



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI  
Școala doctorală de Inginerie Industrială și Robotică

# TEZĂ DE DOCTORAT

## -rezumat-

*Creșterea performanțelor roboților mobili și a vehiculelor ghidate autonom ce deservește mediului industrial*

*Increasing the performance of mobile robots and autonomously guided vehicles serving the industrial environment*

Autor, Ing. Iosif-Adrian MAROȘAN

Conducător de doctorat, Prof. dr. ing. George CONSTANTIN

București, 2023

## CUPRINS

<b>CAP. 1. INTRODUCERE.....</b>	<b>5</b>
<b>CAP. 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL ROBOȚILOR MOBILI ȘI AL VEHICULELOR GHIDATE AUTONOM.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. EVOLUTIA ROBOȚILOR MOBILI AUTONOMI.....</b>	<b>6</b>
2.1.1. Analiza literaturii de ultimă generație .....	8
<b>2.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII .....</b>	<b>10</b>
<b>CAP. 3. MODELAREA CINEMATICĂ ȘI DINAMICĂ A PLATFORMEI MOBILE MODULARE .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. MODELAREA MATEMATICĂ A SISTEMULUI DE LOCOMOȚIE AL UNUI ROBOT MOBIL MODULAR .....</b>	<b>13</b>
3.1.1. Model cinematic pentru roboți mobili modulari cu tracțiune diferențială și roți clasice .....	13
3.1.2. Model cinematic pentru roboți mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți cu role dispuse la 90° .....	15
3.1.3. Model cinematic pentru roboți mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți mecanum cu role dispuse la 45° .....	17
<b>3.2. CONCLUZII .....</b>	<b>19</b>
<b>CAP. 4. DEZVOLTAREA UNEI PLATFORME MOBILE MODULARE UTILIZÂND TEHNICILE CAD-CAM-CAE.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1. MODELARE 3D A VARIANTELOR CONSTRUCTIVE .....</b>	<b>20</b>
4.1.1. Modulul principal.....	20
4.1.2. Modulul roată motoare.....	21
<b>CAP. 5. CERCETĂRI PRELIMINARE EFECTUATE PE UN ROBOT MOBIL OMNIDIRECȚIONAL CU ROȚI MECANUM.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1. ROBOTUL MOBIL.....</b>	<b>23</b>
<b>5.2. SOLUȚII CINEMATICE AVUTE ÎN VEDERE .....</b>	<b>24</b>
5.2.1. Cinematica mecanum cu patru roți.....	24
5.2.2. Cinematica de acționare diferențială .....	24
<b>5.3. SIMULAREA MODELULUI DINAMIC AL ROBOTULUI OMNIDIRECȚIONAL.....</b>	<b>25</b>
<b>5.4. COMPARAȚIE ÎNTRE VALORILE SIMULATE ȘI CELE EXPERIMENTALE ALE CURENȚILOR ABSORBIȚI DE MOTOARE.....</b>	<b>27</b>
<b>5.5. CONCLUZII .....</b>	<b>29</b>
<b>CAP. 6. CERCETĂRI DE MODELARE, SIMULARE ȘI EXPERIMENTALE EFECTUATE PE VARIANTE CONSTRUCTIVE DE ROBOȚI MOBILI.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1. STRUCTURA ȘI CARACTERISTICILE PLATFORMEI MOBILE MODULARE DEZVOLTATE.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2. MODELAREA DINAMICĂ A CONFIGURAȚIILOR ROBOTICE.....</b>	<b>36</b>
<b>6.3. REZULTATE.....</b>	<b>39</b>
6.3.1. Simularea modelelor dinamice pentru cele cinci configurații de roboți mobili.....	39

6.3.2.	Validarea experimentală a modelelor simulate .....	43
6.3.3.	Calculul energiei consumate .....	50
<b>6.4.</b>	<b>DISCUȚII .....</b>	<b>55</b>
<b>6.5.</b>	<b>CONCLUZII .....</b>	<b>57</b>
<b>CAP. 7. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.....</b>		<b>58</b>
<b>7.1.</b>	<b>CONCLUZII GENERALE .....</b>	<b>58</b>
<b>7.2.</b>	<b>CONTRIBUȚII ORIGINALE .....</b>	<b>60</b>
<b>7.3.</b>	<b>DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE .....</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>		<b>63</b>

## **GLOSAR DE TERMENI**

ADC – convertor analog-digital (Analog-to-digital converter);  
AGV – vehicule ghidate automat (Automated Guided Vehicles);  
AHP – proces analitic de ierarhizare (Analytic Hierarchy Process);  
CAD – proiectarea asistată de calculator (Computer aided design);  
CAE – analiză tehnică asistată de calculator (Computer-aided engineering);  
CAM – fabricare asistată de calculator (Computer-aided manufacturing);  
CAN – magistrală serială utilizată în industria de automobile (Controller Area Network));  
CCD – senzor cu celule sensibile la lumină (Charged Coupled Device);  
CG – centrul de greutate al vehiculului;  
CMOS – senzor cu material semiconductor din oxid de metal (Complementary metal–oxide–semiconductor);  
DBS – simulare blocuri digitale (Digital Block Simulation);  
DC – curent continuu;  
GPS – sistem de poziționare globală (Global Positioning System);  
I2C – magistrală pentru transmisie de date serială master-slave (The Inter-Integrated Circuit);  
IoT – internetul obiectelor (Internet of Things);  
KF – filtru Kalman;  
LAN – rețea locală (Local Area Network);  
LiDAR – sistem de măsurarea distanțelor cu lumină (Laser imaging, detection, and ranging);  
MCL – localizarea Monte Carlo (Monte Carlo localization);  
MPC – model predictiv de control (Model Predictive Control);  
OM – obiectiv major;  
OS – obiectiv secundar;  
PID – controler proporțional integral derivativ (Proportional–integral–derivative controller);  
PLA – polimerul acid polilactic (PolyLactic Acid);  
PLC – automat programabil (Programmable Logic Controller);  
PWM – modulare cu impulsuri (Pulse-width modulation);  
RGS – simulare corpuri rigide (Rigid Body Simulation);  
RMA – roboți mobili autonomi;  
ROS – sistem de operare pentru roboți (Robot Operating System);  
SC – spațiul de configurare;  
SFD – sistem de fabricație dedicat;  
SFF – sistem de fabricație flexibil;  
SFR – sistem de fabricație reconfigurabil;  
SLAM – sistemul de localizare și cartografierea simultană (Simultaneous Localization and Mapping);  
WLAN – rețea locală fără fir (Wireless Local Area Network).

## CAP. 1. INTRODUCERE

În zilele noastre, robotica este unul dintre domeniile de cercetare științifică cu cea mai rapidă expansiune. Datorită abilităților lor, roboții mobili pot înlocui factorul uman în multe domenii [1]. În general, roboții mobili sunt acei roboți care se pot deplasa dintr-un loc în altul pentru a realiza sarcini complexe și a ajunge la rezultatele dorite într-un timp mult mai scurt. De asemenea, realizează acțiuni repetitive sau periculoase înlocuiesc oamenii care desfășoară activități în interior sau în aer liber în multe domenii, cum ar fi: industrie, operațiuni militare, spitalicești, sport, agricultură ș.a. În funcție de destinație, pot avea diferite configurații, și diferite sisteme de locomoție, fiind dotați cu senzori multipli (infraroșu, ultrasonic, camere, GPS etc.) sau diferiți algoritmi de comandă și control, fiind supravegheați local sau de la distanță [2]. În lucrarea [3] sunt prezentați roboți mobili ce sunt controlați în timp real prin Internet folosind o pagină *web* protejată sau cu tehnologia *Internet of Things* (IoT). Toate aceste platforme se bazează pe un computer *Raspberry Pi* ce permite vizualizarea online a mediului de lucru prin intermediul unei camere *web* [4]. Platformele mobile robotice sunt utilizate tot mai des în industrie pentru transportul de materiale, semifabricate, subansambluri sau piese prelucrate între fazele fluxului tehnologic, pentru manipularea, încărcarea sau descărcarea produselor. Platformele mobile pot fi întâlnite în diferite domenii de activitate, cum ar fi: industria auto, industria de produse farmaceutice sau chimice, alimentară, în industria plasticului sau a hârtiei. De asemenea, platformele pot deservi centre de logistică, pot transporta diferite piese, în general pot executa orice operație de transport între două sau mai multe faze ale unui flux tehnologic[5]. Roboții mobili se pot deplasa autonom, adică fără asistență din partea operatorilor umani externi. Un robot mobil poate fi numit autonom atunci când are capacitatea de a determina acțiuni ce trebuie întreprinse pentru a îndeplini o sarcină, folosind un sistem de percepție care ajută la detectarea obstacolelor și un sistem de control pentru coordonarea tuturor subsistemelor care aparțin robotul [1].

Platformele mobile robotice sunt întâlnite adesea sub denumirea de vehicule ghidate automat sau *Automated Guided Vehicles* (AGV). Ele au dimensiuni de ordinul centimetrilor până la cel al zecilor de metri.

Utilizarea platformelor mobile robotice crește flexibilitatea și productivitatea sistemelor de fabricație în care operațiile de deservire, paletizare, ocupă un volum mare din activitate. Vehiculele ghidate automat ajută la reducerea costurilor și crește eficiența într-un sistem de producție. Platformele mobile pot să transporte obiecte, având în dotare diferite sisteme de remorcare sau transport, cum ar fi sistemele de tip container sau basculante pentru a muta materiale direct pe linia de producție sau sisteme de tip furcă pentru a ridica sau a coborî obiecte în zonele de depozitare.

## CAP. 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL ROBOȚILOR MOBILI ȘI AL VEHICULELOR GHIDATE AUTONOM

Platformele robotice mobile cunosc o dezvoltare majoră în ultima perioadă de timp, și în structura lor hardware întâlnim o varietate de sisteme mecatronice ce au în componența lor senzori, actuatori și microprocesoare de ultimă performanță. Domeniile de activitate unde întâlnim platforme robotice mobile sunt variate [6], astfel roboții mobili sunt întâlniți în diverse sectoare industriale, în educație și cercetare, în agricultură precum și în asistența socială, ajutând persoane cu dizabilități.

### 2.1. EVOLUTIA ROBOȚILOR MOBILI AUTONOMI

Roboții mobili autonomi (RMA) de ultimă generație dețin o serie de performanțe ce îi ajută la deplasarea în siguranță în medii aglomerate, pot interpreta comenzi vocale, pot recunoaște obiecte reale, planifică trasee sau navighează autonom. Proiectarea platformelor RMA folosește metodologii și tehnologii de control inteligent, bazate pe unități de calcul performante și arhitecturi hardware cu un grad ridicat de flexibilitate [7].

Domeniul de navigare și control al RMA a evoluat în timp, ajungând astăzi la un nivel înalt, atât din punct de vedere teoretic cât și practic. Au fost publicate un număr important de cărți și lucrări științifice pe plan internațional. **Tabelul 2.1** prezintă succint în ordine cronologică evoluția în domeniu prin prisma celor mai importante publicații [8].

**Tabelul 2.1. Cărți care tratează roboți mobili autonomi, navigare și control (1991–2022) [8].**

Autor	An publicare	Rezumat
A.M. Meystel [9]	1991	Controlul inteligent al mișcării. Evoluția roboților mobili autonomi (RMA). Mobilitate autonomă. Controlul cognitiv al RM.A Module inteligente (planificare, navigare).
J.C. Latombe [10]	1991	Spațiul de configurare (SC) al obiectului rigid. Obstacole în SC. drum metode de hartă. Compoziția celulei robotice. Metode de câmp potențial. Confruntarea cu incertitudinea. Obiecte mobile.
J.L. Leonard [11]	1992	Problema navigației. Model de senzor sonar bazat pe modele de localizare. Construirea simultană a hărții de localizare. Strategii de detecție dirijate.

J.L. Jones [12]	1995	TuteBot. Proiectare și prototipare. Senzori. Mecanica. Motoare. Programarea roboților. Roboți aplicații. Principii de proiectare a roboților. Probleme nerezolvate.
H.R. Everett [13]	1995	Considerații de proiectare. Senzori pentru odometrie. Doppler și navigația inerțială. Configurații tipice de mobilitate. Senzori tactili și de proximitate. Variația triangulației. Senzori de poziționare și localizare. Senzori ultrasonici și optici pentru sisteme de localizare.
J. Borenstein [14]	1996	Senzori pentru poziționarea robotului mobil. Senzori de control al direcției. Balize active (beacons). Senzori pentru poziționarea pe hartă. Sisteme de navigație active cu balize (beacons).
R.C. Arkin [15]	1998	Comportamentul robotului. Arhitecturi pe baza de comportament. Probleme de reprezentare. Comportament adaptativ. Comportament social.
J. Canny [16]	1998	Probleme de planificare a mișcării robotului. Constrângeri de mișcare. Teoria eliminării. Limite inferioare pentru planificarea mișcării. Mișcare planificare cu incertitudine.
X.Zhu [17]	2001	Roboți mobili în aer liber. Controlul mișcării. Mișcare de cooperare control și arhitectură. Controlul mișcării cinematice.
U.Nehmzow [18]	2003	Sisteme hardware pentru roboți. Învățare robot. Simulare. Modelarea mediului robotic. Analiza comportamentului robotului. Locomoție. Cinematica robotului mobil. Percepție. Localizare robot mobil. Planificare și navigare.
R. Siegwart [19]	2005	Locomoție. Cinematica robotului mobil. Percepție. Localizarea robotului mobil. Planificare și navigare.
F. Cuesta [20]	2005	Sisteme fuzzy. Analiza stabilității. Sisteme fuzzy Takagi-Sugeno. Control inteligent al roboților mobili cu fuzzy logic. Stabilitatea roboților mobili cu navigare fuzzy cu buclă de feedback. Sistem inteligent de parcare paralelă a mașinilor.
K. Berns [21]	2009	Istoric a vehiculelor terestre autonome. Cinematica robotului. Sisteme senzoriale. Problema localizării. Construirea hărții. Strategii de navigare.
G. Dudek [22]	2010	Probleme fundamentale. Sisteme hardware pentru roboți mobili. Senzori non-vizuali și algoritmi. Senzori vizuali și algoritmi. Reprezentarea și raționamentul despre spațiu. Controlul sistemului. Roboți în practică. Viitorul roboților mobili.
G. Cook [23]	2011	Controlul robotului mobil. Atitudinea robotului. Navigare roboți. Aplicarea filtrării Kalman. Teledetecție. Maparea obstacolului și aplicarea acesteia la navigarea robotului. Cinematică.

C.A. Berry [24]	2012	Introducere. Hardware. Control. Controlul feedback-ului. Reprezentare. Arhitecturi de control. Software. Navigare. Localizare. Mapare. Localizare și mapare simultană.
R. Tiwari [25]	2012	Planificarea traseului bazată pe grafice. Tehnici comune de planificare. Robotică evolutivă. Planificarea traseului comportamental. Metode hibride bazate pe grafice. Metode comportamentale hibride. Sisteme multi-robot.
A. Kelley [26]	2013	Introducere. Fundamente matematice. Metode numerice. Dinamică. Estimare optima. Control. Percepție. Localizare și mapare. Planificarea mișcării.
S.G. Tzafestas [27]	2014	Roboți mobili. Cinematica roboților mobili. Dinamica roboților mobili. Senzori pentru roboții mobili. Controlul robotului mobil. Metode adaptative și robuste. Metode Fuzzy și neuronale. Localizare și maparea robotului mobil. Studii experimentale. Roboți mobili la locul de muncă.
L. Jaulin [28]	2017	Modelare tridimensională. Liniarizarea feedback-ului. Control fără model. Îndrumare. Localizare instantanee. Identificare. Filtru Kalman.
N. Martins [29]	2022	Utilizarea tehnicilor de calcul software, cum ar fi logica fuzzy și rețelele neuronale artificiale. Analiza de stabilitate atât pentru controlerele cinematice, cât și pentru cele dinamice, bazate pe teoria stabilității lui Lyapunov.

### 2.1.1. Analiza literaturii de ultimă generație

Domeniul roboticii este unul foarte vast și într-o continua schimbare. Interesul cercetătorilor pentru acest domeniu este într-o continua creștere, la fel fiind și numărul de publicații ce apar în fiecare an. Acesta secțiune prezintă o analiză asupra unor referințe bibliografice, care prezintă stadiul actual în ceea ce privește domeniul roboticii mobile. Analiza este realizată pe baza a mai multor subiecte ce se vor regăsi în acest articol. În prima secțiune 1.1 sunt prezentate o selecție de lucrări ce prezintă aplicații în care sunt integrații roboți mobili și aspecte generale ale acestora. Următoarea secțiune 1.2 prezintă aspecte legate de senzorii utilizați în robotica mobile, prezentând în detaliu aspecte ale senzorului de curent hall. Secțiunea 1.3 este dedicată robotice modulare, în care se prezintă ultimele noutăți și cercetări în ceea ce privește modularitatea și re-configurabilitatea roboților mobili. Ce de-a patra secțiune 1.4 pune în evidență utilizarea Matlab Simulink în proiectarea și dezvoltarea roboților. Ultima secțiune 1.5 prezintă ultimele noutăți despre consumul energetic al roboților mobili, iar referințe selectate tratează subiecte despre eficiență energetică a roboților mobili în funcție de traseul parcurs sau sistemele de locomoție pe care ei le utilizează. Referințele selectate sunt prezentate în **Tabelul 2.2** grupate pe fiecare secțiune. Relevanța referințelor se cuantifică prin evaluarea căutărilor și a numărului de citări utilizând motoare de căutare specializate pentru referințe științifice cum sunt Google Scholar sau Web of Science [30].



**Tabelul 2.2 Referințe pe secțiuni**

Titlu [sursa]	Tip document	Număr referințe citate	Număr citări în toate bazele de date	An	Categorii
<b>Aspecte generale ale roboților mobili</b>					
Locomoție roboți mobili [31]	Recenzie	73	3	2022	Engineering, Mechanical
Roboți mobili cu roți [32]	Recenzie	118	2	2021	Disciplines, Multidisciplinary
Roboți mobili omnidirecționali [33]	Articol	354	21	2020	Engineering, Mechanical
Navigația roboților mobili [34]	Recenzie	208	220	2019	Engineering, Multidisciplinary
Recenzii roboți mobili [1]	Recenzie	188	120	2019	Robotics
<b>Senzori Hall</b>					
Senzori de curent Hall [35]	Articol	103	6	2022	Engineering, Applied
Efectul Hall indus [36]	Articol	34	3	2021	Engineering, Electrical
Senzori de curent [37]	Articol	21	15	2019	Engineering, Electrical
Monitorizare curent wireless [38]	Conf.	8	0	2019	Engineering, Electrical
MagFET- senzori de curent [39]	Articol	23	14	2013	Engineering, Electrical
<b>Roboți mobili modulari și reconfigurabili</b>					
Roboți mobili reconfigurabili [40]	Articol	23	8	2020	Artificial Intelligence; Robotics
Modularitate și ROS [41]	Conf.	31	1	2020	Engineering, Robotics
Platforme mobile modulare [42]	Conf.	16	3	2019	Automation & Control Systems
Roboți reconfigurabili [43]	Conf.	16	25	2010	Automation & Control Robotics
Proiectare iRobot [44]	Conf.	12	51	2010	Automation & Control Robotics
<b>Modelare cu Matlab Simulink</b>					
Roboți mobili Holonici [45]	Articol	40	4	2022	Multidisciplinary; Engineering
Controlul roboților cu roți [46]	Articol	66	5	2021	Automation & Control Systems
Traietorii roboți mobili [47]	Conf.	27	1	2021	Engineering, Industrial
Roboți autonomi cu 4 roți [48]	Articol	29	30	2019	Engineering, Electrical
Roboți mobili și Simscape [49]	Conf.	14	5	2019	Engineering, Multidisciplinary
<b>Consum energetic al roboților mobili</b>					
Tracțiune diferențială [50]	Articol	30	12	2020	Engineering, Electrical
Estimare consum roboți [51]	Articol	23	11	2020	Robotics
Modelare consum roboți [52]	Articol	30	27	2019	Energy & Fuels
Putere consumată roboți [53]	Articol	25	18	2019	Computer Science, Robotics
Consum energetic influențat de traiectorie [54]	Articol	21	17	2019	Robotics

Toate căutările au fost realizate în luna Februarie 2023

## 2.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII

În urma analizei bibliografice efectuate s-a identificat un număr mare de studii ce abordează subiecte legate de planificarea și navigarea roboților mobili autonomi. Principalele performanțe puse în evidență în majoritatea lucrărilor sunt: gradul de autonomie al robotului din punct de vedere al navigației într-un mediu necunoscut, posibilitatea de a ocoli obstacole și precizia de poziționare. Din punct de vedere al modularității și a posibilității de reconfigurare s-a constatat existența unui număr mai mic de studii asupra roboților mobili cu roți. Majoritatea acestor studii au fost realizate pe roboți mobili celulari de tip „șarpe”. Consumul energetic al roboților mobili este un alt aspect mai puțin tratat în literatura de specialitate. Majoritatea studiilor existente analizează consumul energetic din punct de vedere a strategiei de navigare a robotului pe o anumită traiectorie. Mai puțin tratată este influența sistemului de locomoție în consumul energetic total pentru parcurgerea unei traiectorii. Plecând de la aceste considerente ce reies din analiza stadiului actual al cercetării, obiectivele cercetării, ale căror rezultate au caracter de originalitate, sunt următoarele:

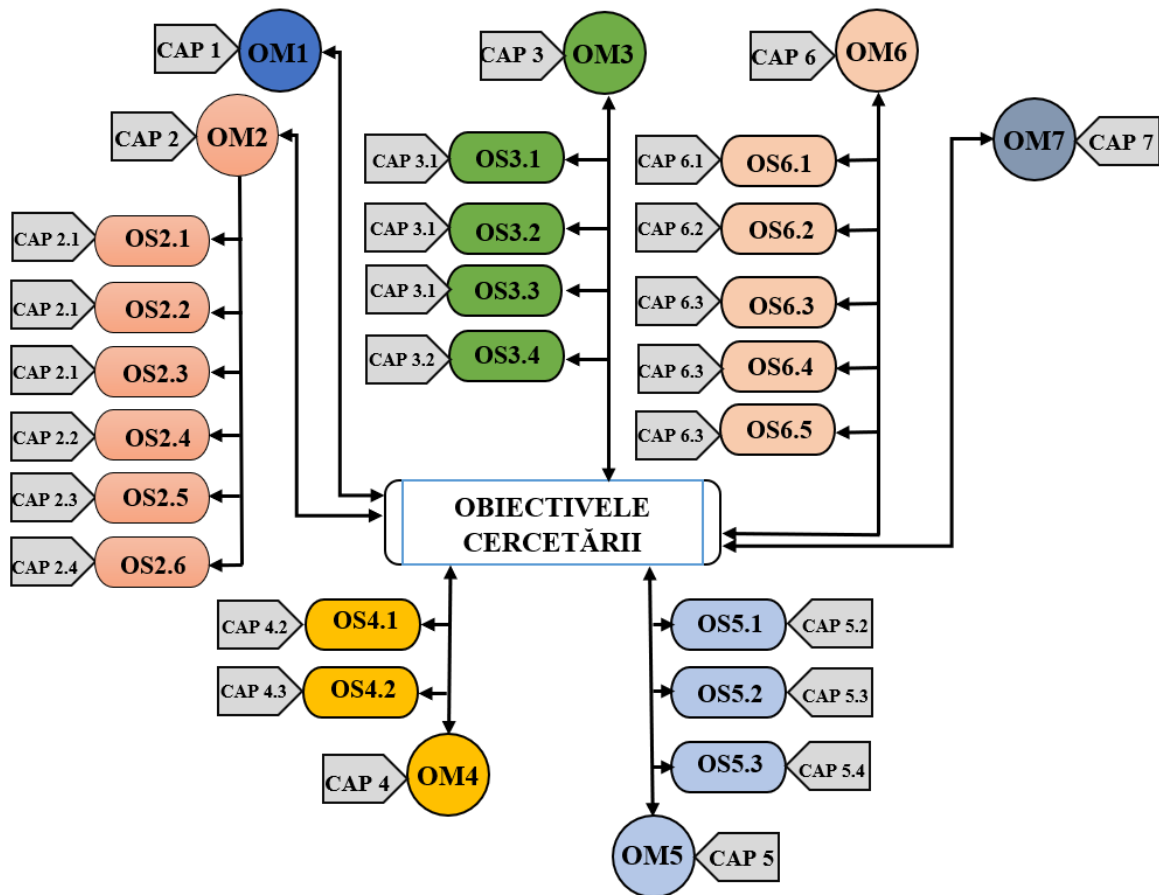
1. Analiza evoluției roboților mobili autonomi.
2. Studiu privind modularitatea și reconfigurarea roboților mobili.
3. Analiza roboților mobili cu roți din punctul de vedere al consumului energetic.
4. Studiu privind locomoția roboților mobili și a vehiculelor ghidate autonom din mediul industrial.
5. Studiu privind tipurile de senzori utilizați în construcția roboților mobili.
6. Analiza sistemelor de localizare a roboților mobili autonomi.
7. Modelarea cinematică a roboților mobili modulari cu tracțiune diferențială și roți clasice.
8. Modelarea cinematică a roboților mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți cu role dispuse la  $90^\circ$ .
9. Modelarea cinematică a roboților mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți mecanum cu role dispuse la  $45^\circ$ .
10. Metode de alegere și de verificare a motorului electric pentru acționarea platformei mobile modulare.
11. Modelare 3D și construcția platformei mobile modulare.
12. Dezvoltarea unui model funcțional pentru o platformă robotică mobilă pentru măsurarea curentului absorbit cu ajutorul unui senzor de curent Hall.
13. Modelarea cinematică omnidirecțională și diferențială.
14. Realizarea modelului dinamic al robotului utilizând Matlab Simulink.
15. Determinarea curenților absorbiți de motoarele roților, atât prin simulare, cât și prin măsurare experimentală.
16. Analiza structurii și a caracteristicilor platformei mobile modulare.
17. Modelarea dinamică a 5 configurații de roboți mobili utilizând Matlab Simulink.
18. Determinarea curenților prin motoarele roților prin simulare, pentru 5 configurații de roboți mobili.
19. Realizarea de teste experimentale în vederea validării modelelor simulate.
20. Calculul energiei consumate și compararea rezultatelor simulate cu cele măsurate pentru cele 5 configurații de roboți mobili.

**Tablelul 2.3** prezintă obiectivele principale și obiectivele secundare ale cercetării științifice, iar în se prezintă **Fig. 2.1** hartă conceptuală a acestor obiective cu precizarea secțiunilor unde acestea sunt realizate.

