%)	364,170 (0,04%)	142,967 (0,039%)
0,4	1035,208 (0,1152%)	484,818 (0,053%)	190,523 (0,053%)
0,5	1292,324 (0,1439%)	605,001 (0,067%)	237,985 (0,066%)
0,6	1548,976 (0,1724%)	724,655 (0,08%)	285,324 (0,079%)



(a)



(b)

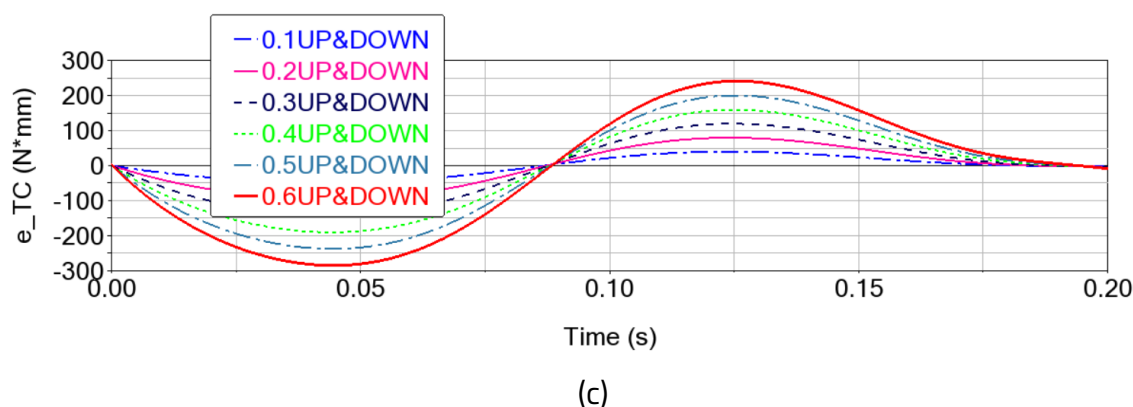


Fig. 3.16. Eroarea momentelor motoare în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare și inferioare de 0,1 mm (red, solid line), 0,2 mm (blue, dash line), 0,3 mm (magenta, dot line), 0,4 mm (midnight_blue DotDash line), 0,5 mm (green, solid line) și 0,6 mm (blue gray, DotDash line), pentru: (a) bratul A; (b) bratul B și (c) bratul C.

Se menține aceeași concluzie ca și în cazul comportamentului cinematic al robotului, și anume faptul că comportamentul dinamic este influențat cu precădere de jocurile din cuplele sferice superioare, influența celor inferioare fiind nesemnificativă.

3.4. Identificarea aditivității efectului jocurilor în cuplele sferice superioare și inferioare

În urma analizelor anterior efectuate, este important de identificat dacă efectul acestor jocuri din cuplele sferice este aditiv. Referitor la erorile de deplasare a punctului caracteristic P, în fig. 3.17 sunt prezentate erorile apărute la deplasarea punctului caracteristic în cazul jocurilor luate în considerare în cuplele sferice superioare și inferioare (blue line) versus suma lor luate separat (red line).

Din analiza rezultatelor obținute se poate concluziona faptul că efectul acestora nu este aditiv, efectul jocurilor luate împreună conducând la erori cu 0,159 mm mai mari pentru cazul jocurilor de 0,1 mm, 0,0319 mm în cazul jocurilor de 0,2 mm, 0,0478 mm în cazul jocurilor de 0,3 mm, 0,0637 mm în cazul jocurilor de 0,4 mm, 0,0794 mm în cazul jocurilor de 0,5 mm și 0,0032 mm în cazul jocurilor de 0,6 mm.

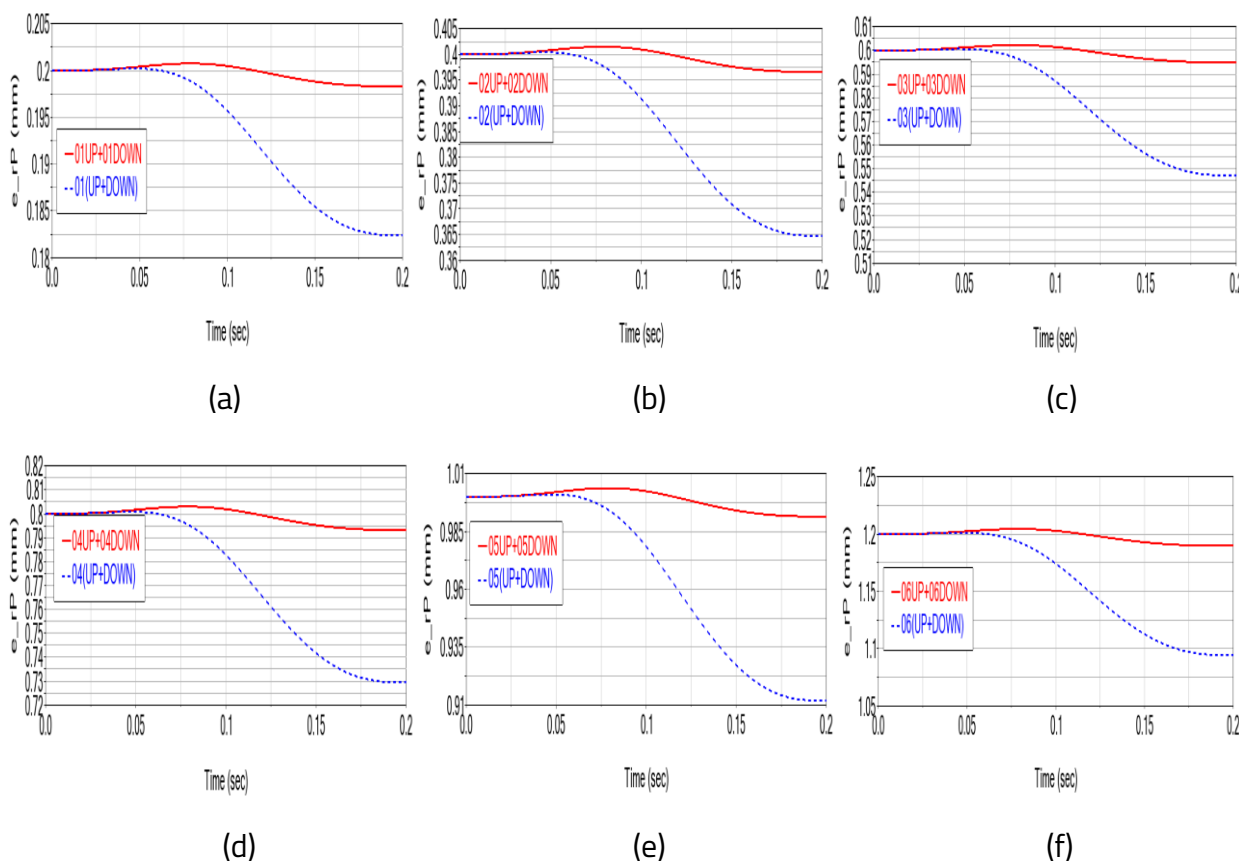
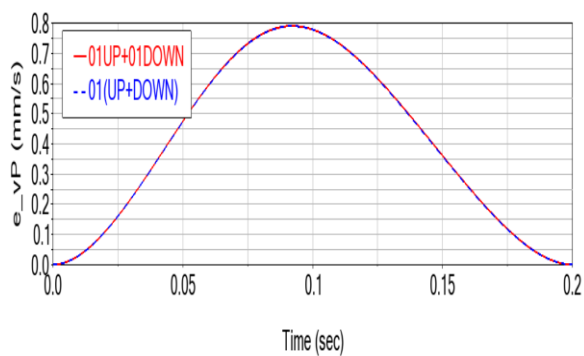


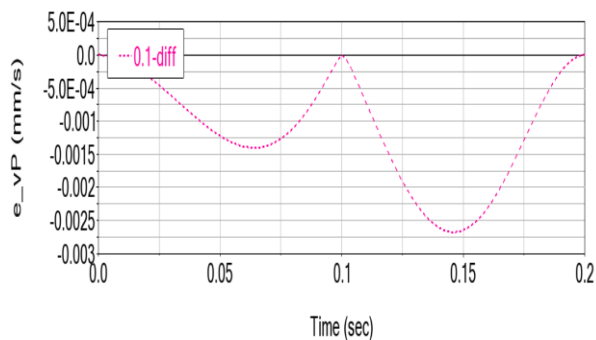
Fig. 3.17. Eroarea deplasărilor end-effectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare și inferioare (red line) și suma celor superioare și inferioare (blue line) pentru jocuri de: (a) 0,1 mm; (b) 0,2 mm; (c) 0,3 mm; (d) 0,4 mm; (e) 0,5 mm; (f) 0,6 mm.

În ceea ce privește analiza erorilor vitezelor punctului caracteristic P în cele două cazuri prezentate anterior, concluzia privind efectul neaditiv rămâne valabilă și în acest caz, rezultatele obținute fiind prezentate în fig. 3.18.

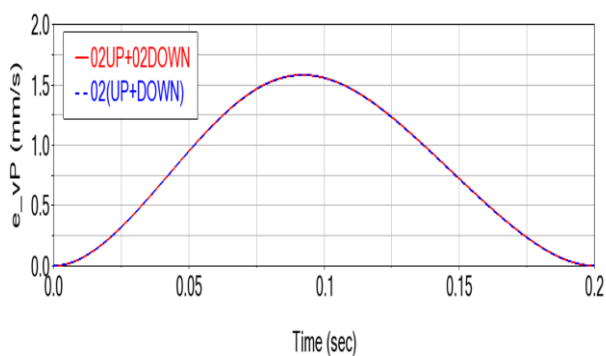
Din analiza rezultatelor obținute se poate concluziona faptul că efectul jocurilor luate împreună (cuple sferice superioare și inferioare) conduce la erori cu până 0,0027 mm/s mai mari pentru cazul jocurilor de 0,1 mm, 0,0053 mm/s în cazul jocurilor de 0,2 mm, 0,008 mm/s în cazul jocurilor de 0,3 mm, 0,0107 mm/s în cazul jocurilor de 0,4 mm, 0,0134 mm/s în cazul jocurilor de 0,5 mm și 0,016 mm/s în cazul jocurilor de 0,6 mm.



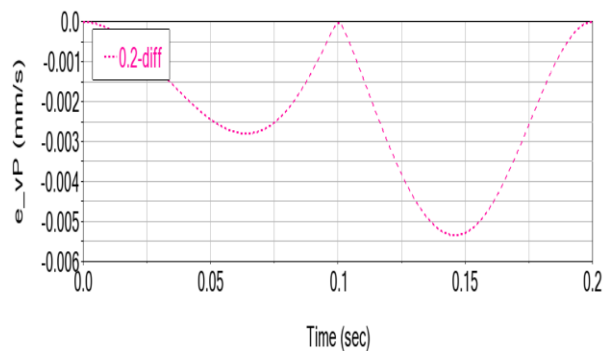
(a)



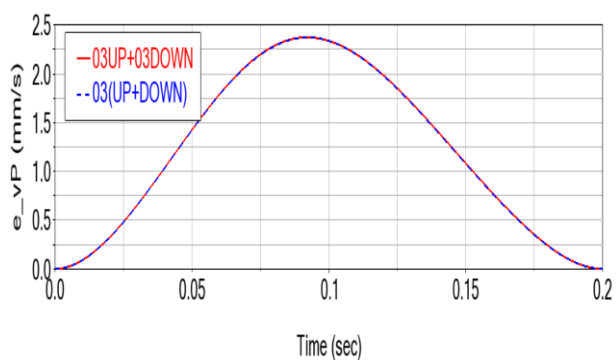
(b)



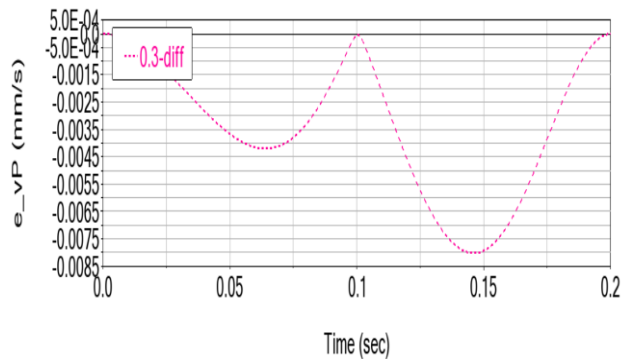
(c)



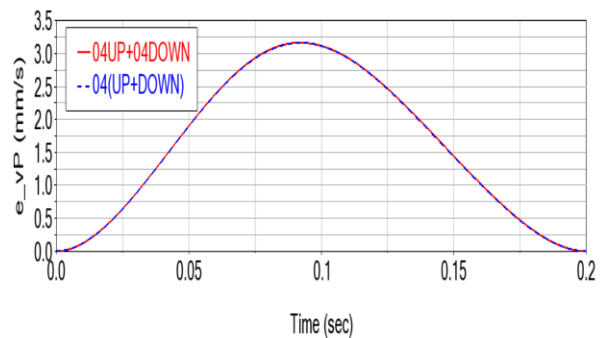
(d)



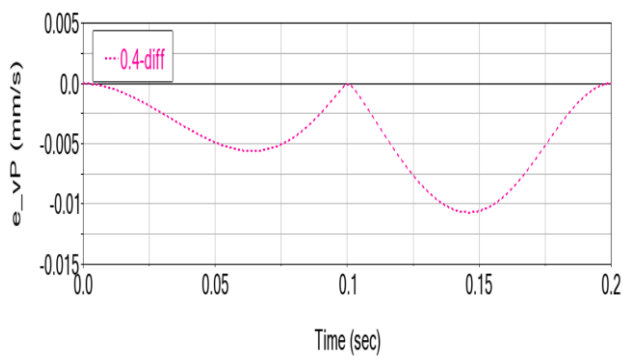
(e)



(f)



(g)



(h)

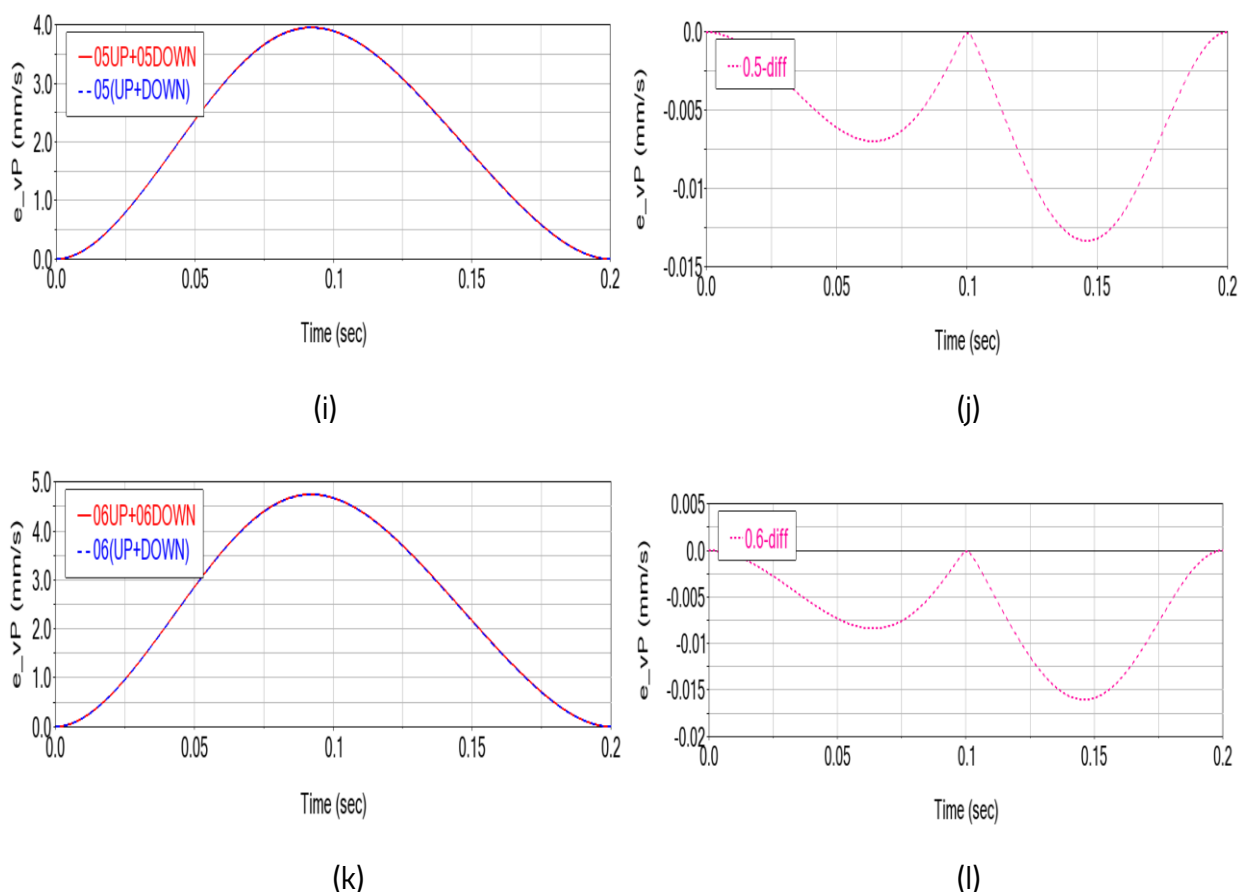
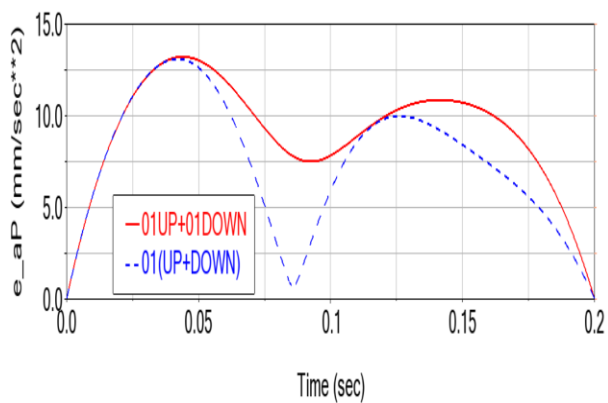


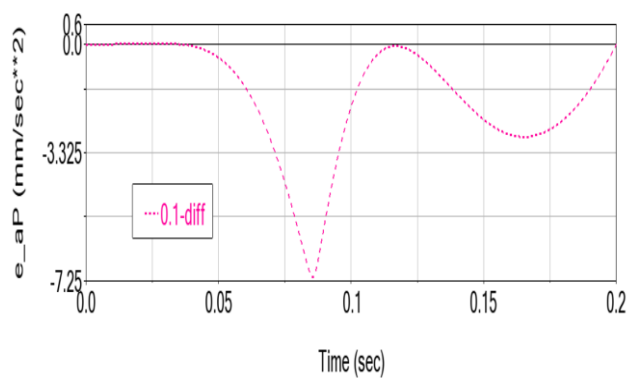
Fig. 3.18. Eroarea vitezelor end-efectorului in cazul jocurilor in cuplele sferice superioare si inferioare (red line) and suma celor superioare si inferioare (blue line) pentru jocuri de: (a) 0,1 mm; (c) 0,2 mm; (e) 0,3 mm; (g) 0,4 mm; (i) 0,5 mm; (k) 0,6 mm si diferentele intre ele pentru (b) 0,1 mm; (d) 0,2 mm; (f) 0,3 mm; (h) 0,4 mm; (j) 0,5 mm; (l) 0,6 mm.

În ceea ce privește analiza erorilor accelerațiilor punctului caracteristic P în cele două cazuri prezentate anterior (jocurile din cuple luate separat și împreună), rezultatele obținute sunt prezentate în fig. 3.19, iar concluzia privind faptul că efectul acestora nu este aditiv rămâne valabilă și în acest caz.

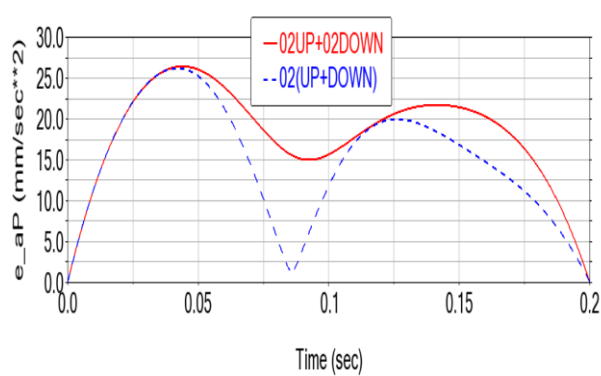
Din analiza rezultatelor obținute se poate concluziona faptul că efectul jocurilor considerate împreună (cuple sferice superioare și inferioare) conduc la erori cu până 7,151 mm/s² mai mari pentru cazul jocurilor de 0,1 mm, 14,3018 mm/s² în cazul jocurilor de 0,2 mm, 21,4523 mm/s² în cazul jocurilor de 0,3 mm, 28,6024 mm/s² în cazul jocurilor de 0,4 mm, 35,7523 mm/s² în cazul jocurilor de 0,5 mm și 42,9019 mm/s² în cazul jocurilor de 0,6 mm.



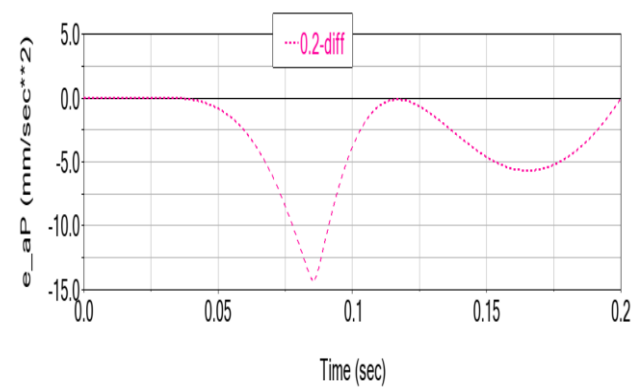
(a)



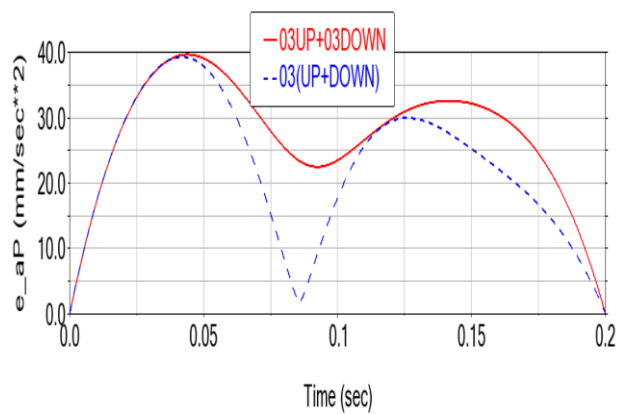
(b)



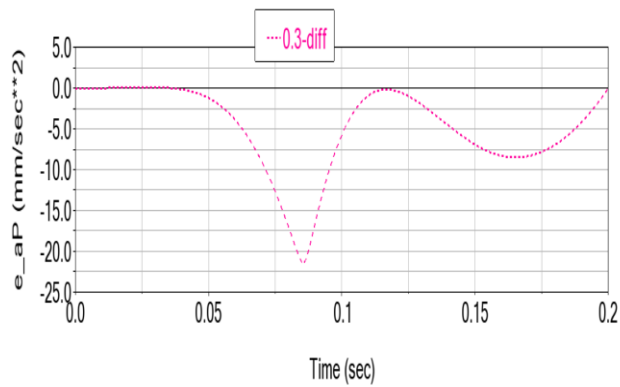
(c)



(d)



(e)



(f)

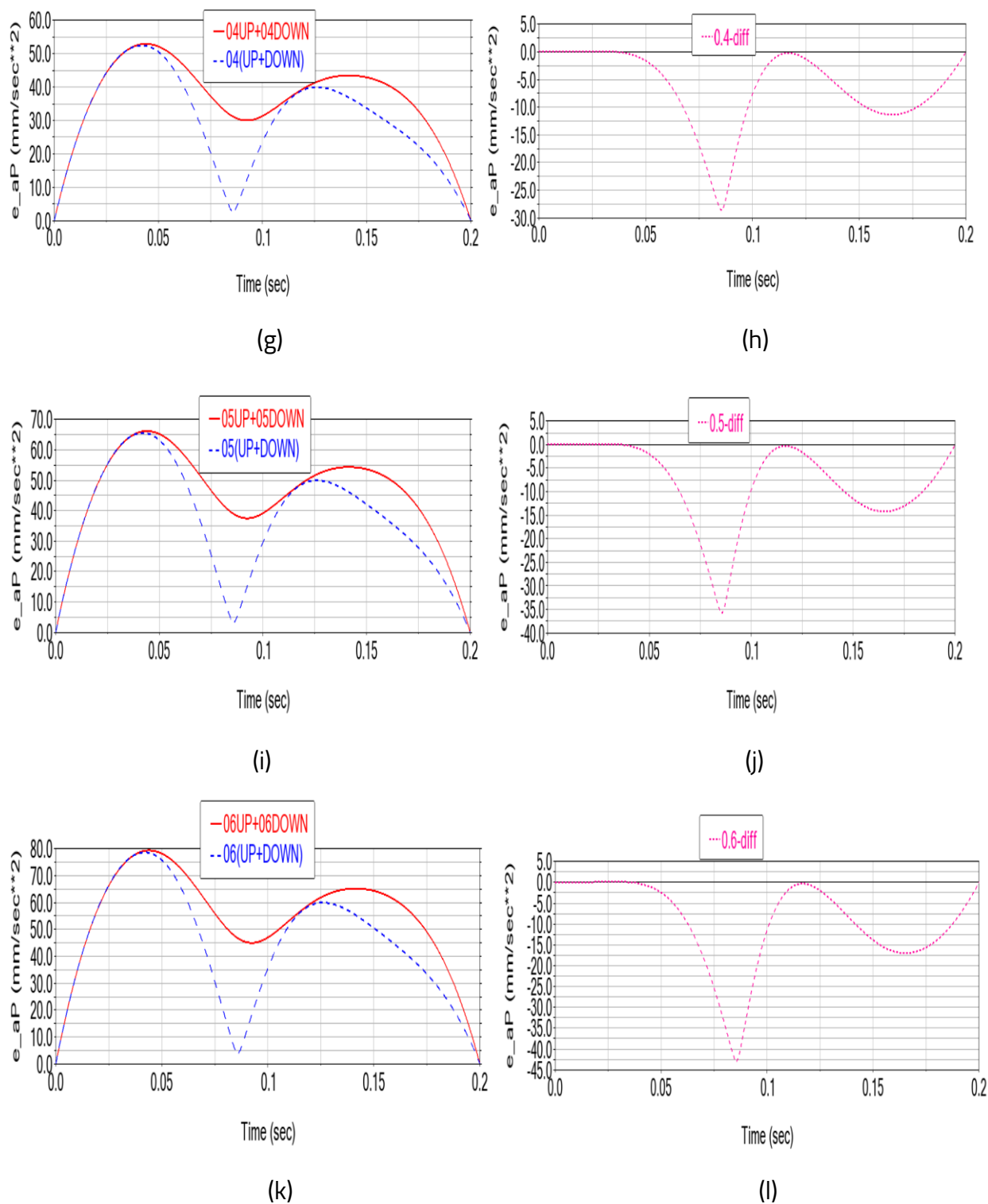


Fig.3.19. Eroarea accelerațiilor end-efectorului în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare și inferioare (red line) și suma celor superioare și inferioare (blue line) pentru jocuri de: (a) 0,1 mm; (c) 0,2 mm; (e) 0,3 mm; (g) 0,4 mm; (i) 0,5 mm; (k) 0,6 mm și diferențele între ele pentru (b) 0,1 mm; (d) 0,2 mm; (f) 0,3 mm; (h) 0,4 mm; (j) 0,5 mm; (l) 0,6 mm.

În urma analizelor anterior efectuate, este important de identificat și ce se întâmplă la nivel de erori maxime obținute. În acest sens, erorile maxime sunt prezentate în fig. 3.20 în cazul deplasărilor și în fig. 3.21 pentru cazul momentelor motoare.

Din analiza rezultatelor obținute se poate concluziona faptul că efectul acestora nu este aditiv, efectul jocurilor luate separat și adunate versus luate împreună în considerare conducând la erori maxime ale deplasărilor cu până 0,0032 mm mai mari pentru cazul jocurilor de 0,6 mm (fig. 20.a).

În ceea ce privește analiza erorilor vitezelor maxime ale punctului caracteristic P în cele două cazuri prezentate anterior, concluzia cum că efectul acestora nu este aditiv rămâne valabilă și în acest caz, efectul jocurilor luate separat și adunate versus luate împreună în considerare (cuple sferice superioare și inferioare) conduc la erori mai mari cu până 0,0137 mm/s în cazul jocurilor de 0,6 mm (fig. 3.20.b).

Din analiza rezultatelor maxim obținute se poate concluziona faptul că efectul jocurilor luate separat/împreună în considerare (cuple sferice superioare și inferioare) conduc la erori ale accelerațiilor mai mari cu până la 0,9931 mm/s² în cazul jocurilor de 0,6 mm (fig. 3.20.c).

În ceea ce privește analiza erorilor de mișcare ale punctului caracteristic P în cele două cazuri prezentate anterior (jocurile din cuple luate separat și împreună), concluzia cum că efectul acestora nu este aditiv rămâne valabilă și în acest caz.

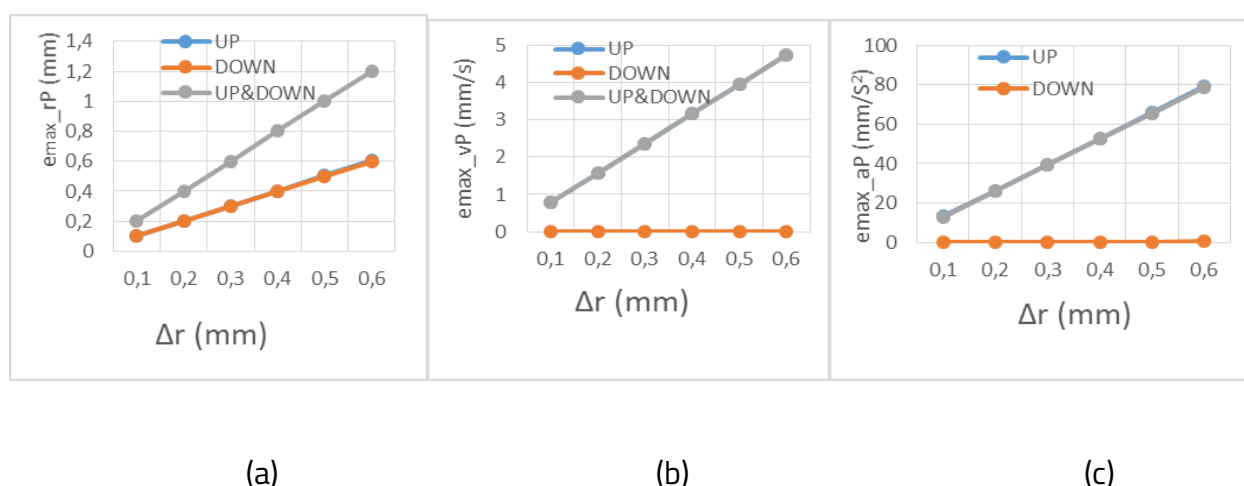


Fig. 3.20. Eroarea maximă a end-efectorului în cazul jocurilor din cuplele sferice superioare, inferioare, superioare și inferioare pentru: (a) deplasare; (b) viteza; (c) accelerație.

