



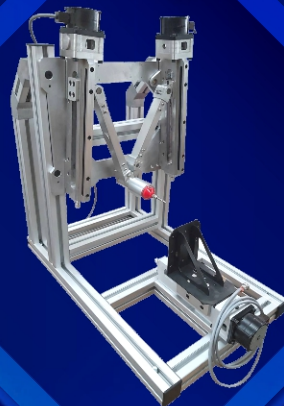
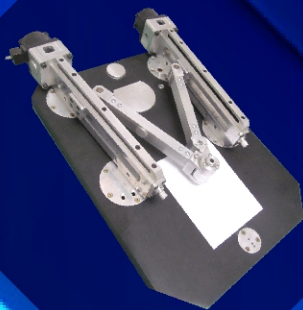
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



Горан В. Василић

КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНЕ КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ

докторска дисертација



Београд, 2023.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Горан В. Василић

**КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНЕ
КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ**

докторска дисертација

Београд, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Goran V. Vasilic

**CONCEPTUAL DESIGN OF ONE CLASS OF
COMPLEX MACHINE TOOLS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

КОМИСИЈА ЗА ПРЕГЛЕД И ОДБРАНУ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ментор: др Саша Т. Живановић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије: др Живана Б. Јаковљевић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Никола Р. Славковић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Слободан Н. Табаковић, редовни професор
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

др Зоран Ж. Димић, виши научни сарадник
Лола институт, Београд

Датум одбране: _____

ЗАХВАЛНОСТ

Желео бих да изразим неограничену захвалност свим појединцима и институцијама који су допринели реализацији ове докторске дисертације. Посебну захвалност дугујем:

- *Ментору, проф. др Саши Т. Живановићу на несебичној помоћи, саветима и стрпљењу током израде докторске дисертације, реализације експеримената и верификације остварених резултата везаних за докторску дисертацију,*
 - *Члановима комисије за преглед и одбрану дисертације, професорима са Универзитета у Београду и Новом Саду др Живани Б. Јаковљевић, др Николи Р. Славковићу, др Слободану Н. Табаковићу и др Зорану Ж. Димићу вишем научном сараднику са "Лола института", који су својим конструктивним примедбама, сугестијама, саветима и смерницама у значајној мери допринели побољшању квалитета докторске дисертације,*
 - *Доценту др Бранку М. Кокотовићу са Катедре за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду и редовним професорима Машинског факултета у Београду у пензији др Милошу М. Главоњићу и др Драгану С. Милутиновићу који су ме инспирисали а своја знања и искуства несебично поделили са мном,*
 - *Професору струковних студија др Милану Д. Милутиновићу на подршци и помоћи при изради експерименталне инсталације као и на пруженој помоћи током реализације експеримената везаних за докторску дисертацију,*
 - *Катедри за производно машинство, Машинског факултета Универзитета у Београду у оквиру које је израђен део експерименталне поставке и која је обезбедила простор за реализацију експеримената везаних за докторску дисертацију,*
 - *Академији техничких струковних студија Београд на пружању помоћи у сваком тренутку када се указала потреба, чиме ми је омогућено да успешно завршим докторске студије и одбраним докторску дисертацију,*
 - *Катедри за Машинско инжењерство АТССБ и Одсеку за саобраћај, машинство и инжењерство заштите који су омогућили приступ опреми, машинама и инструментима у лабораторијама за: конвенционалне методе обраде, CNC технологије, аутоматизацију производње и мерење и контролу, у којима су израђени делови експерименталне инсталације и склопљена експериментална поставка,*
-

-
- *ЛОЛА институту на уступљеној опреми помоћу које су реализовани експерименти и потврђени резултати истраживачког рада приказаних у докторској дисертацији,*
 - *Драгим пријатељима који су ми у тренуцима посустајања увек давали праве савете и речи охрабрења,*
 - *Мајци Миланки и сестри Маријани на моралној подршци и разумевању током израде докторске дисертације.*

Горан В. Василић

Оцу Војину ...

КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНЕ КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ

Резиме:

Развој машина алатки као и њихових појединачних делова су незаобилазни процеси у целокупном развоју привреде. Са циљем да се допринесе глобалном развоју *CNC* машина алатки, докторска дисертација предлаже концепт једне класе машина алатки сачињене од већег броја машина алатки које се међусобно разликују бар по једном делу своје структуре. Машине алатке у оквиру формиране класе као заједничку основу имају двоосни равански реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком. Према усвојеном концепту, дефинисани су формализми који обухватају различите анализе, а чији резултати дају полазну тачку за будућа конфигурасања и пројектовања било које машине алатке из формиране класе машина алатки.

За заједничку основу класе машина алатки су изведене генерализоване и уопштене једначине које представљају решења кинематичких проблема и важе за сваку конфигурацију машине. Генерализоване једначине кинематичких проблема су основа свих анализа приказаних у дисертацији а њиховом употребом, анализирање већег броја различитих конфигурација је поједностављено. Са циљем да се анализе додатно упросте и убрзају, развијена је апликација *MOMA-GUI* у коју су имплементиране генерализоване једначине кинематичких проблема. Осим могућности да се помоћу апликације изврше одређене анализе, апликација се може користити и за анализу рада машине одређене конфигурације према учитаном *G-код* програму па у одређеној мери апликација представља виртуелну машину.

Изведене генерализоване једначине су искориштене и за формирање реконфигурабилног управљања. Реконфигурабилно управљање, засновано на софтверском управљачком систему отворене архитектуре *LinuxCNC (EMC2)*, конфигурирано је тако да се применом стандардних *G-код* функција управља унапред дефинисаним виртуелним погонским осама. Оваквим приступом се управљачки систем може брзо и лако реконфигурисати и прилагодити одговарајућој конфигурацији машине алатке. У оквиру софтверског управљачког система, конфигурирана је и виртуелна машина која симулира рад стварне машине алатке и то симулацијом кретања која се реализују и на виртуелним и на реалним погонским осама.

Користећи тренутно доступне начине програмирања *CNC* машина, израђени су програми за три различите машине алатке. Пуштањем у рад и анализом рада одабраних машина алатки, као и анализом резултата реализоване обраде, потврђена је исправност изведених генерализованих једначина које представљају основу целог концепта класе комплексних машина алатки.

Кључне речи: Механизми са паралелном и хибридном кинематиком, Реконфигурабилне машине алатке, Комплексне машине алатке, Вишеосне машине алатке, кинематички проблеми, Анализе машина алатки, Реконфигурабилно управљање, Програмирање машина алатки, *CAD/CAM*, *STEP-NC*

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Производно машинство

УДК број: 621.9-52:004.42(043.3)

CONCEPTUAL DESIGN OF ONE CLASS OF COMPLEX MACHINE TOOLS

Abstract:

The development of machine tools and their parts is an unavoidable process in the entire prosperity of industry. In order to contribute to the development of *CNC* machine tools, the doctoral dissertation proposes the concept of a class of complex machine tools, which consists of many machines that differ from each other at least in one part of their own structure. Machine tools within the formed class as a common basis have a planar two-axis reconfigurable mechanism with parallel kinematics. According to the adopted concept, formalisms are defined, that include various analyses whose results provide an initial point for the future configuring and design of any machine from the formed class.

For the common basis of the machine tools class, generalized equations are derived that represent solutions of kinematic problems and that are applicable to any machine tool configuration. Generalized equations of kinematic problems are the basis of all analyses presented in the dissertation, and by their use, the analysis of a larger number of different configurations is simplified. To further simplify and speed up the analysis, the derived and generalized equations of kinematic problems have been implemented in the developed application *MOMA-GUI*. Except possibilities to do some analysis with, the developed application can be used to analyze the operation of machine with a specific configuration according to the loaded *G-code* program, so to a certain extent the application presents a virtual machine.

Also, the derived generalized equations were used to form a reconfigurable control system of machine tools. The reconfigurable control system is based on an open architecture software control system *LinuxCNC (EMC2)* and is configured to be able to control predefined virtual joints using a standard *G-code* function. In this way, control system can be easily and quickly reconfigured and adapted to required machine tool configuration. As a part of the software control system, a virtual machine is configured that simulates work of the real machine by simulating the movements that are realized on virtual and real joints.

Implementing currently available programming methods of machine tools, machine programs were made for three different machines. By putting selected machine tools into operation, analyzing their work and the results of machining, the correctness of the derived generalized equations that are the basis of the entire concept of complex machine tools was confirmed.

Keywords: Mechanisms with parallel and hybrid kinematics, Reconfigurable machine tools, Complex machine tools, Multi-axis machine tools, Analyses of machine tools, Reconfigurable control system, Programming of machine tools, *CAD/CAM*, *STEP-NC*

Research field: Mechanical Engineering

Specific field: Production engineering

UDC number: 621.9-52:004.42(043.3)

РЕЗИМЕ

ABSTRACT

НОМЕНКЛАТУРА

i

СПИСАК СЛИКА

iii

СПИСАК ТАБЕЛА

ix

1. УВОД

1

- 1.1 Полазне хипотезе 1
- 1.2 Предмет и циљ истраживања 2
- 1.3 Композиција рада 3

2. РЕЗУЛТАТИ ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

7

3. РАВАНСКИ РЕКОНФИГУРАБИЛНИ МЕХАНИЗАМ СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ - МОМА

23

- 3.1 Опис реконфигурабилног раванског механизма са паралелном кинематиком *МОМА* 24
- 3.2 Конфигурације двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком *МОМА* 25
- 3.3 Кинематички модел двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком 27
- 3.4 Кинематички проблеми двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком 28
 - 3.4.1 Решења инверзног кинематичког проблема *РПКМ-МОМА* 29
 - 3.4.2 Решења директног кинематичког проблема *РПКМ-МОМА* 31
- 3.5 Геометријски параметри *РПКМ-МОМА* 32

4. АНАЛИЗЕ РАВАНСКОГ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ МЕХАНИЗМА СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ РПКМ-МОМА	35
4.1 Одређивање облика и величине достизивог радног простора	36
4.1.1 Одређивање достизивог радног простора једначинама <i>ИКП</i> -а	36
4.1.2 Одређивање достизивог радног простора једначинама <i>ДКП</i> -а	39
4.2 Јакобијан матрица и сингуларитети <i>РПКМ-МОМА</i>	41
4.2.1 Сингуларитети инверзне кинематике	45
4.2.2 Сингуларитети директне кинематике	46
4.3 Користан радни простор <i>РПКМ-МОМА</i>	48
4.4 Оптимизација дужине спојки <i>РПКМ-МОМА</i>	49
4.5 <i>МОМА-GUI</i> софтвер за анализу <i>РПКМ-МОМА</i>	52
4.6 Резолуција <i>РПКМ-МОМА</i>	62
4.7 Грешка позиционирања платформе <i>РПКМ-МОМА</i>	66
5. ПРОШИРЕНА КОНФИГУРАЦИЈА ДВОСНОГ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ МЕХАНИЗМА СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ <i>РПКМ-МОМА</i>	69
5.1 Кинематички модел проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	71
5.2 Кинематички проблеми проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	73
6. КЛАСА КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ ЗАСНОВАНИХ НА МЕХАНИЗМУ <i>РПКМ-МОМА</i>	81
6.1 Дефинисање класе комплексних машина алатки, конфигурисање хардверског дела машина алатки	83
6.2 Кинематика троосних машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки	88
6.3 Кинематика обртних оса машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки	88
7. КОМПЛЕКСНЕ ВИШЕОСНЕ МАШИНЕ АЛАТКЕ СА ДВА МЕХАНИЗМА <i>РПКМ-МОМА</i>	93
7.1 Комплексна вишеосна машина алатка <i>МОМА-W</i>	94
7.1.1 Кинематички модел вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i>	96
7.1.2 Кинематички проблеми комплексне машине алатке <i>МОМА-W</i>	98
7.1.3 Радни простор комплексне вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i>	101
7.1.4 Прецизност комплексне вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i>	104

7.1.5	Кинематичка анализа процеса обраде сечења жицом машином алатком <i>МОМА-W</i>	112
7.2	Комплексна вишеосна машина алатка <i>МОМА-W 4S</i>	118
7.3	Комплексна вишеосна машина алатка <i>МОМА HV-Mill 4S</i>	120
8.	УПРАВЉАЊЕ И ПРОГРАМИРАЊЕ МАШИНАМА АЛАТКАМА ИЗ КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ ЗАСНОВАНИХ НА <i>РПКМ-МОМА</i>	123
8.1	Конфигурисање управљачког система	125
8.2	Конфигурисање виртуелне машине	128
8.3	Виртуелна машина <i>РПКМ-МОМА</i>	130
8.4	Програмирање машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки	133
8.4.1	Програмирање према стандарду <i>ISO-6983</i>	133
8.4.2	Програмирање према <i>STEP-NC</i> протоколу	135
9.	ВЕРИФИКАЦИЈА РАДА МАШИНА АЛАТКИ ИЗ ФОРМИРАНЕ КЛАСЕ МАШИНА АЛАТКИ ЗАСНОВАНИХ НА <i>РПКМ-МОМА</i>	139
9.1	Верификација рада машине алатке <i>МОМА-2D</i>	142
9.1.1	Верификација рада програмима добијених применом <i>CAD/CAM</i> софтверских пакета	143
9.1.2	Верификација рада параметарским програмима	143
9.1.3	Верификација рада програмима са потпрограмима	144
9.2	Верификација рада машине алатке <i>МОМА-3D</i>	144
9.2.1	Верификација рада програмима добијених применом <i>CAD/CAM</i> софтверских пакета	145
9.2.2	Верификација рада применом <i>STEP-NC</i> протокола	146
9.3	Верификација рада машине алатке <i>МОМА-W 4S</i>	151
9.3.1	Делови једноставног облика	155
9.3.2	Делови сложеног облика и танкозидни делови	156
9.3.3	Делови израђени променом оријентација жице	157
9.3.4	Делови већих дужина	158
9.3.5	Делови израђени параметарским програмима и потпрограмима	159
9.3.6	Делови израђени обрадом спољашње и унутрашње контуре	160
10.	ЗАКЉУЧАК	163

ЛИТЕРАТУРА	167
ПРИЛОЗИ	181
ПРИЛОГ 1 : Конфигурисање виртуелне машине <i>РПКМ-МОМА</i> у оквиру <i>LinuxCNC</i> управљачког система	182
ПРИЛОГ 2 : Програми за верификацију рада двоосног раванског механизма са паралелном кинематиком <i>РПКМ-МОМА</i>	186
Параметарски програм са потпрограмом	186
Програм са потпрограмом и ротацијом координатног система	188
ПРИЛОГ 3 : Једначине кинематичких проблема вишеосне машине алатке <i>МОМА-W 4S</i> имплементиране у <i>LinuxCNC</i> управљачки систем	190
ПРИЛОГ 4 : Делови израђени на комплексној машини алатки <i>МОМА-W 4S</i>	195
Делови сложеног облика и танкозидни делови	195
Делови израђени променом оријентација жице	196
Програм са потпрограмом за израду украсних лајсни	198
Параметарски програм за израду зарубљеног конуса	199
БИОГРАФИЈА	201
ИЗЈАВЕ ДОКТОРАНДА	205
Изјава о ауторству	207
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	209
Изјава о коришћењу	211

НОМЕНКЛАТУРА

<i>МА</i>	Машина Алатка
<i>ИР</i>	Индустријски робот
<i>НУМА</i>	Нумерички управљана машина алатка
<i>ТеМоРаМ</i>	Технолошки модул са паралелном кинематиком
<i>МОМА</i>	МОдуларна Машина Алатка
<i>ИКП</i>	Инверзни кинематички проблем
<i>ДКП</i>	Директни кинематички проблем
<i>CAD</i>	Computer-aided design (Пројектовање подржано рачунаром)
<i>CAM</i>	Computer-aided manufacturing (Пројектовање технологије помоћу рачунара)
<i>CNC</i>	Computer numerical control (Нумеричко управљање помоћу рачунара)
<i>CLF</i>	Cutter location file (Датотека са информацијама о путањи алата)
<i>APT</i>	Automatically Programmed Tool (Програмски језик којим се дефинишу кретања CNC машине током процеса обраде)
<i>RPKM</i>	Reconfigurable Rarallel Kinematic Machine (Реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком)
<i>W-EDM</i>	Wire Electrical Discharge Machining (Електро-ерозиона обрада помоћу жице)
<i>DOF</i>	Degrees of freedom (Степени слободе)
<i>MRM</i>	Modular Reconfigurable Machine (Модуларна реконфигурабилна машина)
<i>LOM</i>	Laminated Object Manufacturing (Израда делова у облику ламела)
<i>VLM</i>	Variable Lamination Manufacturing (Израда ламела различите дебљине)
<i>GUI</i>	Grasphical User Interface (Графички кориснички интерфејс)
$\{B_j\}$	Непокретни координатни системи везани за базе паралелних механизма
α_i	Углови оријентације погонских оса
γ_i	Помоћни углови оријентације погонских оса
\mathbf{a}_i	Јединични вектори оријентације погонских оса
a_{xi}, a_{yi}	Пројекције јединичних вектора \mathbf{a}_i на осе x и y координатног система $\{B\}$
p_i	Скаларне вредности унутрашњих координата механизма
$\mathbf{a}_i \cdot p_i$	Вектори унутрашњих координата

R_i	Референтне тачка погонских оса
P_i	Платформе механизма
Z_i	Зглобна веза спојки паралелног механизма
l_i	Дужине спојки механизма
x_{R_i}, y_{R_i}	Координате референтних тачака R_i у координатном систему $\{B\}$
x_{P_i}, y_{P_i}	Координате платформи механизма P_i у координатним системима $\{B\}$
x_{Z_i}, y_{Z_i}	Координате зглобне везе Z_i у координатном систему $\{B\}$
${}^{B_j}p_{P_i}$	Вектори положаја платформи механизма P_i у координатним системима $\{B_j\}$
${}^{B_j}p_{R_i}$	Вектори положаја референтних тачака R_i у координатним системима $\{B_j\}$
${}^{B_j}p_{B_j}$	Позиција координатног система $\{B_j\}$ у односу на координатни систем $\{B_i\}$
${}^{P_i}p_{P_j}$	Позиција платформе P_j у односу на платформу P_i
L_{OPT}	Оптимална дужина спојки
Δp	Резолуција погонске осе механизма
S_i	Сингуларне тачке
α_{KM}	Физичка резолуција корачног мотора
s	Корак завојног вретена погонске осе
$\{Q\}$	Генералисани координатни систем
q_i	Осе генералисаног координатног система $\{Q\}$
e_i	Јединични вектори оса q_i генералисаног координатног система $\{Q\}$
$\alpha_{q,1}, \beta_{q,2}, \gamma_{q,3}$	Ојлерови углови ротације координатног система $\{Q\}$
w	Manipulability (Манипулативност - способност механизма да у свом радном простору мења позицију и оријентацију)
κ	Condition number (Индекс структуре Јакобијан матрице)
η	Global performance index (Глобални индекс покретљивости механизма)
η_s	Global stiffness index (Глобални индекс крутости)
κ_j	The index of kinematic isotropy (Индекс кинематске изотропности)

СПИСАК СЛИКА

2.1	Технолошки модул са паралелном кинематиком <i>2D ТеМоРаМ</i>	8
2.2	Троосна машина алатка са хибридном кинематиком - <i>Specht</i>	9
2.3	Троосна машина алатка са хибридном кинематиком - <i>TriJoint</i>	9
2.4	Машине алатке са хибридном кинематиком	10
2.5	Троосни индустријски робот са хибридном кинематиком заснован на раванском <i>Delta</i> механизму	11
2.6	<i>3D</i> модел хибридне машине алатке <i>DynaM</i>	11
2.7	<i>3D</i> Модел раванског паралелног механизма са флексибилним спојкама	12
2.8	Шематски приказ раванског паралелног механизма са флексибилним спојкама	12
2.9	Конфигурације троосног раванског паралелног механизма као дела петоосне МА са хибридном кинематиком	13
2.10	Класификација раванских паралелних механизма	13
2.11	Реконфигурабилне машине алатке засноване на троосном паралелном механизму са транслаторним осама	14
2.12	Реконфигурабилни индустријски робот <i>Tricept</i>	15
2.13	Реконфигурабилна машина алатка грађена по модуларном принципу градње	15
2.14	Хибридни механизми конфигурисани повезивањем два паралелна механизма	16
2.15	Синхронизовани рад два индустријска робота током процеса сечења пенастих материјала усијаном жицом	17
2.16	Двоосни равански механизам са паралелном кинематиком - <i>2DOF РКМ</i>	18
2.17	Грешке у реализованој путањи троосног раванског паралелног механизма	18
2.18	Сечење пенастих материјала усијаном жицом помоћу индустријског робота	19
2.19	Кинематика једне серијске четвороосне машине алатке намењене за сечење пенастих материјала усијаном жицом	19
3.1	<i>CAD</i> модел раванског паралелног механизма <i>МОМА</i>	23
3.2	Модули раванског паралелног механизма <i>МОМА</i> са главним саставним елементима	24
3.3	Конфигурације и типови <i>РПКМ-МОМА</i>	26
3.4	Геометријске величине <i>РПКМ-МОМА</i>	26
3.5	Уопштени кинематички модел <i>РПКМ-МОМА</i>	27
3.6	Вишеструкост решења <i>ИКП</i> -а за различите конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	30

3.7	Вишеструкост решења ДКП-а за различите конфигурације РПКМ-МОМА	31
3.8	Позиције координатног система $\{B\}$ за различите конфигурације РПКМ-МОМА	32
4.1	Претпостављени радни простор РПКМ-МОМА	36
4.2	Решења ИКП-а у облику комплексних бројева за унутрашње координате p_i	37
4.3	Решења ИКП-а у облику реалних бројева за унутрашње координате p_i	37
4.4	Алгоритам за одређивање облика и величине радног простора РПКМ-МОМА на основу једначина ИКП-а	38
4.5	Одређивање облика и величине радног простора РПКМ-МОМА на основу једначина ИКП-а	39
4.6	Алгоритам за одређивање облика и величине радног простора РПКМ-МОМА на основу једначина ДКП-а	39
4.7	Достизив радни простор конфигурација МОМА-1	40
4.8	Достизив радни простор конфигурација МОМА-4	40
4.9	Достизив радни простор конфигурација МОМА-5	41
4.10	Достизив радни простор конфигурације МОМА-2.1	41
4.11	Достизив радни простор конфигурације МОМА-3.1	41
4.12	Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М1.1	43
4.13	Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М2.1	43
4.14	Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М3.1	44
4.15	Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М4.1	44
4.16	Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М5.1	44
4.17	Сингуларитети инверзне кинематике за конфигурације механизма МОМА-М1, МОМА-М4 и МОМА-М5	45
4.18	Сингуларитети инверзне кинематике конфигурације механизма МОМА-М2	45
4.19	Сингуларитети инверзне кинематике конфигурације механизма МОМА-М3	46
4.20	Позиције сингуларитета директне кинематике конфигурација механизма МОМА-М2 и МОМА-М3	46
4.21	Позиције сингуларитета директне кинематике конфигурација механизма МОМА-М4 и МОМА-М5	47
4.22	Сингуларитети директне кинематике са промењеним вредностима параметара K_{IKP} за конфигурација механизма МОМА-М4 и МОМА-М5	47
4.23	Физички достизив радни простор конфигурација механизма МОМА-М1	48
4.24	Различити облици корисног радног простора конфигурације МОМА-М1	49
4.25	Користан радни простор конфигурације МОМА-2.1	49
4.26	Користан радни простор конфигурације МОМА-3.1	49
4.27	Одређивање вредности параметра κ унутар дефинисаног корисног радног простора механизма РПКМ-МОМА	51
4.28	Минималне и максималне вредности дужина спојки РПКМ-МОМА	52

4.29	<i>MOMA GUI</i> апликација за анализу основних типова <i>РПКМ-МОМА</i>	53
4.30	<i>IDEF0</i> дијаграм апликације <i>MOMA GUI</i>	54
4.31	<i>MOMA GUI</i> - Анализе достиживих и корисних радних простора конфигурација <i>M1.1</i> , <i>M1.2</i> и <i>M1.3</i> раванског паралелног механизма <i>MOMA</i>	55
4.32	<i>MOMA M1.1</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	56
4.33	<i>MOMA M1.2</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	56
4.34	<i>MOMA M1.3</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	56
4.35	<i>MOMA GUI</i> - Упоредни приказ достиживих и заједничког корисног радног простора конфигурација <i>MOMA M1.1</i> , <i>MOMA M4.1</i> и <i>MOMA M5.1</i>	57
4.36	<i>MOMA M1.1</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	58
4.37	<i>MOMA M4.1</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	58
4.38	<i>MOMA M5.1</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	58
4.39	<i>MOMA GUI</i> - Анализа достиживог и корисног радног простора конфигурације <i>M2.1</i> раванског паралелног механизма <i>MOMA</i>	59
4.40	<i>MOMA M2.1</i> - Расподела вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	60
4.41	<i>MOMA GUI</i> - Анализа достиживог и корисног радног простора конфигурације <i>M3.1</i> раванског паралелног механизма <i>MOMA</i>	60
4.42	<i>MOMA M3.1</i> - Вредности $det(J)$ и резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор	61
4.43	Вредности $det(J)$ унутар корисног радног простора са оптималним дужинама спојки конфигурације <i>MOMA M4</i> и конфигурације <i>MOMA M5</i>	61
4.44	Резолуције традиционални серијских и паралелних раванских двоосних механизма	63
4.45	Реализација кретања платформе <i>РПКМ-МОМА</i> од чворне тачке до чворне тачке .	64
4.46	Реализација програмиране путање платформе <i>РПКМ-МОМА</i> кретањем од чворне тачке до чворне тачке	65
4.47	Алгоритам за одређивање резолуције <i>РПКМ-МОМА</i>	66
4.48	Грешка позиционирања платформе <i>РПКМ-МОМА</i> при реализацији програмиране путање алата	67
4.49	Расподеле максималних вредности грешака позиционирања платформе механизма <i>РПКМ-МОМА</i> конфигурација <i>M1.1</i> , <i>M2.1</i> , <i>M3.1</i> , <i>M4.1</i> и <i>M5.1</i>	68
5.1	<i>CAD</i> модел проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	70

5.2	Новоуведене геометријске величине проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i> . . .	71
5.3	Оријентација главног вретена проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	71
5.4	Кинематички модел проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	72
5.5	Трансформација координатног система $\{Q\}$	74
6.1	Модули класе машина алатки заснованих на <i>РПКМ-МОМА</i>	82
6.2	Шематски приказ конфигурисања машина алатки из класе комплексних машина алатки заснованих на <i>РПКМ-МОМА</i>	84
6.3	Конфигурисање хардверског дела МА заснованих на <i>РПКМ-МОМА</i> са хоризонталном оријентацијом осе Oz	85
6.4	Конфигурисање хардверског дела МА заснованих на <i>РПКМ-МОМА</i> са вертикалном оријентацијом осе Oz	86
6.5	Конфигурисање хардверског дела МА заснованих на <i>РПКМ-МОМА</i> са вертикалном оријентацијом осе Oz	87
6.6	Кинематички модел обртног кретања	89
6.7	Кинематички модел две обртне осе	91
7.1	<i>CAD</i> модел вишеосне комплексне машине алатке	95
7.2	Кинематички модел вишеосне комплексне машине алатке <i>МОМА-W</i>	96
7.3	Позиције програмираних тачака C_1 и C_2 у односу на координатне системе $\{B_j\}$	98
7.4	Радни простор машине алатке <i>МОМА-W</i> конфигурације V4.5	102
7.5	Радни простор различитих конфигурација машине алатке <i>МОМА-W</i>	103
7.6	Симулација обраде вишеосном машином алатком <i>МОМА-W</i> конфигурације V4.5	105
7.7	Алгоритам за израчунавање грешке позиционирања платформи и грешке обраде вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i> за учитан <i>G-код</i> програм	106
7.8	<i>МОМА-W</i> конфигурација V4.5, грешке позиционирања платформе и грешке обраде	107
7.9	<i>МОМА-W</i> конфигурација V1.4, грешке позиционирања платформе и грешке обраде	107
7.10	<i>МОМА-W</i> конфигурација V3.3, грешке позиционирања платформе и грешке обраде	108
7.11	<i>МОМА-W</i> конфигурација V4.4, грешке позиционирања платформе и грешке обраде	108
7.12	Утицај грешака позиционирања платформи e_{P_j} на грешку обраде e_{C_1} и e_{C_2} вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i>	110
7.13	Кинематика процеса обраде вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i>	114
7.14	Одређивање брзина платформи машине алатке <i>МОМА-W</i> према теорији обртања крутог тела око непокретне тачке	115
7.15	Утицај конфигурације машине алатке <i>МОМА-W</i> на велике вредности брзина платформи P_1 и P_2	117
7.16	<i>CAD</i> модел комплексне вишеосне машине алатке <i>МОМА-W 4S</i>	118
7.17	Кинематички модел проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i> употребљене за градњу машине алатке <i>МОМА-W 4S</i>	119
7.18	Комплексна вишеосна машина алатка намењена за процес обраде глодањем	120

8.1	Структура управљачког система заснованог на <i>LinuxCNC</i> систему управљања прилагођен формираној класи комплексних машина алатки	124
8.2	Конфигуратор управљачког система <i>LinuxCNC</i>	126
8.3	Конфигурисање управљања за <i>РПКМ-МОМА</i>	127
8.4	Конфигурисање виртуелне машине <i>РПКМ-МОМА</i>	130
8.5	Виртуелна машина <i>РПКМ-МОМА</i> у оквиру управљачког система <i>LinuxCNC</i>	131
8.6	Мануелно реконфигурисање хардверског дела <i>РПКМ-МОМА</i>	132
8.7	Реконфигурисање виртуелне машине <i>РПКМ-МОМА</i> стандардним <i>G-код</i> функцијама	132
8.8	Синтеза система за програмирање са управљачким системом <i>LinuxCNC</i>	134
8.9	Ток информација при програмирању и реализацији програма израђених према стандарду <i>ISO-6983</i>	135
8.10	Ток информација при програмирању и реализацији програма израђених према <i>STEP-NC</i> протоколу	136
8.11	<i>STEP-NC Machine: Сценарио 1</i>	137
8.12	<i>STEP-NC Machine: Сценарио 2</i>	137
9.1	Експериментална поставка за верификацију рада машина алатки заснованих на основној и проширеној конфигурацији <i>РПКМ-МОМА</i>	140
9.2	Енергетски део управљачког система машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки	141
9.3	Спољашњи прикључци енергетског дела управљачког система	141
9.4	Верификација рада двоосне машине алатке <i>МОМА-2D</i>	142
9.5	Тест део <i>ISO 10791-7:1998 - Creo Parametric</i>	145
9.6	Израда тест дела на машини алатки <i>МОМА-3D</i>	146
9.7	<i>STEP-NC Machine - Сценарио 1</i>	147
9.8	Провера путање алата дефинисане у изворној <i>STEP-NC</i> датотеци	148
9.9	Верификација рада машине алатке <i>МОМА-3D</i> применом <i>STEP-NC</i> протокола према <i>Сценарију 1</i>	148
9.10	Тест део <i>ISO 14649-11:2004 - Creo Parametric</i>	149
9.11	Симулација рада машине алатке <i>МОМА-3D</i> у <i>STEP-NC Machine</i> окружењу - <i>Сценарио 2</i>	150
9.12	Верификација рада машине алатке <i>МОМА-3D</i> применом <i>STEP-NC</i> протокола према <i>Сценарију 2</i>	150
9.13	Експериментална поставка комплексне машине алатке <i>МОМА-W 4S</i>	151
9.14	Конвексно конкавни пробни део	152
9.15	Анализа путање алата за израду конвексно конкавног дела	153
9.16	Анализа рада комплексне машине алатке <i>МОМА-W 4S</i> развијеном апликацијом	154
9.17	Делови једноставног облика	155
9.18	Израда дела сложеног облика - лавља глава	156

9.19	Израда танкозидног дела - лого <i>МОМА</i>	156
9.20	Делови са нагнутим страницама израђени променом оријентације жице	157
9.21	Дугачак део израђен променом оријентације жице током процеса обраде - аеро профил	158
9.22	Украсне лајсне - делови израђени употребом потпрограма	159
9.23	Делови израђени параметарским програмом - зарубљени конуси различитих димензија	159
9.24	Израда грба Републике Србије обрадом унутрашње и спољашње контуре	160
<i>Сп.1</i>	Скица типске контуре за коју је дат параметарски програм	187
<i>Сп.2</i>	Скица типске контуре за коју је дат програм са потпрограмима	189
<i>Сп.3</i>	Грб фудбалског и кошаркашког клуба Црвена звезда	195
<i>Сп.4</i>	Лого Академије техничких струковних студија Београд	195
<i>Сп.5</i>	Планетарни механизам	195
<i>Сп.6</i>	Танкозидни делови израђени на машини алатки <i>МОМА-W 4S</i>	196
<i>Сп.7</i>	Шестокрака увијена звезда	196
<i>Сп.8</i>	Делови облика дијаманта	197

СПИСАК ТАБЕЛА

3.1	Геометријски параметри основних типова <i>РПКМ-МОМА</i>	33
4.1	Реализација кретања платформе механизма елементарним променама унутрашњих координата механизма	64
5.1	Новоуведени геометријски параметри проширене конфигурације <i>РПКМ-МОМА</i>	77
6.1	Матрица конфигурисања основних конфигурација машина алатки из класе комплексних машина алатки заснованих на <i>РПКМ-МОМА</i>	83
7.1	Геометријски параметри различитих конфигурација комплексне вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i>	102
7.2	Позиције координатних система $\{B_2\}$ и $\{W\}$ у односу на координатни систем $\{B_1\}$ анализираних конфигурација	106
7.3	Грешке позиционирања платформи паралелних механизма и грешке обраде анализираних конфигурација	109
7.4	Грешке позиционирања платформи и грешке обраде вишеосне машине алатке <i>МОМА-W</i> конфигурације V4.4 за различите вредности вектора ${}^{B_1}p_W$	111
7.5	Геометријски параметри комплексне вишеосне машине алатке <i>МОМА-W 4S</i>	119

У општено говорећи, машине алатке (МА) се користе за израду делова неопходних за градњу других машина и уређаја различитих намена. На основу изнете чињенице, може се тврдити да машине алатке представљају једну незаобилазну целину која се користи у многим гранама привреде па се самим тиме и увиђа њихов значај у целокупној индустрији. Посматрајући развој индустрије и развој МА, јасно се може уочити повезаност између степена развијености саме индустрије и степена развијености машина алатки што се и огледа у индустријским револуцијама [1]. Као део једног производног процеса, машине алатке са својим могућностима имају значајан утицај на ток самог производног процеса. Као битне карактеристике МА које утичу на производни процес могу се издвојити: могућност реализације одређеног процеса обраде, брзина израде, квалитет израде, економичност израде итд. На наведене карактеристике утичу појединачни подсистеми МА са својим карактеристикама. Унапређењем појединачних подсистема, унапређују се и карактеристике разматране машине алатке. Пратећи данашње трендове, докторска дисертација је усмерена ка развоју концепта за пројектовање машина алатки које ће својим карактеристикама и могућностима моћи да одговоре будућим захтевима које поставља сама технологија за израду конкретног дела.

1.1 Полазне хипотезе

Полазну тачку истраживачког рада усмереног ка развоју и концепцијском пројектовању једне класе комплексних машина алатки представљају хипотезе постављене на основу досадашњих сазнања и резултата истраживачког рада добијених пре почетка израде докторске дисертације. Полазне хипотезе, за које се очекује потврда резултата научно-истраживачког рада, су:

- *Прва хипотеза:* Карактеристике једне машине алатке са паралелном кинематиком се значајно могу променити променом конфигурације. Хипотеза ће бити потврђена применом математичких модела који су кориштени за низ анализа више различитих конфигурација једне двоосне реконфигурабилне машине алатке са паралелном кинематиком.

- *Друга хипотеза:* Реконфигурисање машине алатке са паралелном кинематиком се може реализовати на брз, лак и економски прихватљив начин. Хипотеза се најпре потврђује употребом постојећег, а потом и градњом новог двоосног раванског паралелног механизма који ће бити кориштен за израду нових машина алатки са три и више степени слободе, различитих конфигурација и намена.
- *Трећа хипотеза:* За једну фамилију машина алатки са паралелном кинематиком, могуће је конфигурисати јединствено реконфигурабилно управљање што ће бити потврђено извођењем низа уопштених и генерализованих једначина које представљају решења кинематичких проблема и важе за све машине алатке у оквиру фамилије машина алатки. Изведене генерализоване једначине се користе при конфигурисању јединственог реконфигурабилног управљања.
- *Четврта хипотеза:* Једна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком може се конфигурисати тако да је могуће да се користити за различите методе обраде. Хипотеза ће бити потврђена градњом једне комплексне вишеосне машине алатке ослањајући се на резултате истраживања који потврђују претходне хипотезе.

1.2 Предмет и циљ истраживања

Тренутно стање у глобалној индустрији је такво да се у највећој мери употребљавају машине алатке са серијском кинематиком. Истраживања су показала да машине алатке са паралелном кинематиком поседују извесне предности у односу на МА са серијском кинематиком те се у све већој мери комерцијализују и употребљавају у производним погонима за различите производне процесе. Неретко, као механизми МА користе се механизми са хибридном кинематиком који представљају комбинацију серијског и паралелног механизма. Управо из тог разлога су за предмет истраживања докторске дисертације одабрани хибридни и паралелни механизми машина алатки. Са циљем да се успостави формализам за конфигурисање хардверског и софтверског система по коме се машина алатка прилагођава постављеним захтевима, у оквиру истраживачког рада везаног за дисертацију, спроведено је низ анализа, испитивања и експеримената. На основу добијених резултата, паралелни и хибридни механизми анализирани у дисертацији, могу се значајно унапредити. Такође, на основу добијених резултата се могу конципирати и конфигурисати машине алатке које се бар по једном делу своје структуре разликују од разматраних машина алатки, чиме је и остварен постављени циљ дисертације. Од случаја до случаја, постављени захтеви могу бити различити па чак и контрадикторни те машина алатка са својим карактеристикама не може у најбољој мери одговорити свим постављеним захтевима. Карактеристике МА у великој мери зависе од конфигурације механизма машине алатке. Из тог разлога, намеће потреба за анализом механизма МА чија се конфигурација може брзо и лако мењати и прилагодити тренутним потребама [2,3]. Усвајањем концепта реконфигурабилности и употребом двоосног раванског реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком, формирана је група

машина алатки намењених за различите процесе обраде. Формирану групу чине машине алатке са заједничком основом и међусобно се разликују по конфигурацији механизма и кинематичким карактеристикама. Из тог разлога, формирана група је окарактерисана као једна класа машина алатки. Полазним хипотезама је одређен ток истраживачког рада који води ка реализацији уже одређених циљева као што су: i) успостављање концепта једне класе машина алатки, ii) формирање универзалних једначина намењених за анализе различитих конфигурација реконфигурабилног механизма, iii) формирање реконфигурабилног система управљања за машине алатки које припадају формираној класи. Физичком реализацијом и верификацијом рада машина алатки одабраних из формиране класе, према резултатима анализа приказаних у докторској дисертацији, потврђују се полазне хипотезе, оправдава успостављен концепт и постављају се основе за будућа истраживања.

1.3 Композиција рада

Након уводних разматрања и прегледа резултата досадашњих истраживања, у наредна два поглавља разматран је равански двоосни реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком који представља основу целог истраживачког рада докторске дисертације. Конкретно, у трећем поглављу након описа двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком, формиран је кинематички модел на основу кога су потом изведене једначине које представљају решења кинематичких проблема разматраног механизма. У трећем поглављу, дефинисани су и геометријски параметри којима је одређена свака конфигурација анализираних двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком. Постављањем појединих параметара за променљиве, и њиховим уврштавањем у изведене једначине кинематичких проблема, добијене су уопштене и генерализоване једначине. Изведене једначине важе за сваку конфигурацију механизма, без обзира да ли је дефинисана тренутним програмом градње или не.

Четврто поглавље обухвата различите анализе двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком описаног у трећем поглављу. Приказане анализе су засноване на изведеним генерализованим једначинама кинематичких проблема, а резултати приказаних анализа се користе приликом избора оптималне конфигурације механизма машине алатке према постављеним захтевима. Из формиране класе, у мањој или већој мери, различите конфигурације машина алатки могу испунити постављене захтеве. Избор једне оптималне од већег броја различитих конфигурација, које у одређеној мери испуњавају постављене захтеве, представља проблем који је неопходно ефикасно решити. Да би се решавање постављеног проблема поједноставило, истраживачким радом је обухваћен и развој апликације намењене за анализирање двоосног раванског реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком. У развијену апликацију су имплементирани генерализоване једначине кинематичких проблема, а избором одговарајућих геометријских параметара изведене једначине се прилагођавају одговарајућој конфигурацији анализираних механизма. Апликација поседује кинематичке

карактеристике стварне машине и пружа могућност симулације рада током процеса обраде. Са могућностима које пружа, апликација се може посматрати као виртуелна машина која се користи при избору оптималне конфигурације МА намењене за одређени процес обраде.

Са циљем да се број различитих конфигурација машина алатки у оквиру формиране класе повећа, дефинисана је проширена конфигурација двоосног раванског реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком. Новоформирана конфигурација механизма је слична основној па се и новоизведене једначине кинематичких проблема у оквиру петог поглавља незнатно разликују од претходно изведених једначина основне конфигурације. Новоизведене једначине са уведеним новим геометријским параметрима одговарају и основној и проширеној конфигурацији двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком и као такве представљају основу за предстојећа истраживања.

У шестом поглављу приказана је процедура по којој је формирана класа машина алатки заснованих на двоосном реконфигурабилном механизму са паралелном кинематиком. Основу сваке машине алатке унутар формиране класе чини основна или проширена конфигурација двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком. Концепт је заснован на проширивању једне од две разматране конфигурације двоосног механизма са паралелном кинематиком и то додавањем одређеног броја погонских оса. На тај начин су добијене машине алатке хибридног типа које поседују три или више погонских оса. За додатне погонске осе је неопходно већ изведене једначине кинематичких проблема проширити додатним једначинама како би кинематички модел машине био потпуно дефинисан.

У оквиру формиране класе, посебну групу чине машине алатке које у својој структури поседују више од једног двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком. У седмом поглављу је приказана једна реконфигурабилна машина алатка за коју су до сада дефинисане две различите конфигурације прилагођене различитим процесима обраде. Конфигурација приказане машине алатке се разликује од већине познатих по томе што поседује два механизма са паралелном кинематиком и по томе што се може користити за различите процесе обраде. У складу са наведеним, приказана машина алатка се може сврстати у групу комплексних машина. Развој и градња комплексне машине алатке приказане у осмом поглављу представља кључни резултат ове докторске дисертације. Верификацијом рада су потврђене успостављене хипотезе на основу којих се приступило изради докторске дисертације.

Конфигурисање хардверског дела је само један од корака у процедури конфигурисања целе машине алатке. Хардверском делу МА неопходна је подршка одговарајућег управљачког система који је конфигурисан тако да у потпуности одговара датој конфигурацији. Као евентуално погодни управљаки системи намећу се софтверски управљачки системи као што су: *LinuxCNC (EMC2)*, *KCAM*, *TurboCNC*, *Mach3* [4] и др. У осмом поглављу приказан је поступак конфигурисања реконфигурабилног управљачког система *LinuxCNC* на *PC* платформи као и поступак конфигурисања виртуелне машине која симулира рад стварне машине према имплементираним једначинама кинематичких проблема.

У деветом поглављу приказане су експерименталне поставке три различите машине алатке, које припадају формираној класи, чији је рад анализиран. За анализу рада одабраних машина, кориштени су програми који су добијени применом различитих метода програмирања. Пре саме реализације, вршена је провера припремљених програма како би се установило да ли се процес обраде може реализовати на одговарајућој машини алатки. У зависности од потреба, провера програма је рађена у кориштеним *CAD/CAM* софтверским системима и у већ поменутој развијеној апликацији. Пошто претходно споменуте методе нису погодне за проверу програма припремљених за реализацију на вишеосној комплексној машини алатки, развијена је нова апликација намењена за симулацију рада машине алатке према учитаном програму. У апликацију су имплементирани генерализоване једначине кинематичких проблема проширене конфигурације двоосног раванског реконфигурабилног механизма са вредностима геометријских параметара који одговарају развијеној и изграђеној машини. Једначине имплементирани у апликацију су у незнатно измењеном облику кориштене за формирање управљања вишеосном комплексном машином алатком. Анализом рада као и анализом квалитета и тачности обраде израђених делова, потврђен је исправан рад тестираних МА чиме је извршена верификација и потврђена исправност изведених генерализованих једначина кинематичких проблема.

У десетом поглављу изнети су закључци који су донешени на основу резултата истраживачког рада и резултата реализованих експеримената везаних за докторску дисертацију. У закључку је образложен научни допринос докторске дисертације области која је била предмет дисертације. У оквиру закључка су према резултатима досадашњег истраживачког рада дефинисани планови предстојећих истраживања за које постоји и оправданост и добре основе, а са циљем да се у континуитету настави са научноистраживачким радом чиме би се и у будуће давао научни допринос развоју машина алатки нове генерације.

У прилозима на крају докторске дисертације приказан је садржај једне датотеке којом је за двоосну реконфигурабилну машину алатку са паралелном кинематиком конфигурирана виртуелна машина алатка у оквиру *LinuxCNC* управљачког система. У оквиру прилога дат је садржај друге датотеке која садржи изведене једначине кинематичких проблема на основу које је конфигурирано управљање за наведену МА. У прилозима су приказани и делови израђени на различитим машинама алаткама чије су конфигурације разматране у претходним поглављима. Израђени делови представљају експериментални део докторске дисертације којим се потврђују теоријска разматрања и постављени математички модели који представљају резултате истраживачког рада докторске дисертације.

РЕЗУЛТАТИ ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

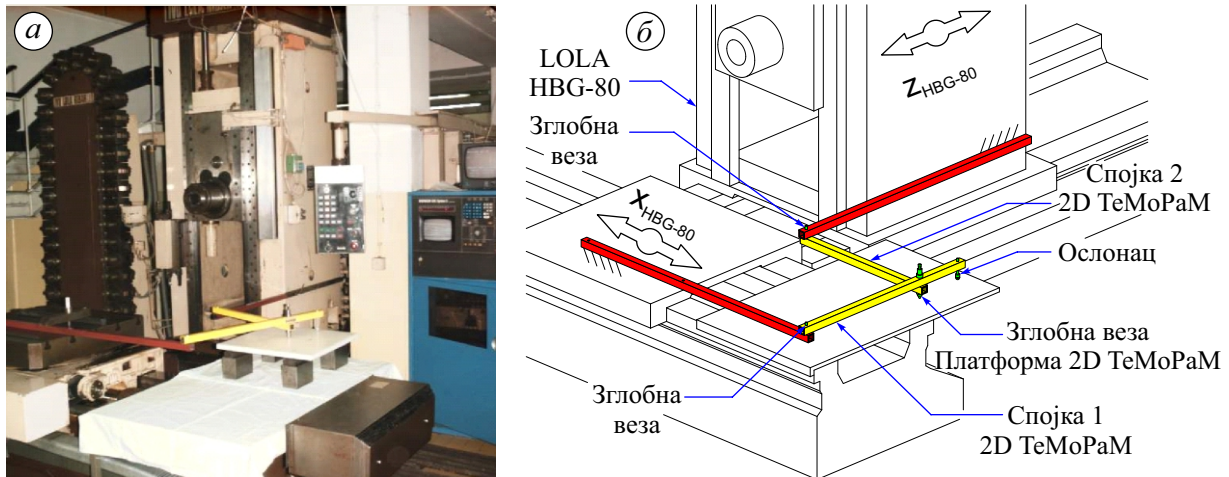
Осим у машинству, *CNC* машине алатке и индустријски роботи су нашли примену и у другим областима као што су стоматологија [5], медицина [6], [7], архитектура, грађевина [8] итд. Очигледан је значај *CNC* машина алатке у целокупној привреди те се и намеће потреба за непрестаним истраживањима и развојем ради унапређења њихових техничких карактеристика. Употреба *CNC* машина у различитим областима је резултат многих истраживања која су изучавала:

- методе обраде различитих материјала,
- структуру и конфигурацију машина намењених за одређени обрадни процес,
- анализе различитих карактеристика машине,
- оптимизацију појединих геометријских величина,
- системе програмирања и управљања.

Резултати досадашњих истраживања саопштених од стране многих аутора, пружили су могућност да се овом докторском дисертацијом дефинише другачији приступ при градњи и употреби будућих машина алатки. Применом концепта класе машина алатки, за потребе докторске дисертације су претходно наведене истраживачке области обједињене у једну целину, а добијени резултати пружају могућност да се на јединствени начин пројектују и конфигуришу машине алатке различитих конфигурација, различитих карактеристика и различите намене.

Основу докторске дисертације чини двоосни равански реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком, а у оквиру истраживачког рада су у највећој мери разматрани механизми и машине алатке који у делу своје структуре садрже сличан механизам. Након представљене *Stewart*-ове платформе са шест степени слободе [9], проучавању механизма са паралелном кинематиком се у све већој мери посвећује пажња, а у наставку прегледа литературе, наводе се радови чији су резултати у одређеној мери допринели развоју концепта класе комплексних машина алатки која је и предмет истраживања докторске дисертације.

Изучавање механизма са паралелном кинематиком на Катедри за производно машинство Машинског факултета у Београду, отпочела су развојем двоосног технолошког модула са паралелном кинематиком (*2D ТеМоРаМ*) [10], [11]. Верификација рада технолошког модула *2D ТеМоРаМ* је урађена помоћу обрадног центра *LOLA HBG-80* на кога је и постављен технолошки модул како је и приказано на слици 2.1.

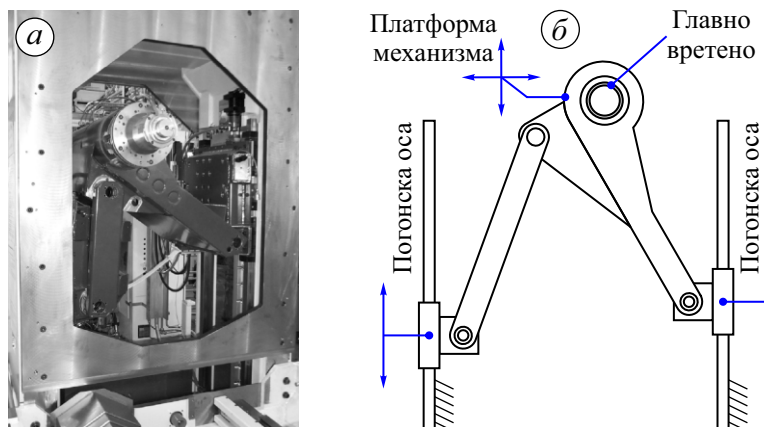


Слика 2.1 Технолошки модул са паралелном кинематиком *2D ТеМоРаМ*: а) Експериментална поставка; б) Шематски приказ (Преузето и дорађено - [10],[11])

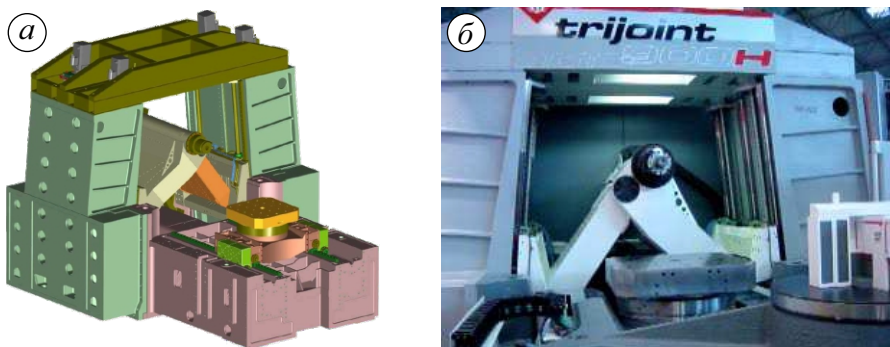
Технолошки модул *2D ТеМоРаМ* чине две спојке чији су крајеви међусобно зглобно повезани. Свака од спојки је својим другим крајем (почетак спојки) везана зглобном везом за сегменте који су причвршћени за покретне делове обрадног центра *LOLA HBG-80*. Конфигурисањем механизма на описан начин, погонским осама обрадног центра x и z реализује кретање почетака спојки технолошког модула у два међусобно управна правца. Жељено кретање платформе технолошког модула се реализује слагањем наведених кретања према учитаном програму. Кинематика технолошког модула *2D ТеМоРаМ* и обрадног центра *LOLA HBG-80* се међусобно разликују па се директним извршењем учитаног програма не добија жељено кретање платформе технолошког модула. До жељених кретања платформе технолошког модула, долази се трансформацијом изворног програма у нови програм и то применом једначина које представљају решења кинематичких проблема технолошког модула *2D ТеМоРаМ*. Трансформацијом програма из једног облика у други се за жељене позиције платформе технолошког модула израчунавају вредности координата x и z обрадног центра којима се остварује жељена позиција платформе. Програмирање технолошког модула *2D ТеМоРаМ* описаном процедуром је у ствари индиректан начин програмирања који је неуобичајен, а са становишта корисника непрактичан. Испитивања и анализе технолошког модула *2D ТеМоРаМ* су дали добре резултате чиме су се стекли услови за предстојећа истраживања. Истраживања и изучавања механизма са паралелном кинематиком су осим анализе хардверског дела механизма усмерена и ка конфигурисању управљачког система прилагођеног конфигурацији механизма. Управљачки систем прилагођен конфигурацији механизма између осталог за задатак има да у реалном времену на основу решења кинематичких проблема обавља

процедуру која је мануелно рађена код технолошког модула *2D TeMoPaM*. Имплементацијом једначина кинематичких проблема у управљачки систем машине, престаје потреба за конверзијом и прилагођавањем програма механизму *CNC* машине чиме је и само програмирање олакшано.

Даљим развојем технолошког модула *2D TeMoPaM*, добијен је двоосни равански паралелни механизам са транслаторним осама намењен за градњу стоних едукационих машина алатки. Развијени двоосни равански механизам са паралелном кинематиком носи назив *МОМА* и основа је ове докторске дисертације, а детаљан опис механизма је дат у трећем поглављу дисертације. Механизам *МОМА* је грађен по узору на механизме употребљене за градњу троосних машина алатки са хибридном кинематиком *Specht* [12], [13] (слика 2.2) и *Trijoint* [14] (слика 2.3). Равански паралелни механизми кориштени за градњу машина алатки *Specht* и *Tri-Joint* су механизми са константном дужином спојки и са транслаторним погонским осама чија се оријентација не може мењати. За разлику од претходно описаних паралелних механизма, паралелни механизам *МОМА* је механизам код кога се, према потребама, могу користити спојке различитих константних дужина и/или се променити оријентација погонских оса.