**Tablelul 2.3 Obiectivele majore și cele secundare ale tezei de doctorat**

OBIECTIVELE MAJORE ALE CERCETĂRII	OBIECTIVELE SECUNDARE ALE CERCETĂRII
<b>OM1.</b> Obiective ce fac referire la fundamentele domeniului de studiu și performanțele necesare ale roboților mobili	
<b>OM2.</b> Analiza literaturii de ultima generație ce face referire la tema de cercetare aleasă	<b>OS2.1</b> Analiza evoluției roboților mobili autonomi
	<b>OS2.2</b> Studiu privind modularitatea și reconfigurarea roboților mobili
	<b>OS2.3</b> Analiza roboților mobili cu roți din punctul de vedere al consumul energetic
	<b>OS2.4</b> Studiu privind locomoția roboților mobili și a vehiculelor ghidate autonom din mediul industrial
	<b>OS2.5</b> Studiu privind tipurile de senzori utilizați în construcția roboților mobili
	<b>OS2.6</b> Analiza sistemelor de localizare a roboților mobili autonomi
<b>OM3.</b> Contribuții teoretice privind modelarea cinematică și dinamică a unei platforme mobile modulare	<b>OS3.1</b> Modelarea cinematică a roboților mobili modulari cu tracțiune diferențială și roți clasice
	<b>OS3.2</b> Modelarea cinematică a roboților mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți cu role dispuse la 90 °
	<b>OS3.3</b> Modelarea cinematică a roboților mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți mecanum cu role dispuse la 45 °
	<b>OS3.4</b> Metode de alegere și de verificare a motorului electric pentru acționarea platformei mobile modulare
<b>OM4.</b> Contribuții teoretice privind dezvoltarea unei platforme mobile modulare utilizând tehnicile CAD-CAM-CAE	<b>OS4.1</b> Modelare 3D și construcția platformei mobile modulare
	<b>OS4.2</b> Dezvoltarea unui model funcțional pentru o platformă robotică mobilă pentru măsurarea curentul absorbit cu ajutorul unui senzor de curent Hall.
<b>OM5.</b> Cercetări preliminare efectuate pe o platformă mobilă omnidirecțională cu roți mecanum	<b>OS5.1</b> Modelarea cinematică omnidirecțională și diferențială
	<b>OS5.2</b> Realizarea modelului dinamic al robotului utilizând Matlab Simulink
	<b>OS5.3</b> Determinarea curenților absorbiți de motoarele roților, atât prin simulare, cât și prin măsurători experimentale
<b>OM6.</b> Contribuții originale privind simulări și cercetări experimentale efectuate pe variante constructive de roboți mobili	<b>OS6.1</b> Analiza structurii și a caracteristicilor platformei mobile modulare
	<b>OS6.2</b> Modelarea dinamică a 5 configurații de roboți mobili utilizând Matlab Simulink.
	<b>OS6.3</b> Determinarea curenților absorbiți de motoarele roților prin simulare pentru 5 configurații de roboți mobili

	<b>OS6.4</b> Realizarea de teste experimentale în vederea validării modelelor simulat
	<b>OS6.5</b> Calculul energiei consumate și compararea rezultatelor simulate cu cele măsurate pentru cele 5 configurații de roboți mobili
<b>OM6.</b> Discuții și concluzii generale	



**Fig. 2.1.** Hartă conceptuală cu obiective principale și secundare.

## **CAP. 3. MODELAREA CINEMATICĂ ȘI DINAMICĂ A PLATFORMEI MOBILE MODULARE**

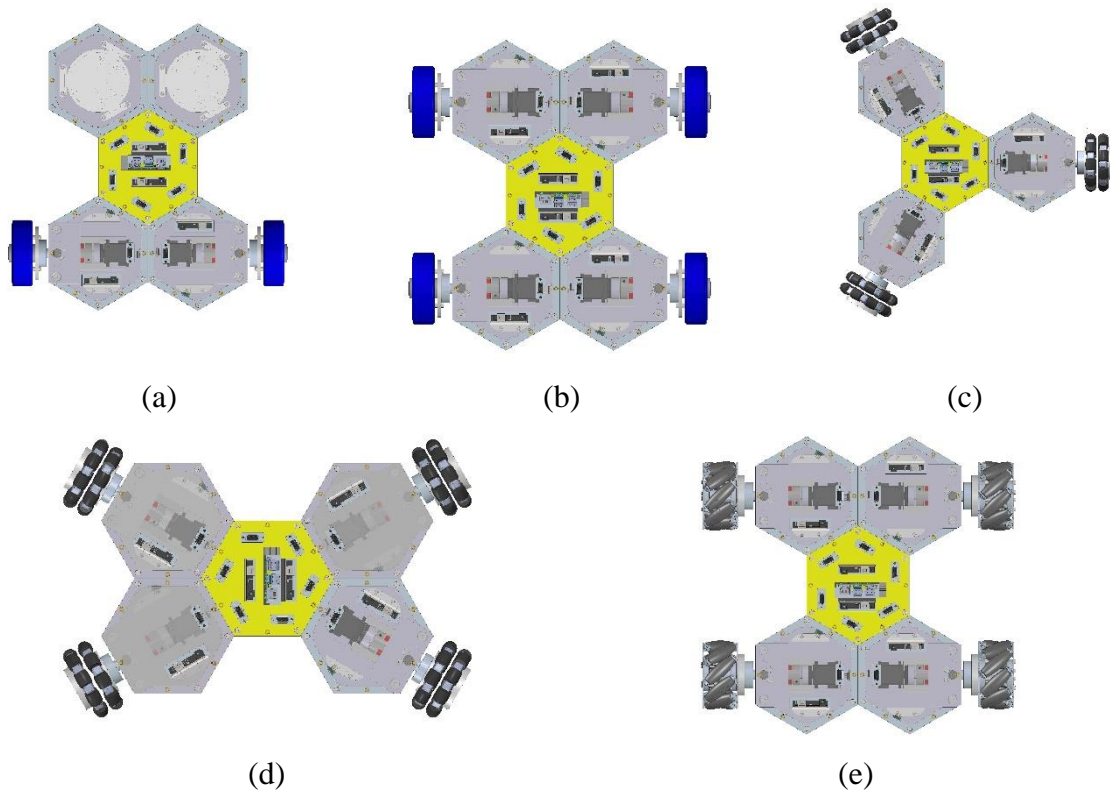
### **3.1. MODELAREA MATEMATICĂ A SISTEMULUI DE LOCOMOȚIE AL UNUI ROBOT MOBIL MODULAR**

Un sistem de locomoție eficient pentru un robot mobil destinat mediului industrial trebuie să faciliteze operarea acestuia în diferite medii, cum ar fi zonele de producție, sau zonele de logistică care sunt în continua dezvoltare și schimbare. În cele mai multe cazuri, un singur tip de sistem de locomoție nu este suficient pentru a face față situațiilor întâlnite, deoarece mediile pot prezenta obstacole complexe cum ar fi denivelări accentuate, șanțuri și obstacole cu dimensiuni diferite [55]. Principalul avantaj a unui robot mobil modular este faptul că poate avea sisteme de locomoție diferite prin adăugarea de module noi, cu diferite tipuri de roți. În acest fel, robotul mobil modular se poate configura cu un sistem de locomoție adecvat pentru mediul în care își desfășoară activitatea. În **Fig. 3.1** se prezintă posibilitățile de configurare ale unei platforme mobile modulare considerând sistemul de locomoție. Figura prezintă 5 sisteme de locomoție diferite. **Fig. 3.1a** prezintă o configurație robotică cu două roți convenționale și două elemente de sprijin cu bilă iar **Fig. 3.1b** prezintă o configurație cu patru roți convenționale, ambele platforme utilizând tracțiune diferențială. **Fig. 3.1c și d** prezintă două configurații robotice cu 3 și 4 roți omnidirecționale cu role dispuse la  $90^\circ$ . **Fig. 3.1e** prezintă o configurație robotică cu tracțiune omnidirecțională și patru roți Mecanum cu role dispuse la  $45^\circ$ .

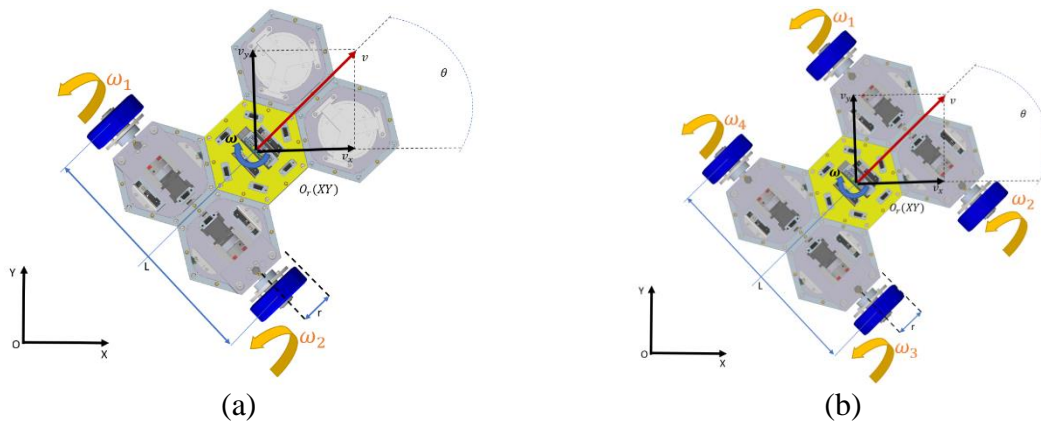
În continuare se prezintă modelele cinematice și posibilitățile de mișcare pentru toate cele 5 configurații.

#### **3.1.1. Model cinematic pentru roboți mobili modulari cu tracțiune diferențială și roți clasice**

Cinematica roboților mobili modulari cu patru și două roți convenționale se bazează pe ecuații matematice ale mișcării specifice tracțiunii diferențiale. Această soluție se bazează pe Mobile Robotics Simulation Toolbox [56] din pachetul software Matlab (The MathWorks Inc., Natick, MA, SUA), fiind adaptată la configurațiile roboților mobili modular dezvoltati. Conform **Fig. 3.2**.



**Fig. 3.1** Posibilități de configurare ale sistemului de locomoție a unei platforme mobile modulare: (a) sistem de locomoție cu două roți convenționale; (b) sistem de locomoție cu patru roți convenționale; (c) sistem de locomoție cu trei roți omnidirecționale; (d) sistem de locomoție cu patru roți omnidirecționale; (e) sistem de locomoție cu patru roți mecanum.



**Fig. 3.2.** Model cinematic al platformei mobile modulare cu tracțiune diferențială: (a) sistem de locomoție cu două roți convenționale; (b) sistem de locomoție cu patru roți convenționale.

Datele de intrare ale modelului cinematic sunt următoarele:

- $v$  – viteză liniară a robotului;
- $\omega$  – viteză unghiulară a robotului;
- $\theta$  – unghi de rotație al robotului;
- $\omega_1$  – viteză unghiulară a roții antrenate de motorul M1;
- $\omega_2$  – viteză unghiulară a roții antrenate de motorul M2;
- $\omega_3$  – viteză unghiulară a roții antrenate de motorul M3;
- $\omega_4$  – viteză unghiulară a roții antrenate de motorul M4;

$L$  – distanță între centrele roților;

$r$  – rază a roții.

Următoarele relații matematice descriu cinematica directă:

$$v = \frac{r}{2}(\omega_2 + \omega_1), \omega = \frac{r}{L}(\omega_2 - \omega_1), \quad (3.1)$$

$$v = \frac{r}{2}(\omega_4 + \omega_3), \omega = \frac{r}{L}(\omega_4 - \omega_3), \quad (3.2)$$

Următoarele relații matematice descriu cinematica inversă:

$$\omega_1 = \frac{1}{r}(v - \frac{\omega \cdot L}{2}), \omega_2 = \frac{1}{r}(v + \frac{\omega \cdot L}{2}), \quad (3.3)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{r}(v - \frac{\omega \cdot L}{2}), \omega_4 = \frac{1}{r}(v + \frac{\omega \cdot L}{2}). \quad (3.4)$$

### 3.1.2. Model cinematic pentru roboți mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți cu role dispuse la 90°

Unul dintre tipurile de roboți mobili cele mai utilizate în servicii sau industrie este robotul cu trei sau patru roți cu role dispuse la 90°, cunoscut sub numele de robot mobil omnidirecțional [57]. Acest tip de robot are multe avantaje, cum ar fi flexibilitatea modelelor de mișcare, având de asemenea capacitatea de a se deplasa liber în ambele direcții în comparație cu robotul convențional cu două roți și cel cu tracțiune pe patru roți [135, 136]. Având aceeași viteză și accelerație, robotul cu roți omnidirecționale se poate deplasa în orice direcție, acest lucru fiind foarte util dacă robotul lucrează, spre exemplu, într-un depozit de logistică. Construcția omnidirecțională cu trei roți, fiecare roată fiind montată la 120°, are o mobilitate și o manevrabilitate ridicată, permițând robotului să se deplaseze prin cele mai înguste zone. În această configurație, roțile sunt menite să se rotească fie perpendicular, fie paralel cu direcția de mișcare [60].

Cinematica robotului mobil modular cu trei și patru roți omnidirecționale se bazează pe soluția Mobile Robotics Simulation Toolbox [56] din pachetul software Matlab (The MathWorks Inc., Natick, MA, SUA), fiind adaptată la configurația robotului mobil modular dezvoltat. Conform **Fig. 3.3**, variabilele de intrare ale modelului cinematic sunt următoarele:

$v_x$  – viteza liniară descompusă pe axa X;

$v_y$  – viteza liniară descompusă pe axa Y;

$\omega$  – viteza unghiulară;

$\omega_1$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M1;

$\omega_2$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M2;

$\omega_3$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M3;

$L$  – raza robotului;

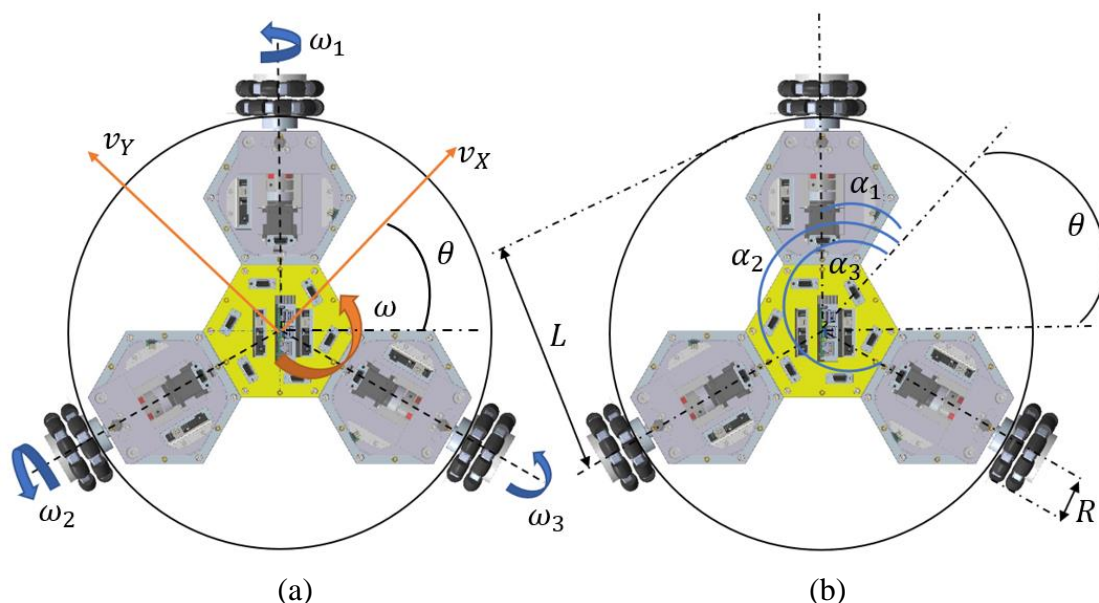
$r$  – raza roții;

$\theta$  – unghiul de rotație al robotului;

$\alpha_1$  – unghiul roții 1;

$\alpha_2$  – unghiul roții 2;

$\alpha_3$  – unghiul roții 3.



**Fig. 3.3** Model cinematic platforma mobila modulară cu 3 roți omnidirecționale: (a) reprezentarea vitezei unghiulare a robotului și a celor 3 roți omnidirecționale; (b) reprezentarea celor 3 unghiuri ale roților și a unghiul de rotație al robotului.

Acest configurație reprezintă un robot mobil cu 3 roți omnidirecționale amplasate radial, în jurul unui corp circular. Deoarece există 3 roți acționate independent, vehiculul dispune de un control complet al mișcării în toate gradele de libertate, cu soluții unice.

Cinematica directă poate fi exprimată sub formă matriceală, după cum urmează:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{R}{3} \begin{bmatrix} \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & \sin(\alpha_3) \\ -\cos(\alpha_1) & -\cos(\alpha_2) & -\cos(\alpha_3) \\ -1/L & -1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Cinematica inversă este descris prin următoarea relație:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Pentru configurația robotică cu patru roți omnidirecționale, datele de intrare ale modelului cinematic sunt următoarele:

$v_x$  – componenta pe axa  $X$  a vitezei liniare;

$v_y$  – componenta pe axa  $Y$  a vitezei liniare;

$\omega$  – viteza unghiulară;

$\omega_1$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M1;

$\omega_2$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M2;

$\omega_3$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M3;

$\omega_4$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M4;

$L$  – raza robotului;

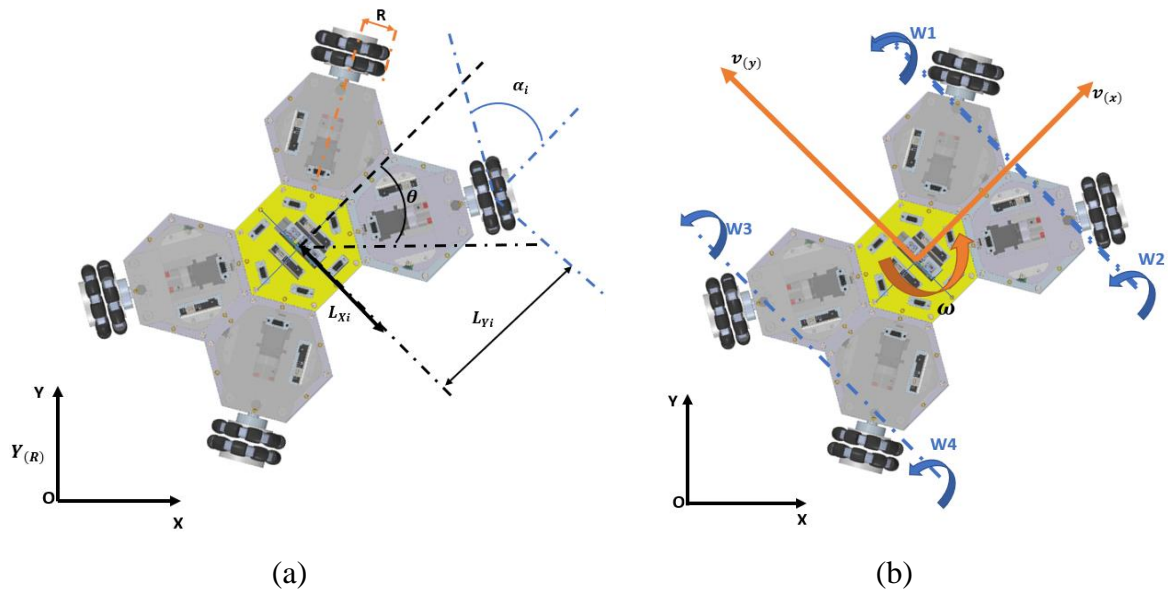
$R$  – raza roții;

$\theta$  – unghiul de rotație al robotului;

$L_{xi}$  – distanța de la centru de greutate la centrul roții pe axa  $X$ ;

$L_{yi}$  – distanța de la centru de greutate la centrul roții pe axa  $Y$ .





**Fig. 3.4** Model cinematic al platformei mobile modulare cu 4 roți omnidireționale: (a) reprezentarea distanțelor de la centrul robotului la centrul roții pe cele două axe X și Y; (b) reprezentarea vitezei unghiulare a robotului și a celor 4 roți omnidireționale.

**Fig. 3.4** se prezintă configurația robotului cu patru roți omnidireționale, poziționate și orientate în raport cu centrul de greutate (CG) al vehiculului. Configurațiile cu 3 sau mai multe roți omnidireționale acționate independent, au un control complet al mișcării pentru toate gradele de libertate.

Cinematica directă poate fi exprimată cu ajutorul următoarei ecuații:

$$\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{R}{N} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\alpha_2) & \dots & \cos(\alpha_N) \\ \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & \dots & \sin(\alpha_N) \\ \frac{1}{D_1} & \frac{1}{D_2} & \dots & \frac{1}{D_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

unde:  $D_i$  – distanța perpendiculară de axa de rotație a roții la centrul de greutate al robotului.

Cinematica inversă poate fi obținută inversând matricea  $\mathbf{M}$  a cinematicii directe. Cu toate acestea deoarece matricea  $\mathbf{M}$  este de ordinul 3 acestea poate fi inversată numai pentru  $N = 3$ . Prin urmare, acest model folosește matricea pseudoinversă  $\mathbf{M}^+$ :

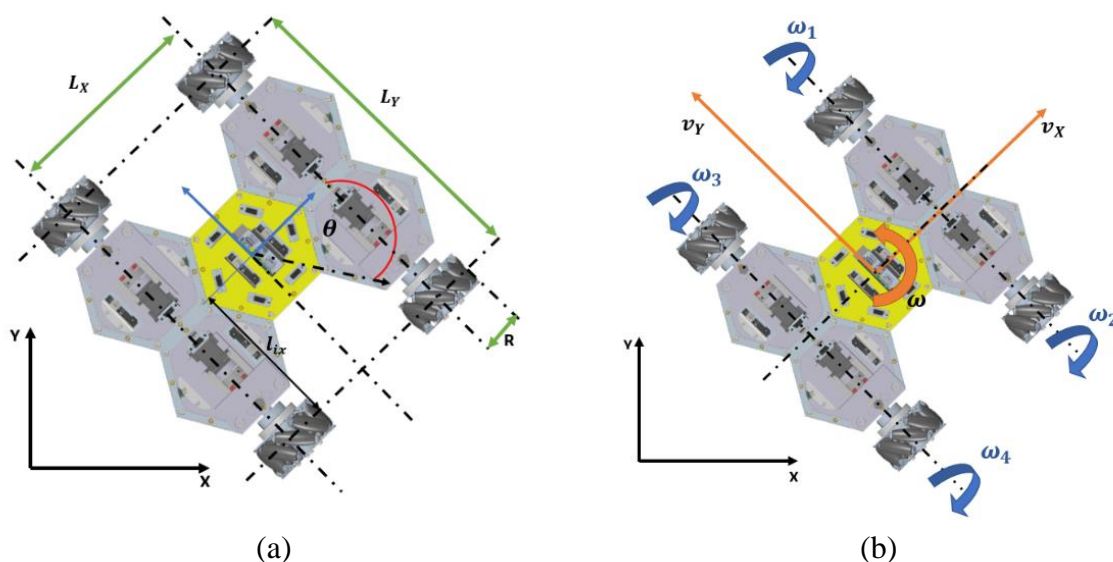
$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix} = \mathbf{M}^+ \begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

### 3.1.3. Model cinematic pentru roboți mobili modulari cu tracțiune omnidirecțională și roți mecanum cu role dispuse la 45°

Robotul mobil cu roți omnidireționale de tip mecanum este cel mai cunoscut și cel mai utilizat robot mobil cu tracțiune omnidirecțională. Roata mecanum cu role pasive dispuse la 45° oferă posibilitatea robotului să se miște liber, fără spațiu de manevră. Deși prezintă o serie de avantaje importante, găsirea unui algoritm de control eficient pentru urmărirea unei traiectorii este o sarcină complexă, tratată în multe articole de specialitate [61]. Cinematica robotului mobil modular cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum se bazează pe soluția Mobile Robotics Simulation Toolbox [56] din pachetul software Matlab (The MathWorks Inc., Natick,

MA, SUA), fiind adaptată la configurația robotului mobil modular dezvoltat. Conform **Fig. 3.5** variabilele de intrare ale modelului cinematic sunt următoarele:

- $v_x$  – componenta pe axa  $X$  a vitezei liniare;
- $v_y$  – componenta pe axa  $Y$  a vitezei liniare;
- $\omega$  – viteza unghiulară;
- $\omega_1$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M1;
- $\omega_2$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M2;
- $\omega_3$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M3;
- $\omega_4$  – viteza unghiulară a roții antrenate de motorul M4;
- $R$  – raza roții;
- $\theta$  – unghiul de rotație al robotului;
- $L_x$  – distanța dintre roți pe direcția axei  $X$ ;
- $L_y$  – distanța dintre roți pe direcția axei  $Y$ .



**Fig. 3.5** Model cinematic al platforma mobile modulare cu 4 roți omnidirecționale de tip mecanum: (a) reprezentarea distanțelor dintre roți pe cele două direcții  $X$  și  $Y$  și raza roții de acționare; (b) reprezentarea vitezei unghiulare a robotului și a celor 4 roți mecanum.

Cinematica directă poate fi exprimată cu ajutorul următoarei ecuații:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -2/(L_x + L_y) & 2/(L_x + L_y) & -2/(L_x + L_y) & 2/(L_x + L_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Cinematica inversă este descrisă prin următoarea relație:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L_x + L_y)/2 \\ 1 & 1 & (L_x + L_y)/2 \\ 1 & 1 & -(L_x + L_y)/2 \\ 1 & -1 & (L_x + L_y)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Direcția și viteza roților diagonale sunt setate independent. Utilizarea aceleiași viteze la fiecare roată în același timp, în timpul funcționării, conduce la obținerea a opt direcții pentru mișcarea robotului fără a se schimba orientarea acestuia.

### 3.2. CONCLUZII

Capitolul 3 prezintă contribuții teoretice privind modelarea cinematică și dinamică a unei platforme mobile modulare reconfigurabile. În prima parte a acestui capitol s-a realizat modelarea cinematică pentru configurațiile posibile de roboți mobili ce rezultă din reconfigurarea platformei modulare. Astfel s-a prezentat modelul cinematic pentru următoarele structuri robotice:

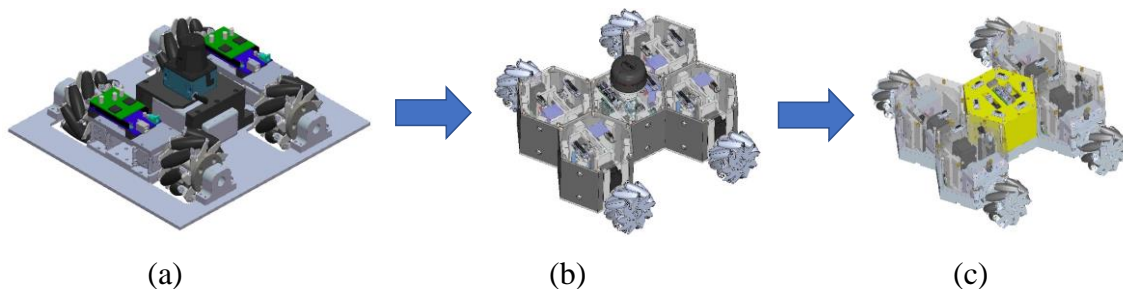
- Robot mobil cu tracțiune diferențială, cu patru sau două roți convenționale;
- Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională cu trei sau patru roți omnidirecționale cu role dispuse la  $90^\circ$ ;
- Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională cu patru roți mecanum.

Ecuțiile ce definesc modelele cinematice, au fost folosite în continuare pentru a realiza modele dinamice și controlul fiecărei configurații robotice în parte. Pentru a se putea folosi module independente de acționare s-au realizat o serie de calcule necesare alegerii motorului electric. Pentru aceste calcule s-a luat în considerare configurația robotică cu tracțiune diferențială și două roți convenționale. Pentru acesta configurație masa distribuită pe un modul a avut valoarea cea mai mare. În urma acestor calcule s-a determinat cuplul și turația necesară, și s-a ales motorul electric. Cunoșcând parametrii motorului necesar acționării unui modul, s-a realizat diferite structuri robotice cu două sau mai multe roți motoare în funcție de aplicația industrială în care va fi integrat robotul mobil modular.

## CAP. 4. DEZVOLTAREA UNEI PLATFORME MOBILE MODULARE UTILIZÂND TEHNICILE CAD-CAM-CAE

### 4.1. MODELARE 3D A VARIANTELOR CONSTRUCTIVE

Conform capitolului 2 ce prezintă ultimele noutăți în domeniul roboticii se observă că în trendul roboților mobili se află platforme mobile cu roți omnidirecționale, datorita avantajelor din punct de vedere al mobilității și flexibilității de care acestea dispun. În ziua de azi însă trecem prin niște schimbări continue în ceea ce privește procesele industriale iar termeni precum: „Economic și prietenos cu mediul”, „Eficienta și economie”, „Industria 4.0”, „Soluții flexibile”, „Cost redus”, sunt principalele caracteristici pe care trebuie să le poată avea noile echipamente din industrie. Coroborând aceste caracteristici cu studiile din literatura de specialitate prezentate în Capitolul 2 s-a realizat trei concepte de platforme robotice mobile, iar în **Fig. 4.1** se prezintă evoluția acestui concept.



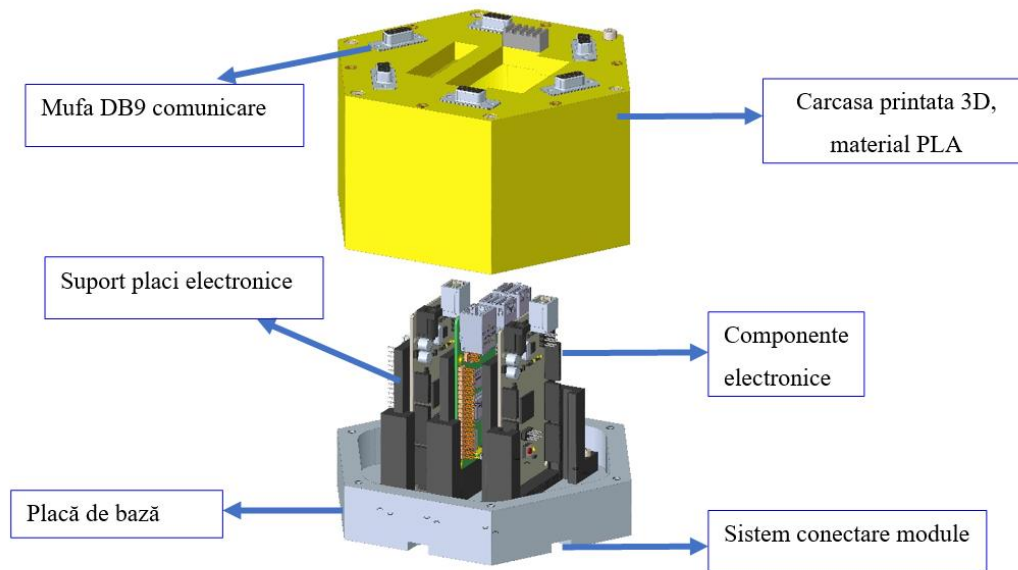
**Fig. 4.1** Evoluție concept platforma mobila cu roți omnidirecționale de tip mecanum: (a) Platforma mobila cu patru omnidirecțională mecanum; (b) Platforma mobila modulară cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum varianta 1; (c) Platforma mobila modulară cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum varianta 2.

#### 4.1.1. Modulul principal

Unitatea principală a robotului sau modulul principal este o structură cu formă hexagonală are două roluri importante: rol de unitate de comandă pentru toate celelalte module secundare și rol de conexiune mecanică, ceea ce face ca împreună cu celelalte module să formeze configurații de structuri robotice diferite. Principala caracteristică din punct de vedere mecanic este forma hexagonală a structurii ce permite o configurare rapidă cu alte 6 module de forma similară și posibilitatea de a forma structuri robotice diverse.