Din analiza rezultatelor maxim obținute în cazul erorilor momentelor motoare (fig. 3.21) se poate concluziona faptul că efectul jocurilor în cazul cuplelor sferice inferioare sunt neglijabile (sub $1.5 \text{ N}\cdot\text{mm}$), efectul principal datorându-se jocurilor din cuplele sferice superioare, care conduc la erori ale momentelor motoare cu până la maxim $\sim 260 \text{ N}\cdot\text{mm}$ pentru cazul jocurilor de $0,1 \text{ mm}$ (pentru TA), până la maxim $\sim 520 \text{ N}\cdot\text{mm}$ pentru cazul jocurilor de $0,2 \text{ mm}$ (pentru TA), până la maxim $\sim 778 \text{ N}\cdot\text{mm}$ pentru cazul jocurilor de $0,3 \text{ mm}$ (pentru TA), până la maxim $\sim 1035 \text{ N}\cdot\text{mm}$ pentru cazul jocurilor de $0,4 \text{ mm}$ (pentru TA), până la maxim $\sim 1292 \text{ N}\cdot\text{mm}$ pentru cazul jocurilor de $0,5 \text{ mm}$ (pentru TA), până la maxim $\sim 1549 \text{ N}\cdot\text{mm}$ pentru cazul jocurilor de $0,6 \text{ mm}$ (pentru TA).

În ceea ce privește analiza erorilor momentelor motoare în cele două cazuri prezentate anterior (jocurile din cuple sferice luate separat și împreună), concluzia este că efectul acestora pare aditiv deoarece efectul jocurilor din cuplele sferice inferioare este aproape neglijabil, dar acest lucru nu poate conduce la concluzia că efectul aditivității este verificat în acest caz.

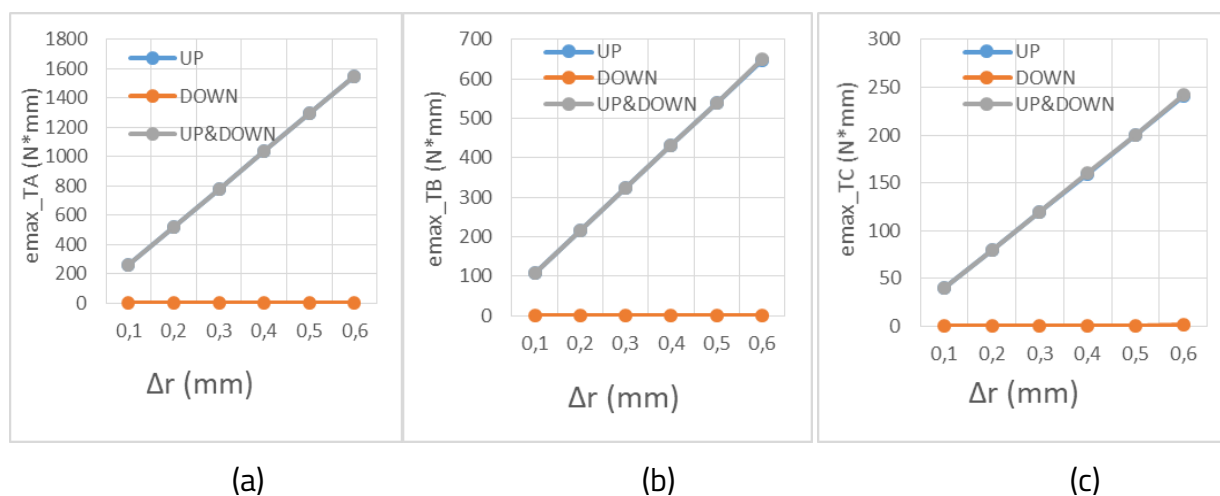


Fig. 3.21. Eroarea maxima a momentelor în cazul jocurilor în cuplele sferice superioare, inferioare și superioare și inferioare pentru: (a) momentul motor din cupla A; (b) momentul motor din cupla B; (c) momentul motor din cupla C.

3. 5. Concluzii

În urma analizei efectuate, se desprind câteva concluzii:

- Un model CAD a fost realizat cu succes utilizând softul ADAMS;
- Mai multe variante ale jocurilor din cuplele sferice au fost luate în considerare pentru a stabili influența acestora asupra comportamentului cinematic și dinamic: 0,1 mm, 0,2 mm 0,3 mm, 0,4 mm , 0,5 mm sau 0,6 mm;
- Jocurile din cuplele sferice influențează comportamentul cinematic și dinamic al robotului paralel;
- Efectul cel mai mare asupra comportamentului cinematic al robotului îl au jocurile din cuplele sferice superioare, cel din cuplele sferice inferioare fiind neglijabile sau au valori foarte mici;
- Din punct de vedere cinematic, erorile cresc odată cu jocurile din cuplele sferice, dar nu proporțional cu acestea;
- Din punct de vedere dinamic, efectul jocurilor din cuplele sferice conduce la erori de pînă la $\sim 1600 \text{ N} \cdot \text{mm}$;
- Efectul jocurilor din cuplele sferice nu este aditiv.

Capitolul 4

Optimizarea dimensională a robotului paralel Delta

Scopul principal al acestui capitol este de a identifica o soluție optimizată din punct de vedere dimensional pentru structura mecanică a robotului paralel Delta, care să conducă la un comportament mai bun al acestuia atât din punct de vedere cinematic, cât și dinamic.

În acest sens, se vor analiza mai multe valori de diametre ale elementelor de tip bară, atât mai mici cât și mai mari față de diametrul inițial de 10 mm (denumit 1ϕ). Pentru toate cazurile analizate se vor identifica abaterile de pe traiectorie a end-efectorului (analiză cinematică), dar și a erorilor momentelor motoare (analiză dinamică), pentru a identifica care este diametrul optim pentru a putea obține caracteristici mai bune ale robotului în utilizarea lui pentru diferite task-uri în industrie.

Astfel, analiza comparativă a structurii robotice de tip Delta este prezentată în trei scenarii de simulare dinamică, luând ca referință modelul ideal definit în capitolul 2:

- **Cazul 1:** se iau în considerare numai elasticitatea elementelor 2 și 3 și doar frecvențe naturale mai mici de 300 Hz (pentru diferite valori ale diametrului elementelor suple ale paralelogramelor robotului Delta).
- **Cazul 2:** se iau în considerare numai jocurile din cuplele sferice pasive (S_2k_1 , S_2k_2 și S_3k_1 , S_3k_2 , $k = A, B, C$), considerând o gamă de valori uzuale combinat cu cazul 1.

Influența fiecăruia dintre factorii considerați, precum și combinația lor, a fost analizată prin comparație cu modelul de referință (cazul ideal) în vederea identificării:

(a) erorilor cinematice (deplasări, viteze și accelerații ale punctului caracteristic) și dinamice (momente motoare) generate de acești factori. Aceste erori sunt notate generic cu $e_{X_p} = X_p - X$, unde $X = r_p, v_p, a_p, TA, TB, TC$, p este parametrul considerat (e —elasticitate, c —joc), iar X_p este valoarea variabilei X în ipoteza considerării factorului p , X obținut în cazul ideal;

(b) identificării unei variante optimizate a structurii robotului paralel Delta în ceea privește diametrele elementelor de tip bară (care produc efect și asupra masei totale a robotului, deci modificări ale comportamentului dinamic).

Același model CAD, prezentat în capitoul anterior, a fost considerat și în acest studiu, fiind însă modificată traiectoria de mișcare care permite atingerea vitezelor și accelerațiilor maxime (8 m/s respectiv 120 m/s^2) într-un interval scurt de timp ($0,2 \text{ s}$), utilizând tot o lege de mișcare în spațiul articular de tip polinom de gradul 5 (fig. 4.1).

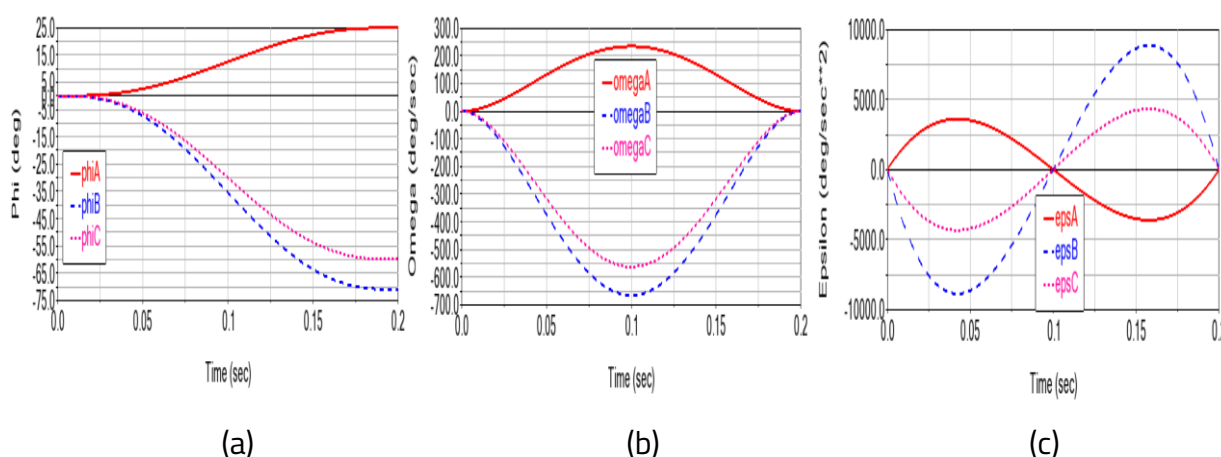


Fig. 4.1. Traiectoriile de mișcare în spațiul cuplelor active (RA, RB și RC): (a) deplasare unghiulară; (b) viteză unghiulară și (c) accelerație unghiulară.

Atunci când se aplică cuplelor active traiectorii de mișcare polinomiale de gradul cinci, se obține o traiectorie carteziană între poziția inițială și finală a punctului caracteristic P. Această traiectorie este caracterizată prin deplasarea punctului caracteristic P de-a lungul tuturor celor trei axe ale sistemului global de coordonate $X_0 Y_0 Z_0$ (fig. 4.2) și atinge o poziție finală de $r_p = 1,33 \text{ m}$ (fig. 4.3.a). De asemenea, traiectoria atinge o viteză maximă de $v_p = 8 \text{ m/s}$ la $0,1 \text{ s}$ (fig. 3.3.b) și o accelerație maximă de aproximativ $a_p = 120 \text{ m/s}^2$ la $0,051 \text{ s}$ și $0,158 \text{ s}$ (fig. 4.3.c).

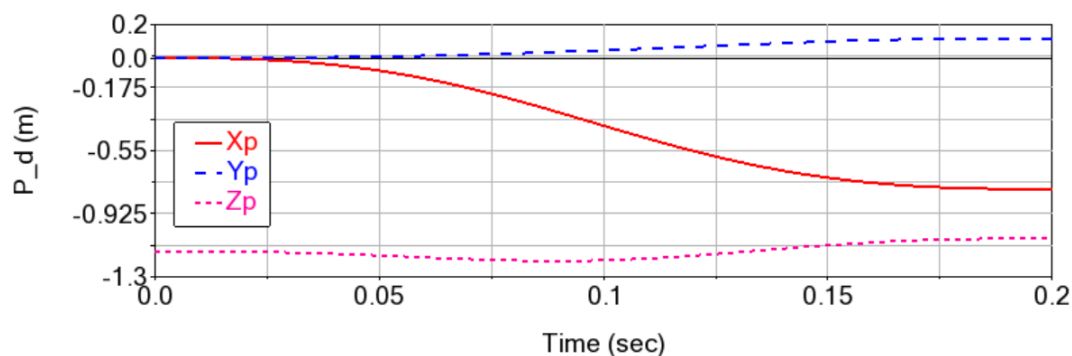


Fig. 4. 2. Deplasarea end-efectorului robotului paralel Delta

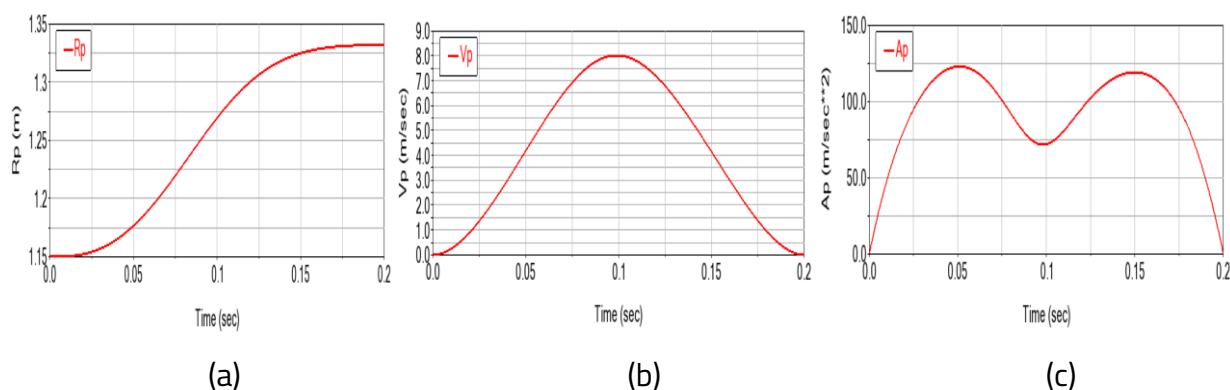


Fig. 4.3. Mișcarea end-efectorului robotului paralel Delta: (a) deplasarea; (b) viteza și (c) accelerația.

Momentele în cuplele active (fig 3.4) pe traiectoria menționată au alura accelerației unghiulare (fig 4.1.c); se observă valori mai mari ale momentului TA și TB datorate accelerațiilor unghiulare mai mari (în consecință și valori mai mari ale vitezelor și deplasărilor unghiulare) comparativ cu celălalt moment motor activ (TC).

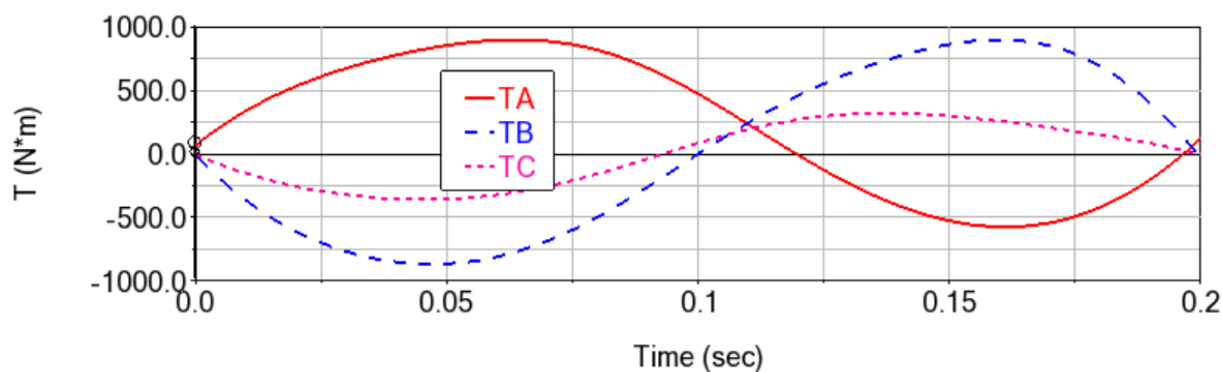


Fig. 4.4. Momentele motoare (TA, TB și TC) pentru traiectoria considerată a robotului Delta.

În continuare, se vor analiza pe rând influența valorilor diametrului barelor paralelogramelor robotului paralel Delta, cu luarea în considerare a elasticității elementelor (cazul 1) și influența jocurilor din cuplele sferice combinate cu elasticități (cazul 2).

4.1. Analiza efectului diametrelor barelor asupra comportamentului robotului paralel Delta

În ipoteza considerării flexibilității elementelor elastice ale robotului paralel Delta (elementele 2 și 3 pe fiecare braț) și limitând analiza la primele moduri de vibrație (cu frecvențe naturale mai mici de 300 Hz, deoarece efectul frecvențelor mai mari este neglijabil), se obțin rezultatele privind comportamentul cinematic și dinamic al robotului pentru elemente cu diverse diametre ale barelor ($0,4\Phi - 4\text{ mm}$, $0,8\Phi - 8\text{ mm}$ și $1\Phi - 10\text{ mm}$). Restul ipotezelor luate în considerare în capitolul precedent rămân valabile și în acest capitol (celelalte elemente rămân rigide, accelerația gravitațională are direcția în sensul negativ al axei Z).

În continuare, se vor analiza separat și ulterior cumulativ cele 3 valori ale diametrului barelor.

➤ Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente suple elastice și cu diametre de $0,4\Phi$

O primă analiză efectuată este pentru cazul reducerii diametrului barelor cu 60% ($0,4\Phi$), masa barelor reducându-se de peste 6 ori, rezultând un robot mai suplu (fig. 4.5.c).

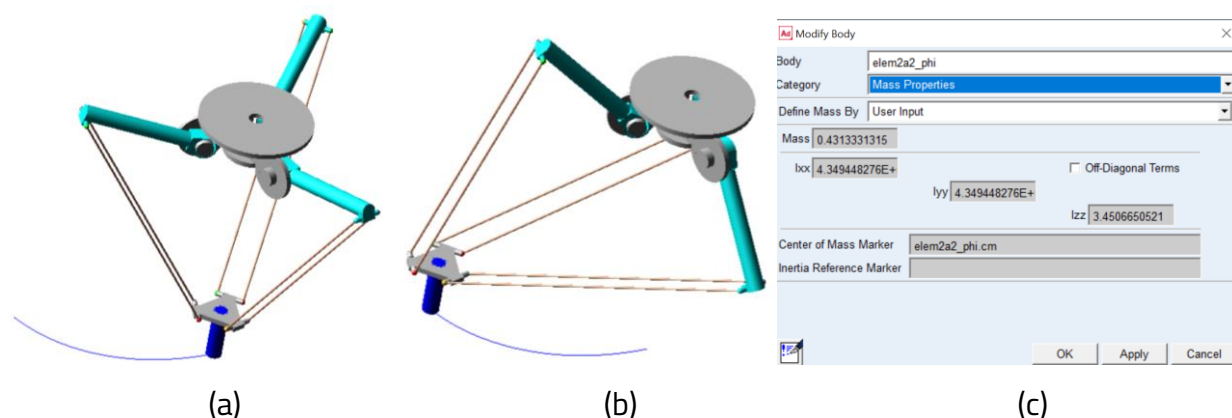


Fig. 4.5. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta: (a) poziția inițială; (b) poziția finală; (c) proprietățile masice și inerțiale ale elementelor suple cu diametru redus la $0,4\Phi$.

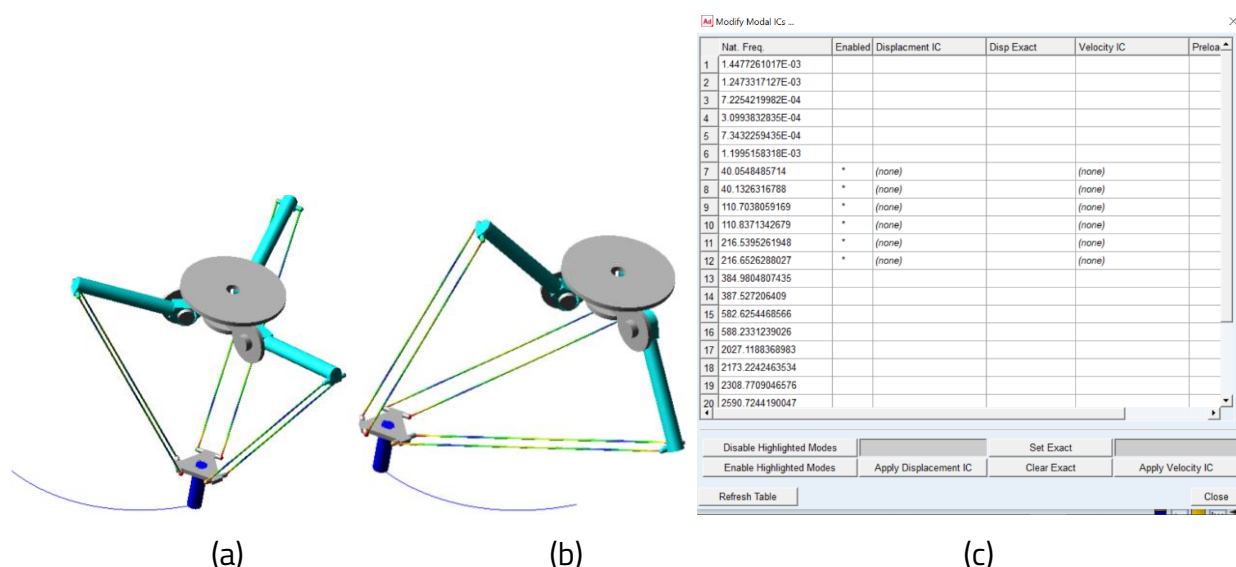


Fig. 4.6. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta cu elemente elastice: (a) poziția inițială; (b) poziția finală; (c) modurile naturale ale elementelor suple cu diametru redus la $0,4\Phi$.

Utilizând modulul Autoflex, se obțin elementele elastice dorite (barele suple) și se iau în considerare doar frecvențele naturale mai mici decât 300 Hz (frecvențele nr. 7-12, fig. 4.6).

Simulările ADAMS arată ca rezultat al valorilor erorilor cinematice de maxim 10^{-4} mm pentru deplasare, 0,002 mm/s pentru viteză și de până la $0,4 \text{ mm/s}^2$ pentru accelerație (fig. 4.7).

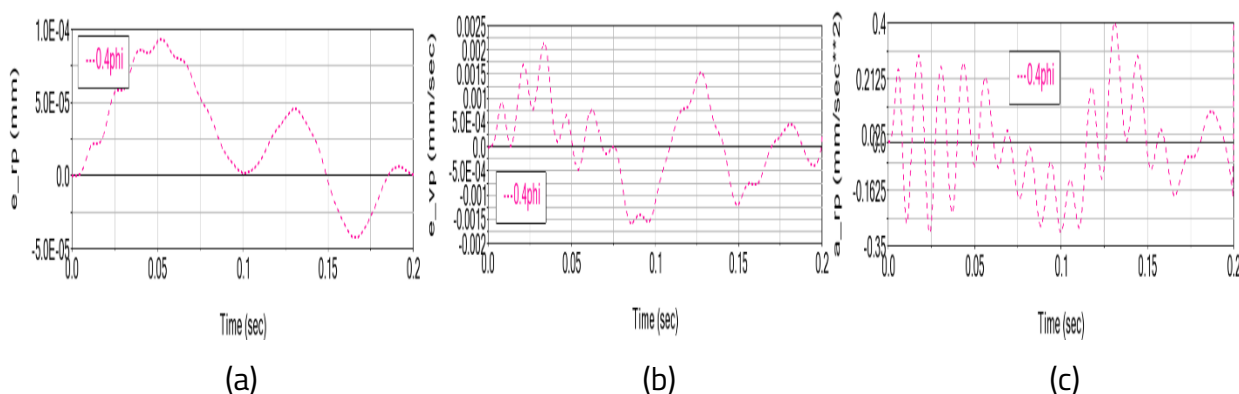


Fig. 4.7. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul diametrelor barelor elastice de $0,4\Phi$ pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Eroarea maximă a momentelor motoare atinge valori de $\sim 10 \text{ N}\cdot\text{m}$ pentru TA (fig. 4.8.a), $\sim 8 \text{ N}\cdot\text{m}$ pentru TB (fig. 4.8.b) și $\sim 3 \text{ N}\cdot\text{m}$ pentru TC (fig. 4.8.c).

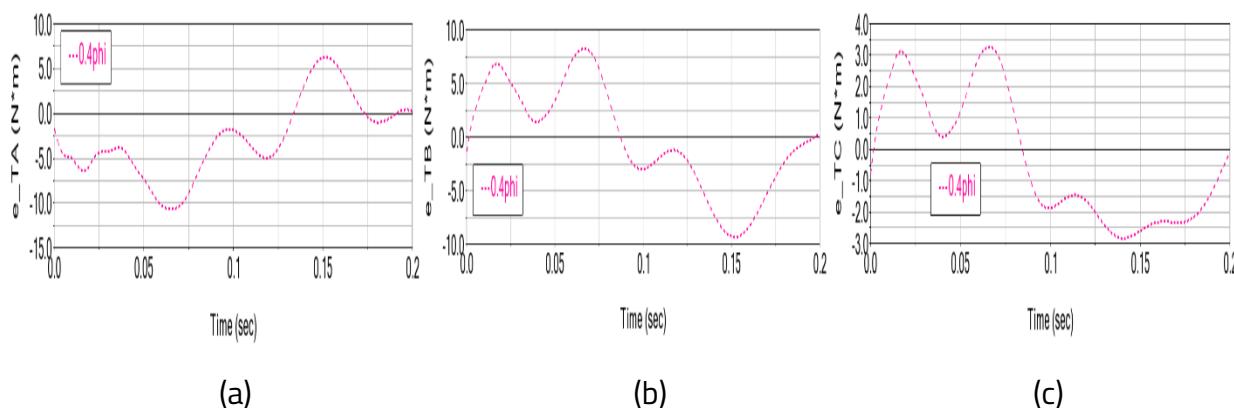


Fig. 4.8. Eroarea momentelor motoare în cazul diametrelor barelor elastice de $0,4\Phi$ pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente suple elastice și cu diametre de $0,8\Phi$*

Următoarea analiză efectuată este pentru cazul reducerii diametrului barelor cu 20% ($0,8\Phi$), masa barelor ajungând la aproximativ 1,8 kg (față de 2,7 kg) (fig. 4.9.c).

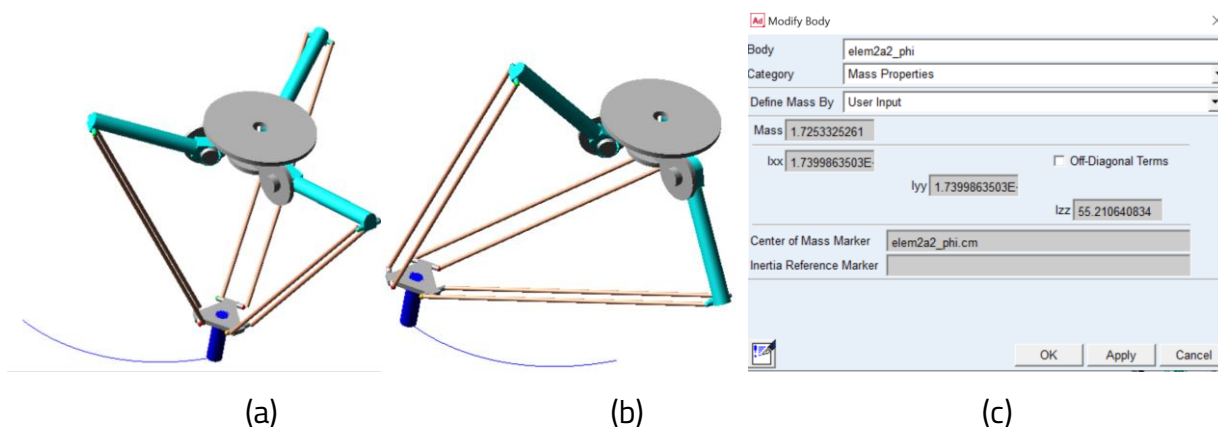


Fig. 4.9. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta: (a) poziția inițială; (b) poziția finală; (c) proprietățile masice și inerțiale ale elementelor suple cu diametru redus la $0,8\Phi$.

Ca și în cazul precedent, utilizând modulul Autoflex, se obțin elementele elastice dorite (barele suple) și se iau în considerare doar frecvențele naturale mai mici decât 300 Hz (fig. 4.10).

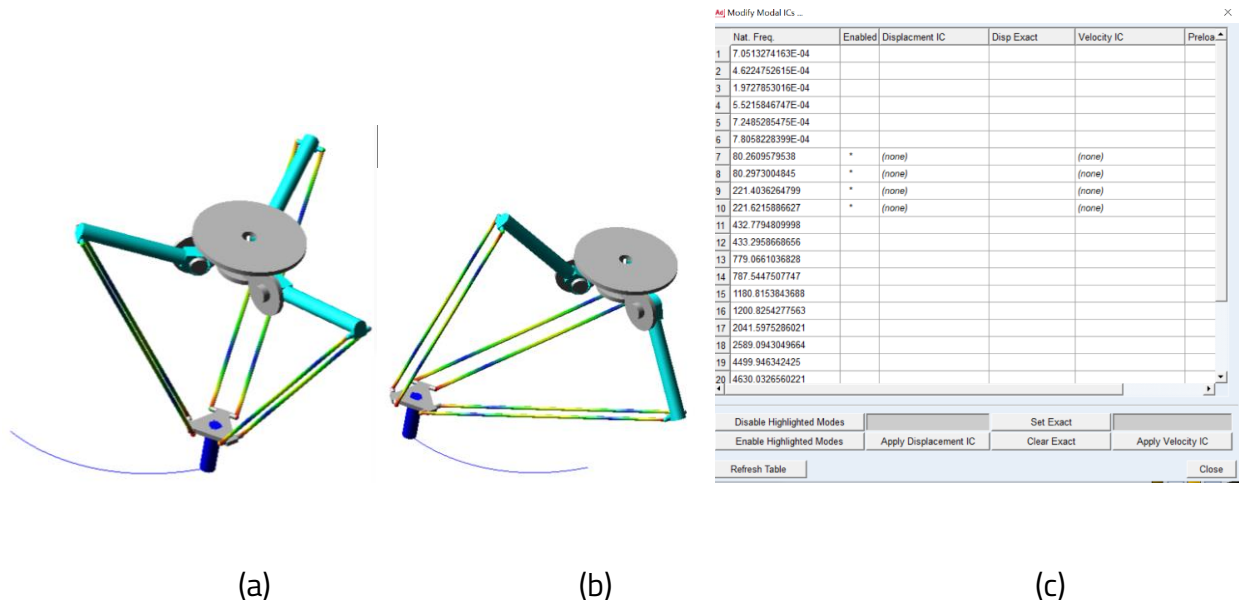


Fig. 4.10. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta cu elemente elastice: (a) poziția inițială; (b) poziția finală; (c) modurile naturale ale elementelor suple cu diametru redus la $0,8\Phi$.

Analizele efectuate arată un rezultat al erorilor cinematice de maxim $5,5 \cdot 10^{-6}$ mm pentru deplasare, 10^{-4} mm/s pentru viteză și de până la $0,025$ mm/s² pentru accelerație (fig. 4.11), erori mai reduse față de cazul precedent.