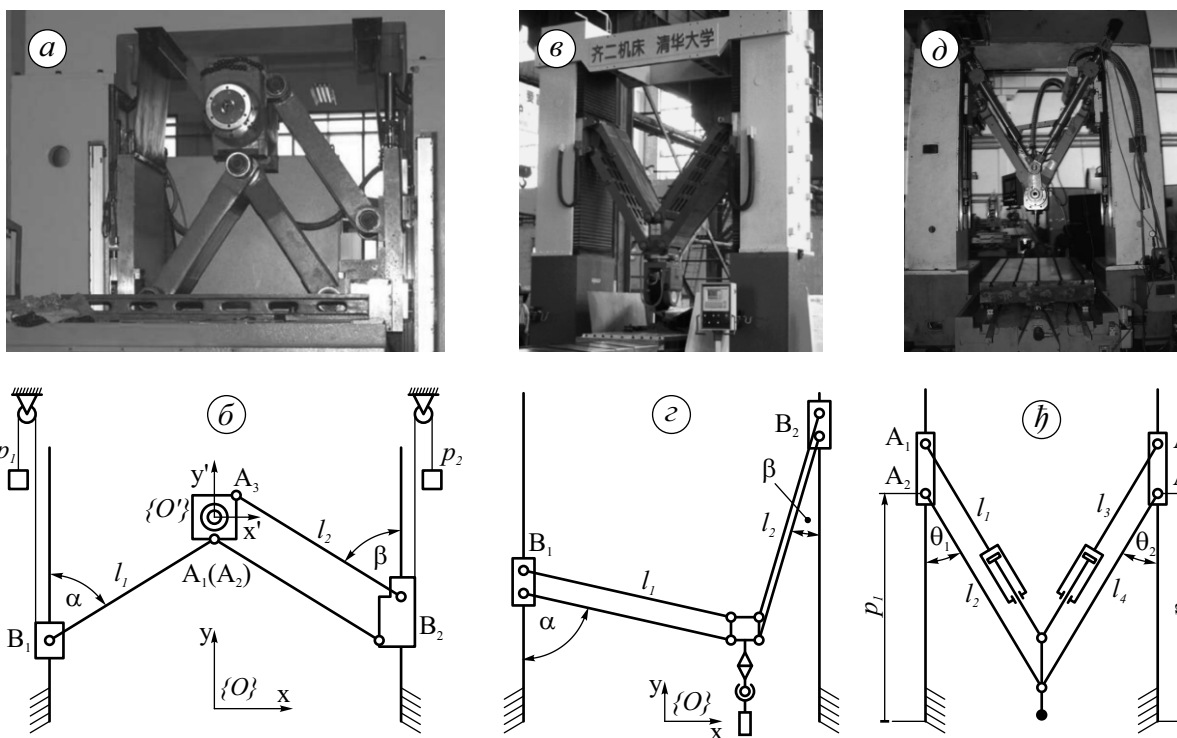


Слика 2.2 Троосна машина алатка са хибридном кинематиком - *Specht*: а) Изграђена машина алатка; б) Шематски приказ паралелног механизма употребљеног за градњу МА (Преузето и дорађено - [13])



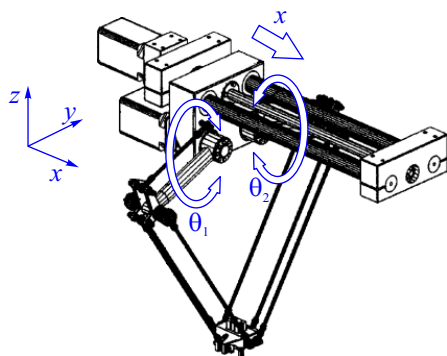
Слика 2.3 Троосна машина алатка са хибридном кинематиком - *TriJoint*: а) 3D Модел машине алатке; б) Изграђена машина алатка (Преузето и дорађено - [14])

У радовима [15–17] група аутора приказује физички реализоване хибридне машине алатке са различитим бројем степени слободe. Приказане машине алатке су засноване на двоосним раванским паралелним механизмима са два степена слободe. Иста група аутора је за своја даља истраживања двоосни равански паралелни механизам проширила на троосни равански паралелни механизам приказан на сликама 2.4.д и 2.4.ђ који је искориштен за градњу четвороосне и петоосне хибридне машине алатке [18]. Паралелни механизми употребљени за градњу машина алатки приказаних на слици 2.4 су у основи равански паралелни механизми са трансаторним погонским осама који за разлику од паралелних механизма машина алатки *Specht* и *TriJoint* поседују више од две спојке. На овај начин се за машине алатке са слике 2.4.а и 2.4.в обезбеђује константна оријентација платформе паралелног механизма док је употребом спојки променљиве дужине код машине алатке са слике 2.4.д добијен троосни равански паралелни механизам код кога се оријентација платформе механизма може мењати.



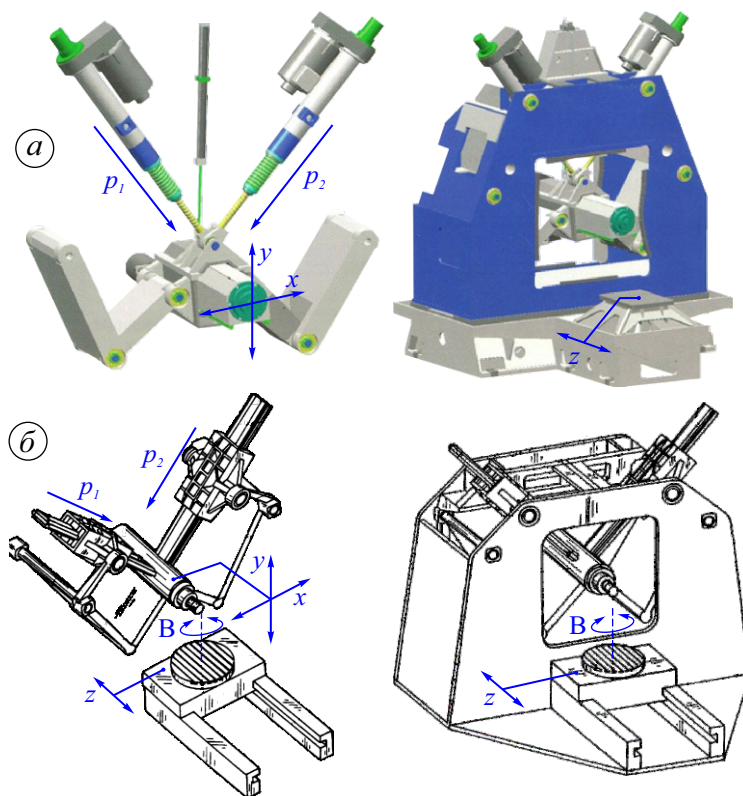
Слика 2.4 Машиње алатке са хибридном кинематиком: а),б) Двоосни равански паралелни механизам као део троосне хибридне машине алатке XNZD755; в),г) Двоосни равански паралелни механизам као део петоосне хибридне машине алатке XNZD2415; д),ђ) Троосни равански паралелни механизам. (Преузето и дорађено - [15–18])

У научном раду [19], приказан је концепт индустријског робота са хибридном кинематиком. Индустријски робот је намењен за "Pick & Place" операције и приказан је на слици 2.5. Механизам индустријског робота је заснован на двоосном раванском паралелном механизму са обртним погонским осама код кога су спојке константне дужине. Двоосни механизам има могућност трансаторног кретања дуж треће осе што га чини индустријским роботом са хибридном кинематиком.



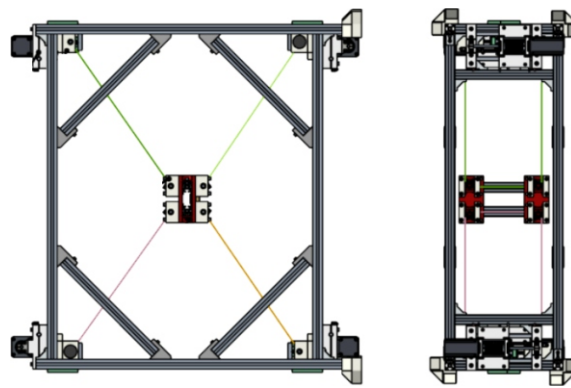
Слика 2.5 Троосни индустријски робот са хибридном кинематиком заснован на раванском Delta механизму (Преузето и дорађено - [19])

Спојке променљиве дужине су кориштене за градњу двоосних раванских паралелних механизма који су део машине алатке *ДинаМ* [20]. Код машине алатке са слике 2.6.a, кретање платформе паралелног механизма обезбеђују спојке код којих се дужине мењају помоћу завојних вретена док је променљива дужина спојки раванског паралелног механизма хибридне машине алатке са 2.6.б реализована употребом линеарних мотора. У оба случаја платформе паралелних механизма имају могућност транслаторног кретања у вертикалној *Oxy* равни. Паралелном механизму са слике 2.6.a, серијски је додата транслаторна оса дуж које се може кретати радни сто МА док је паралелном механизму са слике 2.6.б осим транслаторне осе додата и обртна оса којом се радни сто може обртати око вертикалне осе *y*. На овај начин су добијене машине алатке са хибридном механизмима.

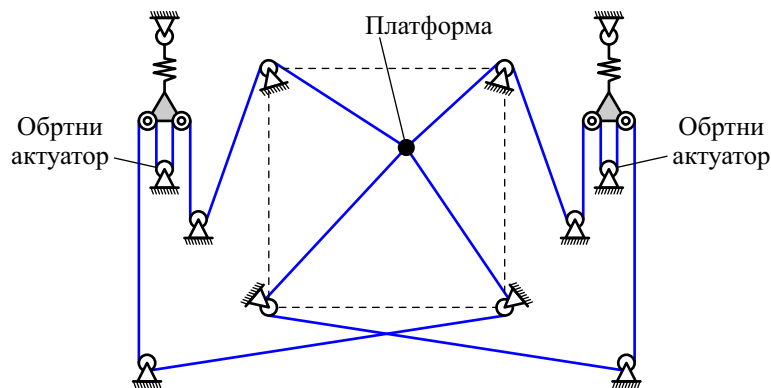


Слика 2.6 3D модел хибридне машине алатке *ДинаМ*: а) Са завојним вретенима; б) Са линеарним моторима (Преузето и дорађено - [20])

Двоосни паралелни механизми приказани на сликама 2.2 до 2.6 кориштени за градњу машина алатки различитих конфигурација су окарактерисани као механизми са крутим спојкама које могу бити константне или променљиве дужине. Осим паралелних механизма са крутим спојкама, предмет неких истраживања је група механизма који су окарактерисани као механизми са флексибилним спојкама [21] који се још и називају *Cable-Loop-Driven*¹ механизми [22]. Спојке *Cable-Loop-Driven* механизма су променљиве дужине, а пошто су флексибилне могу бити оптерећене само на истезање при чему се затегнутост остварује помоћу опруга. На сликама 2.7 и 2.8, приказани су 3D модел и шема двоосног раванског паралелног механизма са флексибилним спојкама. Група паралелних механизма са флексибилним спојкама није од значаја за израду ове докторске дисертације, али се спомињу у прегледу досадашњих истраживања јер припадају групи двоосних раванских паралелних механизма.



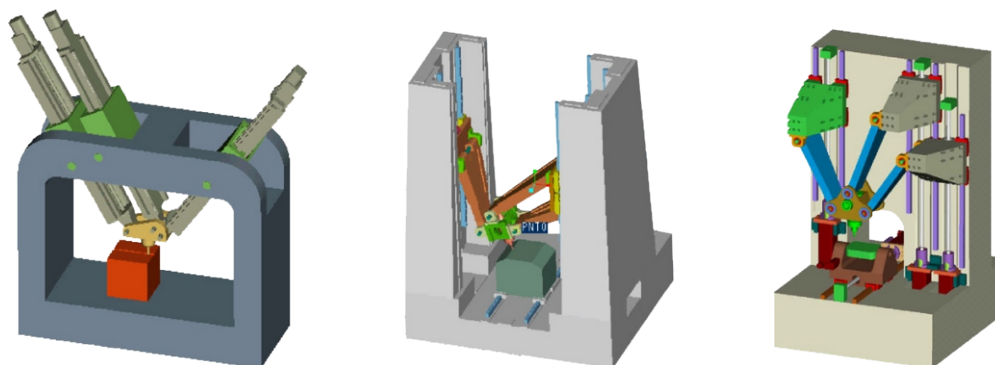
Слика 2.7 3D Модел раванског паралелног механизма са флексибилним спојкама (Преузето и дорађено - [21])



Слика 2.8 Шематски приказ раванског паралелног механизма са флексибилним спојкама (Преузето и дорађено - [22])

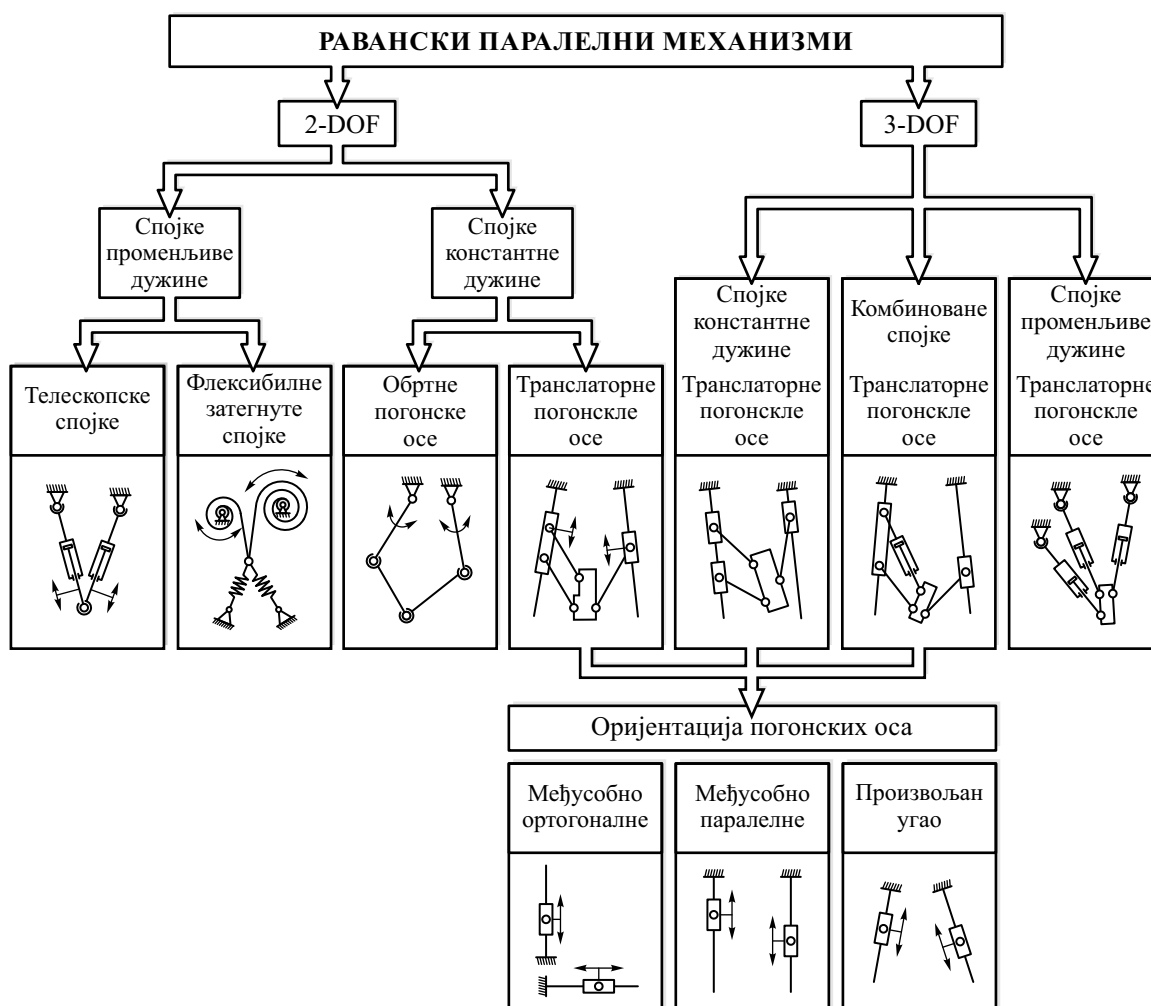
Петоосна хибридна машина алатка заснована на троосном раванском паралелном механизму са транслаторним погонским осама представљена је у научном раду [23]. У наведеном научном раду, приказане су различите конфигурације троосног раванског механизма као дела петоосне хибридне машине алатке (слика 2.9).

¹eng. *Cable-Loop-Driven* - Механизми са кабловима који се намотавају



Слика 2.9 Конфигурације троосног раванског паралелног механизма као дела петоосне МА са хибридном кинематиком (Преузето и дорађено - [23])

Анализом различитих конфигурација механизма разматраних у цитираним радовима, може се успоставити класификација раванских паралелних механизма по више основа. Основна подела раванских паралелних механизма је подела према броју степени слободe (DOF^2) па према слици 2.10 равански паралелни механизми могу имати два или три степена слободe.

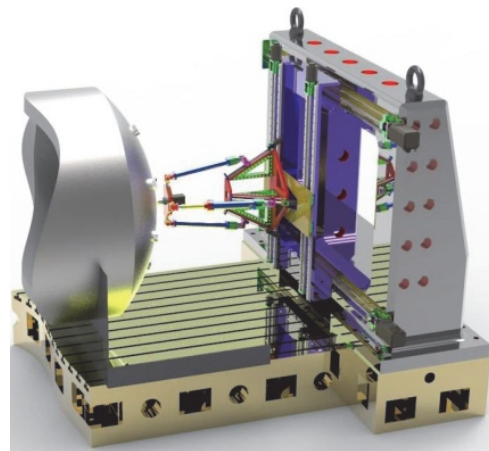


Слика 2.10 Класификација раванских паралелних механизма

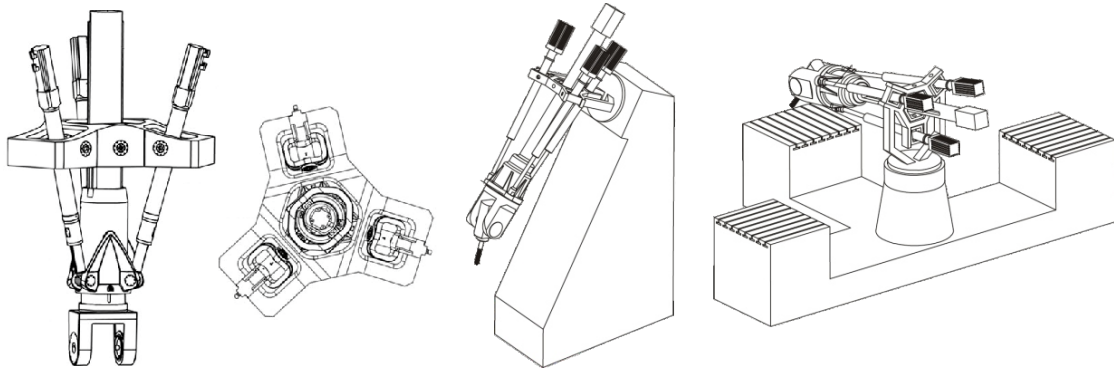
²eng. DOF - Degrees of Freedom

Како је приказано слици 2.10, приликом конфигурисања раванских паралелних механизма се могу користити спојке променљиве или спојке константне дужине при чему спојке променљиве дужине могу бити круте или флексибилне. Променљива дужина крутих спојки се обезбеђује одговарајућим актуаторима (слика 2.6) па самим тиме спојка представља погонску осу механизма. Флексибилне спојке променљиве дужине захтевају мотор (слике 2.7 и 2.8) који обрће калем у једном или другом смеру при чему се флексибилна спојка (сајла, жица, кабл итд.) намотава и одмотава са калема. Склоп мотора, калема и флексибилне спојке представља погонску осу механизма. Са друге стране, спојке константне дужине се користе за конфигурисање механизма са обртним (слика 2.5) и транслаторним погонским осама (слике 2.2 и 2.3) што је и приказано класификацијом раванских паралелних механизма на слици 2.10. Према претходно цитираним радовима, неретко се приликом конфигурисања раванских паралелних механизма спојке константне дужине комбинују са спојкама променљиве дужине чиме се добијају $3-DOF$ равански паралелни механизми код којих се помоћу треће погонске осе управља оријентацијом платформе раванског паралелног механизма (слике 2.4.д и 2.4.ђ). За израду ове докторске дисертације, од значаја су двоосни равански паралелни механизми са транслаторним погонским осама различите оријентације, а група троосних раванских паралелних механизма приказаних на слици 2.10 ће бити предмет будућих истраживања.

Концепт реконфигурабилних обрадних система [2,3] и концепт реконфигурабилних машина алатки [24,25] је усвојен од стране многих аутора који предлажу различите конфигурације реконфигурабилних машина алатки. Примењујући концепт реконфигурабилности, за процес обраде материјала глодањем, аутори у оквиру научног рада [26] предлажу обрадни систем заснован на реконфигурабилном роботу *LOLA-50* са серијском кинематиком. Аутори радова [27,28] предлажу хибридне машине алатке које у основи поседује троосни паралелни механизам са транслаторним осама (слика 2.11) док аутори радова [29,30] предлажу реконфигурабилног индустријског робота са хибридном кинематиком који у основи имају троосни индустријски робот *Tricept* са спојкама променљиве дужине (слика 2.12).

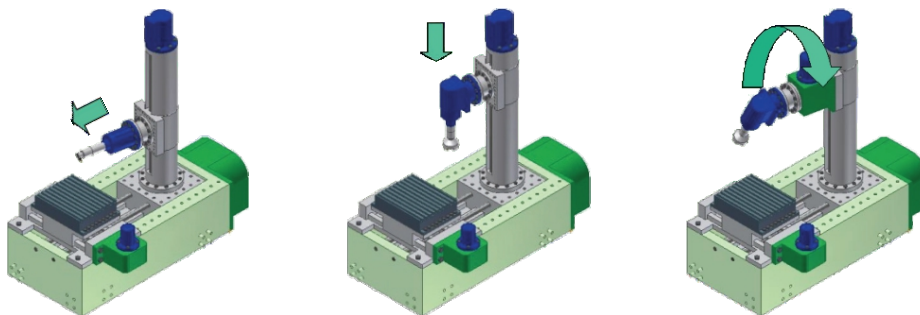


Слика 2.11 Реконфигурабилне машине алатке засноване на троосном паралелном механизму са транслаторним осама (Преузето и дорађено - [27,28])



Слика 2.12 Реконфигурабилни индустријски робот *Tricert* (Преузето и дорађено - [29,30])

У претходно наведеним радовима, реконфигурабилност машина алатки и индустријских робота (*ИР*) се огледа у лакој и брзој промени тренутне конфигурације на економски исплатив начин [2]. Реконфигурабилност једне машине алатке се може огледати и у брзој и лакој промени намене машине изменом једног од што је и приказано у оквиру научног рада [31]. Машина алатка разматрана у научном раду [31] намењена је за обраду материјала глодањем, брушењем и полирањем. Модуларни принцип градње на коме се и заснивају реконфигурабилне машине алатке је разматран у научном раду [32]. Према модуларном принципу градње, у наведеном раду је приказана методологија конфигурисања различитих машина алатки употребом одговарајућих расположивих модула (слика 2.13).

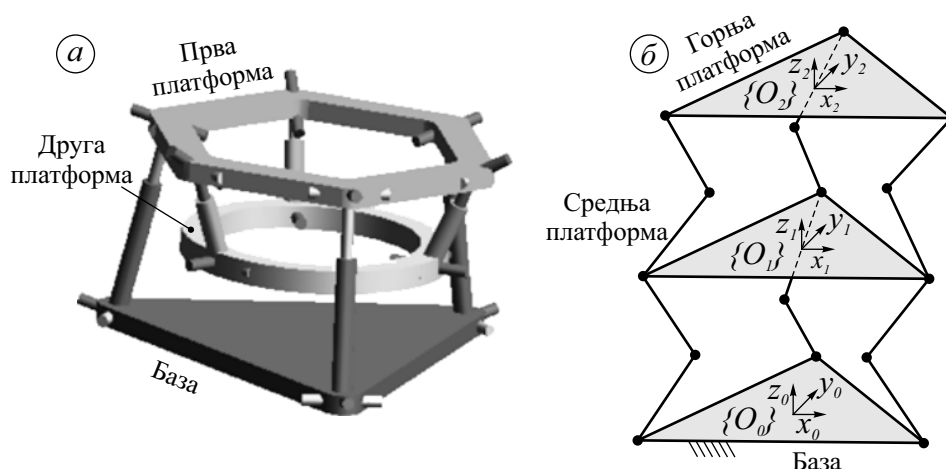


Слика 2.13 Реконфигурабилна машина алатка грађена по модуларном принципу градње (Преузето и дорађено - [32])

Аутори научног рада [33] су представили методологију конфигурисања модуларне реконфигурабилне машине алатке (*MRM³*) као и методологију конфигурисања њених подсистема према геометрији дела који се израђује. У научном раду [33], за реконфигурабилни хардвер којим је могуће конфигурисати *3-DOF*, *4-DOF*, *5-DOF* и *6-DOF* машине алатке, приказан је развијени реконфигурабилни систем управљања који представља саставни део реконфигурабилног система. У научном раду [34] је приказан преглед различитих мултифункционалних машина алатки, методологија њихових конфигурисања и реконфигурисања, технологија програмирања и технологија управљања прилагођена кинематици мултифункционалне машине.

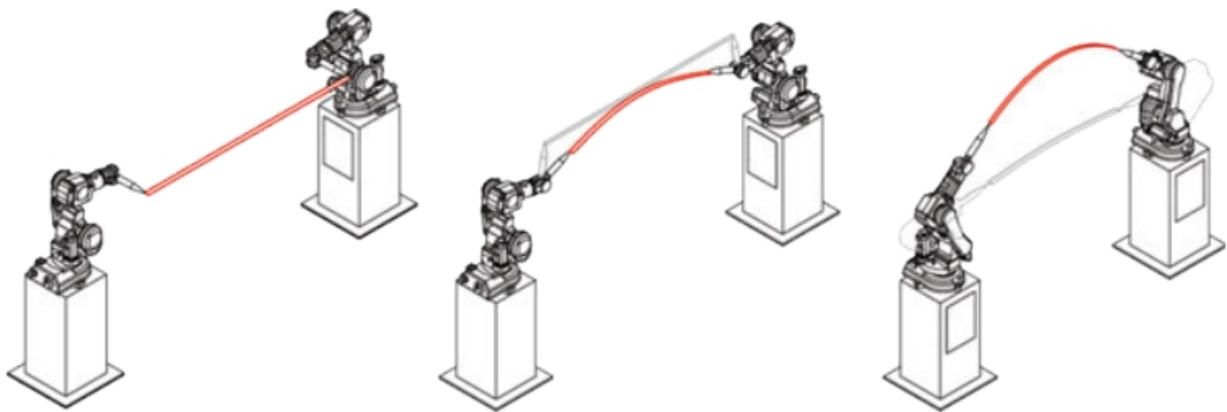
³eng. *MRM* - Modular Reconfigurable Machine

Са циљем да се процеси обраде унапреде и побољшају, истраживачи су своја истраживања усмерили ка анализи различитих конфигурација машина алатки како би се дефинисале процедуре којима се долази до оне конфигурације која у потребној мери испуњава постављене захтеве. Узимајући у обзир карактеристике традиционалних серијских механизма као што су: радни простори правилног облика, једноставна кинематика, непостојање сингуларних тачака, велика маса покретних делова, велике инерцијалне силе итд. као и карактеристике паралелних механизма као што су: веће брзине рада, боља крутост, мање масе покретних делова, мање инерцијалне силе, радни простори неправилног облика, сложена кинематика, постојање сингуларитета итд. [35–37], често се при конфигурисању машина алатки и индустријских робота прибегава комбинацији једног механизма са паралелном кинематиком са другим механизмом чија кинематика може бити или серијска или паралелна. Механизми настали серијским повезивањем два механизма од којих је један механизам са паралелном кинематиком, називају се хибридни механизми. Код хибридних механизма су искориштене предности серијских и паралелних механизма, а утицај недостатака појединачних механизма на карактеристике хибридног механизма је редукован. Посебну групу машина алатки чине *МА* чији се механизам може окарактерисати као механизам са хибридном кинематиком, а у својој структури поседује више од једног паралелног механизма. Спајањем два паралелна механизма са по три степена слободe, при чему је база једног механизма постављена као платформа другог паралелног механизма, добијени су механизми са шест степени слободe [37,38]. Механизам анализиран у научном раду [38] је механизам са транслаторним погонским осама и спојкама променљиве дужине (слика 2.14.а) док је механизам анализиран у научном раду [37] механизам са спојкама константне дужине и обртним погонским осама (слика 2.14.б). Спајањем два паралелна механизма (слика 2.14), због постојања и серијске и паралелне везе, добијен је механизам са хибридном кинематиком. У радовима [39,40] је приказана методологија конфигурисања и анализе хибридних механизма састављених од два или више паралелних механизма међусобно повезаних серијском везом.



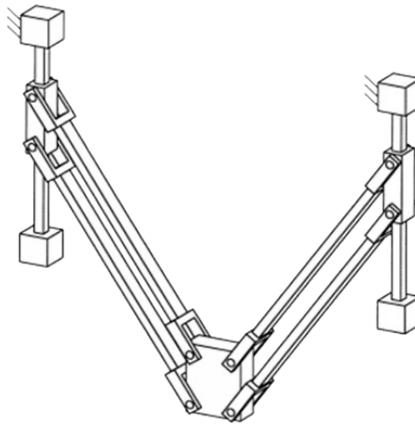
Слика 2.14 Хибридни механизми конфигурисани повезивањем два паралелна механизма: а) Механизам са спојкама променљиве дужине; б) Механизам са обртним погонским осама (Преузето и дорађено -[37,38])

Механизми сачињени од два или више паралелна механизма се обрађују у једном делу докторске дисертације, али са нешто другачијим приступом. По угледу на научни рад [41] у коме је приказана сарадња (кооперација) два индустријска робота (слика 2.15) током процеса обраде сечења материјала, и узимајући у обзир [37–40], у засебном поглављу докторске дисертације је разматрана машина алатка сачињена од два паралелна механизма који током процеса обраде синхронизовано раде.



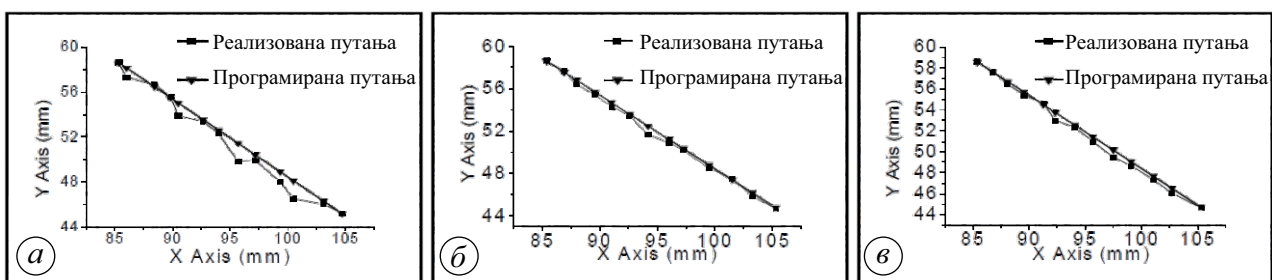
Слика 2.15 Синхронизовани рад два индустријска робота током процеса сечења пенастих материјала усијаном жицом (Преузето и дорађено -[41])

У претходно наведеним радовима аутори су осим конфигурације предложених механизма вршили и различите анализе како би се потврдила оправданост градње предложених конфигурација. Основне и неизбежне анализе су анализа облика и величине радног простора разматраног механизма *МА* или *ИР* као и утврђивање кинематичких карактеристика механизма за позиције алата (или завршног уређаја код *ИР*) у свим или неким карактеристичним тачкама одређеног радног простора. Осим наведених анализа, аутори научних радова приказују и различите методологије којима се карактеристике механизма побољшавају. Тако, већ поменути аутори у научном раду [18] приказују методологију по којој се долази до оптималне конфигурације механизма машине алатке узимајући у обзир површину радног простора као критеријум оптимизације. У научном раду [15], аутори приказују анализу динамичког понашања паралелног механизма током рада машине алатке. Оптимизација кинематике и динамике двоосног раванског паралелног механизма по више критеријума је приказана и у научном раду [42]. Као критеријуми за оптимизацију су кориштени крутост механизма као и кинематичке и динамичке карактеристике. Према наведеним критеријумима су одређене оптималне вредности геометријских параметара анализираног паралелног механизма. Оптимизација двоосног раванског паралелног механизма (слика 2.16) са незнатно сложенијом геометријом је приказана у научном раду [43]. У научном раду [44] је приказана оптимизација геометрије робота заснованог на троосном просторном паралелном механизму при чему су као критеријуми узети величина радног простора, крутост, кинематичке и динамичке карактеристике.



Слика 2.16 Двоосни равански механизам са паралелном кинематиком - 2DOF РКМ (Преузето и дорађено -[43])

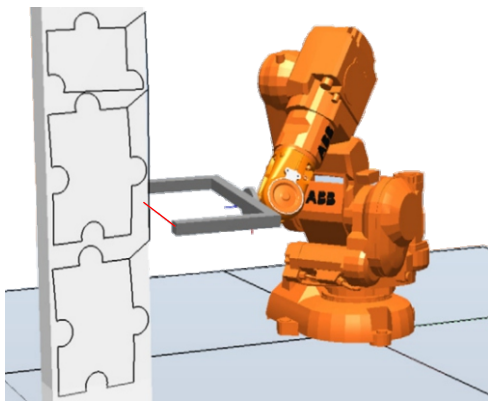
За разлику од традиционалних серијских механизма, резолуција паралелних механизма није иста у свакој тачки радног простора. У зависности од геометрије механизма, резолуција механизма у појединим тачкама радног простора се може значајно разликовати од резолуције погонских оса механизма. Пошто резолуција механизма директно утиче на квалитет обрадног процеса, неопходно је и резолуцију механизма уврстити у групу критеријума према којима се конфигурише паралелни механизам [45]. Група аутора је у научним радовима [46,47] приказала методологију за одређивање резолуције раванског паралелног механизма. На слици 2.17 су приказани резултати анализе одступања реализоване од програмиране путање платформе троосног раванског паралелног механизма са обртним погонским осама, а за различите вредности корака корачног мотора [47]. Према наводима аутора, максималне грешке у реализованој путањи имају вредности $e_{1/1}=1.626\text{ mm}$, $e_{1/2}=0.864\text{ mm}$ и $e_{1/4}=0.772\text{ mm}$ за пун корак, полукорак и четвртину корака корачног мотора, респективно.



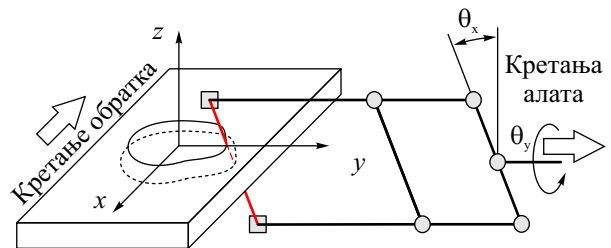
Слика 2.17 Грешке у реализованој путањи троосног раванског паралелног механизма: а) Пун корак корачног мотора; б) 1/2 корака корачног мотора; в) 1/4 корака корачног мотора (Преузето и дорађено -[47])

У научним радовима [48] и [49] су приказани резултати анализе прецизности просторног троосног механизма са обртним погонским осама (*Delta Robot*) док је у [50] и [51] приказано моделирање и грешке позиционирања платформе троосног просторног паралелног механизма са транслаторним погонским осама који је кориштен за конфигурисање 3D-штампача [52].

Машине алатке и индустријски роботи се осим за конвенционалне методе обраде (обрада резањем и обрада пластичним деформисањем) користе и за различите неконвенционалне методе. У научном раду [53] је предложена употреба индустријског робота за израду сложених облика сечењем пенастих материјала усијаном жицом (слика 2.18). Обрада пенастих материјала индустријским роботом *Modelangelo* и усијаном жицом са једним слободним крајем је приказана у научном раду [54]. Анализа утицаја различитих параметара обраде при сечењу пенастих материјала усијаном жицом је приказана у научном раду [55], при чему је за експерименте коришћена једна *CNC* машина алатка са серијском кинематиком управљана микроконтролером *Arduino Mega 2560*. Четвороосна машина алатка са нетрадиционалном серијском кинематиком, намењена за сечење пенастих материјала (слика 2.19), користи се за брзу израду прототипова методама *LOM*⁴ (израда делова у облику ламела) и *VLM*⁵ (израда делова у облику ламела различите дебљине) је разматрана у научном раду [56]. Обрада материјала помоћу жице се користи и за сечење метала електроерозионом (*W-EDM*)⁶ методом. У научним радовима [57–59], анализирана је примена *W-EDM* методе обраде за израду микро делова. Процеси обраде сечења пенастих материјала усијаном жицом и сечења метала *W-EDM* методом имају велики значај у производним технологијама. Истраживања и испитивања машина алатки које подржавају наведене методе су и даље актуелна. Из тог разлога део истраживачког рада везан за докторску дисертацију усмерен је ка анализи, конфигурисању и градњи машине алатке намењене за процес обраде сечења пенастих материјала усијаном жицом.



Слика 2.18 Сечење пенастих материјала усијаном жицом помоћу индустријског робота (Преузето и дорађено - [53])



Слика 2.19 Кинематика једне серијске четвороосне машине алатке намењене за сечење пенастих материјала усијаном жицом (Преузето и дорађено - [56])

Током истраживања, од многих доступних система за управљање машинама алаткама и роботима, истраживачи су се у највећој мери опредељивали за систем отворене архитектуре заснован на *PC-Linux* платформи и *LinuxCNC* софтверском систему. Софтверски систем

⁴eng. *LOM* - Laminated Object Manufacturing

⁵eng. *VLM* - Variable Lamination Manufacturing

⁶eng. *W-EDM* - Wire Elctrical Discharge Machining

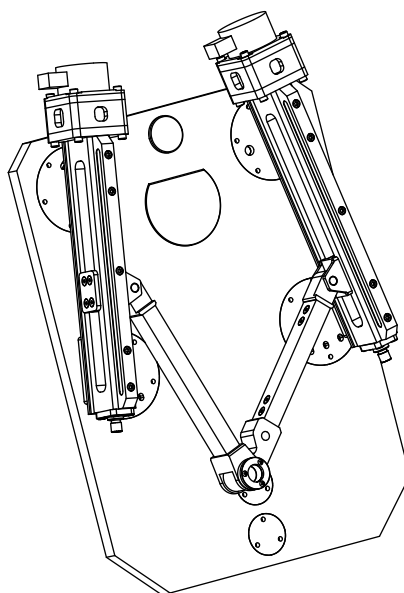
LinuxCNC је систем отворене архитектуре који омогућава конфигуравање управљања према кинематици машине [60]. Осим за управљање машинама алаткама са тривијалном кинематиком попут *MA* за сечење воденим млазом [61] и *CNC* машине алатке малих габарита [62], софтверски управљачки систем *LinuxCNC* је у многим научним радовима кориштен за формирање управљачког система индустријских робота и машина алатки са не-тривијалном и сложеном кинематиком. У научном раду [63], *LinuxCNC* софтверски систем је кориштен за управљање четвороосном машином алатком са серијском кинематиком, конфигурације *XYZA* намењене за обраду дрвета. За управљање вишеосном машином алатком за обраду дрвета [64] је такође кориштен *LinuxCNC* софтверски систем. У научном раду [65] је констатовано да је за индустријску употребу управљачки систем *LinuxCNC* погоднији од управљачког система *Mach3* након тестирања оба система на индустријском роботу *ASEA IRB6S2*. Управљање шестоосним индустријским роботом *LOLA50* намењеном за машинску обраду је приказано у научном раду [66] при чему је управљачки систем конфигурисан тако да *IP* може радити као петоосна вертикална и као петоосна хоризонтална глодалица. У научном раду [67] је искориштена могућност повезивања *Linux-CNC* система и *V-rep* софтверског система отворене архитектуре. *V-rep* софтверски систем може се користити за комуникацију са *LinuxCNC* системом, а намењен је за симулацију рада *IP*. Софтверски систем *LinuxCNC* се показао као погодан систем за формирање управљачког система за машине алатке и индустријске роботе са паралелном или хибридном кинематиком. У научним радовима [68] и [69], *LinuxCNC* је искориштен за формирање управљања за троосне хибридне машине различитих конфигурација док је у радовима [70–72], искориштен за конфигуравање управљања за троосне машине са паралелном кинематиком. Управљачки систем *LinuxCNC* заснован на *PC-Linux* платформи са својим функцијама за програмирање *CNC* машина алатки је најсличнији *Fanuc* управљачким јединицама, а за реализацију процеса обраде се могу користити програми различитог облика као што су: i) једноставни програми ручно израђени; ii) параметарски програми [73]; iii) програми са пот-програмирањем; iv) програми генерисани неким од *CAD/CAM* система [74].

Као алтернатива досадашњем начину програмирања и управљања, намеће се нови начин програмирања и управљања *CNC* машина према групи стандарда *ISO-14679* [75] и *ISO-10303 AP238* [76], познати као *STEP-NC*. Нов начин програмирања и управљања поседује низ предности у односу на досадашњи начин програмирања (применом *G-код*-а) и управљања по стандарду *ISO-6983* [77]. Даљи развој програмирања применом *STEP-NC* протокола има за циљ да се машинама управља помоћу геометрије обратка без непотребних конверзија података приликом припреме машине за рад. За реализацију постављеног циља постоји низ препрека, али многа истраживања су до сада дала резултате који се могу употребити у имплементацији *STEP-NC* стандарда. За интерпретацију *STEP-NC* програма и за управљање кретањима *CNC* машине према *STEP-NC* програму најчешће се користи софтверски систем *STEP-NC Machine*. Највећа препрека за широку употребу софтверског система *STEP-NC Machine* је недостатак контролера који би реализовали задатке добијене од софтверског система *STEP-NC Machine*, а на основу података, команди и функција садржаних у *STEP-NC* програму. Из тог разлога, један

од праваца истраживања из области новог начина програмирања и управљања *CNC* машинама усмерен је ка развоју контролера [78,79] који подржавају *STEP-NC* стандард. Други правац истраживања усмерен је ка изради и употреби *STEP-NC* програма за различите методе обраде као што су сечење метала жицом (*W-EDM*) [80], обрада материјала применом индустријских робота [81,82], обрада глодањем [83,84] итд.

РАВАНСКИ РЕКОНФИГУРАБИЛНИ МЕХАНИЗАМ СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ - МОМА

Основу истраживачког рада везаног за ову дисертацију чини двоосни равански механизам са паралелном кинематиком. Механизам је прављен по модуларном принципу градње па отуда и потиче назив механизма *МОМА* који је у ствари акроним од **МО**дуларна **МА**шина **А**латка. На слици 3.1 приказан је *3D-CAD* модел раванског паралелног механизма *МОМА*.



Слика 3.1 *CAD* модел раванског паралелног механизма *МОМА*

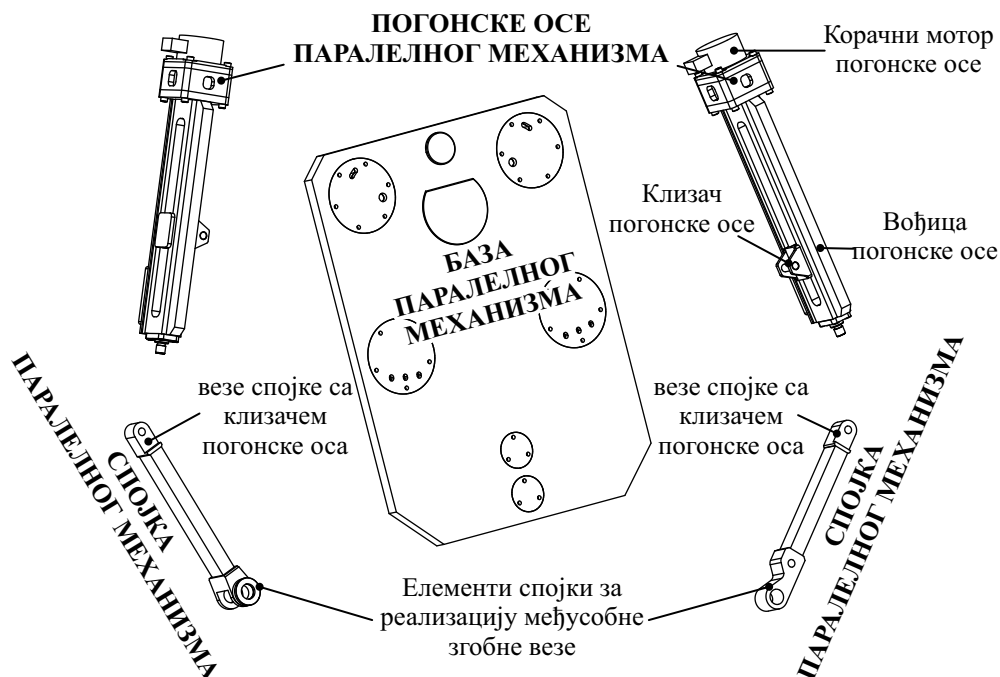
Како је цела класа комплексних машина алатки која се разматра у докторској дисертацији заснована на раванском паралелном механизму *МОМА*, резултати анализа које обухвата ово поглавље, могу се користити приликом конфигурисања било које од машина алатки које ће бити приказане у наредним поглављима. Након описа двоосног раванског паралелног механизма

МОМА, на основу формираног геометријског модела механизма дата решења кинематичких проблема механизма. Потом су приказане анализе засноване на изведеним једначинама кинематичких проблема на основу чијих резултата се механизам конфигурише.

3.1 Опис реконфигурабилног раванског механизма са паралелном кинематиком *МОМА*

Равански паралелни механизам *МОМА* је настао уопштавањем технолошког модула са паралелном кинематиком *2D TeMoPaM* [10,11], а истраживања и постигнути резултати приказани у оквиру дисертације су наставак претходних истраживања [85]. Равански паралелни механизам *МОМА* чине модули механизма (подсклопови) повезани у једну целину (главни склоп). Модули двоосног раванског механизма са паралелном кинематиком *МОМА* ,приказани на слици 3.2, су:

- **Погонске осе** конфигурисане тако да се обртна кретања корачних мотора преко завојних вретена претварају у транслаторна кретања клизача дуж вођица погонских оса,
- **База паралелног механизма** са елементима за везу са погонским осама,
- **Спојке** са елементима за међусобну зглобну везу и са елементима за зглобну везу са клизачима погонских оса.



Слика 3.2 Модули раванског паралелног механизма *МОМА* са главним саставним елементима

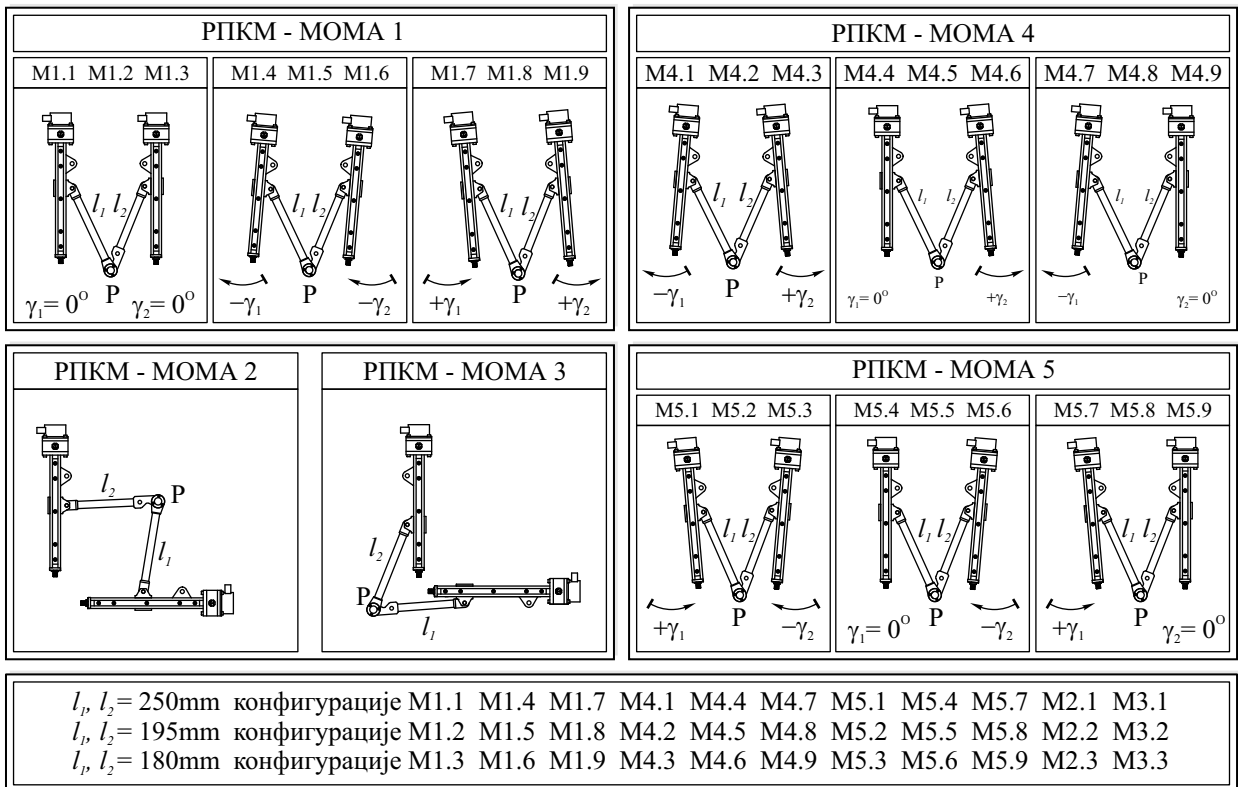
Према слици 3.1 и слици 3.2, погонске осе двоосног раванског паралелног механизма су круто везане за базу паралелног механизма. Спојке паралелног механизма су једним својим крајем обртном зглобном везом спојене са клизачима погонских оса. Позивањем модула механизма на описан начин, омогућено је транслаторно кретање крајева спојки који су везане за клизаче погонских оса. Својим другим крајем, спојке раванског паралелног

механизма су међусобно повезане обртном зглобном везом. Слагањем трансляторних кретања крајева спојки везаних за клизаче погонских оса, омогућује се кретање зглобне везе између спојки паралелног механизма у два правца. Зглобна веза између две спојке представља платформу двоосног раванског паралелног механизма *МОМА*. Веза између погонских оса и базе паралелног механизма је реализована тако да се погонским осамма може подесити одговарајућа оријентација. Пре пуштања у рад, на двоосни паралелни механизам *МОМА* се постављају спојке одговарајуће дужине. Променом оријентације погонских оса и коришћењем спојки различитих дужина, мења се и геометрија двоосног паралелног механизма *МОМА*. Како се геометрија механизма може променити на лак, брз и економско прихватљив начин [24], описани механизам се може окарактерисати као реконфигурабилни механизам чија се конфигурација може мењати и прилагодити тренутним потребама [2,3] променом оријентације погонских оса и/или променом дужине спојки. Надаље, за двоосни механизам *МОМА*, у складу са описаним могућностима, биће кориштен назив *Реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком* или скраћено *РПКМ* (енг. ***RPKM - Reconfigurable Parallel Kinematic Machine***) као што је и кориштено у научним радовима [74,86].

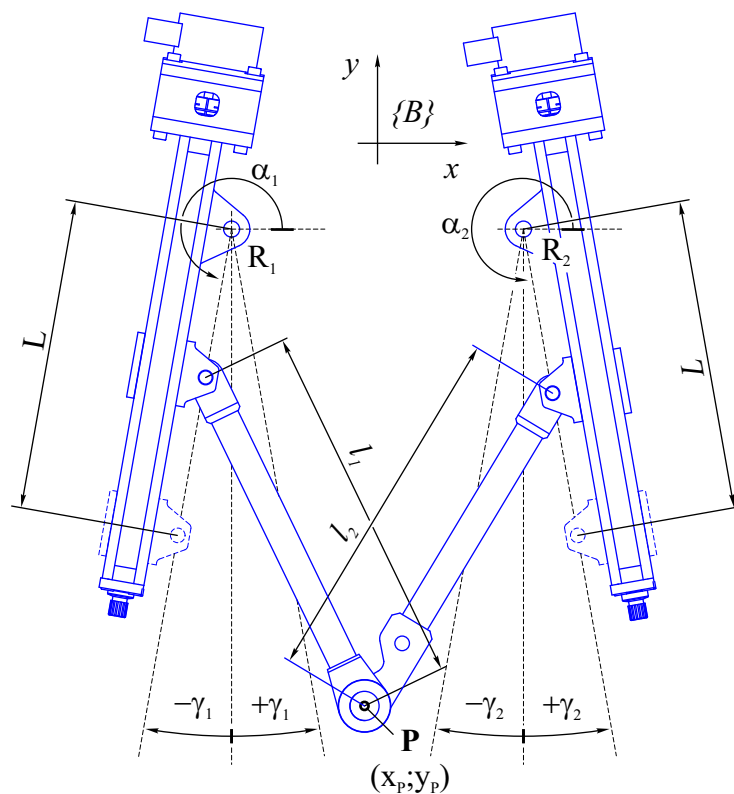
3.2 Конфигурације двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком *МОМА*

Конфигурације *РПКМ-МОМА* се првенствено разликују по оријентацији погонских оса које су дефинисане углом α_i , односно углом између осе x координатног система $\{B\}$ и правца пружања погонске осе (слика 3.4). Да би се поједноставиле предстојеће анализе механизма, углови оријентације погонских оса су дефинисани преко помоћног угла γ_i , односно угао оријентације је дефинисан изразом $\alpha_i = 3\pi/2 + \gamma_i$. Координатни систем $\{B\}$ је непокретни координатни систем и везан је за базу паралелног механизма. За сада, координатни систем $\{B\}$ се користи за дефинисање различитих конфигурација *РПКМ-МОМА*, а у наставку текста, значајан је за анализе наведеног механизма. У складу са могућностима које пружа сам хардвер механизма, према програму градње приказаном у радовима [74] и [87], конфигурације *РПКМ-МОМА* су подељене у пет основних типова који су приказани на слици 3.3. Према приказаном програму градње, за сваку конфигурацију у оквиру типова механизма *МОМА-1*, *МОМА-2*, *МОМА-3*, *МОМА-4* и *МОМА-5*, могу се користити спојке чије су дужине $l_i=180\text{ mm}$, $l_i=195\text{ mm}$ и $l_i=250\text{ mm}$. Користећи спојке једнаких дужина односно $l_1 = l_2$, према програму градње је могуће конфигурисати 33 различите конфигурације *РПКМ-МОМА*. Ако се узму у обзир и конфигурације код којих су спојке различитих дужина односно, $l_1 \neq l_2$, у том случају је могуће конфигурисати 99 различитих конфигурација *РПКМ-МОМА*.