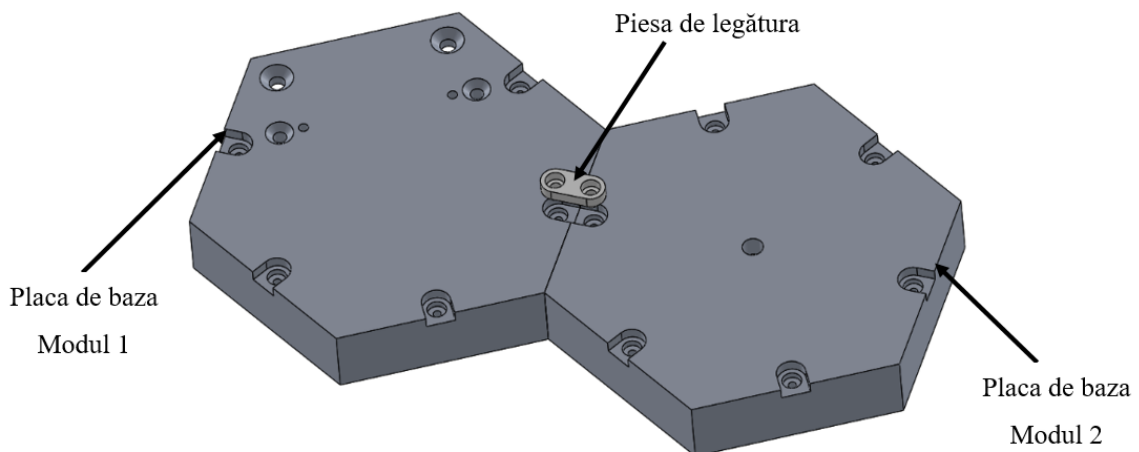
Componentele principale ce alcătuiesc acest modul pot fi observate în **Fig. 4.2**. Placa de bază a fost realizată din aluminiu prin prelucrări mecanice de precizie pe un centru de prelucrare cu comanda numerică. Toate celelalte componente mecanice au fost realizate prin imprimare

3D, în acest fel obținându-se un cost de fabricație a modului mai redus, excluzând componentele electronice [62].



**Fig. 4.2** Componente modul principal – varianta 2 [62].

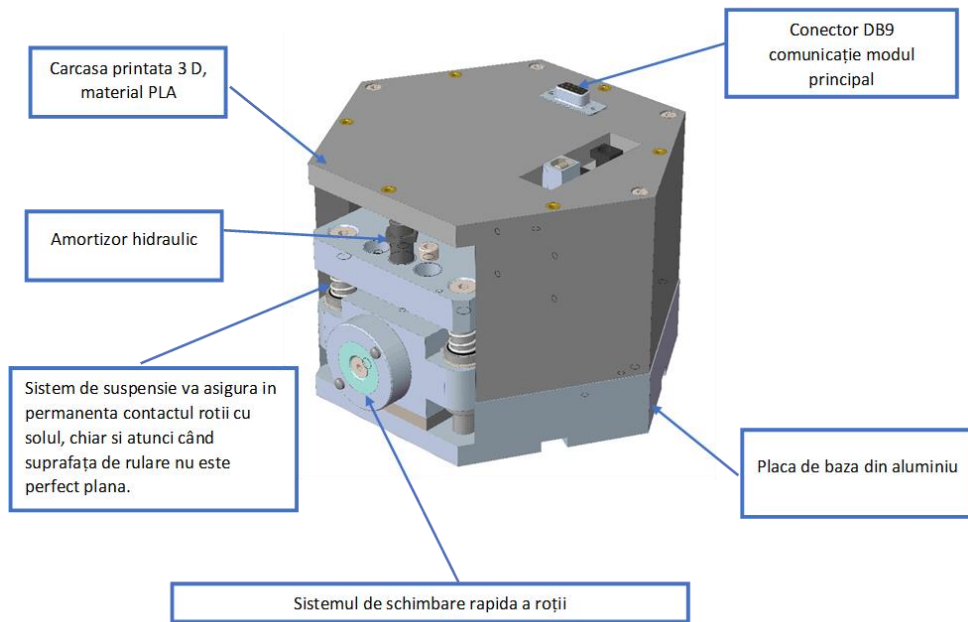
Față de varianta inițială, sistemul de conectare între module a fost modificat și s-a realizat un sistem mai simplu și mai eficient din punct de vedere al timpului și al complexității asamblării modulelor. Acest lucru a fost posibil deoarece ansamblul are mai puține componente, în acest mod realizându-se o conexiune directă între plăcile de bază ale fiecărui modul și având nevoie doar de o simplă piesă de legătură și șuruburi pentru fixare, așa cum este prezentat în **Fig. 4.3**.



**Fig. 4.3** Sistem conectare a modulelor.

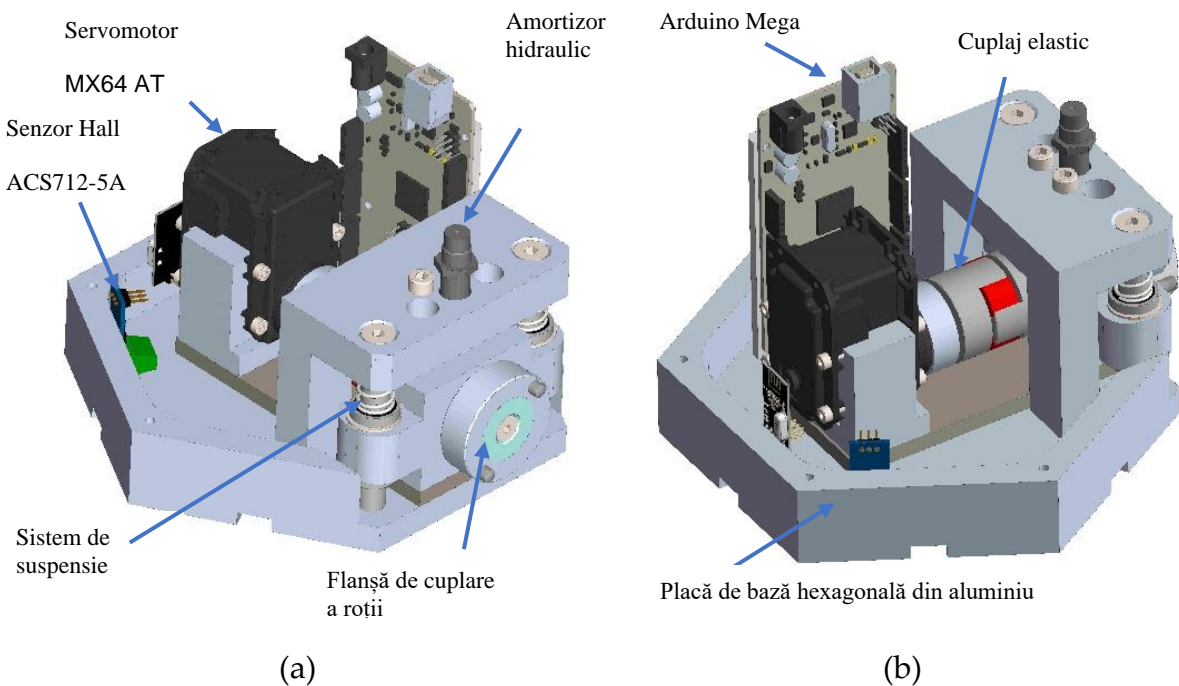
#### 4.1.2. Modulul roată motoare

Aționarea platformei mobile modulare este asigurată de modulul roată motoare ilustrat în **Fig. 4.4**, unde sunt prezentate construcția și principalele componente ale modului.



**Fig. 4.4** Ansamblu modul roată motoare.

Modulul este alcătuit din mai multe subsisteme, cum ar fi sistemul de suspensie sau sistemul de cuplare rapidă a roții, prezentate în **Fig. 4.5a** și **Fig. 4.5b**. Un servomotor de curent continuu realizează acțiunea roții robotului mobil modular.



**Fig. 4.5** Modul roată motoare (model 3D): (a) vedere exterioară; (b) vedere interioară.

## CAP. 5. CERCETĂRI PRELIMINARE EFECTUATE PE UN ROBOT MOBIL OMNIDIRECȚIONAL CU ROȚI MECANUM

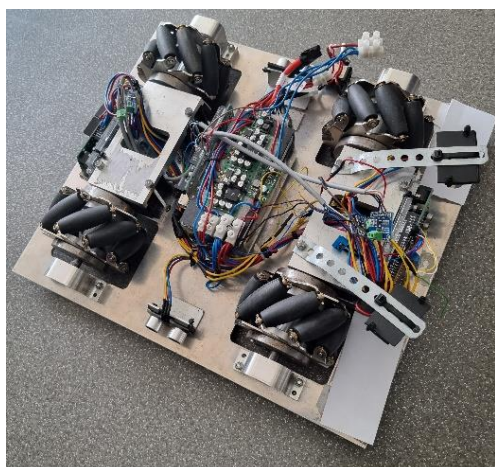
Capitolul de cercetări preliminare urmărește dezvoltarea unui robot mobil autonom, ieftin și eficient, potrivit pentru aplicații industriale. Astfel, platforma dezvoltată se va deplasa în interiorul unui mediu controlat, transferând piese între posturile de lucru. În consecință, traseele sunt fixe, iar posibilitățile de apariție a obstacolelor sunt destul de mici. Astfel, planificarea traiectoriei, precizia traiectoriei și evitarea obstacolelor nu sunt atât de importante pentru robotul mobil autonom propus.

### 5.1. ROBOTUL MOBIL

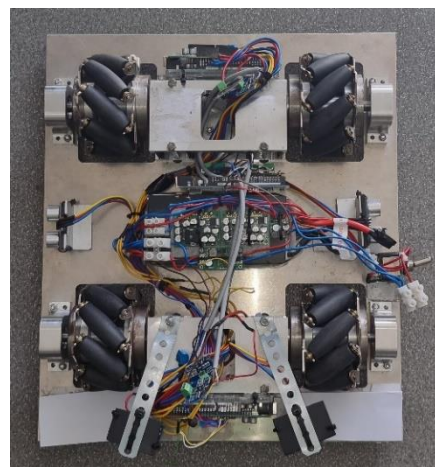
Pentru această cercetare a fost dezvoltată o platformă robotică mobilă cu roți Mecanum, prezentată în **Fig. 5.1**.

Fiecare roată poate fi acționată în mod independent cu ajutorul motoarelor de curent continuu comandate prin impulsuri de tensiune cu lățime variabilă, prin intermediul metodei PWM (*pulse with modulation*).

Pentru acționare au fost utilizate motoarele de curent continuu DCX 22 L de la Maxon (Maxon Motor AG, Sachseln, Elveția). Două plăci Arduino Mega 2560 (Arduino AG, Italia) au fost utilizate pentru a gestiona generarea impulsurilor de tensiune cu lățime variabilă pentru motoarele de acționare. Pentru a comanda motoarele de acționare a roților au fost utilizate două drivere de motor dual VNH5019 (Pololu, Las Vegas, SUA) [63].



(a)



(b)

**Fig. 5.1** Robotul mobil cu roți mecanum: (a) vedere izometrică; (b) vedere de sus.

Platforma a fost, de asemenea, echipată cu diverși senzori, cum ar fi senzori de distanță cu ultrasunete și un modul de senzori cu infraroșu pentru evitarea obstacolelor, dar acești senzori nu au fost utilizați în timpul testelor realizate.

## 5.2. SOLUȚII CINEMATICE AVUTE ÎN VEDERE

### 5.2.1. Cinematica mecanum cu patru roți

Cinematica directă poate fi descrisă prin următoarea relație:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \\ -2/(L_x + L_y) & 2/(L_x + L_y) & -2/(L_x + L_y) & -2/(L_x + L_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

Cinematica inversă poate fi descrisă prin următoarea relație:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L_x + L_y)/2 \\ 1 & 1 & (L_x + L_y)/2 \\ 1 & 1 & -(L_x + L_y)/2 \\ 1 & -1 & (L_x + L_y)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (5.2)$$

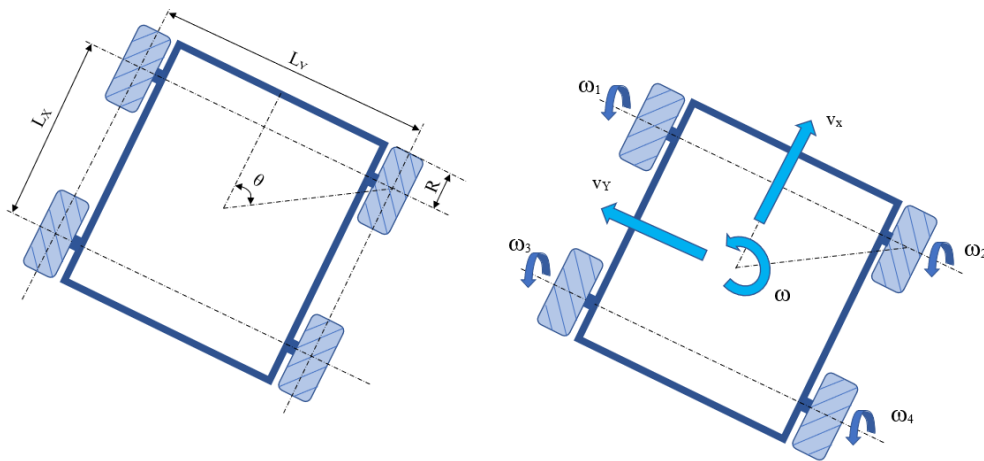


Fig. 5.2 Schema unui robot mobil mecanum cu patru roți.

### 5.2.2. Cinematica de acționare diferențială

În Fig. 5.3 este prezentată o schemă a unui robot mobil cu acționare diferențială.

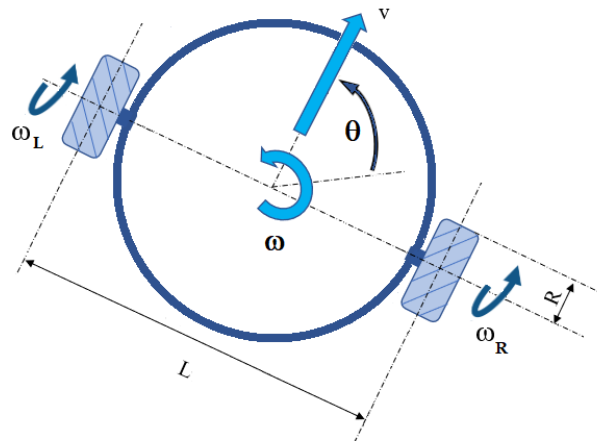


Fig. 5.3 Schemă a unui robot mobil cu acționare diferențială.



Conform [56], datele de intrare ale modelului cinematic sunt vitezele roților din stânga și din dreapta,  $\omega_L$  și  $\omega_R$  (în rad/s), în timp ce datele de ieșire sunt viteza liniară  $v$  (în m/s) și viteza unghiulară  $\omega$  (în rad/s).

Cinematica directă poate fi descrisă prin următoarea relație:

$$v = \frac{R}{2}(\omega_R + \omega_L), \quad \omega = \frac{R}{L}(\omega_R - \omega_L), \quad (5.3)$$

Cinematica inversă poate fi descrisă prin următoarea relație:

$$\omega_L = \frac{1}{R}(v - \frac{\omega L}{2}), \quad \omega_R = \frac{1}{R}(v + \frac{\omega L}{2}). \quad (5.4)$$

### 5.3. SIMULAREA MODELULUI DINAMIC AL ROBOTULUI OMNIDIRECȚIONAL

Modelul dinamic al robotului mobil, luând în considerare soluția cinematică mecanum cu patru roți, este prezentată în **Error! Reference source not found.** Modelul utilizează, de asemenea, blocuri din Mobile Robotics Simulation Toolbox [56] din cadrul Matlab. În model au fost introduse dependențele mecanice dintre forțele care acționează asupra șasiului robotului și cuplurile care acționează asupra roților, considerând, de asemenea, raportul reductorului armonic dintre motor și roată.

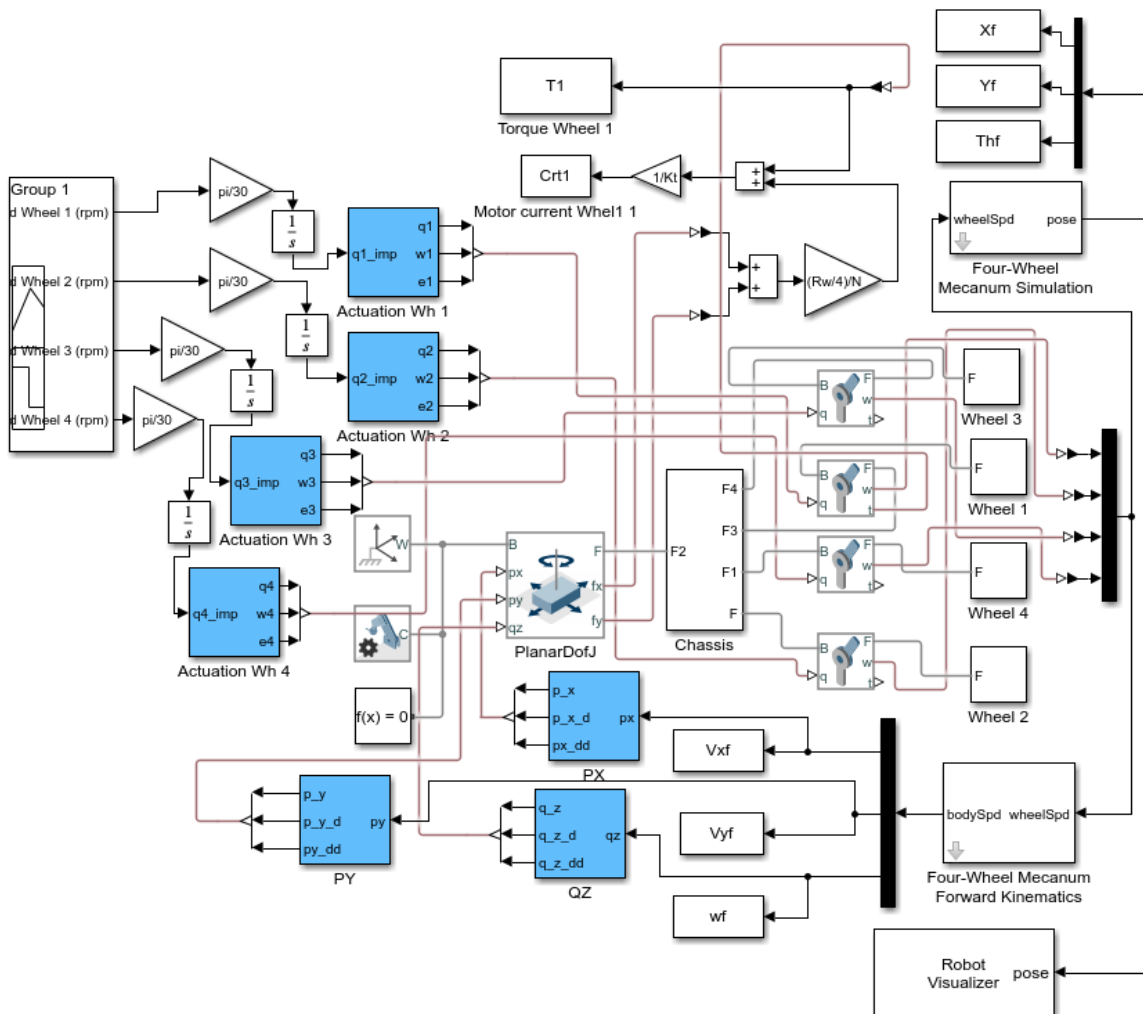


Fig. 5.4 Model dinamic pentru soluția cinematică mecanum cu patru roți.

În Fig. 5.5 se prezintă modelul dinamic pentru soluția cinematică a acțiunii diferențiale.

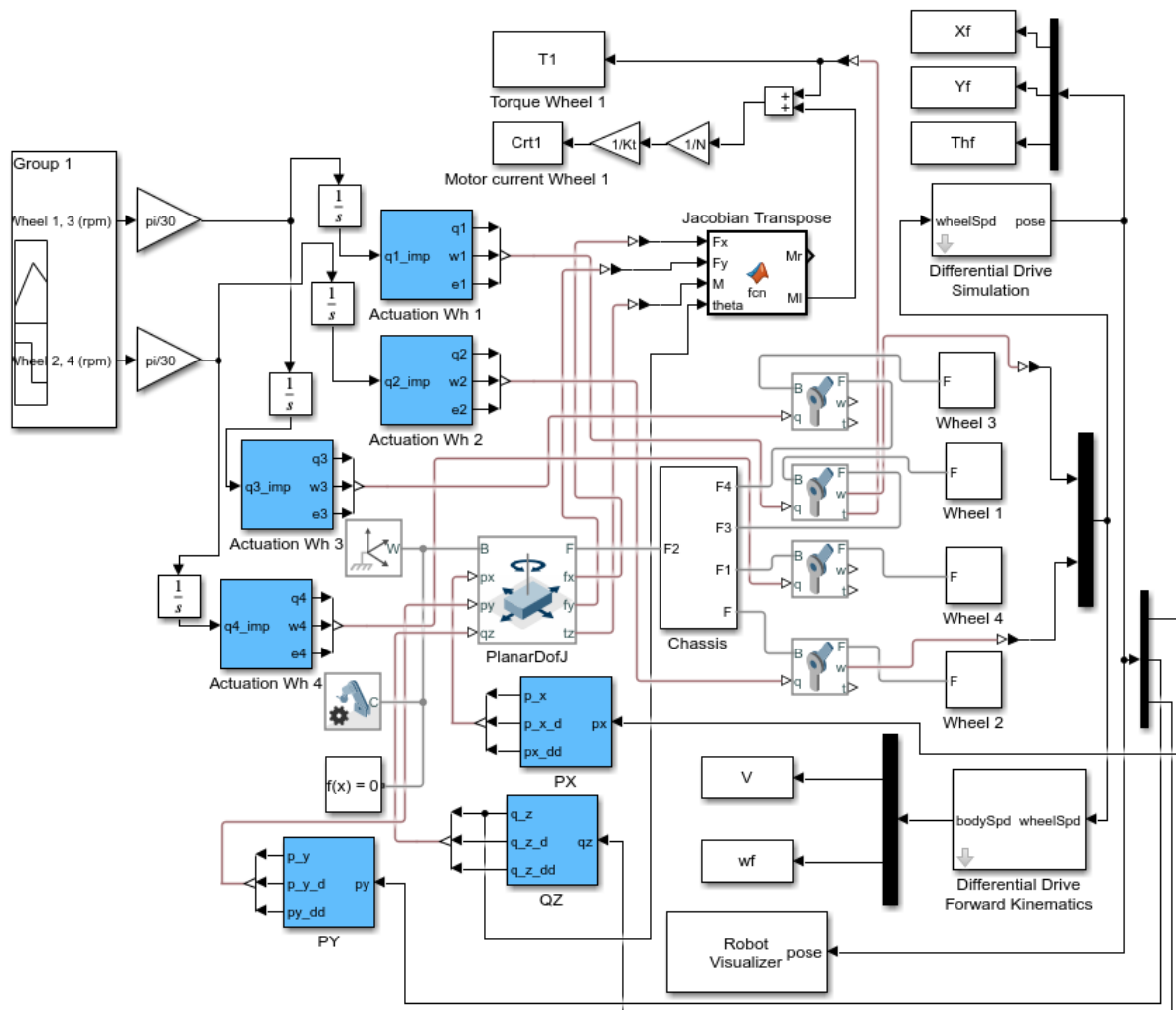
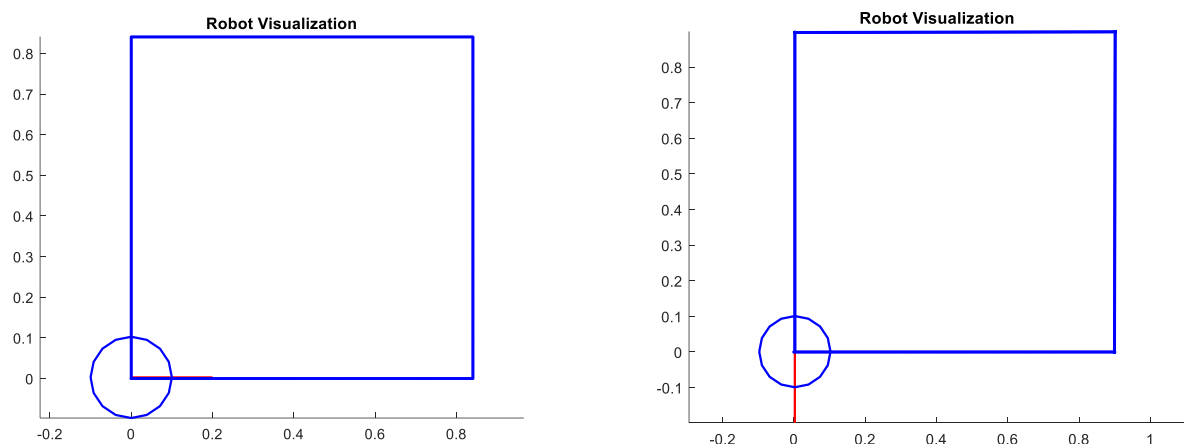


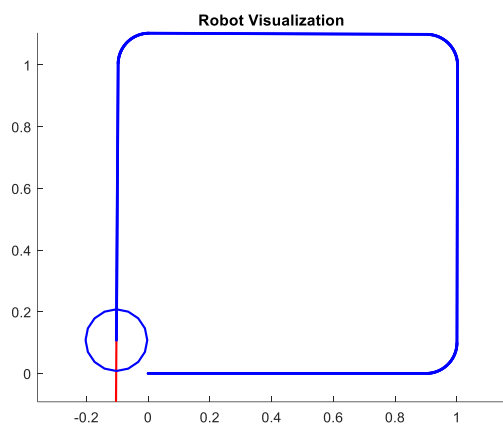
Fig. 5.5 Modelul dinamic al soluției cinemate cu acțiune diferențială.

Rezultatele simulării (traectoria simulată) pentru cele două cazuri considerate sunt prezentate în Fig. 5.6, capturi din Blocul Robot Visualizer din Mobile Robotics Simulation Toolbox.

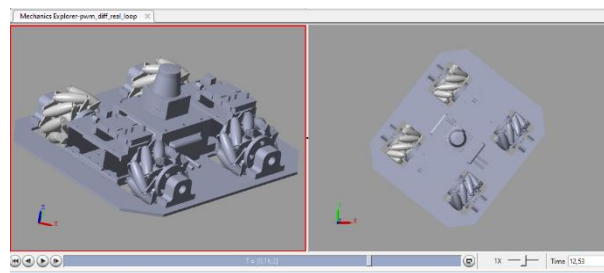


(a)

(b)



(c)



(d)

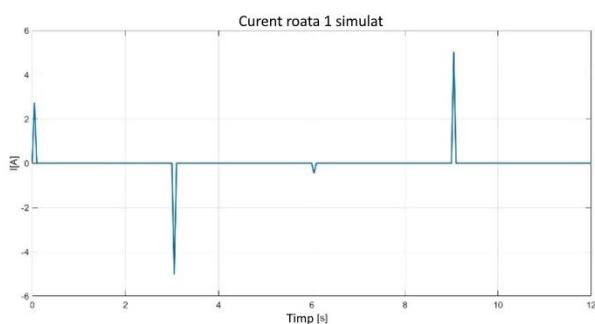
**Fig. 5.6** Traiectoriile simulate: (a) traiectoria pentru Mecanum cu patru roți; (b) traiectoria pentru transmisia diferențială, fără rază; (c) traiectoria pentru transmisia diferențială cu rază (d) captură de ecran din Mechanics Explorer – Simscape.

#### 5.4. COMPARAȚIE ÎNTRE VALORILE SIMULATE ȘI CELE EXPERIMENTALE ALE CURENȚILOR ABSORBIȚI DE MOTOARE

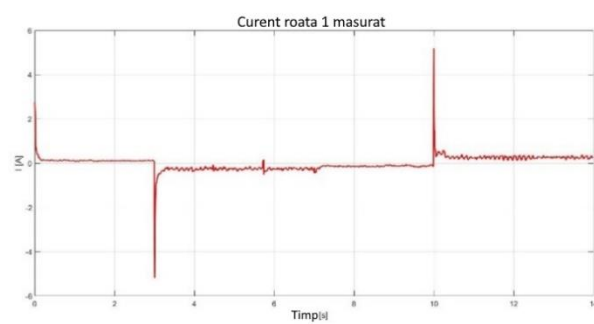
Unul dintre obiectivele principale ale acestei abordări a fost determinarea curenților prin motoarele roților, atât prin simulare, cât și prin măsurători experimentale. Curenții au fost măsurați cu ajutorul modului de senzori CJMCU-219 INA219 (Texas Instruments, Dallas, TX, SUA).

**Fig. 5.7** și **Fig. 5.8** prezintă o comparație între valorile simulate și cele măsurate ale acestor curenți, în timpul parcurgerii traiectoriei pătrate pentru toate cele două situații menționate (mecanum cu patru roți și acționare diferențială).