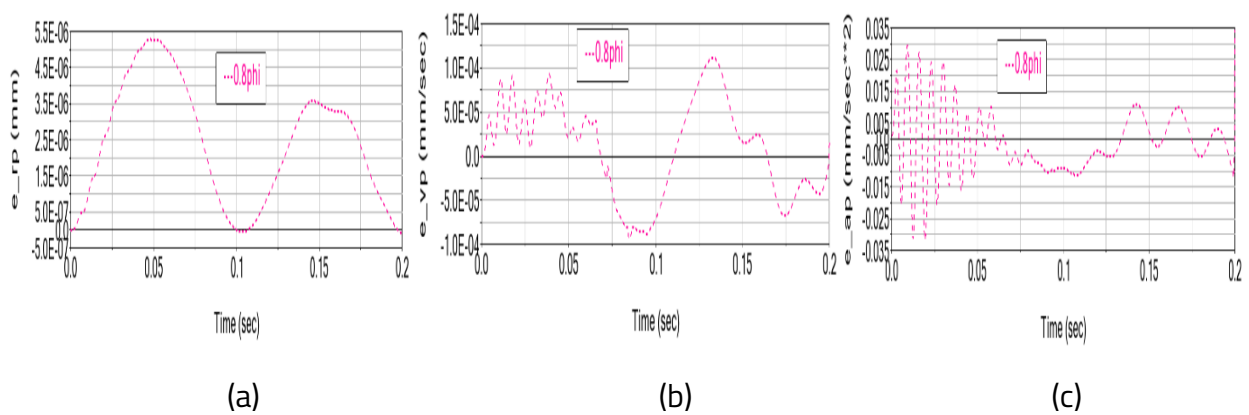


Fig. 4.11. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul diametrelor barelor elastice de $0,8\Phi$ pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Din punct de vedere dinamic, eroarea maximă a momentelor motoare atinge valori de ~ 40 N·m pentru TA (fig. 3.12.a), ~ 35 N·m pentru TB (fig. 3.12.b) și ~ 15 N·m pentru TC (fig. 3.12.c). Erorile dinamice astfel obținute sunt mai mari față de cazul precedent.

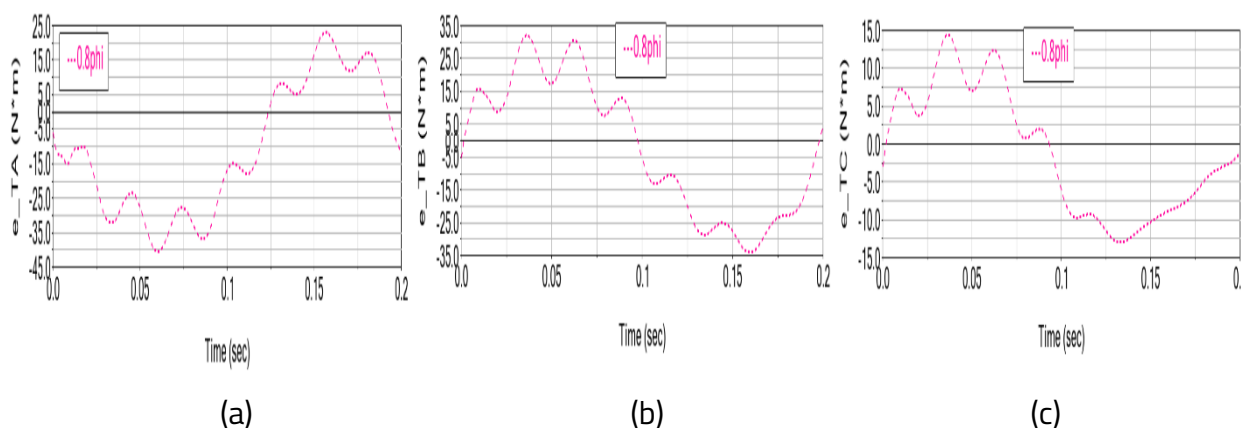


Fig. 4.12. Eroarea momentelor motoare în cazul diametrelor barelor elastice de $0,8\phi$ pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente suple elastice și cu diametre de 1ϕ*

Cea de-a treia analiză este pentru cazul inițial al diametrului barelor, adică 10mm (1ϕ), masa barelor fiind de aproximativ $2,7\text{ kg}$ (fig. 4.13.c).

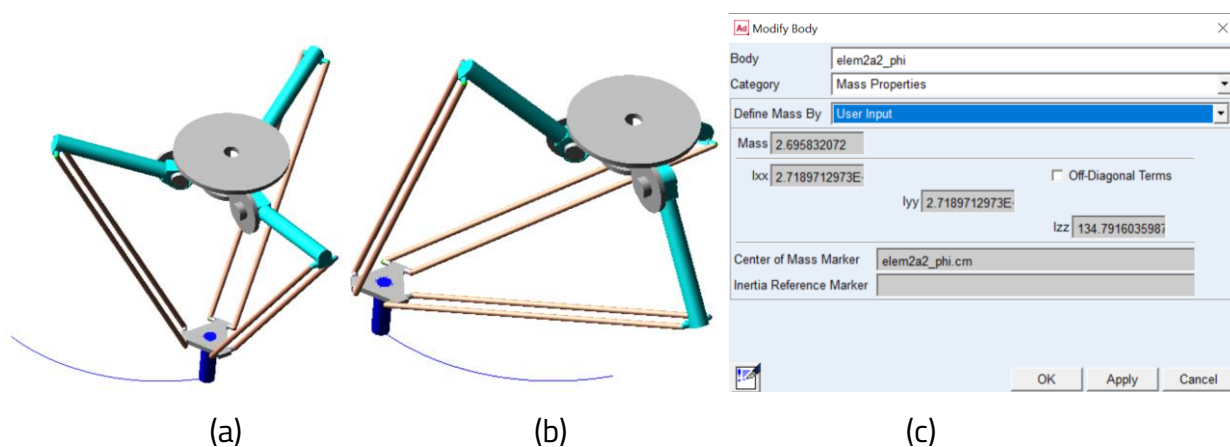


Fig. 4.13. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta: (a) poziția inițială; (b) poziția finală; (c) proprietățile masice și inerțiale ale elementelor suple cu diametru de 1ϕ .

Ca și în cazurile anterioare, utilizând modulul Autoflex, se obțin elementele elastice dorite (barele suple) și se iau în considerare doar frecvențele naturale mai mici decât 300 Hz (fig. 4.14).

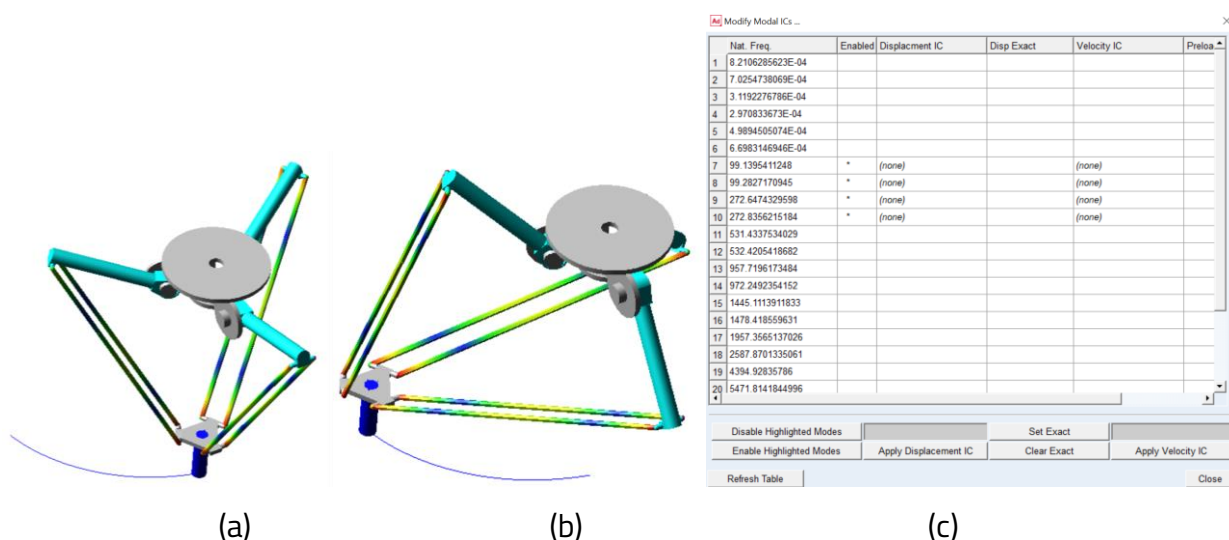


Fig. 4.14. Traiectoria carteziană a robotului paralel Delta cu elemente elastice: (a) poziția inițială; (b) poziția finală; (c) modurile naturale ale elementelor suple cu diametru de 1Φ.

Analizele efectuate arată ca rezultat al erorilor cinematice de maxim $2 \cdot 10^{-6}$ mm pentru deplasare, $4 \cdot 10^{-5}$ mm/s pentru viteză și de $0,015$ mm/s² pentru accelerație (fig. 4.15). Rezultatele obținute conduc la concluzia că erorile sunt mai mici față de cazurile precedente (cu cât scade diametrul barelor și elementele devin mai suple cu atât cresc erorile cinematice – abaterea de la traiectoria dorită).

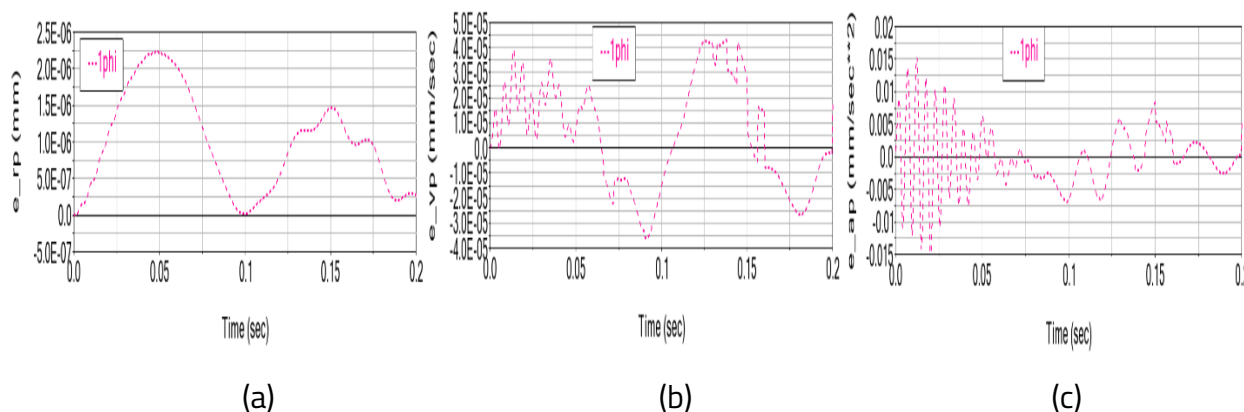


Fig. 4.15. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul diametrelor barelor elastice de 1Φ pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Din punct de vedere dinamic, eroarea maximă a momentelor motoare atinge valori de ~60 N·m pentru TA (fig. 4.16.a), ~50 N·m pentru TB (fig. 4.16.b) și ~18 N·m pentru TC (fig. 4.16.c). Erorile dinamice obținute sunt mai mari față de cazurile precedente.

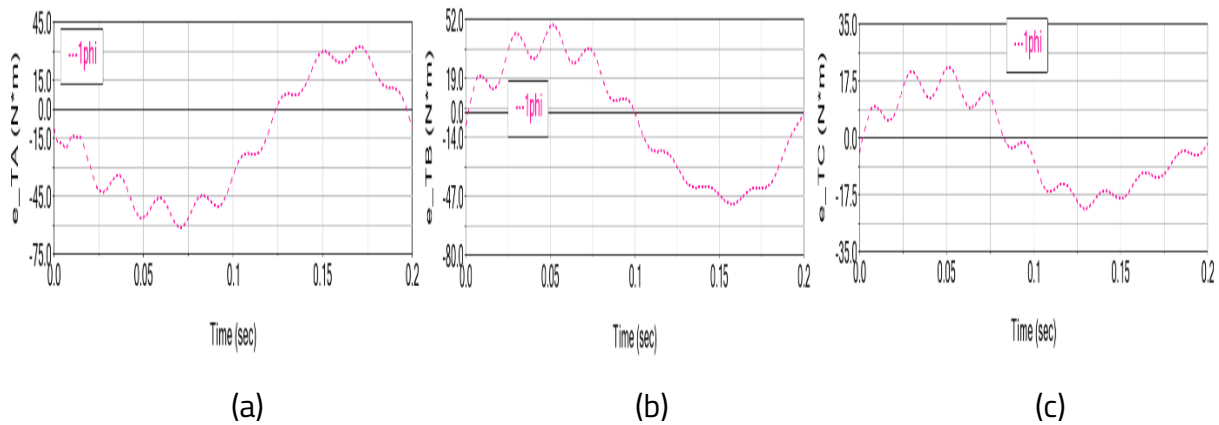
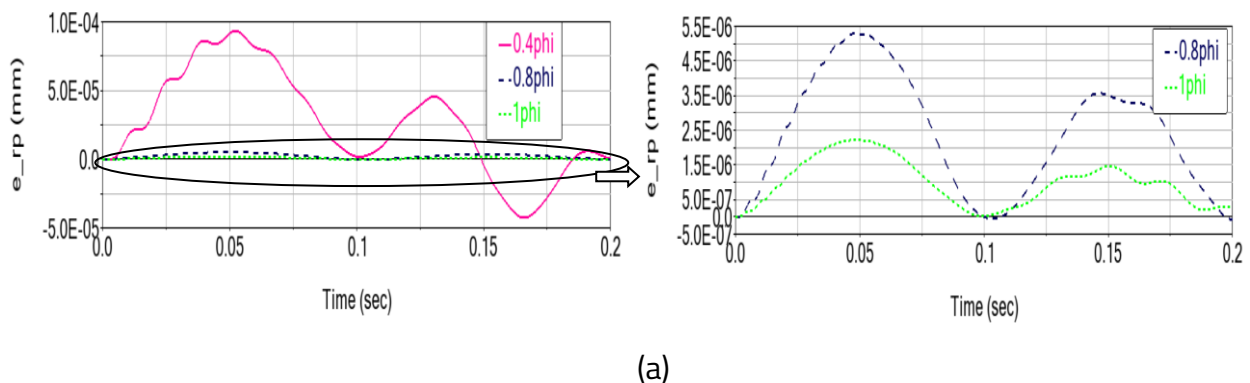


Fig. 4.16. Eroarea momentelor motoare în cazul diametrelor barelor elastice de 1Φ pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

În concluzie, cu cât scade diametrul barelor față de diametrul de referință cu atât crește abaterea de la traiectoria dorită a punctului caracteristic și scade eroarea momentelor motoare.

➤ Concluzii

Pentru a pune mai bine în evidență comparativ efectele diametrelor barelor asupra comportamentului cinematic și dinamic al robotului paralel Delta analizat în fig. 4.17 și fig. 4.18 sunt prezentate pe același grafic abaterile de la traiectoria dorită în funcție de diametrele barelor elementele paralelogramelor în ceea ce privește mișcarea (deplasare, viteză și accelerație) punctului caracteristic sau momentele motoare.



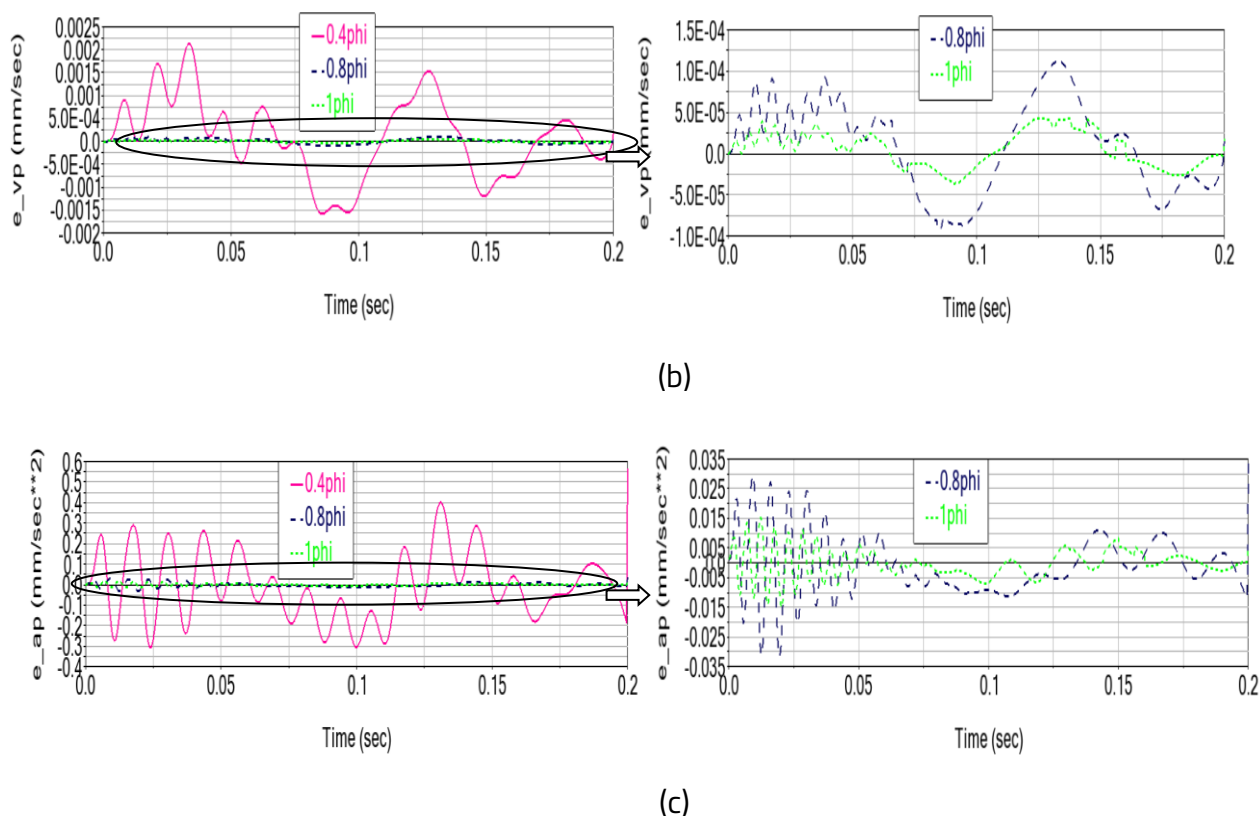


Fig. 4.17. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul diametrelor barelor elastice de $0,4\Phi$, $0,8\Phi$ și 1Φ pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație a punctului caracteristic P.

Din analiza comparativă prezentată a erorilor mișcărilor punctului caracteristic P (fig. 4.17), se poate observa că cel mai dezavantajos caz din punct de vedere cinematic este cel al celui mai mic diametru ($0,4\Phi$ - 4 mm), caz în care erorile sunt maxime, la nivel de deplasări de până la 0,4 mm , 0,002 mm/s la nivel de viteze și $0,4 \text{ mm/s}^2$ la nivel de accelerații (față de ordinul micronilor în celelalte cazuri).

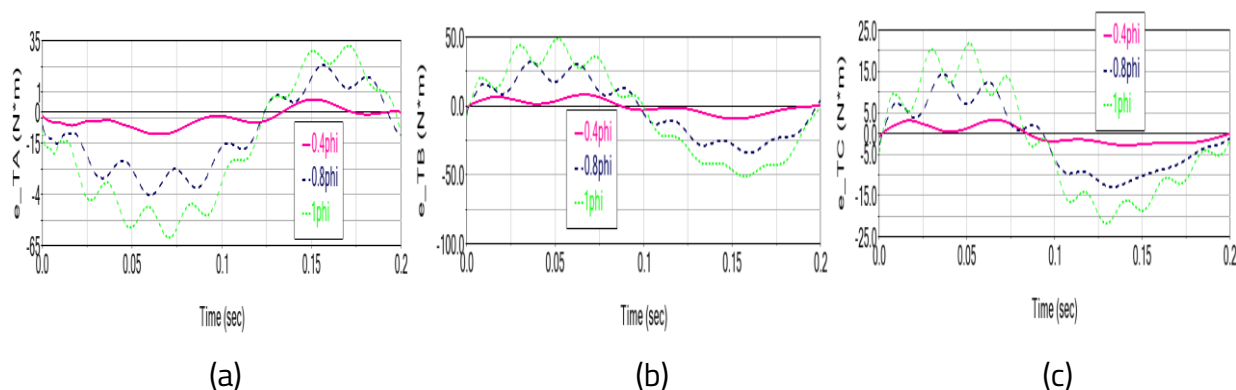


Fig. 4.18. Eroarea momentelor motoare în cazul diametrelor barelor elastice de $0,4\phi$, $0,8\phi$ și 1ϕ pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

La nivel de erori ale momentelor motoare (fig. 4.18), datorită supleții structurii, valorile sunt mai mici atunci când avem diametre mai mici. În cazul în care se analizează o structură mai robustă (cazul 1ϕ), valorile momentelor motoare sunt mai mari, dar datorită robusteții structurii erorile sunt mai mici, ceea ce conduce la un comportament mai bun, atât din punct de vedere cinematic cât și dinamic.

În concluzie, în urma analizei efectuate, din punct de vedere al efectului elasticităților elementelor, varianta optimă este cea a barelor cu diametrul de 1ϕ (10 mm).

În realitate, nu este singurul aspect de care se ține cont, motiv pentru care în continuare se va analiza și efectul jocurilor din cuplele sferice asupra comportamentului cinematic și dinamic concomitent cu luarea în considerare a diferitelor diametre ale elementelor de tip bară (2 și 3).

4.2. Analiza robotului cu elemente elastice și jocuri în cuplele sferice

În acest subcapitol se urmărește analiza influenței elasticităților elementelor de tip bară a robotului paralel Delta și a jocurilor din cuplele sferice ale robotului în ceea ce privește abaterile de la traiectoria dorită a end-efectorului și a erorilor momentelor motoare din cuplele active.

Ipotezele de lucru în care s-au făcut analizele sunt aceleași ca și în cazurile anterior analizate, și anume:

- Pentru realizarea elementelor flexibile a fost utilizat modulul AutoFlex din Adams;
- Au fost luate în considerare frecvențele proprii mai mici de 300 Hz (primele moduri de vibrație) ;
- În ceea ce privește diametrul barelor, aceleași valori au fost luate în considerare, și anume $0,4\Phi$ (4 mm), $0,8\Phi$ (8 mm) și 1Φ (10 mm) ;
- Referitor la jocurile din cuple, au fost analizate 3 valori: 0,2 mm, 0,4 mm și 0,6 mm (distanța pe axa Z între centrele sferelor - elemente componente ale cuplelor sferice) .

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,4\Phi$ și jocuri în cuplele sferice de 0,2 mm*

O primă analiză efectuată este cea a barelor de 4 mm diametru ($0,4\Phi$) și cu valori ale jocurilor din cuplele sferice de 0,2 mm.

În fig. 4.19 sunt reprezentate erorile apărute pe traiectoria end-efectorului pentru cazul cu diametre ale barelor flexibile de $0,4\Phi$ și jocuri în cuplele sferice (toate cuplele, atât în cele superioare cât și în cele inferioare) de 0,2 mm.

Din rezultatele obținute se poate observa o eroare pe traiectorie de până la 0,65 mm la nivel de deplasări, 2 mm/s la nivel de viteze și erori ceva mai mari la nivel de accelerații, în special la începutul traiectoriei (până se stabilizează sistemul).

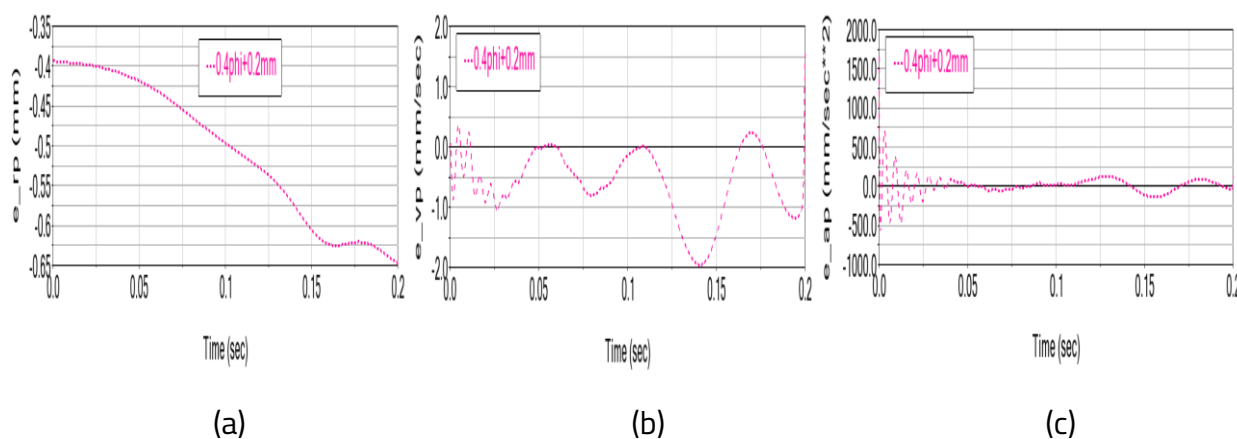


Fig. 4.19. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

În ceea ce privește erorile apărute la nivelul momentelor motoare, acestea ating valori de ~ 430 N·m pentru TA, ~ 380 N·m pentru TB și ~ 150 N·m pentru TC (fig.4.20).

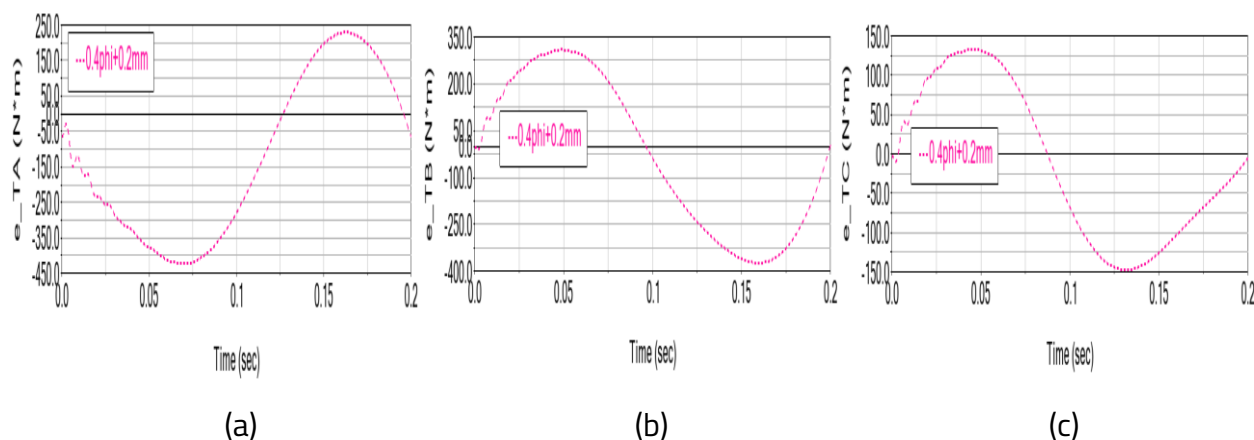


Fig. 4.20. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de $0,2$ mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Pentru a putea compara rezultatele obținute, în fig. 4.21 - 4.23 sunt prezentate erorile de mișcare a end-efectorului (deplasări, viteză și accelerație) pentru cele trei cazuri: elemente elastice pentru bare de diametre $0,4\Phi$, jocuri în cuplele sferice (superioare și inferioare) de $0,2$ mm.

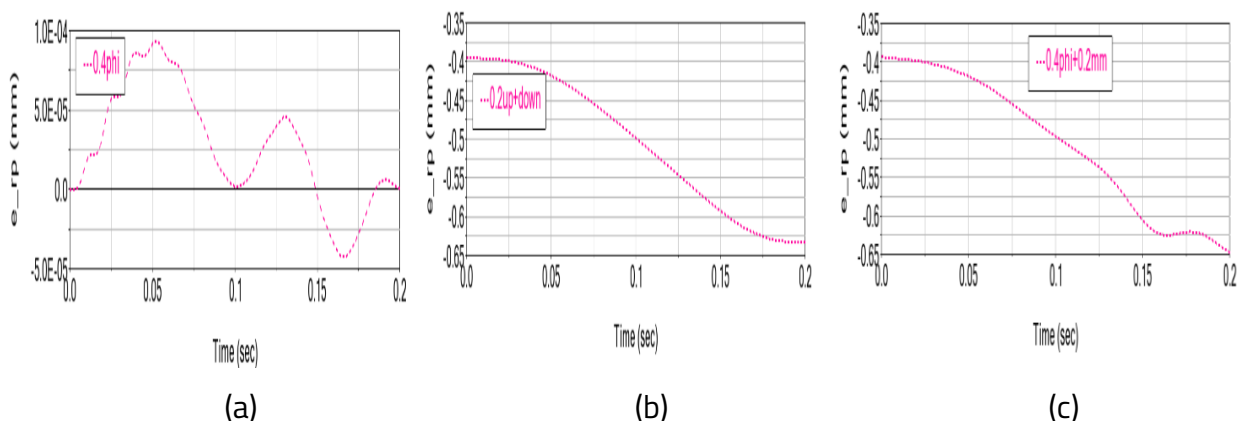


Fig. 4.21. Eroarea deplasării end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de $0,2$ mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

După cum se poate vedea în fig. 4.21, la nivel de deplasări, flexibilitatea elementelor nu afectează semnificativ abaterea de pe traiectorie a punctului caracteristic (fig. 4.21.a), spre deosebire de jocurile din cuplele sferice conduc la erori mai mari, de până la $0,63$ mm (fig. 4.21.b). Pentru cazul în care se iau ambele variante în considerare (și flexibilități și jocuri),

alura erorii este cea dată de jocurile din cuplele sferice, dar efectul nu este aditiv, alura curbei fiind schimbată în ultima parte a traiectoriei (fig. 4.21.c).

În cazul erorilor vitezelor punctului caracteristic pe traiectorie, după cum se poate observa în fig. 4.22, efectul nu este cumulativ, alura graficului fiind diferită atunci când se iau ambele ipoteze în considerare (flexibilități și jocuri), atingând valori de până la 2 mm/s (fig. 4.22.c), spre deosebire de 1,1 mm/s în cazul jocurilor și 0,002 mm/s în cazul flexibilităților.

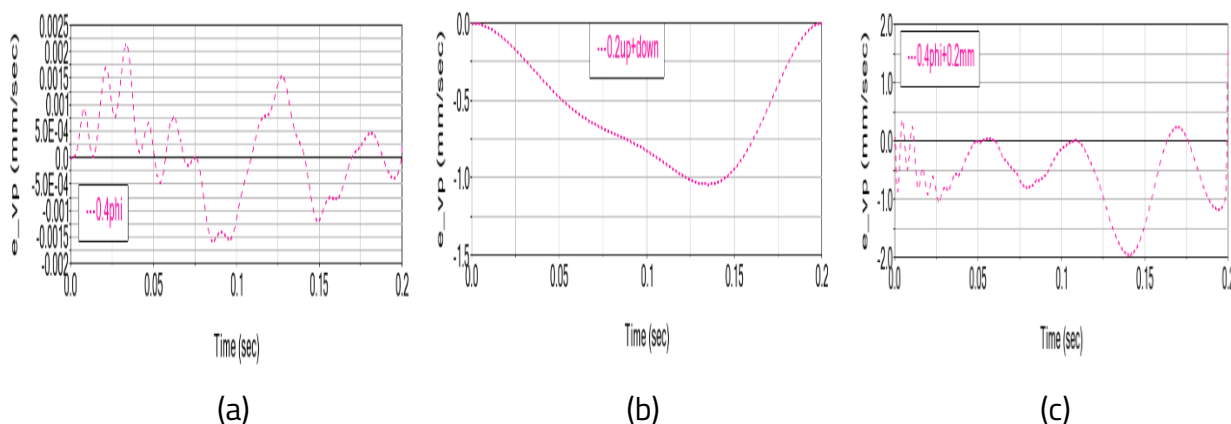


Fig. 4.22. Eroarea vitezei end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Și pentru erorile accelerațiilor (fig. 4.23) se poate observa același comportament (neaditiv), atunci când se iau ambele ipoteze (flexibilități și jocuri) în considerare, la începutul traiectoriei apar valori foarte mari ale erorilor accelerațiilor (până se stabilizează sistemul), ulterior acestea atingând valori de până la 4-5 ori mai mari față de cazul în care se iau în considerare doar jocurile din cuplele sferice (de 0,2 mm).