Осим наведених величина, на слици 3.4 су приказане и тачке R_i које у ствари представљају нулте (почетне) позиције клизача на вођици погонске осе, а у наставку текста ће носити назив *Референтне тачке*. Позиција референтних тачака је дефинисана координатама у усвојеном непокретном координатном систему $\{B\}$. Такође, приказане су и дужине L које представљају максималне ходове клизача дуж вођица погонских оса.



Слика 3.3 Конфигурације и типови РПКМ-МОМА (преузето и дорађено - [74])

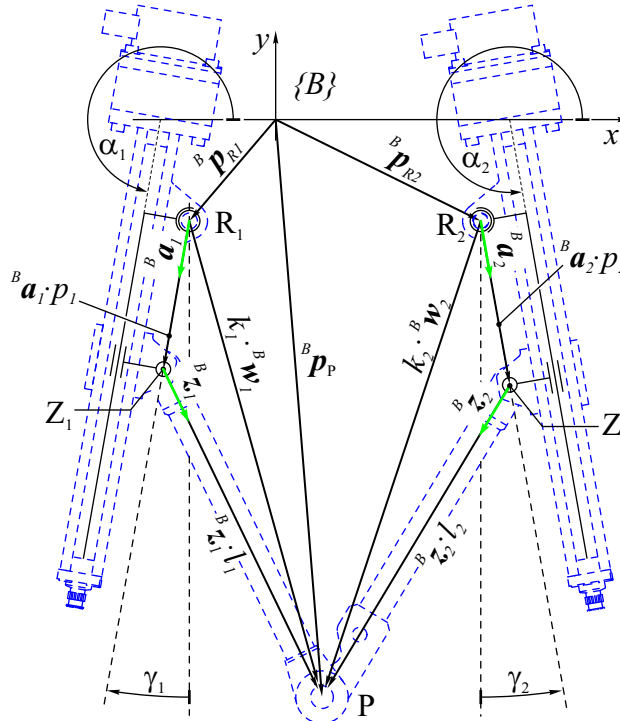


Слика 3.4 Геометријске величине РПКМ-МОМА

3.3 Кинематички модел двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком

У складу са геометријом *РПКМ-МОМА* са слике 3.4, дефинишу се вектори који одређују међусобне позиције карактеристичних тачака механизма и то: R_i - референтне тачке у којима вредност унутрашњих координата има вредност $p_i = 0$; Z_i - зглобне везе између спојки и клизача погонских оса; P - зглобна веза између две спојке која је уједно и платформа паралелног механизма. Узимајући у обзир геометријске величине дефинисане у претходном поглављу, вектори значајни за даље анализе *РПКМ-МОМА* приказани на слици 3.5 су:

- ${}^B p_{R_i}$ вектори који дефинишу позиције референтних тачака R_i у непокретном координатном систему $\{B\}$,
- ${}^B p_P$ вектор који дефинише позицију платформе паралелног механизма у координатном систему $\{B\}$,
- ${}^B a_i$ јединични вектори одређени угловима оријентације погонских оса α_i ,
- p_i скаларне вредности унутрашњих координата паралелног механизма,
- ${}^B a_i \cdot p_i$ вектори унутрашњих координата паралелног механизма при чему су компоненте јединичних вектора $a_{xi} = \cos(\alpha_i)$ и $a_{yi} = \sin(\alpha_i)$,
- ${}^B z_i$ јединични вектори који одређују оријентацију спојки паралелног механизма,
- ${}^B z_i \cdot l_i$ вектори одређени јединичним векторима ${}^B z_i$ и скаларним вредностима дужине спојки l_i .



Слика 3.5 Уопштени кинематички модел *РПКМ-МОМА*

Вектор ${}^B p_P$ који дефинише позицију платформе паралелног механизма у координатном систему $\{B\}$ одређује координате платформе x_P и y_P . Координате x_P и y_P су координате којима корисник задаје жељено кретање платформе и из тог разлога се ове координате називају спољашње

координате механизма *РПКМ-МОМА*. Кретања платформе по задатој путањи механизм реализује се слагањем кретања клизача дуж вођица погонских оса. Заузимање жељене позиције платформе у координатном систему $\{B\}$ се реализује заузимањем одређених позиција зглобова Z_i у односу на референтне тачке R_i које су одређене јединичним векторима ${}^B\mathbf{a}_i$ и скаларним вредностима p_i . Скаларним вредностима p_i се управља корачним моторима погонских оса што значи да их механизм остварује на основу задатих координата x_P и y_P па су самим тим скаларне вредности p_i унутрашње координате *РПКМ-МОМА*.

Према уопштеном кинематичком моделу *РПКМ-МОМА*, спољашње координате механизма x_P и y_P се доводе у везу са унутрашњим координатама механизма p_i векторским једначинама (3.1) у којима су вектори $k_i^B\mathbf{w}_i$ помоћни вектори и представљају позицију платформе механизма у односу на референтне тачке R_i (слика 3.5).

$$p_i^2 - 2p_i({}^B\mathbf{a}_i \cdot k_i^B\mathbf{w}_i) + (k_i^B\mathbf{w}_i)^2 - l_i^2 = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (3.1)$$

За помоћне векторе $k_i^B\mathbf{w}_i$ према слици 3.5 се могу написати следеће векторске једначине:

$$k_i^B\mathbf{w}_i = l_i \cdot {}^B\mathbf{z}_i + p_i \cdot {}^B\mathbf{a}_i \quad (i = 1, 2) \quad (3.2)$$

$$k_i^B\mathbf{w}_i = {}^B\mathbf{p}_P - {}^B\mathbf{p}_{Ri} \quad (i = 1, 2) \quad (3.3)$$

Узимајући у обзир једначине (3.2) и (3.3), једначина (3.1) се може написати у матричном облику који је у ствари полазни облик за решавање кинематичких проблема *РПКМ-МОМА* и обједињује величине које дефинишу геометрију *РПКМ-МОМА* са спољашњим координатама (x_P и y_P) и унутрашњим координатама (p_i) механизма. Једначине (3.4) су уопштене и осим тога што важе за сваку конфигурацију механизма са слике 3.3 важе и за конфигурације које нису обухваћене програмом градње, а могу се формирати помоћу саставних елемената *РПКМ-МОМА*.

$$p_i^2 - 2p_i \begin{bmatrix} a_{xi} & a_{yi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P - x_{Ri} \\ y_P - y_{Ri} \end{bmatrix} + (x_P - x_{Ri})^2 + (y_P - y_{Ri})^2 - l_i^2 = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (3.4)$$

3.4 Кинематички проблеми двоосног реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком

За потребе конфигурисања, али и за потребе анализа *РПКМ-МОМА* неопходна су решења кинематичких проблема механизма. Решавање кинематичких проблема подразумева одређивање зависности унутрашњих координата p_i од спољашњих координата x_P и y_P (решавање инверзног кинематичког проблема) и одређивање зависности спољашњих координата x_P и y_P од унутрашњих координата p_i (решавање директног кинематичког проблема). Једначине које дају зависност $p_i = p_i(x_P, y_P)$ су једначине које представљају решење инверзног кинематичког проблема док једначине које дају зависност $x_P = x_P(p_i)$

и $y_P = y_P(p_i)$ представљају решење директнокинематичког проблема. За конфигурисања управљања *РПКМ-МОМА*, решење инверзног кинематичког проблем (*ИКП*) је неопходно за одређивање вредности унутрашњих координата p_i за задате (програмиране) вредности спољашњих координата x_P и y_P . Решења директног кинематичког проблема (*ДКП*) су првенствено потребна за проверу изведених једначина, а потом и за анализе механизма. Како је на основу уопштеног кинематичког модела механизма (слика 3.5) изведена уопштена једначина (3.4), тако ће и решења *ИКП*-а и *ДКП*-а бити у општим облицима који важе за све могуће конфигурације *РПКМ-МОМА*. Уоштавањем једначина кинематичких проблема, анализе целе класе комплексних машина алатки знатно упрошћавају и убрзавају и пружа се могућност за формирање реконфигурабилног управљања што су циљеви докторске дисертације.

3.4.1 Решења инверзног кинематичког проблема *РПКМ-МОМА*

Матрична једначина (3.1) се може написати у облику погоднијем за даља разматрања и то на следећи начин:

$$p_i^2 - 2p_i[a_{xi}(x_P - x_{Ri}) + a_{yi}(y_P - y_{Ri})] + (x_P - x_{Ri})^2 + (y_P - y_{Ri})^2 - l_i^2 = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (3.5)$$

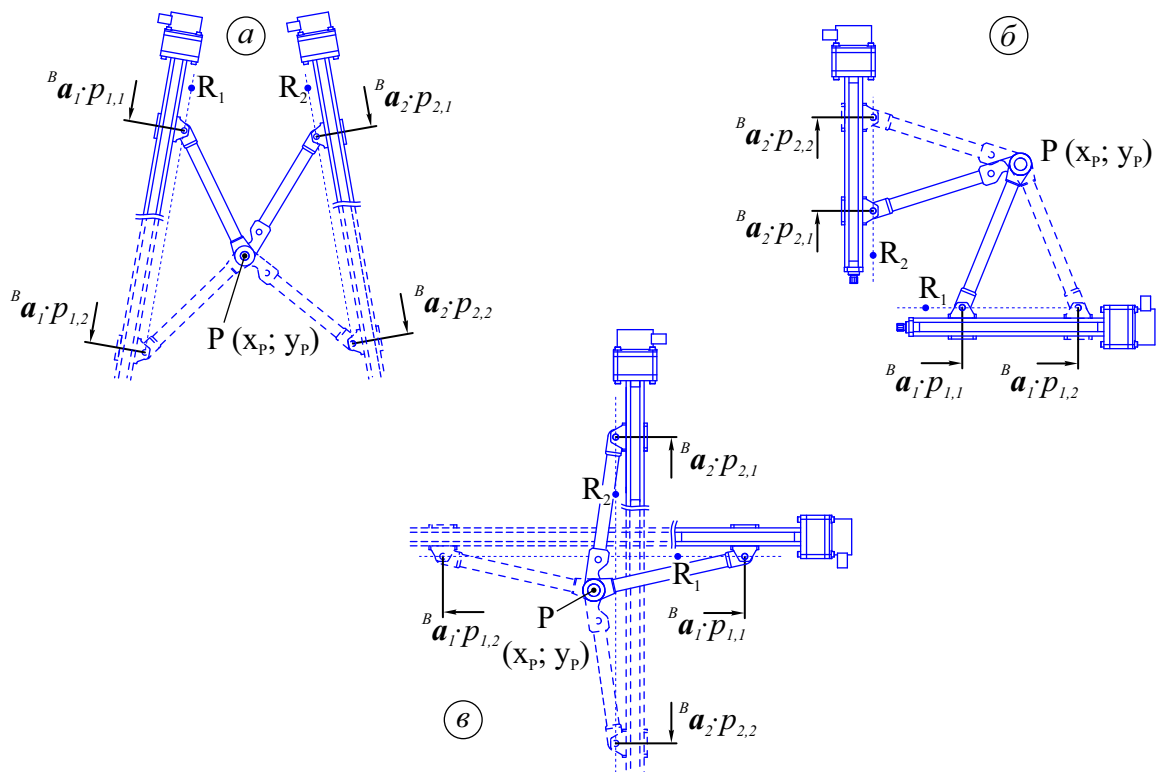
Како је за решење *ИКП*-а потребно наћи зависност унутрашњих координата механизма p_i од спољашњих координата механизма (x_P и y_P) и величина које дефинишу геометрију механизма (a_{xi} , a_{yi} , x_{Ri} , y_{Ri} и l_i), решавањем једначина (3.5) по унутрашњим координатама p_i се добијају једначине (3.6).

$$p_i = a_{xi}(x_P - x_{Ri}) + a_{yi}(y_P - y_{Ri}) \pm \sqrt{[a_{xi}(x_P - x_{Ri}) + a_{yi}(y_P - y_{Ri})]^2 - (x_P - x_{Ri})^2 - (y_P - y_{Ri})^2 + l_i^2} \quad (3.6)$$

У једначинама (3.6) фигурише двознак "±" што значи да за сваку позицију платформе дефинисане спољашњим координатама x_P и y_P постоје по два решења за обе унутрашње координате p_i механизма. На слици 3.6.a су приказана вишеструка решења *ИКП*-а за конфигурацију раванског паралелног механизма *МОМА-4.1*. Вишеструка решења *ИКП*-а приказана на слици 3.6.a одговарају свим конфигурацијама механизма *МОМА-1*, *МОМА-4* и *МОМА-5* док су на сликама 3.6.b и 3.6.v приказана вишеструка решења за конфигурације раванског паралелног механизма *МОМА-2* и *МОМА-3*, респективно.

Посматрајући графички приказ вишеструких решења, примећује се да је једно од два решења сваке конфигурације мање погодно или физички неизводљиво за рад механизма. Према слици 3.6.v за конфигурацију *МОМА-3* неповољно решење *ИКП*-а захтевају негативне вредности унутрашњих координата p_i посматрајући у односу на приказане референтне тачке R_i како је раније већ описано. Такође, неповољна решења *ИКП*-а са слике 3.6.v захтевају да се вођице

погонских оса укрштају што физички није изводљиво. За све остале конфигурације *РПКМ-МОМА*, неповољна решења *ИКП*-а захтевају вођице погонских оса већих дужина што са економске стране није прихватљиво. Неповољна решења *ИКП*-а различитих конфигурација *РПКМ-МОМА* су на слици 3.6 приказана испрекиданом линијом. За предстојеће анализе, али и за потребе каснијег конфигурисања управљања *РПКМ-МОМА*, из једначине (3.6) је неопходно елиминисати двознак "±" који даје вишеструка решења *ИКП*-а за све конфигурације механизма. Корићењем знака "+" или знака "-" уместо двознака "±", једначина (3.6) даје јединствена решења *ИКП*-а. Како ће предстојеће анализе показати, за поједине конфигурације знак "-" даје повољна решења *ИКП*-а док за остале конфигурације знак "+" даје повољна решења *ИКП*-а. Да би се задржала уопштеност једначине (3.6), односно да би и даље једначина важила за сваку конфигурацију *РПКМ-МОМА* без обзира који се знак користи уместо двознака "±", уводи се параметар инверзне кинематике K_{IKP} [74] и може имати вредности $K_{IKP} = -1$ и $K_{IKP} = 1$. Са наведеним вредностима параметра инверзне кинематике, једначина (3.6) добија нови облик (3.7). Вредности параметра K_{IKP} различитих конфигурација механизма, дата су у засебном поглављу уз геометријске параметре који дефинишу геометрију свих конфигурација *РПКМ-МОМА* дефинисаних програмом градње.



Слика 3.6 Вишеструкост решења *ИКП*-а за различите конфигурације *РПКМ-МОМА*

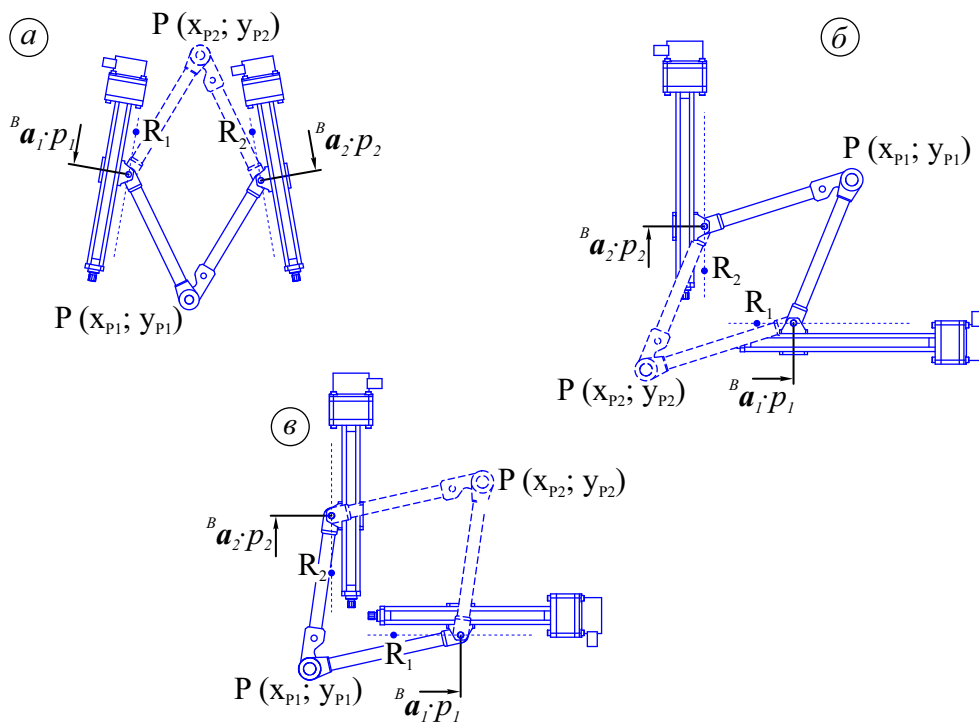
$$\begin{aligned}
 p_i = & a_{xi}(x_P - x_{Ri}) + a_{yi}(y_P - y_{Ri}) + \\
 & + K_{IKP} \sqrt{[a_{xi}(x_P - x_{Ri}) + a_{yi}(y_P - y_{Ri})]^2 - (x_P - x_{Ri})^2 - (y_P - y_{Ri})^2 + l_i^2}
 \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.4.2 Решења директног кинематичког проблема РПКМ-МОМА

Полазећи од једначине (3.5), до решења директног кинематичког проблема РПКМ-МОМА се долази изражавањем координата платформе x_P и y_P у зависности од унутрашњих координата p_i и параметара који дефинишу геометрију механизма. Увођењем смена датих једначинама (3.8) у полазну једначину, добијају се једначине (3.9) које представљају решење директног кинематичког проблема РПКМ-МОМА. У једначинама (3.9) такође фигурише двознак \pm што значи да и код решења ДКП-а постоје вишеструка решења односно да за све вредност задатих унутрашњих координата p_i , платформа механизма може заузети две позиције. Графички приказ вишеструкости решења РПКМ-МОМА за конфигурације МОМА-4.1, МОМА-2 и МОМА-3 је дат на сликама 3.7.a, 3.7.b и 3.7.c респективно.

$$\begin{aligned}
 v_1 &= 2(x_{R1} + p_1 \cdot a_{x1}) & v_2 &= 2(y_{R1} + p_1 \cdot a_{y1}) \\
 v_3 &= [p_1^2 + 2p_1(x_{R1} \cdot a_{x1} + y_{R1} \cdot a_{y1}) + x_{R1}^2 + y_{R1}^2 - l_1^2] \\
 v_4 &= 2(x_{R2} + p_2 \cdot a_{x1}) & v_5 &= 2(y_{R2} + p_2 \cdot a_{y1}) \\
 v_6 &= [p_2^2 + 2p_2(x_{R2} \cdot a_{x2} + y_{R2} \cdot a_{y2}) + x_{R2}^2 + y_{R2}^2 - l_2^2] \\
 v_7 &= \frac{v_6 - v_3}{v_4 - v_1} & v_8 &= \frac{v_2 - v_5}{v_4 - v_1} & v_9 &= 1 + v_8^2 \\
 v_{10} &= 2v_7v_8 - v_1v_8 - v_2 & v_{11} &= v_7^2 - v_1v_7 + v_3
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$y_P = \frac{-v_{10} \pm \sqrt{v_{10}^2 - 4v_9v_{11}}}{2v_9}; \quad x_P = v_7 + v_8 \cdot y_P \tag{3.9}$$



Слика 3.7 Вишеструкост решења ДКП-а за различите конфигурације РПКМ-МОМА

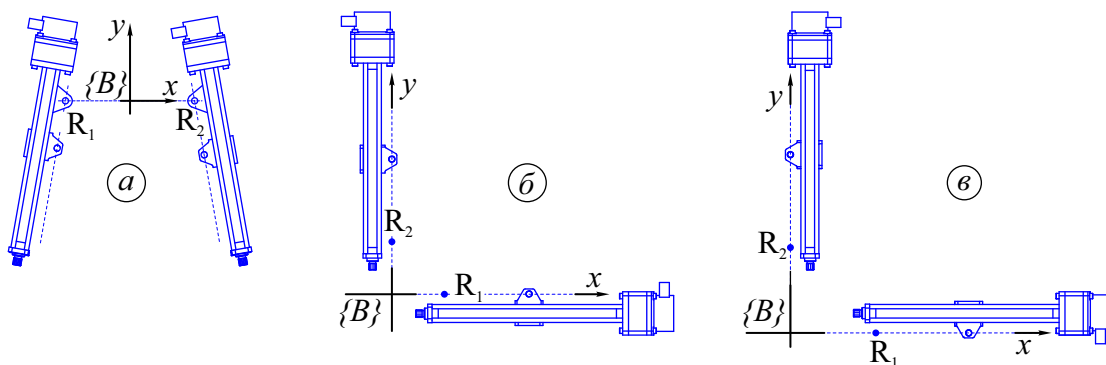
Као и код једначина које представљају решења *ИКП*-а, и у једначинама које представљају решења *ДКП*-а је неопходно елиминисати двознак "±" како би се добила јединствена решења *ДКП*-а. Из тог разлога се уводи параметар директне кинематике K_{DKP} који такође може имати вредности $K_{DKP} = -1$ и $K_{DKP} = 1$, па једначина (3.9) добија нови облик:

$$y_P = \frac{-v_{10} + K_{DKP} \sqrt{v_{10}^2 - 4v_9 v_{11}}}{2v_9} \quad (3.10)$$

$$x_P = v_7 + v_8 \cdot y_P$$

3.5 Геометријски параметри *РПКМ-МОМА*

Све до сад изведене једначине су у општем облику, а формиране су на основу уопштеног геометријског модела *РПКМ-МОМА* са слике 3.5. Да би свака од конфигурација механизма са слике 3.3 у потпуности била дефинисана, неопходно је дефинисати бројне вредности параметара механизма. Тек са дефинисаним бројним вредностима параметара, могуће су даље анализе сваке конфигурације механизма, али и формирање реконфигурабилног управљања за *РПКМ-МОМА*. Како би се дефинисали геометријски параметри сваке конфигурације механизма, најпре је потребно одредити позицију непокретног координатног система $\{B\}$. Као што је већ поменуто, тачке R_i су непокретне референтне тачке у којима вредност унутрашњих координата има вредност $p_i=0$. Приликом конфигурисања, хардвер механизма омогућава обртање погонских оса око референтних тачака R_i и то само за конфигурације механизма *МОМА-1*, *МОМА-4* и *МОМА-5*. Тако је непокретни координатни систем $\{B\}$ за наведене конфигурације постављен на половини хоризонталног растојања између референтних тачака R_1 и R_2 (слика 3.8.а). Код конфигурација механизма *МОМА-2* (слика 3.8.б) и *МОМА-3* (слика 3.8.в), координатни систем $\{B\}$ је постављен тако да су осе координатног система паралелне погонским осама механизма и уједно пролазе кроз референтне тачке погонских оса.



Слика 3.8 Позиције координатног система $\{B\}$ за различите конфигурације *РПКМ-МОМА*

Програмом градње приказаним на слици 3.3 су дефинисане конфигурације *РПКМ-МОМА* које је тренутно могуће конфигурирати са постојећим дужинама спојки. Табелом 3.1, програм градње *РПКМ-МОМА* се надопуњује дефинисањем бројних вредности геометријских параметара механизма који нису приказани на слици 3.3 и то:

- Координате референтних тачака x_{R1} , y_{R1} , x_{R2} и y_{R2} у усвојеном непокретном координатном систему $\{B\}$;
- Вредности углова оријентације погонских оса α_1 и α_2 ;
- Вредности помоћних углова γ_1 и γ_2 помоћу којих се дефинишу углови оријентација погонских оса;
- Вредности параметара инверзне кинематике K_{IKP} као и вредности параметара директне кинематике и K_{DKP} .

Уврштавањем геометријских параметара механизма наведених у табели 3.1 у уопштене једначине које представљају решења кинематичких проблема (3.7) и (3.10), добијају се коначне једначине ИКП-а и ДКП-а за конкретну конфигурацију РПКМ-МОМА. Овако формиране једначине у многоне упрошћавају анализе целе класе комплексних машина алатки базираних на двоосном реконфигурабилном механизму са паралелном кинематиком МОМА. Формирањем уопштених једначина које представљају решења ИКП-а и ДКП-а омогућено је формирање јединственог реконфигурабилног управљања које се може користити за сваку конфигурацију РПКМ-МОМА.

Табела 3.1 Геометријски параметри основних типова РПКМ-МОМА

	x_{R1}	y_{R1}	x_{R2}	y_{R2}	γ_1	α_1	γ_2	α_2	K_{IKP}	K_{DKP}	
M1	1.1 1.2 1.3	-100	0	100	0	270	0	270	-1	-1	
	1.4 1.5 1.6	-100	0	100	-5	265	-5	265	-1	-1	
	1.7 1.8 1.9	-100	0	100	+5	275	+5	275	-1	-1	
M2	2.1 2.2 2.3	95	0	0	95	90	0	180	90	+1	+1
M3	3.1 3.2 3.3	117	0	0	117	90	0	180	90	+1	-1
M4	4.1 4.2 4.3	-100	0	100	0	-5	265	+5	275	-1	-1
	4.4 4.5 4.6	-100	0	100	0	0	270	+5	275	-1	-1
	4.7 4.8 4.9	-100	0	100	0	-5	265	0	270	-1	-1
M5	5.1 5.2 5.3	-100	0	100	0	+5	275	-5	265	-1	-1
	5.4 5.5 5.6	-100	0	100	0	0	270	-5	265	-1	-1
	5.7 5.8 5.9	-100	0	100	0	+5	275	0	270	-1	-1

АНАЛИЗЕ РАВАНСКОГ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ МЕХАНИЗМА СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ РПКМ-МОМА

У оквиру овог поглаља су приказане анализе *РПКМ-МОМА* на основу чијих резултата се доноси оцена о подобности анализиране конфигурације за обављање постављеног задатка, односно извршења задатог програма. Првенствено, ту се мисли на способност конфигурације да изврши задати програм у зависности од величине и облика сопственог радног простора па ће из тог разлога у првом потпоглављу бити приказане методологије за анализу радног простора *РПКМ-МОМА*. Међутим, могућност да одређена конфигурација може да изврши задати програм не гарантује и квалитетан резултат па су из тог разлога приказане и додатне анализе. За све приказане анализе се користе већ изведене уопштене једначине *ИКП*-а и *ДКП*-а, док се анализе одређене конфигурације *РПКМ-МОМА* врше конкретизовањем уопштених једначина према жељеној конфигурацији помоћу већ описаних и дефинисаних параметара механизма. Како постоји велики број конфигурација *РПКМ-МОМА*, није могуће приказати анализе за сваку појединачну конфигурацију. Из тог разлога је број анализираних конфигурација сведен на минимум, односно за сваки од пет типова механизма *МОМА* је одабрана једна конфигурација која је анализирана.

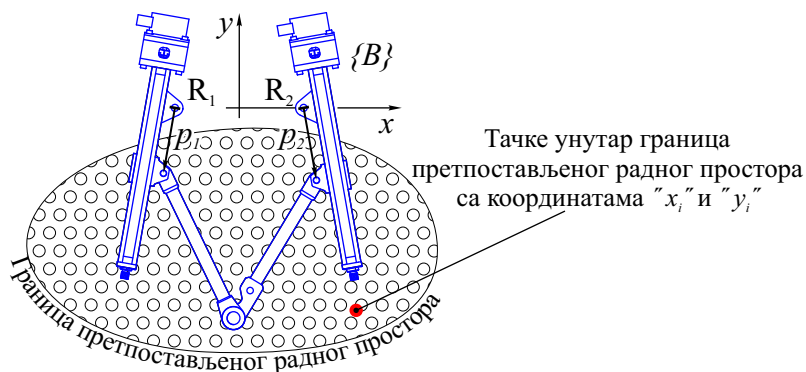
Анализе *РПКМ-МОМА* су веома сложене и није могуће урадити их без примене рачунара па је у оквиру истраживачког рада везаног за докторску дисертацију направљена апликација за анализу *РПКМ-МОМА*. Апликација је направљена помоћу софтверског пакета *MATLAB*и у њу су имплементиране уопштене претходно изведене једначине кинематичких проблема, а кориснику апликације је остављена могућност да параметре механизма уноси према тренутним потребама.

4.1 Одређивање облика и величине достизивог радног простора РПКМ-МОМА

Паралелни механизми имају радни простор неправилног облика те анализа облика и величине радног простора представља једну од основних и најбитнијих анализа. Пошто се у оквиру дисертације разматра један реконфигурабилни механизам чијим се реконфигурисањем може добити велики број различитих конфигурација, није могуће приказати анализе радних простора свих конфигурација. Из тог разлога, број анализираних конфигурација је умањен и сведен на довољан број анализираних конфигурација како би било могуће упоредити резултате и извести одговарајуће закључке.

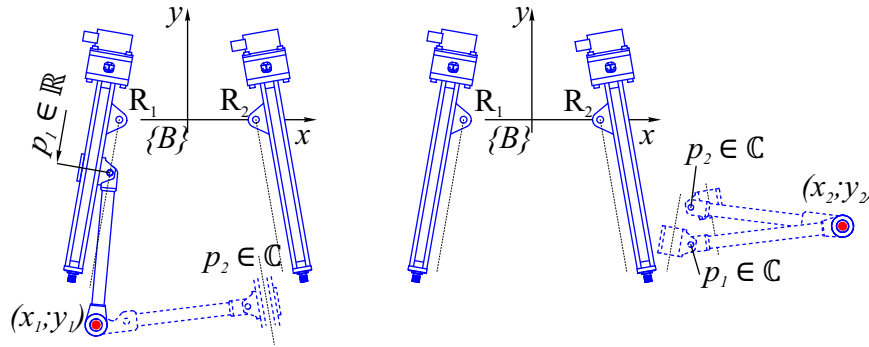
4.1.1 Одређивање достизивог радног простора једначинама ИКП-а

Метода којом се облик и величина радног простора механизма одређују коришћењем једначина ИКП-а спада у итеративне методе. Код паралелних механизма, до решења ИКП-а је знатно лакше доћи него до решења ДКП-а. Самим тиме, одређивање облика и величине радног простора механизма са паралелном кинематиком применом једначина ИКП-а се врши када су решења ДКП-а или изузетно сложена или се не могу извести у експлицитној форми. Механизам РПКМ-МОМА не спада у групу механизма са сложеним решењима ДКП-а, али да би анализе самог механизма биле потпуне, у наставку су дати резултати анализе величине и облика радног простора применом ове методе. Приликом одређивања облика и величине радног простора механизма на основу једначина које представљају решења ИКП-а, полази се од такозваног претпостављеног радног простора механизма (слика 4.1). За сваку тачку претпостављеног радног простора, на основу једначина које представљају решења ИКП-а, израчунавају се вредности унутрашњих координата p_i , а потом се добијени резултати анализирају.



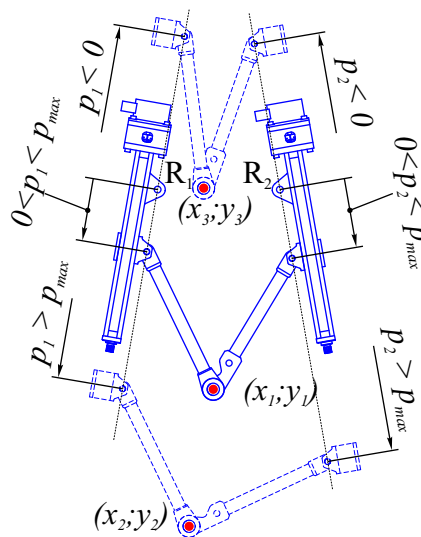
Слика 4.1 Претпостављени радни простор РПКМ-МОМА

Тачке унутар граница претпостављеног радног простора имају координате x_i и y_i у координатном систему $\{B\}$. За задате вредности координата x_i и y_i , користећи једначине (3.7), за вредности унутрашњих координата p_i се могу добити различита решења од којих нису сва прихватљива. Најпре, за поједине тачке унутар претпостављеног радног простора, решења за једну или обе унутрашње координате p_i могу бити комплексни бројеви. Графички приказ унутрашњих координата p_i чија су решења комплексни бројеви је приказан на слици 4.2.



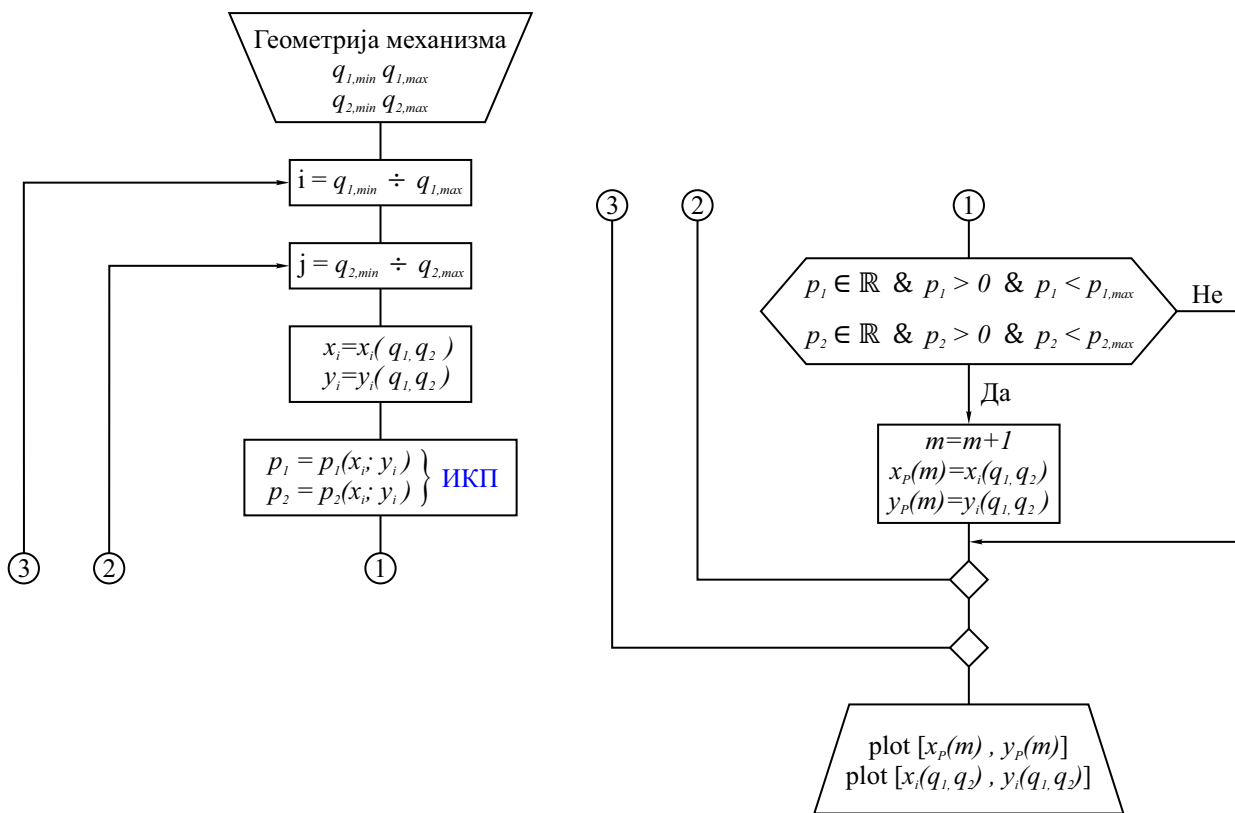
Слика 4.2 Решења ИКП-а у облику комплексних бројева за унутрашње координате p_i

У случајевима када се за унутрашње координате добијају комплексан решења, механизам са својом конфигурацијом ни на који начин платформу механизма не може довести у задату тачку па самим тиме ове тачке нису део стварног радног простора механизма. Са друге стране, за задате вредности координата x_i и y_i , вредности за обе унутрашње координате могу имати решења у облику реалних бројева. Међутим, за поједине тачке x_i и y_i , чак и ако су решења за унутрашње координате реални бројеви, због геометрије механизма, није могуће платформу механизма довести у задату тачку. Тако, према слици 4.3, за тачку са координатама $(x_3; y_3)$, користећи једначину (3.7) добијају се негативне вредности унутрашњих координата ($p_1 < 0$ и $p_2 < 0$), док се за тачку са координатама $(x_2; y_2)$ добијају вредности унутрашњих координата $p_1 > p_{max}$ и $p_2 > p_{max}$. Како ове вредности унутрашњих координата није могуће физички реализовати, тачке са координатама $(x_2; y_2)$ и $(x_3; y_3)$ не припадају радном простору механизма. Према претходно наведеном, може се тврдити да су тачке претпостављеног радног простора уједно и тачке радног простора механизма само ако за њих вредности унутрашњих координата припадају скупу реалних бројеви ($p_i \in \mathbb{R}$) и уједно се налазе у границама $p_{min} > p_i > p_{max}$. Минимална вредност унутрашњих координата износи $p_{min} = 0$, а вредност p_{max} одговара величини хода погонске осе. На слици 4.3 тачка са координатама x_1 и y_1 је тачка у којој су испуњени претходни уследи па самим тим је и део радног простора механизма.



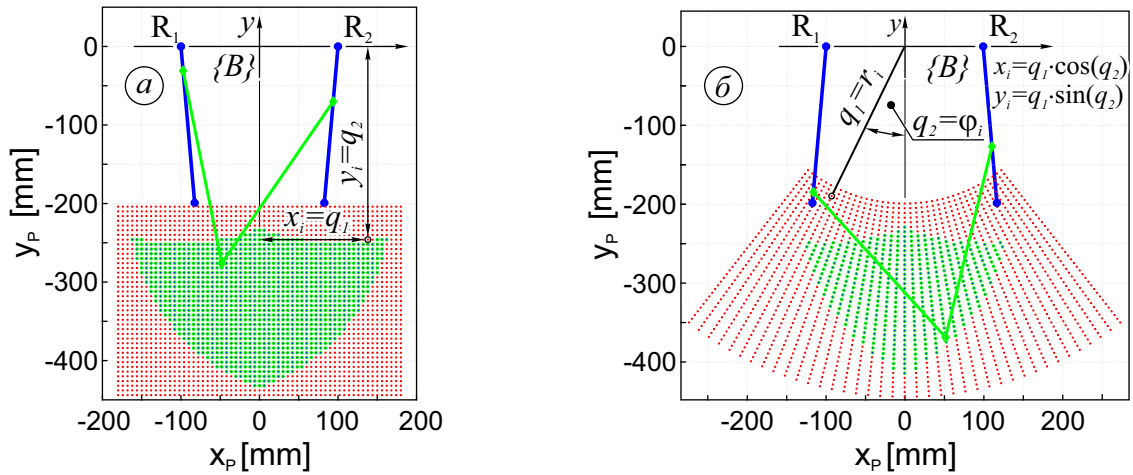
Слика 4.3 Решења ИКП-а у облику реалних бројева за унутрашње координате p_i

Алгоритам за одређивање облика и величине радног простора применом једначина ИКП-а је приказан на слици 4.4, а описана процедура и резултати истраживачког рада су публиковани у [88]. Алгоритам је формиран у складу са описаном процедуром анализе радног простора у коме се облик и величина претпостављеног радног простора дефинишу преко неименованих координата q_1 и q_2 . У зависности од потреба, анализа радног простора РПКМ-МОМА применом једначина ИКП-а се може вршити у Декартовим координатама (слика 4.5.a) при чему неименоване координате q_1 и q_2 постају Декартове координате x_i и y_i , или у поларним координатама (слика 4.5.б) при чему неименоване координате q_1 и q_2 постају поларне координате r_i и φ_i . У оба случаја, дефинишу се минималне и максималне вредности неименованих координата $q_{i,min}$ и $q_{i,max}$ чиме се дефинише облик и величина претпостављеног радног простора.



Слика 4.4 Алгоритам за одређивање облика и величине радног простора РПКМ-МОМА на основу једначина ИКП-а [88]

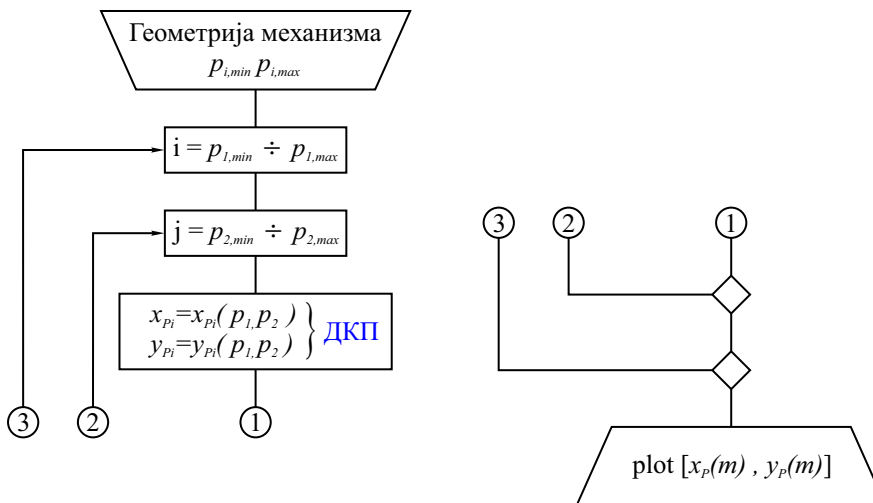
За сваки пар координата q_1 и q_2 , чије се вредности налазе унутар постављених граница, коришћењем једначина ИКП-а се израчунавају вредности унутрашњих координата p_i и истовремено се проверава испуњеност постављених услова за унутрашње координате. На слици 4.5 црвеном бојом су обележене тачке које припадају претпостављеном радном простору, а за које није испуњен неки од постављених услова за унутрашње координате па ове тачке не припадају радном простору механизма. На истој слици зеленом бојом су обележене тачке за које су испуњени сви постављени услови за унутрашње координате p_i и те тачке припадају радном простору механизма.



Слика 4.5 Одређивање облика и величине радног простора РПКМ-МОМА на основу једначина ИКП-а: а)Применом Декартових координата; б)Применом поларних координата

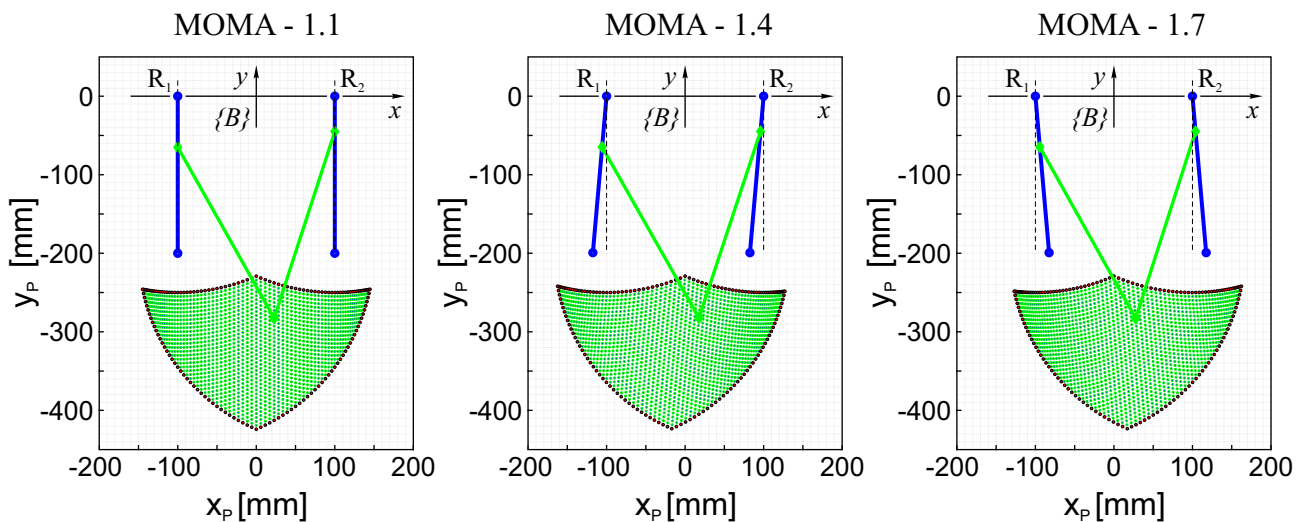
4.1.2 Одређивање достизивог радног простора једначинама ДКП-а

Метода се заснива на примени изведених једначина које представљају решења ДКП-а. За одређивање облика и величине радног простора одређене конфигурације, у уопштене једначине ДКП-а се уврштавају геометријски параметри жељене конфигурације механизма датих у табели 3.1. Уврштавањем вредности унутрашњих координата p_1 и p_2 (од $p_i = p_{min} = 0$ до $p_i = p_{i,max} = L$) у једначине ДКП-а (3.10), израчунавају се вредности координата платформе x_p и y_p . Максималне вредности унутрашњих координата $p_{i,max}$ су вредности које имају унутрашње координате када се клизачи погонских оса нађу у крајњем положају погонских оса, па ове вредности одговарају ходовима погонских оса (на слици 3.5 означених са L) и имају вредност $L=200$ mm. Алгоритам за одређивање облика и величине достизивог радног простора РПКМ-МОМА применом једначина које представљају решења ДКП-а је приказан на слици 4.6.

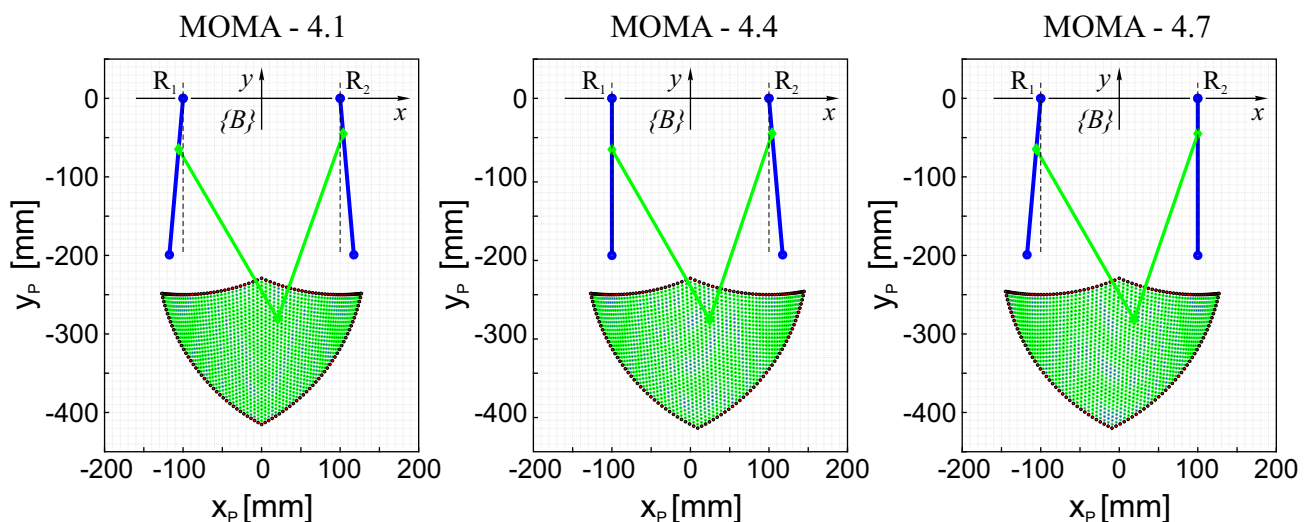


Слика 4.6 Алгоритам за одређивање облика и величине радног простора РПКМ-МОМА на основу једначина ДКП-а

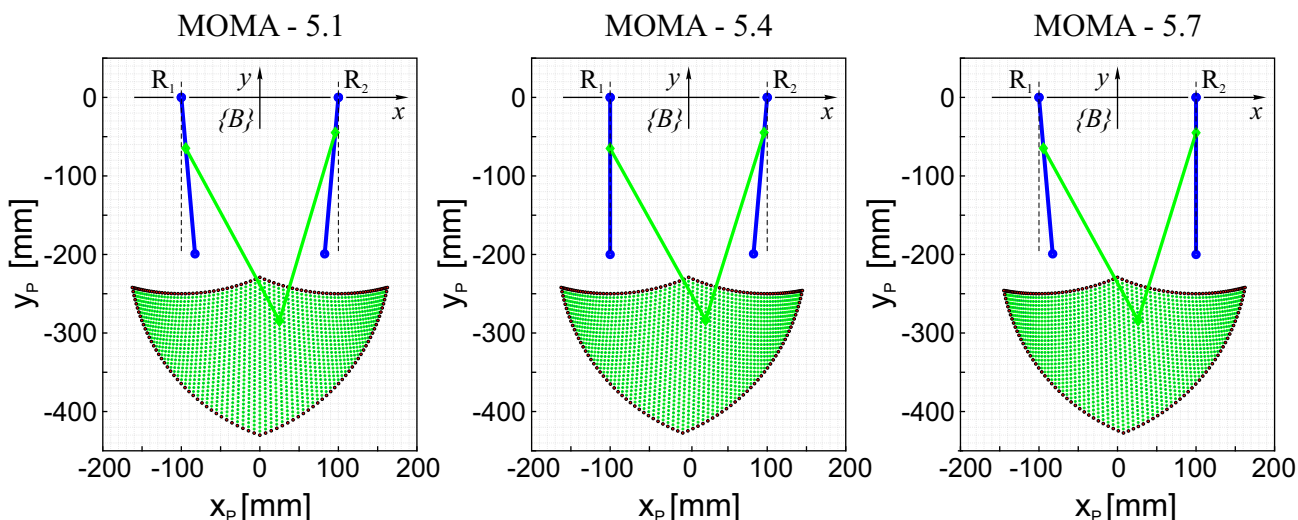
Резултати анализе облика и величине радног простора механизма *РПКМ-МОМА* применом једначина *ДКП*-а, делимично су представљени у радовима [74,88,89], а у наставку су приказани резултати анализе за по једну подваријанту од свих пет типова механизма *МОМА*. Због потребе за упоређивањем облика и величине радног простора различитих конфигурација, за анализу сваке конфигурације су коришћене спојке исте дужине, односно $l_1=l_2=250\text{ mm}$. Анализом механизма, конфигурисаних на описан начин, добијени су радни простори за три подваријанте конфигурација *МОМА-1*, *МОМА-4* и *МОМА-5* (слике 4.7, 4.8 и 4.9, респективно). Достизиви радни простори за по једну подваријанту конфигурација *МОМА-2* и *МОМА-3* и дужине спојки $l_1=l_2=250\text{ mm}$ су приказане на сликама 4.10 и 4.11, респективно.



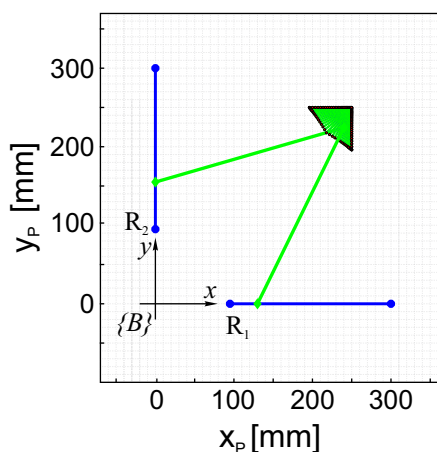
Слика 4.7 Достизив радни простор конфигурација *МОМА-1*



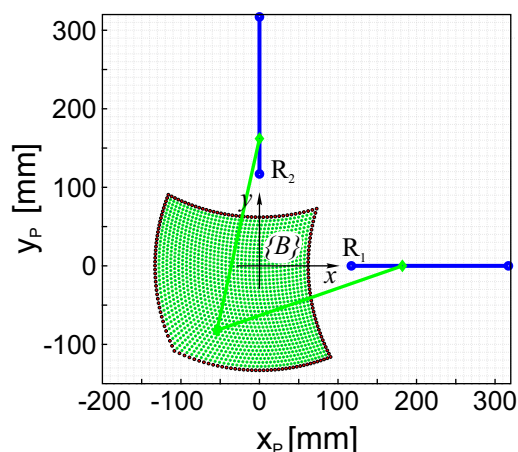
Слика 4.8 Достизив радни простор конфигурација *МОМА-4*



Слика 4.9 Достизив радни простор конфигурација МОМА-5



Слика 4.10 Достизив радни простор конфигурације МОМА-2.1



Слика 4.11 Достизив радни простор конфигурације МОМА-3.1

4.2 Јакобијан матрица и сингуларитети РПКМ-МОМА

Заменом индекса $i=1$ и $i=2$ у општу једначу (3.5), добијају се две имплицитне једначине при чему у свакој од њих фигуришу величине везане само за једну погонску осу механизма. Имплицитне једначине носе ознаке f_1 и f_2 и имају облик:

$$\begin{aligned} f_1 : \quad & p_1^2 - 2p_1[a_{x1}(x_P - x_{R1}) + a_{y1}(y_P - y_{R1})] + (x_P - x_{R1})^2 + (y_P - y_{R1})^2 - l_1^2 = 0 \\ f_2 : \quad & p_2^2 - 2p_2[a_{x2}(x_P - x_{R2}) + a_{y2}(y_P - y_{R2})] + (x_P - x_{R2})^2 + (y_P - y_{R2})^2 - l_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Имплицитне једначине су неопходне за формирање Јакобијан матрице инверзне кинематике J_p и Јакобијан матрице директне кинематике J_x чији су облици дати матрицама (4.2). Чланови Јакобијан матрица J_p и J_x су дати једначинама (4.3).