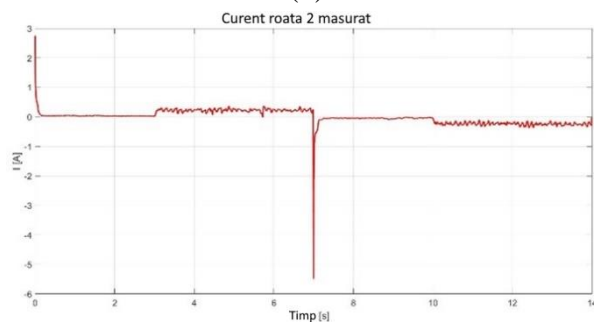
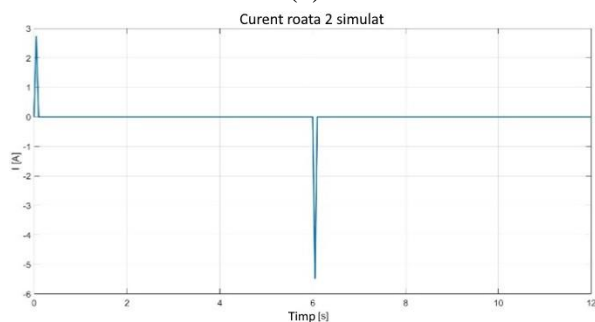
Trebuie menționat faptul că nu s-a luat în considerare frecarea în modelul dinamic, în timp ce măsurătorile au fost influențate de aceasta.

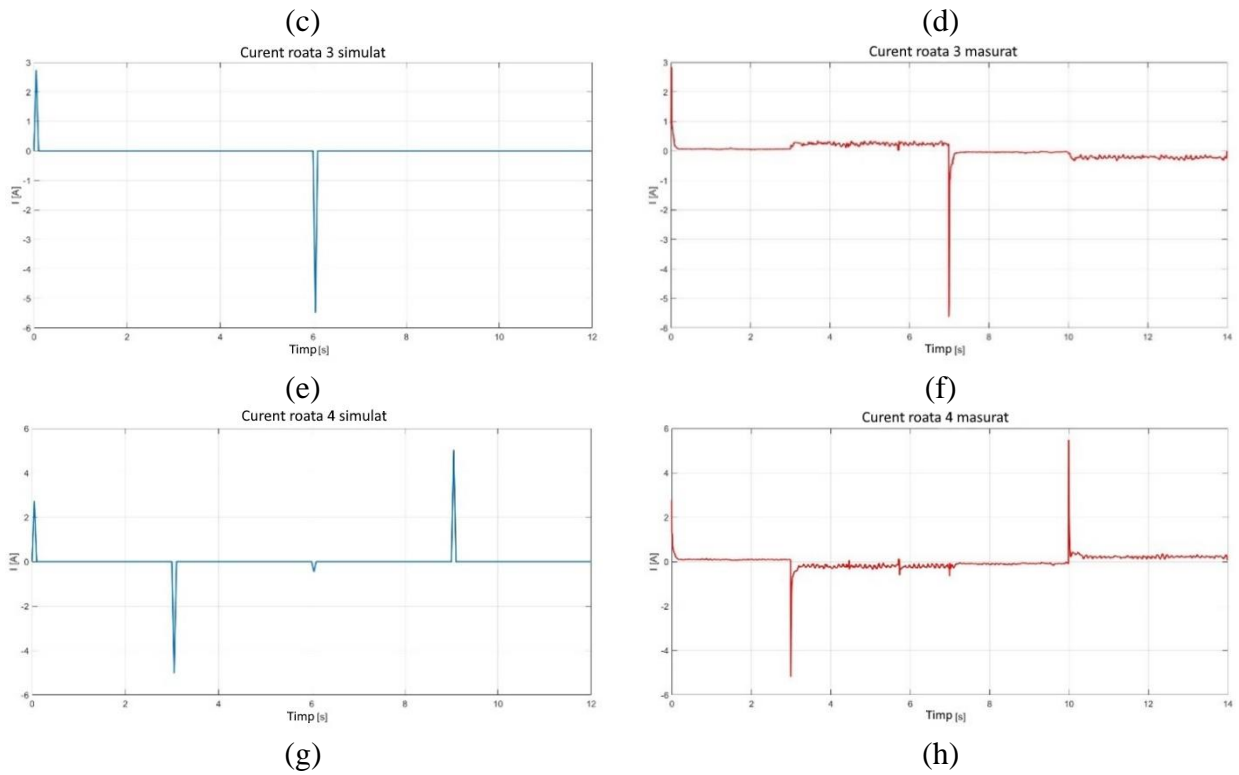


(a)

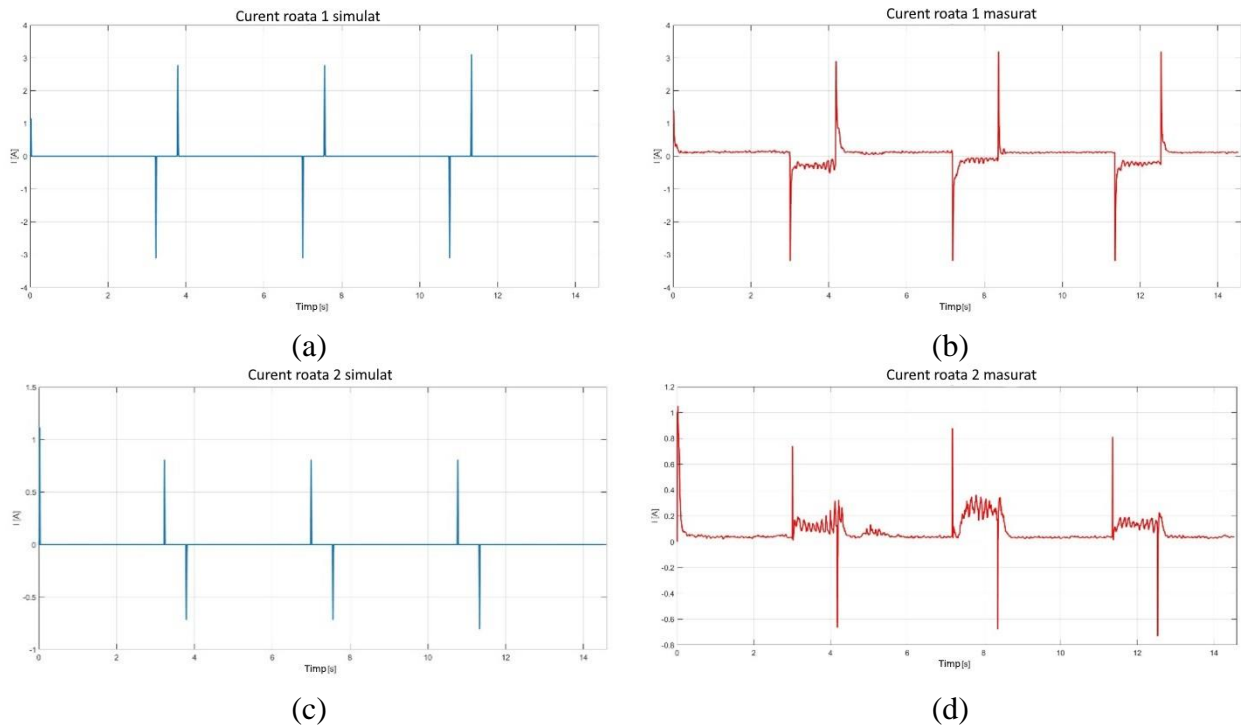


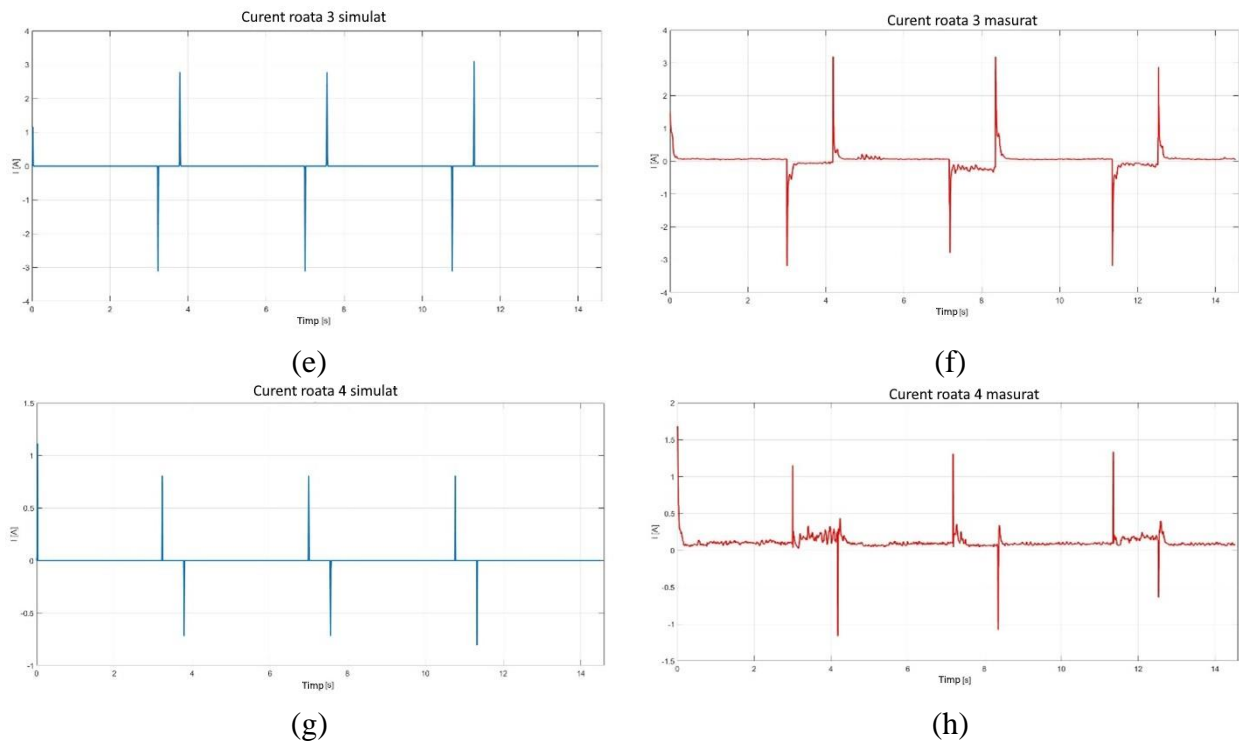
(b)





**Fig. 5.7** Comparație între curenții simulați (a, c, e, g) și mășurați (b, d, f, h) absorbiți de motoarele de acționare a roților pentru soluția cinematică mecanum cu patru roți: (a, b) roata 1; (c, d) roata 2; (e, f) roata 3; (g, h) roata 4.





**Fig. 5.8** Comparație între curenții simulați (a, c, e, g) și mășurați (b, d, f, h) absorbiți de motoarele de acționare a roților pentru soluția cinematică cu virare fără rază, a acționării diferențiale: (a, b) roata 1; (c, d) roata 2; (e, f) roata 3; (g, h) roata 4.

## 5.5. CONCLUZII

Obiectivul principal al cercetărilor preliminare a fost dezvoltarea unor modele bloc digitale dinamice eficiente, care să permită studierea comportării platformelor robotice mobile autonome la deplasarea pe traiectorie impusă.

Modelele elaborate iau în considerare următoarele:

- caracteristicile geometrice și constructive ale robotului mobil, prin integrarea modelului 3D al acestuia în simulare;
- cinematica robotului mobil, utilizând blocuri care permit implementarea cinematicii mecanum pe patru roți și a cinematicii diferențiale. De asemenea, au fost construite blocuri care permit generarea de intrări cinematice pentru cele două situații;
- dinamica robotului, atât prin blocuri specifice Simscape, cât și prin blocuri create de utilizator (de exemplu, blocul pentru implementarea matricei Jacobian transpusă).

De asemenea, modelele permit vizualizarea 3D a mișcării robotului în timpul simulării, prin intermediul interfeței Mechanics Explorer din Simscape.

Bineînțeles, modelele propuse și unele dezavantaje:

- nu iau în considerare fenomenul de frecare;
- acestea nu includ partea de control a sistemului de acționare (pentru soluția de acționare aleasă, DCPWM, aceasta nu este relevantă).

Validarea modelelor propuse a fost realizată prin compararea rezultatelor simulării cu cele experimentale. Pentru această comparație, au fost aleși curenții absorbiți de motoarele care acționează roțile robotului, în principal datorită ușurinței cu care pot fi mășurați experimental.

Comparația dintre valorile experimentale și cele simulate a demonstrat acuratețea diagramelor de simulare propuse.

Cu ajutorul schemelor de simulare propuse, a fost studiat comportarea robotului mobil la deplasarea pe traiectorii pătrate. Simulările au demonstrat că avantajele roților mecanum vin împreună cu dezavantajul unor valori ridicate ale curenților absorbiți de motoarele de acționare a roților, în varianta utilizării soluției de acționare bazată pe motoare de curent continuu comandate prin intermediul impulsurilor de tensiune PWM.

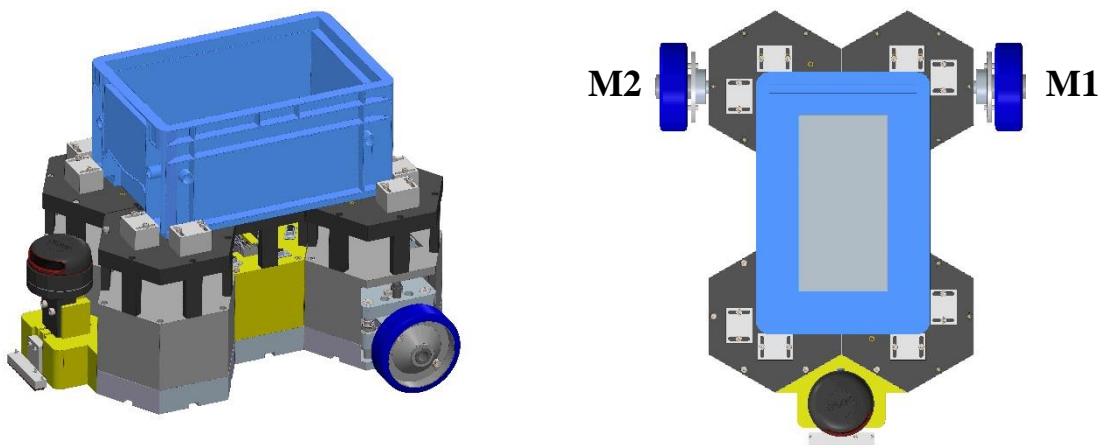
Utilizarea cinematicii diferențiale, care nu beneficiază de facilitățile roților de tip mecanum, conduce la apariția unor curenți de valori mai mici, care pot fi reduse și mai mult dacă se introduce virarea în arc de cerc, în locul virării prin rotire pe loc în jurul propriei axe verticale.

În urma comparării rezultatelor testelor experimentale s-a constatat că valorile curenților simulate sunt apropiate de cele măsurate.

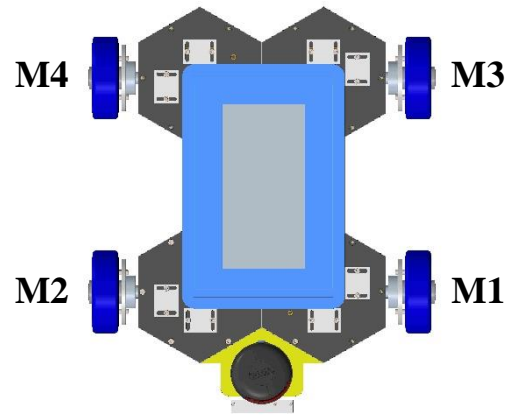
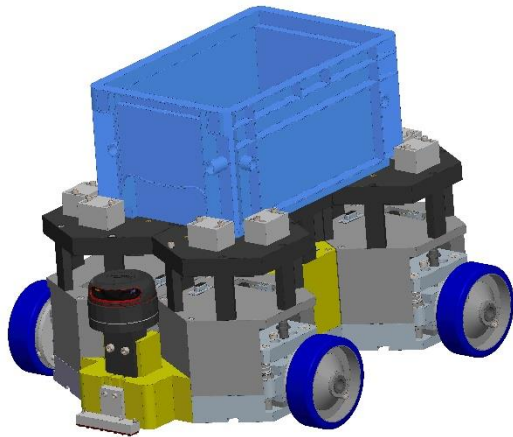
## CAP. 6. CERCETĂRI DE MODELARE, SIMULARE ȘI EXPERIMENTALE EFECTUATE PE VARIANTE CONSTRUCTIVE DE ROBOȚI MOBILI

### 6.1. STRUCTURA ȘI CARACTERISTICILE PLATFORMEI MOBILE MODULARE DEZVOLTATE

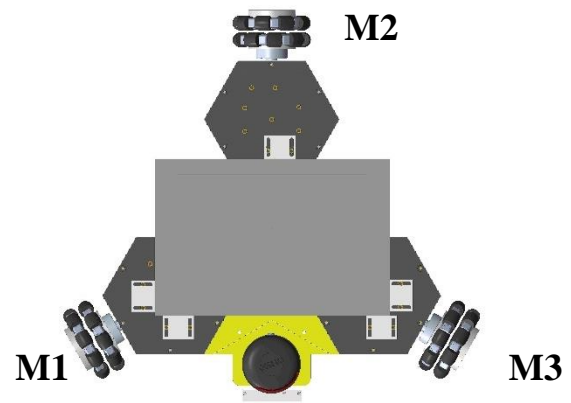
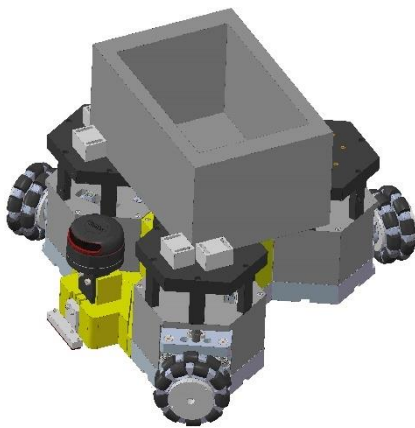
În urma cercetărilor preliminare, se poate observa că modelul dinamic al robotului mobil omnidirecțional cu roți mecanum ce a fost realizat în Matlab Simulink și validat experimental, poate estima consumul energetic al robotului în funcție de traiectoria parcursă. Astfel s-a dorit să se continue aceste cercetări pentru alte tipuri de roboți mobili și să se poată determina influența structurii robotice și a sistemului de locomoție în consumul energetic al robotului. Pornind de la aceste considerente s-a dezvoltat o platformă mobilă modulară ce are posibilitatea să fie configurată în 5 structuri robotice cu 3 tipuri de roți diferite. Pentru a demonstra modularitatea și capacitatea de reconfigurare a conceptului original, **Fig. 6.1** prezintă modelele CAD 3D ale celor 5 configurații de roboți mobili.



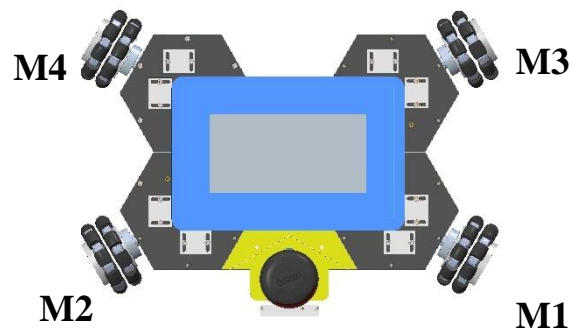
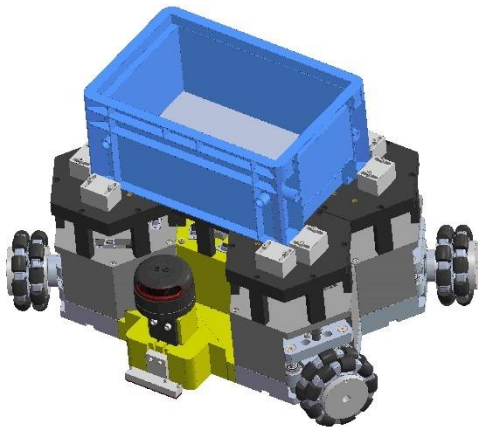
(a)



(b)

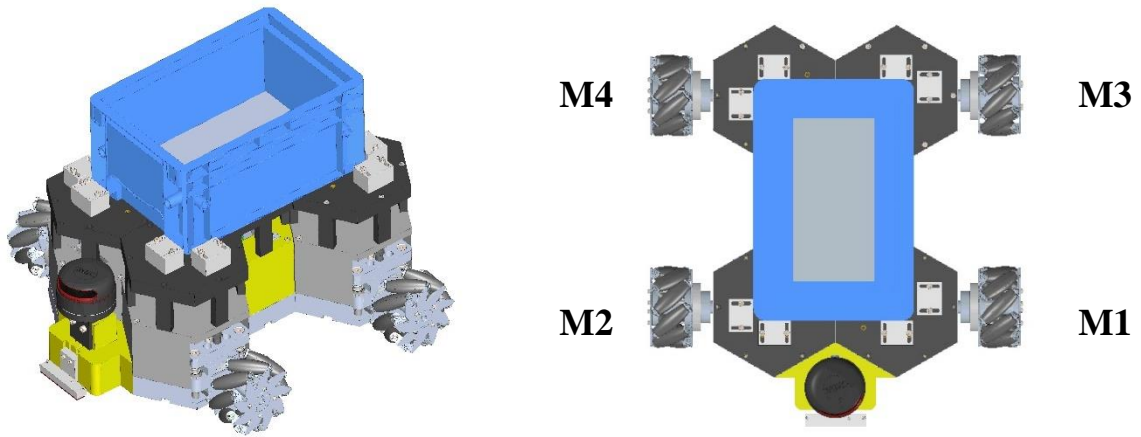


(c)



(d)

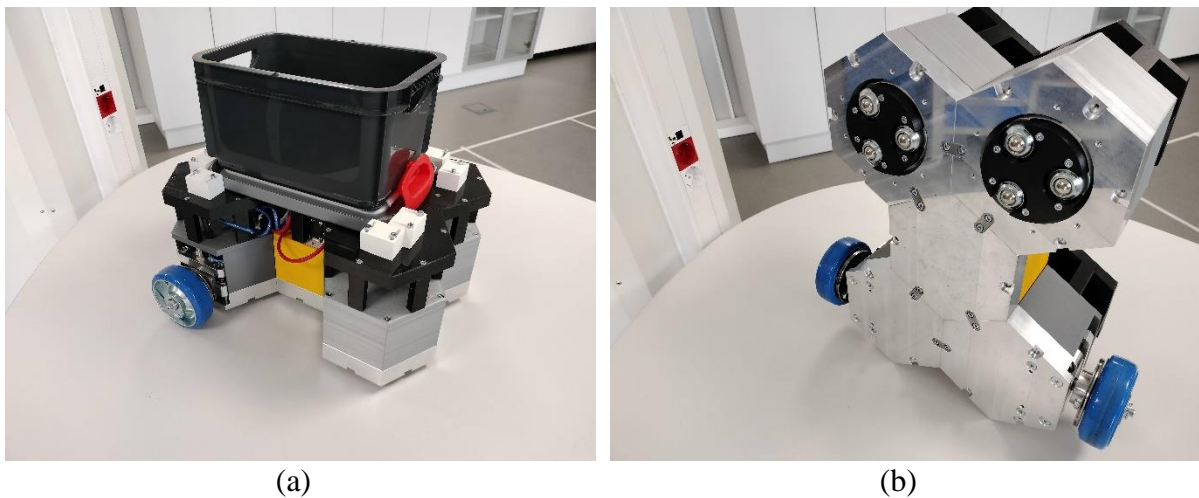




(e)

**Fig. 6.1** Configurări posibile platforma mobilă modulară: (a) robot mobil cu tracțiune diferențială și două roți convenționale; (b) robot mobil cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale; (c) robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și trei roți omnidirecționale; (d) robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți omnidirecționale; (e) robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum.

Configurația robotului mobil modular cu locomoție diferențială și două roți convenționale este prezentată în **Fig. 6.1a**. Roțile sunt acționate de două servomotoare (M1, M2). **Fig. 6.2a** prezintă o vedere generală a ansamblului fizic al robotului mobil, în timp ce **Fig. 6.2b** prezintă o vedere de jos a robotului pentru a evidenția modulele Ball Castor.



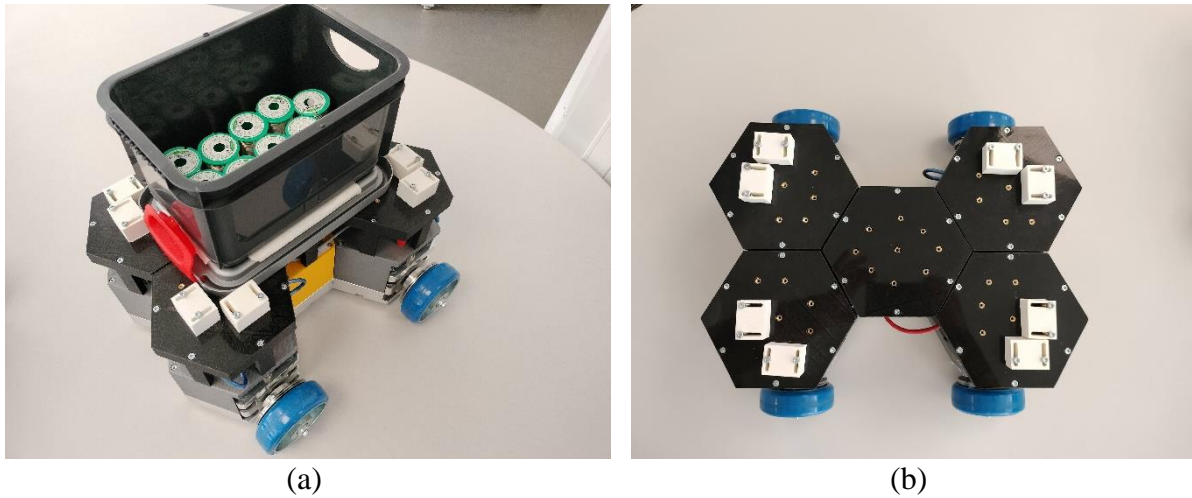
**Fig. 6.2** Robot mobil modular cu două roți convenționale (model real): (a) vedere izometrică; (b) vedere de jos.

Această configurație de robot include următoarele module:

- Un modul principal, care are rolul de comandă și de legătură cu celelalte module;
- Două module de roți motoare, care au rolul de a conduce robotul;
- Doua module cu roți de sprijin.

Configurația robotului mobil modular cu locomoție diferențială și patru roți convenționale este prezentată în **Fig. 6.1b**. Roțile sunt acționate de patru servomotoare (M1, M2, M3, M4). **Fig. 6.3a** prezintă o vedere generală a ansamblului fizic al robotului mobil, în

timp ce **Fig. 6.3b** prezintă o vedere de sus a robotului pentru a evidenția modularitatea sistemului de fixare a cutie pentru transportul de piese.



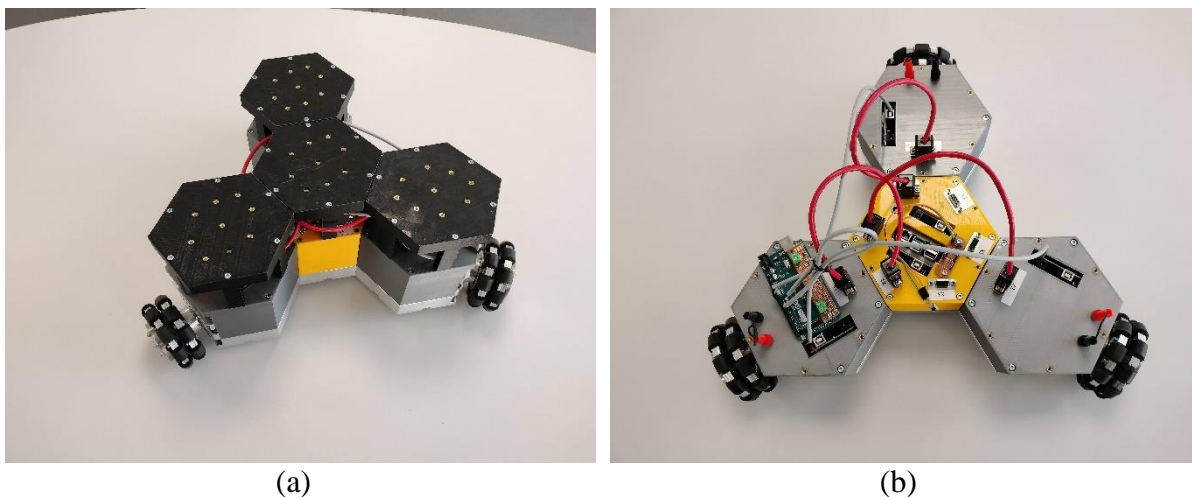
**Fig. 6.3** Robot mobil modular cu patru roți convenționale (model real): (a) vedere izometrică. (b) vedere de sus.

Această configurație de robot include următoarele module:

- Un modul principal, care are rolul de comandă și de legătură cu celelalte module;
- Patru module de roți motoare, care au rolul de a conduce robotul.

Configurația robotului mobil modular cu locomoție omnidirecțională și trei roți cu role dispuse la  $90^\circ$  este prezentată în **Fig. 6.1c**. Roțile sunt acționate de trei servomotoare (M1, M2, M3). În

**Fig. 6.4a** se prezintă o vedere generală a ansamblului fizic al robotului mobil, în timp ce în **Fig. 6.4b** se prezintă o vedere de sus a robotului pentru a evidenția modularitatea sistemului și posibilitățile de configurare.