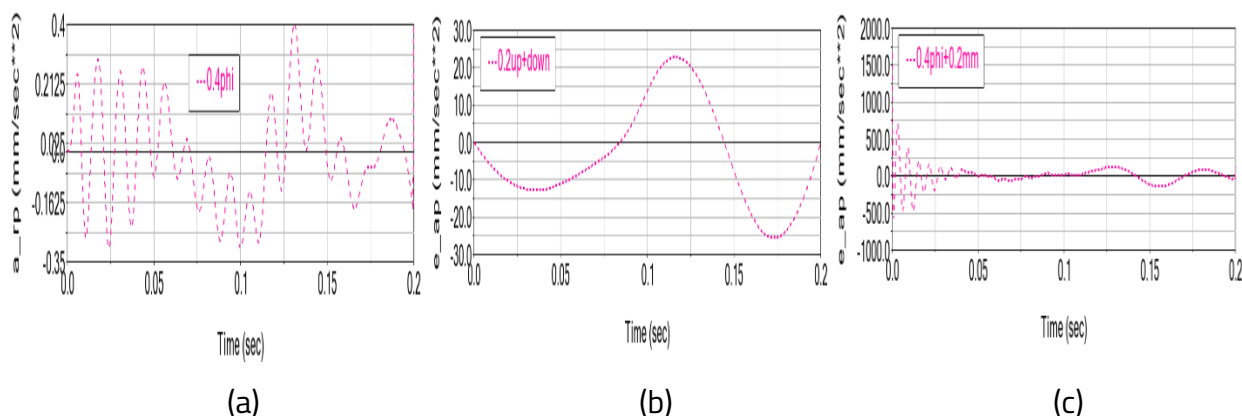


Fig. 4.23. Eroarea accelerațiilor end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

În ceea ce privește comportamentul dinamic, atunci când se ține cont atât de elasticități cât și de jocuri (pentru elemente cu diametre de $0,4\Phi$ și jocuri de $0,2$ mm în cuplele sferice superioare și inferioare), erorile momentelor motoare ating valori mari, de ~ 420 N·m pentru momentul TA, ~ 380 N·m pentru momentul TB și aproximativ și ~ 150 N·m pentru momentul TC (fig. 4.24).

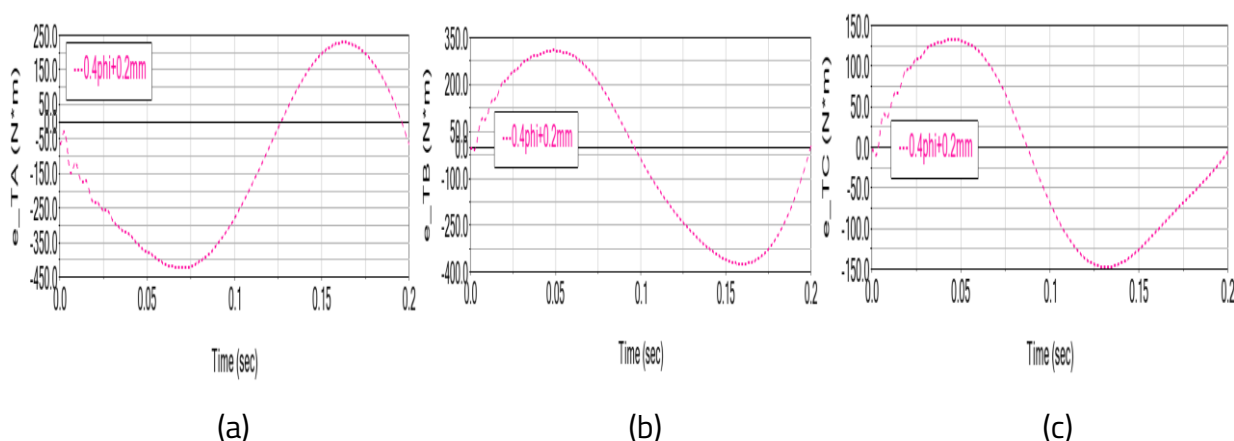


Fig. 4.24. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de $0,2$ mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Pentru a putea analiza comparativ comportamentul dinamic al robotului, erorile momentelor motoare în cele trei cazuri (flexibilități, jocuri, flexibilități+jocuri) sunt prezentate în fig. 4.25-4.27.

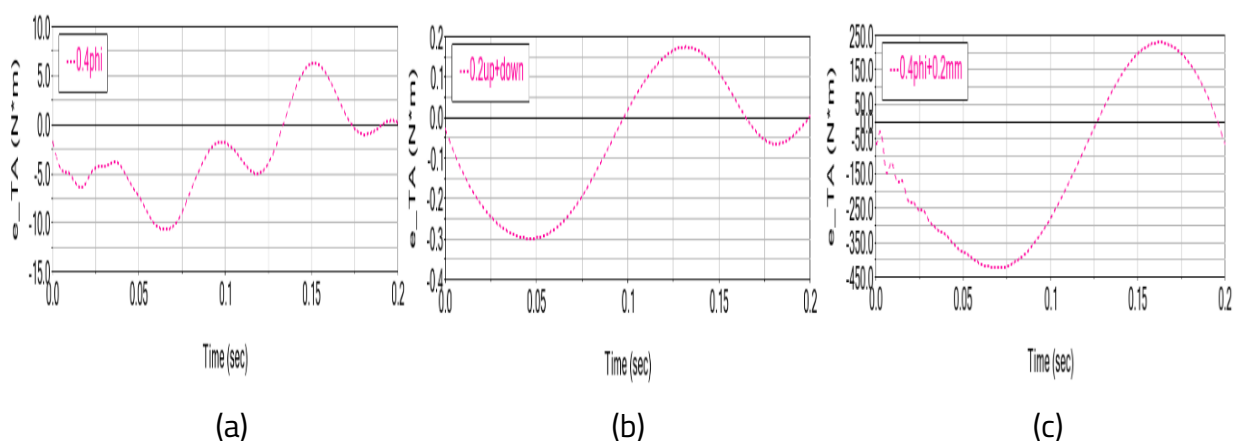


Fig. 4.25. Eroarea momentului motor TA în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de $0,2$ mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Astfel, în fig. 4.25 sunt reprezentate erorile momentului motor TA. După cum se poate observa în fig. 4.25.c efectul celor doi factori (flexibilități și jocuri) luate concomitent în considerare nu sunt aditive, din contră erorile cresc semnificativ, ajungând la valori de peste 400 N·m, de peste 40 de ori mai mare față de maximul obținut în situația în care se iau în considerare separat cele două ipoteze.

În ceea ce privește eroarea momentului motor TB (fig. 4.26), valorile maxime ale acestuia ating valori foarte mari, de peste 30 de ori mai mari, pentru cazul în care se iau în considerare atât flexibilitatea elementelor cu diametru de $0,4\Phi$ (4 mm) și jocuri de 0,2 mm în cuplele sferice, față de cazul în care se iau în considerare separat. În ceea ce privește analiza efectului cumulativ al acestor efecte, se poate concluziona de asemenea că efectul acestora nu este cumulativ, ci afectează în mod negativ comportamentul dinamic (crescând semnificativ erorile apărute la nivelul momentelor motoare).

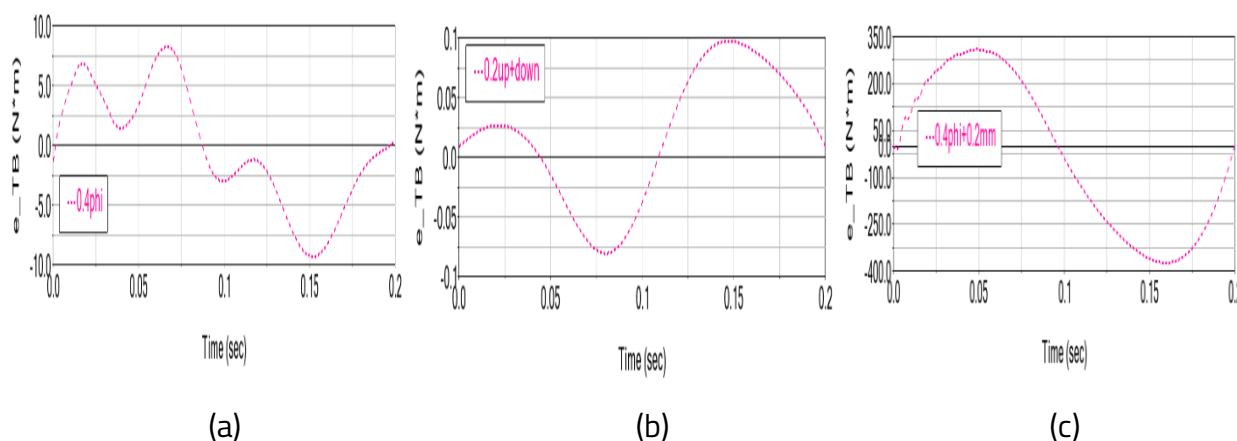


Fig. 4.26. Eroarea momentului motor TB în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Efectul elasticităților (pentru diametru de $0,4\Phi$) cumulat cu efectul jocurilor din cuplele sferice inferioare și superioare (0,2 mm), conduce la erori mult mai mari în ceea ce privește eroarea momentului motor TC (fig. 4.27), erorile crescând cam tot de 30 ori, (aproximativ maxim de 150 N·m față de 3 N·m), doar că per ansamblu se ating valori mult mai mici față de cazurile erorilor momentelor motoare TA și TB (de aproximativ 3 ori mai mici).

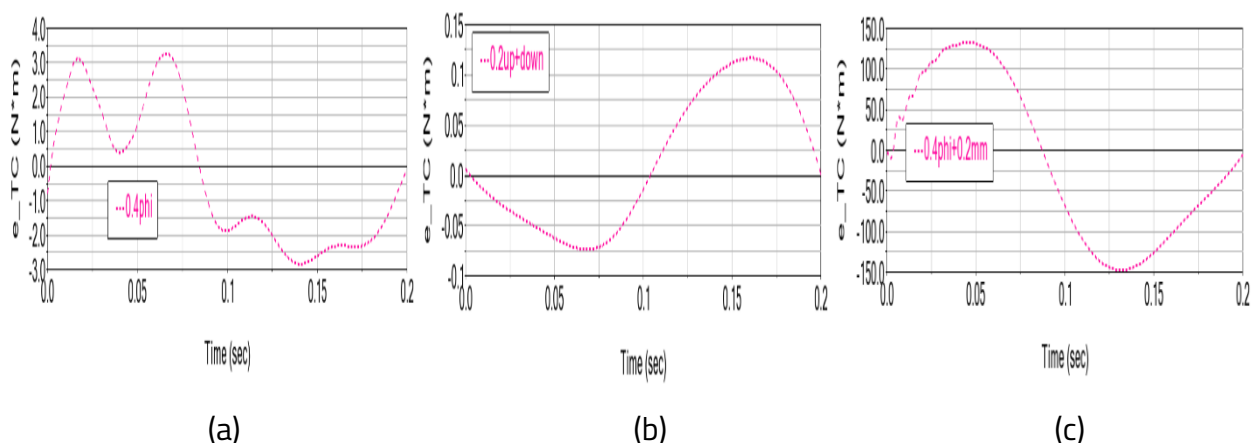


Fig. 4.27. Eroarea momentului motor TC în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\phi$; (b) jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,4\phi$ și jocuri în cuplele sferice de 0,4 mm*

În această parte, analiza efectuată este pentru cazul în care se iau în considerare elementele care vor fi luate în considerare elementele flexibile de 4 mm în diametru, iar jocurile din cuplele sferice (superioare și inferioare) de 0,4 mm.

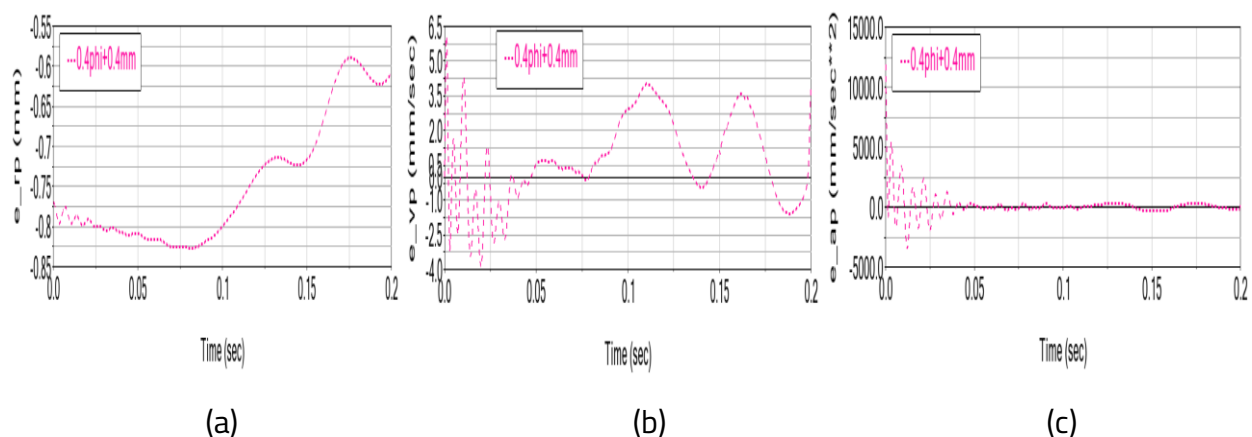


Fig. 4.28. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,4\phi$ și a jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Astfel, în fig. 4.28 este reprezentată eroarea pe traiectorie a punctului caracteristic, din punct de vedere al mișcării atunci când sunt luate în considerare elasticitatea elementelor cu diametre de 4 mm și jocuri în cuplele sferice de 0,4 mm. Din punct de vedere al deplasării (fig. 4.28.a) eroarea atinge valori de până la 0,82 mm; din punct de vedere al erorilor de viteză

acestea atingând valori de până 6,1 mm/s (fig. 4.28. b), iar din punct de vedere al erorilor de accelerație, acestea ating valori mai mari la începutul traiectoriei, în primele 0,04 s, până se stabilizează sistemul (fig. 4.28.c).

Pentru o mai bună evaluare a comportamentului robotului, în fig. 4.29-4.31 sunt prezentate comparativ efectele elasticităților și a jocurilor luate separate, dar și împreună.

Astfel, în fig. 4.29 sunt prezentate comparativ erorile deplasării punctului caracteristic P în cele trei situații, și după cum se poate observa efectul nu este cumulativ, cele două ipoteze de lucru luate în considerare împreună au aproximativ alura erorii deplasării pentru cazul în care doar jocurile din cuplele sferice de 0,4 mm sunt considerate, cu mici abateri datorate elasticităților elementelor.

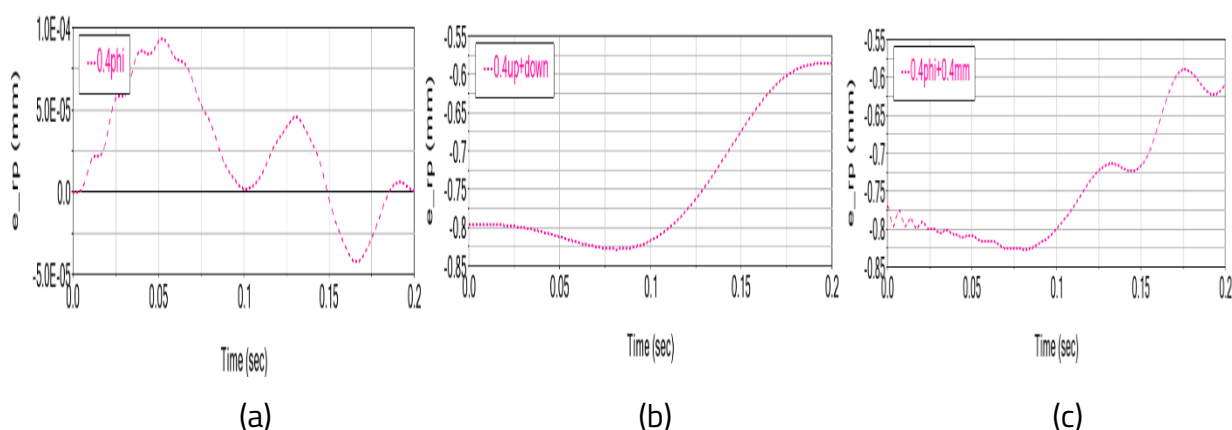


Fig. 4.29. Eroarea deplasării end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de 0,4 Φ ; (b) a jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Erorile vitezei end-efectorului cresc atunci când se iau în considerare atât elasticitatea elementelor de tip bară cu diametrul de 0,4 Φ (4 mm), cât și jocurile din cuplele sferice de 0,4 mm. După cum se poate observa în fig. 4.30, efectul acestora nu este cumulativ, ci atinge valori cu peste 50% mai mari față de cazul în care s-ar însuma cele două (fig. 4.30 a și b).

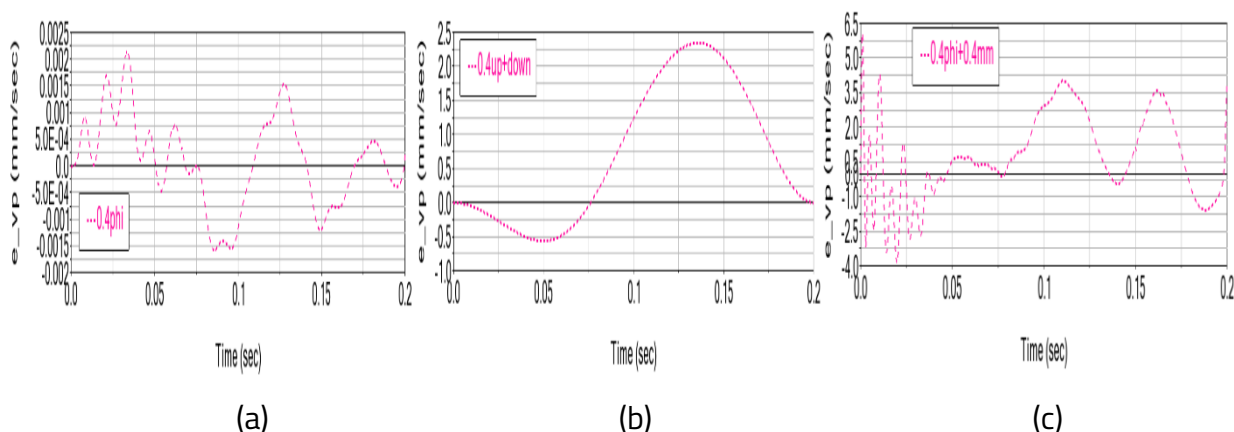


Fig. 4.30. Eroarea vitezei end-effectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de $0,4\text{ mm}$ în cuplele sferice; (c) cumulate.

În ceea ce privește efectul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor din cuplele sferice de $0,4\text{ mm}$ asupra erorilor accelerației pe traiectorie, aceeași concluzie se poate contura, și anume faptul că efectul nu este cumulativ, și că în prima parte a traiectoriei apar niște abateri mai mari datorate instabilității sistemului (fig. 4.31.c).

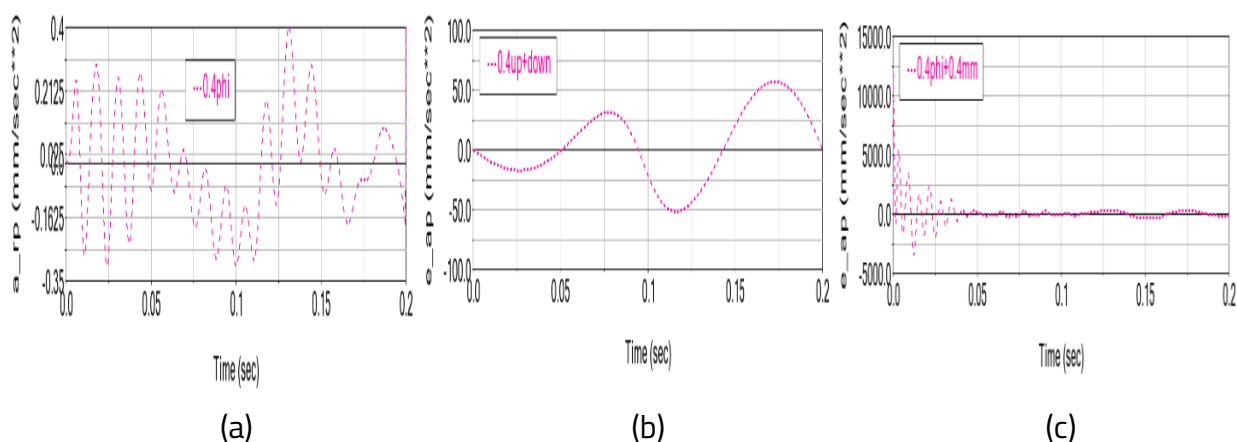


Fig. 4.31. Eroarea accelerației end-effectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) a jocurilor de $0,4\text{ mm}$ în cuplele sferice; (c) cumulate.

Referitor la comportament dinamic, efectul elasticităților barelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de $0,4\text{ mm}$, se poate observa că abaterea momentului motor atinge valori de până $\sim 450\text{ N}\cdot\text{m}$ pentru TA, $\sim 350\text{ N}\cdot\text{m}$ pentru TB și $\sim 150\text{ N}\cdot\text{m}$ pentru TC (fig. 4.32).

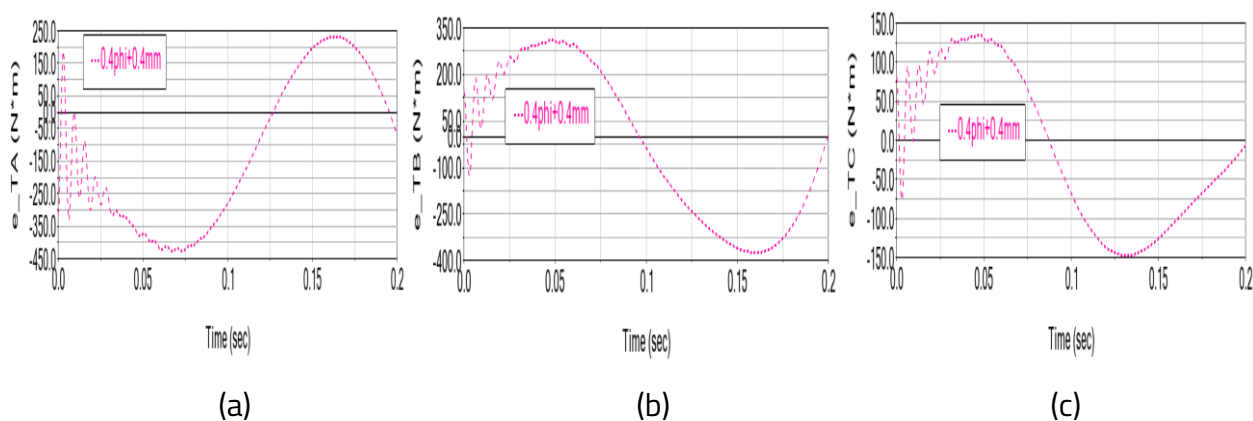


Fig. 4.32. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Pentru o analiză mai detaliată a efectului elasticităților elementelor ($0,4\Phi$) și a jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice asupra comportamentului dinamic al robotului, în fig. 4.33-4.35 sunt prezentate alături toate cele trei cazuri, cu cele două ipoteze luate separat și apoi împreună.

În cazul erorii momentului motor TA, efectul cu luarea în considerare a ambelor ipoteze (elasticități și jocuri) nu este cumulativ, ci crește semnificativ (de aproximativ 40 ori) față ca suma cazurilor luate separat (fig. 4.33).

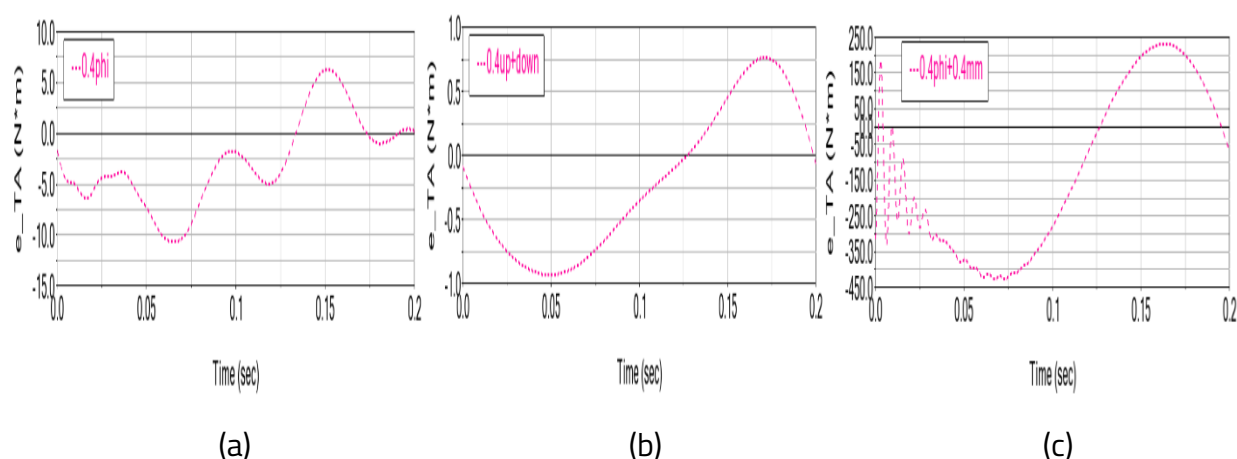


Fig. 4.33. Eroarea momentului motor TA în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Eroarea momentului motor TB atinge valori foarte mari (de ~40 de ori mai mari) în cazul în care se iau ambele ipoteze în considerare, față de cazurile luate separat (elasticități sau

jocuri), după cum se poate observa în fig. 4.34. Iar concluzia conform căreia efectul nu este aditiv rămâne valabilă și în acest caz.

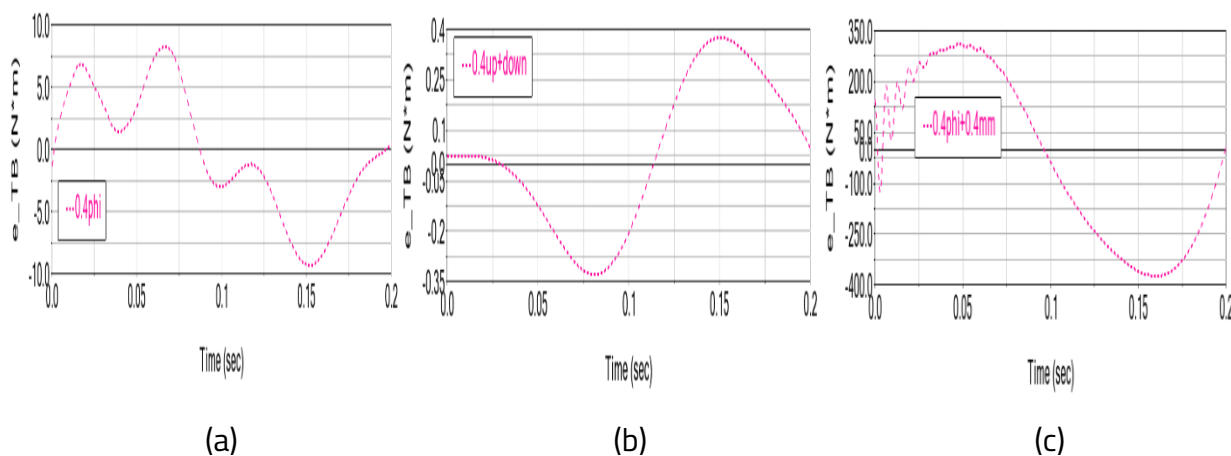


Fig. 4.34. Eroarea momentului motor TB în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\phi$; (b) a jocurilor de $0,4$ mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Concluzia enunțată anterior rămâne valabilă și pentru erorile momentului motor TC (fig. 4.35), și anume că efectul acestor două ipoteze luate în calcul împreună nu este cumulativ, eroarea crescând semnificativ atunci când se iau ambele ipoteze în considerare față de suma celor două luate separat, dar nu așa de mult ca în cazul erorilor momentului motor TA sau TB.

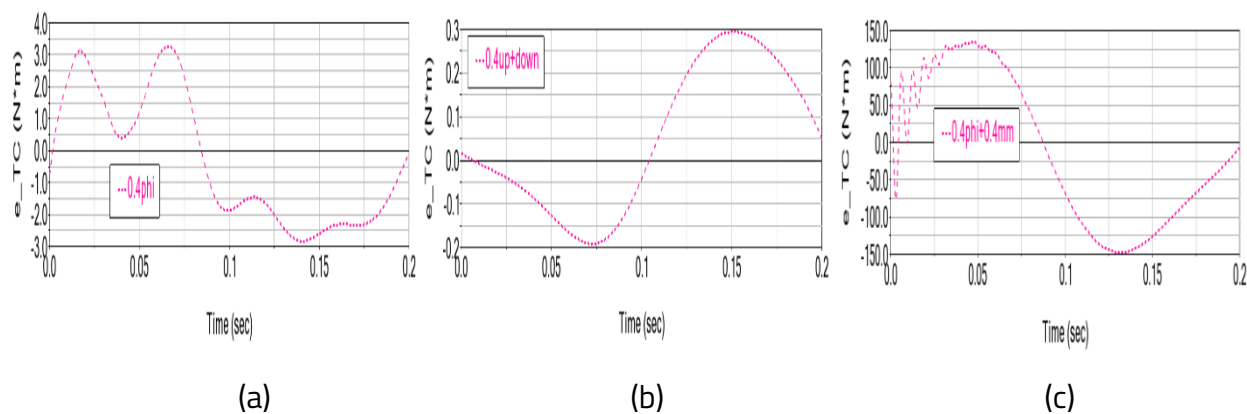


Fig. 4.35. Eroarea momentului motor TC în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\phi$; (b) jocurilor de $0,4$ mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,4\phi$ și jocuri în cuplele sferice de $0,6$ mm*

Această parte este destinată analizei efectului elasticităților barelor cu diametre de 4 mm ($0,4\Phi$) și jocuri în cuplele sferice cu o valoare mai mare față de cazurile precedente, și anume 0,6 mm (distanța pe axa Z între centrele sferelor care formează cuplele sferice).

Astfel, după cum se poate observa în fig.4.36 comportamentul cinematic al robotului este afectat de aceste ipoteze luate în calcul (față de cazul ideal, cu elemente rigide și fără jocuri).

La nivel de erori ale deplasărilor, acestea ating valori de până la 1,28 mm, la viteze de aproximativ 5 mm/s (dacă se ignoră prima parte a mișcării, unde apar deviații mai mari până se stabilizează sistemul), iar la nivel de erori ale accelerației acestea ating valori mai mari la începutul traiectoriei datorită instabilității sistemului, apoi ajungând la un maxim de 500 mm/s².