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1} & \frac{\partial f_2}{\partial p_2} \end{bmatrix} \quad J_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_P} & \frac{\partial f_1}{\partial y_P} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_P} & \frac{\partial f_2}{\partial y_P} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x_P} &= -2p_1 a_{x1} + 2(x_P - x_{R1}) & \frac{\partial f_1}{\partial y_P} &= -2p_1 a_{y1} + 2(y_P - y_{R1}) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_P} &= -2p_2 a_{x2} + 2(x_P - x_{R2}) & \frac{\partial f_2}{\partial y_P} &= -2p_2 a_{y2} + 2(y_P - y_{R2}) \\ \frac{\partial f_1}{\partial p_1} &= 2p_1 - 2[a_{x1}(x_P - x_{R1}) + a_{y1}(y_P - y_{R1})] & & \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_2} &= 2p_2 - 2[a_{x2}(x_P - x_{R2}) + a_{y2}(y_P - y_{R2})] & & \\ \frac{\partial f_1}{\partial p_2} &= \frac{\partial f_2}{\partial p_1} = 0 & & \end{aligned} \quad (4.3)$$

Јакобијан матрице J_p и J_x су потребне за формирање Јакобијан матрице механизма J чији је облик дат матрицом (4.4).

$$J = J_p^{-1} \cdot J_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1} & \frac{\partial f_2}{\partial p_2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_P} & \frac{\partial f_1}{\partial y_P} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_P} & \frac{\partial f_2}{\partial y_P} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

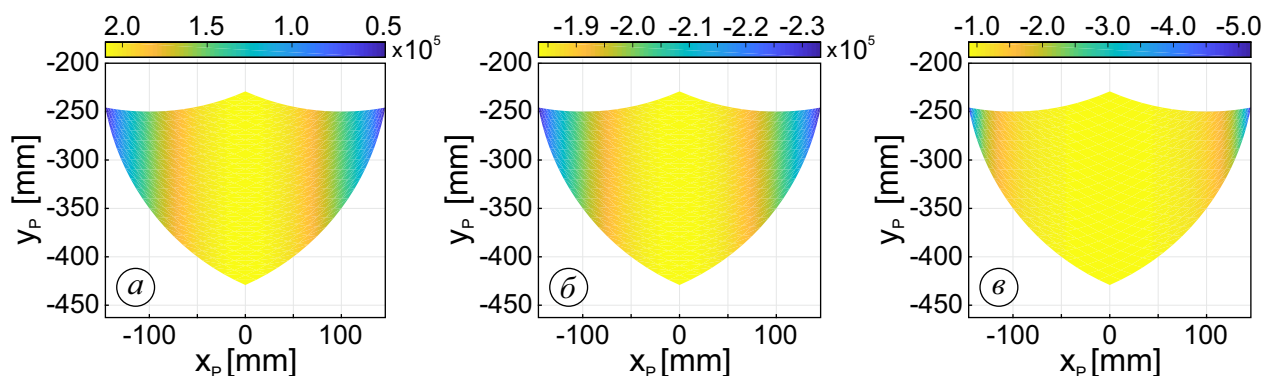
Матрична једначина (4.4), може се написати и у другачијем облику, матрична једначина (4.5), који је погоднији за тумачење.

$$J = \frac{1}{|J_p|} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial p_2} & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_1}{\partial p_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_P} & \frac{\partial f_1}{\partial y_P} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_P} & \frac{\partial f_2}{\partial y_P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\partial f_1 / \partial p_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\partial f_2 / \partial p_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_P} & \frac{\partial f_1}{\partial y_P} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_P} & \frac{\partial f_2}{\partial y_P} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

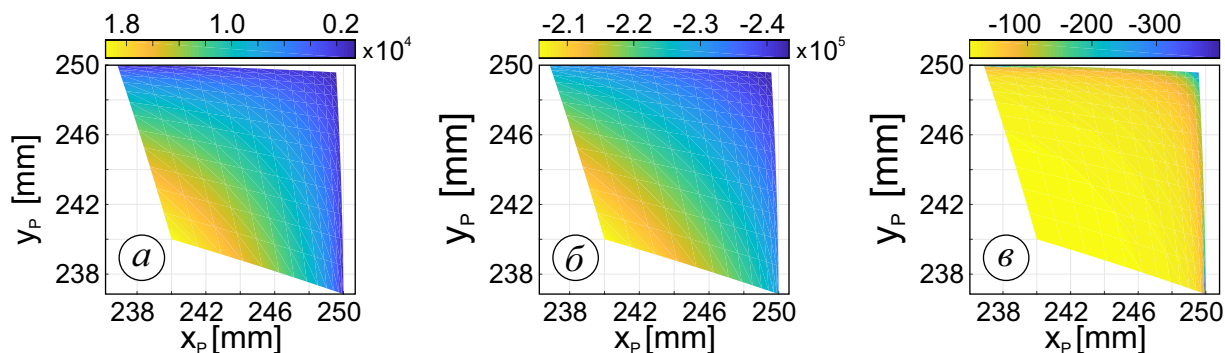
Према претходним једначинама, детерминанте Јакобијан матрица инверзне и директне кинематике се израчунавају према једначинама (4.6). Изједначавањем са нулом детерминанти датих једначинама (4.6) односно $\det(J_p)=0$ и $\det(J_x)=0$, добијају се сингуларитети инверзне и директне кинематике. Решења наведених једначина дају позиције платформе механизма у којима механизам губи степене слободе (сингуларитети инверзне кинематике) или позиције платформе у којима механизам добија степене слободе (сингуларитети директне кинематике).

$$\begin{aligned}
 \det(J_p) &= 2[p_1 - a_{x1}(x_P - x_{R1}) - a_{y1}(y_P - y_{R1})] \cdot \\
 &\quad \cdot [p_2 - a_{x2}(x_P - x_{R2}) - a_{y2}(y_P - y_{R2})] \\
 \det(J_x) &= 2[((x_p - x_{R1}) - p_1 a_{x1}) \cdot ((y_p - y_{R2}) - p_2 a_{y2})] - \\
 &\quad - 2[((x_p - x_{R2}) - p_2 a_{x2}) \cdot ((y_p - y_{R1}) - p_1 a_{y1})]
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

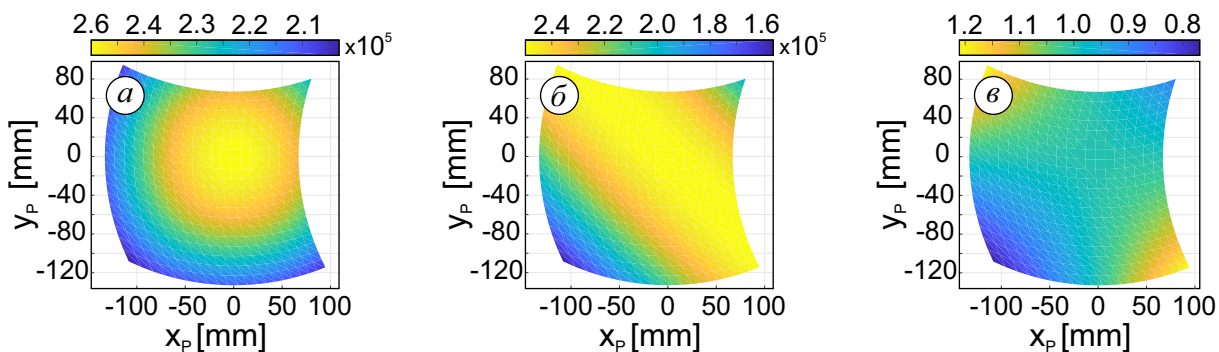
Пошто у свакој од претходних једначина фигуришу по четири променљиве (две спољашње координате x_P и y_P и две унутрашње координате p_1 и p_2), уз компоненте јединичних вектора a_{x_i} и a_{y_i} који одређују оријентацију погонских оса, решавање наведених једначина је изузетно сложено па се из тог разлога анализа сингуларитета ослања на графички приказ вредности детерминанти Јакобијан матрица у целом радном простору механизма. Према једначинама (4.5) и (4.6) су израчунате вредности $\det(J_p)$, $\det(J_x)$ и $\det(J)$ за сваку тачку радног простора различитих конфигурација механизма РПКМ-МОМА. На сликама 4.12-4.16 су у облику дијаграма приказани резултати анализа Јакобијан матрица различитих конфигурација РПКМ-МОМА на којима се може видети зависност $\det(J_p)$, $\det(J_x)$ и $\det(J)$ од спољашњих координата x_P и y_P анализираних конфигурација.



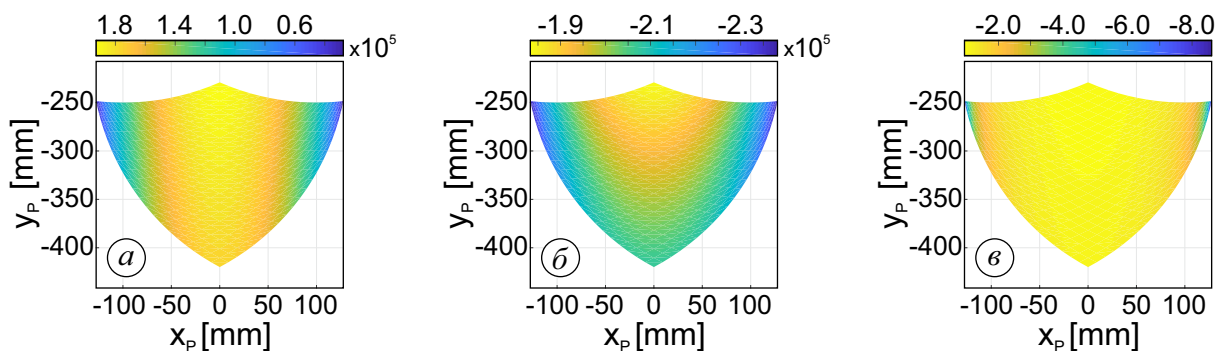
Слика 4.12 Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М1.1: а) $\det(J_p)$; б) $\det(J_x)$; в) $\det(J)$



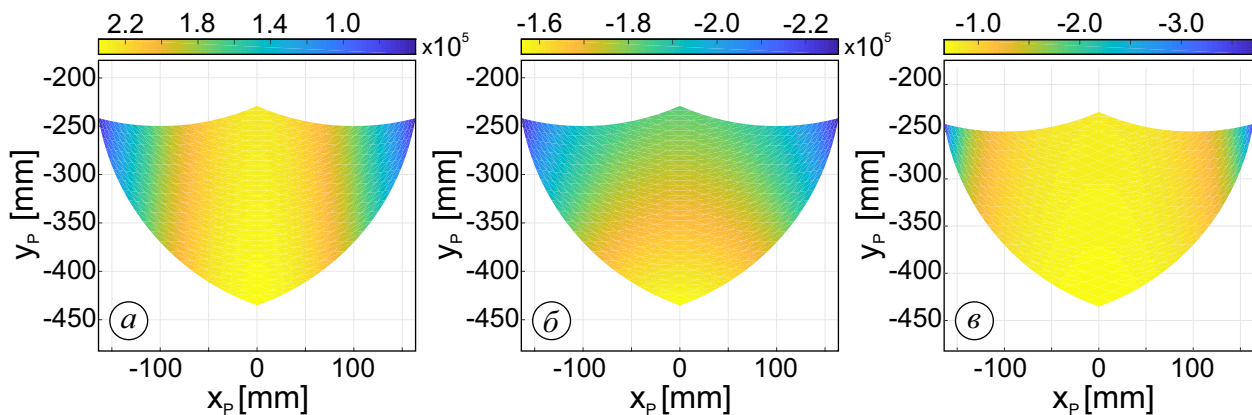
Слика 4.13 Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М2.1: а) $\det(J_p)$; б) $\det(J_x)$; в) $\det(J)$



Слика 4.14 Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М3.1: а) $\det(J_p)$; б) $\det(J_x)$; в) $\det(J)$



Слика 4.15 Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М4.1: а) $\det(J_p)$; б) $\det(J_x)$; в) $\det(J)$

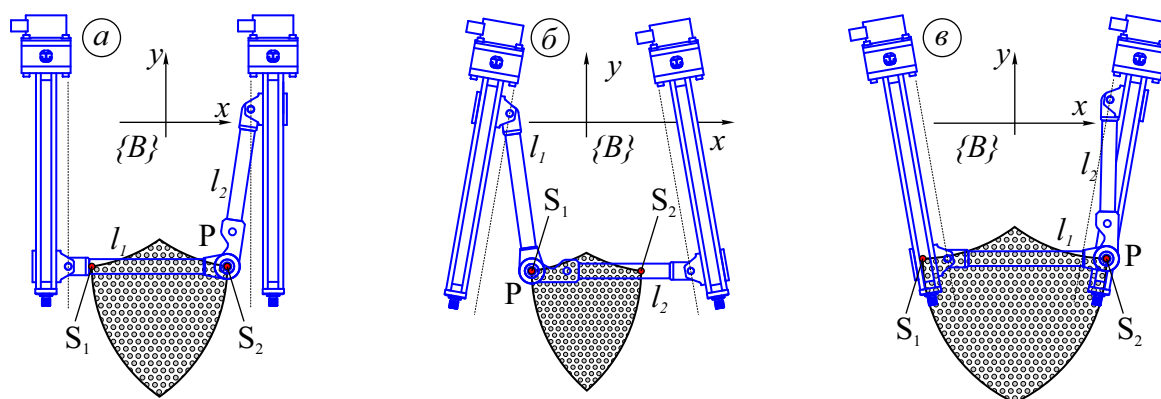


Слика 4.16 Вредности детерминанти Јакобијан матрица РПКМ-МОМА конфигурације М5.1: а) $\det(J_p)$; б) $\det(J_x)$; в) $\det(J)$

Конфигурације механизма *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5* су међусобно сличне, па осим облика и величине радног простора имају и сличну расподелу вредности Јакобијан матрица. Конфигурације механизма *МОМА-М2* и *МОМА-М3*, осим што се међусобно разликују, разликују се и од претходно три наведене конфигурације механизма *РПКМ-МОМА*. Самим тиме, сингуларитети конфигурација *МОМА-М2* и *МОМА-М3* се налазе на различитим местима, што ће бити и приказано у наставку текста.

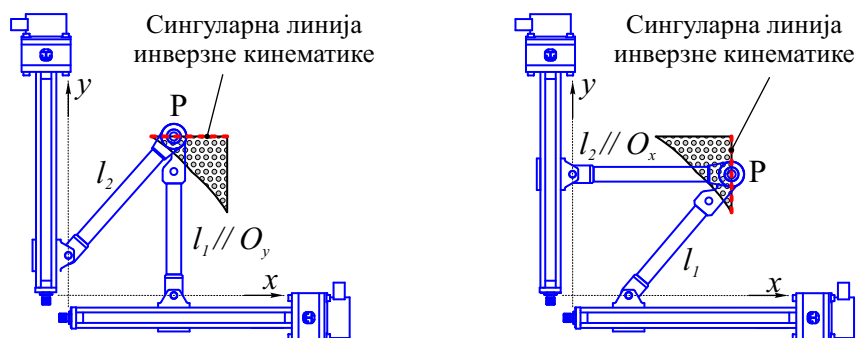
4.2.1 Сингуларитети инверзне кинематике

Како су конфигурације механизма *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5* међусобно сличне, анализом вредности детерминанти Јакобијан матрица инверзне кинематике приказаних на сликама 4.12.a, 4.15.a и 4.16.a добијају се сингуларитети инверзне кинематике који се јављају на границама радног простора и то када је једна од спојки механизма паралелна са осом O_x координатног система $\{B\}$ како је и приказано на слици 4.17.

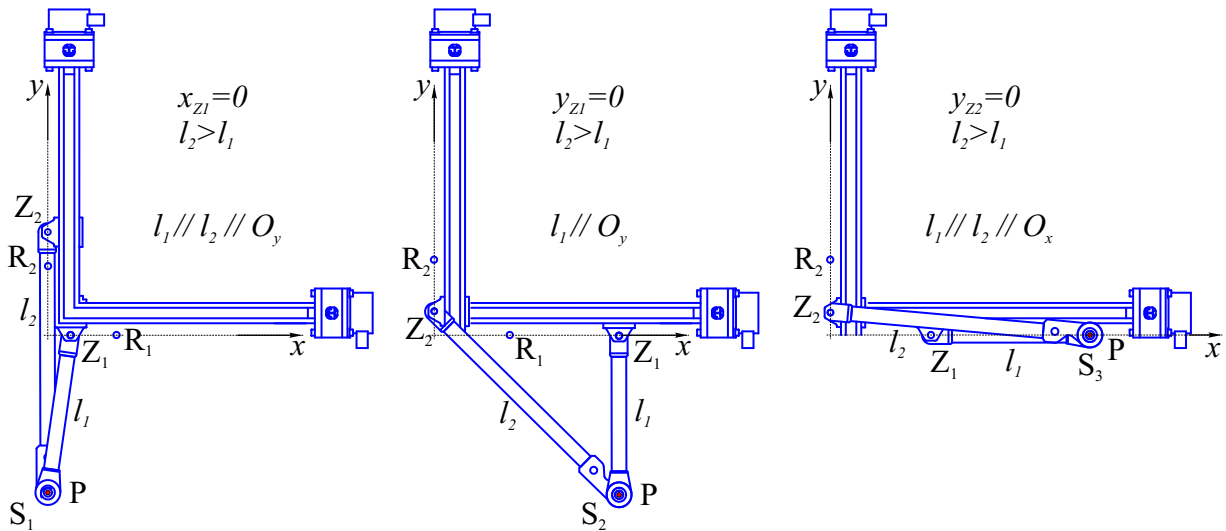


Слика 4.17 Сингуларитети инверзне кинематике за конфигурације механизма: а) *МОМА-М1*; б) *МОМА-М4*; в) *МОМА-М5*

Код конфигурација механизма *МОМА-М2* и *МОМА-М3*, погонске осе су међусобно управне и из тог разлога се облик и величина радног простора знатно разликују од облика и величине радног простора *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5*. Постављањем погонских оса у међусобно управни положај, значајно се и променила кинематика механизма што се огледа у вредностима Јакобијан матрица унутар радног простора. Анализом вредности Јакобијан матрица конфигурације *МОМА-М2* са слике 4.13, добијају се позиције сингуларитета који се простиру дуж правих линија на границама радног простора. На слици 4.18, сингуларне линије су приказане црвеном испрекиданом линијом. Сингуларитети инверзне кинематике конфигурације *МОМА-М3* се као и код претходно анализираних конфигурација налазе на ивицама радног простора. На слици 4.19 дат је приказ позиције сингуларитета (S_1 и S_2) у случају када су спојке механизма различите дужине.



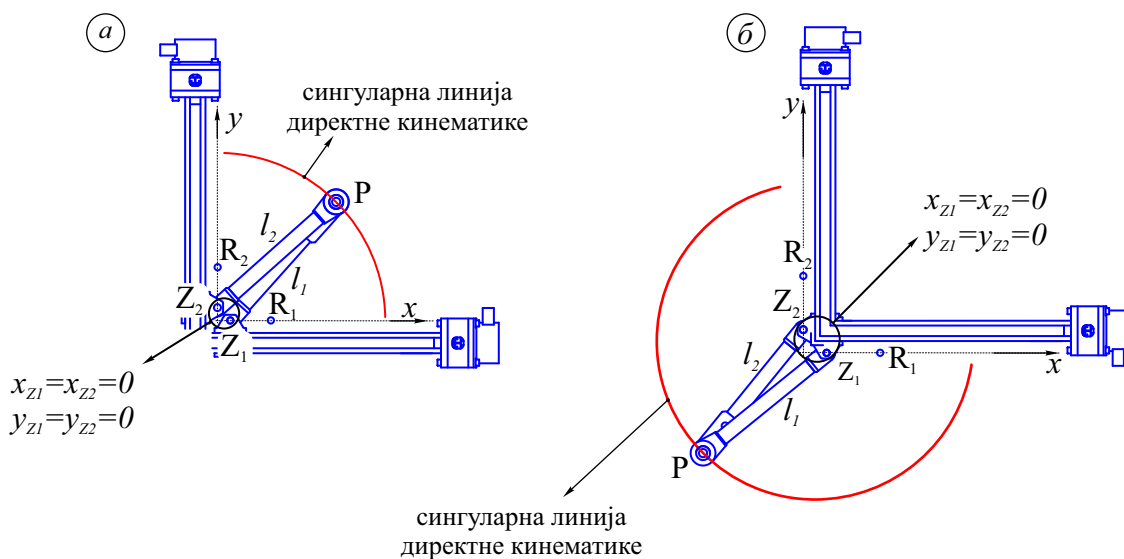
Слика 4.18 Сингуларитети инверзне кинематике конфигурације механизма *МОМА-М2*



Слика 4.19 Сингуларити инверзне кинематике конфигурације механизма МОМА-М3

4.2.2 Сингуларитети директне кинематике

Сингуларитети директне кинематике се јављају у тачкама радног простора у којима детерминанта Јакобијан матрице директне кинематике има вредност $\det(J_x)=0$. Вредности $\det(J_x)$ приказане на сликама 4.12.б, 4.13.б, 4.14.б, 4.15.б и 4.16.б за анализиране конфигурације РПКМ-МОМА, показују да унутар достизивог радног простора не постоје сингуларитети директне кинематике. Анализом једначина (4.2) до (4.5), добијају се позиције клизача Z_1 и Z_2 који дају сингуларитете директне кинематике. Тако, за конфигурације механизма МОМА-М2 и МОМА-М3, сингуларитети директне кинематике се јављају у сличају када се оба клизача нађу у координатном почетку (слика 4.20).

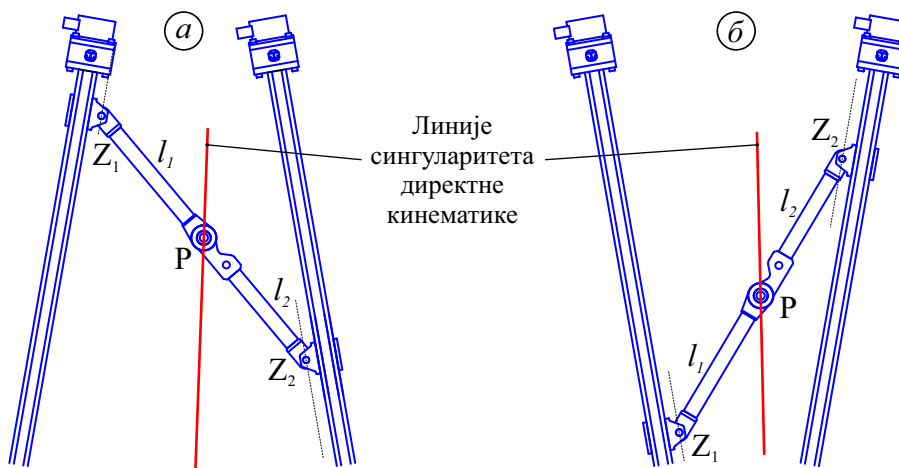


Слика 4.20 Позиције сингуларитета директне кинематике конфигурација механизма: а) МОМА-М2; б) МОМА-М3

Позиције клизача Z_1 и Z_2 , за које вредности унутрашњих координата имају негативне вредности ($p_1 < 0$ и $p_2 < 0$), не могу се реализовати али се разматрају због евентуалног конфигурисања нових типова механизма. Сингуларитети инверзне кинематике конфигурација *МОМА-М4* и *МОМА-М5* се такође не могу реализовати јер у једном случају вредности унутрашњих координата имају вредности $p_1 < 0$ и $p_2 < 0$ (слика 4.21.a), а у другом случају вредности унутрашњих координата су веће од максималног хода погонских оса $p_1 > p_{max}$ и $p_2 > p_{max}$ (слика 4.21.б). Променом вредности параметра K_{IKP} у односу на вредности које су дате у табели 3.1, мења се и облик једначине (3.7) што узрокује и другачију расподелу вредности $\det(J_x)$ па самим тиме и позиције сингуларитета. Са променом вредности параметра K_{IKP} узима се у обзир вишеструкост решења инверзне кинематике, а сингуларитети конфигурација механизма *МОМА-М4* и *МОМА-М5* су приказани на слици 4.22. Као и код претходне две конфигурације, и код конфигурације механизма *МОМА-М1* сингуларитети директне кинематике са промењеном вредношћу једног параметра K_{IKP} се налазе на средини радног простора. Из наведеног разлога ниједна од конфигурација није погодна за употребу па овим конфигурацијама није посвећена пажња.



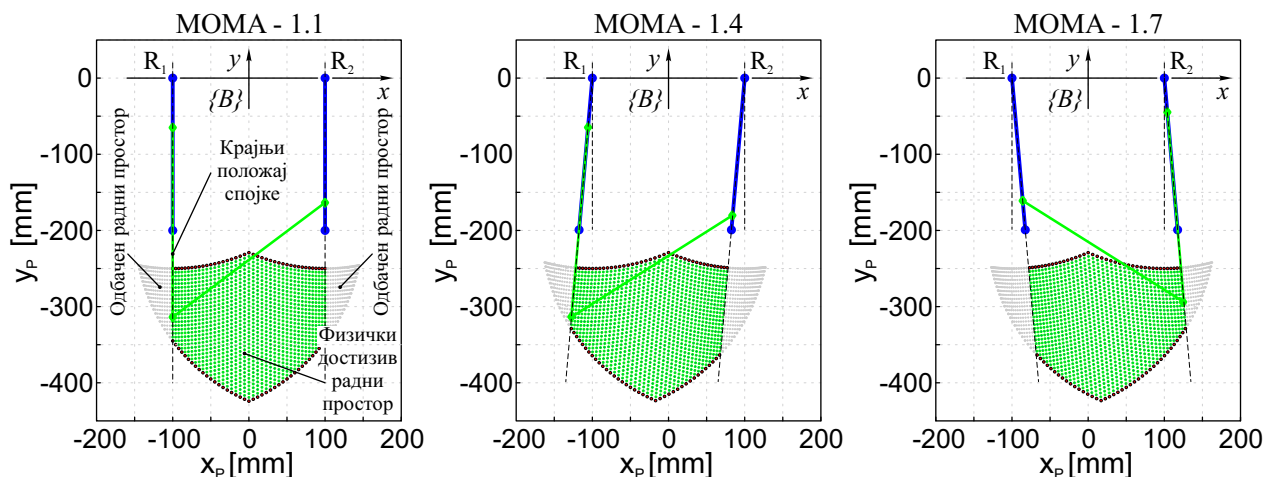
Слика 4.21 Позиције сингуларитета директне кинематике конфигурација механизма: а) *МОМА-М4*; б) *МОМА-М5*



Слика 4.22 Сингуларитети директне кинематике са промењеним вредностима параметара K_{IKP} за конфигурација механизма: а) *МОМА-М4*; б) *МОМА-М5*

4.3 Користан радни простор РПКМ-МОМА

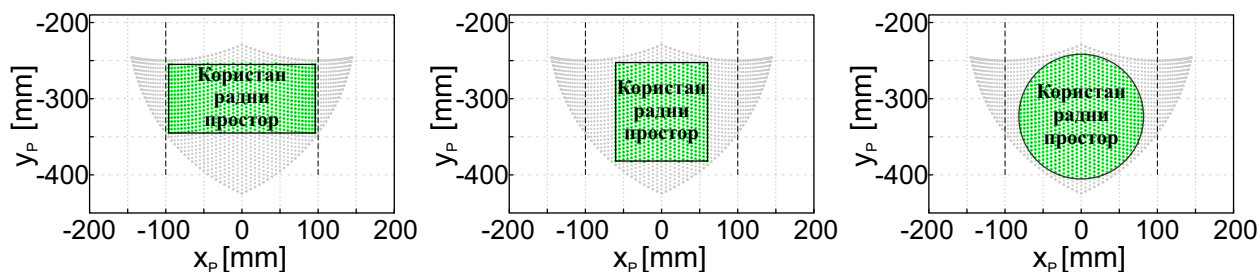
Претходно анализирани достизиви радни простори различитих конфигурација механизма РПКМ-МОМА су добијени применом једначина ИКП-а или ДКП-а. Приказаним анализама су занемарене поједине геометријске величине делова механизма којима су дефинисани облици и величине саставних делова механизма чиме је занемарена могућност колизије између спојки и вођица механизма као и немогућност довођења платформе механизма у сваку тачку достизивог радног простора. Исто тако, претходна разматрања су сведена на математички опис величине и облика радног простора, расподеле детерминанти Јакобијан матрица унутар њих и као таква представљају полазну тачку за дефинисање корисног радног простора. Од значаја је одредити користан радни простор механизма који је део достизивог радног простора и правилног је облика. Димензије и облик корисног радног простора су првенствено условљене обликом и величином достизивог радног простора, а потом и коначним вредностима геометријских величина делова механизма. За конфигурације механизма *МОМА-М1*, узимајући у обзир крајњи положај спојки механизма (случај када је спојка паралелна са вођицом погонске осе), одбацује се део достизивог радног простора јер механизам због физичких ограничења не може да доведе платформу механизма у тај део радног простора. Одбацивањем дела радног простора, добија се физички достизив радни простор како је и приказано на слици 4.23. Овако добијени радни простори су изузетно неправилног облика и са стране будућих корисника било које машине алатке базиране на РПКМ-МОМА нису погодни. Из тог разлога, према неком од критеријума, унутар физички достизивог радног простора се дефинише користан радни простор механизма са погодним обликом и димензијама.



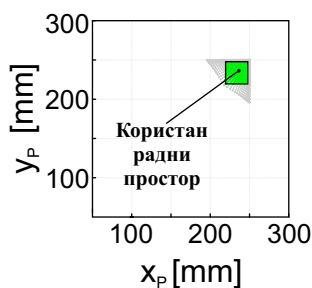
Слика 4.23 Физички достизив радни простор конфигурација механизма *МОМА-М1*

Примери корисног радног простора конфигурације механизма *МОМА-М1.1* су приказани на слици 4.24. Конфигурације механизма *МОМА-М4* и *МОМА-М5* су сличне конфигурацији *МОМА-М1* па се и корисни радни простори дефинишу на исти начин те не постоји потреба за њиховим приказом. Конфигурација механизма *МОМА-М2* не поседује физичка ограничења па је и достизив радни простор са слике 4.10 уједно и физички достизив радни простор. Код конфигурације механизма *МОМА-М3*, физичко ограничење је крајњи положај спојки механизма

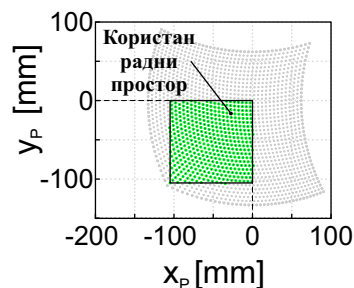
као и код конфигурација механизма *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5*. Разлика је једино у томе што су код конфигурације механизма *МОМА-М3* крајњи положаји спојки међусобно управни. Облици и величине корисног радног простора конфигурација *МОМА-М2.1* и *МОМА-М3.1* су приказани на сликама 4.25 и 4.26.



Слика 4.24 Различити облици корисног радног простора конфигурације *МОМА-М1*



Слика 4.25 Корисан радни простор конфигурације *МОМА-2.1*



Слика 4.26 Корисан радни простор конфигурације *МОМА-3.1*

Упоредном анализом корисног радног простора и расподеле вредности детерминанти Јакобијан матрица, закључује се да се физичким ограничењима механизма онемогућује позиционирање платформе у сингуларним тачкама и то за све анализирание конфигурације механизма (конфигурације са дужинама спојки $l_1=l_2=250 \text{ mm}$) осим за конфигурацију *М2.1* што у многоме олакшава употребу механизма. За конфигурације механизма *МОМА-М2*, неопходно је током програмирања водити рачуна о путањи платформе да би се обезбедило да се платформа механизма у сваком тренутку налази довољно далеко од сингуларних линија приказаних на слици 4.18. За конфигурације механизма *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5* са краћим спојкама ($l_i=195 \text{ mm}$ и $l_i=180 \text{ mm}$), сингуларитети се налазе унутар физички достиживих радних простору. За претходно наведене конфигурације, неопходно је водити рачуна о кретању плафрме током рада механизма.

4.4 Оптимизација дужине спојки РПКМ-МОМА

Анализа расподеле детерминанти Јакобијан матрица показала је да вредности $\det(J)$ унутар достиживог радног простора могу имати било коју вредност у границама $\det(J)=[-\infty; +\infty]$ па чак и $\det(J)=0$. Дефинисањем корисног радног простора избегавају се сингуларне конфигурације у којима детерминанта Јакобијан матрице $\det(J)$ има вредности $\det(J) = 0$, $\det(J) = -\infty$ и $\det(J) = +\infty$. Међутим, вредности $\det(J)$ нису само показатељи позиције

сингуларних тачака већ се за њих везују и многе друге карактеристике механизма попут крутости, покретљивости, тачности, кинематике, динамике итд. [36,42]. Из тог разлога, једна од незаобилазних процедура при конфигурисању паралелних механизма је и оптимизација геометријских параметара механизма чиме се обезбеђује да механизам испуњава неке од постављених захтева као што су: i) максимална тачност у дефинисаном корисном радном простору; ii) максимална крутост механизма у одређеном правцу; iii) максималне брзине или убрзања за задате брзине и убрзања актуатора; iv) минимална сила актуатора за задато оптерећење на платформи механизма [36] итд.

Оптимизација дужина спојки РПКМ-МОМА има за циљ да се за унапред дефинисан користан радни простор дефинише дужина спојки механизма која ће обезбедити вредности детерминанте Јакобијан матрице такве да паралелни механизам у погледу кинематике има приближно исте карактеристике као и конвенционални двоосни серијски механизам са трансляторним погонским осама. Узимајући у обзир једначине (4.2) до (4.5), за традиционални серијски двоосни механизам се може констатовати да вредности детерминанте Јакобијан матрице у целом радном простору имају вредност $\det(J)=1$ што значи да је брзина промене одређене спољашње координате једнака брзини промене одговарајуће унутрашње координате, односно $\dot{x}_i = \dot{p}_i$. Узимајући у обзир слике 4.12 до 4.16, недвосмислено се може тврдити да брзине \dot{x}_P и \dot{y}_P платформе РПКМ-МОМА имају другачије вредности у различитим тачкама радног простора механизма, а за константне вредности \dot{p}_i . Пресликавање вредности \dot{p}_i на вредности \dot{x}_P и \dot{y}_P се описује параметром κ^1 који према теорији линеарне алгебре показује у којој мери се излазне величине (у овом случају \dot{x}_P и \dot{y}_P) мењају са променом улазних величина (у овом случају \dot{p}_i) у датој тачки [43]. Вредности параметра κ се израчунавају према једначини (4.7)

$$\kappa = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (4.7)$$

при чему су σ_{max} и σ_{min} максималне и минималне вредности решења карактеристичне једначине

$$\det(\sigma^2 I - J^T J) = 0 \quad (4.8)$$

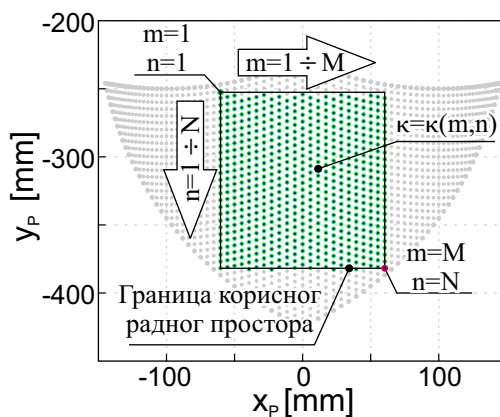
Параметар κ може имати вредности $1 < \kappa < \infty$ [17] при чему вредност $\kappa=1$ указује на изотропан механизам код кога су вредности $\dot{x}_i = \dot{p}_i$ док $\kappa = \infty$ указују на то да мале вредности \dot{p}_i узрокују велике промене \dot{x}_P и \dot{y}_P и да се ради о сингуларној конфигурацију механизма [74]. У различитим деловима достизивог радног простора механизма, параметар κ има другачије вредности па се за оцену кинематичких перформанси механизма користи параметар η^2 [90] чија се вредност за радни простор механизма израчунава према једначини (4.9).

$$\eta = \sqrt{\eta_1^2 + (w \cdot \eta_2)^2} \quad (4.9)$$

¹ κ - eng. Condition number - Индекс структуре Јакобијан матрице

² η - eng. Global performance index - Глобални индекс покретљивости механизма

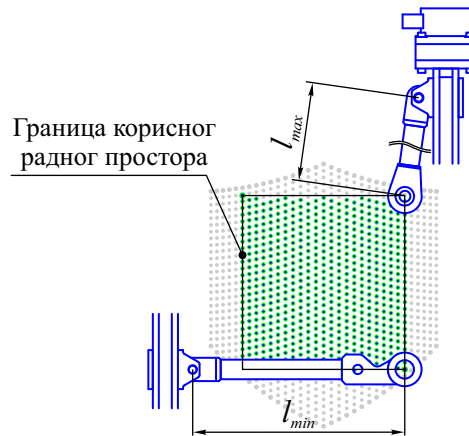
Глобални индекс покретљивости η је статистичка величина коју према једначини (4.9) чине две компоненте и то, η_1 - средња вредност параметра κ и η_2 - однос максималне и минималне вредности параметра κ унутар разматраног корисног радног простора. Разматрани радни простор се састоји од низа тачака које формирају мрежу од M врста и N колона. Позиција сваке тачке у формираној мрежи је дефинисана променљивим величинама m и n како је и приказано на слици 4.27, а вредности компонената глобалног индекса покретљивости разматраног радног простора се израчунавају једначинама (4.10).



Слика 4.27 Одређивање вредности параметра κ унутар дефинисаног корисног радног простора механизма РПКМ-МОМА

$$\eta_1 = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \kappa(m, n)}{M \cdot N} \quad \eta_2 = \frac{\max[\kappa(m, n)]}{\min[\kappa(m, n)]} \quad (4.10)$$

Једначине (4.7) до (4.10) указују на чињеницу да различите конфигурације механизма имају различите вредности глобалног индекса покретљивости за радне просторе идентичног облика и величине. Променом дужине спојки механизма мења се и конфигурација механизма па самим тим и вредност глобалног индекса покретљивости. Одређивањем глобалног индекса покретљивости за оне дужине спојки које се налазе у границама $l=(l_{min} \div l_{max})$, добија се низ вредности на основу којих се може конструисати крива $\eta=\eta(l)$. Оптимална дужина спојки за дефинисани облик и величину корисног радног простора анализирани конфигурације механизма је она дужина која даје минималну вредност глобалног индекса η_{min} . Вредности l_{min} и l_{max} се одређују на основу геометрији механизма, а према дефинисаном корисном радном простору. Наиме, за дефинисану величину корисног радног простора, механизам мора бити у стању да платформу механизма доведе у сваку тачку радног простора са сваком дужином спојки која се налази у границама од l_{min} до l_{max} . Тако, према слици 4.28 ако је дужина спојки краћа од l_{min} , платформа се не може довести у крајње бочне положаје. Исто тако, ако је дужина спојки дужа од l_{max} , платформа се не може довести у горње углове корисног радног простора. Резултати оптимизације дужине спојки за различите конфигурације РПКМ-МОМА и за различите величине и облике корисног радног простора су приказани у наредном поглављу.



Слика 4.28 Минималне и максималне вредности дужина спојки РПКМ-МОМА

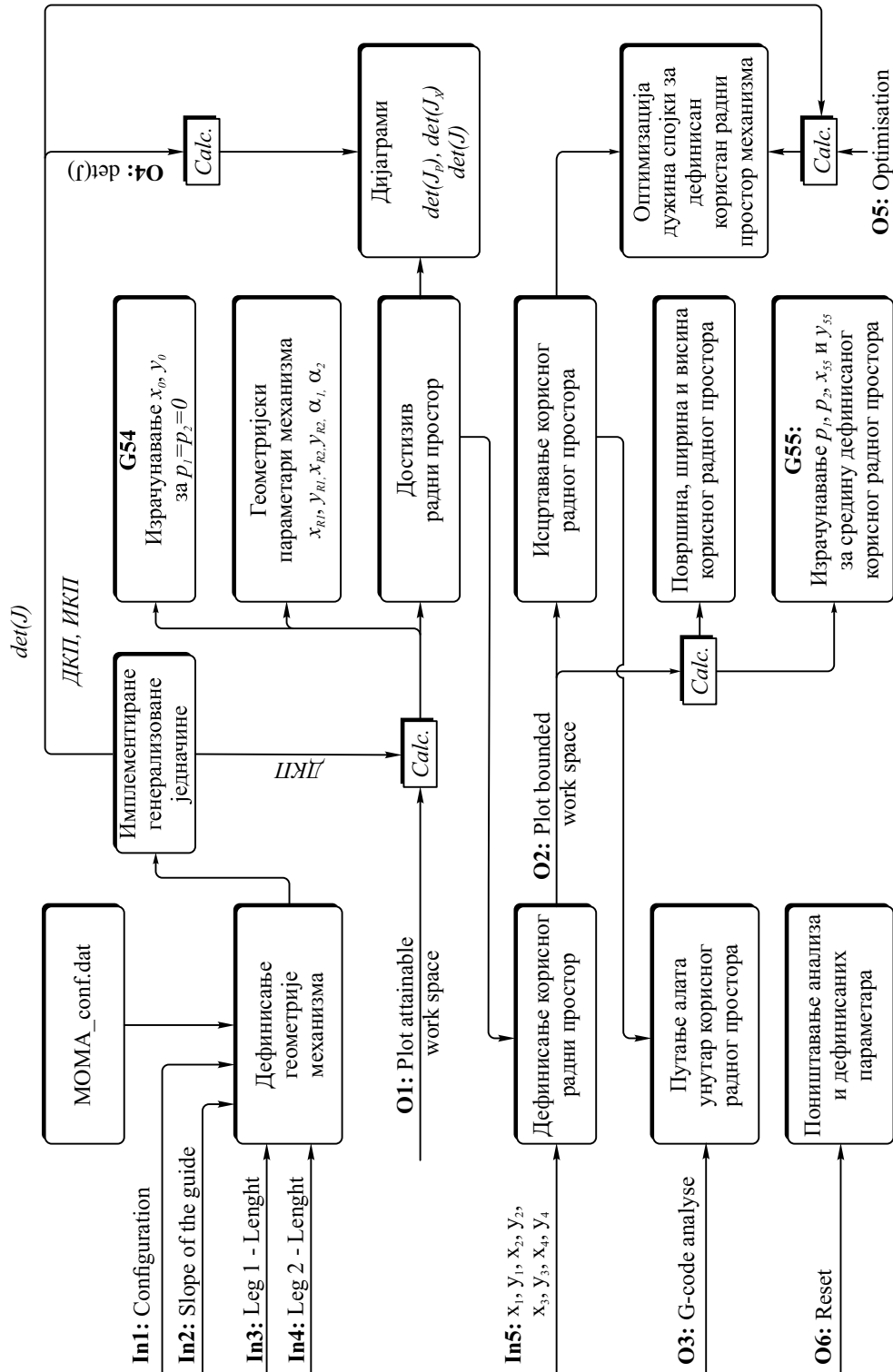
4.5 МОМА-GUI софтвер за анализу РПКМ-МОМА

МОМА-GUI³ је графичко софтверско окружење развијено у оквиру ове докторске дисертације и обухвата све претходно описане анализе РПКМ-МОМА. Апликација је креирана са циљем да олакша и убрза анализе свих основних конфигурација механизма дефинисаних параметрима који су наведени у табели 3.1. У апликацију су имплементирани претходно изведене једначине кинематичких проблема у уопштеном облику као и изведена Јакобијан матрица механизма. На основу имплементираних једначина и задатих параметара, осим резултата претходно описаних анализа, апликација пружа и додатне могућности о којима ће бити више речи у наставку текста. Графичко окружење апликације (слика 4.29), чине неколико целина и то:

- Део у коме се дефинише конфигурација механизма одабиром: i) Типа механизма ($M1$, $M2$, $M3$, $M4$ или $M5$); ii) Оријентације вођица (*Left*, *Right* или *Simetric*); iii) Дужине спојки (180 mm , 195 mm или 250 mm) → (слика 4.29 (а))
- Део у коме се дефинише облик корисног радног простора преко координате четири тачке. На основу задатих координата четири тачке, приказује се ширина, висина и површина корисног радног простора → (слика 4.29 (б))
- Део у коме се за одабрану конфигурацију механизма приказују координате координатног система $G54$ (координатни систем машине) у односу на дефинисан непокретни координатни систем $\{B\}$. Позиција координатног система $G54$ одговара позицији платформе механизма у координатном систему $\{B\}$, а за вредности унутрашњих координата $p_1=p_2=0$. За задату конфигурацију и дефинисан користан радни простор, приказују се и координате координатног почетка координатног система $G55$ (координатни систем обратка). Координатни система $G55$ је постављен на средини корисног радног простора → (слика 4.29 (в))
- Део у коме се врши одабир жељене анализе механизма као што су исцртавање достизивог радног простора (*Plot attainable work space*), исцртавање корисног радног простора (*Plot*

³ eng. GUI (*Graphical User Interface*) - Графички кориснички интерфејс

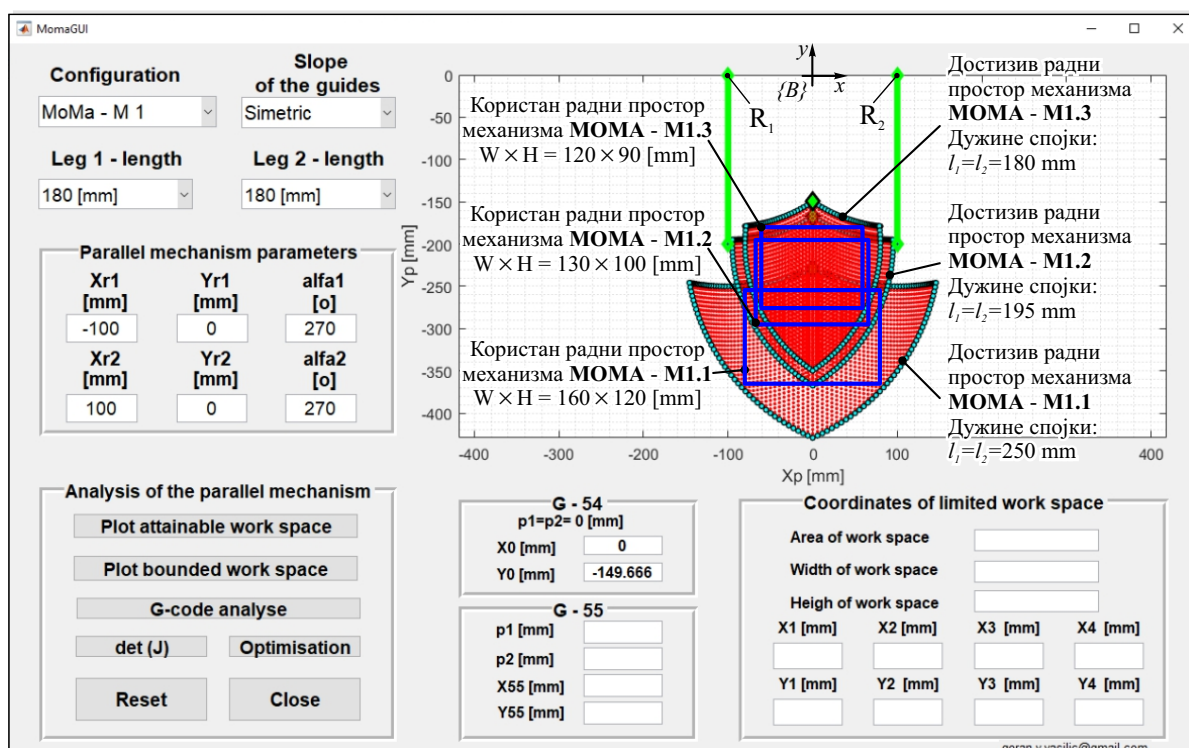
Структура апликације *МОМА-GUI* је формирана на основу дефинисане методологије по којој се конфигурише хардверски део *РПКМ-МОМА*. Развој методологије обухвата дефинисање активности и токова података приликом анализе било које конфигурације *РПКМ-МОМА*. Одређене активности апликација реализује применом имплементираних једначина, а на основу одговарајућих података. Дефинисане активности као и токови података унутар апликације су у облику *IDEF0* дијаграма приказани на слици 4.30.



Слика 4.30 IDEF0 дијаграм апликације MOMA GUI

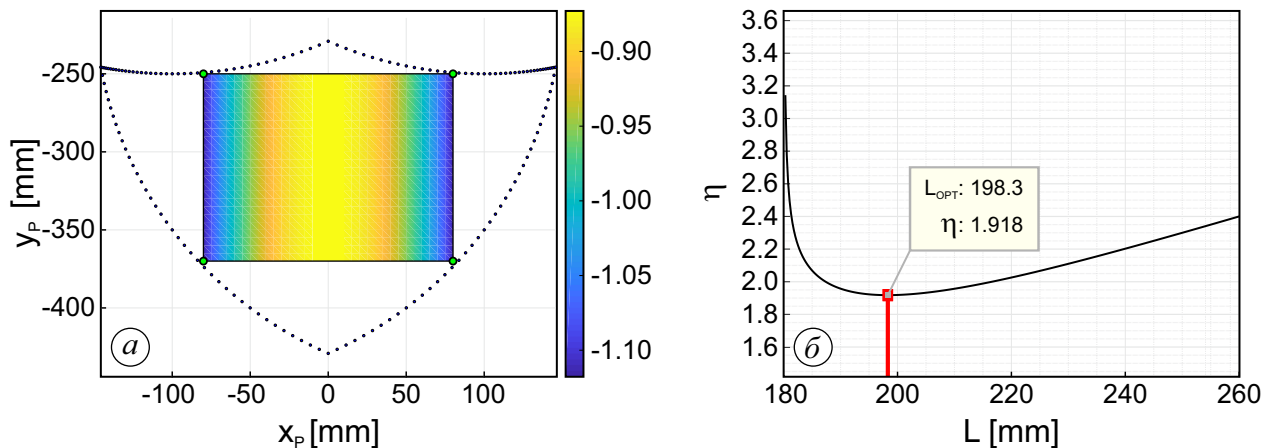
На *IDEF0* дијаграму, стрелицама су приказани токови података између блокова који представљају одговарајућу активност у оквиру апликацију. Ознаке **"In:"** представљају улазне величине апликације и корисник их уноси према својим потребама, док ознаке **"O:"** представљају захтев апликацији за одређену анализу која на основу прорачуна **"Calc."** као излаз даје резултате захтеване анализе. Користећи апликацију MOMA-GUI, анализирани су неке од конфигурација раванског реконфигурабилног механизма *MOMA*. Према програму градње постоји велики број конфигурација, а за анализе су издвојене оне конфигурације механизма које су значајне за даља разматрања.

На слици 4.31 приказана је анализа достиживих и корисних радних простора конфигурације *MOMA M-1.1* са дужинама спојки $l_1=l_2=250\text{ mm}$, конфигурације *MOMA M-1.2* са дужинама спојки $l_1=l_2=195\text{ mm}$ и конфигурације *MOMA M-1.3* са дужинама спојки $l_1=l_2=180\text{ mm}$. За наведене конфигурације дефинисани су корисни радни простори за које су у наставку дате анализе расподеле детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$ као и оптимизације дужине спојки. Резултати наведених анализа приказани су на сликама 4.32, 4.33 и 4.34.

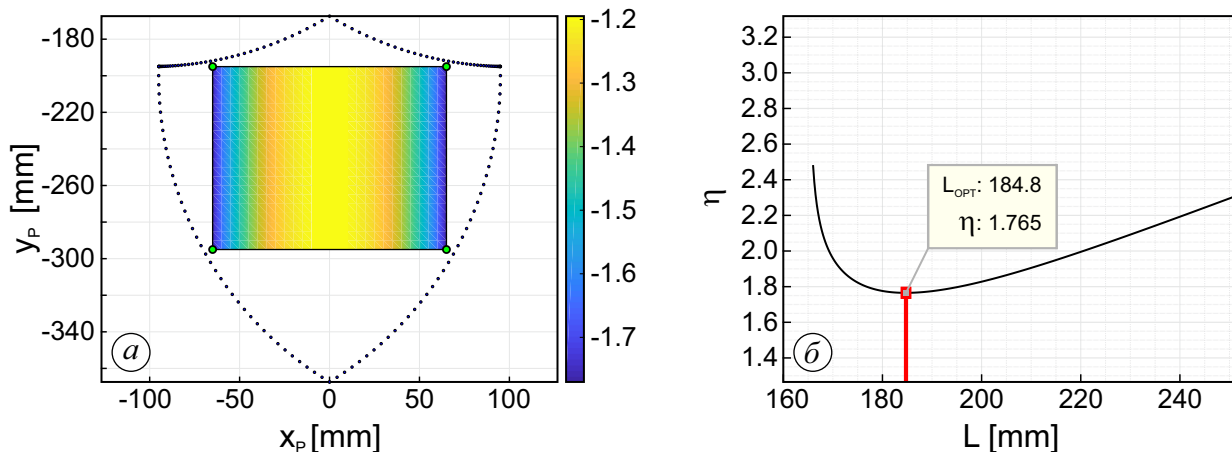


Слика 4.31 MOMA GUI - Анализа достиживих и корисних радних простора конфигурација M1.1, M1.2 и M1.3 раванског паралелног механизма MOMA

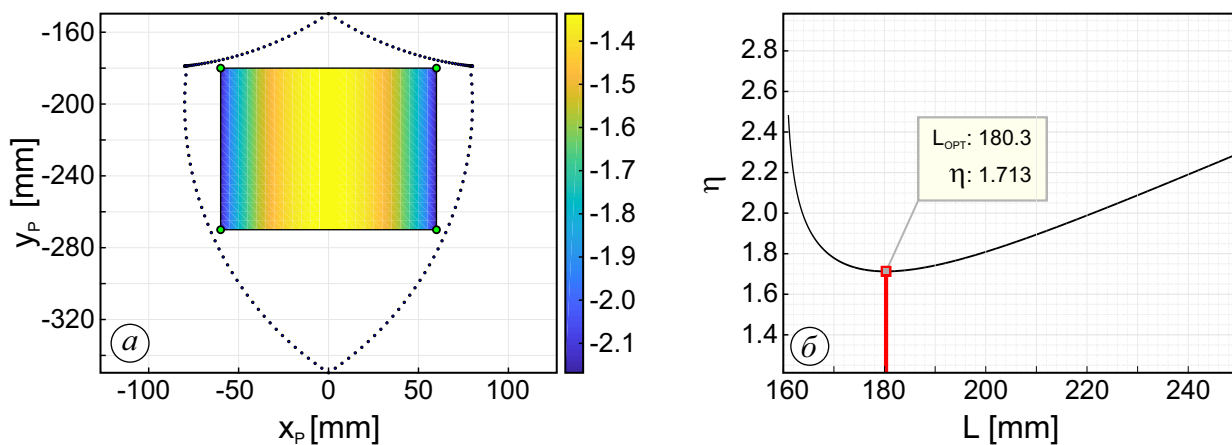
На основу слика 4.31 до 4.34, може се закључити да осим облика и величине достиживог радног простора, дужине спојки РПКМ-МОМА утичу на расподелу вредности детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$ унутар достиживог, а самим тиме и унутар корисног радног простора. Оптимизацијом дужине спојки РПКМ-МОМА добијене су спојке нове дужине са којима РПКМ-МОМА има нови облик и величину достиживог радног простора, али и другачију расподелу $\det(J)$ унутар већ дефинисаног корисног радног простора.