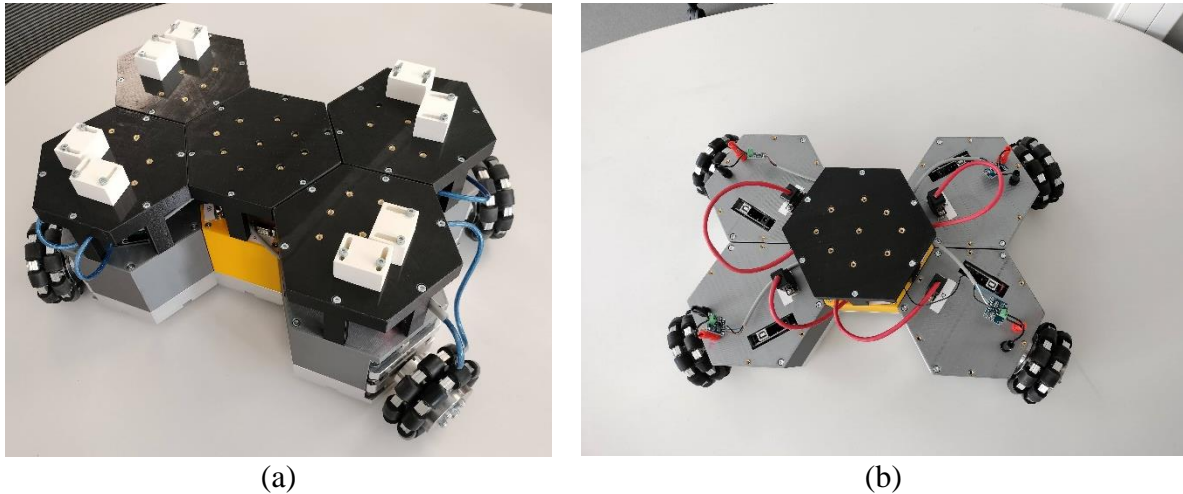
**Fig. 6.4** Robot mobil modular cu trei roți omnidirecționale (model real): (a) vedere izometrică; (b) vedere de sus.

Această configurație de robot include următoarele module:

- Un modul principal, care are rolul de comandă și de legătură cu celelalte module;
- Trei module de roți motoare, care au rolul de a conduce robotul;

- Trei roți omnidirecționale cu role dispuse la  $90^\circ$ .

Configurația robotului mobil modular cu locomoție omnidirecțională și patru roți cu role dispuse la  $90^\circ$  este prezentată în **Fig. 6.1d**. Roțile sunt acționate de patru servomotoare (M1, M2, M3, M4). **Fig. 6.5a** prezintă o vedere generală a ansamblului fizic al robotului mobil, în timp ce **Fig. 6.5b** prezintă o vedere de sus a robotului pentru a evidenția modularitatea sistemului și posibilitățile de configurare.



**Fig. 6.5** Robot mobil modular cu trei roți omnidirecționale (model real): (a) vedere izometrică; (b) vedere de sus.

Această configurație de robot include următoarele module:

- Un modul principal, care are rolul de comandă și de legătură cu celelalte module;
- Patru module de roți motoare, care au rolul de a conduce robotul;
- Patru roți omnidirecționale cu role dispuse la  $90^\circ$ .

Principalele caracteristici ale platformei robotice sunt prezentate în **Error! Reference source not found.**

Configurația robotului mobil modular cu locomoție omnidirecțională și patru roți mecanum este prezentată în **Fig. 6.1e**. Roțile sunt acționate de patru servomotoare (M1, M2, M3, M4). **Fig. 6.6a** prezintă o vedere generală a ansamblului fizic al robotului mobil, în timp ce **Fig. 6.6b** prezintă o vedere de sus a robotului pentru a evidenția modularitatea sistemului și posibilitățile de configurare.



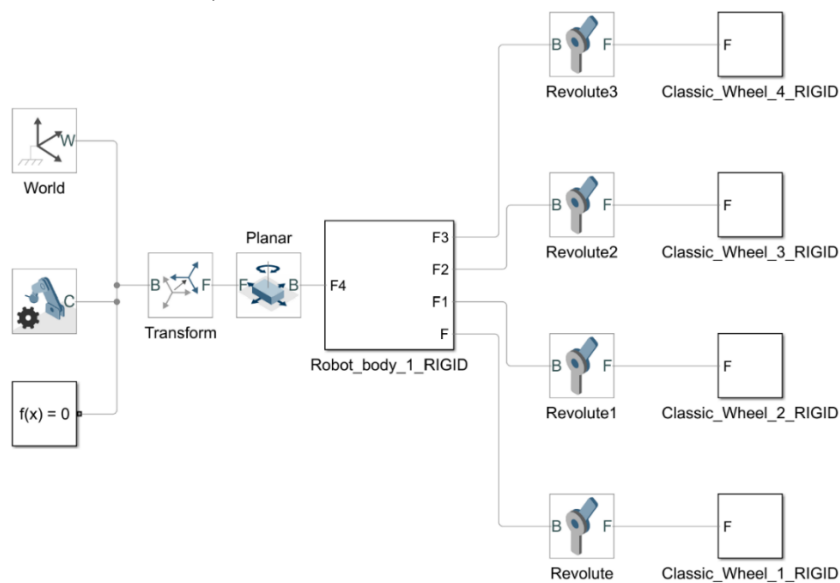
**Fig. 6.6** Robot mobil modular cu patru roți mecanum (model real): (a) vedere izometrică; (b) vedere de sus.

Această configurație de robot include următoarele module:

- Un modul principal, care are rolul de comandă și de legătură cu celelalte module;
- Patru module de roți motoare, care au rolul de a conduce robotul;
- Patru roți omnidirecționale mecanum.

## 6.2. MODELAREA DINAMICĂ A CONFIGURAȚIILOR ROBOTICE

Pentru modelarea robotului mobil, după crearea modelului CAD 3D, s-a realizat exportul în Simulink Simscape. **Fig. 6.7** prezintă rezultatul după import, și anume, întregul model CAD transformat într-un lanț cinematic format din mai multe articulații plane și de rotație, sisteme de coordonate și corpuri rigide.



**Fig. 6.7** Rezultatul importului modelului CAD în Simulink Simscape.

Pornind de la fundamentele teoretice legate de cinematica roboților mobili, s-a realizat legătura dintre variabilele cuplurilor cinematice și pozițiile elementelor cinematice, relațiile fiind stabilite în două etape succesive: problema cinematicii directe și problema cinematicii inverse. În cazul modelului dinamic Simulink al robotului mobil nu este posibilă modelarea legăturii dintre spațiul de lucru și mișcarea roților robotului [64].

Cinematica inversă este necesară pentru acționarea corpului robotului de-a lungul unei anumite traiectorii, rezultând forțe inerțiale. Cinematica directă este necesară pentru acționarea roților, de unde se poate afla valoarea cuplurilor care acționează asupra roților în timpul deplasării (acționării).

În **Fig. 6.8**, **Fig. 6.9**, **Fig. 6.10**, **Fig. 6.11** și **Fig. 6.12** se prezintă modelele dinamice originale ale celor 5 configurații de roboți mobili sub forma unor modele bloc digitale Simulink. Acestea conțin partea de blocuri caracteristice lanțului cinematic ale roboților, blocuri specifice actuatorilor din articulații, blocuri care definesc monitorizarea forțelor și cuplurilor din articulații și blocuri pentru implementarea modelului matematic al cinematicii robotului pentru deplasarea de-a lungul traiectoriei. Totodată, modelele dinamice ale roboților conțin un bloc de calcul care ia în considerare și frecarea dintre roți și suprafața de rulare.



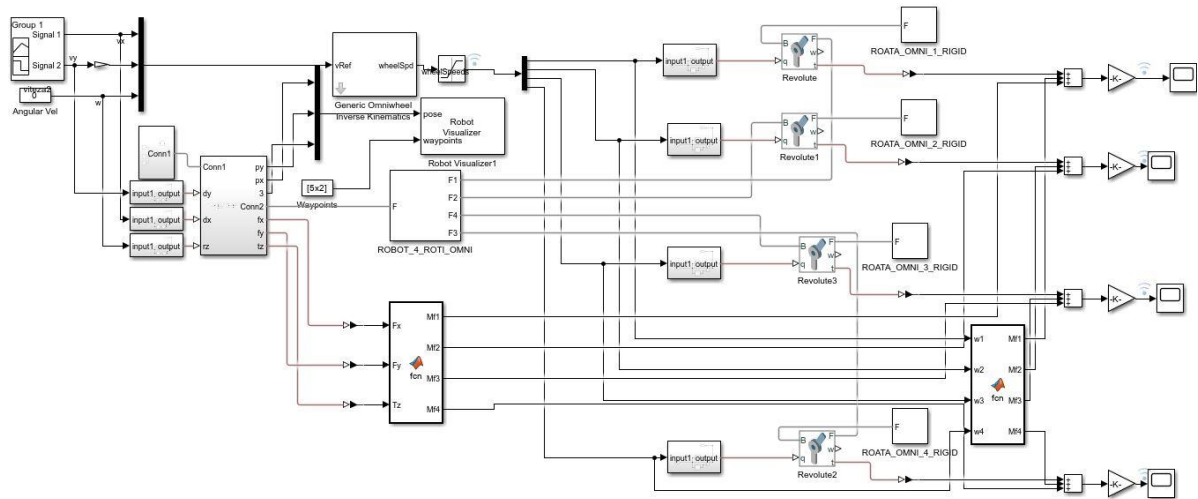


Fig. 6.11 Model dinamic al robotului mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți omnidirecționale.

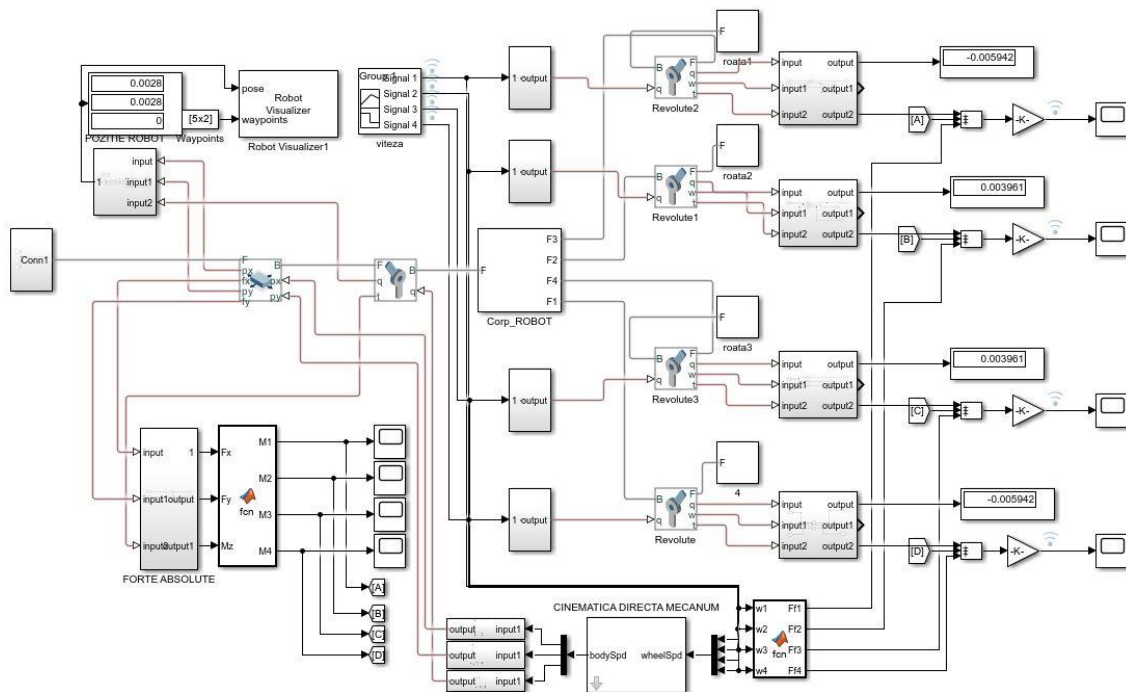
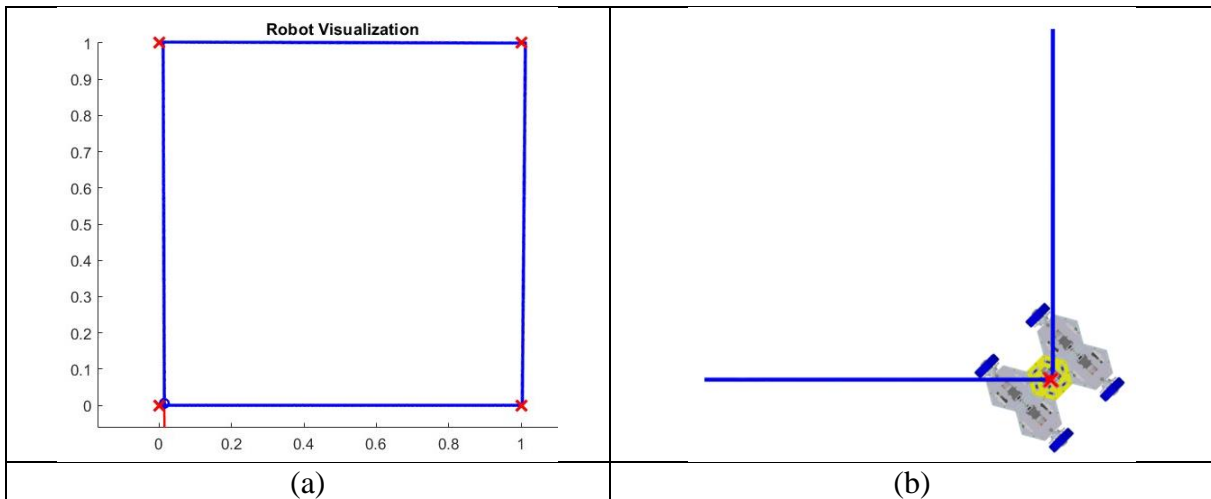


Fig. 6.12 Model dinamic al robotului mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum.

În Fig. 6.13a se prezintă traseul sub forma unui pătrat cu latura de 1 m parcurs de robot în timpul simulării. În Fig. 6.13b se poate observa momentul în care robotul termină deplasarea liniară de 1 m, după care începe să se rotească în jurul centrului de masă cu 90°. Pentru a finaliza întreaga traiectorie, robotul trebuie să efectueze patru mișcări liniare și trei rotații. Pentru a controla robotul a fost utilizat un sistem în buclă deschisă. Au fost efectuate o serie de calibrări prin care au fost măsurate fizic distanța parcursă de robot și unghiul de rotație. Utilizând aceste calibrări, s-au determinat timpii necesari pentru a acționa motoarele robotului pentru deplasarea de 1 m și pentru a efectua o rotație de 90°. Programarea mișcărilor liniare și de rotație pentru întregul traseu a fost realizată în funcție de timp cu ajutorul plăcii Arduino.



**Fig. 6.13** Traiectoria parcursă de robot în simulare: (a) traiectoria rezultată; (b) virarea de  $90^\circ$  a robotului.

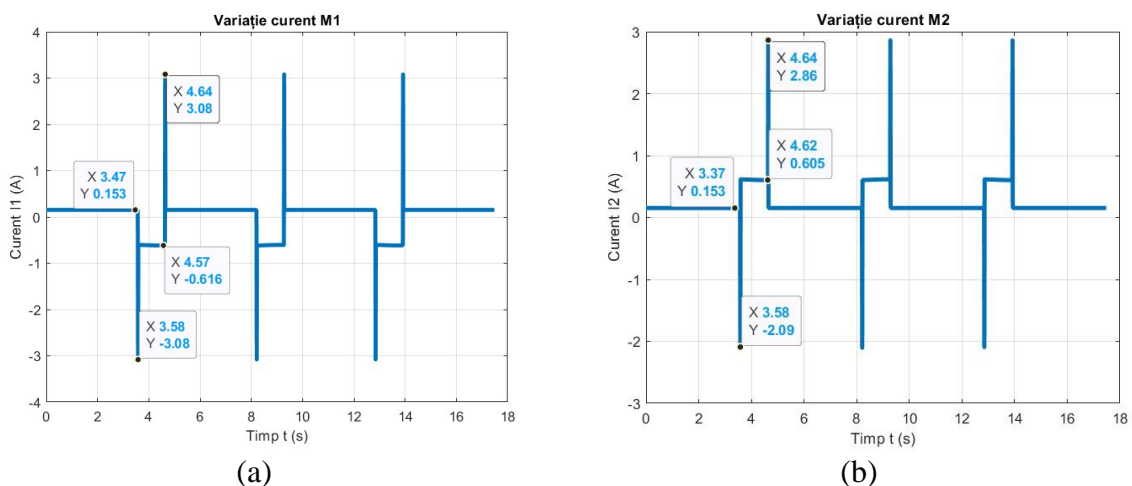
### 6.3. REZULTATE

#### 6.3.1. Simularea modelelor dinamice pentru cele cinci configurații de roboți mobili

Prin simularea modelelor dinamice în mediul de lucru Simulink, au fost determinate cuplurile rezistente la nivelul motoarelor electrice care acționează roțile roboților mobili. Pe baza cuplurilor rezistente determinate, au fost create scheme bloc echivalente cu motorul electric de acționare cu ajutorul Simulink. Utilizând un model virtual cât mai precis posibil al motorului electric de curent continuu, a fost posibilă determinarea curentului absorbit de motoare atunci când robotii parcurg traseul impus.

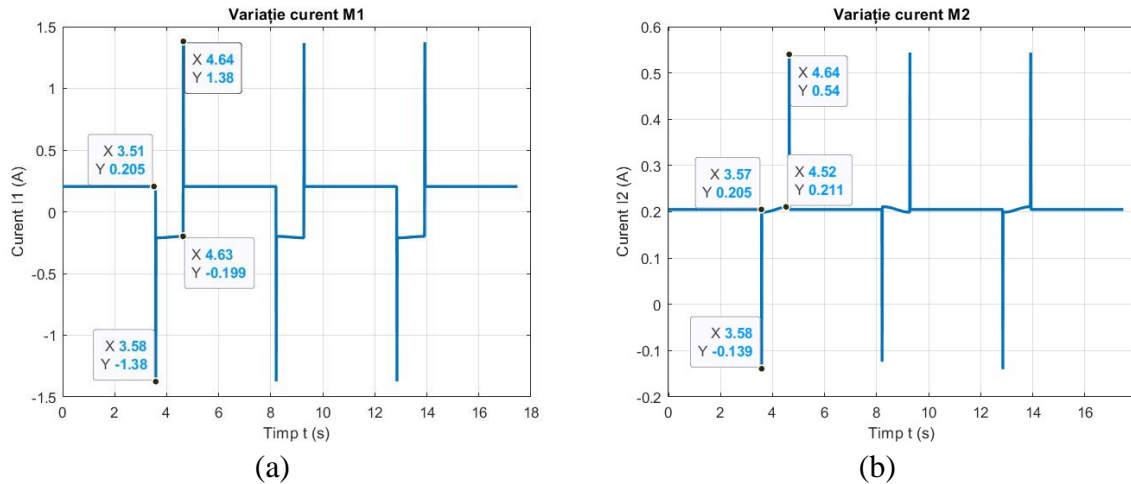
##### 6.3.1.1. Simulare a modelului dinamic al robotului cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale

Curenții variabili absorbiți de servomotoare sunt prezentați în **Fig. 6.14**. Valorile înregistrate pentru roțile 3 și 4 au variații identice cu cele ale roților 1 și, respectiv, 2. Se pot observa cele patru segmente care corespund mișcărilor liniare ale robotului, în care curentul este constant, având valoarea de 0,15 A pentru toate roțile. Curbele au trei zone pentru rotirea cu  $90^\circ$ , în care roțile 1 și 3 inversează rotația (**Fig. 6.14a**, cu un maxim de  $-3,08$  A urmat de o parte constantă de  $-0,61$  A), iar roțile 2 și 4 accelerează (**Fig. 6.14b**, cu un maxim de  $-2,09$  A urmat de o treaptă constantă de  $-0,60$  A).



**Fig. 6.14** Variația curentului determinată în simularea modelului pentru o traiectorie pătrată de 1 m: (a) roata 1 (similar cu roata 3); (b) roata 2 (similar cu roata 4).

6.3.1.2. Simulare a modelului dinamic al robotului cu tracțiune diferențială și două roți convenționale



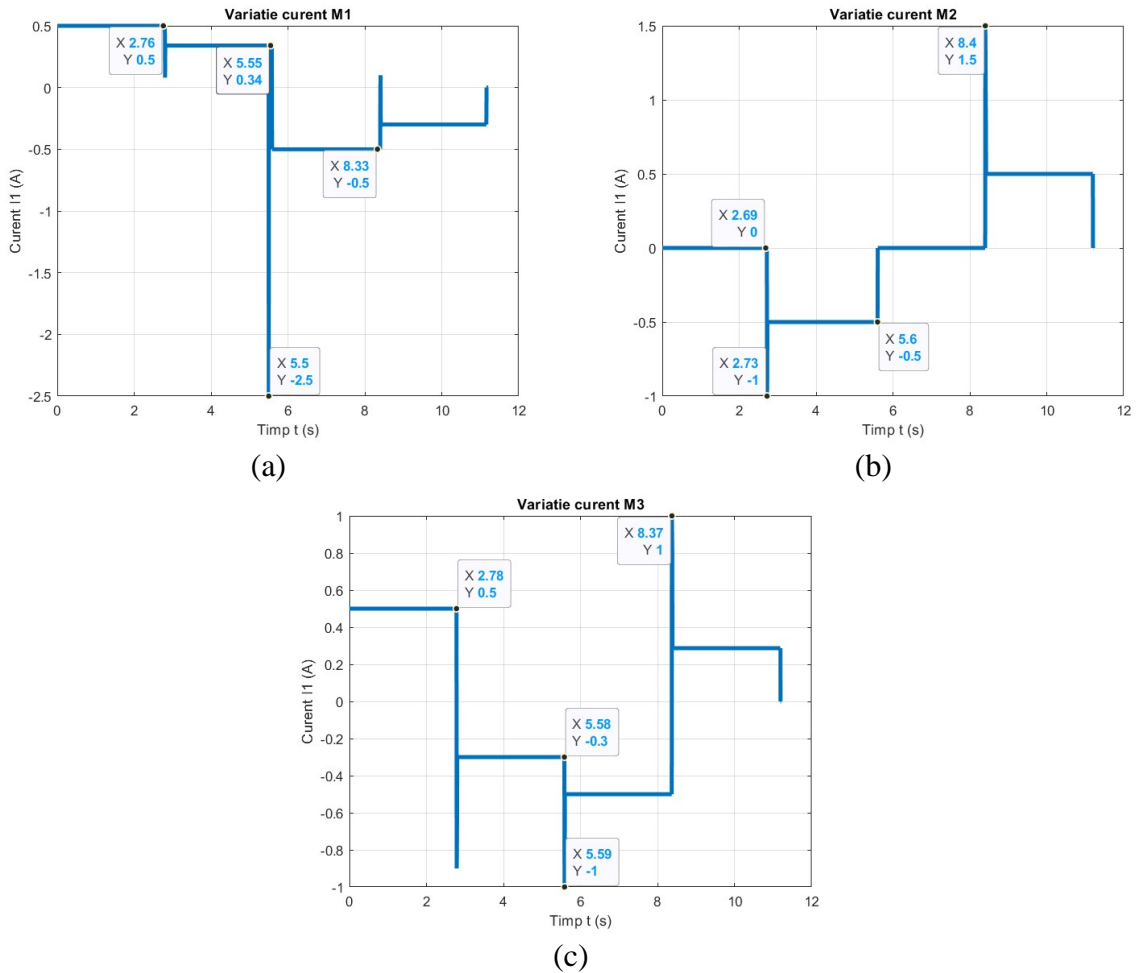
**Fig. 6.15** Variația curentului determinată în simularea modelului pentru o traiectorie pătrată de 1 m: (a) roata 1; (b) roata 2.

Valorile curentului simulat pentru roata acționată de motorul M1 sunt prezentate în **Fig. 6.15a**, iar valorile pentru motorul M2 sunt ilustrate în **Fig. 6.15b**. Se pot observa cele patru segmente care corespund mișcărilor liniare ale robotului, în care curentul este constant, având valoarea de 0,205 A pentru ambele roți. Curbele au trei trepte pentru virarea cu 90°, în care roata 1 își inversează rotația având un maxim de -1,38 A, urmat de o parte constantă de -0,19 A, iar roata 2 accelerează cu un maxim de -0,13 A, urmat de o treaptă constantă de 0,20 A.

6.3.1.3. Simulare a modelului dinamic al robotului cu tracțiune omnidirecțională și trei roți cu role la 90°

Curenții variabili absorbiți de servomotoare în urma simulării sunt prezentați în **Fig. 6.16**. Se observă că în momentul în care robotul începe să se deplaseze în line dreaptă, valorile înregistrate pentru roțile 1 (**Fig. 6.16a**) și 3 (**Fig. 6.16b**) au variații identice, egale cu 0.5 A, în timp roata 2 (**Fig. 6.16c**) este oprită. După ce robotul s-a deplasat 1 metru în line dreaptă, urmează o deplasare laterală, moment în care roata 1 își schimbă sensul de rotație având un vârf de curent maxim de -2.5A. Roata 2 începe să se rotească cu jumătate din viteza roții 1 și 3, având un curent maxim de -1 A, în timp ce roata 3 va avea un curent maxim de -0.8 A.

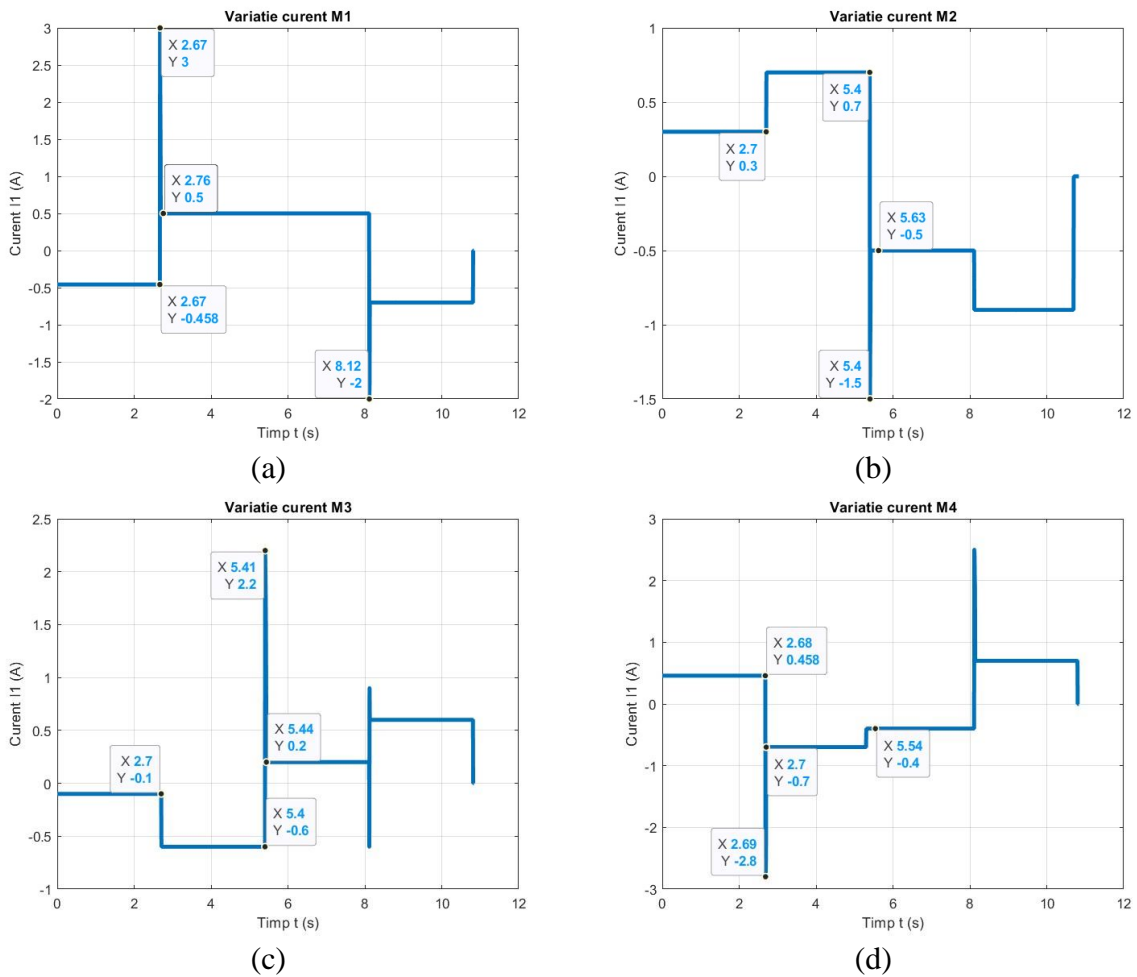




**Fig. 6.16** Variația curentului determinată în simularea modelului pentru o traiectorie pătrată de 1 m: (a) roata 1; (b) roata 2; (c) roata 3.