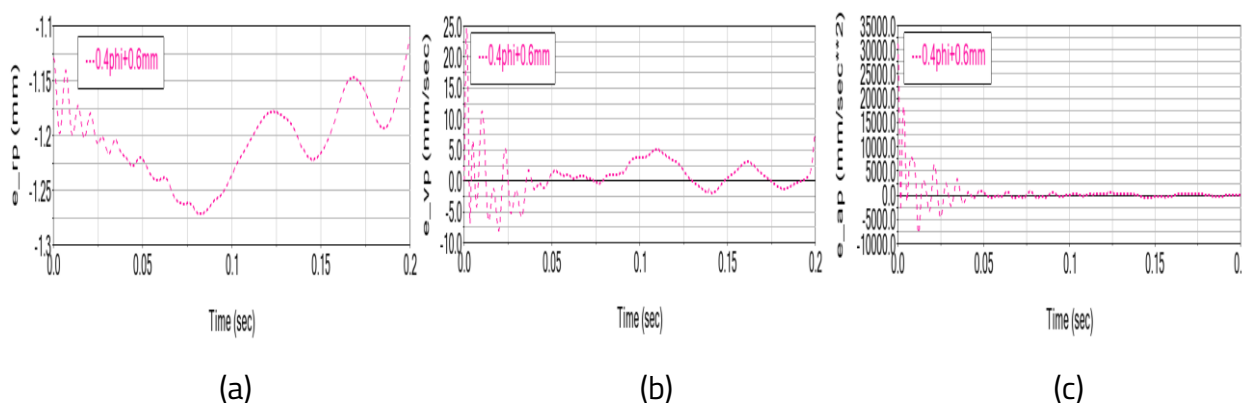


Fig. 4.36. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Pentru a analiza mai bine comportamentul cinematic, în fig. 4.37- 4.39 sunt prezentate alături erorile deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor pentru a evidenția cum influențează fiecare ipoteză luată în calcul separat, dar și împreună.

Astfel, erorile deplasării punctului caracteristic P în cele trei situații (în cele două ipoteze luate în considerare separat, dar și împreună) sunt reprezentate în fig. 4.37. Așa cum se poate observa din grafice, efectul nu este aditiv, dar ca și valori maxime în cazul în care sunt luate în considerare ambele ipoteze (elasticități și jocuri) sunt aproximativ aceleași ca și cele obținute în cazul în care sunt luate în considerare numai jocurile în cuplele sferice de 0,6 mm.

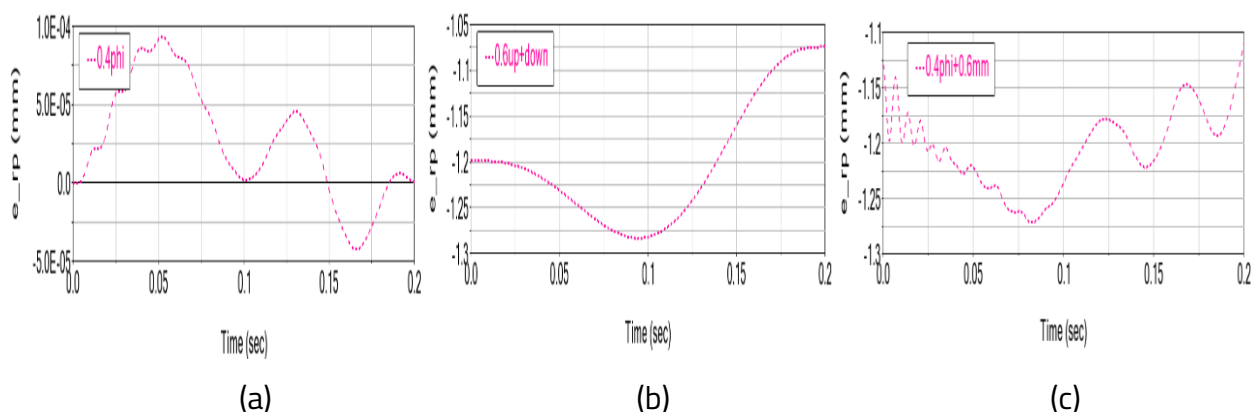


Fig. 4.37. Eroarea deplasării end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

În cazul erorilor vitezei end-efector, acestea ating valori de peste două ori mai mari atunci când se iau ambele ipoteze în considerare (fig. 4.38.c), și anume 5 mm/s versus 2,2 mm/s (valori citite după stabilizarea sistemului, adică după 0,03 s).

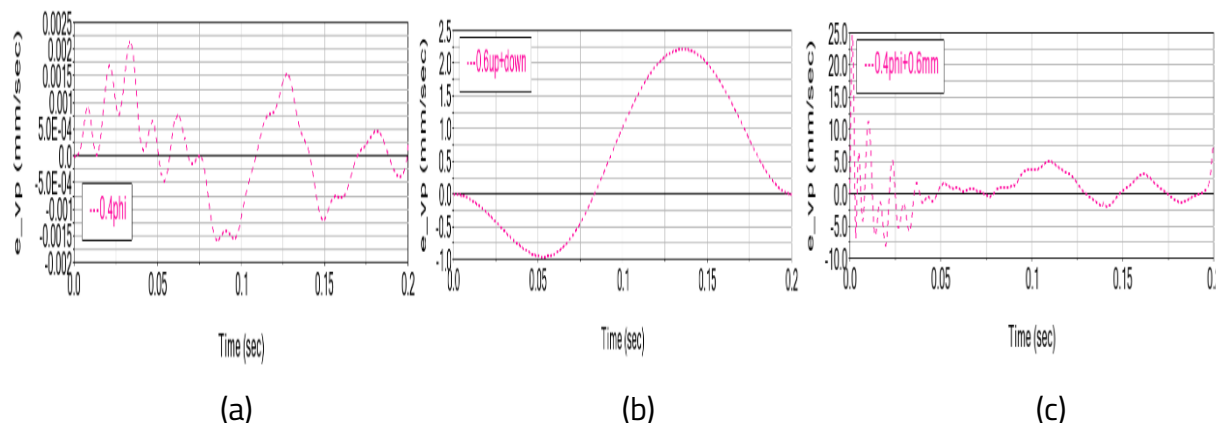


Fig. 4.38. Eroarea vitezei end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

La nivel de erori ale accelerațiilor, dacă efectul elasticităților duc la o alură oscilatorie a erorilor (fig. 4.39.a), dar cu amplitudini mici, de până 0,4 mm/s², efectul jocurilor duc la eroare de până la 50 mm/s² (fig. 4.39.b), iar când se iau ambele ipoteze în considerare, acestea ating valori și de 10 ori mai mari, adică 500 mm/s², valori obținute după stabilizarea sistemului, adică după 0,04 s (fig. 4.39.c).

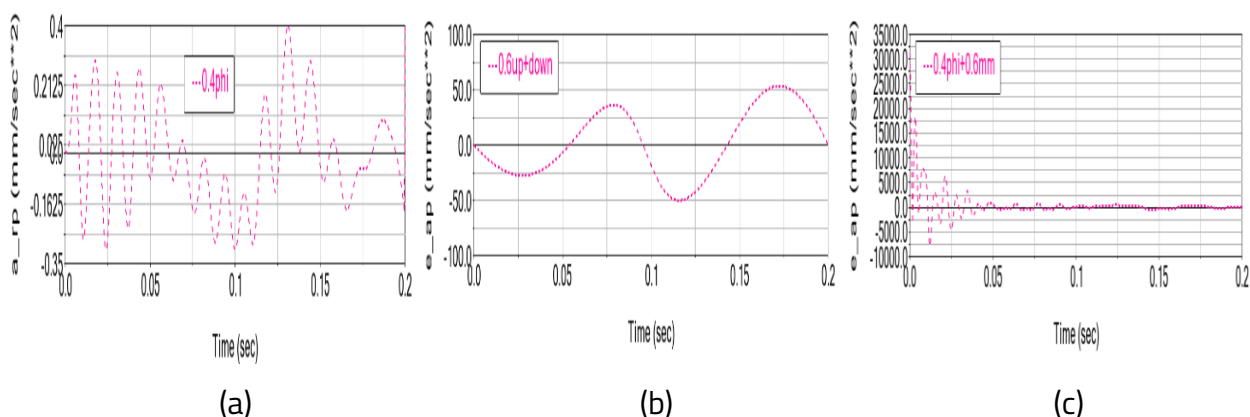


Fig. 4.39. Eroarea accelerației end-effectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

În ceea ce privește comportamentul dinamic al robotului analizat, erorile momentelor motoare (fig. 4.40) arată un efect mai mare asupra momentului motor TB, unde se ating și valori de peste 300 N·m (fig. 4.40.b), valori duble față de eroarea momentului motor TC care atinge un maxim de 150 N·m (fig. 4.40.c). Aceleași diferențe mari în prima parte a mișcării apar și în acest caz, motivul acestora fiind pe de o parte metoda de integrare utilizată în rezolvarea numerică, și pe de altă parte datorită perioadei necesare sistemului până se stabilizează.

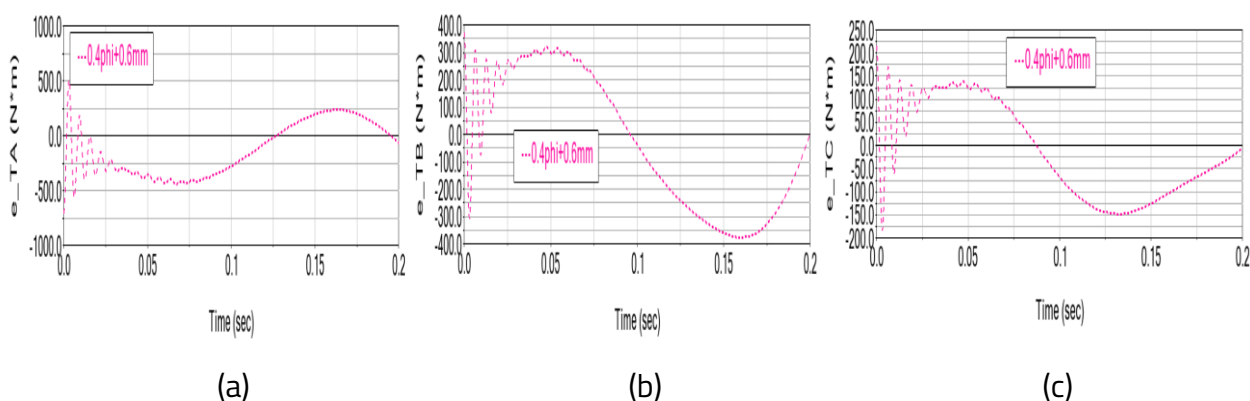


Fig. 4.40. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Pentru a putea compara rezultatele obținute, în fig. 4.41-4.43 sunt prezentate rezultatele alăturat, pentru a putea analiza efectele asupra comportamentului fiecărui motor în parte

atunci când se iau în considerare elasticitatea elementelor, jocurile sau cele două cumulate (cu valorile specificate anterior).

Analizând evoluția erorilor momentului motor TA, acestea ating valori de până 250 N·m pentru cazul în care se iau ambele ipoteze în considerare, față de 1,3 N·m în cazul jocurilor sau 70 N·m în cazul elasticităților.

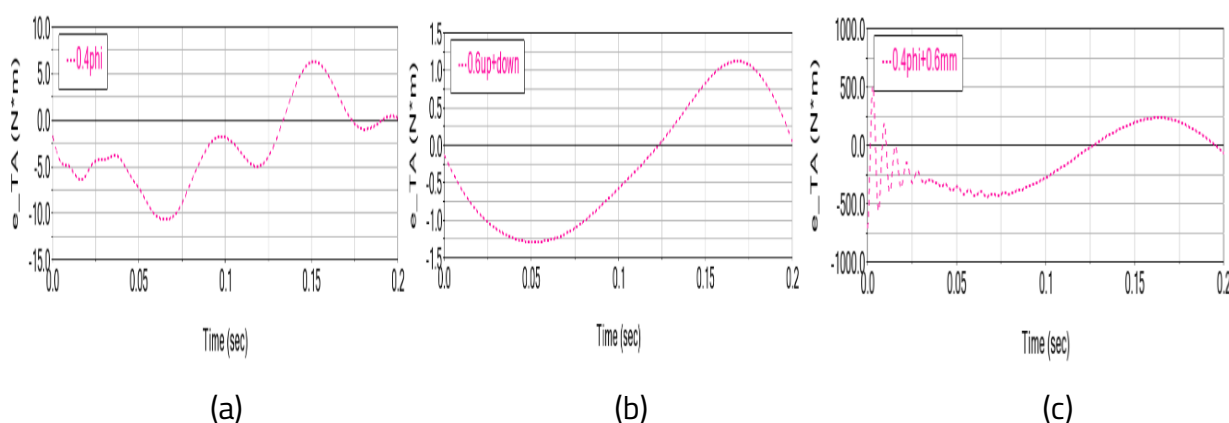


Fig. 4.41. Eroarea momentului motor TA în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

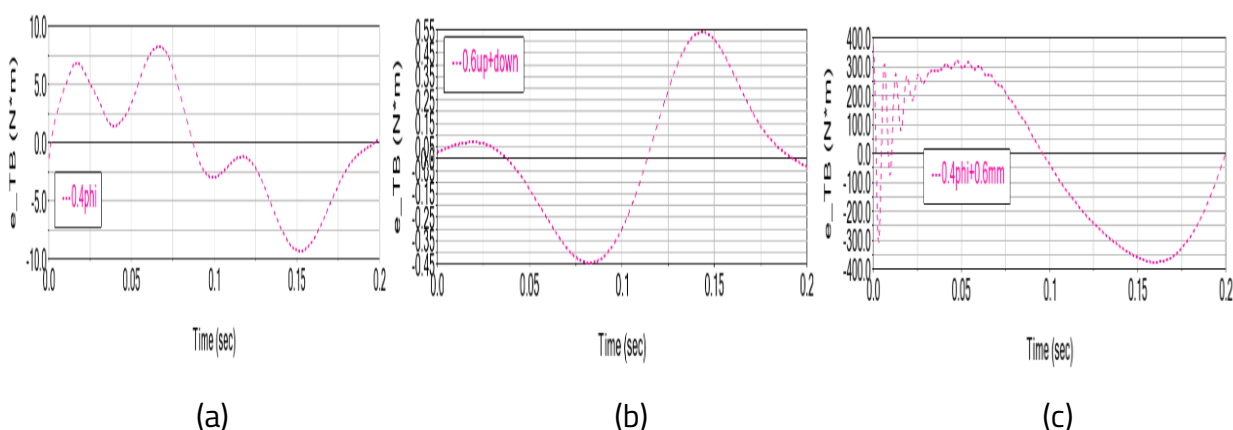


Fig. 4.42. Eroarea momentului motor TB în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\Phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Eroarea momentului motor TB atinge valori de până aproape de 400 N·m, valori mult mai mari decât în cazul luării în considerare separat a celor două ipoteze (elasticitățile și jocurile), după cum se poate observa în fig. 4.42, diferențele fiind de peste 40 de ori mai mari față de suma efectelor celor ipoteze luate separate.

În ceea ce privește eroarea momentului motor TC, aceasta atinge valori de până la 50 de ori mai mari în cazul în care se iau în considerare ambele ipoteze față de ele luate separat (fig. 4.43).

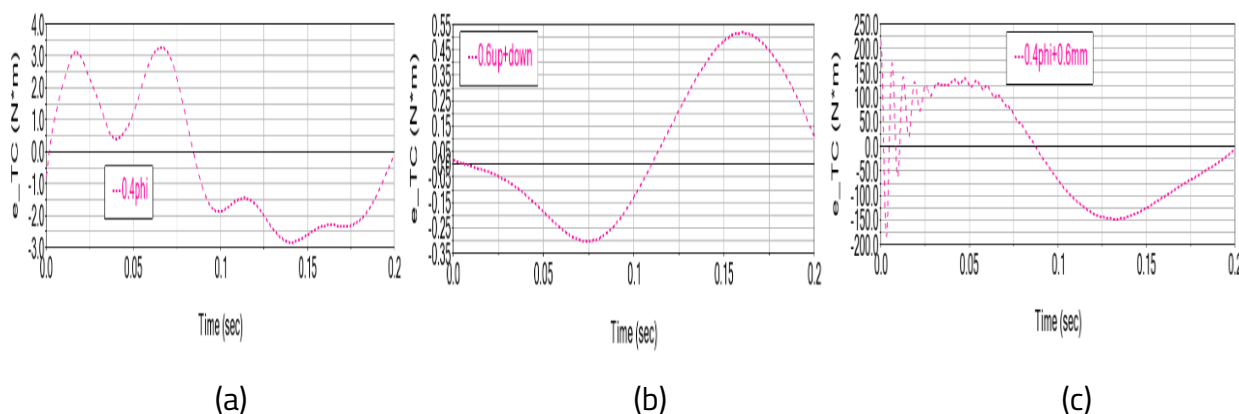


Fig. 4.43. Eroarea momentului motor TC în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,4\phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

➤ *Concluzii privind erorile cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,4\phi$ și jocuri în cuplele sferice*

Prin acest studiu s-a evidențiat efectul asupra comportamentului cinematic și dinamic asupra robotului paralel Delta al elementelor elastice de tip bară cu diametrul de $0,4\phi$ și jocuri ale 0,2 mm, 0,4 mm și 0,6 mm, inclusiv s-a analizat efectul față de ipotezele luate separat în considerare.

Astfel, în fig. 4.44 și fig. 4.45 sunt prezentate pe același grafic pentru același diametru (și anume de $0,4\phi$) efectele pe care le produc comparativ jocurile de 0,2 mm, 0,4 mm și respectiv 0,6 mm.

Astfel, în fig. 4.44 este reprezentat efectul pe care îl au jocurile asupra comportamentului cinematic al robotului.

Erorile deplasării punctului caracteristic P pe traiectorie datorate jocurilor din cuplele sferice de 0,2 mm, 0,4 mm sau 0,6 mm (fig. 4.44.a), arată faptul că jocurile conduc la erori mai mari pe traiectorie, afectând poziția inițială a end-effectorului, iar apoi deviind cu până la 0,2 mm.

În ceea ce privește eroarea vitezei punctului caracteristic P (fig. 4.44.b), exceptând valorile mai mari de la începutul traiectoriei (valori care sunt din ce în ce mai mari odată cu creșterea

valorilor jocurilor luate în considerare), erorile cele mai mici sunt în cazul în care se iau în considerare jocuri de 0,2 mm, în cazul erorilor datorate jocurilor de 0,4 mm și 0,6 mm sunt aproximativ la fel, cu excepția primei părți a traiectoriei, când erorile sunt și de 5 ori mai mari în cazul jocurilor de 0,6 mm (datorită faptului că din cauza jocului mai mare instabilitatea sistemului crește).

Erorile accelerației păstrează același trend ca și erorile vitezelor, cu diferența că în primele 0.04 s abaterile sunt mult mari pentru cazul cu jocuri de 0,6 mm.

În concluzie, din punct de vedere cinematic, se poate afirma faptul că jocurile de 0,6 mm sunt mult prea mari și conduc la instabilitatea sistemului în prima parte a traiectoriei.

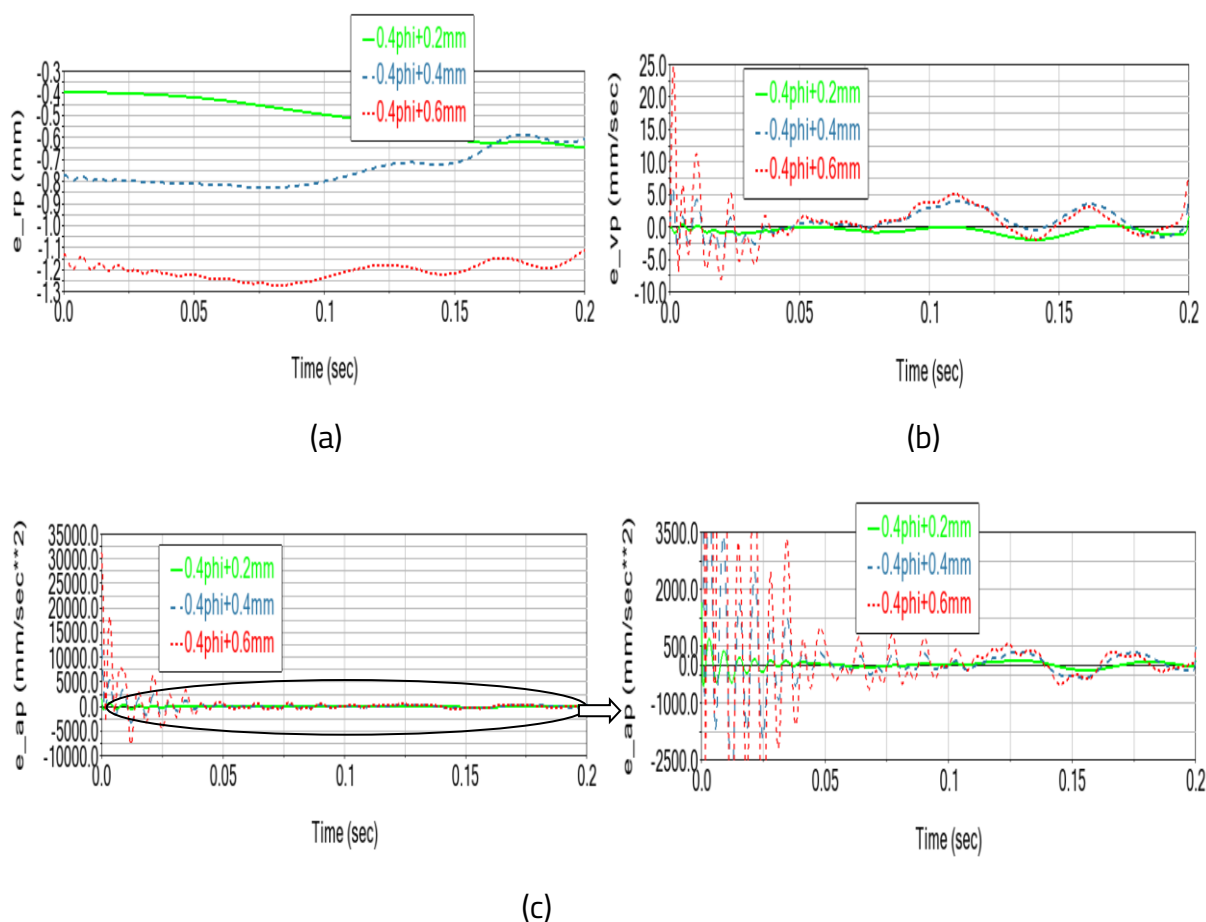


Fig. 4.44. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de 0,4 ϕ și a jocurilor în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Din punct de vedere al erorilor momentelor motoare (fig.4.45), pentru cel mai dezavantajos caz al elasticităților elementelor (cu diametrul barelor de 0,4 ϕ , adică cele mai

subțiri), efectul jocurilor este aproximativ același, cu excepția primei părți a traiectoriei unde apar abateri din ce în ce mai mari odată cu creșterea jocului din cuplele sferice.

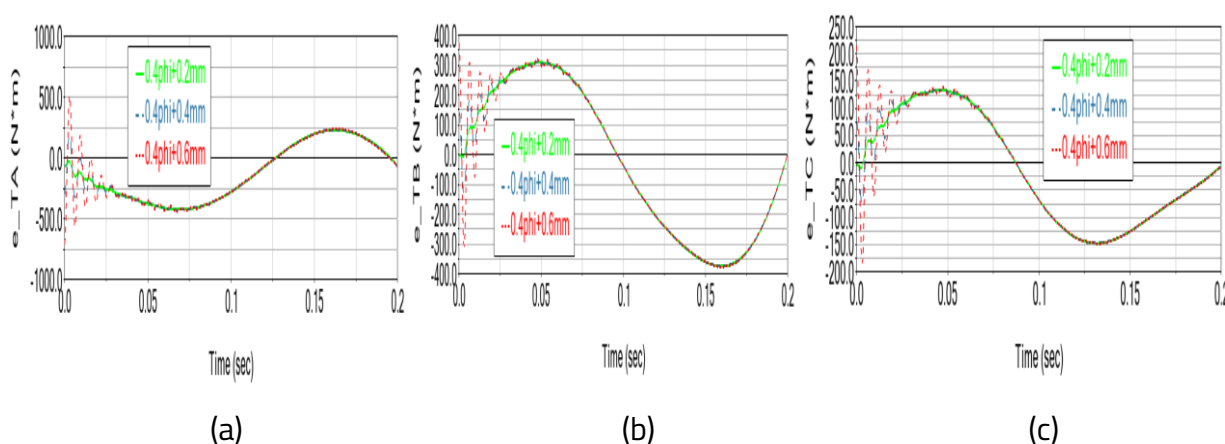


Fig. 4.45. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,4\Phi$ și a jocurilor în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

A doua variantă de analiză a comportamentului cinematic și dinamic a robotului paralel Delta este cea a diametrului barelor de 8 mm ($0,8\Phi$) și diferite jocuri în cuplele sferice ($0,2\text{ mm}$, $0,4\text{ mm}$ sau $0,6\text{ mm}$).

În continuare, se vor studia pe rând toate aceste analize.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,8\Phi$ și jocuri în cuplele sferice de $0,2\text{ mm}$*

În cadrul analizei cu diametrul barelor elastice de 8 mm ($0,8\Phi$), prima parte este destinată studiului influenței jocurilor de $0,2\text{ mm}$ în cuplele sferice (după axa Z).

Astfel, erorile deplasărilor sunt de până la $0,63\text{ mm}$ (fig. 4.46.a), de până la $1,1\text{ mm/s}$ în cazul erorilor vitezei pe traiectorie (fig. 4.46.b), și de aproximativ 50 mm/s^2 (exceptând prima parte a traiectoriei, până se stabilizează) la nivel de accelerații, așa cum reiese din fig. 4.46.c.

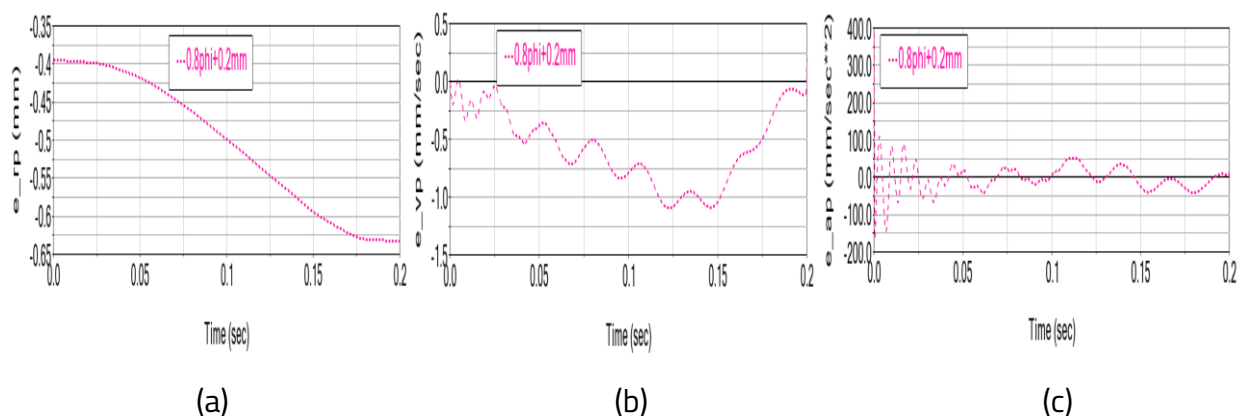


Fig. 4.46. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,8\phi$ și a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Pentru a putea analiza comparativ efectul ipotezelor luate în considerare cumulativ (flexibilități și jocuri), în fig. 4.47-4.49 sunt prezentate alături cele trei cazuri: elasticități, jocuri, elasticități+jocuri.

Astfel, din punct de vedere al erorilor deplasărilor pe traiectorie se poate spune că efectul este cumulativ, efectul influenței elasticităților în cazul luării în considerare a elasticităților (fig. 4.47a) adunat cu efectul influenței jocurilor de 0,2 mm (fig. 4.47.b), conduc la alura obținută în cazul luării în considerare concomitent a elasticităților și jocurilor.

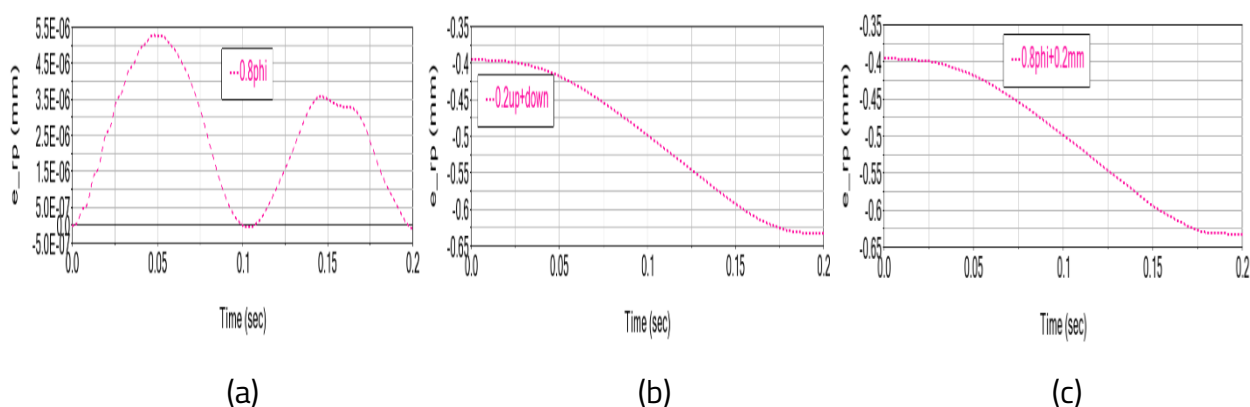


Fig. 4.47. Eroarea deplasării end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\phi$; (b) a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Din punctul de vedere al erorilor vitezelor pe traiectorie a punctului caracteristic, după cum se poate observa în fig. 4.48, efectul elasticităților și jocurilor nu este cumulativ, alura

graficului pentru cazul în care se iau în considerare ambele ipoteze seamană cu cel obținut în cazul jocurilor de 0,2 mm, atinge același maxim, doar că din cauza elasticităților se obțin oscilații ale acestuia (fig. 4.48.c)

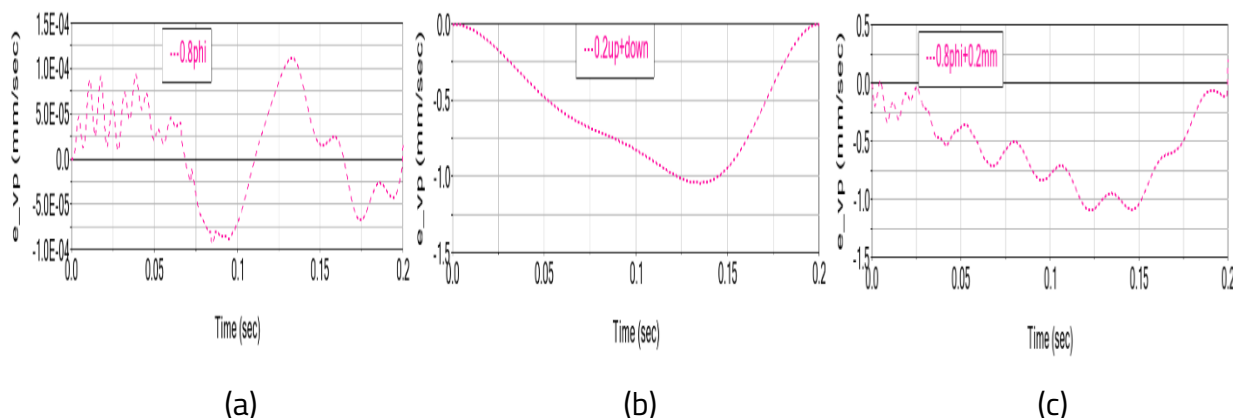


Fig. 4.48. Eroarea vitezei end-effectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\phi$; (b) jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Erorile accelerațiilor pe traiectorie (fig. 4.49) conduc la valori mult mai mari atunci când se iau ambele ipoteze în considerare (de până la 4 ori mai mari), iar efectul oscilant rămâne valabil și în acest caz, iar rezultatele obținute nu sunt cumulative (ipoteze luate separat versus ipoteze luate împreună în considerare).