Слика 4.32 МОМА М1.1: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор

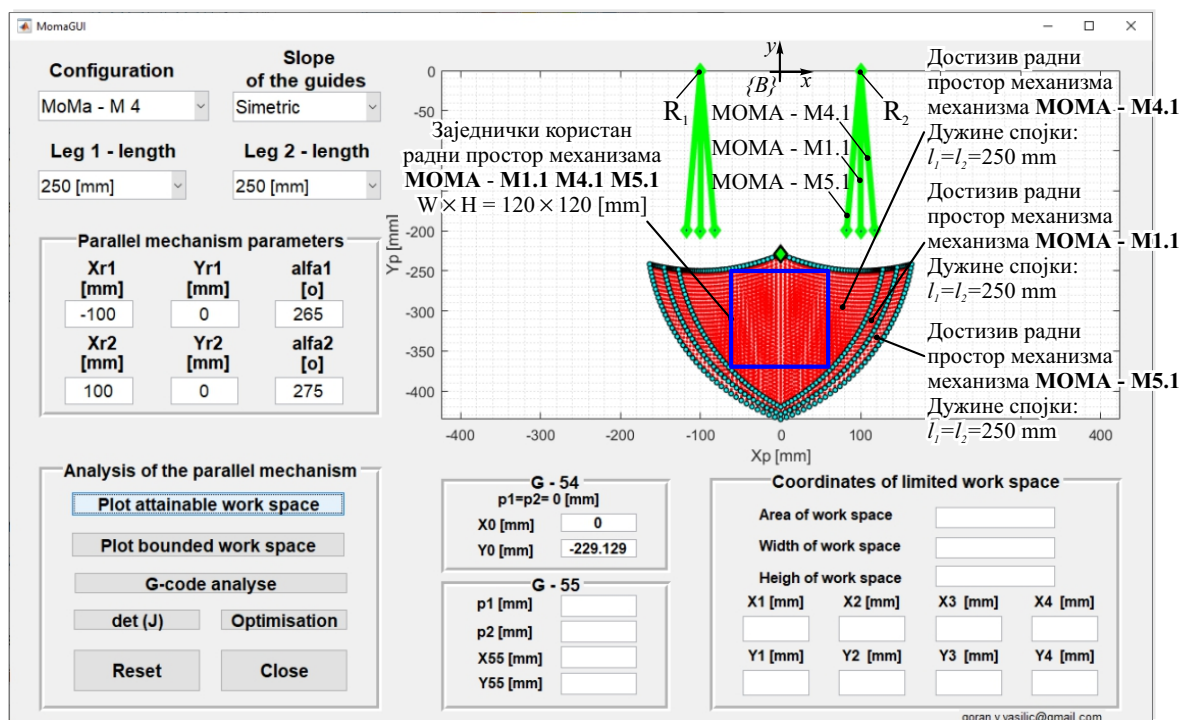


Слика 4.33 МОМА М1.2: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор



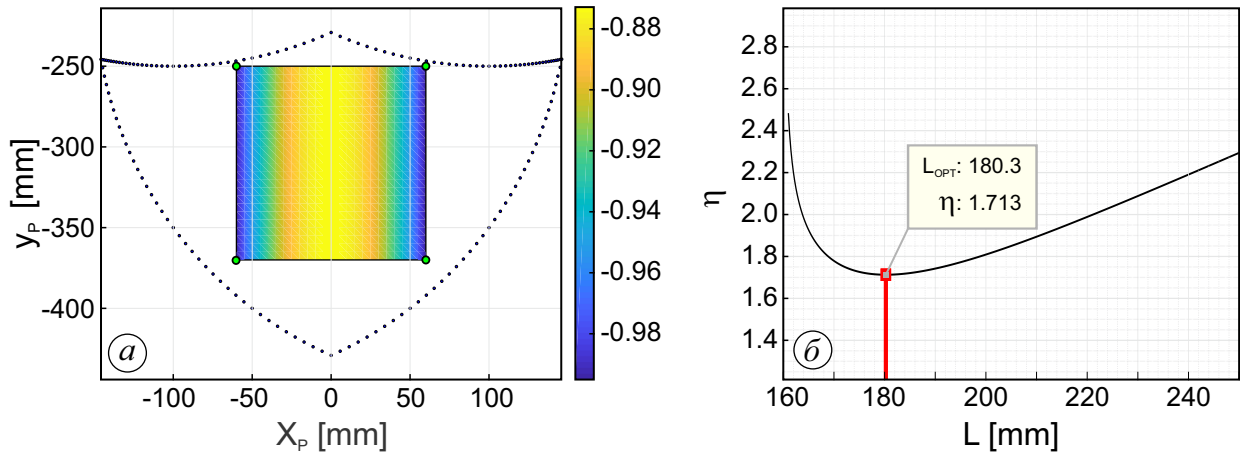
Слика 4.34 МОМА М1.3: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор

Од значаја је упоредити конфигурације механизма *МОМА М1.1*, *МОМА М4.1* и *МОМА М5.1*. На слици 4.35 је приказана упоредна анализа наведених конфигурација. Све три конфигурације имају спојке исте дужине и за све три конфигурације је дефинисан идентичан користан радни простор. Упоредном анализом се стиче увид у зависност расподеле детерминанте Јакобијан матрице $det(J)$ од оријентација погонских оса као и утицај оријентације погонских оса на оптималну дужину спојки за дефинисан облик и величину корисног радног простора.

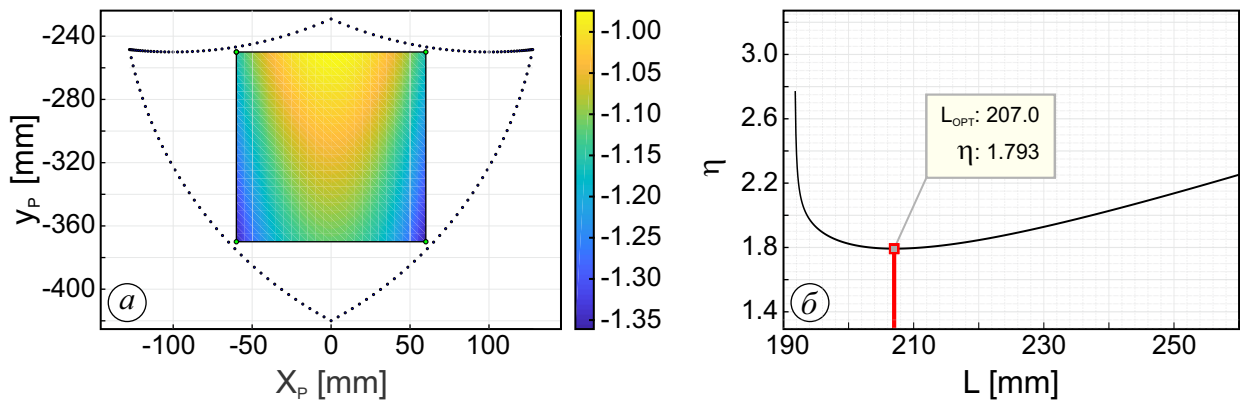


Слика 4.35 MOMA GUI - Упоредни приказ достизивих и заједничког корисног радног простора конфигурација *МОМА М1.1*, *МОМА М4.1* и *МОМА М5.1*

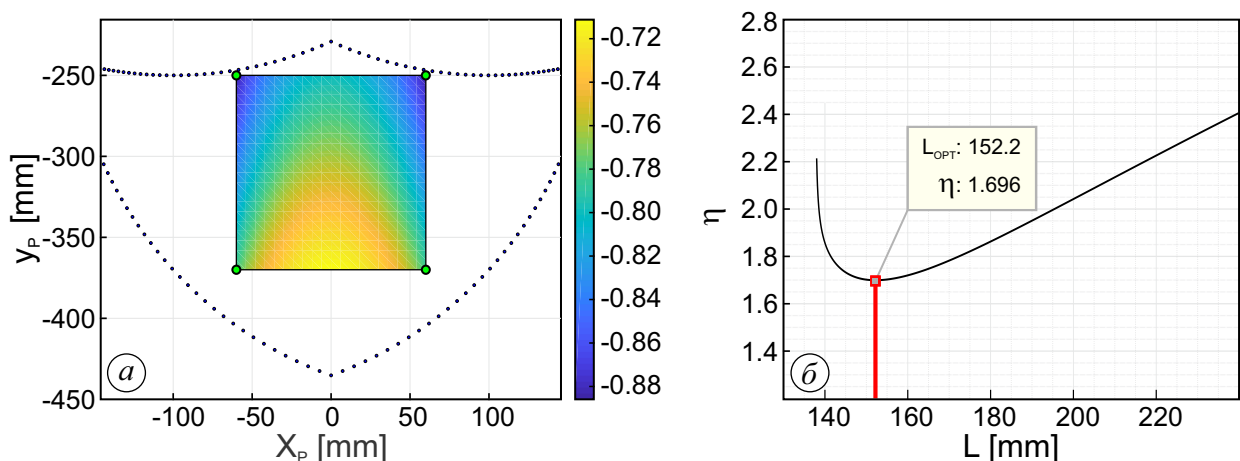
Резултати упоредне анализе конфигурација механизма *МОМА М1.1*, *М4.1* и *М5.1* су приказани на сликама 4.36, 4.37 и 4.38. Резултати анализа приказаних на сликама 4.34 и 4.36, указују на чињеницу да је поступком оптимизације добијена иста вредност оптималних дужина спојки L_{OPT} па се намеће закључак да почетне дужине спојки и величине достизивог радног простора не утичу на оптималну дужину спојки. На оптималну дужину спојки L_{OPT} утиче облик и величина корисног радног простора као и вредности детерминанте $det(J)$ унутар њега. Резултати анализа приказаних на сликама 4.37 и 4.38 указују на то да се након оптимизације дужине спојки, за исти облик и величину корисног радног простора различитих конфигурација механизма добијају различите вредности оптималне дужине спојки. Посматрајући промену вредности детерминанте Јакобијан матрице $det(J)$ унутар корисног радног простора, закључује се да код конфигурације механизма *МОМА М1* нема промене вредности $det(J)$ у правцу осе Oy већ промена постоји само у правцу осе Ox . Из тог разлога на оптималну дужину спојки конфигурације *МОМА М1* утиче само ширина корисног радног простора па резултати анализа са слика 4.34 и 4.36 дају једнаке вредности оптималних дужина спојки L_{OPT} .



Слика 4.36 МОМА М1.1: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор



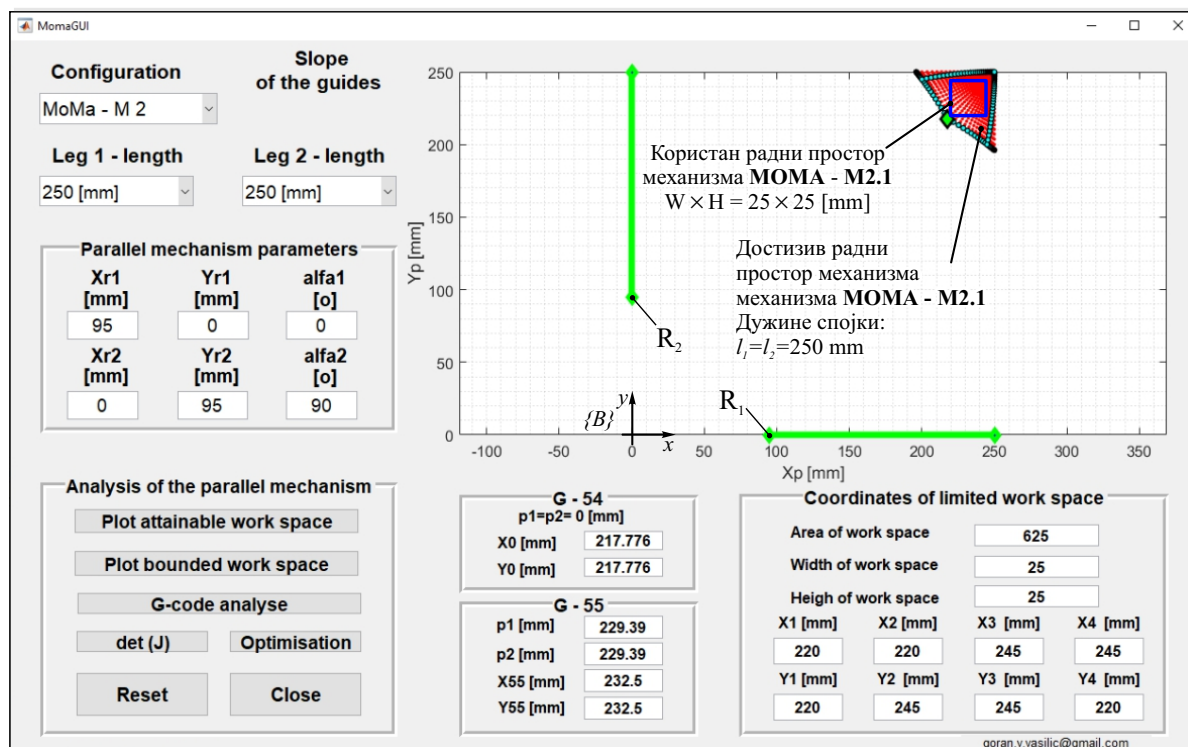
Слика 4.37 МОМА М4.1: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор



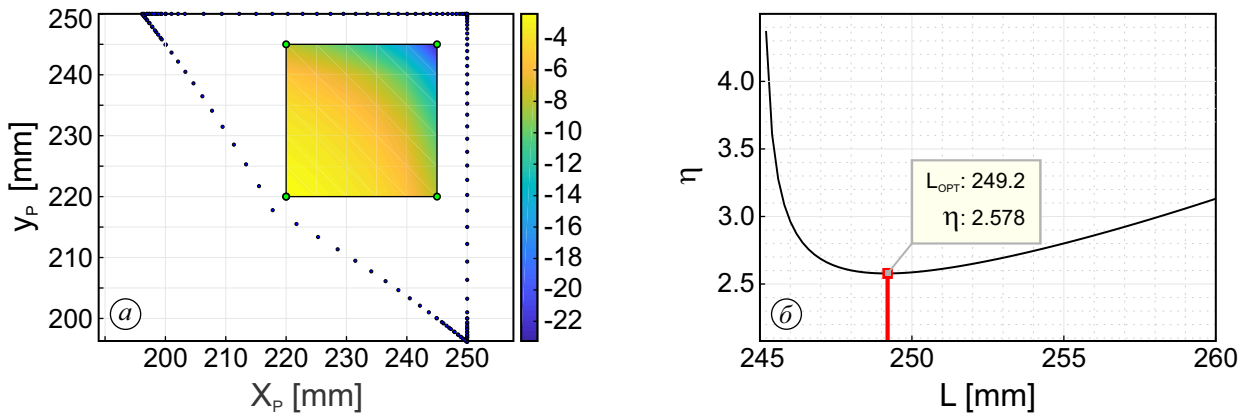
Слика 4.38 МОМА М5.1: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор

Код конфигурација механизма *МОМА М4* и *МОМА М5*, вредности $\det(J)$ се мењају и са променом координата x_P и са променом координата y_P платформе механизма па на оптималну дужину спојки утиче и ширина и висина дефинисаног корисног радног простора. Посматрајући резултате анализа приказаних на сликама 4.37 и 4.38, уочава се да осим што се вредности $\det(J)$ мењају и у правцу осе Ox и у правцу осе Oy , другачија је и расподела вредности $\det(J)$, тј. са порастом координата y_P код конфигурације механизма *МОМА М4*, вредности $\det(J)$ такође расту, док код конфигурације механизма *МОМА М5* вредности $\det(J)$ опадају са порастом координата y_P па се за исти облик и величину корисног радног простора добијају различите вредности оптималне дужине спојки.

Анализа конфигурације *МОМА М2.1* са дужинама спојки $l_1=l_2=250\text{ mm}$ (слика 4.39), показује да је величина достизивог радног простора веома мала па се у оквиру њега може дефинисати користан простор са знатно мањом ширином и висином у односу на претходно анализирани конфигурације. Према слици 4.40, вредности $\det(J)$ крећу се у границама $\det(J)\approx 4\div 22$ док се за све претходне анализирани конфигурације вредности $\det(J)$ налазе у границама $\det(J)\approx 0.7\div 2.1$. Користан радни простор малих димензија, велике вредности $\det(J)$ као и велике промене вредности $\det(J)$ унутар корисног радног простора наводе на закључак да ова конфигурација механизма нема своју практичну примену, али даље анализе ће показати да конфигурације *МОМА М2.1* има и своје предности у односу на остале конфигурације механизма.

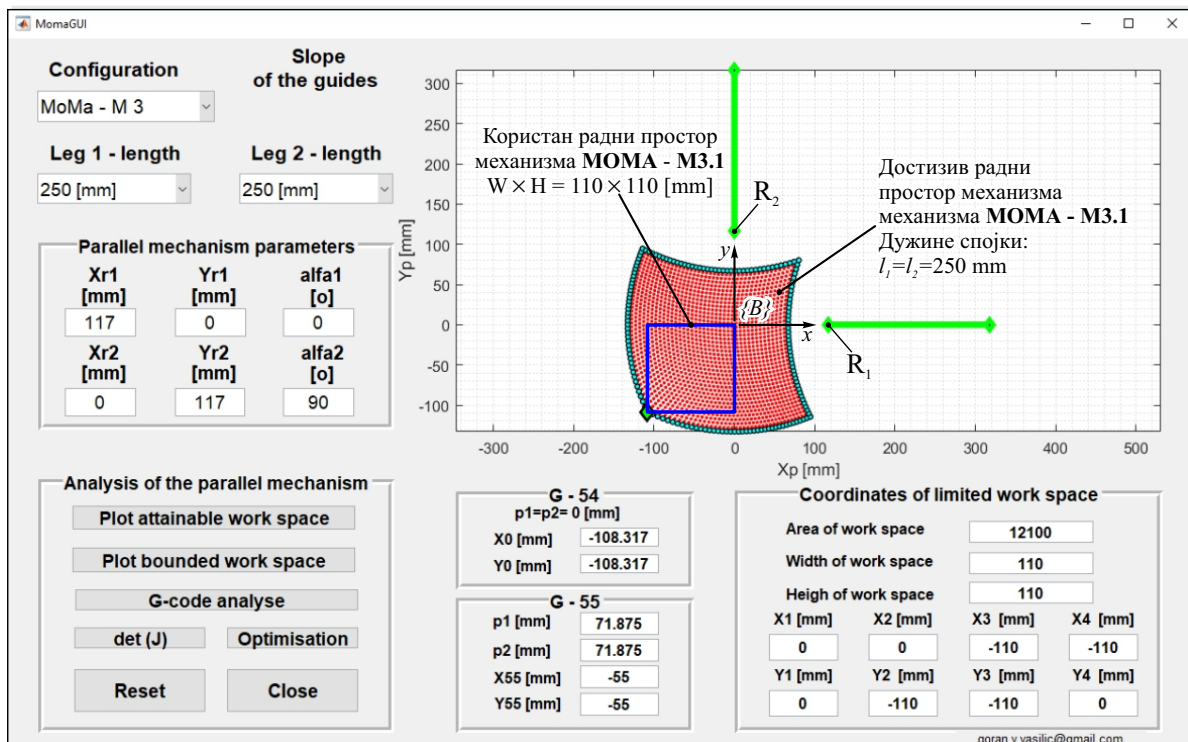


Слика 4.39 MOMa GUI - Анализа достизивог и корисног радног простора конфигурације М2.1 раванског паралелног механизма МОМА

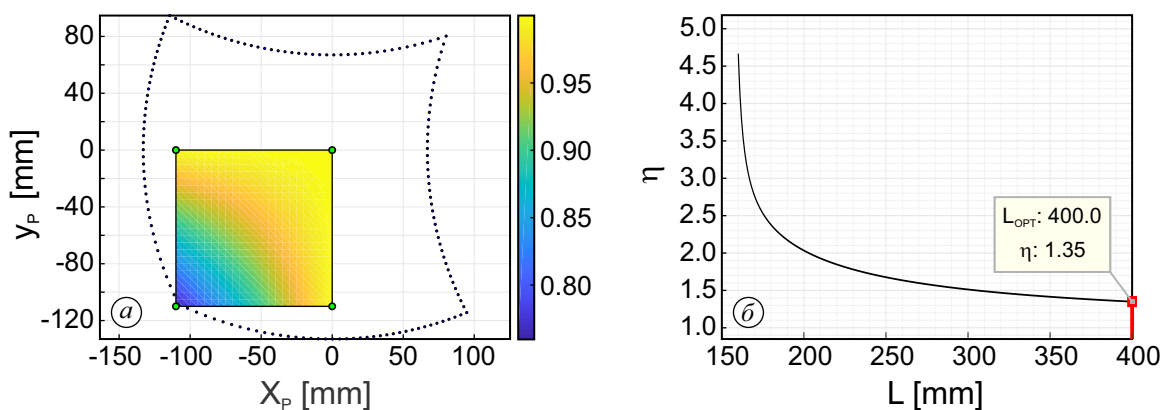


Слика 4.40 МОМА М2.1: а) Распореда вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор

Конфигурација МОМА М3.1 се својом геометријом разликује од претходно анализираних конфигурација. Према облику и величини достизивог и корисног радног простора, и према распореда $\det(J)$ (слике слика 4.41 и 4.42), конфигурација МОМА М3.1 се битно не разликује од конфигурација МОМА М1.1, МОМА М4.1 и МОМА М5.1. Битна разлика између конфигурације МОМА М3.1 и конфигурација МОМА М1.1, МОМА М4.1 и МОМА М5.1 се увиђа тек код оптимизације дужине спојки механизма. Према дијаграму са слике 4.42.б, крива $\eta = \eta(l)$ нема свој минимум као што је случај са претходно анализираним конфигурацијама већ крива $\eta = \eta(l)$ непрестано опада па се оптималне дужине спојки не могу одредити као код претходно анализираних конфигурација.

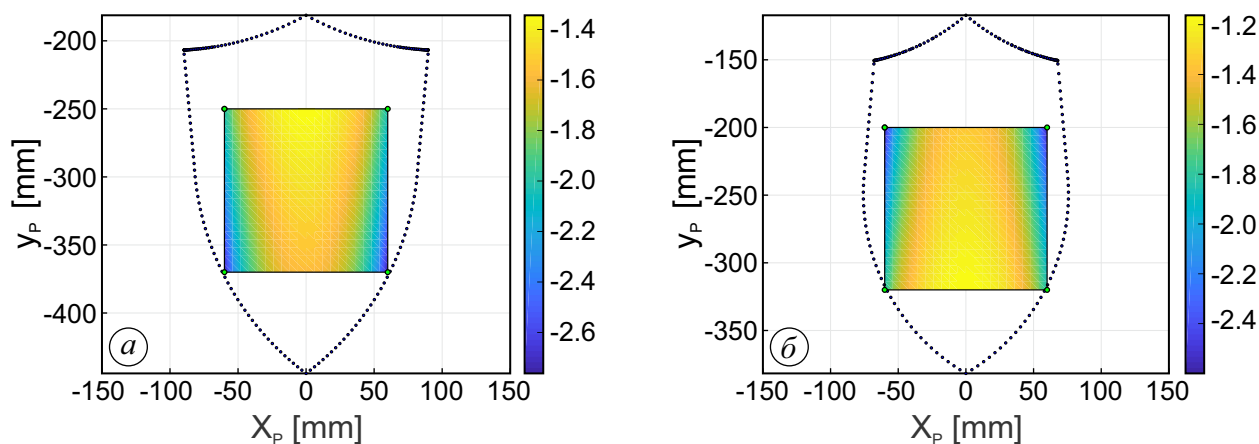


Слика 4.41 МОМА GUI - Анализа достизивог и корисног радног простора конфигурације М3.1 раванског паралелног механизма МОМА



Слика 4.42 МОМА М3.1: а) Вредности $\det(J)$ унутар дефинисаног корисног радног простора; б) Резултат оптимизације дужине спојки за задати користан радни простор

Дијаграми $\eta=\eta(l)$ указују на то да свака конфигурација има своје граничне минималне вредности дужине спојки L_{min} за које индекс η има вредност $\eta=+\infty$. За дату конфигурацију и са минималним вредностима дужине спојки, унутар граница дефинисаног корисног радног простора се налазе сингуларне тачке. Оптимизацијом дужине спојки, осим што се избегавају граничне минималне вредности дужина спојки, добија се потпуно нови облик и величина достизивог радног простора као и расподела вредности $\det(J)$ унутар претходно дефинисаног корисног радног простора. Претходне тврдње се најбоље могу уочити анализом конфигурација МОМА М4 и МОМА М5. Упоредивањем дијаграма приказаног на слици 4.43 са дијаграмима на сликама 4.37.а и 4.38.а, закључује се да промена дужине спојки узрокује промену расподеле $\det(J)$ што је било и очекивано.



Слика 4.43 Вредности $\det(J)$ унутар корисног радног простора и оптималним дужинама спојки: а) Конфигурација МОМА М4, $L_{OPT}=207$ mm; б) Конфигурација МОМА М5, $L_{OPT}=152$ mm

Даљим тумачењима, може се установити да је промена дужина спојки узроковала и промену граница у којима се крећу вредности $\det(J)$ унутар корисног радног простора. Међутим, иако су проширени распони у којим се вредности $\det(J)$ крећу, сама расподела вредности $\det(J)$ је уједначенија што и показује распрострањеност жуте и наранџасте боје на дијаграмима

приказаним на слици 4.43. Недостатак примењене методе за оптимизацију дужина спојки је тај што метода не узима у обзир дужину вођица погонских оса механизма већ само њихову оријентацију. Тако, платформа механизма конфигурације *МОМА М5.1* са добијеном оптималном дужином спојки $L_{OPT}=152.2 \text{ mm}$ не може досегнути сваку тачку претходно дефинисаног корисног радног простора. Свака тачка дефинисаног корисног радног простора се може досегнути продуживањем вођица погонских оса, али због додатних трошкова и нарушавања реконфигурабилност механизма наведена опција се не разматра. Као алтернатива, намеће се опција којом се задржава облик и величина већ дефинисаног корисног радног простора, али се мења позиција корисног радног простора у односу на координатни систем $\{B\}$. Променом позиције корисног радног простора, не ремети се употребљивост и функционалност механизма, а резултати су приказани на слици 4.43.б.

Осим параметра κ (*Condition number*) који је споменут у претходном поглављу, за описе различитих карактеристика паралелних механизма се користе и други параметри попут w^4 - манипулативност (способност механизма да у свом радном простору мења позицију и оријентацију) [36,44], η_s^5 - глобални индекс крутости [42,44], κ_j^6 - индекс кинематске изотропности [44] итд. Наведени параметри механизма (али и многи други) према цитираним ауторима имају различите вредности у различитим деловима радног простора, а њихове вредности зависе од вредности $\det(J)$ у даатој тачки радног простора механизма. Примењујући поступак оптимизације дужина спојки *РПКМ-МОМА* и уједначавањем вредности $\det(J)$ у дефинисаном радном простору механизма, уједначавају се и карактеристике механизма што и јесте од значаја при самој градњи механизма.

4.6 Резолуција РПКМ-МОМА

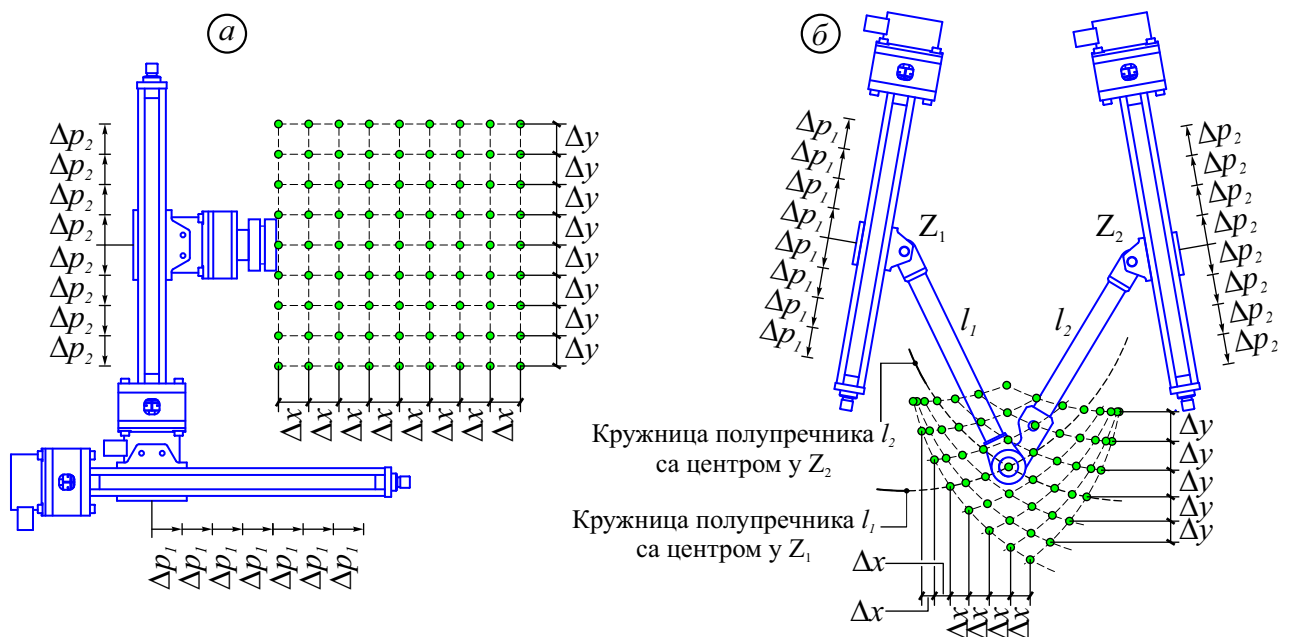
Једна од најбитнијих карактеристика механизма је његова резолуција, без обзира да ли је реч о серијском, паралелном или хибридном механизму. За разлику од традиционалних серијских механизма, резолуција паралелних механизма није константна у радном простору, као што је и приказано на слици 4.44. Ако се резолуција механизма посматра као минимални могући померај завршног уређаја механизма, онда је резолуција традиционалних серијских механизма једнака минималној промени унутрашњих координата Δp , односно $\Delta p = \Delta x = \Delta y$, што важи за сваку тачку радног простора (слика 4.44.а). Претходна тврдња не важи за паралелне механизме због њихове геометрије, конструкције и начина рада. Тако, променом једне од унутрашњих координата Δp паралелног механизма, завршни уређај (у овом случају платформа паралелног механизма) се неће кретати у правцу и смеру промене унутрашње координате већ ће се кретати по кружници пречника једнаком дужини спојки l_i са центром у зглобној вези на клизачу Z_i . На овај начин промена једне унутрашње координате p_i за вредност Δp узрокује померање

⁴ w - eng. Manipulability

⁵ η_s - eng. Global stiffness index

⁶ κ_j - eng. The index of kinematic isotropy

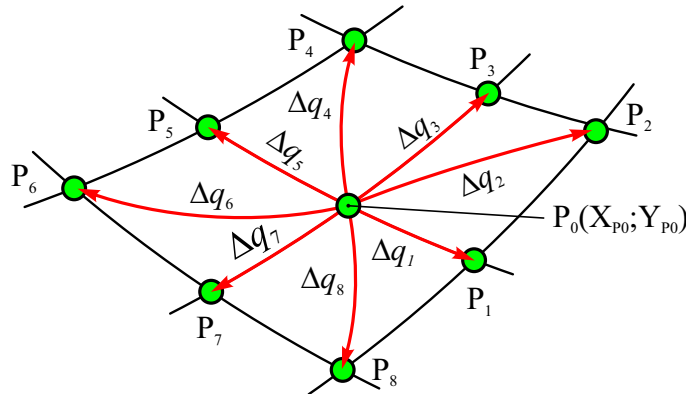
платформе механизма у два правца за вредности Δx и Δy . У зависности од дела круга на ком се у датом тренутку налази платформа, различите су и вредности помераја платформе Δx и Δy за исте вредности промене унутрашње координате Δp_i што је и приказано на слици 4.44.б. Проблематика резолуције паралелних механизма додатно се усложњава када се у разматрање укључе све погонске осе механизма са својим унутрашњим координатама. У случају РПКМ-МОМА, према слици 4.44.б анализирањем могућих кретања платформе механизма са променама обе унутрашње координате p_1 и p_2 за вредности Δp добија се мрежа од пресека кругова полупречника l_1 и l_2 . Сви пресеци кругова чине чворне тачке у којима се може наћи платформа РПКМ-МОМА за одређене вредности унутрашњих координата. Резолуција, односно минимални померај платформе РПКМ-МОМА може се дефинисати као растојање између две суседне чворне тачке. Као што се може приметити, осим што резолуција РПКМ-МОМА није константна у различитим деловима радног простора, разликује се и при кретању платформе механизма из једне тачке у четири могућа правца. Пре саме градње и конфигурисања механизма, од значаја је познавати вредност резолуције чијом би се оценом донели закључци о томе да ли механизам може испунити постављене захтеве у погледу тачности обраде те се овој проблематици посвећује посебна пажња.



Слика 4.44 Резолуција раванских двоосних механизма: а) Традиционални серијски механизам; б) Паралелни механизам МОМА

Досадашња истраживања су имала различите приступе при анализи резолуције и тачности паралелних механизма [46,47,50]. За анализу резолуције РПКМ-МОМА која је приказана у докторској дисертацији већ постоје публиковани и прихваћени резултати [86,91], а методологија је најприближнија методологији примењеној при мултиобјективној оптимизацији линеарног DELTA робота [48]. Приликом одређивања резолуције РПКМ-МОМА за почетак се издваја једна произвољна тачка радног простора P_0 са координатама $P_0(X_{P_0}; Y_{P_0})$ као што је и приказано на слици 4.45. Да би се платформа механизма нашла у изабраној тачки

радног простора, унутрашње координате механизма морају имати вредности $p_{1,0}$ и $p_{2,0}$ које се одређују већ изведеним једначинама ИКП-а. Како се током рада механизма сва макро-кретања платформе свде на микро-кретања платформе која се реализују елементарним променама унутрашњих координата за вредности Δp , платформа механизма из произвољно изабране тачке $P_0 (X_{P_0}; Y_{P_0})$ радног простора може прећи у једну од осам суседних тачака $P_i, (i=1 \div 8)$ како је приказано на слици 4.45. Ових осам могућих помераја су означени са $\Delta q_i, (i=1 \div 8)$ при чему се сваки од помераја реализује променом једне или обе унутрашње координате механизма p_i за вредност $\pm \Delta p$ и то на начине који су приказани табелом 4.1.



Слика 4.45 Реализација кретања платформе РПКМ-МОМА од чворне тачке до чворне тачке

Табела 4.1 Реализација кретања платформе механизма елементарним променама унутрашњих координата механизма

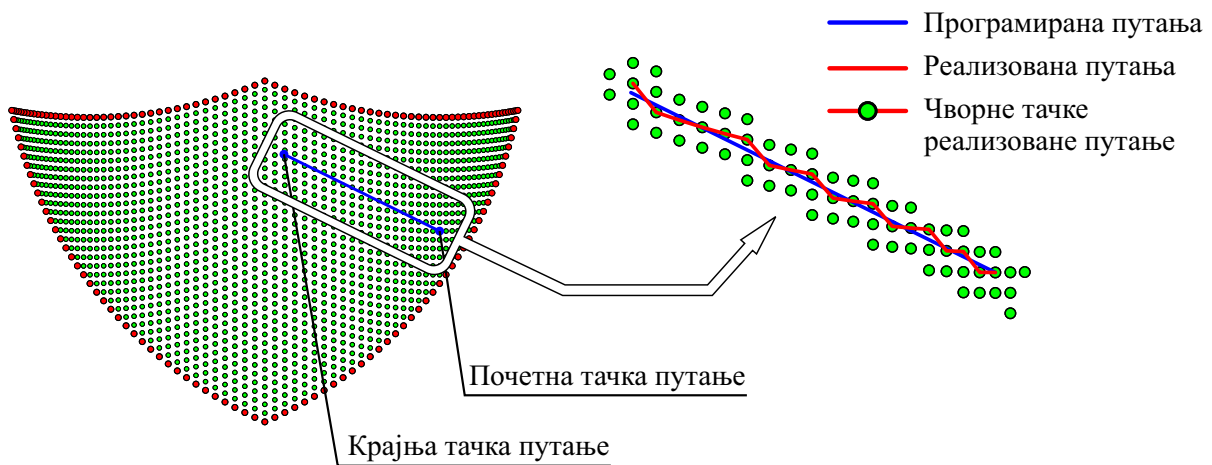
	Δq_1	Δq_2	Δq_3	Δq_4	Δq_5	Δq_6	Δq_7	Δq_8
p_1	$+\Delta p$	$+\Delta p$	0	$-\Delta p$	$-\Delta p$	$-\Delta p$	0	$+\Delta p$
p_2	0	$-\Delta p$	$-\Delta p$	$-\Delta p$	0	$+\Delta p$	$+\Delta p$	$+\Delta p$

Вредност Δp је константна и представља резолуцију погонске осе механизма која зависи од физичке резолуције корачног мотора α_{KM} (минимални угао заокрета ротора употребљеног мотора) као и од корака завојног вретена погонске осе s . За даље анализе усвојене су уобичајене вредности наведених величина $\alpha_{KM}=1.8^\circ$ и $s=1 \text{ mm}$ са којима се добија резолуција погонске осе $\Delta p = \alpha_{KM} \cdot s / 360^\circ$ односно $\Delta p=0.005 \text{ mm}$. Анализом резолуције РПКМ-МОМА у радном простору механизма одређује се зависност помераја Δq од промена унутрашњих координата p_i . С обзиром на то да помераји Δq имају мале вредности, у оквиру анализе резолуције радног простора механизма ће се сматрати да се платформа механизма из тачке P_0 променом унутрашњих координата p_i за вредности $\pm \Delta p$ креће праволинијски до једне од суседних тачака P_i . Узимајући у обзир претходна објашњења, за одређивање резолуције радног простора механизма неопходно је за сваку тачку радног простора одредити вредности помераја $\Delta q_i (i=1 \div 8)$, односно растојања од тачке P_0 до осам суседних тачака $P_i (i=1 \div 8)$. Кад се говори о свакој тачки радног простора механизма, подразумева се да су то оне тачке радног простора у које механизам може довести платформу са оним вредностима унутрашњих координата p_i

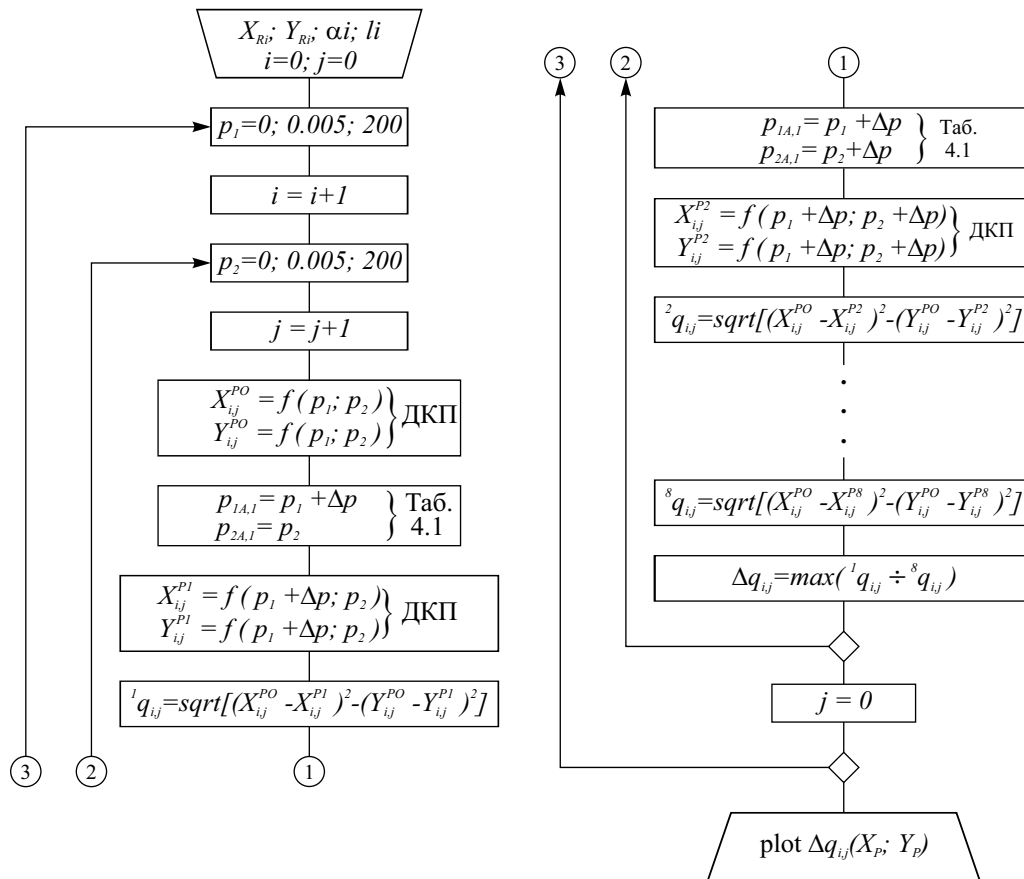
које погонска оса може да реализује. При анализи резолуције механизма, узимају се у обзир све вредности унутрашњих координата $p_i=0\div 200\text{ mm}$ са кораком $\Delta p=0.005\text{ mm}$. За одабране вредности унутрашњих координата, помоћу једначина ДКП-а одређују се координате тачака у којима може да се нађе платформа механизма, а потом се за сваку од тачака одређују координате суседних чворних тачака при чему се вредности унутрашњих координата мењају према табели 4.1 за вредност Δp . Како су сада познате координате свих (полазних) тачака радног простора P_0 као и координате суседних чворних тачака P_i , лако се могу одредити растојања Δq_i између полазне тачке P_0 и суседних чворних тачака P_i према следећој једначини:

$$\Delta q_i = \sqrt{(X_{P_0} - X_{P_i})^2 + (Y_{P_0} - Y_{P_i})^2} \quad (4.11)$$

Као што се може закључити, применом једначине (4.11) се за одређену тачку радног простора добија осам различитих вредности Δq_i при чему свака вредност Δq_i представља резолуцију механизма у одређеном правцу, а за дату тачку радног простора. Која од осам тачака P_i је меродавна зависи од самог кретања платформе механизма по програмираној путањи као што је и приказано на слици 4.46. У зависности од случаја до случаја платформа ће из једне исте почетне тачке прећи у различите суседне тачке при чему ће и резолуција бити различита, а самим тиме ће се правити и различите грешке (одступања од програмиране путање) током рада механизма. Како није могуће предвидети будући рад механизма и како је веома компликовано резолуцију механизма тумачити и дефинисати тако да се узме у обзир променљивост резолуције од тачке до тачке и у осам различитих праваца за сваку тачку радног простора, као резолуција механизма у датој тачки радног простора узима се максимална вредност помераја Δq од свих осам израчунатих вредности, односно $\Delta q = \max(\Delta q_i), i=(1 \div 8)$ што и представља најнеповољнији случај. Алгоритам по коме се одређује резолуција РПКМ-МОМА приказан је на слици 4.47.



Слика 4.46 Реализација програмиране путање платформе РПКМ-МОМА кретањем од чворне тачке до чворне тачке

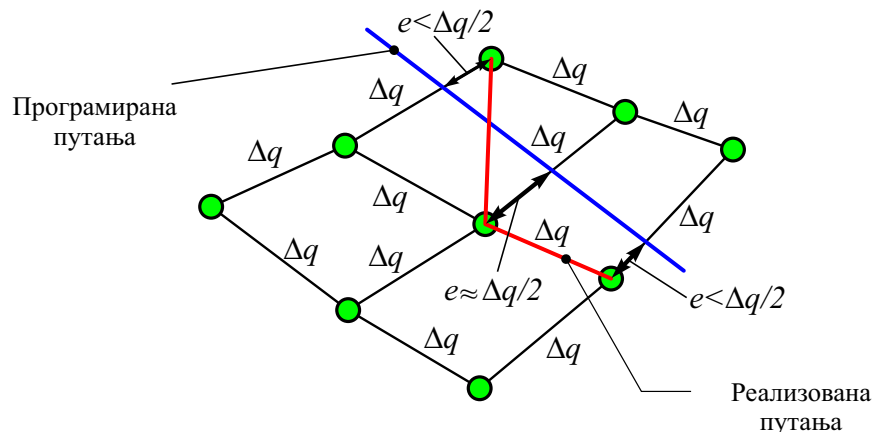


Слика 4.47 Алгоритам за одређивање резолуције РПКМ-МОМА

4.7 Грешка позиционирања платформе РПКМ-МОМА

Грешка позиционирања платформе РПКМ-МОМА зависи од резолуције самог механизма те се ова анализа надовезује на анализу резолуције механизма. Практично, анализа грешке позиционирања је идентична анализи из претходног поглавља с тим да су урађене неке измене. Према сликама 4.45 и 4.46, без обзира каквог је облика програмирана путања, она се реализује кретањем платформе од чворне тачке до чворне тачке при чему, у највећем броју случајева програмирана путања пролази између две чворне тачке. Узимајући у обзир да је усвојено да се платформа од чворне тачке до чворне тачке креће по правим линијама као и детаљнијом анализом реализације програмиране путање платформе (слика 4.48), закључује се да приликом позиционирања платформе у чворну тачку, грешка позиционирања e не може бити већа од половине вредности могућег помераја Δq . У случају да је грешка позиционирања платформе e приликом померања платформе механизма у наредну чворну тачку реализоване путање већа од половине вредности могућег помераја Δq , односно $e > \Delta q / 2$ онда та тачка није права тачка позиционирања већ њена суседна чворна тачка где је $e < \Delta q / 2$ како је и приказано на слици 4.48. За реализацију кретања платформе механизма на описан начин, задужен је управљачки део механизма који интерполатором путање реализује планирану путању. О интерполатору кретања и планирању путање, биће више речи у поглављу 8. Минималном изменом алгоритма са слике 4.47, тј. увођењем параметра e чија се вредност израчунава на основу могућег

помераја Δq , односно $e_{i,j} = \Delta q_{i,j}/2$, добија се максимална могућа грешка коју механизам прави позиционирањем платформе у одређену чворну тачку. Добијене вредности су релевантне јер ће грешка од случаја до случаја за дату чворну тачку бити и мања од израчунате или је чак и неће бити у случају да програмирана путања пролази баш кроз дату чворну тачку.



Слика 4.48 Грешка позиционирања платформе РПКМ-МОМА при реализацији програмиране путање алата

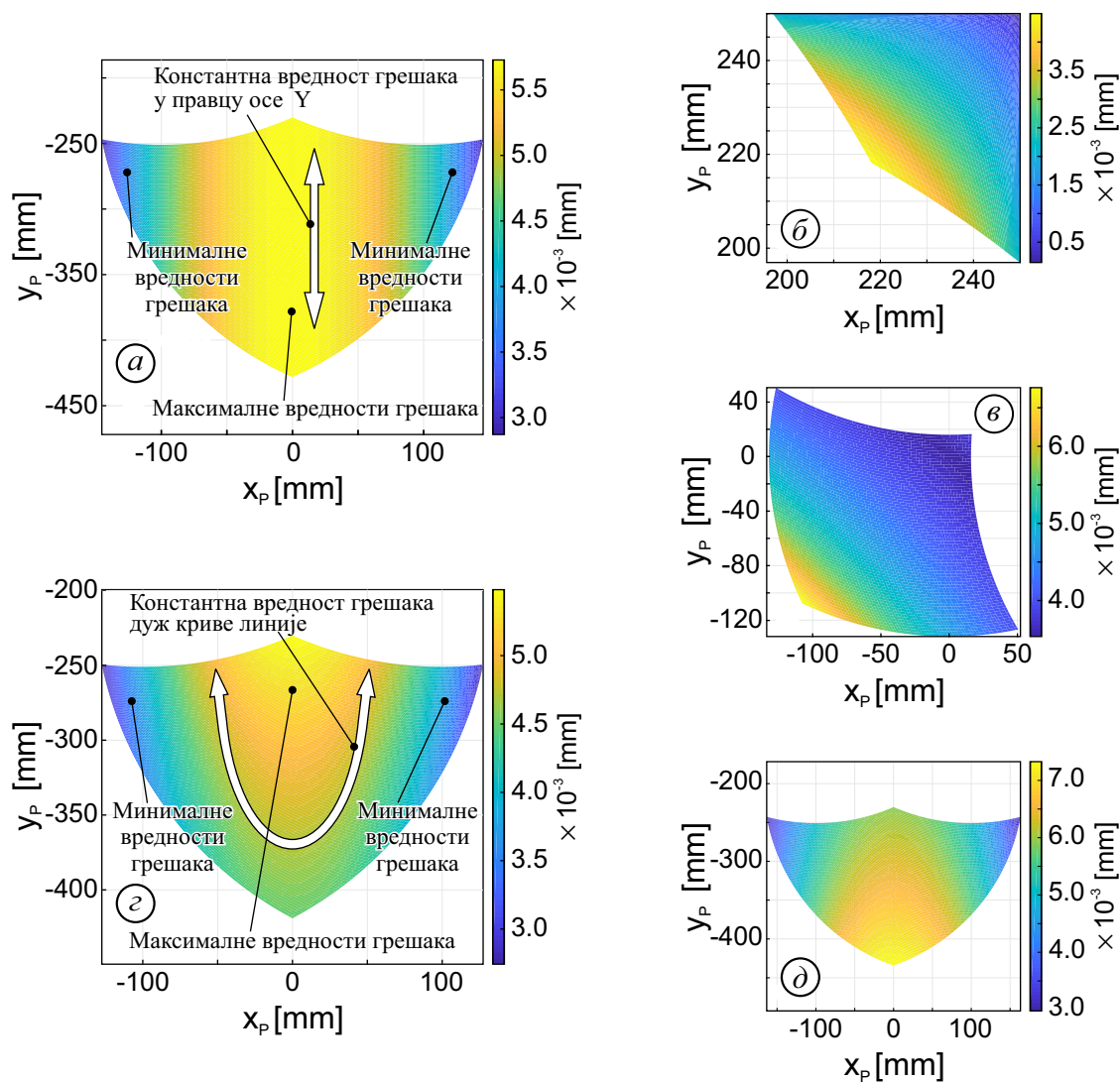
Према описаној процедури су одређене максималне вредности грешака позиционирања платформе механизма РПКМ-МОМА и то за конфигурације МОМА М1.1, МОМА М2.1, МОМА М3.1, МОМА М4.1 и МОМА М5.1 чији су геометријски параметри дати табелом 3.1. Резултати анализе су приказани на сликама 4.49.а до 4.49.д.

Упоредивањем дијаграма приказаних на сликама 4.49.а до 4.49.д са дијаграмима приказаних на сликама 4.12 до 4.16 у поглављу П4.2 на којима су приказане расподеле детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$ различитих конфигурација РПКМ-МОМА, може се закључити да су приказане расподеле грешака и $\det(J)$ у великој мери сличне чиме се намеће закључак да грешка позиционирања платформе у одређеној тачки зависи од вредности $\det(J)$ у датој тачки. Даљим тумачењем добијених резултата, може се закључити да велике вредности $\det(J)$ у одређеној тачки узрокују мале вредности грешака позиционирања платформе механизма као, што је и приказано на сликама 4.49.а и 4.49.з.

Дијаграми приказани на сликама 4.49.а до 4.49.д, показују да се код конфигурација РПКМ-МОМА М1.1, М3.1, М4.1 и М5.1 вредност потенцијалне грешке позиционирања платформе механизма креће у границама од $e \approx 0.003\text{mm}$ до $e \approx 0.007\text{mm}$, док се код конфигурације МОМА М2.1 та грешка креће у границама од $e \approx 0.0005\text{mm}$ до $e \approx 0.0035\text{mm}$. Ово практично значи да је вредност максималне грешке позиционирања платформе механизма конфигурације МОМА М2.1 скоро једнака минималним вредностима позиционирања платформе осталих конфигурација. Главни недостатак конфигурације механизма МОМА М2.1 у односу на остале конфигурације је величина радног простора која је анализирана у поглављима 4.3 и 4.5.

Међутим, како се конфигурација механизма МОМА М2.1 издваја од осталих конфигурација по мањим вредностима грешке позиционирања платформе механизма. Мање вредности грешке

позиционирања платформе механизма даје предност конфигурацији *МОМА М2.1* у односу на остале конфигурације при градњи машина намењених за прецизну или микро обраду материјала. Овиме је показана употребљивост наведене конфигурације механизма, поготово ако се узме у обзир величина и облик дела радног простора у коме су вредности грешке позиционирања платформе минималне. С обзиром да је анализом разматран случај када се кретања платформе реализују физичком резолуцијом корачног мотора ($\alpha_{KM}=1.8^\circ$), грешке позиционирања платформе са слике 4.49 се могу умањити радом корачних мотора у полукораку или микрокораку, како је и приказано у научном раду [47].



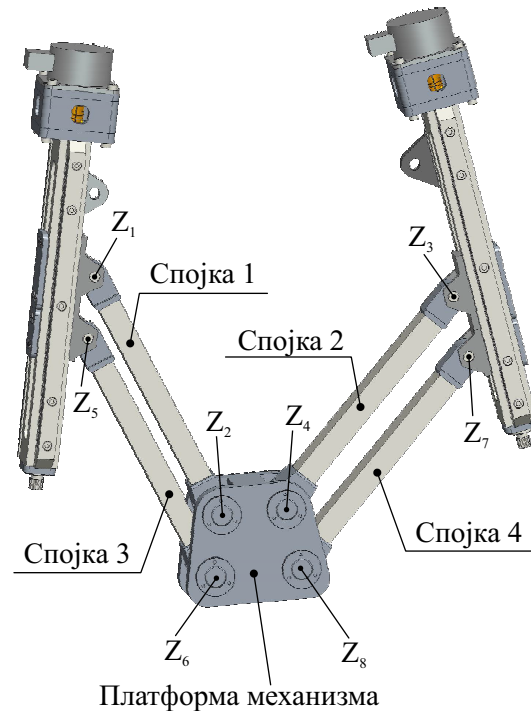
Слика 4.49 Расподеле максималних вредности грешака позиционирања платформе механизма РПКМ-МОМА: а) Конфигурације М1.1; б) Конфигурације М2.1; в) Конфигурације М3.1; г) Конфигурације М4.1; д) Конфигурације М5.1

ПРОШИРЕНА КОНФИГУРАЦИЈА ДВООСНОГ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ МЕХАНИЗМА СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ *РПКМ-МОМА*

Двоосни реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком *МОМА* показује извесне недостатке при усвајању концепта за пројектовање класе комплексних машина алатки те је неопходно у извесној мери модификовати механизам, а да се при томе не поремети главна особина механизма тј. реконфигурабилност. Саме промене конфигурације механизма се осим градње нових саставних елемената могу брзо и лако обавити па се самим тиме могућности реконфигурисања механизма повећавају. Нова, проширена конфигурација *РПКМ-МОМА* механизма се разликује од већ разматране конфигурације по постојању физичке платформе механизма и по броју спојки које повезују платформу механизма са клизачима погонских оса. До проширене конфигурације *РПКМ-МОМА* се дошло по угледу на механизме разматране у радовима [15,17,43], а нова конфигурација механизма је приказана на слици 5.1.

Код предложене нове конфигурације механизма *МОМА* постављањем физичке платформе, омогућено је да се на саму платформу механизма поставе различити завршни уређаји у зависности од намене будуће машине алатке. Платформа паралелног механизма има могућност транслаторног кретања у два правца и то у равни паралелног механизма. За сада се не говори са којим осама се поклапају наведени правци јер у зависности од начина постављања завршног уређаја, равански паралелни механизам може лежати у различитим равнима *Oxyz* непокретног координатног система, о чему ће више речи бити у поглављима 6. и 7.. Константна оријентација платформе је обезбеђена увођењем додатних спојки које су обртним неоснаженим зглобним везама (Z_2 , Z_4 , Z_6 и Z_8) једним крајем везане за платформу механизма, а другим крајем (Z_1 , Z_3 , Z_5 и Z_7) за клизаче погонских оса.