6.3.1.4. Simulare a modelului dinamic al robotului cu tracțiune omnidirecțională și patru roți cu role la 90°.

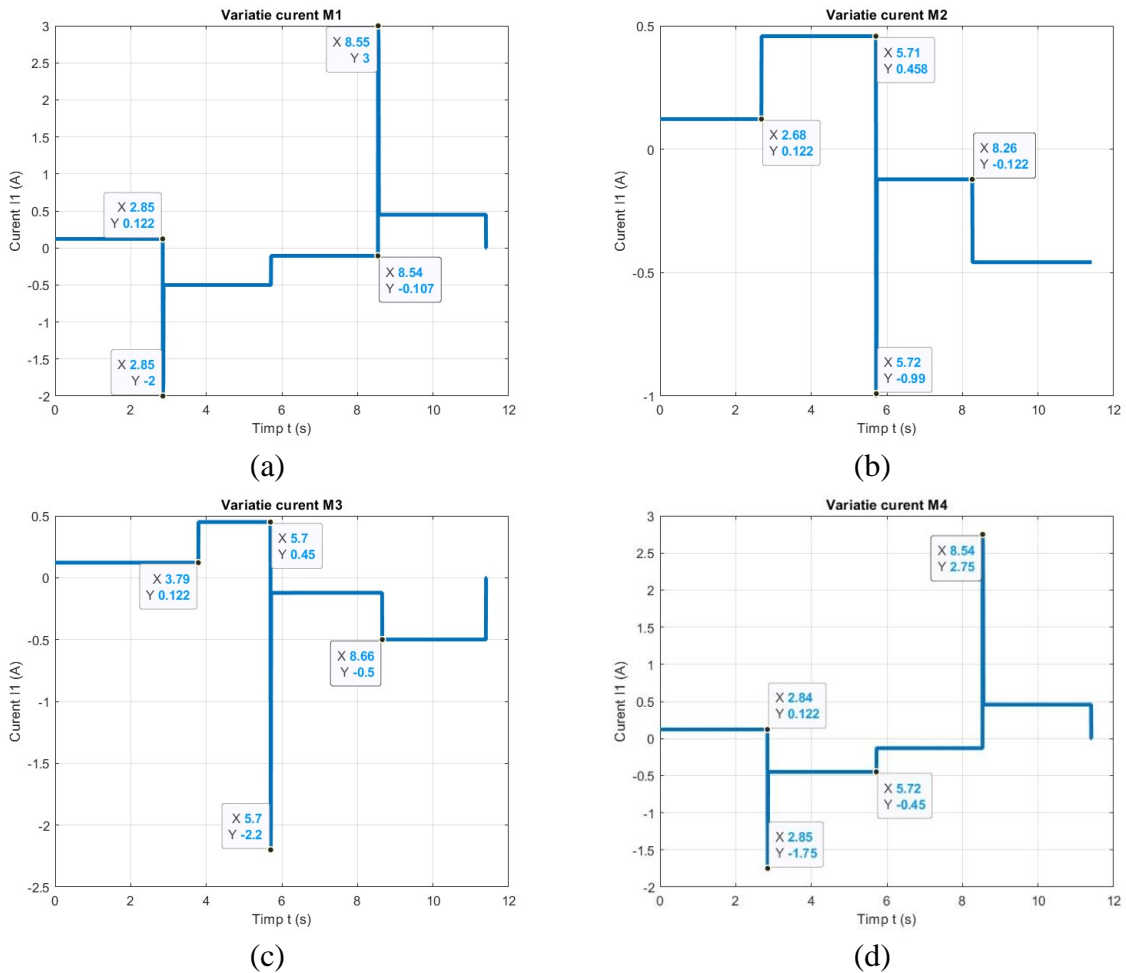
Pentru robotul cu 4 roți și tracțiune omnidirecțională, curenții variabili absorbiți de servomotoare sunt prezentați în **Fig. 6.17**. Se poate observa că, pentru prima deplasare în line dreaptă, valorile înregistrate de roțile 1 (**Fig. 6.17a**) și 4 (**Fig. 6.17d**) sunt egale cu  $-0.45$  A și  $0.45$  A, în timp ce roata 2 (**Fig. 6.17b**) înregistrează o valoare de  $0.3$  A și roata 3 (**Fig. 6.17c**) o valoare de  $-0.1$  A. Urmărind traiectoria, următoarea deplasare este una laterală, unde roata 1 își schimbă sensul de rotație având un vârf de  $2.76$  A, roata 4 se comportă aproape similar având un vârf de  $-2.8$  A. Roțile 2 și 3 nu își schimbă sensul de rotație, având valori de  $0.7$  A, respectiv  $-0.6$  A. În continuare, robotul se deplasează cu spatele, iar aici se poate observa că vârfuri mari de curent sunt absorbite de motoarele ce acționează roțile 2 ( $-1.5$  A) și 3 ( $2.2$  A), în timp ce roțile 1 și 4 au valori maxime de  $-0.5$  A și de respectiv  $-0.4$  A.



**Fig. 6.17** Variația curentului determinată în simularea modelului pentru o traiectorie pătrată de 1 m: (a) roata 1; (b) roata 2; (c) roata 3; (d) roata 4.

### 6.3.1.5. Simulare a modelului dinamic al robotului cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum

În cazul robotului mobil cu tracțiune diferențială și 4 roți mecanum, curenții variabili absorbiți de servomotoare sunt prezentați în **Fig. 6.18**. Se poate observa că pentru prima deplasare în line dreaptă, valorile înregistrate de roțile 1 (**Fig. 6.18a**) și 4 (**Fig. 6.18d**) sunt egale cu valorile roților 2 (**Fig. 6.18b**) și roata 3 (**Fig. 6.18c**) fiind toate de 0.12 A. Urmărind traiectoria, următoarea deplasare este una laterală, unde roata 1 își schimbă sensul de rotație având un vârf de  $-2$  A, roata 4 se comportă aproape similar având un vârf de  $-1.75$  A. Roțile 2 și 3 nu își schimbă sensul de rotație, având ambele aceeași valoare de 0.45 A. În continuare, robotul se deplasează cu spatele, iar aici se poate observa că vârfuri mari de curent sunt absorbite de motoarele ce acționează roțile 2 ( $-0.99$  A) și 3 ( $-2.2$  A), în timp ce roțile 1 și 4 au valori maxime de  $-0.5$  A și de respectiv  $-0.45$  A.



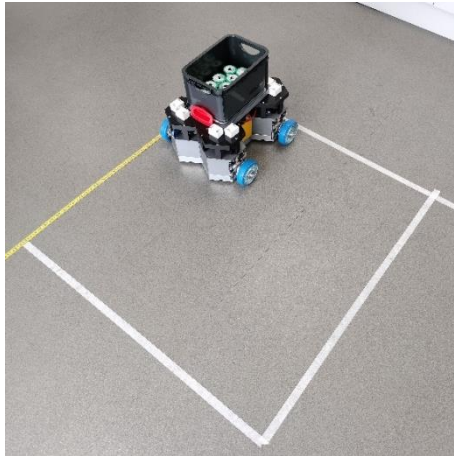
**Fig. 6.18** Variația curentului determinată în simularea modelului pentru o traiectorie pătrată de 1 m: (a) roata 1 mecanum; (b) roata 2 mecanum; (c) roata 3 mecanum; (d) roata 4 mecanum.

### 6.3.2. Validarea experimentală a modelelor simulate

#### 6.3.2.1. Teste experimentale efectuate pe robotul cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale

Validarea experimentală a rezultatelor obținute în urma simulărilor în Matlab Simulink a fost realizată prin monitorizarea curentului consumat de fiecare motor care acționează roțile modelului funcțional al robotului real.

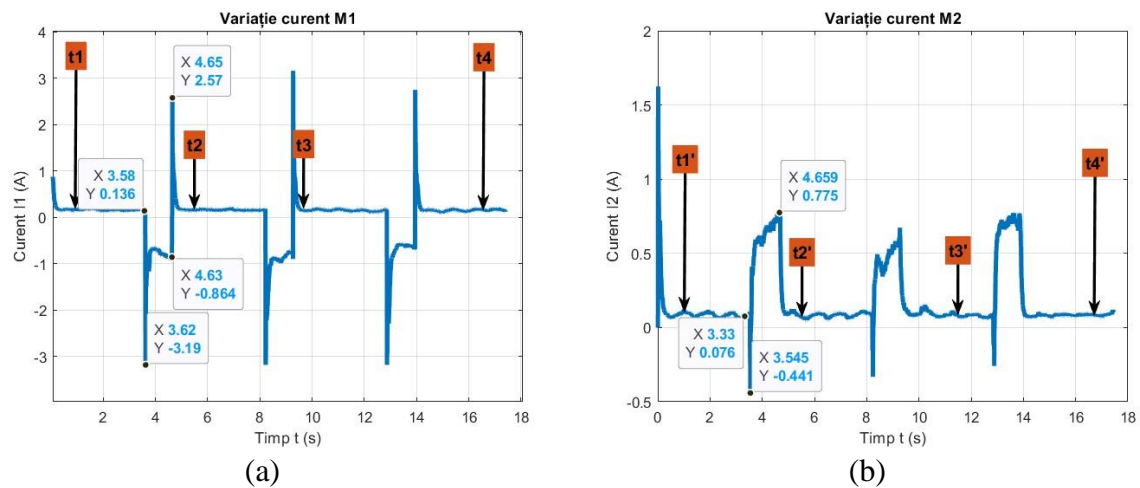
Traseul fizic predefinit (pătrat de un metru) pe care se deplasează robotul este ilustrat în **Fig. 6.19**. Suprafața de rulare este realizată dintr-un material specific mediilor industriale. În timpul testelor, curentul a fost măsurat în timp real cu ajutorul unui multimetru profesional Fluke 115 (**Fig. 6.20**), comparând rezultatul cu curentul măsurat.



**Fig. 6.19** Traseul fizic și robotul mobil real.



**Fig. 6.20** Multimetricu digital Fluke 115.

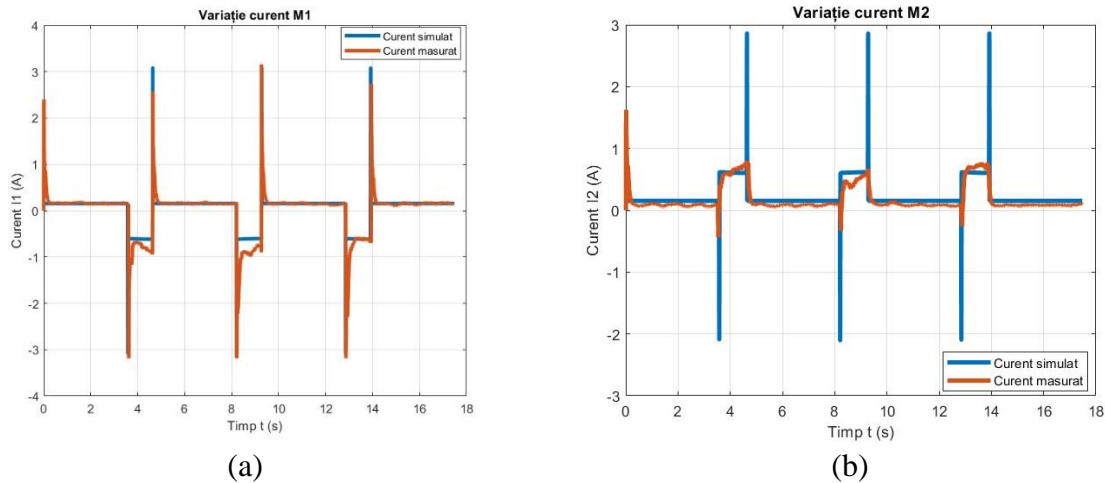


**Fig. 6.21** Variația curentului măsurat cu ajutorul modelului funcțional pentru deplasarea pe traseul redefinit: (a) roata 1 (similară cu roata 3). (b) roata 2 (similară cu roata 4).

**Fig. 6.21** prezintă curbele de variație ale curenților detectați de senzori pe robotul real care se deplasează pe traseu. Pe cele patru segmente care corespund mișcărilor liniare ale robotului, curentul are mici oscilații în jurul unei constante având valoarea de 0,136 A pentru roțile 1 și 3 (**Fig. 6.21 a**) și de 0,07 A pentru toate roțile 2 și 4 (**Fig. 6.21 b**). Curbele au trei trepte pentru rotirea cu  $90^\circ$ , în care roțile 1 și 3 inversează rotația (**Fig. 6.21 a**), pentru prima

rotire există un maxim de  $-3,62$  A și un vârf de  $-0,86$  A), iar roțile 2 și 4 accelerează (**Fig. 6.21 b**), pentru prima rotire există un maxim de  $-0,44$  A și un vârf de  $-0,77$  A).

Conform rezultatelor experimentale obținute în urma monitorizării curentului absorbit de servomotoare pentru parcurgerea traiectoriei impuse, se pot observa o serie de diferențe față de rezultatele obținute prin simularea modelului. **Fig. 6.22** prezintă diferența dintre variația curenților simulați pentru motoarele M1 și M2.



**Fig. 6.22** Variația curentului simulat și măsurat: (a) roata 1 (similar cu roata 3); (b) roata 2 (similară cu roata 4).

În general, variația curentului măsurat urmează forma curbei curentului simulat. Există trepte de curent constant pe segmentele drepte ale traiectoriei atât pentru curenții simulați, cât și pentru cei mășurați. În zonele de viraj la  $90^\circ$ , curentul crește până când se stabilizează la o valoare constantă. Vârfuluri mari sunt cauzate de fenomenele tranzitorii produse în intervale relativ scurte (accelerare, frânare, inversarea sensului de rotație).

### 6.3.2.2. Teste experimentale efectuate pe robotul cu tracțiune diferențială și două roți convenționale

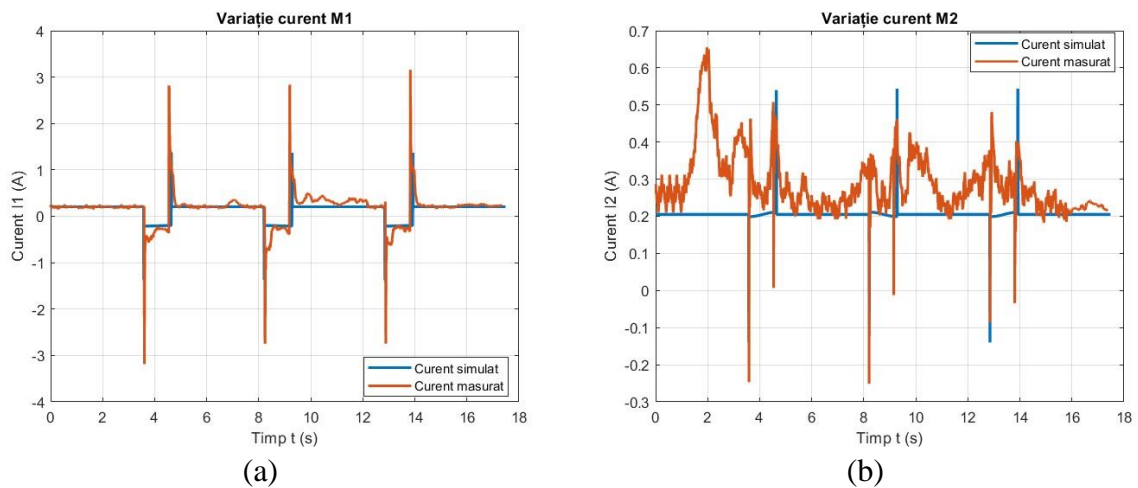
Aceeași metodologie aplicată la configurația robotului mobil cu patru roți motrice a fost aplicată și la configurația cu două roți motrice și tracțiune diferențială, pornind de la modelul CAD 3D, simularea modelului dinamic al robotului și până la testele pe modelul fizic. Acestea din urmă au fost realizate cu ușurință și au fost utilizate pentru validarea sistemului de măsurare și a modelului robotului mobil.

Traectoria fizică pe care se deplasează robotul este ilustrată în **Fig. 6.23**. Este foarte important de precizat că traseul este identic cu cel utilizat în configurația cu patru roți, dimensiunile robotului sunt similare, roțile sunt similare, singura diferență fiind că masa robotului cu două roți este cu 2 kg mai mică decât cea a versiunii cu patru roți.



**Fig. 6.23** Traectoria fizică și robotul mobil real: (a) vedere de aproape; (b) robotul mobil pe traseu.

În **Fig. 6.24**, sunt prezentate comparativ diagramele de curent obținute în urma simulării modelului robotului mobil și cu ajutorul testelor experimentale pentru ambele servomotoare M1 și M2. Analiza acestor grafice arată o abatere standard a curentului simulat fata de cel măsurat de 242.6% pentru motorul M1 și de 24.4% pentru motorul M2.

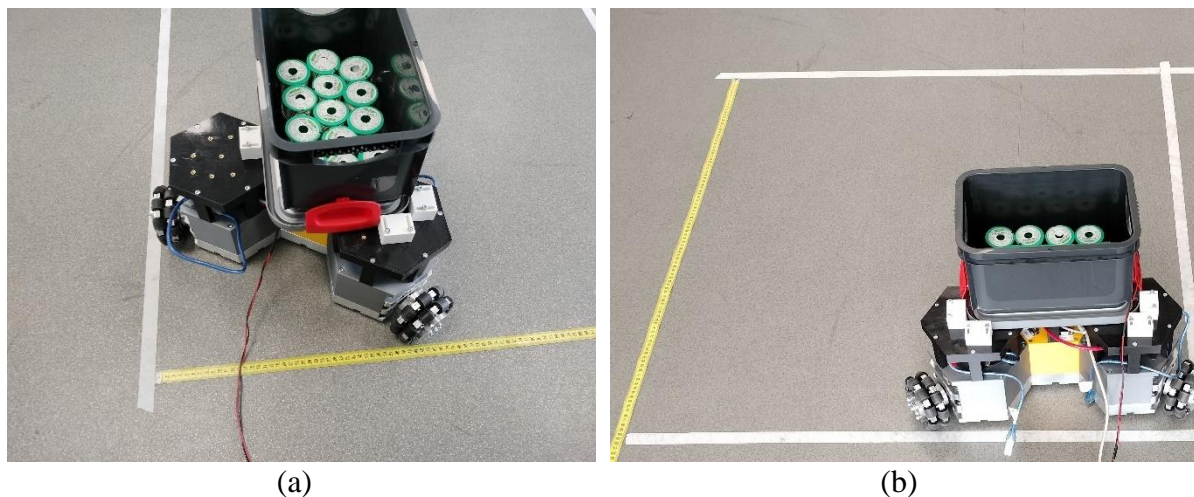


**Fig. 6.24** Variațiile curentului simulat și măsurat: (a) roata 1; (b) roata 2.

### 6.3.2.3. Teste experimentale efectuate pe robotul cu tracțiune omnidirecțională și trei roți cu role la $90^\circ$

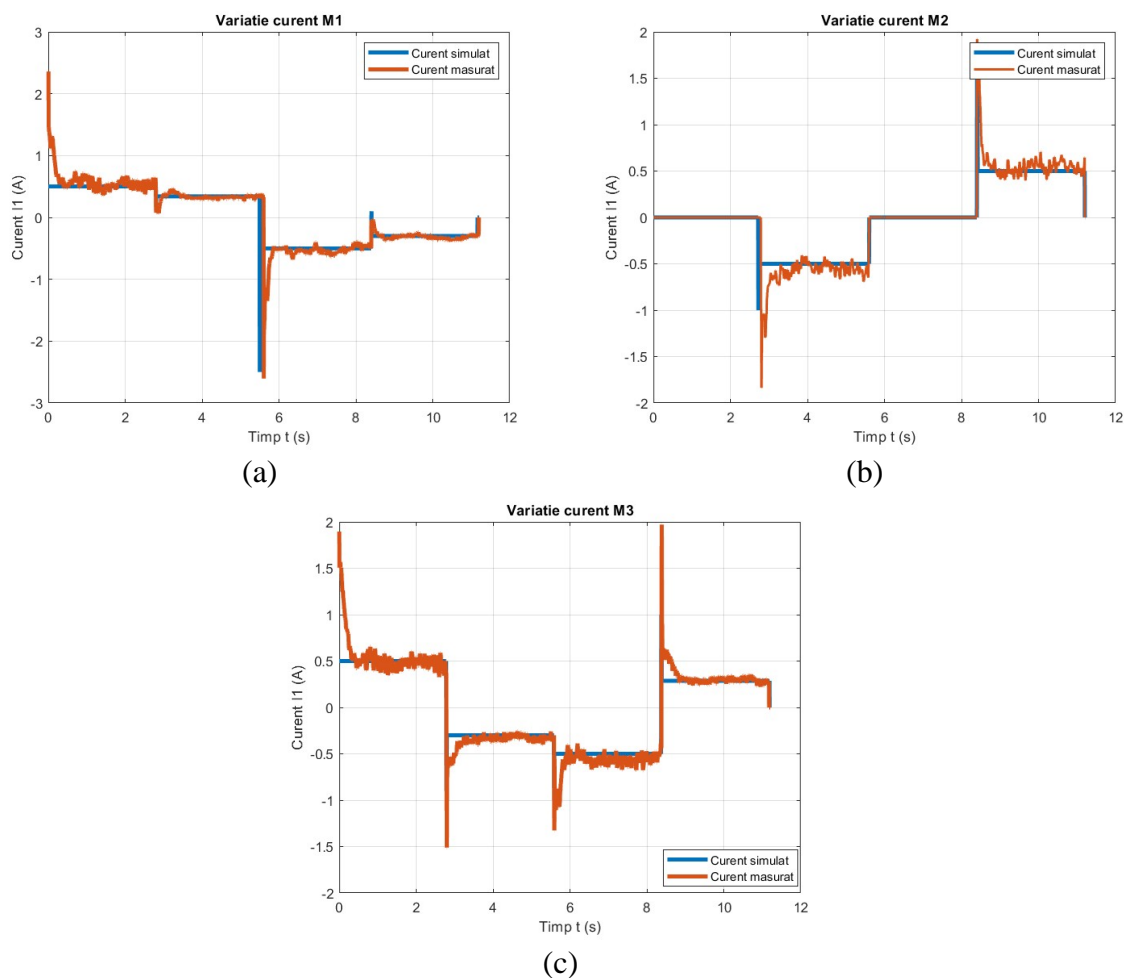
Pentru configurația robotului mobil cu trei roți omnidirecționale s-au folosit 3 module de acționare și modulul principal de comandă. A fost aplicată aceeași metodologie ca și în cazul configurațiilor cu tracțiune diferențială, pornind de la modelul CAD 3D, simularea modelului dinamic al robotului și până la testele pe modelul fizic.

Traectoria fizică pe care se deplasează robotul este ilustrată în **Fig. 6.25**. Este important de precizat că traseul este identic cu cel utilizat în configurațiile cu patru și două roți, convenționale. Dimensiunile robotului în acest caz se schimbă, iar roțile sunt omnidirecționale cu role dispuse la  $90^\circ$ , masa robotului este și ea diferită față de configurațiile cu tracțiune diferențială, masa transportată fiind identică.



**Fig. 6.25** Traiectoria fizică și robotul mobil real cu trei roți omnidirecționale: (a) vedere de aproape; (b) robotul mobil pe traseu.

În **Fig. 6.26** sunt prezentate comparativ diagramele de curent obținute în urma simulării modelului robotului mobil și validate cu ajutorul testelor experimentale pentru servomotoarele M1, M2, respectiv M3.

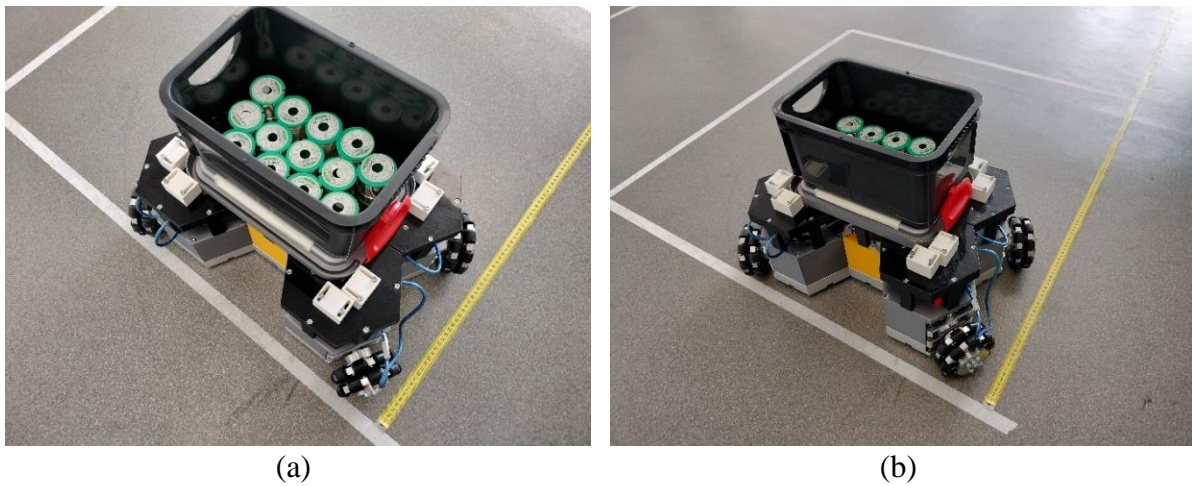


**Fig. 6.26** Variația curentului simulat și măsurat pentru configurația cu trei roți omnidirecționale; (a) roata 1; (b) roata 2; (c) roata 3.

Analiza acestor grafice arată o abatere standard a curentului simulat față de cel măsurat de 14.28% pentru motorul M1, 18.6% pentru motorul M2 și de 16% pentru motorul M3.

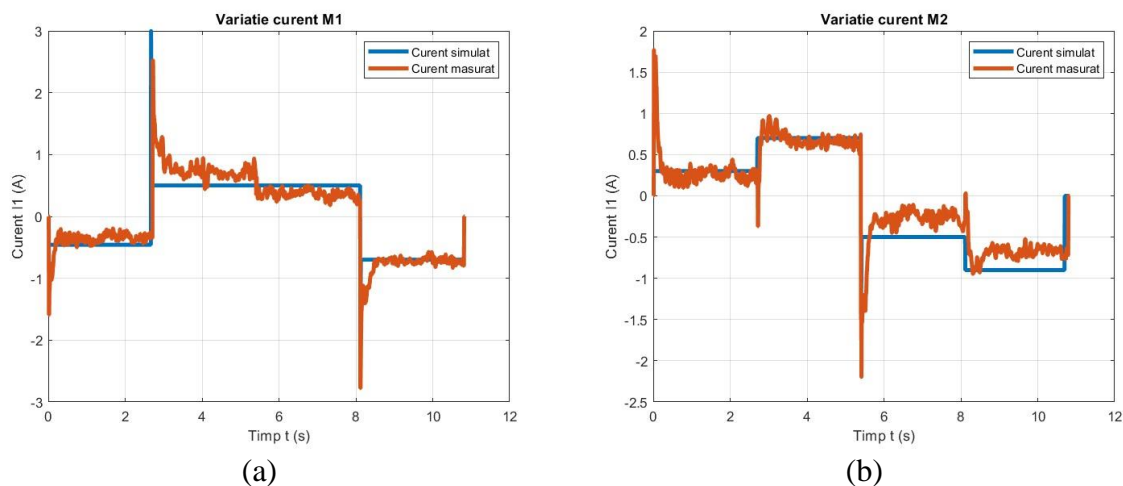
#### 6.3.2.4. Teste experimentale efectuate pe robotul cu tracțiune omnidirecțională și patru roți cu role la $90^\circ$

Pentru configurația robotului mobil cu patru roți omnidirecționale s-au folosit 4 module de acționare și un modul principal de comandă. A fost aplicată aceeași metodologie ca și în cazul configurației cu trei roți omnidirecționale, adică realizarea modelului 3D CAD, simularea modelului dinamic al robotului și teste pe modelul fizic. Traectoria fizică pe care se deplasează robotul este ilustrată în **Fig. 6.27**, cu precizarea că traseul este identic cu cel utilizat pentru configurațiile anterioare. Dimensiunile robotului în acest caz se schimbă, iar roțile sunt omnidirecționale cu role dispuse la  $90^\circ$ , masa robotului este și ea diferită față de configurațiile cu tracțiune diferențială, însă masa transportată este identică.

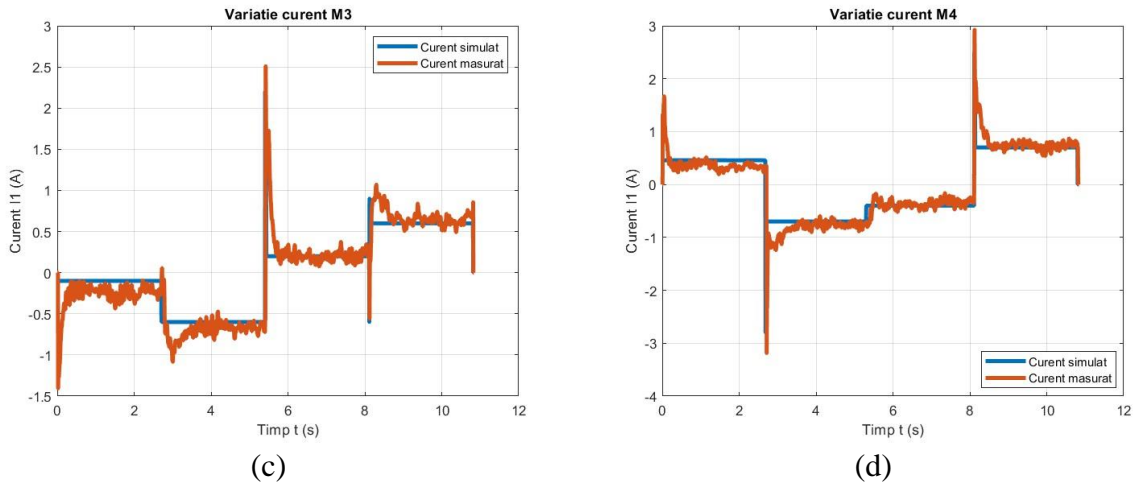


**Fig. 6.27** Traectoria fizică și robotul mobil real cu patru roți omnidirecționale: (a) vedere de aproape; (b) robotul mobil pe traseu.