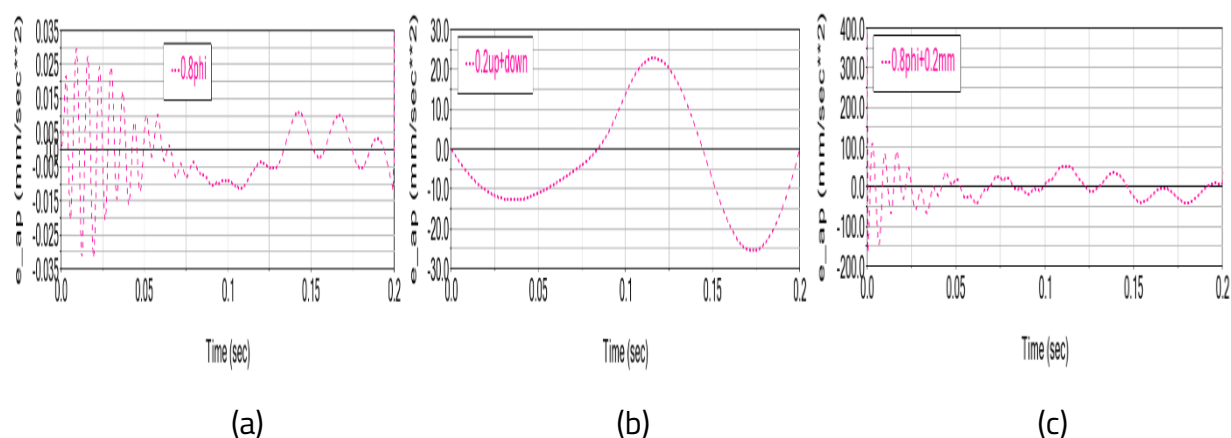


Fig. 4.49. Eroarea accelerației end-effectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\phi$; (b) jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

În ceea ce privește erorile momentelor motoare, acestea au alura accelerațiilor și ating și valori de peste 300 N·m (pentru cazul momentului TC, fig. 4.50.c), cu mici oscilații la începutul traiectoriei.

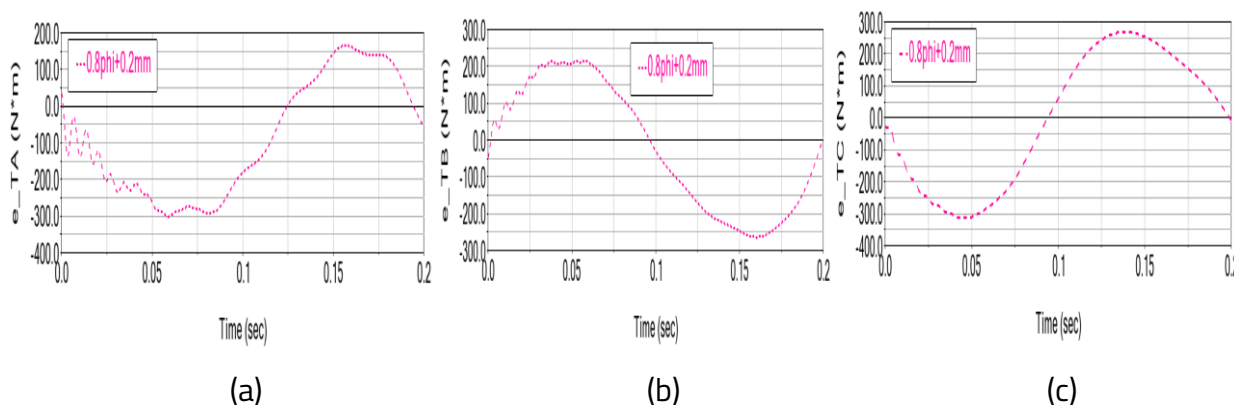


Fig. 4.50. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,8\Phi$ și a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Pentru a analiza mai bine efectele elasticităților elementelor de tip bară cu diametre de 8 mm ($0,8\Phi$) și jocuri de 0,2 mm în cuplele sferice, și în cazul erorilor momentelor motoare este prezentată o analiză comparativă a celor 3 situații analizate: elasticități, jocuri și elasticități+jocuri.

Astfel, analizând comparativ în cele 3 cazuri eroarea momentului motor TA (fig. 4.51), se poate concluziona faptul că efectul celor două ipoteze luate în considerare (elasticități+jocuri) nu este cumulativ, din contră, atunci când se iau ambele ipoteze în considerare erorile cresc semnificativ, de peste 10 ori față de cazul în care sunt luate în calcul separat.

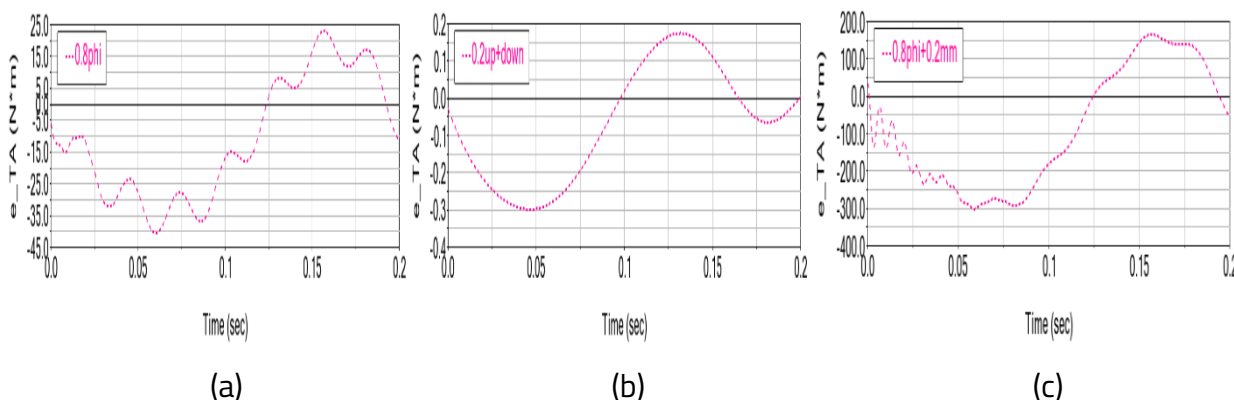


Fig. 4.51. Eroarea momentului motor TA în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

În cazul erorilor momentului motor TB, efectul elasticităților și a jocurilor conduc la valori mult mai mari (de până la 10 ori mai mari) în cazul în care se iau ambele ipoteze în considerare față de cazul în care se iau separat (fig. 4.52).

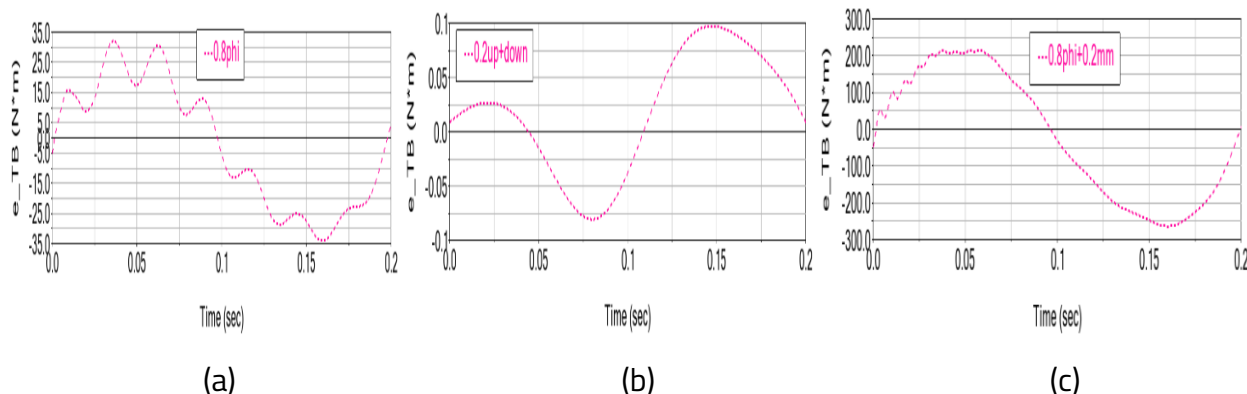


Fig. 4.52. Eroarea momentului motor TB în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

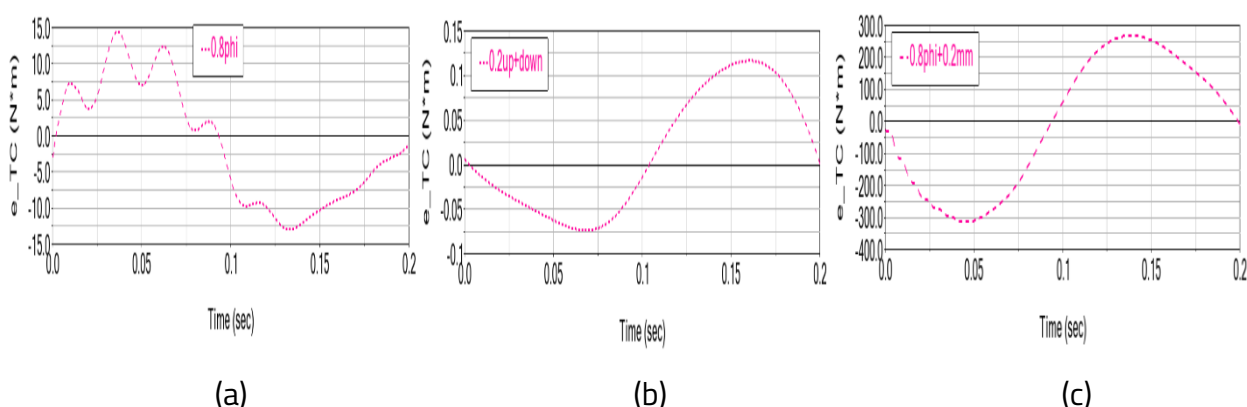


Fig. 4.53. Eroarea momentului motor TC în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) a jocurilor de 0,2 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Erorile momentului motor TC cresc de peste 10 ori în cazul în care se iau în considerare ambele ipoteze în calcul față de cazul în care se iau separat (fig. 4.53). De asemenea, se poate concluziona faptul că efectul nu este cumulativ, iar valorile atinse ale erorilor ajung la peste 300 N·m.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,8\Phi$ și jocuri în cuplele sferice de $0,4\text{ mm}$*

În această parte a studiului, se analizează efectul elasticităților elementelor de diametru de $0,8\Phi$ și jocuri în cuplele sferice de $0,4\text{ mm}$.

Astfel, din punct de vedere al mișcărilor punctului caracteristic pe traiectorie (fig. 4.54), se poate observa că erorile de deplasare ajung până la $0,82\text{ mm}$, cele de viteze ating valori de până la 2 mm/s , iar cele de accelerație până la 300 mm/s^2 (exceptând prima parte a traiectoriei).

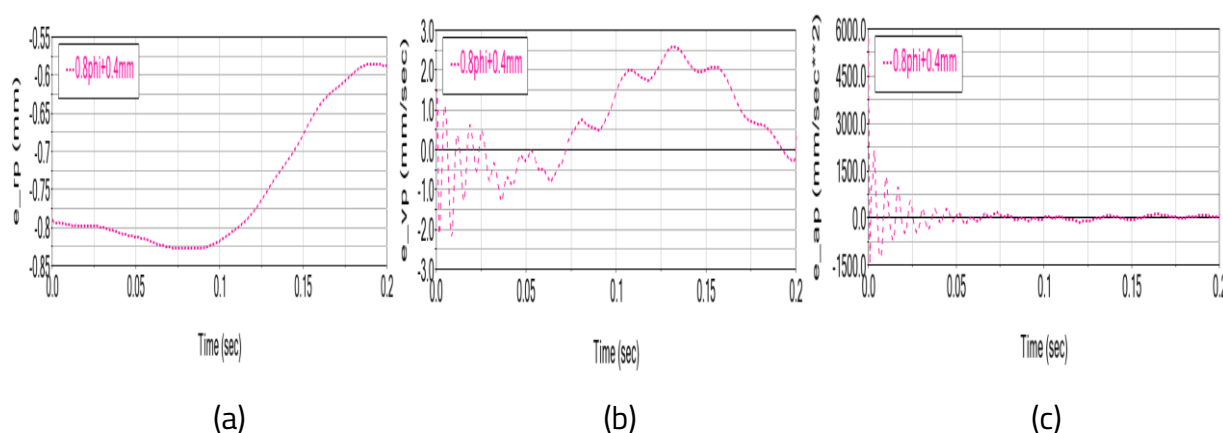


Fig. 4.54. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,8\Phi$ și a jocurilor de $0,4\text{ mm}$ în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Ca și în cazurile precedente, se vor analiza separat erorile deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor (fig. 4.55-4.57) pentru a vedea influența celor 2 factori analizați (elasticități, jocuri, elasticități+ jocuri).

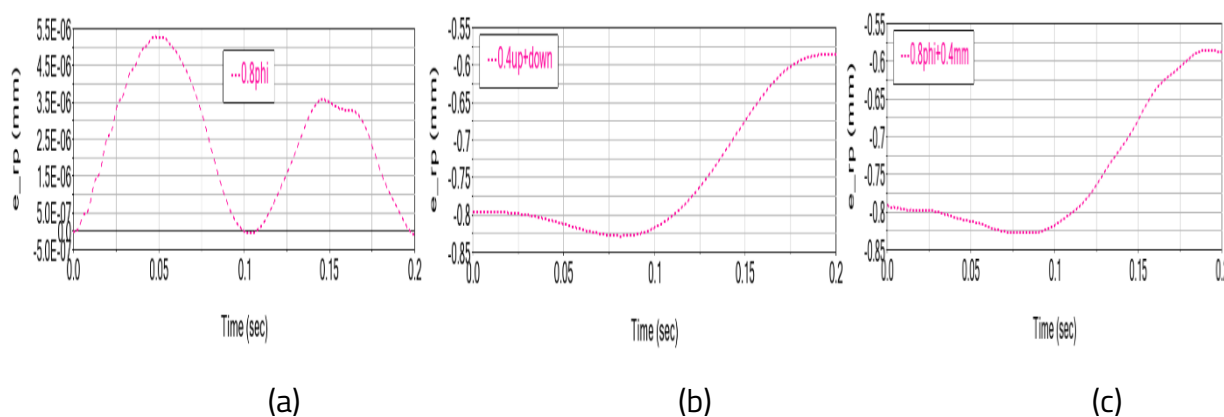


Fig. 4.55. Eroarea deplasării end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) a jocurilor de $0,4\text{ mm}$ în cuplele sferice; (c) cumulate.

Astfel, erorile deplasărilor în cele 3 cazuri sunt prezentate alăturat în fig. 4.55, putând fi analizate comparativ, rezultând concluzia că efectul acestor două ipoteze luate împreună în considerare (elasticități și jocuri) este aproximativ suma celor două luate separat (apar mici oscilații datorate elasticităților suplimentar față de cazul erorilor în care doar jocurile sunt luate în considerare).

Erorile vitezei pe traiectorie (fig.4.56) ating valori maxime aceleași (2,1 mm/s) în cazul luării în considerare a jocurilor din cuplele sferice, doar că elasticitățile duc la valori oscilatorii ale rezultatelor obținute.

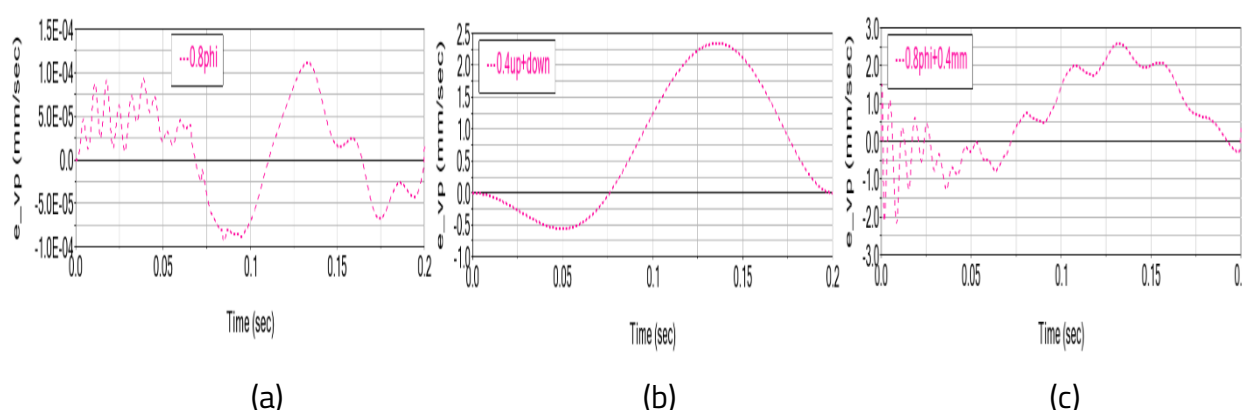


Fig. 4.56. Eroarea vitezei end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

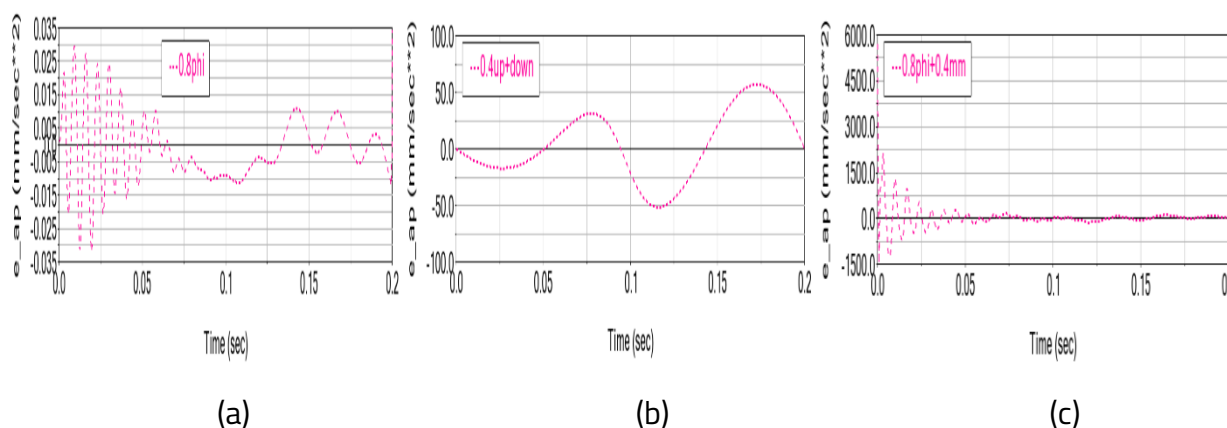


Fig. 4.57. Eroarea accelerației end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) a jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Erorile accelerației pe traiectorie (fig. 4.57) conduc la valori foarte mari atunci când ambele ipoteze sunt luate în considerare (elasticități și jocuri), mai ales la începutul traiectoriei, față de cazul în care se iau separat în considerare, deci se poate concluziona de asemenea că efectul nu este aditiv.

Erorile momentelor motoare datorate elasticităților elementelor de tip bară de 8 mm ($0,8\Phi$) și jocurilor în cuplele sferice de 0,4 mm sunt reprezentate în fig. 4.58. Astfel, se poate remarca faptul că erorile ating valori mari, atunci când se iau în considerare ambele ipoteze în considerare, de ~ 400 N·m pentru momentul motor TA, ~ 260 N·m pentru momentul motor TB și ~ 100 N·m pentru momentul motor TC.

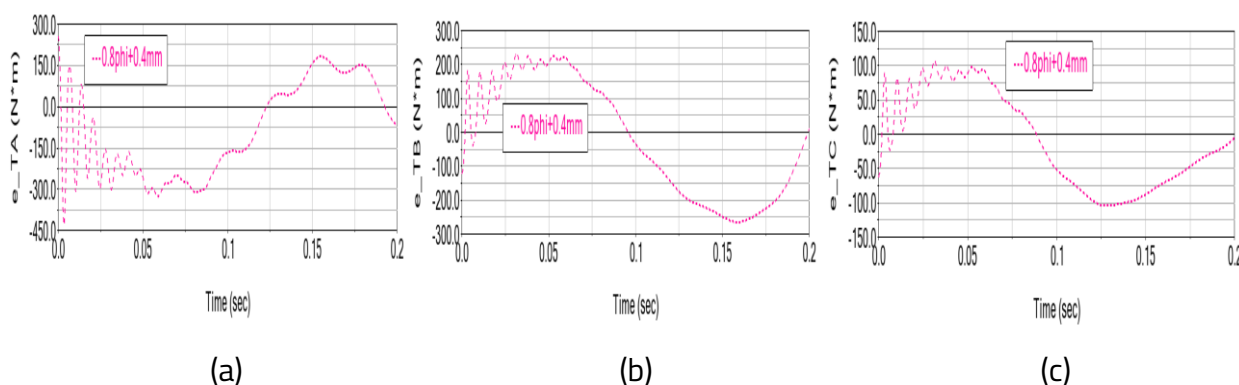


Fig. 4.58. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,8\Phi$ și a jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Dacă anterior s-au analizat comparativ între ele erorile momentelor motoare, în continuare se vor analiza comparativ, pentru fiecare moment motor în parte, și efectele pe care le produc elasticitățile și jocurile, luate în considerare atât separat, cât și împreună.

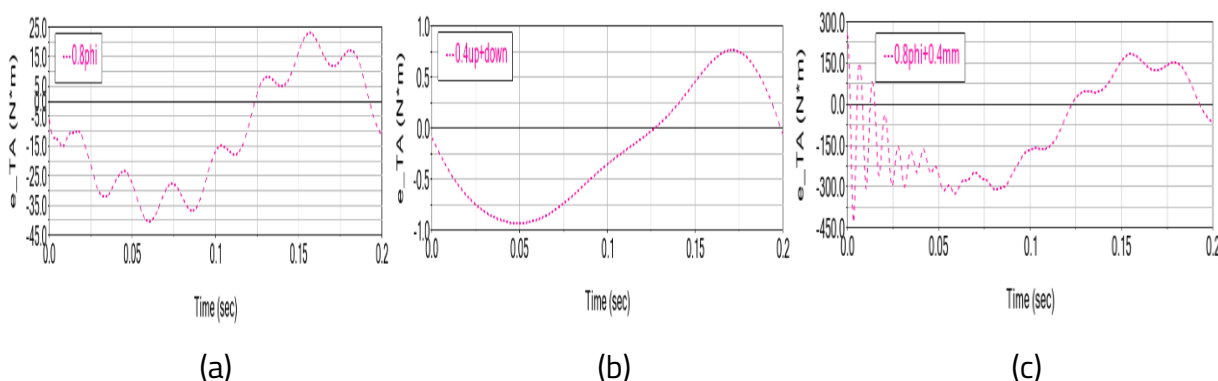


Fig. 4.59. Eroarea momentului motor TA în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) jocurilor de 0,4 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Astfel, erorile momentului motor TA (fig.4.59) cresc de peste 10 ori atunci când ambele ipoteze se iau în considerare (elasticități și jocuri) și efectul elasticităților conduce la oscilații ale rezultatelor obținute.

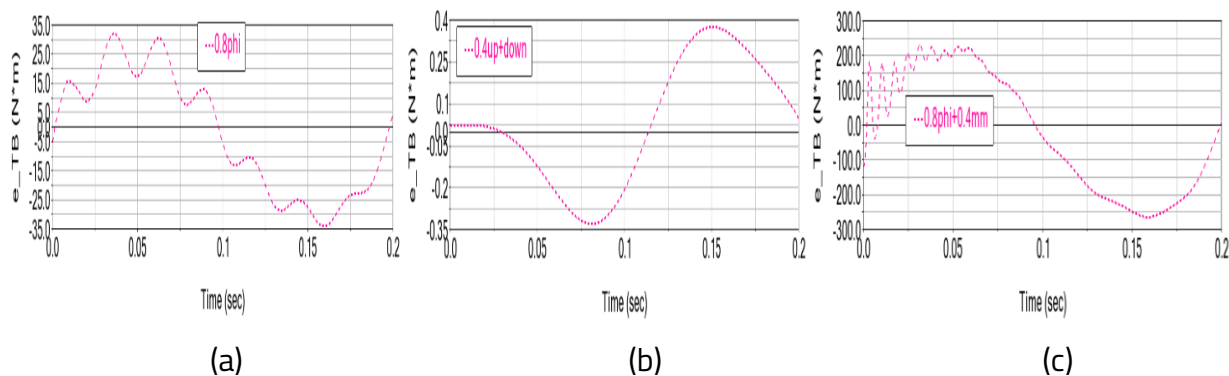


Fig. 4.60. Eroarea momentului motor TB în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) jocurilor de $0,4$ mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Eroarea momentului motor TB de asemenea atinge valori de peste 10 ori mai mari atunci când se iau în considerare ambele ipoteze în considerare față de cazul în care se iau în considerare separat (fig. 4.60).

Eroarea momentului motor TC atinge valori de aproximativ 7 ori mai mari atunci când sunt luate în considerare simultan ambele ipoteze în considerare versus luate separate (fig. 4.61), valori mai mici față de celelalte erori ale momentelor motoare (TA și TB).

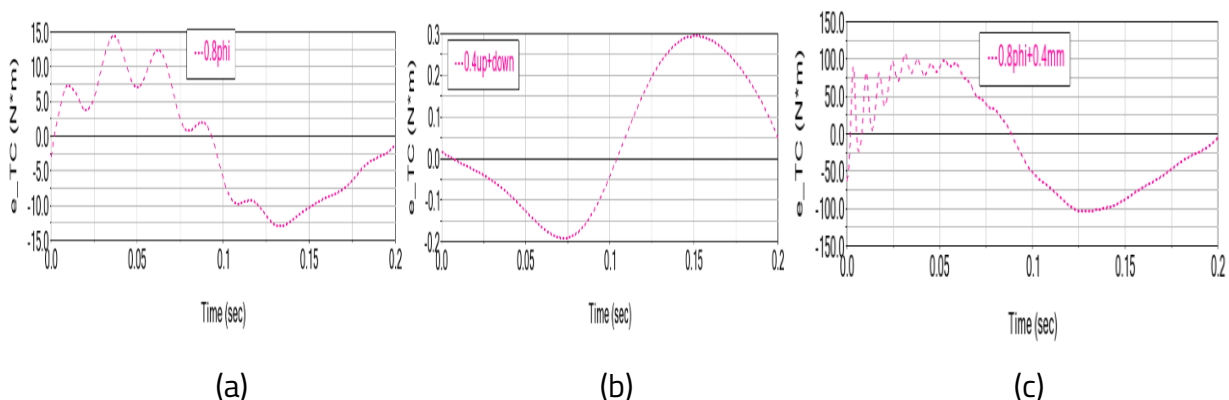


Fig. 4.61. Eroarea momentului motor TC în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) jocurilor de $0,4$ mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

La toate trei cazurile se poate concluziona faptul că efectul nu este cumulativ, ci din contră crește de până la 7-10 ori mai mult față de efectul ipotezelor luate în considerare separat.

➤ *Analiza erorilor cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,8\phi$ și jocuri în cuplele sferice de 0,6 mm*

Pentru cazul barelor cu diametru de 8 mm un ultim studiu efectuat a fost cel al jocurilor din cuple de 0,6 mm (luate în considerare concomitent).

Astfel, la nivel de erori ale punctului caracteristic pe traiectorie, erorile deplasării ating valori de până la 1,28 mm, iar dacă se ignoră prima parte a traiectoriei, la nivel de erori de viteze rezultă valori de până la 2,5 mm/s, iar la nivel de accelerații de până la 300 mm/s² (fig. 4.65).

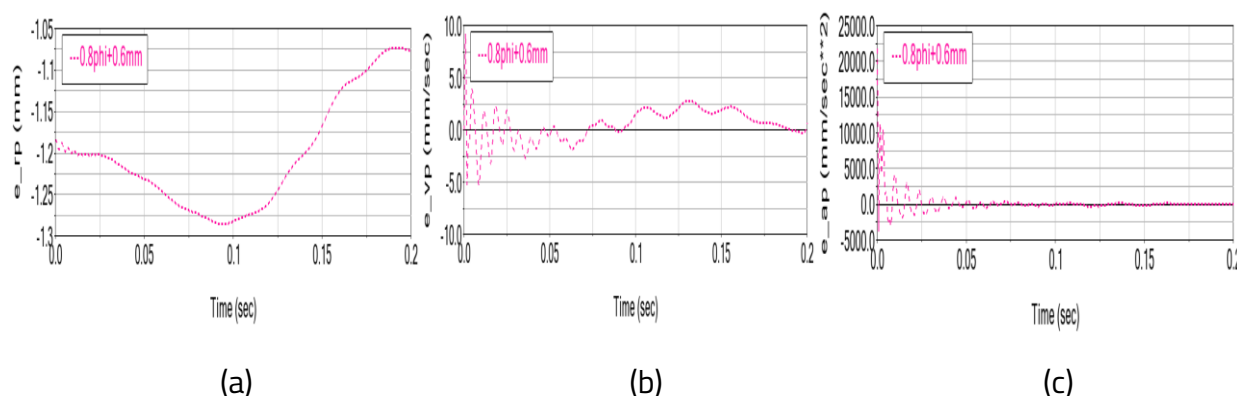


Fig. 4.62. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,8\phi$ și a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Dacă anterior s-a evidențiat comparativ efectul elasticităților și jocurilor asupra comportamentului cinematic al robotului, în continuare se va analiza comparativ pe fiecare componentă în parte: deplasare, viteză și accelerație analizând atât separat cât și împreună efectul pe care îl au elasticitățile elementelor și jocurile din cuple (fig. 4.66-4.68).

Astfel, erorile deplasărilor (fig. 4.66) punctului caracteristic atunci când se iau în considerare și elasticitățile și jocurile are alura și valorile ca și cele ale cazului în care se iau în considerare doar jocurile, cu mici oscilații pe traiectorie.