Физичка платформа и две додатне спојке битно мењају конфигурацију механизма па самим тиме и његову кинематику. У односу на основну конфигурацију механизма, задржане су многе геометријске величине али су уведене и неке нове како би било могуће формирати кинематички модел механизма и извести нове једначине које представљају решења ИКП-а и ДКП-а. Као што је приказано на слици 5.2, нове уведене геометријске величине су растојања између зглобних веза и то $\overline{Z_i Z_{i+4}}$ ($i = 1 \div 4$) као и растојања $l_H = \overline{Z_6 Z_8}$ и $l_T = \overline{PT}$.



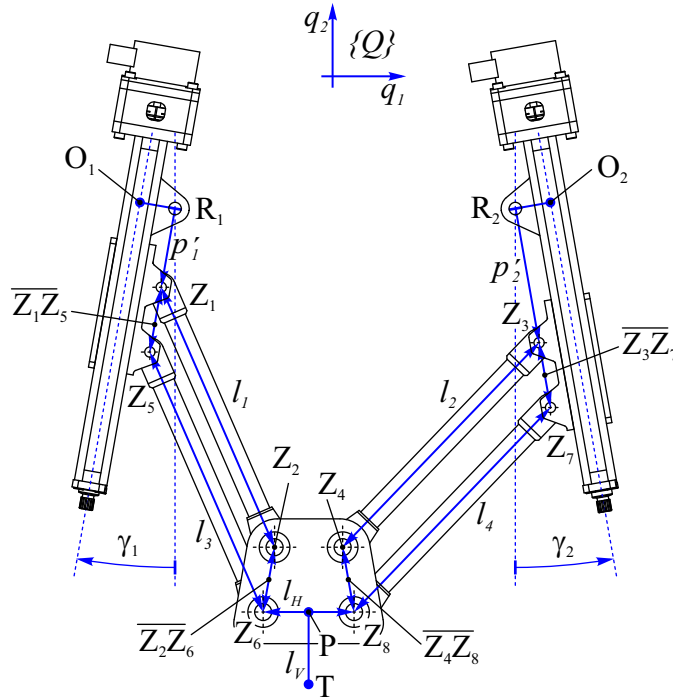
Слика 5.1 CAD модел проширене конфигурације РПКМ-МОМА

Приликом конфигурисања хардверског дела проширеног механизма РПКМ-МОМА, према ознакама на слици 5.2, неопходно је испоштовати следећа захтеве:

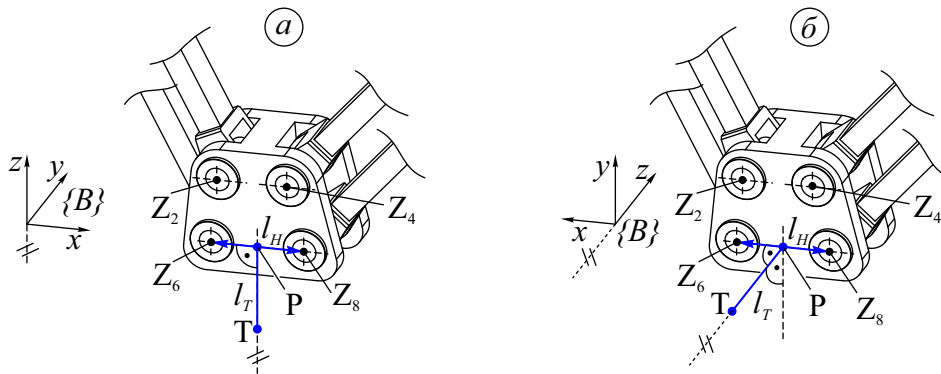
- Дужине спојки l_1 и l_3 морају бити једнаке ($l_1 = l_3$);
- Дужине спојки l_2 и l_4 морају бити једнаке ($l_2 = l_4$);
- Растојања $\overline{Z_1 Z_5}$ и $\overline{Z_2 Z_6}$ морају бити једнака, а правци $\overline{Z_1 Z_5}$ и $\overline{Z_2 Z_6}$ паралелни ($\overline{Z_1 Z_5} = \overline{Z_2 Z_6}$ и $\overline{Z_1 Z_5} \parallel \overline{Z_2 Z_6}$);
- Растојања $\overline{Z_3 Z_7}$ и $\overline{Z_4 Z_8}$ морају бити једнака, а правци $\overline{Z_3 Z_7}$ и $\overline{Z_4 Z_8}$ паралелни ($\overline{Z_3 Z_7} = \overline{Z_4 Z_8}$ и $\overline{Z_3 Z_7} \parallel \overline{Z_4 Z_8}$).

Поштовањем претходно наведених захтева, осим што се поједностављује решавање кинематичких проблема, обезбеђује се исправан рад механизма који се огледа у константној оријентацији платформе као и у непостојању могућности блокирања механизма (одузимање степена слободe) ако је механизам није у сингуларним конфигурацијама. Према слици 5.2, тачка P представља такозвану *Pivot* тачку кроз коју пролази и око које може да се ротира оса главног вретена. У наставку ће се разматрати само могућност ротације осе главног вретена око хоризонталне осе Ox . Тачка T је тачка која се налази у пресеку осе главног вретена и равни

на којој лежи чело главног вретена. За сада се разматрају два могућа случаја, тј. случај када је правац \overline{PT} вертикалан и лежи у равни у којој лежи платформа механизма (слика 5.3.а) и случај када је правац \overline{PT} хоризонталан и управан на раван у којој лежи платформа механизма (слика 5.3.б). У зависности од правца \overline{PT} , према стандарду ISO 6983-1:2009 [77] одређени су и правци оса непокретног координатног система $\{B\}$ како је и приказано на слици 5.3.



Слика 5.2 Новоуведене геометријске величине проширене конфигурације РПКМ-МОМА

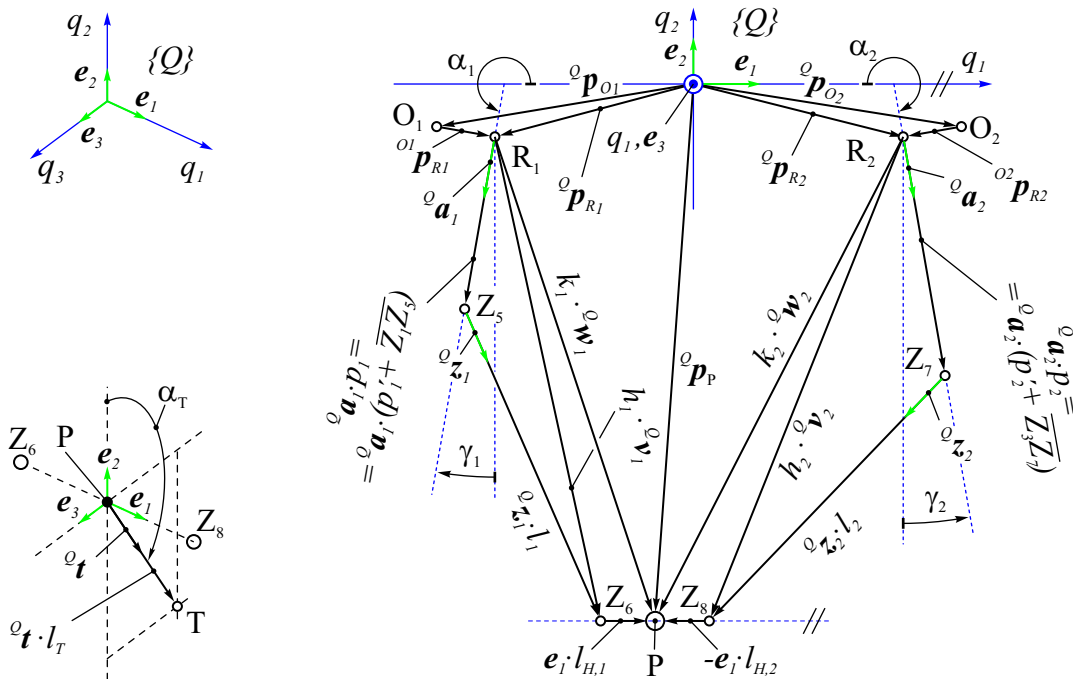


Слика 5.3 Оријентација главног вретена проширене конфигурације РПКМ-МОМА: а) Вертикалан правац; б) Хоризонталан правац

5.1 Кинематички модел проширене конфигурације РПКМ-МОМА

Према претходним описима проширене конфигурације РПКМ-МОМА и на основу слика 5.1 до 5.3 може се формирати кинематички модел проширене конфигурације РПКМ-МОМА тако да у великој мери подсећа на основни модел РПКМ-МОМА. Кинематички модел проширене конфигурације РПКМ-МОМА је приказан на слици 5.4. На кинематичком моделу проширене

конфигурације РПКМ-МОМА се може приметити да се одређене ознаке не поклапају са ознакама на слици 5.2. На пример, према слици 5.2, између зглобних веза Z_5 и Z_6 се налази Спојка-3 дужине l_3 док је на слици 5.4 приказано да се између зглобних веза Z_5 и Z_6 налази Спојка-1 дужине l_1 . Исто важи и за зглобне везе Z_7 , Z_8 , односно за Спојку-4 и Спојку-2. С обзиром да је већ речено да дужине спојки l_1 и l_3 , а затим l_2 и l_4 морају бити међусобно једнаке као и да правци $\overline{Z_1Z_5}$ и $\overline{Z_2Z_6}$, а затим $\overline{Z_3Z_7}$ и $\overline{Z_4Z_8}$ морају бити паралелни, делимично измењене ознаке на кинематичком моделу са слике 5.4 не ремете даља разматрања механизма али знатно доприносе сличности основне и проширене конфигурације РПКМ-МОМА, што је од изузетног значаја. Из истих разлога су унутрашње координате механизма p_1 и p_2 изражене преко унутрашњих координата p'_1 и p'_2 као и дужине $\overline{Z_1Z_5}$ и $\overline{Z_3Z_7}$.



Слика 5.4 Кинематички модел проширене конфигурације РПКМ-МОМА

Основна разлика кинематичког модела проширене конфигурације РПКМ-МОМА (слика 5.4) у односу на кинематички модел основне конфигурације РПКМ-МОМА (слика 3.5) је постојање дужина l_V и l_H и угла α_V , помоћу којих је могуће дефинисати оријентацију главног вретена РПКМ-МОМА као и позицију чела главног вретена у координатном систему $\{Q\}$ у складу са сликом 5.3. Такође, уведени су вектори ${}^B p_{O_i}$ који представљају позиције тачака O_i у координатном систему $\{Q\}$ као и вектори ${}^{O_i} p_{R_i}$ који представљају позицију референтних тачака R_i у односу на тачке O_i . Тачке O_i су од значаја за касније градње различитих конфигурација РПКМ-МОМА базираних на проширеној конфигурацији механизма о којима ће бити више речи у наредним поглављима. Како би се кинематичким моделом механизма са слике 5.4 обухватиле све будуће конфигурације РПКМ-МОМА, сви приказани вектори су дефинисани у координатном систему $\{Q\}$ који за сада нема строго дефинисане осе Декартовог координатног система $Oxyz$ већ осе носе ознаке q_1 , q_2 и q_3 са својим јединичним векторима e_1 , e_2 и e_3 , респективно.

5.2 Кинематички проблеми проширене конфигурације РПКМ-МОМА

По аналогји са поглављем ПЗ.3, за решавање кинематичких проблема је неопходно поставити полазне једначине које повезују физичке величине приказане на кинематичком моделу проширене конфигурације РПКМ-МОМА. За почетак, посматра се тачка P и њен вектор положаја у непокретном координатном систему $\{Q\}$ који је дефинисан следећим координатама ${}^B\mathbf{p}_P = [q_{1P} \ q_{2P} \ q_{3P}]^T$. За вектор ${}^Q\mathbf{p}_P$ се могу написати следеће векторске једначине:

$$\begin{aligned} p_1 \cdot {}^Q\mathbf{a}_1 + l_1 \cdot {}^Q\mathbf{z}_1 + l_{H,1} \cdot {}^Q\mathbf{e}_1 - k_1 \cdot {}^Q\mathbf{w}_1 &= 0 \\ p_2 \cdot {}^Q\mathbf{a}_2 + l_2 \cdot {}^Q\mathbf{z}_2 - l_{H,2} \cdot {}^Q\mathbf{e}_2 - k_2 \cdot {}^Q\mathbf{w}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

при чему је:

$$\begin{aligned} {}^Q\mathbf{p}_{R_i} &= {}^Q\mathbf{p}_{O_i} + {}^{O_i}\mathbf{p}_{R_i} \\ k_i \cdot {}^Q\mathbf{w}_i &= {}^Q\mathbf{p}_P - {}^Q\mathbf{p}_{R_i} \quad i = (1, 2) \end{aligned} \quad (5.2)$$

као и:

$$\begin{aligned} p_1 \cdot {}^Q\mathbf{a}_1 &= (p'_1 + \overline{Z_1 Z_5}) \cdot {}^Q\mathbf{a}_1 \\ p_2 \cdot {}^Q\mathbf{a}_2 &= (p'_2 + \overline{Z_3 Z_7}) \cdot {}^Q\mathbf{a}_2 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Из једначина (5.1) се изводе следеће векторске једначине:

$$p_i \cdot {}^Q\mathbf{a}_i + l_1 \cdot {}^Q\mathbf{z}_1 - h_i \cdot {}^Q\mathbf{v}_i = 0 \quad i = (1, 2) \quad (5.4)$$

у којима су уведене смене:

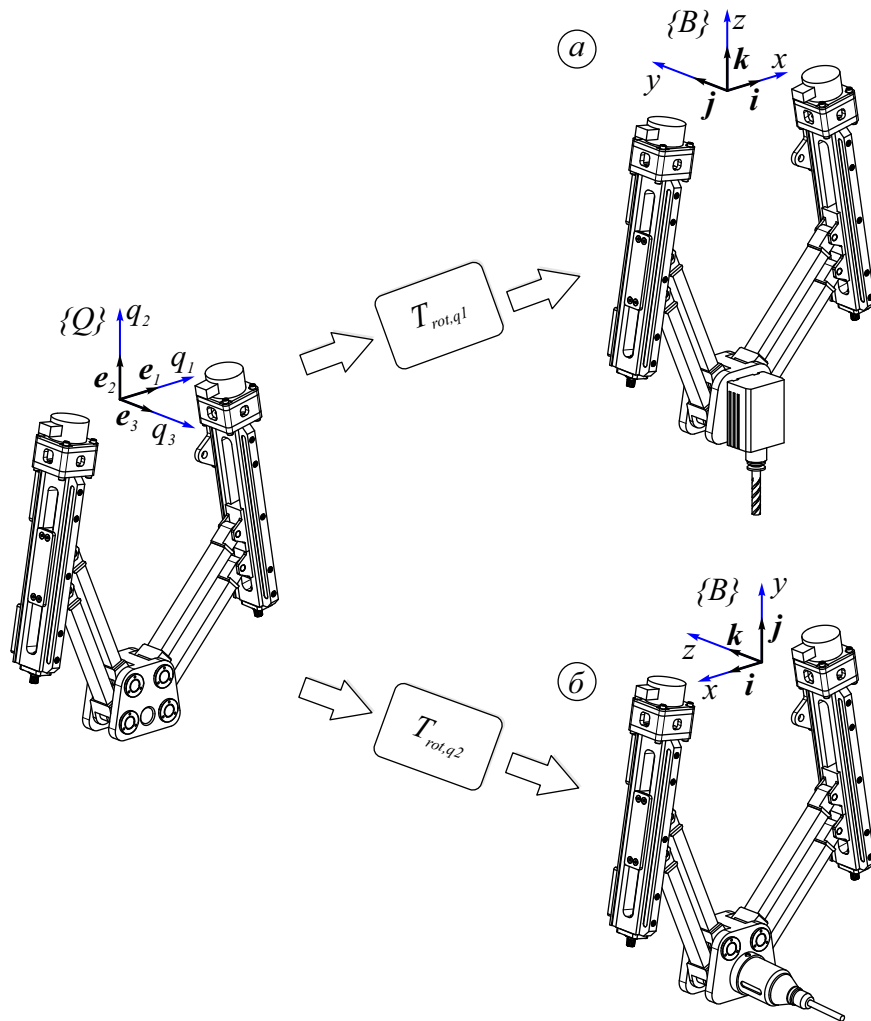
$$\begin{aligned} h_1 \cdot {}^Q\mathbf{v}_1 &= k_1 \cdot {}^Q\mathbf{w}_1 - l_{H,1} \cdot {}^Q\mathbf{e}_1 \\ h_2 \cdot {}^Q\mathbf{v}_2 &= k_2 \cdot {}^Q\mathbf{w}_2 + l_{H,2} \cdot {}^Q\mathbf{e}_1 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Сређивањем векторских једначина (5.4) и узимајући у обзир смене дате једначинама (5.5), добија се једначина (5.6) која је уједно и полазна једначина за решавање кинематичких проблема проширене конфигурације РПКМ-МОМА.

$$p_i^2 - 2p_i ({}^Q\mathbf{a}_i \cdot h_i {}^Q\mathbf{v}_i) + (h_i {}^Q\mathbf{v}_i)^2 - l_i^2 = 0 \quad i = (1, 2) \quad (5.6)$$

Претходна једначина је општа једначина из које се изводе једначине које представљају решења кинематичких проблема проширених конфигурација РПКМ-МОМА. Међутим, како се до претходне једначине дошло посматрањем свих вектора са слике 5.4 у координатном систему $\{Q\}$ у коме нису јасно дефинисани правци и смерови оса x , y и z тако једначина (5.6) није погодна за било какве даље анализе те је према теорији линеарне алгебре потребно извршити

одређене линеарне трансформације [92,93], којима се осе q_1 , q_2 и q_3 полазног координатног система $\{Q\}$ трансформишу у осе x , y и z координатног система $\{B\}$. Тако, према [94] и [95], координатни системи $\{B\}$ са слика 5.3.а и 5.3.б, се добијају ротацијом координатног система $\{Q\}$ око оса q_1 и q_2 респективно, како је и приказано на слици 5.5. Правци и смерови јединичних вектора i , j и k оса x , y и z новодобијених координатних система $\{B\}$ се одређују помоћу матрица трансформације које описују поступак ротације координатног система $\{Q\}$ приказан једначинама (5.7) и (5.8).



Слика 5.5 Трансформација координатног система $\{Q\}$: а) У координатни систем $\{B\}$ са вертикалном осом z ; б) У координатни систем $\{B\}$ са хоризонталном осом z

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = T_{rot,q1} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ -e_3 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = T_{rot,q2} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e_1 \\ e_2 \\ -e_3 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Исто тако коришћењем матрица трансформације $T_{rot,q1}$ или $T_{rot,q2}$ и трансформацијом свих вектора у једначинама (5.1) до (5.5), једначине (5.6) добија облик (5.9) који је погодан за конфигуравање и анализу проширених конфигурација РПКМ-МОМА.

$$p_i^2 - 2p_i ({}^B \mathbf{a}_i \cdot h_i {}^B \mathbf{v}_i) + (h_i {}^B \mathbf{v}_i)^2 - l_i^2 = 0 \quad (5.9)$$

Вектори ${}^B \mathbf{a}_i$ добијени трансформацијом вектора ${}^Q \mathbf{a}_i$ и вектори $h_i {}^B \mathbf{v}_i$ добијени трансформацијом вектора $h_i {}^Q \mathbf{v}_i$, имају облик дат једначинама (5.10) и (5.11) респективно. У наведеним једначинама величине $a_{qj,i}$, $q_{j,P}$ и $q_{j,Ri}$ ($i=(1,2)$; $j=(1,2,3)$) представљају пројекције вектора оријентације погонских оса ${}^Q \mathbf{a}_i$, вектора положаја платформе механизма ${}^Q \mathbf{p}_P$ и вектора положаја референтних тачака ${}^Q \mathbf{p}_{Ri}$ на осе координатног система $\{Q\}$ док величине $a_{x,i}$, $a_{y,i}$, $a_{z,i}$, x_P , y_P , z_P и x_{Ri} , y_{Ri} , z_{Ri} представљају пројекције вектора оријентације погонских оса ${}^B \mathbf{a}_i$, вектора положаја платформе механизма ${}^B \mathbf{p}_P$ и вектора положаја референтних тачака ${}^B \mathbf{p}_{Ri}$ на осе координатног система $\{B\}$.

$${}^B \mathbf{a}_i = T_{rot} \cdot {}^Q \mathbf{a}_i = T_{rot} \cdot \begin{bmatrix} a_{q1,i} \\ a_{q2,i} \\ a_{q3,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x,i} \\ a_{y,i} \\ a_{z,i} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} h_1 {}^B \mathbf{v}_1 &= T_{rot} \cdot h_1 {}^Q \mathbf{v}_1 = T_{rot} \cdot ({}^Q \mathbf{p}_P - {}^Q \mathbf{p}_{R1} - l_{H,1} \cdot {}^Q \mathbf{e}_1) = \\ &= T_{rot} \cdot \left(\begin{bmatrix} q_{1,P} \\ q_{2,P} \\ q_{3,P} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_{1,R1} \\ q_{2,R1} \\ q_{3,R1} \end{bmatrix} - l_{H,1} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \\ &= \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{R1} \\ y_{R1} \\ z_{R1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_{H1,x} \\ l_{H1,y} \\ l_{H1,z} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} h_2 {}^B \mathbf{v}_2 &= T_{rot} \cdot h_2 {}^Q \mathbf{v}_2 = T_{rot} \cdot ({}^Q \mathbf{p}_P - {}^Q \mathbf{p}_{R2} + l_{H,2} \cdot {}^Q \mathbf{e}_1) = \\ &= T_{rot} \cdot \left(\begin{bmatrix} q_{1,P} \\ q_{2,P} \\ q_{3,P} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_{1,R2} \\ q_{2,R2} \\ q_{3,R2} \end{bmatrix} + l_{H,2} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \\ &= \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{R2} \\ y_{R2} \\ z_{R2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{H2,x} \\ l_{H2,y} \\ l_{H2,z} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Може се приметити да су једначине (5.9) и (3.1) сличне. Наиме, због постојања физичке платформе код проширене конфигурације РПКМ-МОМА јавља се растојање између две зглобне везе $\overline{Z_6 Z_8}$ означено са l_H које је подељено на две дужине $l_{H,1}$ и $l_{H,2}$ што се може видети у једначинама (5.11) и на слици 5.4. Управо, по уведеном растојању l_H подељеном на растојања

$l_{H,1}$ и $l_{H,2}$ једначина (5.9) се разликује од једначине (3.1). У случају да се из једначина (5.9) елиминише параметар l_H , односно ако се у једначине уврсте вредност $l_{H,1}=l_{H,2}=0$, зглобне везе механизма Z_6 и Z_8 постају коинцидентне, а самим тиме једначине (5.9) и (3.1) постају идентичне. Решавањем кинематичких проблема, односно решавањем једначине (5.9) по унутрашњим координатама p_i односно по спољашњим координатама x_P и y_P , добијају се решења ИКП-а односно ДКП-а проширене конфигурације РПКМ-МОМА у којима фигуришу координате тачке P , која се налази на платформи механизма (слика 5.4). Међутим, због постојања вектора ${}^Q\mathbf{t} \cdot l_T$ који дефинише оријентацију главног вретена као и позицију чела главног вретена у односу на тачку P , добијена решења нису потпуна. Да би се решења кинематичких проблема употпунила, неопходно је да вектор ${}^P\mathbf{p}_T$, који представља позицију тачке T у односу на тачку P , фигурише у једначинама које представљају решења кинематичких проблема. Тако, према слици 5.4 координате тачке T у координатном систему $\{Q\}$ су:

$$\begin{aligned}
 {}^Q\mathbf{p}_T &= \begin{bmatrix} q_{1,T} \\ q_{2,T} \\ q_{3,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{1,P} \\ q_{2,P} \\ q_{3,P} \end{bmatrix} + {}^Q\mathbf{t} \cdot l_T = \\
 &= \begin{bmatrix} q_{1,P} \\ q_{2,P} \\ q_{3,P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ l_T \cdot \cos(\alpha_T) \\ l_T \cdot \sin(\alpha_T) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Трансформацијом координата неком од матрица трансформације се добијају координате тачке T у координатном систему $\{B\}$:

$$\begin{aligned}
 {}^B\mathbf{p}_T &= T_{rot,q} \cdot {}^Q\mathbf{p}_T = T_{rot,q} \left(\begin{bmatrix} q_{1,P} \\ q_{2,P} \\ q_{3,P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ l_T \cdot \cos(\alpha_T) \\ l_T \cdot \sin(\alpha_T) \end{bmatrix} \right) = \\
 &= \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + T_{rot,q} \begin{bmatrix} 0 \\ l_T \cdot \cos(\alpha_T) \\ l_T \cdot \sin(\alpha_T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Према претходној једначини и слици 5.4, угао α_T одређује оријентацију главног вретена проширене конфигурације РПКМ-МОМА и за вредност $\alpha_T=\pi$ правац главног вретена је вертикалан, док је за вредност $\alpha_T=\pi/2$ правац главног вретена хоризонталан. Коначно, уз одговарајуће трансформације $T_{rot,q1}$ и $T_{rot,q2}$, а на основу једначине (5.13), координате тачке T у координатном систему $\{B\}$ су дате једначинама (5.14) и (5.15) које одговарају оријентацијама главног вретена проширених конфигурација РПКМ-МОМА приказаних на сликама 5.5.a и 5.5.b, респективно.

$${}^B\mathbf{p}_T = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -l_T \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P - l_T \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

$${}^B \mathbf{p}_T = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P - l_T \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Према претходно датим објашњењима, може се извршити општа класификација проширене конфигурације РПКМ-МОМА према којој се конфигурације механизма могу окарактерисати као вертикалне конфигурације МОМА-*V* и хоризонталне конфигурације МОМА-*H*, а у зависности од оријентације осе z координатног система $\{B\}$. Према претходно датим тумачењима, могу се увести нови геометријски параметри приказани у табели 5.1 којима се уз геометријске параметре дате из табе 3.1 у потпуности дефинишу све проширене конфигурације *M1-M5*, биле оне хоризонталног или вертикалног типа. У табели 5.1, углови $\alpha_{q,1}$, $\beta_{q,2}$ и $\gamma_{q,3}$ представљају Ојлерове углове ротације којима се координатни систем $\{Q\}$ трансформише у координатни систем $\{B\}$. Величине $l_{H,1}$ и $l_{H,2}$ су приказане на слици 5.4 и представљају хоризонтална растојања тачке P од зглобних веза Z_6 и Z_8 . За величине l_T и α_T су у претходном тексту већ дата објашњења, а у табели 5.1 су дате вредности угла α_T за механизме хоризонталног и вертикалног типа. Вредности геометријских параметара $l_{H,1}$, $l_{H,2}$ и l_T , као и вредности параметара $\overline{Z_1 Z_5}$ и $\overline{Z_3 Z_7}$, нису дати јер су у питању општи параметри и могу имати било коју позитивну вредност у зависности од саме конструкције будуће машине базиране на проширеној конфигурацији РПКМ-МОМА.

Табела 5.1 Новоуведени геометријски параметри проширене конфигурације РПКМ-МОМА

	α_{q1}	β_{q2}	γ_{q3}	l_{H1}	l_{H2}	l_T	$\overline{Z_1 Z_5}$	$\overline{Z_3 Z_7}$	α_T
МОМА - V	$\pi/2$	0	0						π
МОМА - H	0	π	0						$\pi/2$

Упоредивањем једначина (5.14) и (5.15), закључује се да без обзира да ли се ради о проширеној конфигурацији РПКМ-МОМА хоризонталног или вертикалног типа, тачка T је измештена у правцу z осе за вредност l_T у односу на тачку P док су координате x и y тачке T и тачке P једнаке. Исти закључак се могао донети и посматрањем кинематичког модела проширене конфигурације РПКМ-МОМА приказаног на слици 5.4. Међутим, због предстојећих анализа комплексних машина алатки неопходно је било извести приказане прорачуне који обухватају параметре l_T и α_T . Узимајући у обзир једначину (5.12) и сређивањем једначине (5.6), добијају се једначине (5.16) које повезују унутрашње координате механизма p_1 и p_2 , координате тачке T у полазном координатном систему $\{Q\}$ тј. $q_{1,T}$ и $q_{2,T}$ са геометријом проширене конфигурације РПКМ-МОМА. Поступак решавања претходних једначина било по унутрашњим координатама p_1 и p_2 или по спољашњим координатама $q_{1,T}$ и $q_{2,T}$ је исти као и код основне конфигурације РПКМ-МОМА те се неће детаљно описивати. Решавањем једначина (5.16) по унутрашњим координатама p_1 и p_2 , добијају се решења ИКП-а, а решавањем једначина (5.16)

по спољашњим координатама $q_{1,T}$ и $q_{2,T}$, добијају се решења ИКП-а проширене конфигурације механизма.

$$\begin{aligned}
 p_1^2 + 2p_1 \cdot (a_{q1,1}(q_{1,R1} - q_{1,T} + l_{1,H}) + a_{q2,1}(q_{2,R1} - q_{2,T} - l_{T,q2})) + \\
 + (q_{1,R1} - q_{1,T} + l_{1,H})^2 + (q_{2,R1} - q_{2,T} - l_{T,q2})^2 - l_1^2 = 0 \\
 p_2^2 + 2p_2 \cdot (a_{q1,2}(q_{1,R2} - q_{1,T} - l_{2,H}) + a_{q2,2}(q_{2,R2} - q_{2,T} - l_{T,q2})) + \\
 + (q_{1,R2} - q_{1,T} - l_{2,H})^2 + (q_{2,R2} - q_{2,T} - l_{T,q2})^2 - l_2^2 = 0
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Због сличности основне и проширене конфигурације РПКМ-МОМА и истог начина решавања кинематичких проблема, у наставку се без детаљних објашњења дају коначна решења кинематичких проблема (једначине 5.18 и 5.20) проширене конфигурације РПКМ-МОМА.

Решења инверзног кинематичког проблема проширене конфигурације РПКМ-МОМА

Уведене смене:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= 2 \cdot (a_{q1,1}(q_{1,R1} - q_{1,T} + l_{1,H}) + a_{q2,1}(q_{2,R1} - q_{2,T} - l_{T,q2})) \\
 c_1 &= (q_{1,R1} - q_{1,T} + l_{1,H})^2 + (q_{2,R1} - q_{2,T} - l_{T,q2})^2 - l_1^2 \\
 b_2 &= 2 \cdot (a_{q1,2}(q_{1,R2} - q_{1,T} - l_{2,H}) + a_{q2,2}(q_{2,R2} - q_{2,T} - l_{T,q2})) \\
 c_2 &= (q_{1,R2} - q_{1,T} - l_{2,H})^2 + (q_{2,R2} - q_{2,T} - l_{T,q2})^2 - l_2^2
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Решење ИКП-а:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= -b_1 + K_{IKP} \sqrt{b_1^2 - c_1} \\
 p_2 &= -b_2 + K_{IKP} \sqrt{b_2^2 - c_2}
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

Решења директног кинематичког проблема проширене конфигурације РПКМ-МОМА

Уведене смене:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= q_{1,R1} + l_{1,H} & t_2 &= q_{2,R1} - l_{T,q2} \\
 t_3 &= 2(p_1 \cdot a_{q1,1} + t_1) & t_4 &= 2(p_1 \cdot a_{q2,1} + t_2) \\
 t_5 &= 2p_1(a_{q1,1} \cdot t_1 + a_{q2,1} \cdot t_2) + p_1^2 + t_1^2 + t_2^2 - l_1^2 \\
 t_6 &= q_{1,R2} - l_{2,H} & t_7 &= q_{2,R2} - l_{T,q2} \\
 t_8 &= 2(p_2 \cdot a_{q1,2} + t_6) & t_9 &= 2(p_2 \cdot a_{q2,2} + t_7) \\
 t_{10} &= 2p_2(a_{q1,2} \cdot t_6 + a_{q2,2} \cdot t_7) + p_2^2 + t_6^2 + t_7^2 - l_2^2 \\
 t_{11} &= \frac{(t_{10} - t_5)}{t_8 - t_3} & t_{12} &= \frac{(t_9 - t_4)}{t_8 - t_3} & t_{13} &= 1 + t_{12}^2 \\
 t_{14} &= t_3 t_{12} - 2t_{11} t_{12} - t_4 & t_{15} &= t_{11}^2 - t_3 t_{11} + t_5
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

Решење ДКП-а:

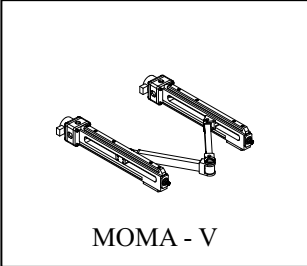
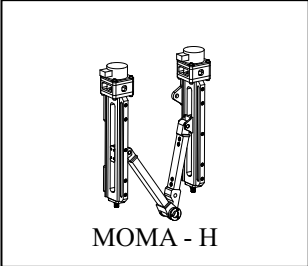
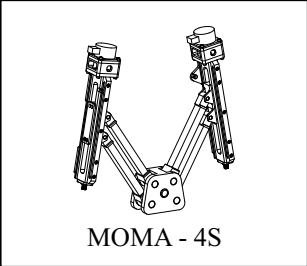
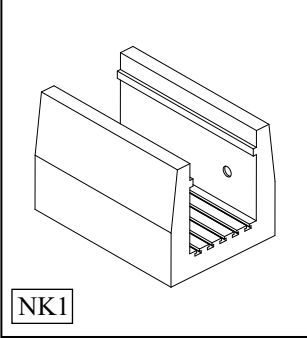
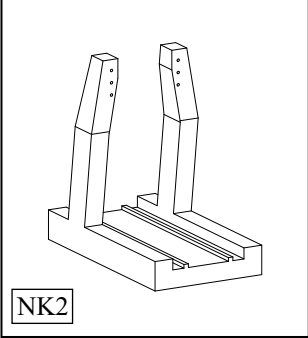
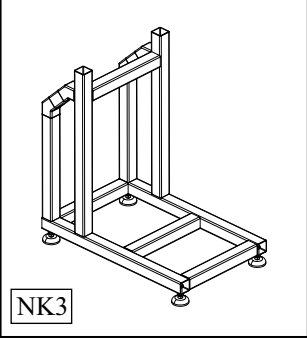
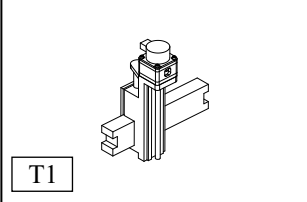
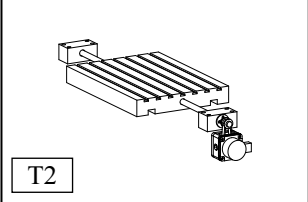
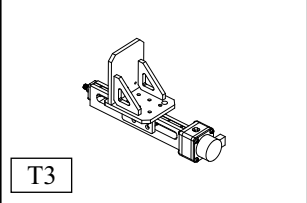
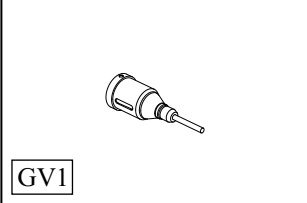
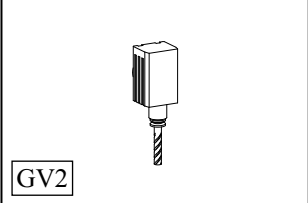
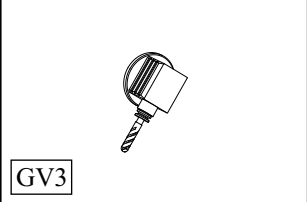
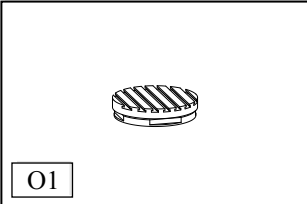
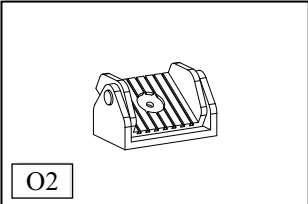
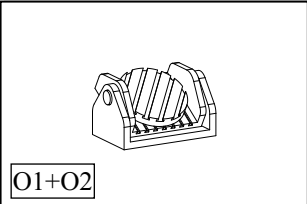
$$q_{2,T} = \frac{-t_{14} + K_{DKP} \sqrt{t_{14}^2 - 4 \cdot t_{13} t_{15}}}{2 \cdot t_{13}} \quad (5.20)$$
$$q_{1,T} = t_{11} - q_{2,T} \cdot t_{12}$$

У једначинама које представљају решења инверзног кинематичког проблема (5.18) као и у једначинама које представљају решења директног кинематичког проблема (5.20) и у уведеним сменама (5.17) и (5.19), фигуришу координате тачака у полазном координатном систему $\{Q\}$. Даљом трансформацијом координата q_i неком од матрица трансформације $T_{rot,q1}$, $T_{rot,q2}$ или чак неком другом матрицом трансформације, добијају се координате тачке T (врх алата) у координатном систему $\{B\}$ чији правци и смерови оса према стандарду *ISO-6983* [77] одговарају датој конфигурацији механизма.

КЛАСА КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ ЗАСНОВАНИХ НА МЕХАНИЗМУ *РПКМ-МОМА*

Група машина алатки које су и предмет ове докторске дисертације, за основу имају равански паралелни механизам *МОМА*. С обзиром да је *РПКМ-МОМА* двоосни равански механизам, да би се испунили минимални услови за хардверско конфигурисање једне машине алатке засноване на *РПКМ-МОМА*, непоходно је извршити надоградњу раванског паралелног механизма *МОМА* како би конфигурисана машина била употребљива за неки од многих процеса обраде. То практично значи да, у зависности од намене будуће машине алатке, механизму *РПКМ-МОМА* је потребно додати нове саставне елементе како би се током процеса обраде могла вршити сва неопходна кретања која сам процес обраде захтева. У даљим разматрањима, саставни елементи ће бити посматрани као засебни модули који се користе за надоградњу *РПКМ-МОМА*. У суштини као и у случају самог механизма сваки модул у ствари представља један подсклоп којим се надограђује *РПКМ-МОМА*. Оваквим приступом, све будуће машине алатке добијене надоградњом раванског паралелног механизма *МОМА* су машине алатке модуларног типа чије се конфигурације у зависности од потреба могу лако променити заменом постојећих и/или додавањем нових модула чиме се добијају машине алатке са три, четири или пет степени слободе. Узимајући у обзир претходна разматрања, у оквиру овог поглавља се дефинише формализам по ком се конфигурише хардверски део било које будуће машине алатке која за основу има основну или проширену конфигурацију *РПКМ-МОМА*. Према дефинисаном формализму, формирана група сличних машина алатки која се може окарактерисати као засебна класа машина алатки. Посматрајући кинематику свих машина алатки из дефинисане класе машина алатки, може се рећи да за сваку машину алатку важе претходно изведене једначине које представљају решења кинематичких проблема те се све претходне приказане анализе могу применити на сваку конфигурисану машину алатку уз једноставне промене одређених параметара које дефинишу геометрију употребљеног паралелног механизма *МОМА*. За потребе

конфигурисања хардверског дела, дефинисани су модули чијом се употребом механизму РПКМ-МОМА додају нови степени слободе. Модули неопходни за конфигурисање машина алатки са три и више степени слободе су приказани на слици 6.1. Како се надградњом РПКМ-МОМА мења број степени слободе конфигурисане машине алатке, па самим тиме и кинематика, претходно изведене једначине које представљају решења кинематичких проблема је потребно проширити додатним једначинама. Додатним једначинама се у потпуности дефинише кинематика машине што је неопходно за конфигурисање управљачког дела о чему ће бити више речи у наредним поглављима. Надградњом РПКМ-МОМА на описан начин може се добити већи број различитих машина алатки па се због сложености проблема цела класа може окарактерисати као класа комплексних машина алатки.

РПКМ МОМА	 МОМА - V	 МОМА - H	 МОМА - 4S
НОСЕЋА КОНСТРУКЦИЈА	 NK1	 NK2	 NK3
ТРАНСЛАТ. ОСА	 T1	 T2	 T3
ГЛАВНО ВРЕТЕНО	 GV1	 GV2	 GV3
ОБРТНЕ ОСЕ	 O1	 O2	 O1+O2

Слика 6.1 Модули класе машина алатки заснованих на РПКМ-МОМА

6.1 Дефинисање класе комплексних машина алатки, конфигурисање хардверског дела машина алатки

Према слици 6.1, приликом конфигурисања хардвера било које машине алатке из дефинисане класе као основа се користи или основна или проширена конфигурација *РПКМ-МОМА* која се поставља на одговарајућу носећу конструкцију *НК1*, *НК2* или *НК3* што омогућава даље надградње механизма. Као што се види на слици 6.1, основна конфигурација *РПКМ-МОМА* се приликом конфигурисања може поставити у хоризонтални или вертикални положај чиме се оса која пролази кроз платформу механизма (оса управна је на раван механизма) поставља у вертикални или хоризонтални положај. Из тог разлога иста основна конфигурација механизма носи ознаке *МОМА-V* и *МОМА-H*, а према оријентацији осе која пролази кроз платформу механизма (*V*-вертикална и *H*хоризонтална). Како су и основна и проширена конфигурација *РПКМ-МОМА* двоосни механизми, минималну надградњу механизма представља увођење још једне транслаторне погонске осе чиме се добија троосна машина алатка која се у зависности од примене најпре може користити за обраду материјала глодањем. Трећа (транслаторна) погонска оса се може реализовати једним од три предложена модула *T1*, *T2* или *T3*. Модул *T1* је модул треће погонске осе кога покреће механизам *РПКМ-МОМА* дуж две хоризонталне осе. Увођењем пасивне (непогоњене осе) онемогућено нежељено и неконтролисано обртање самог модула. Конструкцијом модула је омогућено да се дуж вертикалне осе креће алат којим се врши обрада. Модули *T2* и *T3* су практично исти у погледу кинематике, а задатак им је да током обраде транслаторно померају обрадак у правцу једне осе, али се ради једноставнијег описа процедуре конфигурисања хардвера модули засебно представљају.

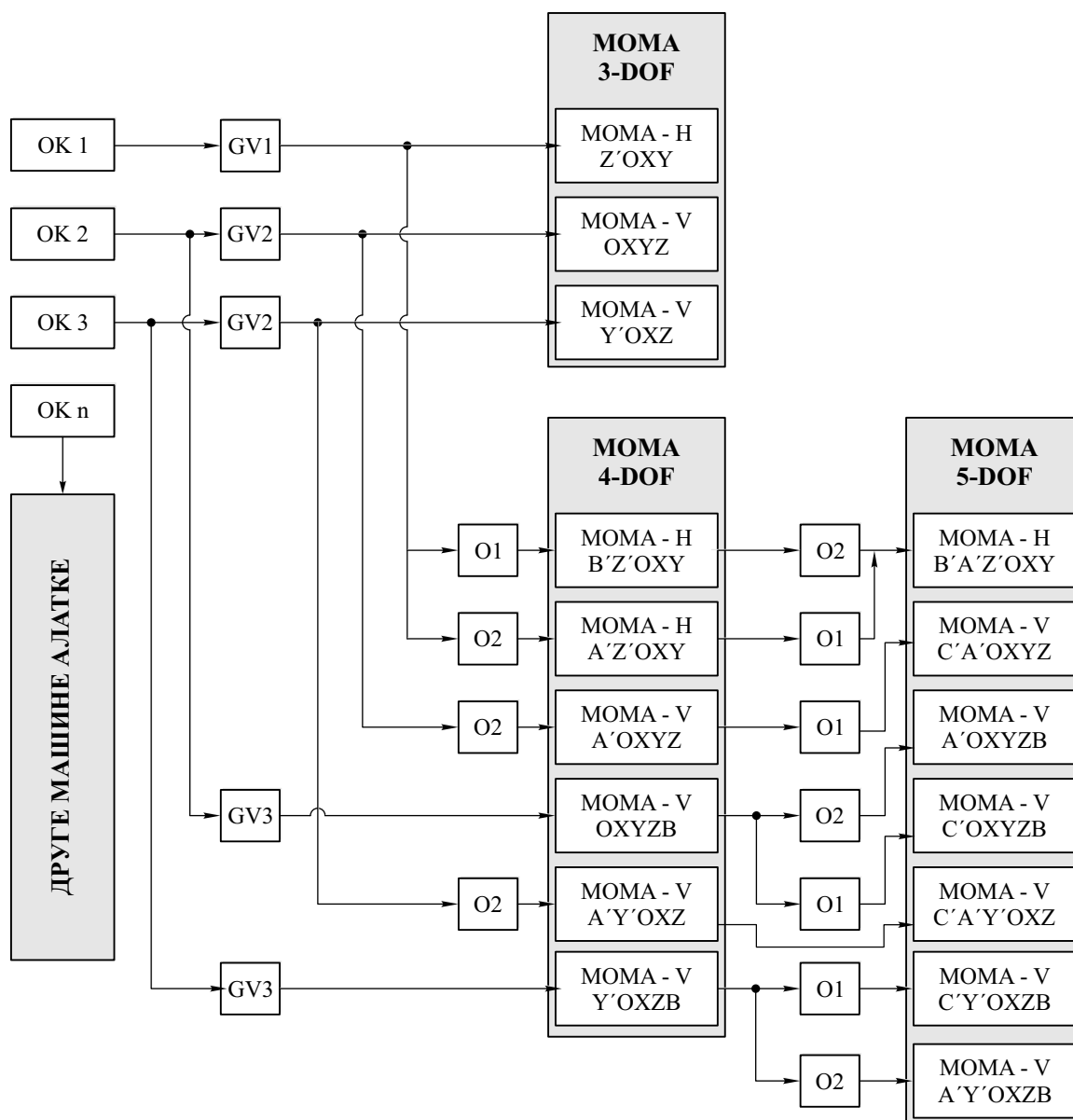
Табела 6.1 Матрица конфигурисања основних конфигурација машина алатки из класе комплексних машина алатки заснованих на *РПКМ-МОМА*

МОМА - V	МОМА - H	МОМА - 4S	НК 1	НК 2	НК 3	НК n	T1	T2	T3	T n
	◆		×	◇	◆	◇	×	◇	◆	
◆			◆	×	×	×	◆	×	×	
		◆	×	◆	◇	◆	×	◆	◇	
◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇

OK 1
 OK 2
 OK 3
 OK n

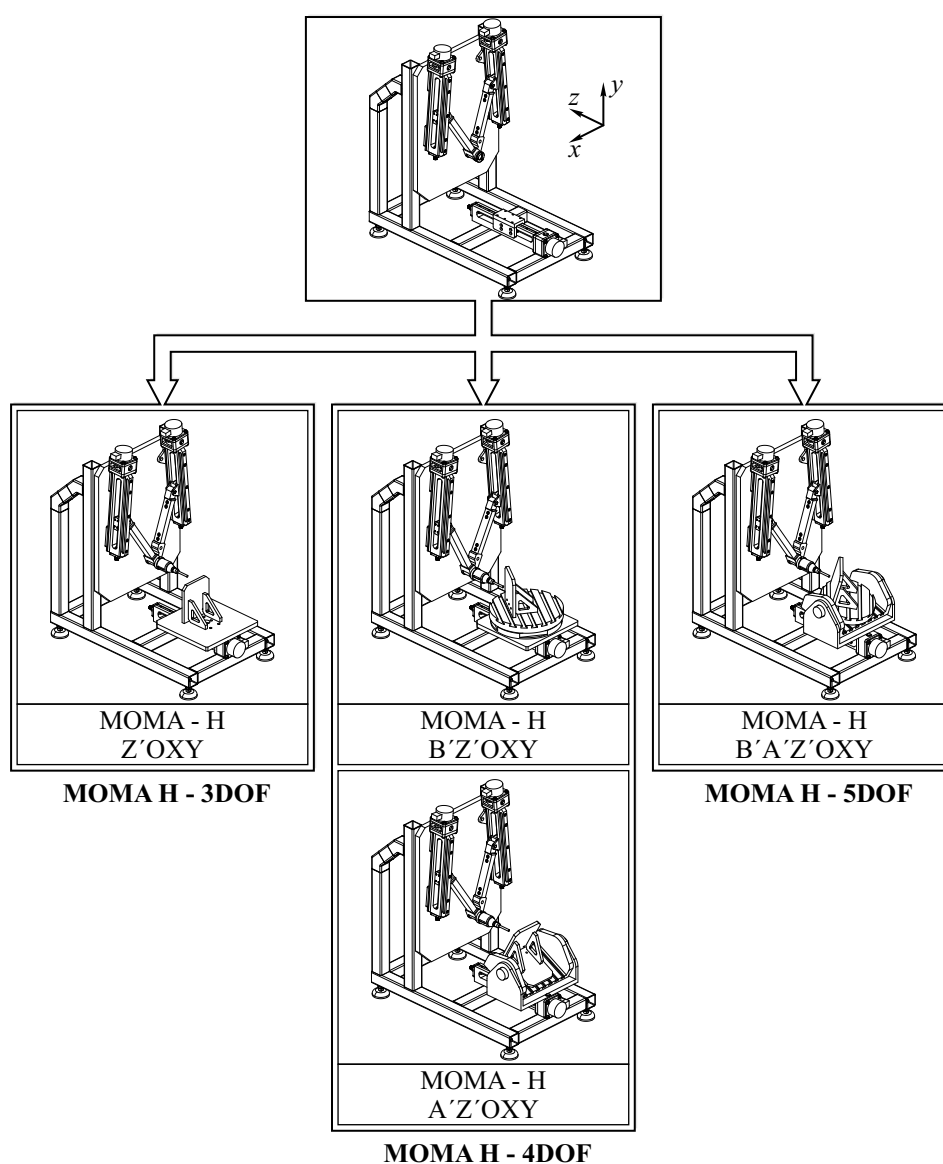
Наведени модули се користе за конфигурисање три основне конфигурације механизма *OK1*, *OK2* и *OK3* које испуњавају минималне услове за даље конфигурисање хардверског дела машина алатки, а припадају класи комплексних машина алатки заснованих на механизму *РПКМ-МОМА*. За основне (полазне) конфигурације формирана је матрица конфигурисања

(табела 6.1) у којој симбол "♦" представља модул који је предвиђен за конфигурисање одређене основне конфигурације, симбол "◇" представља могућу алтернативу за предвиђени модул и симбол "x" представља модул који се не може користити за конфигурисање дате основне конфигурације. Надградњом основних конфигурација *OK1*, *OK2* и *OK3* најпре одговарајућим главним вretenом *GV1*, *GV2* или *GV3*, а затим обртним и/или нагибним радним столом (*O1*, *O2* или *O1+O2*) добија се низ различитих конфигурација са три и више степени слободe које у основи имају РПКМ-МОМА. На слици 6.2 је приказана шема конфигурисања хардверског дела машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки заснованих на РПКМ-МОМА која показује да се употребом дефинисаних модула приказаних на слици 6.1 може конфигурирати 16 различитих конфигурација машина алатки.