În **Fig. 6.28** sunt prezentate comparativ diagramele de curent obținute în urma simulării modelului robotului mobil și validate cu ajutorul testelor experimentale pentru servomotoarele M1, M2, M3, respectiv M4.







**Fig. 6.28** Variația curentului simulat și măsurat pentru configurația cu patru roți omnidirecționale: (a) roata 1; (b) roata 2; (b) roata 3; (c) roata 4.

Analiza acestor grafice arată o abatere standard a curentului simulat față de cel măsurat de 28.18% pentru motorul M1, 9.67% pentru motorul M2, 25% pentru motorul M3 și de 11.86% pentru motorul M4.

#### 6.3.2.5. Teste experimentale efectuate pe robotul cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum

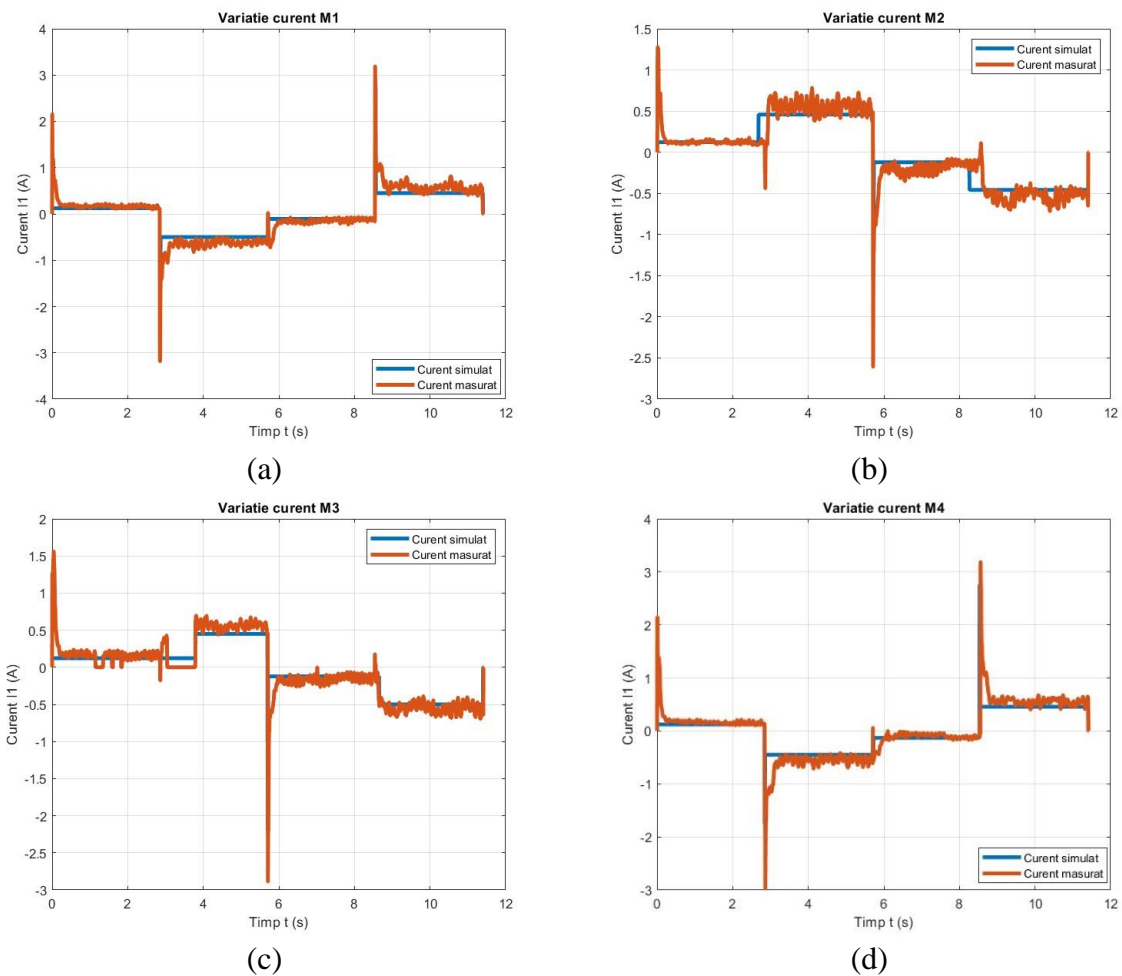
În cazul robotului mobil cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum s-au folosit 4 module de acționare și un modul principal de comandă. A fost aplicată aceeași metodologie ca și în cazul configurației cu patru roți omnidirecționale, adică realizarea modelului 3D CAD, simularea modelului dinamic al robotului și teste pe modelul fizic.

Traectoria fizică pe care se deplasează robotul este ilustrată în **Fig. 6.29**, cu precizarea că traseul este identic cu cel utilizat pentru configurațiile anterioare. Dimensiunile robotului în acest caz se schimbă, iar roțile sunt omnidirecționale cu role dispuse la  $45^\circ$  de tip mecanum, masa robotului este și ea diferită față de configurațiile cu tracțiune diferențială, masa transportată este identică, de asemenea s-a ținut cont la construcția robotului ca masa fiecărui tip de roată să aibă aproape aceeași valoare.



**Fig. 6.29** Traectoria fizică și robotul mobil real cu patru roți mecanum: (a) vedere de aproape; (b) robotul mobil pe traseu.

În **Fig. 6.30** sunt prezentate comparativ diagramele de curent obținute în urma simulării modelului robotului mobil și validate cu ajutorul testelor experimentale pentru servomotoarele M1, M2, M3, respectiv M4.



**Fig. 6.30** Variația curentului simulat și măsurat pentru configurația cu patru roți omnidirecționale: (a) roata 1; (b) roata 2; (b) roata 3; (c) roata 4.

Analiza acestor grafice arată o abatere standard a curentului simulat față de cel măsurat de 35.13% pentru motorul M1, 23.5% pentru motorul M2, 28.12% pentru motorul M3 și de 40% pentru motorul M4.

### 6.3.3. Calculul energiei consumate

Există diferite abordări pentru modelarea energiei în curent continuu [93, 159], cum ar fi:

- metoda inginerescă (integrarea puterii), care se aplică controlerelor cu regenerare;
- metoda costului energiei (integrarea puterii absolute);
- metoda de integrare pozitivă a puterii, aplicată la controlerile fără regenerare.

Pentru prima metodă, energia electrică consumată  $E_e$  se obține prin integrarea puterii motorului electric  $P_{me}$  în funcție de timp:

$$E_e = \int P_{me}(t)dt. \quad (6.1)$$

În cea de-a doua metodă, se utilizează presupunerea conform căreia costul energiei absorbite este proporțional cu puterea sursei. Astfel, în ecuația (6.2) se utilizează modulul puterii sursei:

$$E_e = \int |P_{me}(t)|dt. \quad (6.2)$$

Cea de-a treia metodă este foarte puțin utilizată. Pe baza relației dintre energia  $E$ , puterea  $P$  și timpul  $t$  în curent continuu,  $E = U \cdot t$ , pentru cercetarea de față și pe baza ecuației (6.3), se obține relația energiei consumate:

$$E_e = \int |UI(t)|dt. \quad (6.3)$$

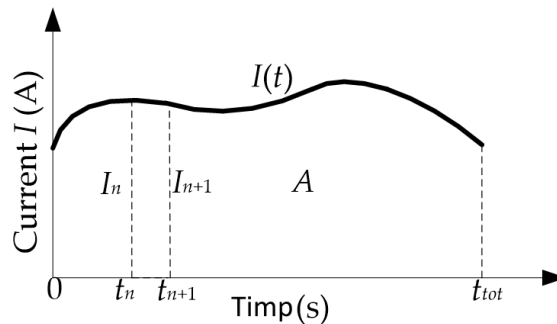
Timpul de eșantionare utilizat în măsurarea curentului cu senzorul Hall este o caracteristică a senzorului și are valoarea  $t_s = 0,005$  s. Numărul total de măsurători este  $n$ . În timpul  $t_{tot} = nt_s$  al măsurării curentului absorbit, când robotul mobil se deplasează de-a lungul traiectoriei, energia totală absorbită se calculează cu ajutorul integralei definite:

$$E_e = U \int_0^{t_{tot}} |I(t)|dt. \quad (6.4)$$

Dacă ne interesează puterea consumată  $P_e$ , atunci relația devine:

$$P_e = \frac{U}{t_{tot}} \int_0^{t_{tot}} |I(t)|dt. \quad (6.5)$$

Practic, valoarea integralei definite este suprafața  $A$  reprezentată schematic în **Fig. 6.31**.



**Fig. 6.31** Calculul integralei definite.

Calculul se poate face prin aproximare folosind metoda trapezoidală ca sumă a suprafețelor trapezoidelor componente:

$$A = \frac{1}{2} t_s \sum_{i=1}^n |(I_i + I_{i+1})| = t_s \sum_{i=1}^n |(I_i)|. \quad (6.6)$$

Dacă se consideră timpul de eșantionare (lățimea pasului infinitezimal) ca fiind raportul  $t_s = t_{tot} / n$ , atunci puterea pe întregul domeniu de măsurare este:

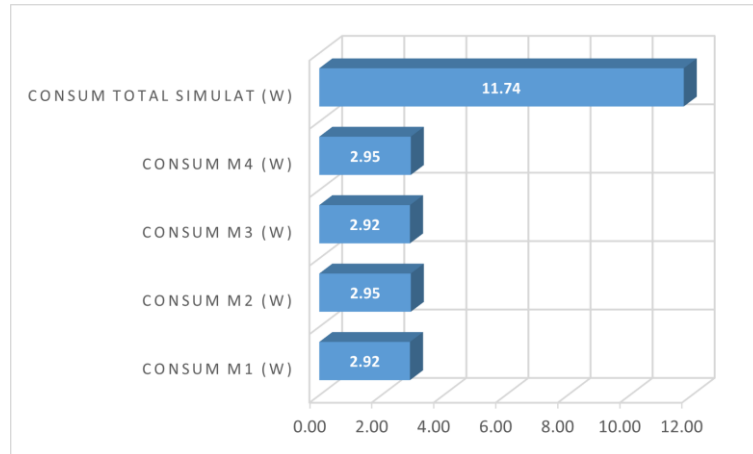
$$P_e = \frac{U}{t_{tot}} \frac{t_{tot}}{n} \sum_{i=1}^n |(I_i)| = \frac{U}{n} \sum_{i=1}^n |(I_i)|, \quad (6.7)$$

care este aproximat ca fiind produsul dintre tensiunea constantă și media curentului măsurat.

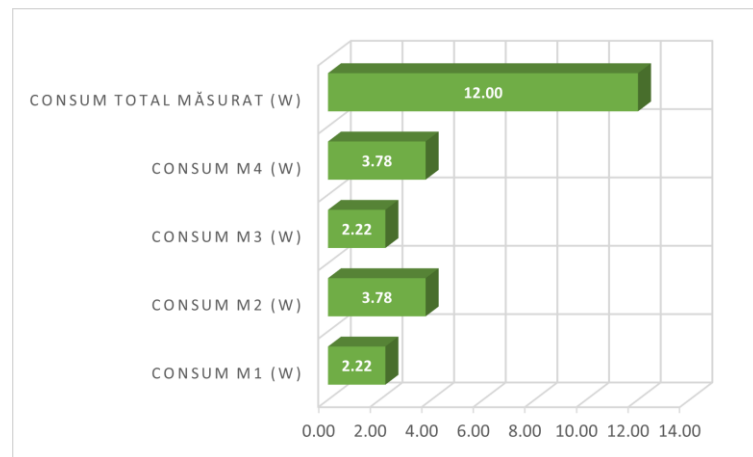
Metodele care sunt mai precise implică aproximarea curentă printr-o curbă spline sau polinoame și prin creșterea numărului de zone componente prin reducerea lățimii pasului infinitezimal. Programul Matlab oferă funcții specializate pentru un calcul mai precis al integralei definite – TRAPZ, CUMTRAPZ.

### 6.3.3.1. Rezultate privind consumul de energie pentru robotul cu tracțiune diferențială și două roți convenționale

Puterea consumată de robotul mobil atunci când se deplasează de-a lungul traiectoriei predefinite este determinată ca sumă a puterilor consumate de toate motoarele ce acționează robotul. Procedura a fost aplicată atât la seturile de date simulate, cât și la cele măsurate pentru fiecare actuator, și pentru fiecare dintre cele 5 configurații de roboți mobili. **Fig. 6.32** prezintă puterea consumată simulată, iar **Fig. 6.33** pe cea măsurată în cazul robotului cu patru roți și tracțiune diferențială.



**Fig. 6.32** Consumul de energie simulat în cazul robotului cu patru roți convenționale.

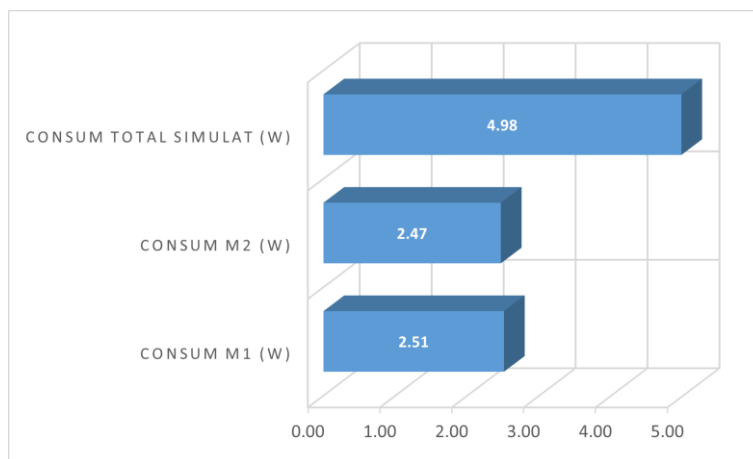


**Fig. 6.33** Consumul de energie măsurat în cazul robotului cu patru roți convenționale.

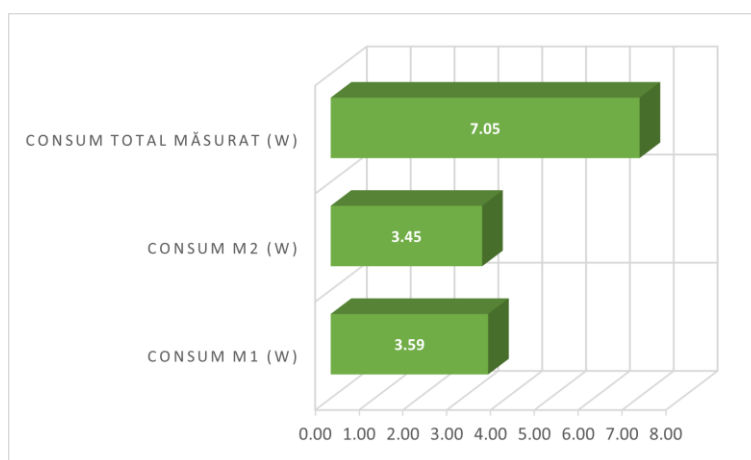
S-a constatat că eroarea relativă a puterii totale consumate determinată în urma simulării este de 2,2%.

### 6.3.3.2. Rezultate privind consumul de energie pentru robotul cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale

Pentru configurația cu două roți convenționale și tracțiune diferențială, consumul de energie este prezentat în **Fig. 6.34** și **Fig. 6.35** pentru puterea simulată și, respectiv, măsurată. Puterea simulată pentru această configurație este estimată cu o eroare de 29,5%.



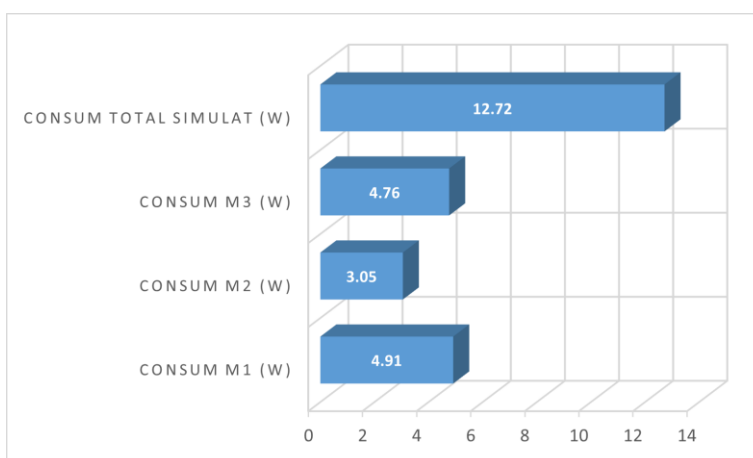
**Fig. 6.34** Consumul de energie simulat în cazul robotului cu două roți convenționale.



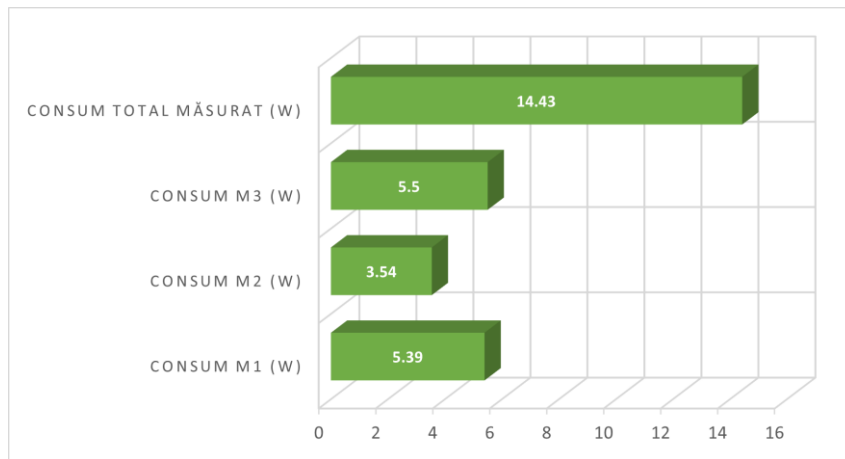
**Fig. 6.35** Consumul de energie măsurat în cazul robotului cu două roți convenționale.

### 6.3.3.3. Rezultate privind consumul de energie pentru robotul cu tracțiune omnidirecțională și trei roți cu role la 90 °

În cazul configurației cu trei roți omnidirecționale cu role dispuse la 90 °, consumul de energie este prezentat în **Fig. 6.36** și **Fig. 6.37** pentru puterea simulată și, respectiv, măsurată.. Puterea simulată pentru această configurație este estimată cu o eroare de 11,85%.



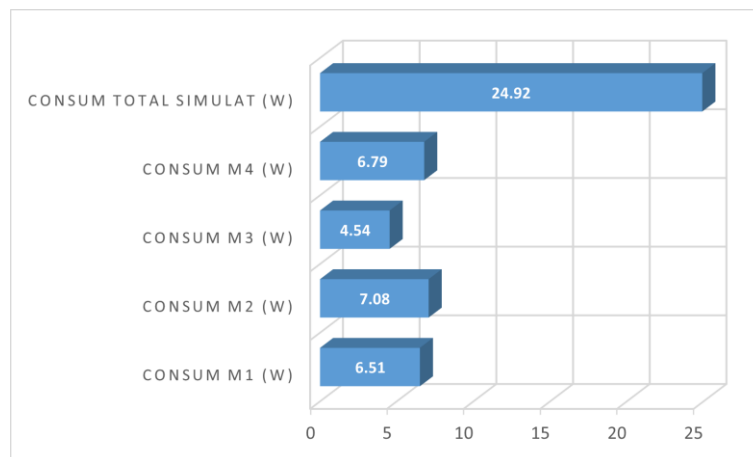
**Fig. 6.36** Consumul de energie simulat în cazul robotului cu trei roți omnidirecționale.



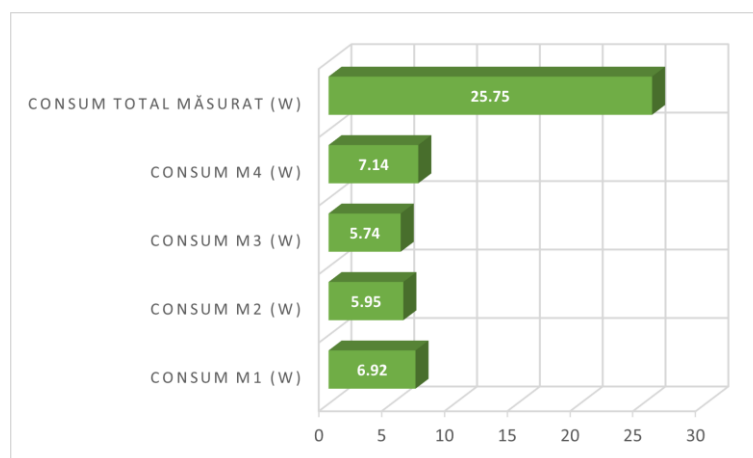
**Fig. 6.37** Consumul de energie măsurat în cazul robotului cu trei roți omnidireționale.

6.3.3.4. *Rezultate privind consumul de energie pentru robotul cu tracțiune omnidirecțională și patru roți cu role la 90 °*

În cazul configurației cu patru roți omnidirecționale cu role dispuse la 90 °, consumul de energie este prezentat în **Fig. 6.38** și **Fig. 6.39** pentru puterea simulată și, respectiv, măsurată. Puterea simulată pentru această configurație este estimată cu o eroare de 2,58%.



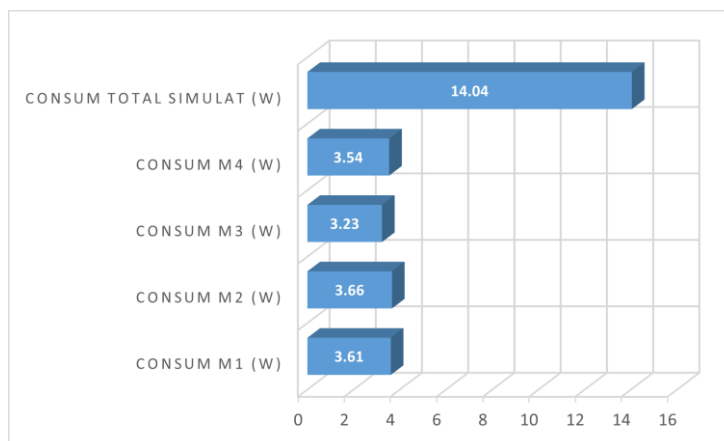
**Fig. 6.38** Consumul de energie simulat în cazul robotului cu patru roți omnidirecționale.



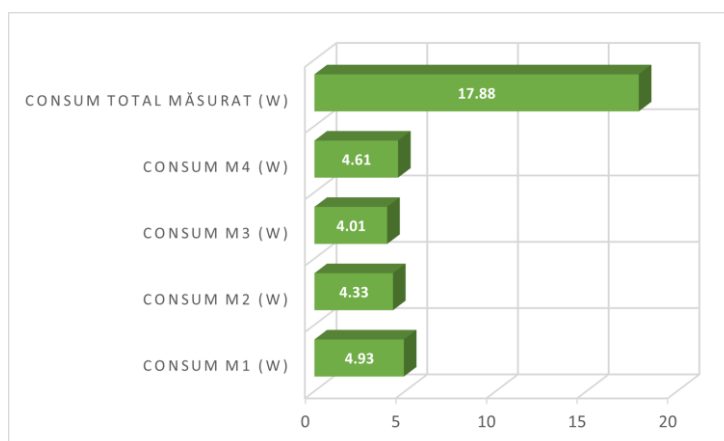
**Fig. 6.39** Consumul de energie măsurat în cazul robotului cu patru roți omnidirecționale.

### 6.3.3.5. Rezultate privind consumul de energie pentru robotul cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum

Pentru configurația cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum, consumul de energie este prezentat în **Fig. 6.40** și **Fig. 6.41** pentru puterea simulată și, respectiv, măsurată. Puterea simulată pentru această configurație este estimată cu o eroare de 20,87%.



**Fig. 6.40** Consumul de energie simulat în cazul robotului cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum.



**Fig. 6.41** Consumul de energie măsurat în cazul robotului cu patru roți omnidirecționale de tip mecanum.

## 6.4. DISCUȚII

Pentru o mai bună interpretare a rezultatelor s-a realizat **Tabelul 6.1** ce prezintă o notație mai scurtă pentru denumirea celor cinci configurații de roboți mobili modulari. Acest lucru fiind util la prezentarea grafică a rezultatelor precum și descrierea în text a acestora.

**Tabelul 6.1** Notații configurații roboți mobili modulari

Denumire configurație	Notație
Robot mobil cu tracțiune diferențială și două roți convenționale	Robot mobil config.1
Robot mobil cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale	Robot mobil config.2
Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și trei roți omnidirecționale	Robot mobil config.3
Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți omnidirecționale	Robot mobil config.4

Este important de precizat faptul că metodologia de creare a modelelor dinamice în Matlab Simulink, pentru toate cele 5 configurații prezentate este aproape identică, utilizându-se aceleași constante și date de intrare.

Comparația rezultatelor obținute la măsurarea curentului absorbit de motoarele electrice din configurația cu patru roți cu ajutorul senzorului Hall și a multimetrului, indică valori apropiate pentru măsurătorile efectuate în același timp. Erorile pentru motorul M1 variază între 0,38% și 2,48%, cu o medie de 1,88%, iar pentru M2 între 4,58% și 13,75%, cu o medie de 9,56%. Astfel, sistemul fizic de măsurare a curentului este validat.

Din analiza variației dintre curentul simulat și cel măsurat pentru cele cinci configurații ale platformei mobile modulare, se pot trage următoarele concluzii:

Pentru configurația cu patru roți valoarea erorilor medii simulate față de cele măsurate a motoarelor M1 și M3, este mai mică de 1 %, iar pentru M2 și M4, aceasta este de 41,6 %. Maximele și minimele prezintă diferențe mai mari. În general, există diferențe mai mari între curenții simulați și cei mășurați pentru motoarele M2 și M4.

Pentru configurația cu două roți se observă un comportament similar cu cel al configurației cu patru roți, valoarea erorii medii fiind este de 1,4% pentru motorul M1, iar pentru motorul M2, eroarea este de 24,6%. În cazul acestei versiuni, există diferențe mai mari între curenții simulați și cei mășurați pentru motorul M2.

În cazul configurației cu 3 roți omnidirecționale și role dispuse la 90°, valorile medii ale erorilor între curentul simulat și cel măsurat, pentru motorul M1 valoarea medie a erorii este de 5,4%, pentru M2 de 6% și pentru M3 de 11,13%. Pentru acesta configurație cu tracțiune omnidirecțională eroarea cea mai mare între curentul simulat și cel măsurat este cea a motorului M3. Erorile între curenții simulați și cei mășurați pentru configurația cu 4 roți omnidirecționale și role dispuse la 90°, sunt: Eroarea cu valoarea de 13,9% este cea mai ridicată și este cea a motorului M4. Pentru motorul M3 valorarea erorii este de 4,71%, pentru M2 de 11,17% și pentru M1 de 2,97%. Diferențelor dintre valorile simulate și măsurate ale curentului absorbit de cele patru servomotoare pentru configurația cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum, sunt : Eroarea cu valoarea de 12,6% este cea mai ridicată și este cea a motorului M2. Pentru motorul M1 valorarea erorii este de 9,51%, pentru M3 de 0.19% și pentru M4 de 4,59%.

Dacă comparăm curbele de curent simulate pentru toate cele cinci configurații ale platformei mobile se pot face câteva observații.

S-a constatat că există diferențe foarte mici în zonele de mișcare liniară pentru toate configurațiile. În general, diferențele provin în mod cert din aproximarea coeficientului de frecare roată-sol în model, în special pentru configurațiile omnidirecționale fiind destul de dificil de determinat. Diferențe mai mari există numai în zonele de viraj, unde curentul măsurat prezintă variații (vârf mare urmat de oscilații). Prin comparație, în timpul virajelor, curba curentului simulat este formată dintr-un vârf și o zonă constantă. Aceste variații mari sunt vârfurile instantanee de curent cu o durată de câteva milisecunde. Consumul total de energie al robotului pentru parcurgerea traiectorie nu va fi influențat în mod semnificativ de aceste vârfuri ce au o durată extrem de mică. Acestea apar de obicei la schimbarea sensului de rotație a motorului de acționare, la accelerări sau decelerări bruște ale robotului.

Diferențele dintre curenții simulați și cei mășurați pot avea următoarele cauze posibile:



- Aproximarea momentelor de inerție pe modelul Simulink. Poate fi legată de valoarea momentului de inerție sau de poziția centrului de masă al modelului robotului.
- Aproximație a coeficientului de frecare dintre roata robotului și suprafața de rulare.
- Variațiile curentului simulat în fazele tranzitorii de accelerare sau de frânare pot fi cauzate de modelul fenomenelor de frecare la schimbarea direcției de deplasare a robotului sau de variațiile de viteză în cazul alunecării roților la sol.
- Variațiile mai mari (vârfuri) pentru curentul simulat ar putea fi produse de setările blocurilor din modelul Simulink.
- Posibilele diferențe dintre traiectoriile fizice și cele simulate pot fi atribuite lipsei controlului poziției în modelul funcțional.

## 6.5. CONCLUZII

În urma analizării rezultatelor obținute se observă că cea mai mare diferență dintre curenții simulați și cei mășurați este de aproximativ 24,6% pentru configurația cu tracțiune diferențială și două roți convenționale. Cea mai mică diferență se înregistrează pentru configurația cu patru roți mecanum, având o valoare de 0.19%. S-a constatat că există diferențe foarte mici în zonele de mișcare liniară pentru toate configurațiile. În general, diferențele provin în mod cert din aproximarea coeficientului de frecare roată-sol în modelul dinamic, acesta fiind destul de dificil de determinat pentru configurațiile omnidirecționale. Diferențe mai mari există numai în zonele de viraj, unde curentul măsurat prezintă variații (vârf mare urmat de oscilații). Astfel, modelul dinamic este validat experimental, având posibilitatea de a se calcula energia consumată pentru traiectoria impusă ce este similară cu cea folosită și în cercetările preliminare.