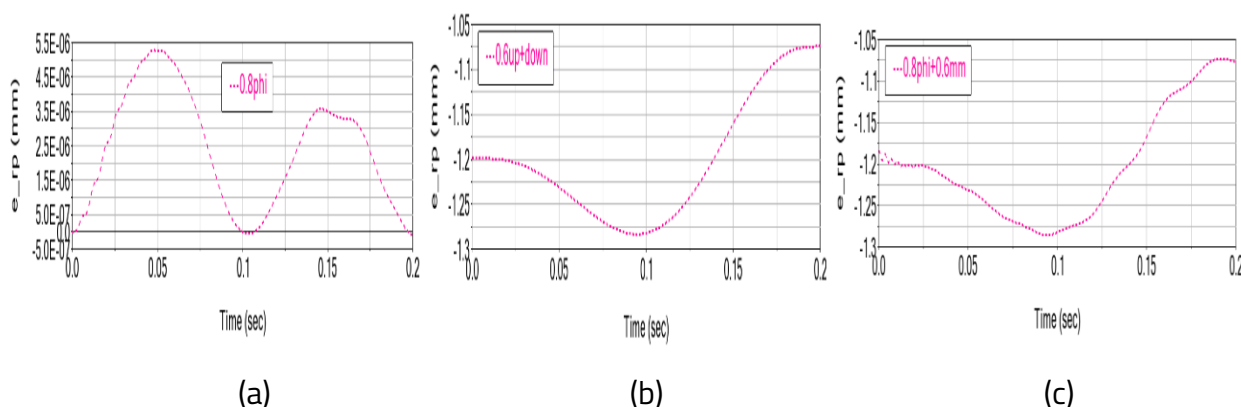


Fig. 4.63. Eroarea deplasării end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Erorile vitezelor traiectoriei punctului caracteristic P atunci când se iau în considerare elasticitățile elementelor și jocurile cuplelor sferice de 0,6 mm sunt prezentate în fig. 4.67.c și arată faptul că atunci când se iau împreună în considerare ca și ipoteze de lucru conduc la erori mai mari, mai ales la începutul traiectoriei (până se stabilizează sistemul) și nu au un efect cumulativ cele două ipoteze (elasticități și jocuri).

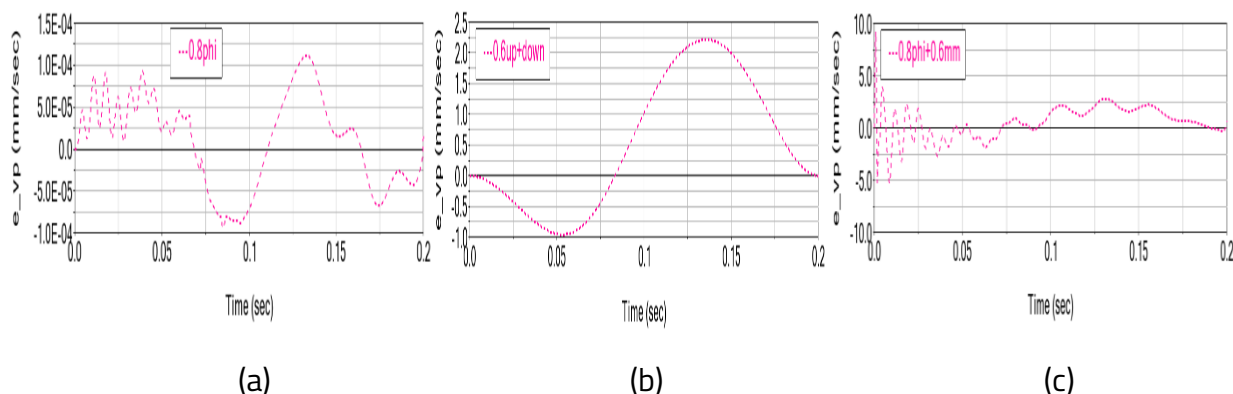


Fig. 4.64. Eroarea vitezei end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\Phi$; (b) jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Erorile accelerațiilor pe traiectorie a punctului caracteristic pentru cele două cazuri luate separat (elasticități și jocuri) și împreună sunt reprezentate în fig. 4.65. Din analiza rezultatelor reiese faptul că efectul celor două ipoteze luate în considerare împreună conduc la valori mult mai mari ale erorilor, mai ales la începutul traiectoriei.

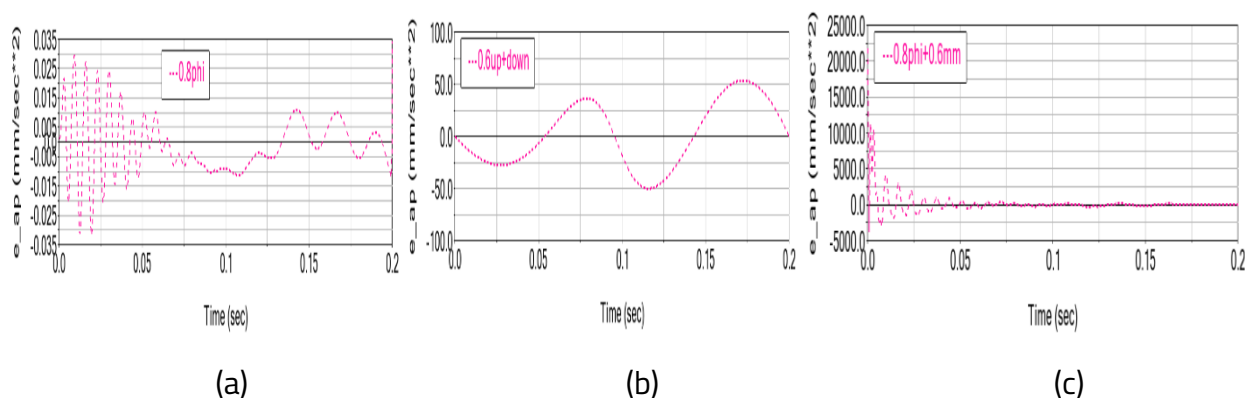


Fig. 4.65. Eroarea accelerației end-efectorului în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Ca și comportament dinamic, erorile momentelor motoare pentru cazul în care se iau în considerare elasticități ale barelor de 8 mm ($0,8\phi$) și jocuri de 0,6 mm sunt reprezentate în fig. 4.66. Astfel, erorile momentelor motoare au variație oscilatorie în prima parte a traiectoriei, atingând valori un pic mai mari față de valorile ulterioare, și anume maxime de ~ 200 N·m pentru momentul motor TA, de ~ 260 N·m pentru momentul motor TB și de ~ 100 N·m pentru momentul motor TC.

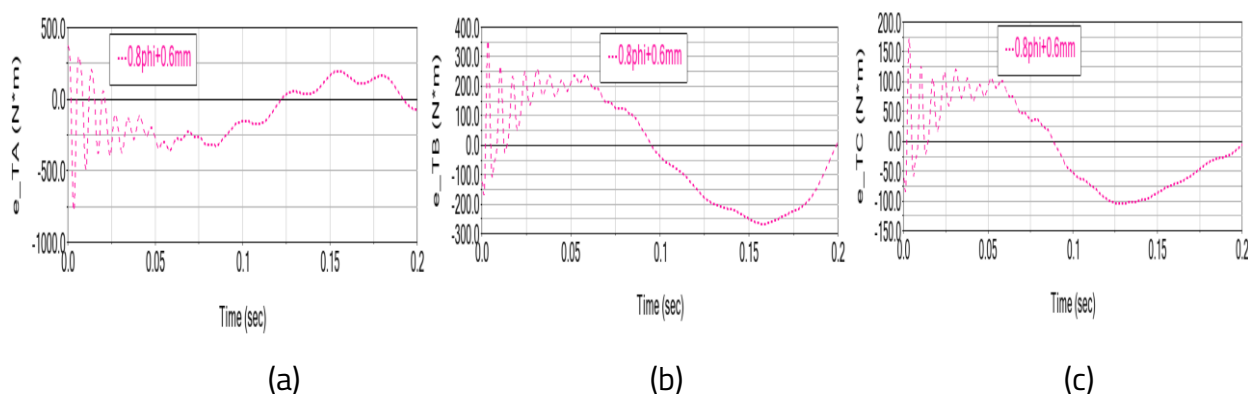


Fig. 4.66. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,8\phi$ și a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

Analizând comparativ eroarea momentului motor TA (fig. 4.67), efectul elasticităților și a jocurilor din cuple conduc la valori foarte mari ale acestora în comparație cu cazul în care se iau separat în considerare, ducând la valori și de peste 10 ori mai mari.

De asemenea, se poate concluziona din analiza comparativă a rezultatelor obținute că efectul elasticităților este mult mai mare asupra erorii momentului motor TA față de cea a jocurilor de 0,6 mm din cuplele sferice (maxim 40 N·m versus 1.1 N·m, deci de aproape 40 de ori), iar efectul cumulativ al acestor două ipoteze conduce la valori și mai mari (așa cum a fost descris anterior).

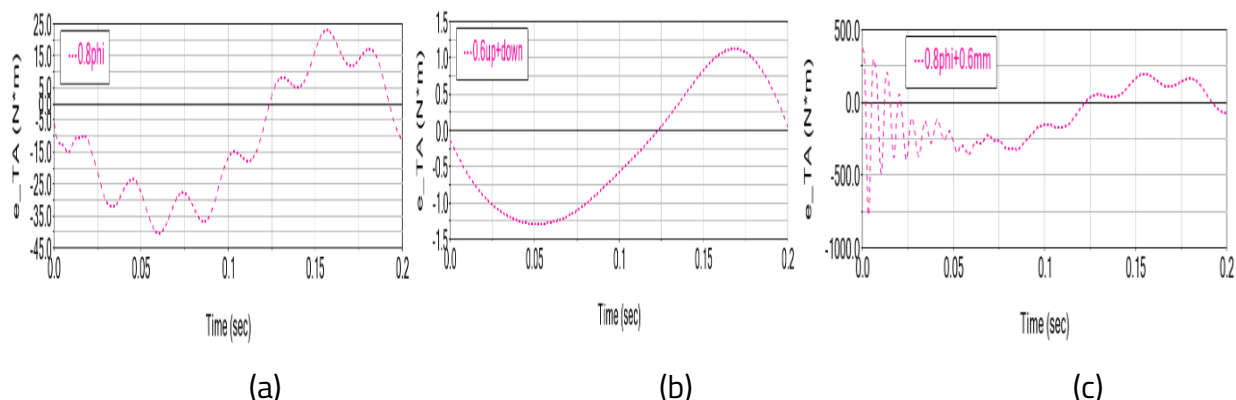


Fig. 4.67. Eroarea momentului motor TA în cazul: (a) elasticităților elementelor de 0,8Φ; (b) jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

Concluziile enunțate anterior pentru eroarea momentului motor TA rămân valabile și pentru eroarea momentului motor TB, cu excepția valorilor; în acest caz erorile cresc de aproximativ 8 ori atunci când se iau ambele ipoteze în considerare (elasticități și jocuri) față de cazul în care se iau în considerare separat (fig. 4.68).

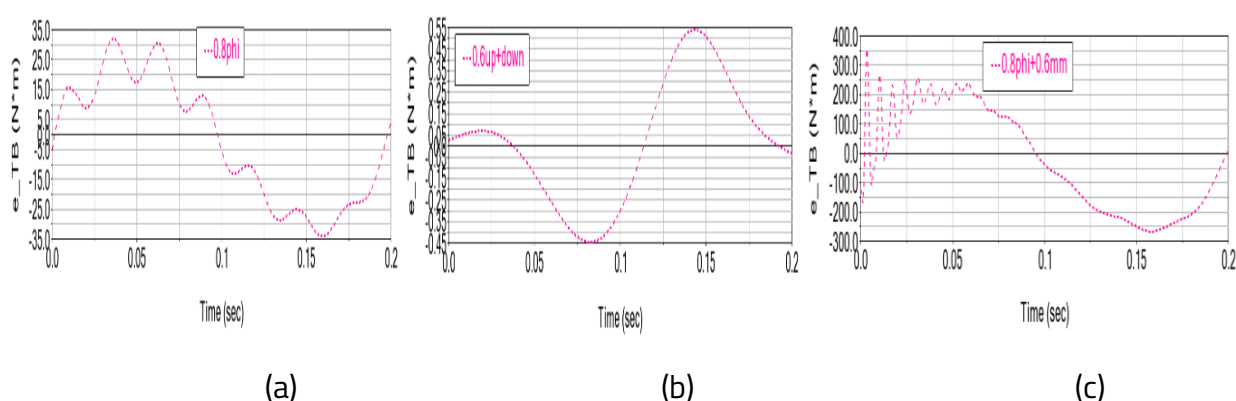


Fig. 4.68. Eroarea momentului motor TB în cazul: (a) elasticităților elementelor de 0,8Φ; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

În ceea ce privește eroarea momentului motor TC, analiza comparativă a celor două ipoteze luate în considerare separat și luate împreună (fig. 4.69) conduce la concluzia că

efectul acestora nu este cumulativ, ci eroarea crește de peste 7 ori atunci când se iau și elasticitățile elementelor de tip bară cu diametru de 8 mm ($0,8 \phi$) și jocurile din cuplele sferice de 0,6 mm în considerare. Efectul elasticităților duce la oscilații pe traiectorie pentru cazul în care se iau în considerare ambele ipoteze (și implicit și la erori cu oscilații).

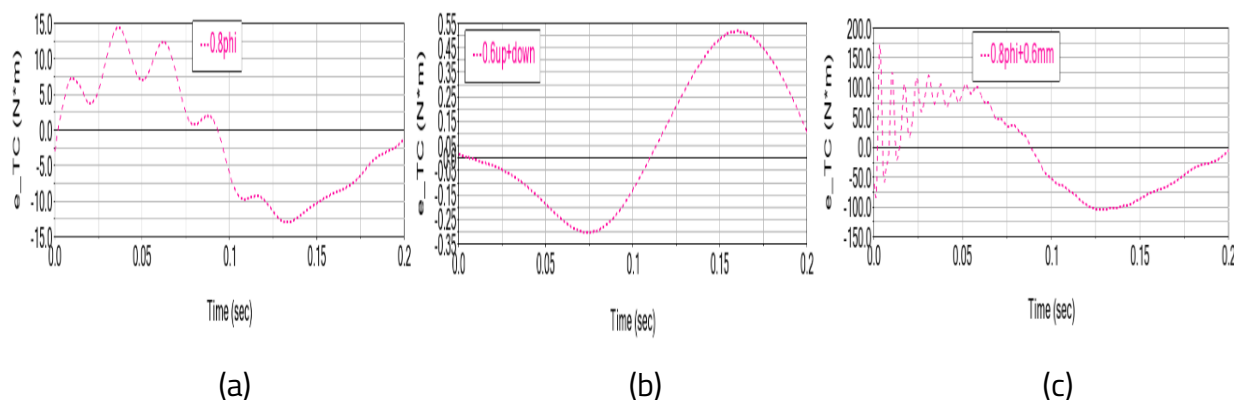


Fig. 4.69. Eroarea momentului motor TC în cazul: (a) elasticităților elementelor de $0,8\phi$; (b) a jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice; (c) cumulate.

➤ *Concluzii privind erorile cinematice și dinamice ale robotului paralel Delta cu elemente elastice pentru bare cu diametru de $0,8\phi$ și jocuri în cuplele sferice*

Pentru a putea compara rezultatele obținute pentru elemente elastice de tip bară cu diametru de 8 mm ($0,8 \phi$) și diferite valori ale jocurilor în fig. 4.70 și fig. 4.71 sunt reprezentate pe același grafic cele trei cazuri ale jocurilor (0,2 mm, 0,4 mm și 0,6 mm) pentru eroarea mișcării end-efectorului (deplasare, viteză și accelerație) și eroarea momentelor motoare.

Astfel, din punct de vedere al mișcării pe traiectorie a punctului caracteristic P (end-efectorul), se poate observa că din punct de vedere al erorilor deplasării pe traiectorie, aceasta crește odată cu creșterea jocurilor (fig. 4.70.a).

Erorile vitezelor pe traiectorie (fig. 4.70.b) cresc semnificativ atunci când se iau în considerare jocuri de 0,4 mm față de cazul în care se iau în considerare jocuri de 0,2 mm. În schimb, odata cu creșterea jocurilor de la 0,4 mm la 0,6 mm eroarea vitezei pe traiectorie nu crește decât în partea de început a traiectoriei (până se stabilizează sistemul), în rest alura este aproape aceeași.

Erorile accelerațiilor pe traiectorie (fig. 4.70.c) cresc foarte mult la începutul traiectoriei (până se ajunge la o stabilizare a sistemului), după care valorile sunt mai mici pentru cazul în care se iau în considerare jocuri de 0,2 mm ale jocurilor cuplelor sferice față de cele de 0,4 mm sau 0,6 mm. În schimb, în cazul jocurilor de 0,4 mm și 0,6 mm valorile sunt aproape identice, cu excepția primei părți a traiectoriei, unde până se stabilizează sistemul, abaterile sunt chiar și duble.

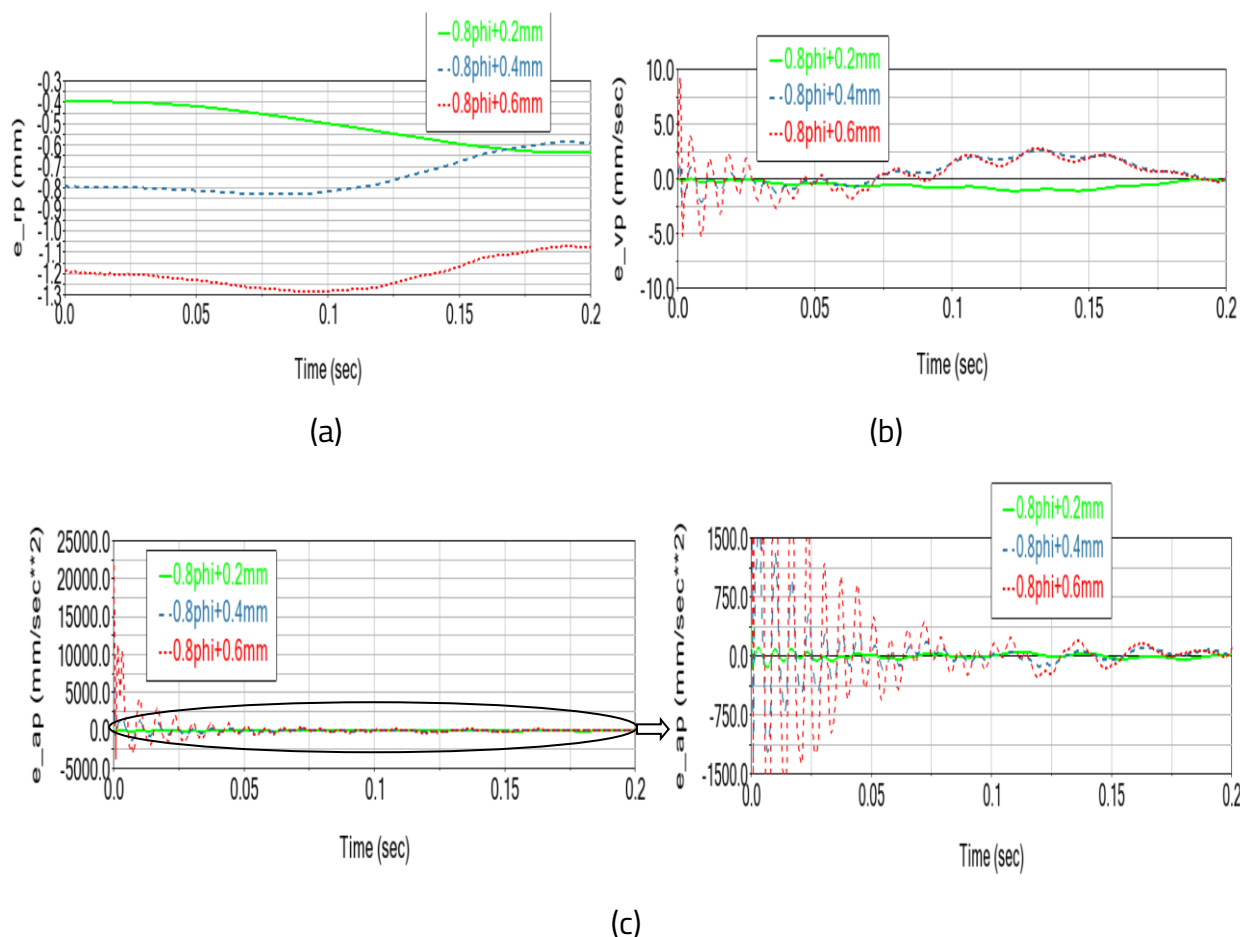


Fig. 4.70. Eroarea mișcărilor end-efectorului în cazul elasticităților elementelor de $0,8\Phi$ și a jocurilor în cuplele sferice pentru: (a) deplasare; (b) viteză; (c) accelerație.

Eroarea momentelor motoare (fig. 4.71) este aproape aceeași atunci când se iau în considerare cele 3 tipuri de valori ale jocurilor din cuplele sferice, cu excepția primelor 0,04 s, când abaterile cresc semnificativ odată cu creșterea jocurilor.

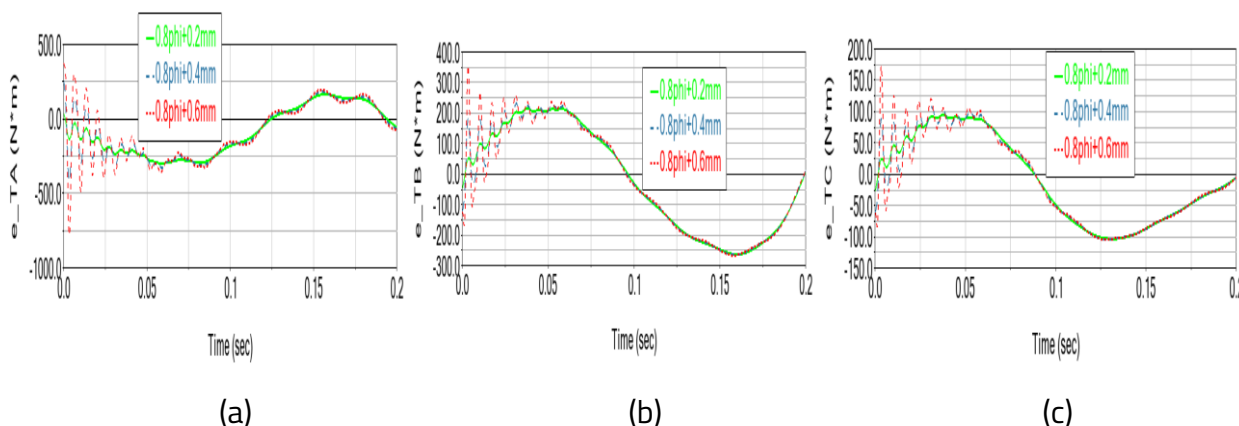


Fig. 4.71. Eroarea momentelor motoare în cazul elasticităților elementelor de $0,8\phi$ și a jocurilor în cuplele sferice pentru: (a) brațul A; (b) brațul B; (c) brațul C.

4.3. Concluzii

În urma analizei efectuate în cadrul acestui capitol se desprind câteva concluzii.

- Robotul paralel Delta a fost modelat și simulat cu succes în trei scenarii:
 - Cu luarea în considerare a elasticității elementelor de tip bară și cu frecvențe naturale mai mici de 300 Hz (pentru valori diferite ale diametrelor elementelor suple din componența paralelogramelor robotului Delta: 4 mm, 8 mm și 10 mm); restul elementelor au fost considerate ca fiind rigide;
 - Cu luarea în considerare a jocurilor din cuplele sferice pasive (0,2 mm, 0,4 mm și 0,6 mm);
 - Cu luarea în considerare a elasticităților elementelor și a jocurilor din cuple.
- Din punctul de vedere al elasticităților elementelor reiese că cea mai bună variantă este cea cu diametrul barelor de 1ϕ , deoarece rigiditatea mărită a elementelor duce la erori cinematice reduse și un comportament cinematic și dinamic mai bun. Reducerea diametrului nefiind o soluție viabilă în vederea obținerii unei soluții mai suple care ar putea lucra la viteze și accelerații mai mari decât soluția existentă.

- În urma analizei cu luarea în considerare a jocurilor din cuplele sferice reiese că:
 - Jocurile din cuplele sferice (superioare și inferioare) influențează comportamentul cinematic și dinamic al robotului paralel Delta;
 - Din punct de vedere cinematic, jocurile din cuplele sferice superioare au efectul cel mai mare, cele din cuplele sferice inferioare conducând la efecte neglijabile;
 - Erorile cinematice cresc odată cu creșterea valorilor jocului din cuplele sferice, dar nu proporțional cu acestea;
 - Din punct de vedere dinamic, efectul jocurilor din cuplele sferice conduce la erori ale momentelor relativ reduse;
 - Efectul cel mai mare asupra comportamentului dinamic al robotului se datorează jocurilor din cuplele superioare;
 - Cel mai dezavantajos caz este cel al jocurilor de 0,6 mm în cuplele sferice.
- Din analiza concomitentă a efectelor asupra comportamentului cinematic al elasticităților elementelor și a jocurilor din cuple reiese că :
 - În cazul celui mai mic diametru, de $0,4\phi$, erorile deplasărilor pe traiectorie sunt cele date de jocurile din cuple, cele ale vitezelor se dublează față de cazul în care doar jocurile sunt luate în considerare, iar cele ale accelerațiilor cresc semnificativ, cu precădere la începutul traiectoriei, în primele 0,04 s (cu valori foarte mari pentru cazul în care jocuri de 0,6 mm sunt luate în considerare);
 - În cazul diametrului de $0,8\phi$, erorile deplasărilor pe traiectorie sunt de asemenea cele date de jocurile din cuple, cele ale vitezelor cresc față de cazul în care doar jocurile sunt luate în considerare și au oscilații la început de traiectorie, iar cele ale accelerațiilor cresc semnificativ, mai ales la începutul traiectoriei;
 - În cazul diametrului de 1ϕ , erorile deplasărilor pe traiectorie cele date de jocurile din cuple, cele ale vitezelor cresc față de cazul în care doar jocurile sunt luate în considerare și au oscilații la început de traiectorie, iar cele ale accelerațiilor cresc, mai ales la începutul traiectoriei.

- Din analiza simultană a efectelor asupra comportamentului dinamic a elasticităților elementelor și a jocurilor din cuple reiese că :

- În cazul diametrului de $0,4\phi$, erorile momentelor motoare cresc de până la 50 de ori față de cazul în care doar elasticitățile sunt luate în considerare și conduc la valori mari mai ales la începutul traiectoriei;

- În cazul diametrului de $0,8\phi$, erorile momentelor motoare cresc de până la 7-10 de ori față de cazul în care doar elasticitățile sunt luate în considerare și conduc la valori mari mai ales la începutul traiectoriei;

- În cazul diametrului de 1ϕ , erorile momentelor motoare conduc la valori mari la începutul traiectoriei, după care valorile maxime sunt un pic mai mari față de cazul în care doar elasticitățile sunt luate în considerare.

În concluzie, din analizele efectuate reiese că cel mai bun comportament cinematic și dinamic este pentru cazul în care se iau în considerare bare cu diametre de 10 mm, deoarece conduce la erori mai mici pe traiectorie și erori ale momentelor motoare cu abateri mai mici la început de traiectorie.

În ceea ce privește jocurile din cuplele sferice, cazul cu 0,6 mm este de asemenea nedorit, deoarece conduce la abateri foarte mari la început de traiectorie. Dintre celelalte două, cazul cel mai favorabil este cel al jocurilor de 0,2 mm, deoarece conduce la erori mai mici.

În final, varianta optimizată din punct de vedere geometric a robotului paralel Delta include bare de diametre de 10 mm (1ϕ), iar jocurile permise din cuplele sferice pasive să nu depășească 0,4 mm (informații utile pentru modelul de comandă și control).

B2. Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

Activitatea mea profesională din ultimii 23 ani s-a desfășurat în cadrul **Departamentului de Design de Produs, Mecatronică și Mediu** din Universitatea Transilvania din Brașov, **Facultatea de Design de Produs și Mediu**.

În anul 2002 am ocupat, prin concurs, un post de preparator în domeniul robotică, participând în această perioadă la diverse activități didactice, științifice, de cercetare și de colaborare cu alte universități din țară și străinătate.

Ca absolventă a Universității Transilvania din Brașov, secția de inginerie „**Roboți Industriali**” și studii de masterat în **Robotică**, am avut ocazia de a învăța de la colegi specialiști în domeniu și de a desfășura activități la discipline de specialitate și de domeniu, având astfel posibilitatea de a mă dezvolta din punct de vedere profesional.

În anul 2014 am ocupat prin concurs postul de șef lucrări în cadrul aceleiași facultăți, iar în anul 2023 am ocupat prin concurs postul de conferențiar, continuând astfel activitățile didactice, științifice și de cercetare.

Această propunere de dezvoltare a carierei universitare este structurată în două părți principale:

- I. Activitatea didactică și de cercetare desfășurată până în prezent;
- II. Dezvoltarea carierei mele universitare viitoare.

I. Activitatea didactică și de cercetare desfășurată până în prezent

În cei peste 20 ani de activitate universitară (din care 4 ani am fost în concediu de creștere copii) am căutat să contribui cât mai mult la pregătirea studenților și la formarea competențelor profesionale ale acestora.

Ca absolventă a secției de Roboți Industriali și cu o teză în domeniul roboticii susținută în anul **2011**, am avut activități la materii de specialitate, precum:

- Mecanisme;

- Organe de mașini;
- Comanda și Controlul Roboților Industriali;
- Senzori și Traductoare pentru Roboți Industriali;
- Programarea Roboților Industriali;
- Cinematica și Dinamica Roboților Industriali;
- Bazele Roboticii;
- Sisteme Flexibile de Fabricație.

De asemenea, am avut ore de activități didactice și la alte materii precum:

- Modelarea cu Elemente Finite;
- Bazele Utilizării Calculatoarelor;
- Designul Produselor Mecatronice;
- Produse Mecatronice;
- Sisteme Mecatronice;
- Metode Numerice.

Diversitatea cursurilor ținute mi-a permis o dezvoltare și o pregătire continuă.

Orele de proiect, laborator sau seminar sunt permanent actualizate, interactive și permit studenților să intervină oricând cu întrebări sau comentarii prin care se pot dezvolta o serie de aspecte de interes practic pentru ei. Acestea sunt adaptate nevoilor studenților și sunt orientate cât mai mult pe aplicații realizate pe calculator. Astfel, feedback-ul obținut de la studenți a fost unul pozitiv.

Dintre metodele utilizate în predare și evaluarea studenților se pot enumera:

- Metode de predare-invățare:
 - activitate pe bază de expunere;
 - conversație, lucru individual și în grup;
 - activitate pe bază de machete.
- Metode de evaluare a studenților la activitatea de laborator, seminar și proiect:
 - testarea atenției prin întrebări din ce li s-a predat anterior;
 - implicarea studenților pentru o mai bună înțelegere și captare a atenției, prin scoaterea acestora la tablă;

- corectitudinea rezolvărilor și înțelegerea a ceea ce s-a predat se evaluează prin prezentarea și susținerea unor proiecte, referate sau prin teste care să dovedească dobândirea cunoștințelor predate;

- studenții activi la ore sunt stimulați prin bonificații la nota finală.

Printre implicările în cadrul departamentului și al facultății se pot enumera:

- implicare activă în desfășurarea procesului de admitere al Facultății de Design de Produs și Mediu;

- secretar la 2 comisii de licență și master (ISER și DPDM) ;
- tutore la anul I secția ISER (Ingineria Sistemelor de Energii Regenerabile) ;
- membru în BOARD-ul secției de ISER;
- responsabil cu Protecția Muncii pe facultate;
- responsabil cu practica la anul II secția Design Industrial.