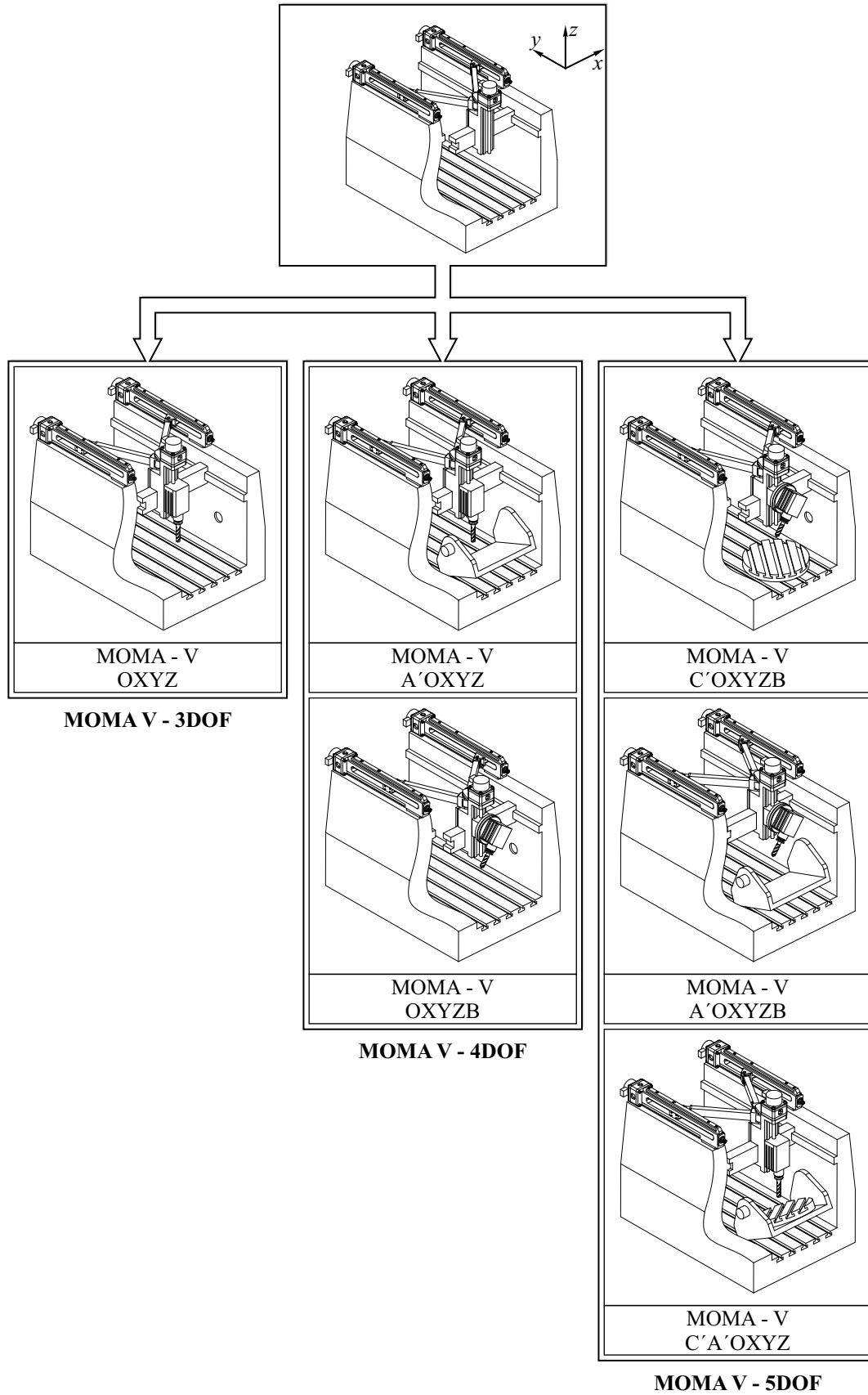


Слика 6.2 Шематски приказ конфигурисања машина алатки из класе комплексних машина алатки заснованих на РПКМ-МОМА

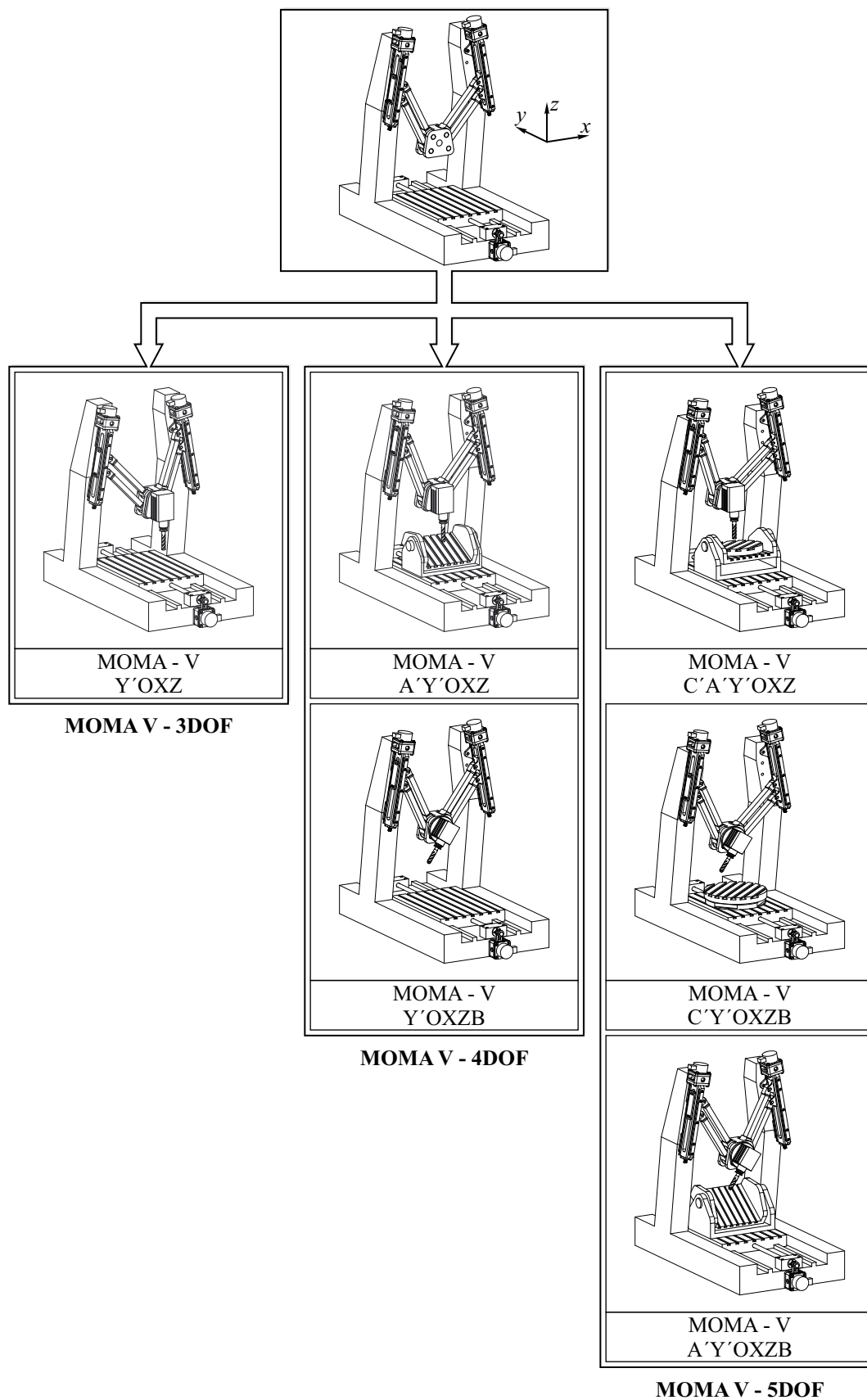
Узимајући у обзир и програм градње самог механизма *РПКМ-МОМА* [74,87,88], и др. по коме је дефинисано 33 различите конфигурације механизма подељених у 5 типова механизма, закључује се да се надградњом механизма *МОМА* добија 528 различитих конфигурација машина алатки намењених за процес обраде глодањем. Конфигурације машина алатки са хоризонталном оријентацијом главног вретена, са вертикалном оријентацијом главног вретена и пасивном осом су приказне на сликама 6.3 и 6.4 респективно, а конфигурације машина алатки са проширеном конфигурацијом механизма *РПКМ-МОМА* приказане су на слици 6.5. У оквиру класе комплексних машина алатки формирана је и група МА названа "Друге машине алатке" у коју спадају све остале машине алатке које такође у основи имају *РПКМ-МОМА*, али се по намени, конфигурацији или неком од својих подсистема разликују од већ дефинисаних *3-DOF*, *4-DOF* и *5-DOF* машина алатки.



Слика 6.3 Конфигурисање хардверског дела МА заснованих на *РПКМ-МОМА* са хоризонталном оријентацијом осе Oz



Слика 6.4 Конфигурисање хардверског дела МА заснованих на РПКМ-МОМА са вертикалном оријентацијом осе Oz



Слика 6.5 Конфигурисање хардверског дела МА заснованих на РПКМ-МОМА са вертикалном оријентацијом осе Oz

6.2 Кинематика троосних машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки

Како је приказано на сликама 6.3, 6.4 и 6.5, хардверски део сваке машине алатке из класе комплексних машина алатки је конфигуриран најпре серијским додавањем једне транслаторне осе раванском паралелном механизму. Даља надградња на четвороосну и петоосну машину алатку подразумева додавање једне или две обртне осе. За касније конфигурирање управљања неопходно је формирати једначине које представљају решења кинематичких проблема вишеосних машина при чему ће формиране једначине обухватати сва кретања која машина алатка обавља својим погонским осама током процеса обраде.

Серијски додата трећа погонска оса не утиче на кинематику употребљених раванских паралелних механизма па су решења кинематичких проблема треће осе тривијална. Код машина алатки заснованих на механизмима *МОМА-Н* и *МОМА-V* трећа погонска оса је z оса и управна је на раван механизма. Решења *ИКП-а* су облика $p_3=z$, а решења *ДКП-а* су облика $z=p_3$. Код машина алатки заснованих на конфигурацији механизма *МОМА-4S* трећа погонска оса је y оса и управна је на раван механизма па су решења *ИКП-а* облика $p_3=y$, а решења *ДКП-а* су облика $y=p_3$. У оба случаја важе једначине (5.17) до (5.20) уз одговарајуће трансформације дате једначинама (5.7) и (5.8).

6.3 Кинематика обртних оса машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки

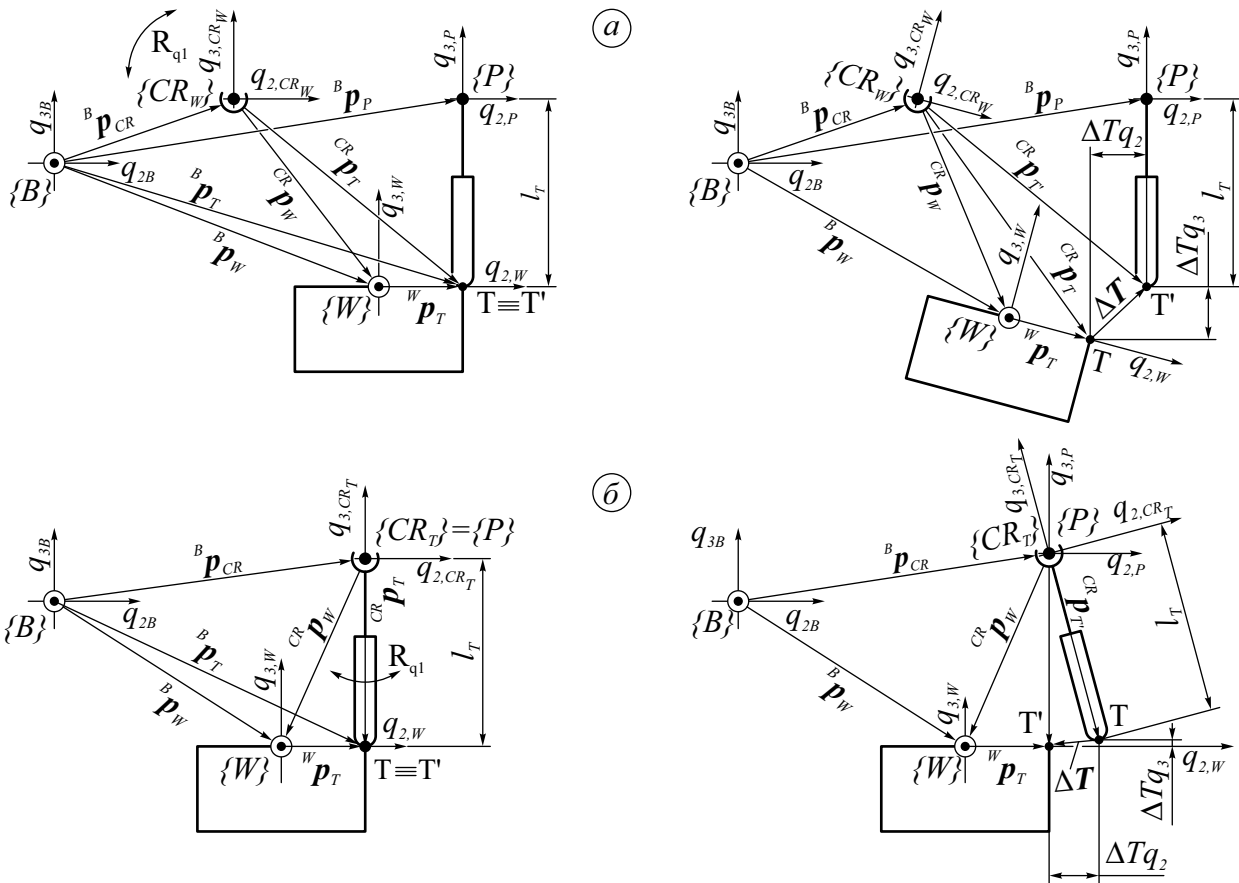
Вишеосна обрада подразумева промену оријентације алата у односу на обрадак што се остварује ротацијом обратка, ротацијом алата или ротацијом и алата и обратка. Како приликом промене оријентације алата у односу на обрадак алат не ротира око оса које пролазе кроз тачку контакта са обратком већ око тачке ротације алата која је одређена конструкцијом машине, нити обрадак ротира око оса сопственог координатног система $\{W\}$ у коме се креирају програми за обраду, сама промена оријентације алата у односу на обрадак захтева и додатне транслације како би врх алата задржао своју позицију у односу на обрадак и то у програмираној тачки. Опште прихваћени називи за тачке око којих се врше ротације су *RTCP*¹ [96] и *Pivot* тачка [97]. Кинематика вишеосних машина алатки различитих конфигурација код којих су транслаторна и обртна кретања алата и/или обратка синхронизована током процеса вишеосне обраде је разматрана у многим радовима попут [30,98,99] и др. За разлику од наведених радова, у наставку текста је приказан нешто другачији, погоднији приступ за извођење уопштених једначина које представљају решења кинематичких проблема вишеосних машина алатки заснованих на *РПКМ-МОМА*.

На самом почетку, издваја се једна обртна оса било које приказане конфигурације машине алатке са слика 6.3, 6.4 и 6.5. Као што је већ речено и према приказаним различитим конфигурацијама, издвојено обртно кретање може вршити или обрадак (слика 6.6.a) или алат

¹eng. *RTCP* (*Rotation Tool Center Point*) -Тачка око које се врши ротација алата

(слика 6.6.б). У случају троосне обраде када не постоји обртање обратка и алата, позиција врха алата T_T се поклапа са програмираном тачком T_P при чему се програмирање врши у координатном систему $\{W\}$. Позиција координатног система $\{W\}$ у односу на непокретни координатни систем $\{B\}$ за који су у поглављима 3.4 и 5.2 решени кинематички проблеми РПКМ-МОМА је одређена векторима ${}^B p_{CR}$ и ${}^{CR} p_W$ који представљају позицију центра ротације CR у односу на непокретни координатни систем $\{B\}$ и позицију координатног система обратка $\{W\}$ у односу на центар ротације. Вектор ${}^B p_{CR}$ је познат и одређен је геометријом саме машине док се вектор ${}^{CR} p_W$ дефинише приликом припремних радњи пре саме обраде па је самим тиме и он познат. На основу слике 6.6.а и слике 6.6.б се може написати следећа једначина:

$${}^B p_T = {}^B p_W + {}^W p_T = {}^B p_{CR} + {}^{CR} p_W + {}^W p_T = {}^B p_{CR} + {}^{CR} p_T \quad (6.1)$$



Слика 6.6 Кинематички модел обртног кретања: а) Обратка; б) Алата

Ако се на тренутак из анализе искључи координатни систем $\{B\}$ и посматрају се ротације око оса q_1 координатних система $\{CR_W\}$ и $\{CR_T\}$ који су смештени у центре ротације обратка и алата респективно, примећује се да услед ротације долази до раздвајања тачака T' и T . Узимајући у обзир приказане ротације као и једначину (6.1), координате тачке T' у координатном систему $\{CR_i\}$ су одређене следећим вектором:

$${}^{CR} p_{T'} = T_{rot,q1} \cdot ({}^{CR} p_W + {}^W p_T) \quad (6.2)$$

У једначини (6.2), T_{rot,q_1} је матрица трансформације којом се координате тачака пресликавају из једног у други координатни систем при чему је један од координатних система заротиран за познати угао око осе ротације. Ако се за случајеве приказане на слици 6.6 као угао ротације око осе q_1 узме угао α , онда је матрица трансформације облика:

$$T_{rot,q_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Јасно је да у случају када је угао $\alpha=0^\circ$, не постоји ротација и тада је матрица T_{rot,q_1} јединична матрица. Међутим, када се изврши само ротација или обратка или алата, долази до разилажења тачака T и T' чиме се формира вектор ΔT који има пројекције у правцу преостале две осе око којих се не врши ротација, односно $\Delta T = \begin{bmatrix} 0 & \Delta q_1 & \Delta q_2 \end{bmatrix}^T$. Компоненте вектора ΔT представљају помераје које обрадак и/или алат морају реализовати како би тачке T и T' поново биле коинцидентне и одређују се на основу слике једначином:

$$\Delta T = {}^{CR} p_{T'} - {}^{CR} p_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,T} \\ q_{2,T} \\ q_{3,T} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,T} \\ q_{2,T} \\ q_{3,T} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

односно

$$\Delta T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) - 1 & -\sin(\alpha) - 1 \\ 0 & \sin(\alpha) - 1 & \cos(\alpha) - 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,T} \\ q_{2,T} \\ q_{3,T} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

из чега произилази:

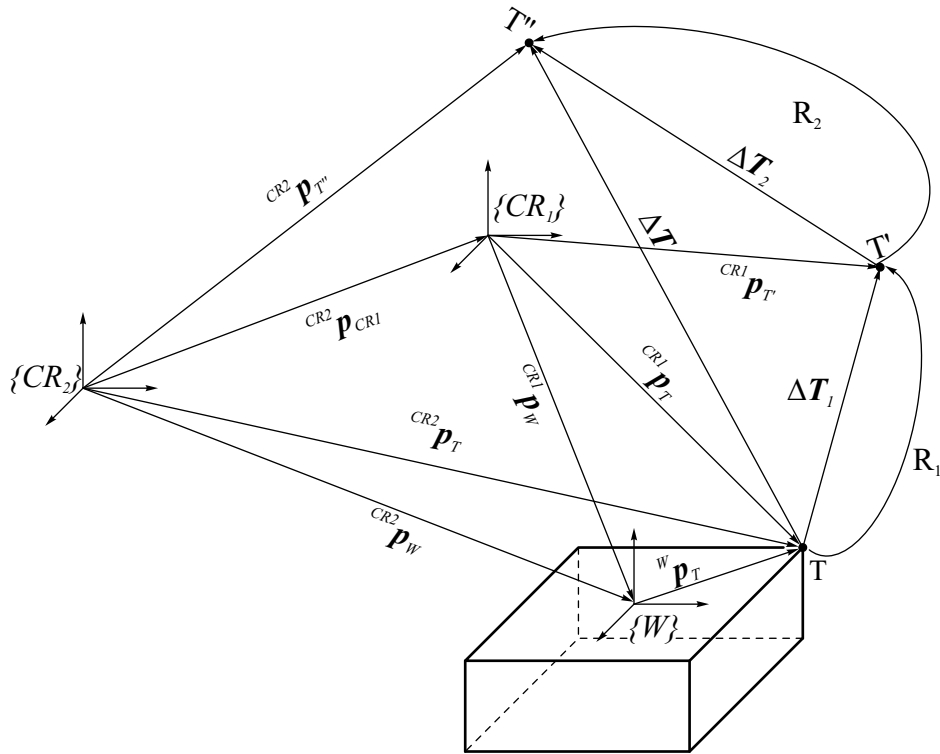
$$\begin{aligned} \Delta T_{q_1} &= 0 \\ \Delta T_{q_2} &= (\cos(\alpha) - 1) \cdot q_{2,T} - (\sin(\alpha) + 1) \cdot q_{3,T} \\ \Delta T_{q_3} &= (\sin(\alpha) - 1) \cdot q_{2,T} + (\cos(\alpha) - 1) \cdot q_{3,T} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Величине ΔT_{q_1} , ΔT_{q_2} и ΔT_{q_3} представљају вредности којима три транслаторне осе морају да надоместе раздвајање тачака T и T' услед релативне промене оријентација алата у односу на обрадак. Према слици 6.6 и претходно изведеним једначинама се закључује да у погледу кинематике целе машине није битно да ли обртно кретање врши алат или обрадак нити у правцу којих оса алат и обрадак врше транслаторна кретања. Релевантна чињеница за даље анализе је да свака од машина из класе машина алатки вредности ΔT_{q_1} , ΔT_{q_2} и ΔT_{q_3} остварује са две погонске осе употребљеног паралелног механизма за чију платформу је везан координатни систем $\{P\}$ и једном додатом транслаторном осом којом се реализује кретање алата (конфигурације слика 6.4) или обратка (слике 6.3 и 6.5).

По аналогији размотриће се и кинематика петоосних машина које у ствари поседују три транслаторне осе и две обртне осе. У овом случају постоје два центра ротације CR_1 и CR_2 , како је приказано на слици 6.7. Након прве ротације око неке од оса координатног система CR_1 , координате тачке T' у координатном систему у коме је вршена ротација су дефинисане једначином (6.7), док су након друге ротације координате тачке T'' у координатном систему у коме је вршена ротација дефинисане једначином (6.8).

$${}^{CR_1}\mathbf{p}_{T'} = T_{rot,1} \cdot \left({}^{CR_1}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_T \right) = T_{rot,1} \cdot {}^{CR_1}\mathbf{p}_T \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} {}^{CR_2}\mathbf{p}_{T''} &= T_{rot,2} \cdot \left({}^{CR_2}\mathbf{p}_{CR_1} + {}^{CR_1}\mathbf{p}_{T'} \right) = \\ &= T_{rot,2} \cdot \left(T_{rot,1} \cdot \left({}^{CR_1}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_T \right) + {}^{CR_2}\mathbf{p}_{CR_1} \right) \end{aligned} \quad (6.8)$$



Слика 6.7 Кинематички модел две обртне осе

Коначно, вектор ΔT који представља позицију тачке T након две ротације (тачка T'') у односу на позицију тачке T пре ротације је одређен позицијама тачке T пре и после ротације у координатном систему CR_2 и дефинисан је следећом векторском једначином:

$$\begin{aligned} \Delta T &= {}^{CR_2}\mathbf{p}_{T''} - {}^{CR_2}\mathbf{p}_T = \\ &= T_{rot,2} \cdot \left(T_{rot,1} \cdot \left({}^{CR_1}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_T \right) + {}^{CR_2}\mathbf{p}_{CR_1} \right) - \left({}^{CR_2}\mathbf{p}_{CR_1} + {}^{CR_1}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_T \right) \quad (6.9) \\ \Delta T &= \left(T_{rot,2} \cdot T_{rot,1} - I \right) \cdot \left({}^{CR_1}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_T \right) + \left(T_{rot,2} - I \right) \cdot {}^{CR_2}\mathbf{p}_{CR_1} \end{aligned}$$

У претходној једначини, I представља 3×3 јединичну матрицу, а $T_{rot,1}$ и $T_{rot,2}$ су матрице ротације којима се координате тачке T трансформишу приликом ротације координатних система око центара ротације. Облици матрица ротације су познати, одређени Ојлеровим угловима² и често се користе за опис кинематике нумерички управљаних машина [100], индустријских робота [26,101], и хибридних машина алатки [30,99]. У анализираном случају, угловима за које су извршене ротације су углови којима је и дефинисана оријентација алата у односу на обрадак [102]. Једначина (6.9) представља део решења инверзне кинематике било које машине алатке са слика 6.3, 6.4 и 6.5, при чему се потпуна решења инверзне кинематике добијају додавањем компонената вектора ΔT одговарајућим унутрашњим координатама којима се реализују транслаторна кретања алата и/или обратка, што се може и записати на следећи начин:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1,tr} \\ p_{2,tr} \\ p_{3,tr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta T_{q1} \\ \Delta T_{q2} \\ \Delta T_{q3} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

²eng. *Euler angles* - Углови којима се описује оријентација крутог тела

КОМПЛЕКСНЕ ВИШЕОСНЕ МАШИНЕ АЛАТКЕ СА ДВА МЕХАНИЗМА *РПКМ-МОМА*

Посебну групу машина алатки, у оквиру класе комплексних машина алатки, представљају машине алатке које поседују више од једног раванског рекофнигурабилног механизма са паралелном кинематиком *МОМА*. Приликом градње вишеосних машина алатки у оквиру ове групе машина алатки, могу се користити и основна и проширена конфигурација механизма *РПКМ-МОМА*. У зависности од употребљених механизма, сама машина алатка може бити кориштена за различите методе обраде, а анализе приказане у овом поглављу ће показати извесне предности у односу на постојеће машине алатке намењене за исте процесе обраде. Први резултати изучавања и анализе комплексних машина алатки сачињених од два раванска паралелна механизма су добијени анализом вишеосне машине алатке намењена за процес обраде сечења жицом. Анализирану машину алатку чине два механизма *РПКМ-МОМА* основне конфигурације. Машина алатки према процесу обраде за који је намењена додељен назив *МОМА-W*¹. Добијени резултати који су и представљени у овом поглављу показују да постоји оправданост за даљим изучавањем сложених механизма сачињених од два раванска паралелна механизма. Проширена конфигурација *РПКМ-МОМА* поседује извесне предности у односу на основну конфигурацију механизма, па су за градњу машине алатке намењене за процес обраде сечења жицом употребљена два механизма *РПКМ-МОМА* проширене конфигурације. Пошто проширена конфигурација механизма поседује четири спојке које су зглобно везане за платформу механизма, изграђена машина носи назив *МОМА-W 4S*.

Изграђена машина алатка *МОМА-W 4S* је конфигурисана тако да се намена машине алатке може променити брзом и лаким заменом појединих саставних делова што је карактеристика и реконфигурабилних и мултифункционалних машина алатки [2,3,34]. Постављањем главног

¹eng. *W-Wire* - жица

вретена одговарајуће оријентације (слика 5.5) на један од раванских паралелних механизма, изграђена машина алатка се може конфигурисати тако да ради као глодалица V^2 типа или као глодалица H^3 типа што је и приказано у поглављу 6. Овако конфигурирана машина алатка представља значајно унапређење хибридне машине алатке засноване на основној конфигурацији *РПКМ-МОМА* која је такође била предмет истраживачког рада везаног за докторску дисертацију и представљена је у научном раду [103].

Најзначајнија предност изграђене машине алатке коју чине два механизма *РПКМ-МОМА* проширене конфигурације се огледа у могућности да се конфигурише једна вишевретена машина алатка намењена за процес обраде глодањем, а истовремено може радити као глодалица H типа и као глодалица V типа. Сходно намени и конфигурацији самог механизма, описана машина алатка носи назив *МОМА HV-Mill⁴ 4S*. Описана машина алатка је приказана у поглављу 7.3, а представља основу за будући научно истраживачки рад који ће се првенствено ослањати на резултате приказане у овој докторској дисертацији.

7.1 Комплексна вишеосна машина алатка *МОМА-W*

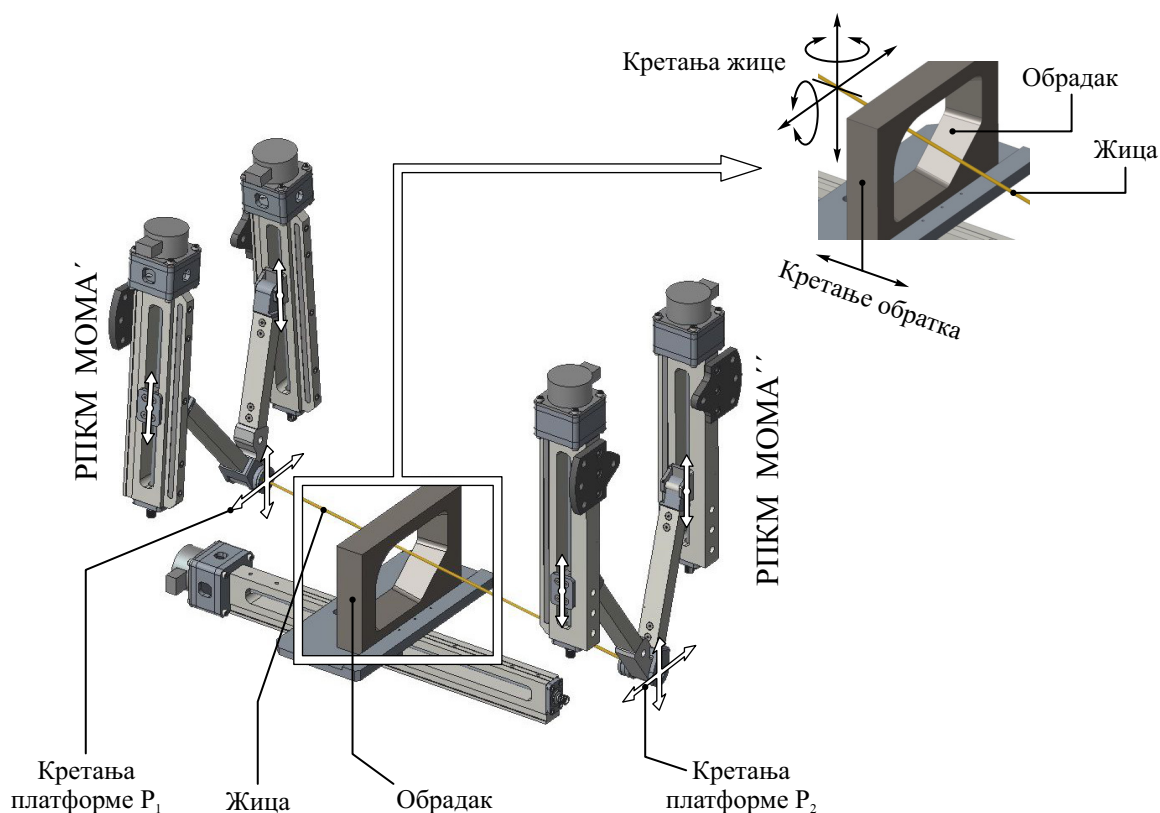
Комплексна вишеосна машина алатка *МОМА-W*, намењена за процес обраде сечења жицом, се према слици 6.1 сврстава у групу "Других машина алатки" дефинисане класе комплексних машина алатки. Као што је већ поменуто, машину алатку *МОМА-W* чине два механизма *РПКМ-МОМА* чије су платформе међусобно повезане жицом (слика 7.1) [86,104,105]. Код овог процеса обраде, жица представља алат којим се врши обрада при чему је неопходно да има могућност трансляторног кретања у правцу две осе и обртног кретања око истих оса што чини укупно четири степена слободe. Према приказаној слици, синхронизованим кретањем платформе употребљених механизма *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''* се реализује жељена позиција и оријентација жице која у сваком тренутну обраде пролази кроз две контуре на обратку дефинисане координатама низа тачака. За описани механизам се може рећи да жељена кретања алата (жице) по задатим контурама, реализују кретања четири клизача дуж вођица погонских оса употребљених паралелних механизма. Другачије речено, релативна позиција платформе једног механизма у односу на платформу другог механизма одређује позицију и оријентацију жице те је за решавање кинематичких проблема комплексног вишеосног механизма неопходно успоставити зависност између позиције клизача на вођицама и координата тачака на обратку које формирају контуре по којима се алат креће током обраде. Осим описаних кретања жице, конфигурација самог механизма, додатном петом погонском осом, пружа могућност позиционирања платформе дуж правца који је управан на две равни у којима леже употребљени механизми *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''*. Како машина алатка са слике 7.1 поседује бар један механизам *РПКМ-МОМА* те припада дефинисаној класи комплексних машина алатки и

²eng. *V-Vertical* - вертикално

³eng. *H-Horizantal* - хоризонтално

⁴eng. *Mill* - глодање

како се у процесу обраде као алат користи жица, машини алатки је додељен назив *МОМА- W* (*W-wire*) и може се првенствено користити за сечење пенастих материјала (стиропор, стиродур и сл.) усијаном жицом [55,56,106], али и за сечење метала [57–59].

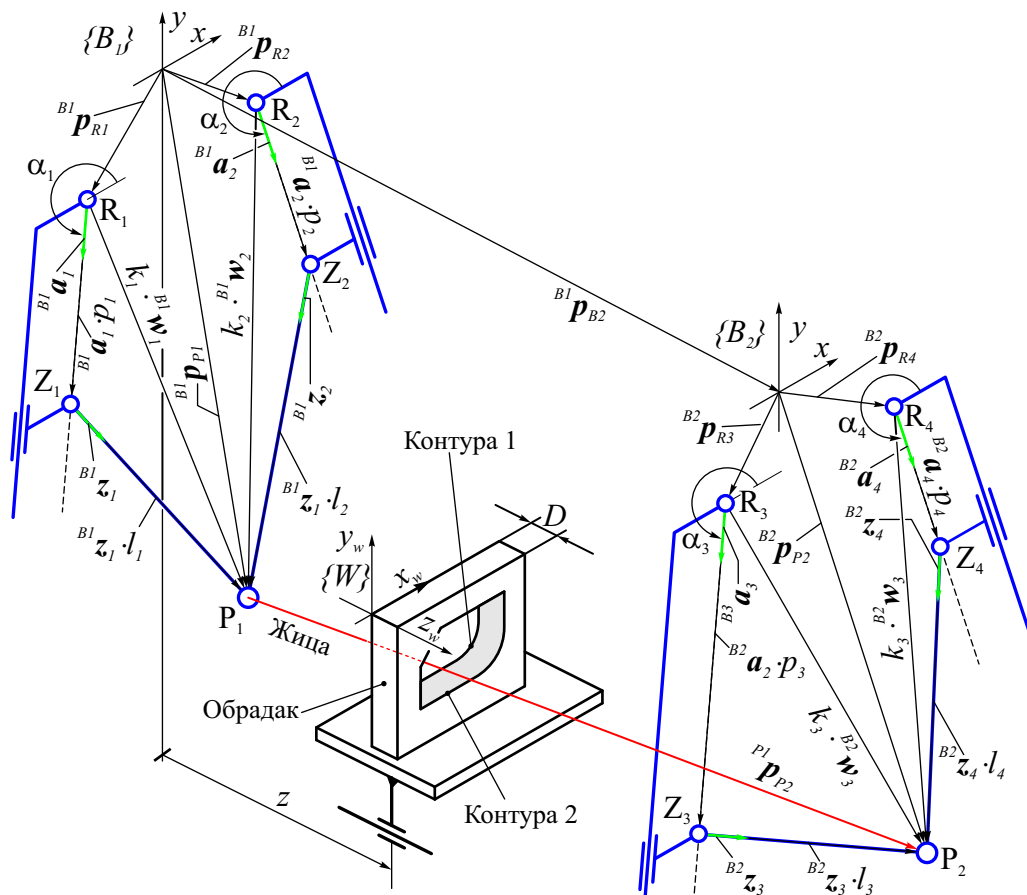


Слика 7.1 CAD модел вишеосне комплексне машине алатке [86]

За разлику од других машина алатки са три и више степени слободe [29,107–109], за машину алатку *МОМА- W* се не може рећи да је машина алатка са паралелном кинематиком нити машина алатка са хибридном кинематиком из разлога што машина алатка *МОМА- W* поседује два паралелна механизма која су независна, а раде синхронизовано. Наведеној тврдњи доприноси чињеница да се жица која повезује два паралелна механизма не може посматрати као платформа целокупног механизма јер се током обраде, осим промене позиције и оријентације жице мења и њена дужина. Исто тако, посматрајући механизме [38,37,39] који су сачињени од два или више паралелних механизма, уочава се да су паралелни механизми надовезани један на други, односно база првог механизма је непокретна, а база сваког наредног механизма је круто везана за платформу претходног механизма. Механизми конфигурисани на описан начин нису независни јер кретања једног механизма узрокују кретање свих наредних механизма што је у принципу карактеристика серијске везе. Због употребљених паралелних механизма и реализоване серијске везе механизма, целокупни механизам се може охарактерисати као хибридни механизми. Како се механизам машине алатке *МОМА- W* не може сврстати ни у једну од три заступљене групе механизма (серијски, паралелни и хибридни), машина алатка *МОМА- W* се сврстава у групу комплексних машина алатки чак и не узимајући у обзир чињеницу да сама машина алатка припада успостављеној класи.

7.1.1 Кинематички модел вишеосне машине алатке *МОМА- W*

Према датом опису комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* и на основу слике 7.1, а по аналогији са уопштеним кинематичким моделом *РПКМ-МОМА*, формиран кинематички модел машине алатке *МОМА- W* је приказан на слици 7.2. Као што је приказана на слици, сваки од употребљених раванских паралелних механизма *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''* поседује сопствени координатни систем $\{B_1\}$ и $\{B_2\}$ респективно, у којима се посматрају кретања платформи P_1 и P_2 као и све геометријске и кинематичке величине датог механизма. За обрадак је везан координатни систем $\{W\}$ у коме су дефинисане координате тачака две контуре по којима се према задатом програму креће алат (жица). Према стандарду ISO 6983-1:2009 [77], програмирање машина алатки намењених за вишеосну обраду сечења жицом се врши задавањем координата низа тачака и то x , y , u и v . Координате x и y су координате тачака којима је дефинисана "Контура 1" док су координате u и v координате тачака којима је дефинисана "Контура 2" са слике 7.2. Како су координате x , y , u и v координате које се програмирају и механизам машине алатке *МОМА- W* мора да их реализује довођењем платформи P_1 и P_2 у одређену позицију, може се рећи да су координате x , y , u и v спољашње координате механизма док су унутрашње координате одређене позицијама зглобова Z_i у односу на референтне тачке R_i ($i=1 \div 4$) и носе ознаке p_i .



Слика 7.2 Кинематички модел вишеосне комплексне машине алатке *МОМА- W* (Преузето и дорађено - [86])

Преко координате z се дефинише нормално растојање координатног система $\{W\}$ од равни механизма *РПКМ-МОМА'* и координата z је везана за пету осу механизма која је позициона оса што у ствари значи да се пре обраде путем координате z обрадак позиционира, а потом током обраде вредност координата z се не мења. Пета погонска оса механизма за коју је везана координата z се може посматрати и као оса која је активна током рада механизма али у том случају би осим преко координата x , y , u , v или p_i било неопходно дефинисати њене вредности и преко додатних услова којима би се утицало на сам процес обраде. Ова тематика је предмет будућих истраживања и неће бити разматрана у овој докторској дисертацији али ће у наредним поглављима бити дате назнаке и резултати који упућују на потребу да пета оса буде активна, а не позициона оса. Сви вектори на слици 7.2 су већ објашњени приликом описа уопштеног кинематичког модела *РПКМ-МОМА* приказаног на слици 3.5 с' том разликом да, вектори који у индексу имају ознаку "1" или "2" се посматрају у координатном систему $\{B_1\}$ док се вектори који у индексу имају ознаку "3" или "4" посматрају у координатном систему $\{B_2\}$ те није потребно давати додатна објашњења за усвојене векторе. Осим вектора којима су дефинисане геометрије употребљених механизма, усвојени су и вектори којима се два употребљена механизма доводе у везу, односно вектор ${}^{B_1}p_{B_2}$ којим је одређена позиција координатног система $\{B_2\}$ у односу на координатни систем $\{B_1\}$ и вектор ${}^{P_1}p_{P_2}$ којим је дефинисана позиција платформе P_2 у односу на платформу P_1 .

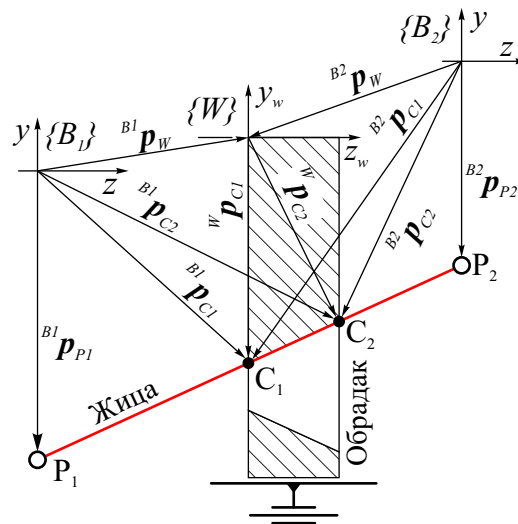
За предстојеће решавање кинематичких проблема комплексне машине алатке *МОМА-W*, неопходно је познате координате тачака у координатном систему $\{W\}$ којима су дефинисане две контуре трансформисати у координате истих тачака у координатним системима $\{B_j\}$ при чему је $j=1,2$. Ако се издвоји један тренутак обраде и уочи тачка C_1 која припада "Контуре 1" и тачка C_2 која припада "Контуре 2", онда су позиције уочених тачака у координатним системима $\{B_j\}$ одређене векторима ${}^{B_j}p_{C_1}$ и ${}^{B_j}p_{C_2}$. Координате тачака C_1 и C_2 у координатном систему $\{W\}$ су познате, а преко њих су одређени вектори ${}^Wp_{C_1}$ и ${}^Wp_{C_2}$ (слика 7.3), као и позиција координатног система $\{W\}$ у односу на координатне системе $\{B_j\}$, тј. познати су вектори ${}^{B_j}p_W$, те се могу написати векторске једначине (7.1) путем којих се дефинишу координате тачака C_1 и C_2 у координатним системима $\{B_j\}$.

$${}^{B_j}p_{C_1} = {}^{B_j}p_W + {}^Wp_{C_1} \quad {}^{B_j}p_{C_2} = {}^{B_j}p_W + {}^Wp_{C_2} \quad (7.1)$$

Једначине (7.1) представљају полазну тачку за решавање кинематичких проблема чија решења дају везу између координата тачака C_1 и C_2 и позиције платформе P_1 и P_2 у координатним системима $\{B_1\}$ и $\{B_2\}$, а реализују се унутрашњим координатама p_i ($i=1\div 4$). На основу слика 7.2 и 7.3 и узимајући у обзир стандард ISO 6983-1:2009 [77], посматрано у координатном систему обратка $\{W\}$ за координате тачака C_1 и C_2 се може написати ${}^Wp_{C_1} = [{}^Wx_{C_1} \quad {}^Wy_{C_1} \quad {}^Wz_{C_1}]^T = [x \quad y \quad 0]^T$ и ${}^Wp_{C_2} = [{}^Wx_{C_2} \quad {}^Wy_{C_2} \quad {}^Wz_{C_2}]^T = [u \quad v \quad D]^T$ па ће у даљим анализама ради лакшег разумевања за координате програмираних тачака бити кориштене ознаке x_{C_1} , y_{C_1} , z_{C_1} , x_{C_2} , y_{C_2} и z_{C_2} са одговарајућим пред-експонентима који дефинишу координате тачака у одређеном координатном систему.

7.1.2 Кинематички проблеми комплексне машине алатке МОМА-*W*

Координате тачака C_1 и C_2 са слике 7.3 у координатним системима $\{B_1\}$ и $\{B_2\}$ су познате и одређене су једначинама (7.1) те се може написати ${}^{Bj}p_{C_1} = [{}^j x_{C_1} \quad {}^j y_{C_1} \quad {}^j z_{C_1}]^T$ и ${}^{Bj}p_{C_2} = [{}^j x_{C_2} \quad {}^j y_{C_2} \quad {}^j z_{C_2}]^T$. Као што је речено, тачкама C_1 и C_2 је дефинисана жељена позиција и оријентација жице. Задатак механизма комплексне вишеосне машине алатке МОМА-*W* је да позицијама платформе P_1 и P_2 обезбеди жељену позицију и оријентацију жице. С обзиром да је координатама тачака C_1 и C_2 дефинисана права, пресеци дате праве са равнима Oxy координатних система $\{B_j\}$ у којима леже употребљени механизми РПКМ-МОМА' и РПКМ-МОМА'' дају позиције платформи P_1 и P_2 које обезбеђују жељену позицију и оријентацију жице. Посматрано у координатним системима $\{B_j\}$, помоћу једначина (7.2) се одређују координате платформи P_j у зависности од координата тачака C_1 и C_2 .



Слика 7.3 Позиције програмираних тачака C_1 и C_2 у односу на координатне системе $\{B_j\}$

$$x_{Pj} = -\frac{{}^j z_{C_1}}{{}^j z_{C_2} - {}^j z_{C_1}} \cdot ({}^j x_{C_2} - {}^j x_{C_1}) + {}^j x_{C_1}$$

$$y_{Pj} = -\frac{{}^j z_{C_1}}{{}^j z_{C_2} - {}^j z_{C_1}} \cdot ({}^j y_{C_2} - {}^j y_{C_1}) + {}^j y_{C_1}$$
(7.2)

Како су сада познате позиције платформи, према кинематичком моделу комплексне машине алатке МОМА-*W* приказаном на сликама 7.2 и 7.3, може се написати векторска једначина (7.3) која повезује геометрију, спољашње и унутрашње координате механизма комплексне машине алатке МОМА-*W*.

$$p_i^2 - 2p_i({}^{Bj}a_i \cdot k_i {}^{Bj}w_i) + (k_i {}^{Bj}w_i)^2 - l_i^2 = 0$$
(7.3)

Узимајући у обзир једначине (7.2), скаларни облик једначина (7.3) је дат једначинама (7.4) при чему се координате тачака C_1 и C_2 у координатним системима $\{B_j\}$ одређују помоћу једначина (7.1).

$$\begin{aligned}
 p_i^2 - 2p_i \left[a_{xi} \cdot \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j x_{C2} - {}^j x_{C1}) + {}^j x_{C1} - {}^j x_{Ri} \right) + \right. \\
 \left. + a_{yi} \cdot \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j y_{C2} - {}^j y_{C1}) + {}^j y_{C1} - {}^j y_{Ri} \right) \right] + \\
 + \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j x_{C2} - {}^j x_{C1}) + {}^j x_{C1} - {}^j x_{Ri} \right)^2 + \\
 + \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j y_{C2} - {}^j y_{C1}) + {}^j y_{C1} - {}^j y_{Ri} \right)^2 - l_i^2 = 0
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

Једначине (7.2) до (7.4) су генерализоване и дате у општем облику те важе за сваку конфигурацију механизма комплексне машине алатке *МОМА- W* без обзира на конфигурације употребљених механизма *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''*. Изведене једначине ће се уз избор одговарајућих геометријских параметара користити за даље анализе комплексне машине алатке *МОМА- W* .

Решења инверзног кинематичког проблема комплексне машине алатке *МОМА- W*

Како у једначини (7.4) индекси геометријских параметара механизма комплексне машине алатке *МОМА- W* могу имати вредности $i=(1\div 4)$, а вредности предекспонента могу имати вредности $j=(1,2)$, решавањем једначине по унутрашњим координатама, добија се група једначина (7.5) које дају зависност унутрашњих координата механизма p_i од спољашњих координата механизма x_{C1}, y_{C1}, x_{C2} и y_{C2} односно x, y, u и v .

$$\begin{aligned}
 p_i = a_{xi} \cdot \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j x_{C2} - {}^j x_{C1}) + {}^j x_{C1} - {}^j x_{Ri} \right) + \\
 + a_{yi} \cdot \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j y_{C2} - {}^j y_{C1}) + {}^j y_{C1} - {}^j y_{Ri} \right) \pm \\
 \pm \left[\left(a_{xi} \cdot \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j x_{C2} - {}^j x_{C1}) + {}^j x_{C1} - {}^j x_{Ri} \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + a_{yi} \cdot \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j y_{C2} - {}^j y_{C1}) + {}^j y_{C1} - {}^j y_{Ri} \right) \right)^2 - \right. \\
 \left. - \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j x_{C2} - {}^j x_{C1}) + {}^j x_{C1} - {}^j x_{Ri} \right)^2 - \right. \\
 \left. - \left(-\frac{{}^j z_{C1}}{{}^j z_{C2} - {}^j z_{C1}} \cdot ({}^j y_{C2} - {}^j y_{C1}) + {}^j y_{C1} - {}^j y_{Ri} \right)^2 + l_i^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

Користећи једначину (7.2) и елиминацијом двознака ” \pm ” увођењем геометријског параметра $K_{IKP,i}$ чије су вредности дате у табели 3.1 и зависе од употребљене конфигурације механизма *РПКМ-МОМА*, претходна једначина се може приказати у краћем облику и дата је једначинама (7.6). У претходним једначинама, координате ${}^j z_{C1}$ и ${}^j z_{C2}$ зависе од позиције координатног система $\{W\}$ у односу на координатне системе $\{B_j\}$ и током обраде имају константну вредност па се из тог разлога погонска оса ” z ” не може посматрати као пета активна оса механизма.

$$\begin{aligned}
 p_i = & a_{xi}(x_{Pj} - {}^j x_{Ri}) + a_{yi}(y_{Pj} - {}^j y_{Ri}) + \\
 & + K_{IKP,i} \cdot \left[\left(a_{xi}(x_{Pj} - {}^j x_{Ri}) + a_{yi}(y_{Pj} - {}^j y_{Ri}) \right)^2 - \right. \\
 & \left. - (x_{Pj} - {}^j x_{Ri})^2 - (y_{Pj} - {}^j y_{Ri})^2 + l_i^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

У случају да се позиција координатног система $\{W\}$ у односу на координатне системе $\{B_j\}$ током обраде мења и знајући позицију координатног система $\{B_2\}$ у односу на координатне системе $\{B_1\}$ на основу геометрије механизма комплексне машине алатке *МОМА- W* , координата ${}^1 z_{C1}$ би постала нова спољашња координата механизма која би се реализовала петом погонском осом и новом унутрашњом координатом p_5 . Координате ${}^2 z_{C1}$, ${}^1 z_{C2}$ и ${}^2 z_2$ би се у том случају одређивале на основу програмиране координате ${}^{B1} z_{C1}$, познате дебљине обратка D и вектора ${}^{B1} p_{B2}$ на основу векторских једначина (7.1) и (7.7) узимајући у обзир само компоненте вектора у правцу осе z .

$$\begin{aligned}
 {}^{B2} p_{C1} &= {}^{B1} p_W + {}^W p_{C1} - {}^{B1} p_{B2} \\
 {}^{B2} p_{C2} &= {}^{B1} p_W + {}^W p_{C2} - {}^{B1} p_{B2}
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

Решења директног кинематичког проблема комплексне машине алатке *МОМА- W*

Првенствено, ради лакшег приказа решења директног кинематичког проблема у генерализованом облику и добијања једначина које важе за оба употребљена механизма *РПКМ-МОМА*, уводи се нови индекс "n" који је везан за предекспонент "j". Наиме, за вредност $j=1$, индекс "n" има вредност $n=1$ док за вредност $j=2$, индекс "n" има вредност $n=3$. Узимајући у обзир постављено правило, за решавање система једначина (7.4) по координатама платформи механизма x_{Pj} и y_{Pj} , уводе се смене (7.8). Приликом решавања система једначина (7.4) се користе једначине (7.2) које повезују координате тачака C_1 , C_2 са координатама платформи механизма x_{Pj} , y_{Pj} .

$$\begin{aligned}
 {}^j t_1 &= 2(p_n \cdot a_{x,n} + x_{R,n}) & {}^j t_2 &= 2(p_n \cdot a_{y,n} + y_{R,n}) \\
 {}^j t_3 &= p_n^2 + 2p_n(a_{x,n} \cdot x_{R,n} + a_{y,n} \cdot y_{R,n}) + x_{R,n}^2 + y_{R,n}^2 - l_n^2 \\
 {}^j t_4 &= 2(p_{n+1} \cdot a_{x,n+1} + x_{R,n+1}) & {}^j t_5 &= 2(p_{n+1} \cdot a_{y,n+1} + y_{R,n+1}) \\
 {}^j t_6 &= p_{n+1}^2 + 2p_{n+1}(a_{x,n+1} \cdot x_{R,n+1} + a_{y,n+1} \cdot y_{R,n+1}) + x_{R,n+1}^2 + y_{R,n+1}^2 - l_{n+1}^2 \\
 {}^j t_7 &= \frac{{}^j t_6 - {}^j t_3}{{}^j t_4 - {}^j t_1} & {}^j t_8 &= \frac{{}^j t_2 - {}^j t_5}{{}^j t_4 - {}^j t_1} & {}^j t_9 &= \frac{{}^j t_2 + {}^j t_4 - {}^j t_1 + {}^j t_4}{{}^j t_4 - {}^j t_1} \\
 {}^j t_{10} &= 2{}^j t_7 {}^j t_8 - {}^j t_1 {}^j t_8 + {}^j t_2 & {}^j t_{11} &= {}^j t_7^2 - {}^j t_1 {}^j t_7 + {}^j t_3
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

Као решење се добијају координате платформи P_1 и P_2 (једначина (7.9)), а користећи везу између координата тачака C_1 и C_2 и координата платформи механизма x_{Pj} и y_{Pj} , добијају се координате тачака C_1 и C_2 у координатном систему $\{B_j\}$ датих једначинама (7.10).

$$y_{Pj} = \frac{-{}^j t_{10} \pm \sqrt{{}^j t_{10}^2 - 4{}^j t_9 {}^j t_{11}}}{2{}^j t_9} \quad x_{Pj} = {}^j t_7 + {}^j t_8 \cdot y_{Pj} \quad (7.9)$$

$${}^j x_{Ck} = \frac{{}^j z_{c1} - {}^j z_{P1}}{{}^j z_{P2} - {}^j z_{P1}} ({}^j x_{P2} - {}^j x_{P1}) + {}^j x_{P1} \quad {}^j y_{Ck} = \frac{{}^j z_{c1} - {}^j z_{P1}}{{}^j z_{P2} - {}^j z_{P1}} ({}^j y_{P2} - {}^j y_{P1}) + {}^j y_{P1} \quad (7.10)$$

Конечно, координате тачака C_1 и C_2 у координатном систему обратка $\{W\}$ се одређују помоћу једначине (7.11) која уз једначине (7.8) до (7.10) представља решење директног кинематичког проблема комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* .

$${}^W p_{Ck} = {}^B p_{Ck} - {}^B p_W = \begin{bmatrix} {}^j x_{Ck} \\ {}^j y_{Ck} \\ {}^j z_{Ck} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{Ow} \\ y_{Ow} \\ z_{Ow} \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

7.1.3 Радни простор комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W*

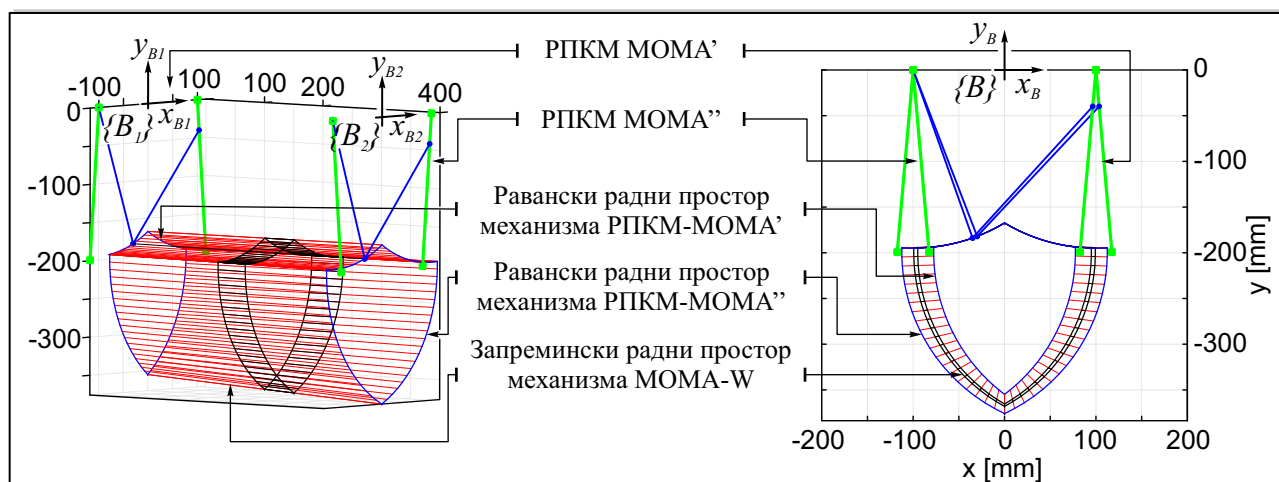
Достизив радни простор комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* је део простора у коме жица може да заузме одређену позицију и оријентацију док је користан радни простор комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* део достизивог радног простора у коме жица током обраде може да заузме жељену позицију и оријентацију. Како је машина алатка *МОМА- W* намењена за вишеосну обраду, за саму машину алатку се могу поставити различити захтеви који утичу на величину и облик корисног радног простора. У оквиру овога поглавља ће бити анализирани само облици и величине достизивих радних простора неких конфигурација комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* . Облик и величина достизивог радног простора одређене конфигурације комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* је одређена крајњим позицијама клизача на погонским осама механизма. Другачије речено, достизив радни простор је одређен вредностима унутрашњих координата $p_i = p_{min} = 0$ и $p_i = p_{max}$ $i=(1 \div 4)$, те се за његово одређивање користе једначине (7.8) до (7.11) које представљају решење *ДКП-а* машине алатке *МОМА- W* . Због прегледности, за приказ добијених резултата се издвајају само вредности унутрашњих координата за које се жица налази на самој ивици достизивог радног простора. За анализу облика и величине достизивог радног простора су издвојене четири различите конфигурације машине алатке *МОМА- W* . Сваку од конфигурација вишеосне машине алатке *МОМА- W* чине два механизма *МОМА*, те свака од анализираних конфигурација носи ознаку према типовима употребљених механизма *РПКМ-МОМА* у складу са табелом 3.1. Тако, за конфигурисање вишеосне машине алатке *МОМА- W* са ознаком *V4.5*, према слици 7.2, за механизам *РПКМ-МОМА'* је употребљена конфигурација *МОМА-4* док је конфигурација *МОМА-5* употребљена за механизам *РПКМ-МОМА''*. Уз већ дефинисане вредности геометријских параметара употребљених раванских паралелних механизма, у табели 7.1 је дат и вектор ${}^{B1} p_{B2}$ којим је дефинисана позиција координатног система $\{B_2\}$ у односу на координатни систем $\{B_1\}$ неопходна за анализу достизивог радног простора као и за предстојеће анализе. Од изабраних конфигурација чије су геометријске карактеристике дате у

табели 7.1, издваја се конфигурација *МОМА-W V4.4* која се према програму градње раванског паралелног механизма *МОМА* не може конфигурисати али се због својих специфичности узима у разматрање. Уврштавањем геометријских параметара одређене конфигурације датих табелом 7.1 у генерализоване једначине (7.2) до (7.4) и (7.8) до (7.11), добија се група једначина која одговара датој конфигурацији. Примењујући претходно описан поступак, добијају се границе раванских радних простора употребљених *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''* који формирају запремински радни простор вишеосне машине алатке *МОМА-W*. На слици 7.4 је приказан достизив радни простор комплексне вишеосне машине алатке *МОМА-W* конфигурације V4.5, док су на слици 7.5 приказани достизив радни простори конфигурација *МОМА-W V1.4*, *МОМА-W V3.3* и *МОМА-W V4.4*.