Modelul dinamic propus reprezintă un instrument precis ce oferă informații pentru determinarea celei mai eficiente configurații din punct de vedere energetic dintre cele 5 configurații prezentate pentru parcurgerea unei traiectorii impuse.

## **CAP. 7. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE**

### **7.1. CONCLUZII GENERALE**

Teza de doctorat intitulată "Creșterea performanțelor roboților mobili și a vehiculelor ghidate autonom ce deservește mediului industrial" are ca obiectiv creșterea performanțelor roboților mobili și a vehiculelor ghidate autonom ce deservește mediului industrial. În urma analizei stadiului actual în domeniu s-au identificat principalele caracteristici și parametri de performanță ai roboților mobili. Teza a urmărit abordarea unei caracteristici importante, și anume modularitatea. Caracteristica de modularitate a permis realizarea mai multor structuri de roboți mobili cu un cost redus. Acest lucru a permis realizarea unor cercetări ce vizează reducerea consumului energetic al roboților mobili. Pentru atingerea acestor obiective s-au realizat cercetări teoretice și experimentale din care rezultă următoarele concluzii:

- Roboții mobili și vehiculele ghidate autonom sunt într-o continuă evoluție, existând un număr mare de publicații recente în acest domeniu. Cele mai semnificative publicații din perioada 2019-2023 au fost prezentate în stadiul actual al cercetării sub formă tabelară.
- În urma modelării cinematice și dinamice a sistemului de locomoție al platformei mobile modulare, s-au determinat modelele cinematice și dinamice pentru o serie de cinci configurații de roboți mobili.
- Pe baza rezultatelor obținute în urma calculelor pentru alegerea motorului electric de acționare al platformei modulare s-a ales un servomotor cu performanțe ridicate ce poate fi folosit în mai multe configurații de structuri robotice.
- Modelarea 3D a platformei modulare s-a realizat cu ajutorul softului Solidworks, realizându-se două concepte. Primul concept a fost dezvoltat în urma unor analize din punct de vedere al realizării fizice, astfel s-a ajuns la conceptul cu numărul 2.
- Al doilea concept de model CAD prezintă o serie de 4 module, ce au posibilitatea de a forma o serie de configurații robotice.
- Placa de dezvoltare Arduino Mega integrată în modulele roților de acționare ale robotului mobil se bazează pe un microcontroler Atmega328 și pe un convertor analog-digital (ADC) integrat cu o rezoluție de 10 biți. În urma cercetărilor experimentale preliminare, s-a constatat că această placă de dezvoltare are o serie de limitări hardware. S-a încercat evitarea acestora cu ajutorul unor algoritmi software. Rezultatele nu au fost eficiente, astfel încât a fost integrat un modul ADNS 1115 extern cu o rezoluție de 16 biți pentru a înlocui ADC-ul intern al plăcii de dezvoltare.

- Pe baza rezultatelor experimentale metoda propusă de măsurare a curentului în timp real a fost validată, aceasta fiind necesară pentru mai multe etape ale cercetării și, de asemenea, pentru utilizarea robotului și pentru cercetări viitoare.
- În urma cercetărilor preliminare efectuate pe un robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum, obiectivul principal a fost dezvoltarea unor modele bloc digitale dinamice eficiente, care să permită studierea comportării platformelor robotice mobile autonome la deplasarea pe traiectorie impusă
- Validarea modelelor propuse a fost realizată prin compararea rezultatelor simulării cu cele experimentale. Pentru această comparație, au fost aleși curenții absorbiți de motoarele care acționează roțile robotului, în principal datorită ușurinței cu care pot fi măsurați experimental.
- Comparația dintre valorile experimentale și cele simulate a demonstrat acuratețea diagramelor de simulare obținute.
- Cu ajutorul schemelor de simulare propuse, a fost studiat comportarea robotului mobil la deplasarea pe traiectorii pătrate. Simulările au demonstrat că avantajele roților mecanum vin împreună cu dezavantajul unor valori ridicate ale curenților absorbiți de motoarele de acționare a roților, în varianta utilizării soluției de acționare bazată pe motoare de curent continuu comandate prin intermediul impulsurilor de tensiune PWM.
- În urma cercetărilor preliminare, se poate observa că modelul dinamic al robotului mobil omnidirecțional cu roți mecanum realizat în Matlab Simulink și validat experimental poate estima consumul energetic al robotului în funcție de traiectoria parcursă. Astfel, s-a trecut la continuarea cercetărilor pentru alte tipuri de roboți mobili și în vederea determinării influenței structurii robotice și a sistemului de locomoție asupra consumului energetic al robotului.
- Pentru a crea modelul dinamic al robotului a fost utilizat mediul de lucru Simulink-Simscape-Multibody. Modelul permite determinarea valorilor cuplurilor rezistente la nivelul cuplurilor cinematice ale robotului mobil atunci când acesta parcurge o traiectorie predefinită.
- Cunoscând evoluția cuplului la nivelul axei motorului, se poate determina curentul electric absorbit de fiecare servomotor din structura robotului la parcurgerea traiectoriei impuse. Astfel, pe baza curentului determinat cât mai precis se pot utiliza algoritmi de optimizare specifici pentru diferite moduri de parcurgere a unei traiectorii, astfel încât consumul de energie electrică să fie minimizat.
- Prin simularea modelelor dinamice în mediul de lucru Simulink, au fost determinate cuplurile rezistente la nivelul motoarelor electrice care acționează roțile roboților mobili. Pe baza cuplurilor rezistente determinate, au fost create scheme bloc echivalente cu motorul electric de acționare cu ajutorul Simulink.
- Validarea experimentală a rezultatelor obținute în urma simulărilor în Matlab Simulink a fost realizată prin monitorizarea curentului consumat de fiecare motor care acționează roțile modelului funcțional al robotului real. Acest lucru s-a realizat prin integrarea senzorului ACS712-05 și a modului ADNS 1115 în sistemul de acționare. Datele obținute după achiziție au fost interpretate și analizate.
- În urma analizării rezultatelor obținute se observă ca cea mai mare diferență între curenții simulați și cei măsurați este de aproximativ 24,6% pentru configurația cu

tracțiune diferențială și două roți convenționale. Cea mai mică diferență fiind pentru configurația cu patru roți mecanum având o valoare de 0.19%.

- În urma acestor analize rezultă faptul că modularitatea oferă flexibilitate ridicată și contribuie și la reducerea consumului energetic cu până la 70% în funcție de configurația aleasă pentru parcurgerea traiectoriei impuse. Modelul dinamic propus poate reprezintă un instrument care prin simulări și comparare conduce la soluția cea mai eficientă energetic dintre cele 5 configurații prezentate pentru parcurgerea unei traiectorii impuse.

Teza de doctorat soluționează toate obiectivele formulate inițial, prin abordări originale atât la nivel conceptual și de modelare, cât și la nivel practic, prin realizarea de modele fizice funcționale, realizându-se o bună corelare între modelare și simulare și testele experimentale. Rezultatele obținute sunt specifice sistemelor robotice studiate, dar au și caracter de generalitate, creând-se premisele pentru unele dezvoltări ale domeniului prin cercetări viitoare.

## 7.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

### Studiul stadiului actual

- S-a prezentat succint în ordine cronologică evoluția roboților mobili autonomi prin prisma celor mai importante publicații între anii 1991-2022.
- Analizarea literaturii de specialitate din perioada 2018-2023, ce prezintă aspecte legate de: navigația roboților mobili, locomoția diferențială, locomoția omnidirecțională, caracteristici generale ale roboților mobili autonomi.
- Analizarea literaturii de specialitate din perioada 2018-2023, ce prezintă procedee de monitorizarea consumului energetic al roboților mobili utilizând senzori de curent Hall.
- Analizarea literaturii de specialitate din perioada 2018-2023, ce prezintă aspecte legate de roboți mobili modulari și reconfigurabili.
- Analizarea literaturii de specialitate din perioada 2018-2023, ce prezintă modelarea dinamică și controlul roboților mobili utilizând Matlab Simulink.
- Analizarea literaturii de specialitate din perioada 2018-2023, ce prezintă aspecte legate de modelarea și estimarea consumului energetic al roboților mobili.

### Cercetări preliminare

- Determinarea soluției de acționare a platformei mobile utilizând metoda de luare a deciziilor multicriterială, bazată pe AHP.
- Modelarea cinematică a unei platforme mobile, utilizând blocuri care permit implementarea cinematicii mecanum pe patru roți și a cinematicii diferențiale.
- Realizarea modelului dinamic în Matlab Simulink, utilizând blocuri specifice Simscape, cât și prin blocuri create de utilizator.
- Validarea modelelor propuse prin compararea rezultatelor simulării cu cele experimentale.
- Comparare între valorile simulate și cele experimentale ale curenților absorbiți de motoarele electrice.

### Conceptul original al unei platforme mobile modulare, cu aplicații pentru o serie de 5 configurații utilizate în cercetare:

- Concept și proiectare module de forma hexagonală ce au rol de : control, acționare, locomoție și alimentare cu energie electrică.

- Realizarea modulelor prin fabricație aditivă sau prelucrare prin așchiere.
- Alegerea și verificarea motoarelor electrice pentru modulul de acționare
- Integrearea senzorilor de curent Hall și a plăcilor de achiziție Arduino.
- Asamblarea și verificarea funcționării pentru 5 configurații de roboți mobili.
- Robot mobil cu tracțiune diferențială și două roți convenționale.
- Robot mobil cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale.
- Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și trei roți omnidirecționale.
- Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți omnidirecționale.
- Robot mobil cu tracțiune omnidirecțională și patru roți mecanum.
- Datorită modularității se pot realiza structuri de roboți mobili ce au cost redus reutilizând module de la alte configurații.

**Modelare dinamică utilizând Matlab Simulink pentru determinarea consumului de energie al unei platforme mobile modulare având o serie de 5 configurații de roboți mobili modulari:**

- Realizare modele dinamice în Matlab Simulink pentru fiecare configurație în parte.
- Utilizarea modelului dinamic pentru a determina cuplurile rezistente în articulațiile cinematice la deplasarea pe o traiectorie pătrată cu latura de 1 m.
- În timpul deplasării pe traiectorie, se înregistrează valorile simulate ale curenților absorbiți de fiecare motor în parte.

**Teste experimentale pe modelul fizic funcțional în vederea validării modelelor Simulink:**

- Dezvoltarea unui sistem electric pentru acționarea roților robotului și monitorizarea curentului absorbit la un cost redus.
- Utilizarea unei metode experimentale de monitorizare a curentului furnizat de un senzor Hall integrat în modulul de acționare al configurației robotice. Sistemul se bazează pe un senzor de curent Hall bidirecțional ACS712-05Hall și pe achiziția de date de la senzor cu ajutorul unei plăci Arduino Mega 2560.
- Pentru a monitoriza și interpreta datele în timp real, a fost creat un model digital Simulink al curentului furnizat de senzor, care a fost ajustat și îmbunătățit după validarea experimentală cu ajutorul unui multimetru digital de ultimă generație.

**Compararea rezultatelor simulate cu cele experimentale obținute pentru cele 5 configurații:**

- Modele create în Simulink au fost simulate pentru parcurgerea aceluiași traseu în aceleași condiții pentru toate cele 5 configurații.
- Măsurătorile experimentale au fost efectuate pe modele funcționale în aceleași condiții.
- S-a determinat puterea consumată pe baza curentului simulat și, respectiv, măsurat cu senzorul Hall, la deplasarea de-a lungul traseului prestabilit.
- S-au stabilit și utilizat metode de calcul ale energiei și puterii consumate.
- Determinarea consumului de energie pentru toate configurațiile de roboți mobili modulari și interpretarea rezultatelor.

**Interpretarea rezultatelor utilizând metoda de luare a deciziilor multicriterială, bazată pe AHP:**

- Din punct de vedere al reconfigurării, al integrabilității și al modularității, aceste performante sunt identice pentru toate cele 5 configurații de roboți mobili modulari.

- Din punct de vedere al mobilității cea mai performantă este configurația cu tracțiune omnidirecțională și trei roți omnidirecționale, urmată de configurațiile cu două roți convenționale și patru roți omnidirecționale, iar configurația cu cea mai mică mobilitate este robotul mobil cu tracțiune diferențială și patru roți convenționale.
- Din punct de vedere al consumului energetic cea mai performantă configurație este configurația cu tracțiune diferențială și două roți convenționale, urmată de configurația cu patru roți convenționale. Cel mai puțin performantă din punct de vedere energetic este configurația cu tracțiune omnidirecțională și patru roți omnidirecționale.

### **7.3. DIRECȚII DE CERCETARE VIITORE**

Platforma robotică modulară descrisă și utilizată în această cercetare este un concept care evidențiază modularitatea, adică posibilitatea de a forma mai multe structuri robotice folosind aceleași componente hardware, dar cu configurații diferite ale sistemului de locomoție. Datorită modularității, performanțele roboților mobili pot crește în ceea ce privește autonomia și flexibilitatea pentru integrarea în diverse aplicații.

Continuarea cercetărilor prezentate se poate realiza având în vedere următoarele direcții:

- Modelele validate pot fi utilizate pentru analize și studii de predicție și optimizare a consumului de energie pentru mai multe tipuri de configurații ale platformei modulare.
- Modelele validate pot fi dezvoltate pentru alte tipuri de traiectorii, urmărind consumul energetic pentru mai multe tipuri de configurații ale platformei modulare.
- Pe modelul funcțional poate fi integrat un senzor LiDAR, sau senzori de poziție și controlat cu ajutorul programelor de simulare a blocurilor digitale.
- Platforma mobilă modulară prezentată poate fi utilizată în continuare pentru proceduri de analiză și optimizare, utilizând modele mai precise de consum energetic.
- Erorile detectate și cauzele acestora pot fi luate în considerare în continuare pentru perfecționarea modelelor de roboți mobili modulari.
- Modelul funcțional poate fi echipat cu senzori pentru controlul deplasării pe traiectorie în vederea realizării de cercetări în domeniu.

## BIBLIOGRAFIE

1. Rubio, F.; Valero, F.; Llopis-Albert, C. A Review of Mobile Robots: Concepts, Methods, Theoretical Framework, and Applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems* **2019**, *16*, 1–22, doi:10.1177/1729881419839596.
2. Oltean, S.E. Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation. *Procedia Manufacturing* **2019**, *32*, 572–577, doi:10.1016/j.promfg.2019.02.254.
3. Kadim, N.; Al-Sahib, A.; Zuhair Azeez, M. Build and Interface Internet Mobile Robot Using Raspberry Pi and Arduino. *Innovative Systems Design and Engineering* **2015**, *6*, 106–114.
4. **Maroşan, I.-A.**; Constantin, G. Wireless Communication Based on Raspberry Pi and Codesys for Mobile Robots Using IoT Technology.; EDP Sciences, 2021; Vol. 343 **(Articol indexat BDI: Proquest)**.
5. Vanitha, M.; Selvalakshmi, M.; Selvarasu, R. Monitoring and Controlling of Mobile Robot via Internet through Raspberry Pi Board. *2016 2nd International Conference on Science Technology Engineering and Management, ICONSTEM 2016* **2016**, 462–466, doi:10.1109/ICONSTEM.2016.7560864.
6. Niloy, M.A.K.; Shama, A.; Chakraborty, R.K.; Ryan, M.J.; Badal, F.R.; Tasneem, Z.; Ahamed, M.H.; Moyeen, S.I.; Das, S.K.; Ali, M.F.; et al. Critical Design and Control Issues of Indoor Autonomous Mobile Robots: A Review. *IEEE Access* **2021**, *9*, 35338–35370, doi:10.1109/ACCESS.2021.3062557.
7. Tzafestas, S.G. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* **2018**, *91*, 35–58, doi:10.1007/s10846-018-0805-9.
8. Cronin, C.; Conway, A.; Walsh, J. State-of-the-Art Review of Autonomous Intelligent Vehicles (AIV) Technologies for the Automotive and Manufacturing Industry. *30th Irish Signals and Systems Conference, ISSC 2019* **2019**, 1–6, doi:10.1109/ISSC.2019.8904920.
9. Meystel, A. *Autonomous Mobile Robots: Vehicles with Cognitive Control*; World Scientific: Singapore, 1991;
10. J.C. Latombe *Robot Motion Planning*.; Kluwer: Boston, 1991;
11. Leonard, J.J.; Durrant-Whyte, H.F. *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*; Springer International Publishing: Berlin, 1992;
12. J.L. Jones, A.M Flynn, B.A. Seiger *Mobile Robots: Inspiration to Implementation.*; Peters A.K., Ltd/CRC Press: New York, 1995;
13. Everett, H.R. *Sensors for Mobile Robots*; Peters A.K. Ltd/CRC Press: New York, 1995;
14. Borenstein, J.; Everett, H.R.; Feng, L. *Navigating Mobile Robots*; Peters A.K. Ltd/CRC Press: New York, 1996;
15. R.C. Arkin *Behavior-Based Robotics.*; MIT Press: Cambridge, 1998;
16. Canny, J.F. *The Complexity of Robot Motion Planning*; MIT Press: Cambridge, 1988; Vol. Doctoral D;
17. Zhu, X.; Kim, Y.; Minor, M.A.; Qiu, C. *Autonomous Mobile Robots in Unknown*

- Outdoor Environments*; CRC Press /Taylor and Francis Group: Boca Raton, 2016; ISBN 9781498740562.
18. Nehmzow, U. *Mobile Robotics: A Practical Introduction.*; Springer: London, 2003;
  19. SIEGWART R. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*; 2011; Vol. 49;.
  20. Cuesta, F.; Ollero, A. *Intelligent Mobile Robot Navigation*; Springer: Berlin, 2005; Vol. 16; ISBN 3540239561.
  21. Berns, K.; von Puttkamer, E. *Autonomous Land Vehicles*; Springer: Berlin, 2009;
  22. Dudek, G.; Jenkin, M. *Computational Principles of Mobile Robotics*; Cambridge University Press: Cambridge, 2010;
  23. Cook, G. *Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing*; Wiley: Hobolen, 2011; ISBN 9780470630211.
  24. Berry, C.A. *Mobile Robotics for Multidisciplinary Study*; Morgan & Claypool: San Rafael, 2012; Vol. 3;.
  25. Tiwari, R. *Intelligent Planning for Mobile Robotics: Algorithmic Approaches (Premier Reference Source)*; IGI Global: Hershey, 2012; ISBN 1466620749.
  26. Kelly, A. *Mobile Robots: Mathematics, Models, and Methods.*; Cambridge University Press: Cambridge, 2013;
  27. Tzafestas, S.G. *Introduction to Mobile Robot Control*; Elsevier: New York, 2013; ISBN 9780124170490.
  28. Jaulin, L. *Mobile Robotics.*; ISTE Press-Elsevier: New York, 2017;
  29. Martins, N.A.; Bertol, D.W. *Wheeled Mobile Robot Control*; Studies in Systems, Decision and Control; Springer International Publishing: Cham, 2022; Vol. 380; ISBN 978-3-030-77911-5.
  30. Jahn, U.; Heß, D.; Stampa, M.; Sutorma, A.; Röhrig, C.; Schulz, P.; Wolff, C. A Taxonomy for Mobile Robots: Types, Applications, Capabilities, Implementations, Requirements, and Challenges. *Robotics* **2020**, *9*, 109, doi:10.3390/robotics9040109.
  31. Bruzzone, L.; Nodehi, S.E.; Fanghella, P. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review. *MACHINES* **2022**, *10*, doi:10.3390/machines10080648.
  32. Wang, Y.; Li, X.; Zhang, J.; Li, S.; Xu, Z.; Zhou, X. Review of Wheeled Mobile Robot Collision Avoidance under Unknown Environment. *SCIENCE PROGRESS* **2021**, *104*, doi:10.1177/00368504211037771.
  33. Taheri, H.; Zhao, C.X. Omnidirectional Mobile Robots, Mechanisms and Navigation Approaches. *Mechanism and Machine Theory* **2020**, *153*, doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.103958.
  34. Patle, B.K.; Babu, G.L.; Pandey, A.; Parhi, D.R.K.; Jagadeesh, A. A Review: On Path Planning Strategies for Navigation of Mobile Robot. *DEFENCE TECHNOLOGY* **2019**, *15*, 582–606, doi:10.1016/j.dt.2019.04.011.
  35. Crescentini, M.; Syeda, S.F.; Gibiino, G.P. Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques. *IEEE SENSORS JOURNAL* **2022**, *22*, 10137–10151, doi:10.1109/JSEN.2021.3119766.
  36. Wang, X.; Sun, X.; Cui, S.; Yang, Q.; Zhai, T.; Zhao, J.; Deng, J.; Ruotolo, A. Physical Investigations on Bias-Free, Photo-Induced Hall Sensors Based on Pt/GaAs and Pt/Si Schottky Junctions. *SENSORS* **2021**, *21*, doi:10.3390/s21093009.
  37. Aiello, O. Hall-Effect Current Sensors Susceptibility to EMI: Experimental Study. *ELECTRONICS* **2019**, *8*, doi:10.3390/electronics8111310.
  38. Romero-Perigault, J.; Flores-Fuentes, W.; Jo, K.-H.; Caceres Hernandez, D. Wireless Current Monitoring for Autonomous Robot Navigation. In Proceedings of the 2019 IEEE 28TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE); IEEE; IEEE Ind Elect Soc, 2019; pp. 1717–1722.
  39. Aiello, O.; Fiori, F. A New MagFET-Based Integrated Current Sensor Highly Immune to EMI. *MICROELECTRONICS RELIABILITY* **2013**, *53*, 573–581, doi:10.1016/j.microrel.2012.10.013.



40. Karamipour, E.; Dehkordi, S.F.; Korayem, M.H. Reconfigurable Mobile Robot with Adjustable Width and Length: Conceptual Design, Motion Equations and Simulation. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS* **2020**, *99*, 797–814, doi:10.1007/s10846-020-01163-7.
41. Luo, R.C.; Lee, S.L.; Wen, Y.C.; Hsu, C.H. Modular ROS Based Autonomous Mobile Industrial Robot System for Automated Intelligent Manufacturing Applications. In Proceedings of the 2020 IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS (AIM); IEEE; ASME, 2020; pp. 1673–1678.
42. Tkacik, M.; Brezina, A.; Jadlovska, S. Design of a Prototype for a Modular Mobile Robotic Platform. *IFAC PAPERSONLINE* **2019**, *52*, 192–197, doi:10.1016/j.ifacol.2019.12.755.
43. Kutzer, M.D.M.; Moses, M.S.; Brown, C.Y.; Scheidt, D.H.; Chirikjian, G.S.; Armand, M. Design of a New Independently-Mobile Reconfigurable Modular Robot. In Proceedings of the 2010 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA); IEEE, 2010; pp. 2758–2764.
44. Ryland, G.G.; Cheng, H.H. Design of IMobot, an Intelligent Reconfigurable Mobile Robot with Novel Locomotion. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* **2010**, 60–65, doi:10.1109/ROBOT.2010.5509359.
45. Piza, R.; Carbonell, R.; Casanova, V.; Cuenca, A.; Salt Llobregat, J.J. Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels. *APPLIED SCIENCES-BASEL* **2022**, *12*, doi:10.3390/app12073560.
46. Ahmadi, S.M.; Taghadosi, M.B.; Haqshenas, A.M. A State Augmented Adaptive Backstepping Control of Wheeled Mobile Robots. *TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF MEASUREMENT AND CONTROL* **2021**, *43*, 434–450, doi:10.1177/0142331220961700.
47. Hassan, N.; Saleem, A. Analysis of Trajectory Tracking Control Algorithms for Wheeled Mobile Robots. In Proceedings of the IEACON 2021: 2021 IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS CONFERENCE (IEACON); IEEE; IEEE Ind Applicat Soc, 2021; pp. 236–241.
48. Ren, Y.; Zheng, L.; Khajepour, A. Integrated Model Predictive and Torque Vectoring Control for Path Tracking of 4-Wheel-Driven Autonomous Vehicles. *IET INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS* **2019**, *13*, 98–107, doi:10.1049/iet-its.2018.5095.
49. Siwek, M.; Baranowski, L.; Panasiuk, J.; Kaczmarek, W. Modeling and Simulation of Movement of Dispersed Group of Mobile Robots Using Simscape Multibody Software. In Proceedings of the COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES IN ENGINEERING (TKI'2018); Military Univ Technol Warsaw, Fac Mech Engn, Dept Mech & Appl Comp Sci; EC Test Syst; SYMCOM, 2019; Vol. 2078.
50. Stefek, A.; Pham, T. Van; Krivanek, V.; Pham, K.L. Energy Comparison of Controllers Used for a Differential Drive Wheeled Mobile Robot. *IEEE ACCESS* **2020**, *8*, 170915–170927, doi:10.1109/ACCESS.2020.3023345.
51. Jaramillo-Morales, M.F.; Dogru, S.; Gomez-Mendoza, J.B.; Marques, L. Energy Estimation for Differential Drive Mobile Robots on Straight and Rotational Trajectories. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS* **2020**, *17*, doi:10.1177/1729881420909654.
52. Hou, L.; Zhang, L.; Kim, J. Energy Modeling and Power Measurement for Mobile Robots. *Energies* **2019**, *12*, doi:10.3390/en12010027.
53. Canfield, S.L.; Hill, T.W.; Zuccaro, S.G. Prediction and Experimental Validation of Power Consumption of Skid-Steer Mobile Robots in Manufacturing Environments. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* **2019**, *94*, 825–839, doi:10.1007/s10846-018-0779-7.

54. Valero, F.; Rubio, F.; Llopis-Albert, C. Assessment of the Effect of Energy Consumption on Trajectory Improvement for a Car-like Robot. *ROBOTICA* **2019**, *37*, 1998–2009, doi:10.1017/S0263574719000407.
55. Tătar, M.O.; Petre, B.; Teușan, E. Design and Development of the Hybrid Mobile Robots. *2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2018 - THETA 21st Edition, Proceedings* **2018**, 1–6, doi:10.1109/AQTR.2018.8402729.
56. MathWorks Student Competitions Team. Mobile Robotics Simulation Toolbox, 2022, GitHub. Retrieved August 1, 2022. <https://github.com/Mathworks-Robotics/Mobile-Robotics-Simulation-Toolbox>.
57. Kim, H.; Kim, B.K. Minimum-Energy Trajectory Planning and Control on a Straight Line with Rotation for Three-Wheeled Omni-Directional Mobile Robots. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* **2012**, 3119–3124, doi:10.1109/IROS.2012.6385568.
58. Kanjanawanishkul, K. Omnidirectional Wheeled Mobile Robots: Wheel Types and Practical Applications. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems* **2015**, *6*, 289–302, doi:10.1504/IJAMECHS.2015.074788.
59. Vejlupek, J.; Lamberský, V. Multi-Purpose Mobile Robot Platform Development. *Mechatronics: Recent Technological and Scientific Advances* **2011**, 463–470, doi:10.1007/978-3-642-23244-2\_56.
60. Ye, C.; Ma, S. Development of an Omnidirectional Mobile Platform. *2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009* **2009**, 1111–1115, doi:10.1109/ICMA.2009.5246079.
61. Sun, Z.; Hu, S.; He, D.; Zhu, W.; Xie, H.; Zheng, J. Trajectory-Tracking Control of Mecanum-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots Using Adaptive Integral Terminal Sliding Mode. *Computers and Electrical Engineering* **2021**, *96*, 107500, doi:10.1016/j.compeleceng.2021.107500.
62. **Marosan, A.**; Constantin, G.; Chicea, A.L.; Crenganis, M.; Morariu, F. DESIGN OF MECHATRONIC MODULES THAT CAN FORM MULTIPLE CONFIGURATIONS OF MOBILE ROBOTS. *Proceedings in Manufacturing Systems* **2022**, *17*, 47–53 (**Articol indexat BDI: Proquest**).
63. **Marosan, A.**; Constantin, G. Pid Controller Based on a Gyroscope Sensor for an Omnidirectional Mobile Platform. *Proceedings in Manufacturing Systems* **2020**, *15*, 27–34 (**Articol indexat BDI: Proquest, Index Copernicus**).
64. Constantin, G.; **Maroșan, I.-A.**; Crenganiș, M.; Botez, C.; Gîrjob, C.-E.; Biriș, C.-M.; Chicea, A.-L.; Bârsan, A. Monitoring the Current Provided by a Hall Sensor Integrated in a Drive Wheel Module of a Mobile Robot. *Machines* **2023**, *11*, 385 (**Autor principal, IF = 2,899, Web of Science, Articol în revista Q2, WOS:000874293700001**).
65. Verstraten, T.; Furnemont, R.; Mathijssen, G.; Vanderborght, B.; Lefeber, D. Energy Consumption of Geared DC Motors in Dynamic Applications: Comparing Modeling Approaches. *IEEE Robotics and Automation Letters* **2016**, *1*, 524–530, doi:10.1109/LRA.2016.2517820.
66. Rapalski, A.; Dudzik, S. Energy Consumption Analysis of the Selected Navigation Algorithms for Wheeled Mobile Robots. *Energies* **2023**, *16*, doi:10.3390/en16031532.