În ceea ce privește activitatea de cercetare, am fost membru în 12 proiecte de cercetare (dintre care unul ca director de proiect):

1) Contract nr. 40533/2003, tema 1/989

Denumirea: Studiul, simularea și optimizarea cuplajelor cu bile de tip Weiss și Rzeppa, utilizate în transmisii mecanice.

Director: Dudiță, F.

Beneficiar: Ministerul Educației, Cercetării și Tineretului

Faza I/2003: Studiul, simularea și optimizarea cuplajelor cu bile de tip Weiss și Rzeppa, utilizate în transmisii mecanice

Valoare: 67.000.000 lei

Autori: Dudiță, F., Diaconescu, D., Munteanu, O., Bercan, N., Jaliu, C., Neagoe, M., Săulescu, R., Lateș, M., Pascale, L., Crețescu, N., Borca, A., Braun, M., Mățăuanu, M., Anghel, E.

2) Contract CNCSIS tip A nr. 40533/2003, tema 5/970

Denumirea: Cercetări teoretice și experimentale privind optimizarea modelelor teoretice ale roboților prin calibrare.

Director: Neagoe, M.

Beneficiar: Ministerul Educației, Cercetării și Tineretului

Faza I/2003: Studii privind optimizarea modelelor de precizie utilizabile în calibrarea roboților.

Valoare: 67.000.000 lei

3) Contract CNC SIS tip A nr. 33369/2004, tema 21/970

Faza II/2004: Algoritmi, programe și testări numerice și experimentale privind calibrarea roboților cu structuri de tip serie.

Valoare: 85.000.000 lei

4) Contract CNC SIS tip A nr. 27684 /2005, tema 10/970

Faza III/2005 Algoritmi, programe și testări numerice și experimentale privind calibrarea roboților cu structuri de tip paralel.

Valoare: 119.000.000 lei

Director: Neagoe, M.

Autori: Neagoe, M., Dudiță, F., Gogu, Gr., Diaconescu, D., Munteanu, O., Starețu, I., Telea, D., Bercan, N., Jaliu, C., Pozna, C., Eftimie, E., Săulescu, R., Pascale, L., Crețescu, N., Borca, A., Manciușea, M., Mățăuanu, M., Jane la Tore, Z., Stoica, B., Mihai, C., Maștei, C.

5) Contract nr. 33369/2004, tema 5/1330

Denumirea: Studiul și optimizarea dinamică a variatoarelor planetare de înaltă putere prin conversia sistemului mecanic în sistem mecatronic.

Director: Diaconescu, D.

Beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării.

Faza I/2004 Studii și simulări dinamice ale transmisiilor planetare în vederea transformării acestora în sisteme mecatronice

Valoare: 112.000.000 lei

Autori: Diaconescu, D., Dudiță, F., Bercan, N., Telea, D., Munteanu, O., Jaliu, C., Neagoe, M., Pozna, C., Eftimie, E., Pascale, L., Săulescu, R., Crețescu, N., Borca, A., Mățăuanu, M., Maștei, C., Mihai, C.

6) Contract nr. 27684/2005, tema 7/1330

Faza II/2005: Studii și simulări privind optimizarea dinamică a transmisiilor planetare abordate ca sisteme mecatronice.

Valoare: 152.000.000 lei

Autori: Diaconescu, D., Bercan, N., Telea, D., Munteanu, O., Jaliu, C., Neagoe, M., Pozna, C., Eftimie, E., Pascale, L., Săulescu, R., Lateș M, Crețescu, N., Borca, A., Stud: Gall, R.

7) Contract nr. 27684/2005, tema 6/1060

Denumirea: Modele, programe și simulări pentru optimizarea dinamică a transmisiilor mecanice cu flux energetic ramificat, prin eliminarea defectelor structurale.

Beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării.

Director: Jaliu, C.

Faza I/2005: Modele și algoritmi pentru optimizarea dinamică a transmisiilor mecanice cu flux energetic ramificat.

Valoare: 130.000.000 lei

Autori: Diaconescu, D., Jaliu, C., Neagoe, M., Eftimie, E., Ciobanu, D., Săulescu, R., Crețescu, N., Stud: Gall, R., Stud: Ochiș, D.

8) Contract nr. TD 138/2006, tema 6/1060

Denumirea: Modelarea robotilor paraleli cu miscari decuplate.

Beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării.

Director: Crețescu, N.,

Valoare: 31.000.000 lei

9) Proiect CNCSIS tip A: Studii si simulari privind conceperea de noi variante de reductoare planetare cu raport cinematic si eficienta energetico-economica ridicate, cu utilizare in sisteme de energii regenerabile.

Beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării.

Director: Diaconescu, D.

Faza I/2007: Analiza și sinteza de noi concepte de reductoare cu structura simplă, înaltă eficiență energetică și rapoarte cinematice mari

Contract nr. 4GR28.05.2007, tema 1/923

Valoare: 65.500 ron

Echipa de cercetare: Dudita Florea, Munteanu Olimpiu, Jaliu Codruța, Neagoe Mircea, Saulescu Radu Gabriel, Pascale Lucia, Cretescu Nadia Ramona, Borca Alina, Matauanu Mihaela, Burduhos Bogdan, Dinicu Valentina, Vidrean Mihai, Ionita Daniela, Gall Robert.

Faza II/2008: Analiza și sinteza de noi concepte de reductoare cu structura simplă, înaltă eficiență energetică și rapoarte cinematice mari

Contract nr. 6GR/2008, tema 14/923

Valoare: 82.500 ron

Echipa de cercetare: Dudita Florea, Munteanu Olimpiu, Jaliu Codruța, Neagoe Mircea, Huidan Livia, Saulescu Radu Gabriel, Pascale Lucia, Cretescu Nadia Ramona, Borca Alina, Burduhos Bogdan, Dinicu Valentina, Vidrean Mihai, Ionita Daniela, Gall Robert, Totu Vlad.

10)Proiectul nr. 3280/nr. 72197 din 1.10.2008 (2008-2011), cu titlul "Sisteme mecatronice complexe pentru aplicatii in medicina - SMART", încheiat în cadrul Programului 4 – Parteneriate în domenii prioritare, Directia de cercetare 7.3 Tehnologii și produse mecanice de înaltă precizie și sisteme mecatronice.

Contractor: Universitatea Tehnică din Cluj Napoca

Parteneri: Universitatea Transilvania din Brașov, Universitatea Politehnica din Timișoara

11)Contract de cercetare științifică nr. 160/06.01.2016 Îmbunătățirea performanțelor funcționale ale dulapurilor Multiflex.

Contractor: Universitatea Transilvania din Brașov

Beneficiar: Societatea Comercială ELDON SRL

Durata proiectului: 6 luni: 06.01 - 05.07.2016

Bugetul proiectului: 48.144 lei.

Director de proiect: Prof.univ.dr. Mircea NEAGOE

12)Proiect PN-III-P2-2.1-BG-2016-0349, Creșterea competitivității SC ELDON SRL prin optimizarea tehnologiei de fabricație a dulapurilor industriale de podea (EldonOptimTeh).

Contractor: Universitatea Transilvania din Brașov

Beneficiar: UEFISCDI/Societatea Comercială ELDON SRL

Durata proiectului: 2 ani: 01.10.2016 - 30.09.2018

Bugetul proiectului: 460.000 lei.

Director de proiect: Prof.univ.dr. Mircea NEAGOE

Pe perioada desfășurării activității în cadrul departamentului Design de Prods, Mecatronică și Mediu, în ultimii ani, am participat la publicarea unor rezultate ale cercetării, astfel:

- articole științifice: 12 indexate WOS ca prim autor sau autor corespondent (7), 4 lucrări indexate WOS în calitate de coautor (5), 5 lucrări indexate BDI ca prim autor sau autor corespondent, 7 lucrări indexate BDI - coautor;
- prim autor la 2 cărți și co-autor la 2 cărți și 4 articole sub forma de capitole ale unor cărți publicate în edituri din străinătate.

II. Dezvoltarea carierei mele universitare viitoare

Dezvoltarea carierei mele universitare viitoare se va face pe două direcții principale:

- Activitatea didactică (educațională);
- Activitatea de cercetare.

Pentru a profita de avantajele ambelor direcții și pentru a le putea îmbunătăți în mod continuu, aceste direcții nu sunt independente, ci sunt corelate.

II.1 Dezvoltarea activității educaționale

Dezvoltarea activității educaționale se bazează pe continua îmbunătățire a metodologiei de predare, prin sprijinirea și implicarea studenților în procesul de învățare și cercetare.

Pentru a crește competențele didactice îmi propun următoarele:

- Să mă implic activ, în toate activitățile didactice și științifice relevante la nivel de departament, facultate și universitate;
- Să implic activ studenții în desfășurarea cursurilor și aplicațiilor utilizând metode didactice centrate pe învățarea prin descoperire, învățarea pe echipe și învățarea în grup;
- Să continui actualizarea cursurilor predate. În acest mod studenții vor avea acces mai ușor la o informație actualizată și în conformitate cu schimbările internaționale și naționale din domeniu;

- Să sprijin și să încurajez studenții să participe la activități de cercetare, conferințe și simpozioane.

II.2 Dezvoltarea activității de cercetare

Dezvoltarea activității de cercetare se axează, ca și până acum, pe participarea la evenimente de specialitate internaționale și naționale, prin publicarea și diseminarea rezultatelor de cercetare și prin elaborarea și dezvoltarea a noi metode și rezultate în domeniu în proiecte de cercetare.

Mai concret, pentru a crește relevanța și impactul lucrărilor mele științifice îmi propun următoarele:

- Publicarea unui minim de două (2) articole pe an în reviste științifice indexate ISI în domeniul ingineriei mecanice, în special în reviste ce au ca factor de impact de minim 0,5;
- Publicarea unui minim de două (2) articole pe an, indexate în alte baze de date, dar recunoscute de CNATDCU;
- Participarea la conferințe, cu precădere de nivel internațional, desfășurate atât în țară, cât și în străinătate (minim 1 pe an). Participarea la conferințe asigură, pe lângă diseminarea rezultatelor, posibilitatea de a face schimb de experiență și informație cu alte instituții din domeniu, lucruri ce pot duce nu numai la dezvoltarea mea ca cercetător, dar și la creșterea prestigiului departamentului (respectiv al facultății, și al universității) în domeniu;
- Publicarea unor cărți de specialitate, cu precădere în edituri din străinătate sau în edituri naționale recunoscute CNCSIS și CNATDCU;
- Continuarea direcțiilor de cercetare actuale, dar și dezvoltarea unor direcții noi.

II.3 Corelarea activității de cercetare cu cea educațională

Rezultatele cercetărilor viitoare se vor regăsi în cărțile și articolele pe care le voi publica, precum și în cadrul proiectelor de cercetare în care mă voi implica.

De asemenea, pe baza rezultatelor obținute din cercetările efectuate, mă voi implica activ în dezvoltarea de noi cursuri și aplicații orientate către tendințele actuale din domeniu.

III. Cadrul de dezvoltare a carierei

Cadrul prin care îmi propun construirea carierei se bazează pe un set de valori: feedback, transparență, deschidere la nou, comunicare, lucru în echipă.

Mă bazez pe susținerea acestor valori din partea colectivului Departamentului de Design de Prods, Mecatronică și Mediu și pe promovarea lor. Consider că dezvoltarea domeniului de inginerie mecanică, a domeniilor conexe, și a carierei mele sunt dependente de respectarea și susținerea acestor valori.

Planul meu de dezvoltare a carierei profesionale este corelat cu planul de dezvoltare al Facultății de Design de Prods și Mediu și al Universității Transilvania din Brașov și îmi propun să realizez cât mai multe din imperativele didactice și științifice necesare care sunt în responsabilitatea mea, ca și cadru didactic, cercetător, coleg al acestei facultăți.

Îmi doresc să construiesc o carieră academică și o reputație profesională excelente, care să asigure succesul și o vizibilitate crescută a Departamentului de Design de Prods, Mecatronică și Mediu.

În acest sens, mi-am propus ca în următorii ani să continui cercetările actuale și să identific noi oportunități de dezvoltare (precum domeniul imprimării 3D), astfel încât să se contureze noi proiecte care să conducă la elaborarea de lucrări științifice și brevete.

Mi-am propus de asemenea, atragerea de viitori studenți, masteranzi și doctoranzi, pentru o implicare activă în cadrul Departamentului Design de Prods, Mecatronică și Mediu din care fac parte.

Îmi doresc să atrag doctoranzi și să continui să implic studenții în crearea de sisteme mecanice inovative, ca de exemplu sisteme de reciclare a plasticului din PET-uri, crearea de filament 3D și utilizarea lui în imprimarea 3D (un astfel de proiect a și câștigat anul acesta premii la Sesiunea de Comunicări Științifice Studentești – premiul I și AFCO- Absolvenți în Fața Companiilor anul trecut). De asemenea îmi doresc implementarea studiilor efectuate în dezvoltarea unui robot paralel de tip Delta optimizat din punct de vedere dimensional utilizat la o imprimantă 3D, sistem utilizabil în industrie, care să fie fiabil și care să conducă la bune performanțe ale comportamentului robotului.

În viitor îmi doresc să mă implic în atragerea de proiecte care să conducă, și prin implicarea studenților și doctoranzilor, la rezultate remarcabile și la articole științifice relevante în domeniul vizat.

Din punct de vedere didactic, mi-am propus ca în următorii 2 ani să scriu un curs (partea a II-a) pe domeniul produselor mecatronice, o carte de aplicații care să vină în sprijinul studenților la laborator/proiect, precum și dezvoltare de standuri/machete utile în activitatea didactică. De asemenea, mi-am propus să continui coordonarea lucrărilor de diplomă/disertație, tutoratul și coordonarea practicii la anul II secția Design Industrial, precum și implicarea studenților în diverse acțiuni cum ar fi: sesiunea de comunicări științifice studentești, olimpiade naționale (la mecanisme), AFCO (absolvenți în fața companiilor).

Instrumentele utilizate în îndeplinirea planului de dezvoltare vor fi atât menținerea și creșterea standardelor de excelență academică și profesională, cât și colaborarea nemijlocită cu colegii – cadre didactice și studenți.

B3. Bibliografie

1. Originea cuvântului robot, <https://ro.wikipedia.org/wiki/R.U.R>. (accesat în iunie 2025).
2. 10 aplicații și utilizări ale roboților industriali, <https://ttonline.ro/articole/10-aplicatii-si-utilizari-ale-robotilor-industriali> (accesat în iunie 2025).
3. Merlet, J.-P., Parallel robots, Kluwer Academic Publisher, 2000.
4. Chapter 1 Introduction: Overview of parallel manipulators and literature review, <https://repository.up.ac.za/server/api/core/bitstreams/23efa1eb-f4cd-4838-b92d-9f2778af6f0f/content> (accesat în iunie 2025).
5. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators - Wiley, <https://www.wiley.com/en-us/Robot+Analysis%3A+The+Mechanics+of+Serial+and+Parallel+Manipulators-p-9780471325932> (accesat în iunie 2025).
6. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators - Wiley, <https://www.wiley.com/en-us/Robot+Analysis%3A+The+Mechanics+of+Serial+and+Parallel+Manipulators-p-9780471325932> (accesat în iunie 2025).
7. Istoria roboților paraleli, <https://studii.crist.ro/wp-content/uploads/2016/the-history-of-the-parallel-robots-29.pdf> (accesat în iunie 2025).
8. Petrescu, F. I., (2011), Mechanical Systems, Serial And Parallel (Romanian Edition). 10.13140/RG.2.1.3697.4800.
9. Stewart D., A platform with 6 degrees of freedom, Proc. Inst. Mech. Eng., 1965.
10. Stewart Platform: 6-DoF Hexapod Positioner System - Acrome Robotics, <https://acrome.net/product/stewart-platform> (accesat în iunie 2025).
11. Stewart platform - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform (accesat în iunie 2025).
12. Studies on Stewart Platform- a review, https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2023-01/07_Lupulescu_Alina_Elena_Studies%20on%20stewart%20platform%20%E2%80%93%20a%20review.pdf (accesat în iunie 2024).

13. The Use of the Stewart Platform (aka Hexapod) in Real Life and Industry - Acrome Robotics, <https://acrome.net/post/the-use-of-the-stewart-platform-in-real-life> (accesat în iunie 2025).
14. SPRK: A Low-Cost Stewart Platform For Motion Study In Surgical Robotics - Ken Goldberg, https://goldberg.berkeley.edu/pubs/2018_ISMR_stewart_design.pdf (accesat în iunie 2025).
15. You, Ki & Lee, Min Cheol & Son, Kwon & Yoo, Wan-Suk. (2004). Sliding mode controller with sliding perturbation observer based on gain optimization using genetic algorithm. Journal of Mechanical Science and Technology - J MECH SCI TECHNOL. 18. 1958- 1963 vol.3. 10.1007/BF02983647.
16. Design and Control of Delta Robot (mini review) - Arab Journals Platform, <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/cgi/viewcontent.cgi?article=1061&context=fej> (accesat în iunie 2025).
17. Delta Parallel Robot — the Story of Success It is in the early 80's when Reymond Clavel (professor at EPFL - École Polytechni, <http://robby.caltech.edu/~jwb/courses/ME115/handouts/DeltaRobotHistory.pdf> (accesat în iunie 2025).
18. Cum optimizează și eficientizează roboții delta procesele de producție a produselor electronice, <https://www.digikey.ro/ro/articles/how-delta-robotics-optimize-and-streamline-electronics-manufacturing-processes> (accesat în iunie 2024).
19. Robotul paralel KR Delta, <https://www.kuka.com/ro-ro/produse-servicii/robotics-systems/industrial-robots/robot-kr-delta> (accesat în iunie 2024).
20. Robotul paralel KR Delta, <https://www.kuka.com/ro-ro/produse-servicii/robotics-systems/industrial-robots/robot-kr-delta> (accesat în iunie 2024).
21. Robotul paralel KR Delta, <https://www.kuka.com/ro-ro/produse-servicii/robotics-systems/industrial-robots/robot-kr-delta-hm> (accesat în iunie 2024).
22. Aksoy, Saadettin & Ozan, Emrah. (2020). Robots and Their Applications. 07. 2001-2009.

23. "Hoosier Daddy – The Largest Delta 3D Printer in the World". *3D Printer World. Punchbowl Media*. 23 July 2014. Archived from the original on 26 October 2014. Retrieved 28 September 2014.
24. **Crețescu, Nadia** & Neagoe, Mircea. (2015). Rigid versus Flexible Link Dynamic Analysis of a 3DOF Delta Type Parallel Manipulator. *Applied Mechanics and Materials*. 762. 101-106. 10.4028/www.scientific.net/AMM.762.101.
25. **Crețescu, N.**, Neagoe, M., Saulescu. R. Dynamic Analysis of a Delta Parallel Robot with Flexible Links and Joint Clearances. *Applied Sciences*. 2023; 13(11):6693. <https://doi.org/10.3390/app13116693>. FI: 2.838, SRI: 0.885, ISSN: 2076-3417.
26. Caccavale, Fabrizio & Siciliano, Bruno & Luigi, Villani. (2003). The Tricept robot: Dynamics and impedance control. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*. 8. 263 - 268. 10.1109/TMECH.2003.812839.
27. Siciliano, Bruno. (1999). The Tricept robot: Inverse kinematics, manipulability analysis and closed-loop direct kinematics algorithm. *Robotica*. 17. 437-445. 10.1017/S0263574799001678.
28. THE DESIGN OF PARALLEL KINEMATIC MACHINE TOOLS ... - arXiv, <https://arxiv.org/pdf/0705.1038> (accesat în iunie 2025).
29. Robot paralel Tricept, <https://loxin2002.com/products/pkm-tricept/> (accesat în iunie 2025)
30. Paskhevich A., Wenger P. et Chablat D., *Kinematic and stiffness analysis of the Orthoglide, a PKM with simple, regular workspace and homogeneous performances*, IEEE International Conference On Robotics And Automation, Rome, Italie, Avril, 2007.
31. THE DESIGN OF PARALLEL KINEMATIC MACHINE TOOLS ... - arXiv, <https://arxiv.org/pdf/0705.1038> (accesat în iunie 2025).
32. Kinematic Analysis of a New Parallel Machine Tool: The ... - SciSpace, <https://scispace.com/pdf/kinematic-analysis-of-a-new-parallel-machine-tool-the-3j6au4weos.pdf> (accesat în iunie 2025).
33. Caro, Stéphane & Chablat, Damien & Lemoine, Philippe & Wenger, Philippe. (2015). Kinematic Analysis and Trajectory Planning of the Orthoglide 5-axis.

34. Dudiță, F., Gogu, G., Diaconescu, D.V., Modelarea cinematica a robotilor industriali prin operatori omogeni. II. Analiza cinematica directa, in Buletinul celui de-al VI-lea Simpozion National de Roboti Industriali, Brasov, vol. I, p. 163-171, 1986.
35. Dudiță, F., Gogu, G., Diaconescu, D.V., Modelarea cinematica a robotilor industriali prin operatori omogeni. III. Analiza cinematica inversa, in Buletinul celui de-al VI-lea Simpozion National de Roboti Industriali, Brasov, vol. I, p. 172-179, 1986.
36. **Crețescu, N. R.**, Kinematic and Dynamic Simulation of a 3DOF Parallel Robot, BULLETIN OF THE TRANSILVANIA UNIVERSITY OF BRASOV ■ VOL. 8 (57) No.1 – 2015, SERIES I - ENGINEERING SCIENCES, ISSN 2065-2119 (Print), ISSN 2065-2127 (CD-ROM), pag 73-78.
37. **Crețescu, N.**, Neagoe, M., Saulescu, R. Kinematic and Dynamic Analysis of a 4DOF Parallel Robot with Flexible Links, Proceedings of The Joint International Conference of the XII International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions (MTM) and the XXIII International Conference on Robotics (Robotics '16), Aachen, 26-27 October 2016, New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics, Editors Burkhard Corves, Erwin-Christian Lovasz, Mathias Husing, Inocentiu Maniu, Corina Gruescu, Ed. Springer, pp. 473-481, ISBN 978-3-319-45449-8, Mechanisms and Machine Science 46, DOI 10.1007/978-3-319-45450-4_48 (ISI Proceedings).
38. **Crețescu, N.**, Neagoe, M. Dynamic Modelling of an Isoglide T3 Type Parallel Robot. In: Lovasz, EC., Maniu, I., Doroftei I., Ivanescu, M., Gruescu. C.M. (eds) New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics. Joint International Conference of the International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions and the International Conference on Robotics, MTM&Robotics 2020, 14-16 October 2020, Timișoara, Romania. Mechanisms and Machine Science, Vol. 88, 2021. Springer, Cham, p. 235-248, DOI: 10.1007/978-3-030-60076-1_21, ISBN 978-3-030-60075-4.
39. Neagoe. M., **Crețescu N.**, Saulescu, R. Dynamic modelling of a 3DOF medical parallel robot with one decoupled motion, Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vol. 837, p. 594-599, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.837.567.
40. **Rat, N.R.**, Neagoe, M., Diaconescu, D., Stan, S.D. Dynamic analysis of a Triglidle parallel robot, The 4th International Conference on Human System Interaction (HSI), Japan, 19-21 May 2011, pp. 245-249, ISBN 978-1-4244-9639-6, IEEE Catalog Number CFP1121D-CDR.
41. **Crețescu N.**, Neagoe. M., Saulescu, R. Kinematic modelling and VR simulation of a 3DOF medical parallel robot with one decoupled motion, Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vol. 837, p. 567-572, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.837.567.

42. Clavel R. Dispositif pour le déplacement et le positionnement d'un élément dans l'espace, Google Patents (WO1987003528A1), 1987.
43. Zhang, Jingjun & Shi, Lihong & Gao, Ruizhen & Lian, Chaoyang. (2009). The mathematical model and direct kinematics solution analysis of Delta parallel robot. 10.1109/ICCSIT.2009.5234909.
44. Sternheim, F.. "Computation of the direct and inverse geometric models of the Delta 4 parallel robot." Robotersysteme 3 (1987): 199-203.
45. Guglielmetti, Philippe & Longchamp, Roland. (1994). A Closed Form Inverse Dynamics Model of the Delta Parallel Robot. J. Robot. Syst.. 6. 10.1016/S1474-6670(17)47294-6.
46. Fabio Falezza, Federico Vesentini, Alessandro Di Flumeri, Luca Leopardi, Gianni Fiori, Gianfrancesco Mistrorigo, Riccardo Muradore. A novel inverse dynamic model for 3-DoF delta robots, Mechatronics, Volume 83, 2022, 102752, ISSN 0957-4158, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2022.102752>.
47. Angel, Luis & Bermúdez, J & Muñoz, O. (2013). Dynamic Optimization and Building of a Parallel Delta-Type Robot. 10.1109/ROBIO.2013.6739499.
48. Shi Baek Park, Han Sung Kim, Changyong Song and Kyunghwan Kim, "Dynamics modeling of a Delta-type parallel robot (ISR 2013)," *IEEE ISR 2013*, Seoul, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISR.2013.6695721.
49. Carp-Ciocardia, Daniela-Craită & Staicu, Stefan. (2005). Dynamics of Delta parallel robot with prismatic actuators. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM '05. 2005. 10.1109/ICMECH.2005.1529376.
50. Liu, Xin-Jun & Wang, Jinsong & oh, ku & Kim, Jongwon. (2004). A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 39. 209-225. 10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68.
51. Maya Mendez, Mauro & Castillo Castaneda, Eduardo & Lomelí, Alberto & González-Galván, Emilio & Cardenas, Antonio. (2013). Workspace and Payload-Capacity of a New Reconfigurable Delta Parallel Robot. International Journal of Advanced Robotic Systems. 10.1.10.5772/54670.
52. Ranjan Jha, Damien Chablat, Luc Baron, Fabrice Rouillier, Guillaume Moroz. Workspace, joint space and singularities of a family of delta-like robot. Mechanism and Machine

- Theory, Volume 127, 2018, Pages 73-95, ISSN 0094-114X, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.004>.
53. Dastjerdi, Amir & Sheikhi, Mohammad & Masouleh, Mehdi. (2020). A complete analytical solution for the dimensional synthesis of 3-DOF delta parallel robot for a prescribed workspace. Mechanism and Machine Theory 153, 103991, 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103991.
 54. Laribi, Med Amine & Romdhane, Lotfi & Zeghloul, S.. (2007). Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace. Mechanism and Machine Theory. 42. 859-870.10.1016/j.mechmachtheory.2006.06.012.
 55. Dsouza, Darren & Rafikh, Rayyan & Jaiswal, Ankur. (2022). Position error estimation and compensation of 3-DOF delta robot under the effect of link tolerances. Materials Today: Proceedings. 62. 10.1016/j.matpr.2022.02.492.
 56. P. GUGLIELMETTI, R. LONGCHAMP, TASK SPACE CONTROL OF THE DELTA PARALLEL ROBOT, Editor(s): A. DE CARLI, E. MASADA, In IFAC Postprint Volume, Motion Control for Intelligent Automation, Pergamon, 1992, Pages 337-342, ISBN 9780080420585, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042058-5.50057-5>.
 57. Minglei, Zhu & Briot, Sébastien & Chriette, Abdelhamid. (2022). Sensor-based design of a Delta parallel robot. Mechatronics. 87. 10.1016/j.mechatronics.2022.102893.
 58. Scott A. Bortoff, Haley Sanders, Deepika Giridhar, Impedance Control of a Delta Robot, IFAC-PapersOnLine, Volume 56, Issue 2, 2023, Pages 1023-1029, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1699>.
 59. Angel, Luis & Viola, Jairo. (2018). Fractional order PID for tracking control of a parallel robotic manipulator type delta. ISA Transactions. 79. 10.1016/j.isatra.2018.04.010.
 60. Abed Azad, Faraz & Ansari-Rad, Saeed & Arashpour, Associate Prof. Mehrdad. (2022). Back-stepping control of delta parallel robots with smart dynamic model selection for construction applications. Automation in Construction. 137. 10.1016/j.autcon.2022.104211.
 61. Ghafarian Tamizi, Mehran & Kashani, Ali & Abed Azad, Faraz & Kalhor, Ahmad & Masouleh, Mehdi. (2022). Experimental study on a novel simultaneous control and

- identification of a 3-DOF Delta robot using model reference adaptive control. *European Journal of Control*. 67. 100715. 10.1016/j.ejcon.2022.100715.
62. Ngo, Van-Tam & Liu, Yen-Chen. (2023). On Tracking Control of Robot Manipulator with Flexible Joints in Operational Space. *IFAC-PapersOnLine*. 56. 1307-1312. 10.1016/j.ifacol.2023.10.1770.
63. Ali Kermanian, Ali Kamali E., Afshin Taghvaeipour, Dynamic analysis of flexible parallel robots via enhanced co-rotational and rigid finite element formulations, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 139, 2019, Pages 144-173, ISSN 0094-114X, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.04.010>.
64. Wang, Xiaoyun & Mills, James. (2006). Dynamic modeling of a flexible-link planar parallel platform using a substructuring approach. *Mechanism and Machine Theory*. 41. 671-687. 10.1016/j.mechmachtheory.2005.09.009.
65. Kuo, Yong-Lin. (2016). Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links. *Computers & Mathematics with Applications*. 71. 10.1016/j.camwa.2016.03.018.
66. Rueda, J. & Angel, Luis. (2009). Structural analysis of a delta-type parallel industrial robot using flexible dynamic of ANSYS 11.0. 10.1109/IECON.2009.5415370.
67. Simionescu, Ion & Ciupitu, Liviu & Ionita, Luciana. (2015). Static balancing with elastic systems of DELTA parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*. 87. 10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.008.
68. Carabin, Giovanni & Scalera, Lorenzo & Wongratanaphisan, Theeraphong & Vidoni, Renato. (2021). An energy-efficient approach for 3D printing with a Linear Delta Robot equipped with optimal springs. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 67. 102045. 10.1016/j.rcim.2020.102045.
69. Ohno, Masumi & Takeda, Yukio. (2021). Design of target trajectories for the detection of joint clearances in parallel robot based on the actuation torque measurement. *Mechanism and Machine Theory*. 155. 104081. 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104081.
70. Ding, Wei & Gu, Jinan & Tang, Shixi & Shang, Zhenyang & Duodu, Enock & Zheng, Changjun. (2016). Development of a calibrating algorithm for Delta Robot's visual

- positioning based on artificial neural network. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 127. 10.1016/j.ijleo.2016.06.126.
71. Vischer, Peter & Clavel, Reymond. (1998). Kinematic calibration of the parallel Delta robot. *Robotica*. 16. 207 - 218. 10.1017/S0263574798000538.
72. Shen, Huiping & Meng, Qingmei & Li, Ju & Deng, Jiaming & Wu, Guanglei. (2021). Kinematic sensitivity, parameter identification and calibration of a non-fully symmetric parallel Delta robot. *Mechanism and Machine Theory*. 161. 104311. 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104311.
73. Mingkun Wu, Jiangping Mei, Yanqin Zhao, Wentie Niu, Vibration reduction of delta robot based on trajectory planning, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 153, 2020, 104004, ISSN 0094-114X, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104004>.
74. SIPRO. Available online: <https://www.sipro.vr.it/en/delta-robot/delta-robot-SIAX-D3-1600.html> (accesat în 4 noiembrie 2024).
75. ENGINEERINGLIBRARY. Available online: <https://engineeringlibrary.org/reference/coefficient-of-friction> (accesat în 4 noiembrie 2024).