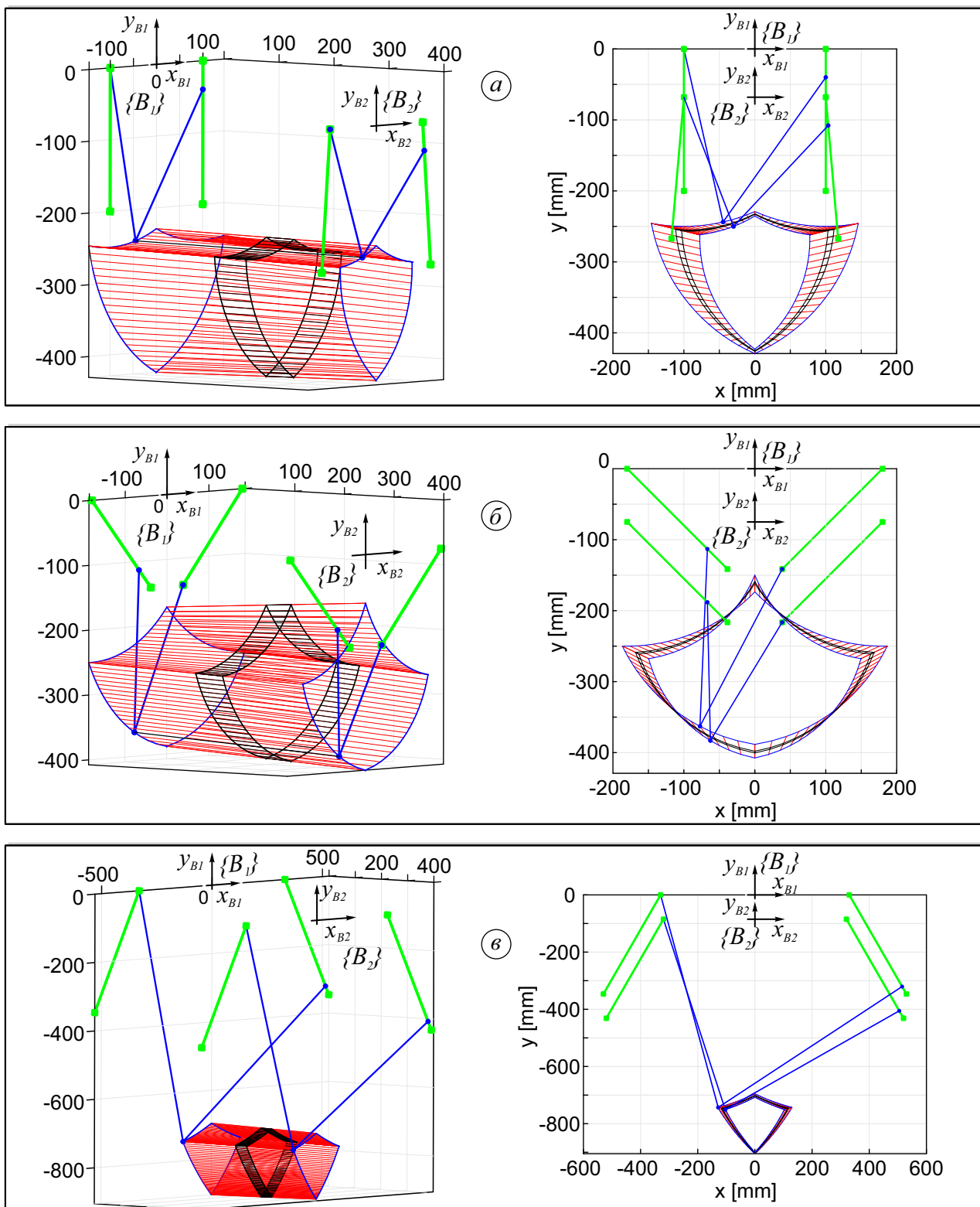
Табела 7.1 Геометријски параметри различитих конфигурација комплексне вишеосне машине алатке *МОМА-W* [86]

Конфигурација	x_{R1}	y_{R1}	x_{R2}	y_{R2}	γ_1	γ_2	l_1	l_2
V4.5	-100	0	100	0	-5	5	195	195
V1.4	-100	0	100	0	0	0	250	250
V3.3	-200	0	200	0	45	-45	250	250
V4.4	-330	0	330	0	-30	30	770	770

Конфигурација	x_{R3}	y_{R3}	x_{R4}	y_{R4}	γ_3	γ_4	l_3	l_4	${}^{B_1}p_{B_2}$
V4.5	-100	0	100	0	5	-5	195	195	$[0 \ 0 \ 400]^T$
V1.4	-100	0	100	0	-5	5	195	195	$[0 \ -68 \ 400]^T$
V3.3	-200	0	200	0	45	-45	195	195	$[0 \ -68 \ 400]^T$
V4.4	-320	0	320	0	-30	30	700	700	$[0 \ -85 \ 400]^T$



Слика 7.4 Радни простор машине алатке *МОМА-W* конфигурације V4.5



Слика 7.5 Радни простор различитих конфигурација машине алатке *МОМА-W*: а) *МОМА-W* V1.4; б) *МОМА-W* V3.3; в) *МОМА-W* V4.4

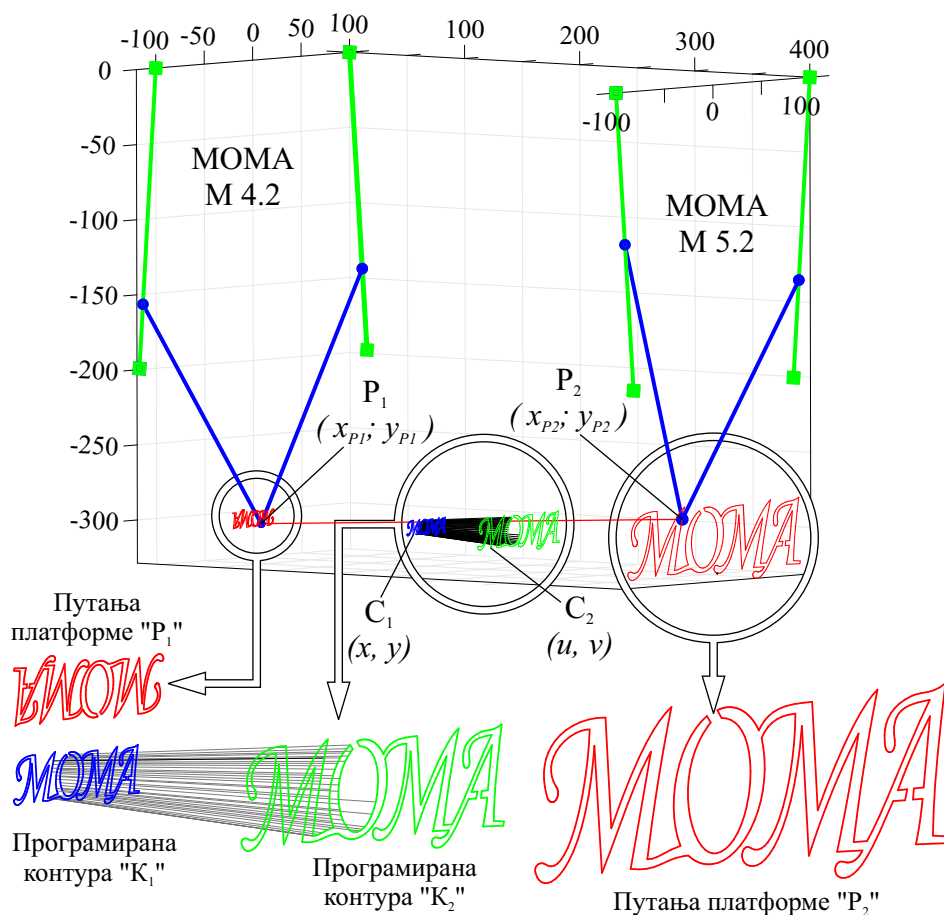
Може се приметити да на облик и величину достиживог радног простора вишеосне машине алатке *МОМА-W* осим облика и величине раванских радних простора употребљених механизма *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''* утиче и положај достиживог радног простора

једног раванског паралелног механизма у односу на други што је одређено позицијом координатног система $\{B_2\}$ у односу на координатни систем $\{B_1\}$. Достизиви радни простор конфигурација *V1.4*, *V3.3* и *V4.4* вишеосне машине алатке *МОМА-W* код којих је координатни систем $\{B_2\}$ измештен у правцу осе "y" у односу на координатни систем $\{B_1\}$ ради добијања повољнијег облика достизивог запреминског радног простора су приказани на слици 7.5. Повољан облик достизивог запреминског радног простора подразумева облик радног простора који је добијен од два раванска радна простора који нису измештени један у односу на други.

7.1.4 Прецизност комплексне вишеосне машине алатке *МОМА-W*

У поглављима 4.6 и 4.7 је анализирана променљива резолуција *РПКМ-МОМА* у различитим деловима достизивог радног простора као и утицај променљиве резолуције на грешку позиционирања платформе. Уочено је да грешка позиционирања платформе зависи од вредности детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$ у датој тачки радног простора. Руководећи се добијеним резултатима, у оквиру овог поглавља ће на конкретним примерима бити анализирана прецизност вишеосне машине алатке *МОМА-W* и то за конфигурације чији су геометријски параметри дати у табели 7.1. Користећи *CAD/CAM* софтверски пакет *Pro ENGINEER* [110], генерисан је *G-кôд* програм који ће послужити за анализу прецизности наведених конфигурација. Предстојеће анализе ће показати колику грешку обраде прави свака анализирана конфигурација односно, колико одступање анализирана конфигурација прави у односу на програмирану путању алата (жице). У ту сврху, помоћу софтверског пакета *MATLAB* је развијена апликација која симулира рад вишеосне машине алатке *МОМА-W* према унетом *G-кôд* програму. На слици 7.6 је приказана симулација рада вишеосне машине алатке *МОМА-W* конфигурације *V4.5* применом развијене апликације. У апликацију за анализу прецизности различитих конфигурација вишеосне машине алатке *МОМА-W*, имплементирани су генерализоване једначине *ИКП*-а и *ДКП*-а (једначине (7.5) до (7.11)). На основу учитаног *G-кôд* програма, којим су дефинисане координате тачака, симулиција рада даје приказ свих кретања стварне машине алатке. Самим тим, симулација даје приказ контура (контуре K_1 и K_2 на слици 7.6) по којима се креће алат (жица). Тако, на основу учитаног *G-кôд* програма, имплементираних једначина које представљају решење инверзног кинематичког проблема и унетих геометријских параметара анализираних конфигурације, апликација израчунава вредности унутрашњих координата које би стварна машина реализовала и са којима се платформе механизма доводе у жељене позиције при чему се формирају путање по којима се платформе крећу (на слици 7.6, путања платформе P_1 и путања платформе P_2). Због минималног угла заокрета корачног мотора погонске осе $\alpha_{KM}=1.8^\circ$ и корака завојног вретена $s=1\text{ mm}$, ни једна од четири погонске осе вишеосне машине алатке *МОМА-W* не може имати вредност израчунате на основу једначина *ИКП*-а већ се израчунате вредности доводе на вредности унутрашњих координата које се могу реализовати резолуцијом погонских оса $\Delta p_i=0.005\text{ mm}$. На пример, израчуната вредност унутрашње координате $p_i=52.2168$ се доводи

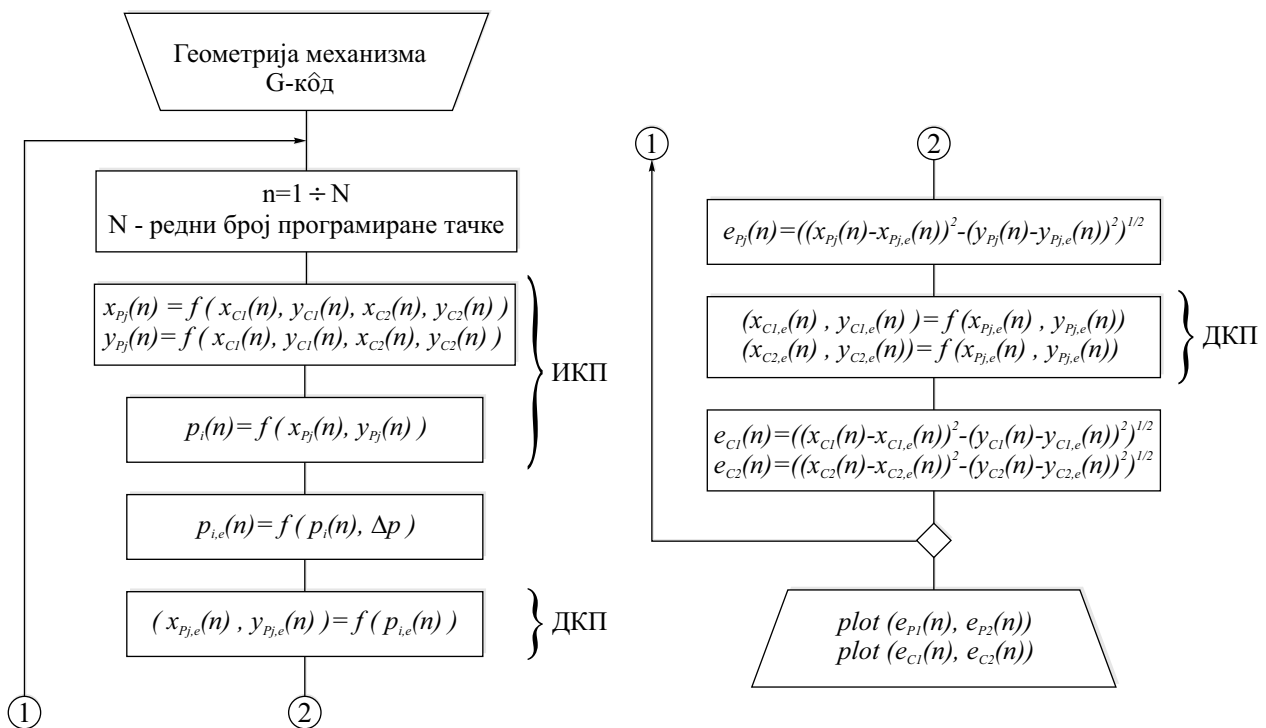
на вредност $p_i=52.215$ док се вредност унутрашње координате $p_i=52.2186$ доводи на вредност $p_i=52.220$. У првом случају, грешка реализовања унутрашње координате износи $e_{p_i}=0.0018$ *mm*, док у другом случају грешка износи $e_{p_i}=0.0014$ *mm*. Описаном анализом, симулира се рад интерполатора у оквиру управљачког дела машине алатке. Као што је поменуто, анализа је урађена за пун корак корачног мотора. Резултати могу бити знатно бољи ако се погонске осе конфигуришу да раде са полукоракком ($\alpha_{KM}=0.9^\circ$) или четвртином корака ($\alpha_{KM}=0.45^\circ$) корачног мотора [47,111]. Грешке направљене при реализовању унутрашњих координата утичу на грешке позиционирања платформи употребљених механизма па самим тиме и на грешку обраде која се огледа у одступању реализоване путање алата од програмиране путање. Поступак одређивања грешке позиционирања платформи употребљених механизма и грешака обраде је приказан алгоритмом на слици 7.7.



Слика 7.6 Симулација обраде вишеосном машином алатком *МОМА-W* конфигурације V4.5

За анализу грешака, уведене су нове величине које су узроковане грешком реализовања унутрашњих координата и то: $p_{i,e}$ - стварне вредности унутрашњих координата са грешком реализовања вредности унутрашњих координата узроковане резолуцијом погонских оса Δp_i ; $x_{Pj,e}$, $y_{Pj,e}$ - стварне вредности координата платформи које се разликују од израчунатих вредности координата платформи а узроковане су грешком заузимања вредности унутрашњих координата и израчунавају се једначинама ДКП - а са вредностима унутрашњих координата $p_{i,e}$; e_{Pj} - грешка позиционирања платформи механизма која представља растојање између заузете

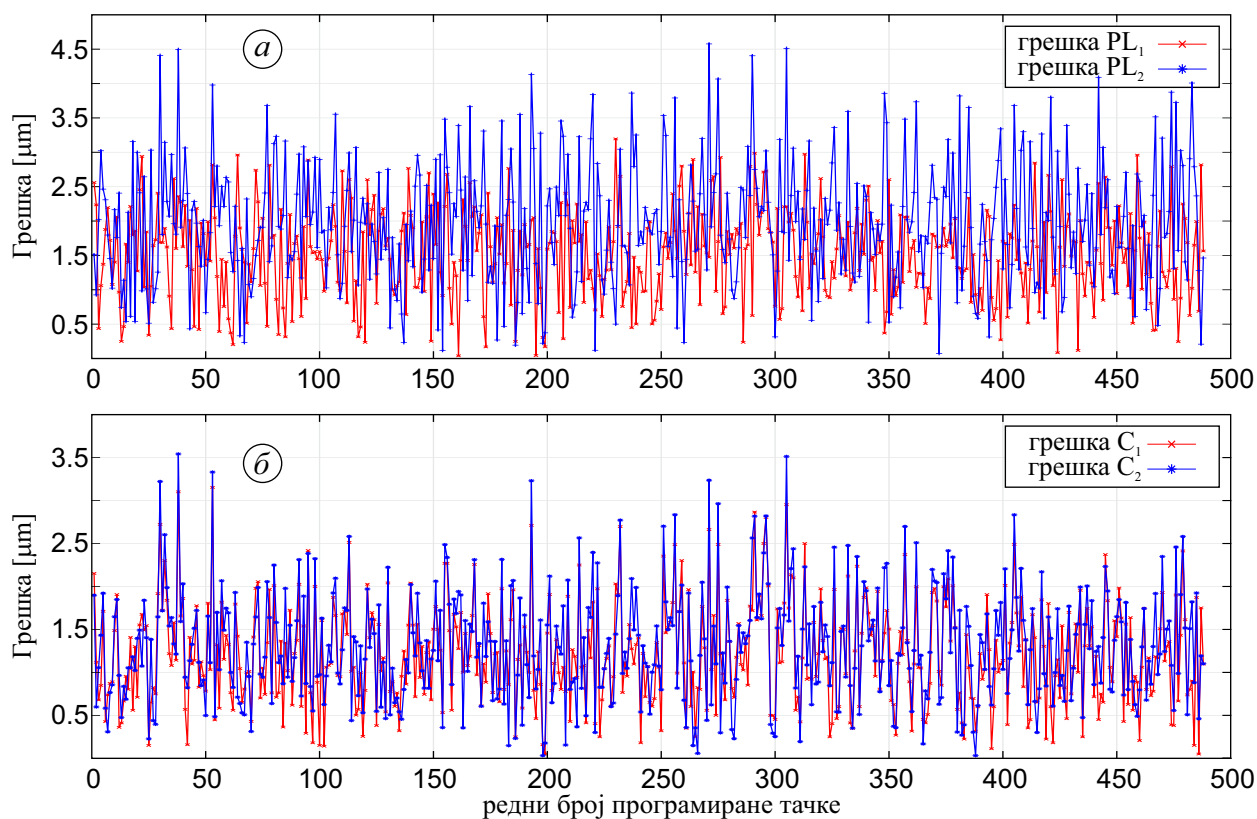
позиције и жељене (израчунате позиције) платформе механизма; $x_{C,e}$, $y_{C,e}$ - реализоване координате тачака којима се формирају програмиране контуре и добијене су на основу реализованих позиција платформи $x_{Pj,e}$, $y_{Pj,e}$ уврштених у једначине ДКП-а; e_{C1}, e_{C2} - грешке обраде које представљају растојање између реализованих и програмираних координата тачака C_1 и C_2 . Описана анализа је урађена за четири конфигурације чији су достизиви радни простори анализирани. Како би било могуће упоредити грешке анализираних конфигурација, за сваку анализу је кориштен исти G -кôд програм приказан на слици 7.6 с' тим да се позиција координатног система обратка $\{W\}$ у односу на непокретни координатни систем $\{B_1\}$ разликује од конфигурације до конфигурације (табела 7.2) због различите позиције достизивих радних простора у односу на координатни систем $\{B_1\}$ а резултати описане анализе су приказани у облику дијаграма на сликама 7.8, 7.9, 7.10 и 7.11.



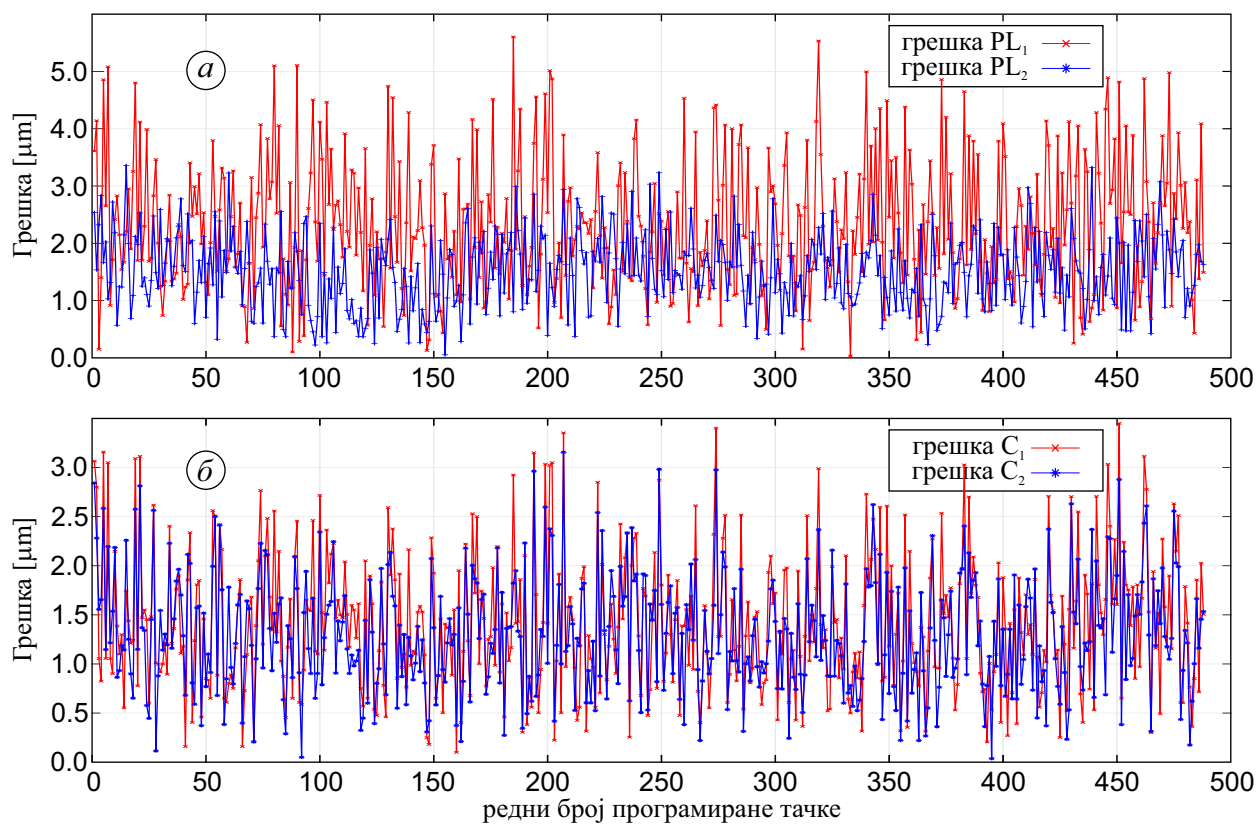
Слика 7.7 Алгоритам за израчунавање грешке позиционирања платформе и грешке обраде вишеосне машине алатке МОМА-W за учитан G-кôд програм

Табела 7.2 Позиције координатних система $\{B_2\}$ и $\{W\}$ у односу на координатни систем $\{B_1\}$ анализираних конфигурација

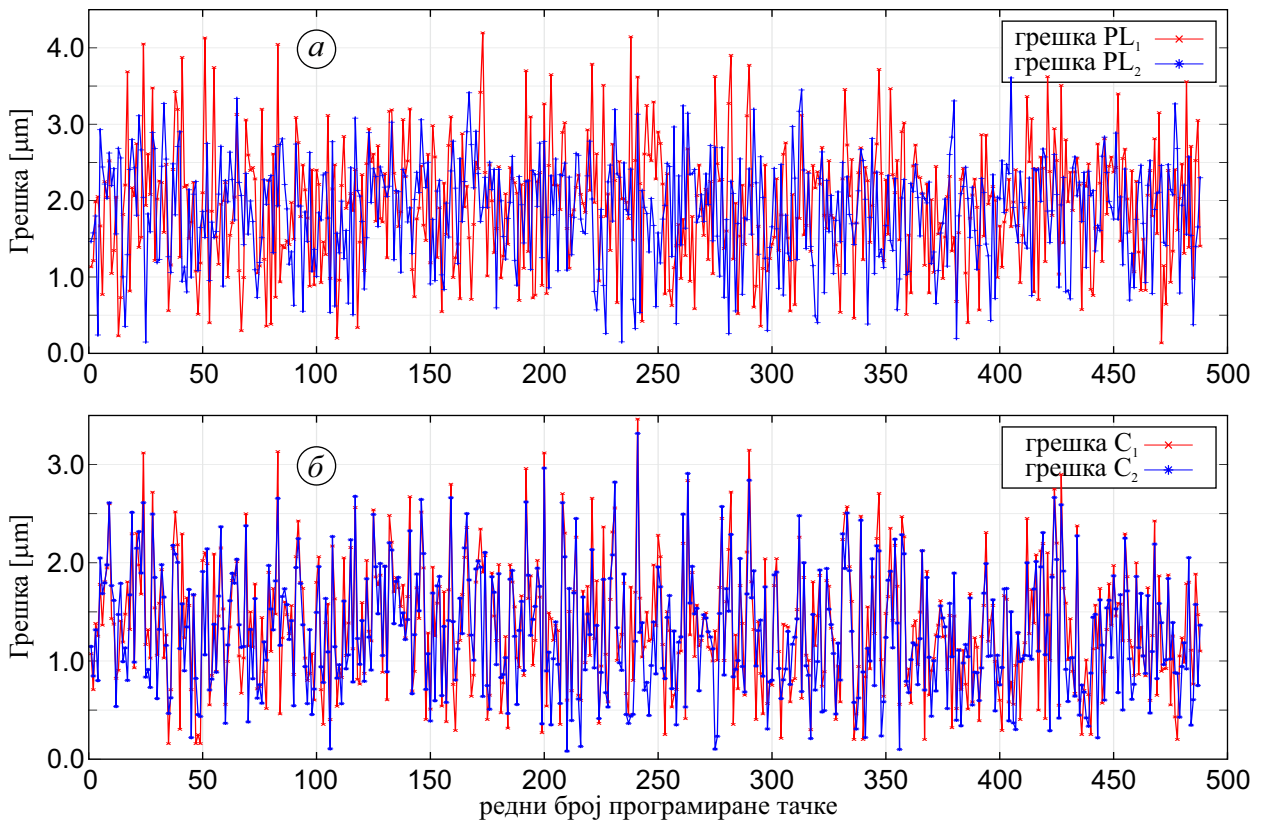
Конфигурација	$B_1 p_{B_2}$	$B_1 p_W$
V4.5	$[0 \ 0 \ 400]^T$	$[0 \ -265 \ 90]^T$
V1.4	$[0 \ -68 \ 400]^T$	$[0 \ -265 \ 150]^T$
V3.3	$[0 \ -68 \ 400]^T$	$[0 \ -290 \ 150]^T$
V4.4	$[0 \ -85 \ 400]^T$	$[0 \ -800 \ 260]^T$



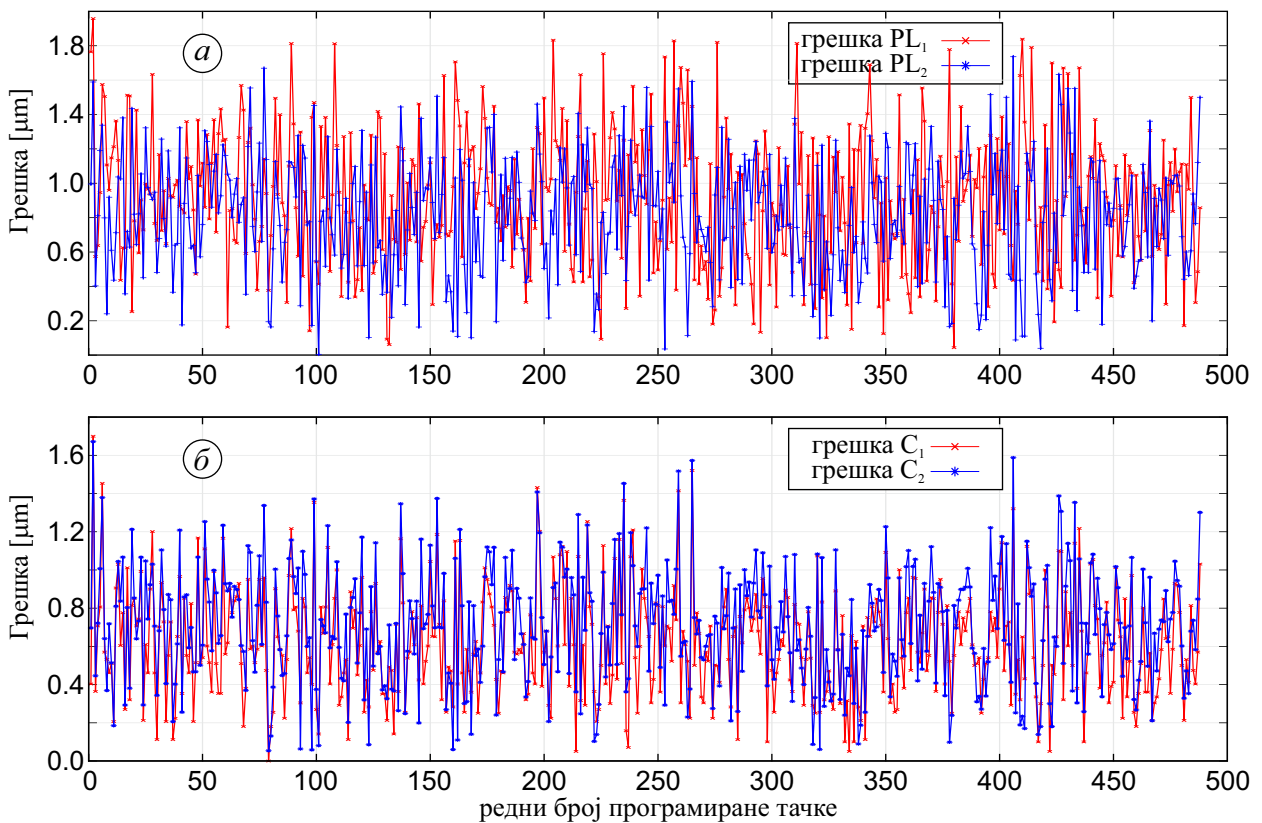
Слика 7.8 *МОМА- W* конфигурација V4.5, грешке: а) Позиционирања платформе; б) Обраде



Слика 7.9 *МОМА- W* конфигурација V1.4, грешке: а) Позиционирања платформе; б) Обраде



Слика 7.10 *МОМА-*W** конфигурација V3.3, грешке: а) Позиционирања платформе; б) Обраде



Слика 7.11 *МОМА-*W** конфигурација V4.4, грешке: а) Позиционирања платформе; б) Обраде

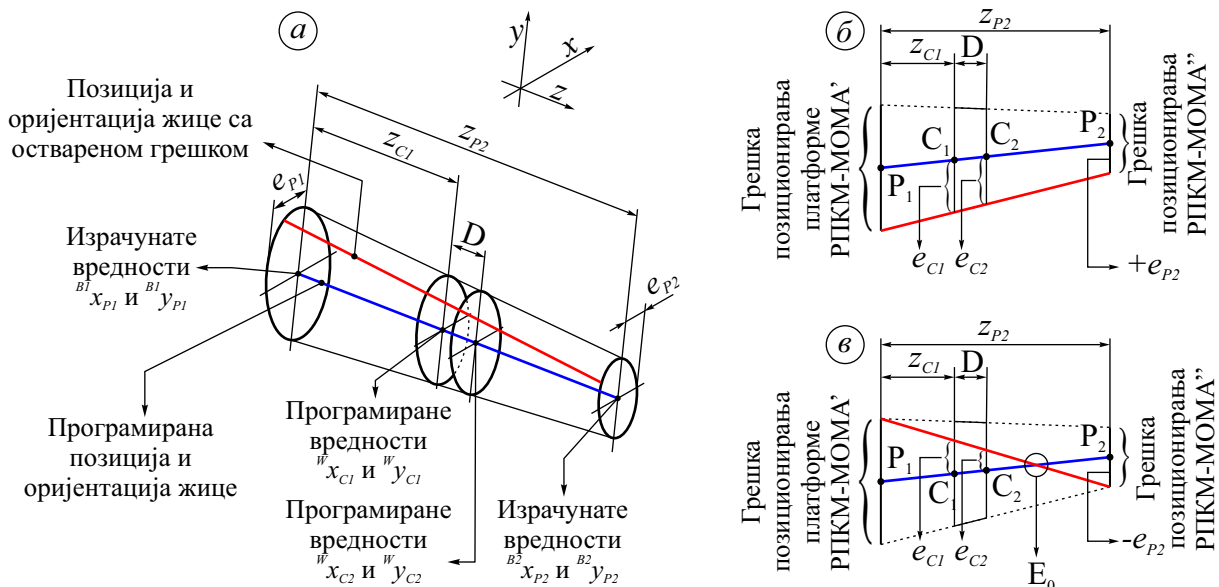
На основу приказаних дијаграма се може закључити да при реализацији учитаног *G-код* програма, све анализираних конфигурације праве различите грешке позиционирања платформи употребљених механизма *РПКМ-МОМА'* и *РПКМ-МОМА''* што се одражава и на различите вредности грешака обраде. Користећи добијене резултате анализа и дијаграме приказане на сликама 7.8, 7.9, 7.10 и 7.11, издвојене су максималне вредности грешака позиционирања платформи $\max PL_1$ и $\max PL_2$ као и максималне вредности грешака обраде $\max C_1$ и $\max C_2$ сваке анализираних конфигурације. Такође, на основу свих добијених вредности грешака су израчунате средње вредности грешака позиционирања платформи $\overline{PL_1}$ и $\overline{PL_2}$ као и средње вредности грешака обраде $\overline{C_1}$ и $\overline{C_2}$. Због лакше анализе и лакшег упоређивања добијених резултата, за сваку анализирану конфигурацију вишеосне машине алатке *МОМА-В*, наведене вредности грешака су дате табеларно (табела 7.3).

Табела 7.3 Грешке позиционирања платформи паралелних механизма и грешке обраде анализираних конфигурација

Конфигурација	$\max PL_1$ [mm]	$\max PL_2$ [mm]	$\max C_1$ [mm]	$\max C_2$ [mm]	$\overline{PL_1}$ [mm]	$\overline{PL_2}$ [mm]	$\overline{C_1}$ [mm]	$\overline{C_2}$ [mm]
V4.5	0.0032	0.0046	0.0032	0.0035	0.0015	0.0019	0.0012	0.0013
V1.4	0.0056	0.0034	0.0035	0.0032	0.0023	0.0015	0.0014	0.0013
V3.3	0.0042	0.0036	0.0035	0.0033	0.0019	0.0018	0.0014	0.0013
V4.4	0.0019	0.0017	0.0017	0.0016	0.0009	0.0008	0.0006	0.0007

Упоређивањем резултата анализе приказаних табелом 7.3), уочава се да конфигурација *МОМА-В* V4.4 прави најмање максималне грешке позиционирања платформи $\max PL_1$ и $\max PL_2$ као и најмање грешке обраде $\max C_1$ и $\max C_2$. Исто тако, средње вредности грешака $\overline{PL_1}$, $\overline{PL_2}$, $\overline{C_1}$ и $\overline{C_2}$ су најмање код конфигурације *МОМА-В* V4.4. У поређењу са осталим конфигурацијама, разлике у оствареним грешкама су значајне те су грешке конфигурације *МОМА-В* V4.4 у просеку упола мање од грешака осталих анализираних конфигурација. Објашњење се може наћи у самој геометрији конфигурације *МОМА-В* V4.4. Наиме, конфигурација носи ознаку V4.4 јер су употребљена два механизма *РПКМ-МОМА* код којих се погонске осе разилазе. Међутим, углови γ_i имају вредност $\gamma_i = \pm 30^\circ$ па су употребљене конфигурације *РПКМ-МОМА* веома сличне конфигурацији *РПКМ-МОМА* V2 за коју се на основу слике 4.13 може рећи да има значајно веће вредности детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$ унутар достиживог радног простора у односу на остале конфигурације што према чињеницама изнетим у поглављу 4.7 узрокује мање вредности грешака позиционирања платформе механизма, а самим тим и мање вредности грешака обраде. Вредности грешака позиционирања платформи употребљених механизма и грешака обраде, приказаних на сликама 7.8 до 7.11 и табели 7.3 се односе на учитан *G-код* програм те за неки други програм вредности грешака могу бити другачије. Ако би се у том случају добиле друге вредности грешака, однос грешака различитих конфигурација би остао приближно исти те се већ приказани резултати могу сматрати као релевантни за оцену прецизности одређене конфигурације вишеосне машине алатке *МОМА-В*.

Даљом анализом добијених резултата се издвајају грешке позиционирања платформи $e_{Pj,n}$ које узрокују грешке обраде $e_{C1,n}$ и $e_{C2,n}$ и то у једном одређеном тренутку. Примећује се да грешке обраде увек имају мању вредност од веће вредности грешке позиционирања платформе, тј. за сваки тренутак обраде важи $e_{C1,n} < \max(e_{P1,n}; e_{P2,n})$ и $e_{C2,n} < \max(e_{P1,n}; e_{P2,n})$. Исто тако се може приметити да у појединим тренуцима грешке обраде $e_{C1,n}$ и/или $e_{C2,n}$ имају мање вредности од обе грешке позиционирања платформи $e_{Pj,n}$. Објашњење за овакве резултате се може дати на основу анализе настанка грешке обраде узроковане грешком позиционирања платформи (слика 7.12). Како је приказано на слици, грешке позиционирања платформи у сваком тренутку обраде формирају зарубљени конус са базама које леже у равнима употребљених паралелних механизма и имају полупречнике e_{P1} и e_{P2} (слика 7.12.a). У сваком тренутку жица лежи на омотачу формираног конуса а равни на којима леже програмиране контуре пресецају конус, па се на основу 7.12.a и 7.12.б закључује да ће грешке обраде $e_{C1,n}$ и $e_{C2,n}$ имати вредности мање од $\max(e_{P1,n}; e_{P2,n})$ али и веће од $\min(e_{P1,n}; e_{P2,n})$ што се може описати и једначином (7.12).



Слика 7.12 Утицај грешака позиционирања платформи e_{Pj} на грешку обраде e_{C1} и e_{C2} вишеосне машине алатке МОМА-W

$$e_{C,k} = \frac{(y_{P1} + e_{P1}) \left(\frac{y_{P1} + e_{P1}}{(y_{P1} + e_{P1}) - (y_{P1} \pm e_{P2})} \cdot z_{P2} - z_{C,k} \right)}{\frac{y_{P1} + e_{P1}}{(y_{P1} + e_{P1}) - (y_{P1} \pm e_{P2})} \cdot z_{P2}} - y_{C,k} \quad k = 1, 2 \quad (7.12)$$

У зависности од остварених позиција крајева жице у односу на жељену позицију и оријентацију жице, посматрајући анализирани грешке као равански проблем (слике 7.12.б и 7.12.в), у одређеним тренуцима обраде се може десити да реализована позиција и оријентација пресеца програмирану позицију и оријентацију жице. На слици 7.12.в тачка пресека је означена са E_0

па. Што је тачка пресека ближа програмираним тачкама C_1 и C_2 грешка обраде је мања, а за приказан случај у једначини (7.12) се уместо двознака " \pm " користи знак " $-$ ", у супротном се користи знак " $+$ ". Исто тумачење грешке обраде се може применити и ако се разматра просторни проблем с тим да се у једначини (7.12) уместо двознака " \pm " користи знак " $-$ " ако крајеви реализоване позиције и оријентације жице леже у супротним квадрантима равни Oxy . Како је показано, грешка обраде може имати различите вредности за исте вредности грешке позиционирања платформи и то у зависности од позиције равни на којима леже програмиране контуре у односу на равни по којима се крећу платформе механизма. Према једначини (7.12), на грешку обраде утичу координате платформе P_1 , координате програмиране тачке C_k и грешке позиционирања платформи e_{P_1} и e_{P_2} . Једначина се може трансформисати и у други облик у којима фигуришу координате платформе x_{P_1} или у облик у коме фигуришу координате платформе P_2 , тј. x_{P_2} или y_{P_2} . Без обзира који облик једначине се користи, добијају се исти резултати. У једначини (7.12) величине $y_{C,k}$ и y_{P_1} су величине које су део кинематичких проблема, величине e_{P_1} и e_{P_2} представљају карактеристике механизма које су последица геометрије механизма у коју спада и величина z_{P_2} те, наведене величине није могуће мењати из било ког разлога. Узимајући у обзир претходне чињенице, на грешку обраде $e_{C,k}$ се може утицати само променом координата $z_{C,k}$ што даље узрокује и промену координата платформе механизма, друге вредности грешака позиционирања платформи и на крају самих грешака обраде. Координате z_C је могуће реализовати петом погонском осом механизма како је већ објашњено у опису вишеосне машине алатке *МОМА- W* . Математички модел петосне машине алатке *МОМА- W* који грешку обраде своди на минималну вредност у реалном времену је веома компликован, па ће за одређивање утицаја координате " z " на грешку обраде бити искориштен постојећи математички модел.

За анализу је одабрана конфигурација *V4.4* комплексне машине алатке *МОМА- W* . За изабрану конфигурацију, анализирана је грешка обраде при реализацији истог *G-код* програма али са различитим позицијама обратка у односу на непокретни координатни систем паралелног механизма *РПКМ-МОМА'*. Различите позиције координатног система обратка $\{W\}$ у односу на непокретни координатни систем $\{B_1\}$ као и реализоване грешке позиционирања платформи и грешака обраде су дати у табели 7.4.

Табела 7.4 Грешке позиционирања платформи и грешке обраде вишеосне машине алатке *МОМА- W* конфигурације *V4.4* за различите вредности вектора ${}^{B_1}p_W$

${}^{B_1}p_W$	$\max PL_1$ [mm]	$\max PL_2$ [mm]	$\max C_1$ [mm]	$\max C_2$ [mm]	$\overline{PL_1}$ [mm]	$\overline{PL_2}$ [mm]	$\overline{C_1}$ [mm]	$\overline{C_2}$ [mm]
$[0 \ -800 \ 230]^T$	0.0020	0.0018	0.0015	0.0014	0.0009	0.0008	0.0006	0.0007
$[0 \ -800 \ 240]^T$	0.0021	0.0018	0.0016	0.0017	0.0009	0.0008	0.0006	0.0007
$[0 \ -800 \ 250]^T$	0.0022	0.0017	0.0014	0.0015	0.0009	0.0008	0.0006	0.0007
$[0 \ -800 \ 270]^T$	0.0020	0.0019	0.0014	0.0016	0.0009	0.0006	0.0006	0.0007

Као што резултати анализе показују, средње вредности грешака су исте у сва четири анализирана случаја. Међутим, како средње вредности грешака не пружају потпуни увид у грешке обраде, посматрајући максималне вредности остварених грешака се закључује да промена координата z_C утиче на промену максималних вредности грешака позиционирања платформи па самим тиме и на максималне вредности грешака обраде. Према добијеним резултатима, максималне вредности грешака имају одступања до $\pm 10\%$ у односу на заједничку средњу вредност одређене грешке, а за сва четири анализирана случаја. Добијени резултати показују да постоји оправданост за даљим истраживањима која би обухватила шире анализе вишеосне машине алатке *МОМА-W* са циљем да се унапреди предложена конфигурација вишеосне машине алатке *МОМА-W*.

7.1.5 Кинематичка анализа процеса обраде сечења жицом машином алатком *МОМА-W*

Под кинематичком анализом процеса обраде машином алатком *МОМА-W* се подразумева анализа кретања појединих делова механизма при задатом програму, а на основу којег се реализује жељено кретање алата у односу на обрадак. Кинематичка анализа процеса обраде има за циљ да се утврди на који начин и у којој мери задата брзина обраде утиче на брзине кретања платформи комплексне вишеосне машине алатке *МОМА-W*. Као што је већ поменуто, позиција и оријентација алата у односу на обрадак је дефинисана спољашњим координатама x , y , u и v и реализују се одговарајућим позицијама платформи механизма које су одређене координатама x_{P1} , y_{P1} , x_{P2} и y_{P2} . Веза између наведених координата је дата једначином (7.2) које се могу написати и у другачијем облику датом једначинама (7.13).

$$\begin{aligned} B^1 x_{P1} &= K_1 \cdot (B^1 x_{C2} - B^1 x_{C1}) + B^1 x_{C1} \\ B^1 y_{P1} &= K_1 \cdot (B^1 x_{C2} - B^1 y_{C1}) + B^1 y_{C1} \\ B^1 x_{P2} &= K_2 \cdot (B^1 x_{C2} - B^1 x_{C1}) + B^1 x_{C1} \\ B^1 y_{P2} &= K_2 \cdot (B^1 x_{C2} - B^1 y_{C1}) + B^1 y_{C1} \end{aligned} \quad (7.13)$$

Ради лакше анализе претходних једначина, координате свих тачака се посматрају у координатном систему $\{B_1\}$ при чему су на основу једначина (7.2) уведене константе K_1 и K_2 и облика су:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{B^1 z_{P1} - B^1 z_{C1}}{B^1 z_{C2} - B^1 z_{C1}} \\ K_2 &= \frac{B^1 z_{P2} - B^1 z_{C1}}{B^1 z_{C2} - B^1 z_{C1}} \end{aligned} \quad (7.14)$$

Привремено, за унутрашње координате механизма су усвојене координате платформи механизма x_{P1} , y_{P1} , x_{P2} и y_{P2} , док се координате x_{C1} , y_{C1} , x_{C2} и y_{C2} и даље задржавају

као спољашње координате. Искључивањем стварних унутрашњих координата механизма p_1 , p_2 , p_3 и p_4 и проглашавањем координата x_{P1} , y_{P1} , x_{P2} и y_{P2} за спољашње координате, може се формирати Јакобијан матрица (7.15) помоћу које ће бити одређена зависност између програмиране брзине обраде и брзине кретања платформи механизма.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{P1}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial x_{P1}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial x_{P1}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial x_{P1}}{\partial y_{C2}} \\ \frac{\partial y_{P1}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial y_{P1}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial y_{P1}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial y_{P1}}{\partial y_{C2}} \\ \frac{\partial x_{P2}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial x_{P2}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial x_{P2}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial x_{P2}}{\partial y_{C2}} \\ \frac{\partial y_{P2}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial y_{P2}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial y_{P2}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial y_{P2}}{\partial y_{C2}} \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Кинематички проблеми комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* су решавани према постпроцесору доступног *CAD/CAM* софтверског система који програм генерише у коме координате x и y представљају апсолутне координате тачке C_1 у координатном систему обратка $\{W\}$ док координате u и v представљају релативне координате тачке C_2 у односу на тачку C_1 . Кинематичка анализа процеса обраде са овако дефинисаним координатама је веома сложена па су у претходној Јакобијан матрици задржане апсолутне координате програмираних тачака x_{C1} , y_{C1} , x_{C2} и y_{C2} у непокретном координатном систему $\{B\}$ при чему важе следеће зависности:

$$\begin{aligned} x_{C1} &= x & y_{C1} &= y \\ x_{C2} &= x_{C1} + u & y_{C2} &= y_{C1} + v \end{aligned} \quad (7.16)$$

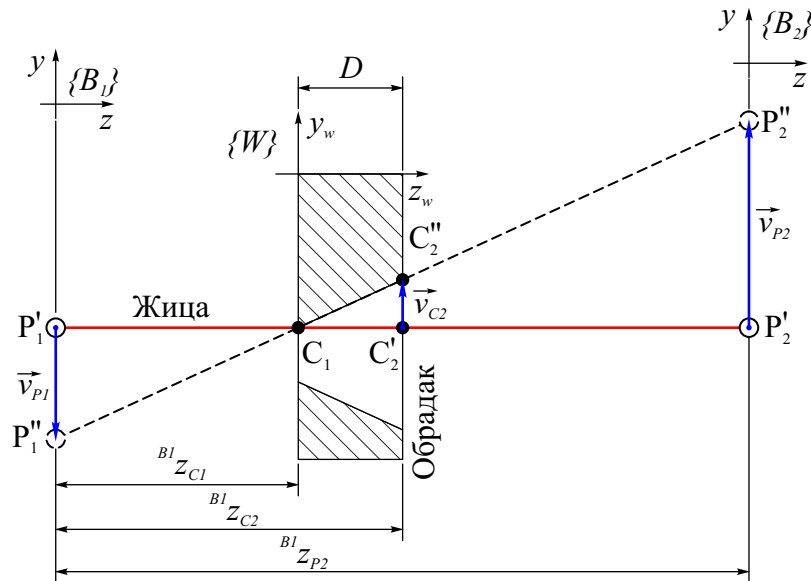
Одређивањем парцијалних извода $\partial f_i / \partial x_{Cj}$ и $\partial f_i / \partial y_{Cj}$ ($i=1 \div 4$, $j=1 \div 2$), и уврштавањем заједно са коефицијентима из једначина (7.14), у општу Јакобијан матрицу (7.15), добија се Јакобијан матрица (7.17) којом је анализирана кинематика обрадног процеса.

$$J = \begin{bmatrix} 1 - K_1 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 1 - K_1 & 0 & K_1 \\ 1 - K_2 & 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 1 - K_2 & 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

Брзине платформи P_1 и P_2 комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W* одређене су величинама \dot{x}_{P1} , \dot{y}_{P1} , \dot{x}_{P2} и \dot{y}_{P2} . У зависности од програмиране брзине алата у тачкама C_1 и C_2 , одређене величинама \dot{x}_{C1} , \dot{y}_{C1} , \dot{x}_{C2} и \dot{y}_{C2} , брзине платформи механизма се израчунавају помоћу матричне једначине (7.18).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{P1} \\ \dot{y}_{P1} \\ \dot{x}_{P2} \\ \dot{y}_{P2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_1 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 1 - K_1 & 0 & K_1 \\ 1 - K_2 & 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 1 - K_2 & 0 & K_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{C1} \\ \dot{y}_{C1} \\ \dot{x}_{C2} \\ \dot{y}_{C2} \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

На основу слике 7.3 се може формирати кинематички модел процеса обраде који је приказан на слици 7.13. На кинематичком моделу процеса обраде је приказано кретање алата (жице) при задатој промени оријентације у вертикалној Oyz равни. Поштујући усвојен начин израде програма односно конвенцију о координатама x , y , u и v , кинематички модел са слике 7.13 одговара промени само координате v за задату вредност. Ако програмом није задата координата y , жица ће након промене оријентације и даље садржати тачку C_1 . Задавањем само координате v , алат који се у претходном тренутку поклапао са тачкама C_1 и C'_2 , у наредном тренутку ће се поклапати са тачкама C_1 и C''_2 чиме је и остварена жељена промена оријентација.



Слика 7.13 Кинематика процеса обраде вишеосне машине алатке *MOMA-W*

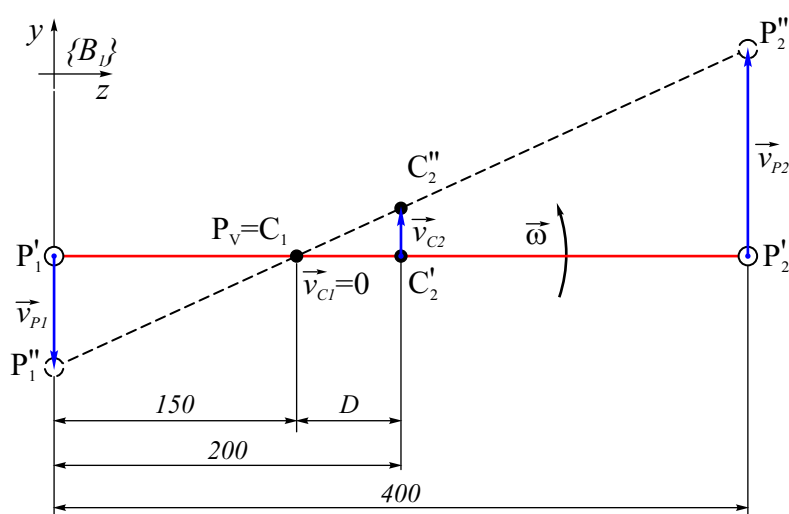
Како је приказано на слици 7.13, промена оријентације алата у вертикалној Oyz се реализује транслацијом платформи механизма у правцу осе Oy . За даљу анализу, од значаја су кретања која врше тачке C_2 , P_1 (платформа првог механизма) и P_2 (платформа другог механизма) при промени оријентације алата. Промена позиције наведених тачака се реализује одговарајућим брзинама које према слици 7.13 носе ознаке \vec{v}_{C_2} , \vec{v}_{P_1} и \vec{v}_{P_2} . За описан случају, када алат мења оријентацију само у равни Oyz , матричном једначином (7.18) и конкретним бројним вредностима се одређују вредности брзина \vec{v}_{P_1} и \vec{v}_{P_2} . Геометријске величине приказане на слици 7.13 имају следеће вредности: ${}^{B1}z_{C_1}=150 \text{ mm}$, ${}^{B1}z_{C_2}=200 \text{ mm}$, ${}^{B1}z_{P_1}=0 \text{ mm}$ и ${}^{B1}z_{P_2}=400 \text{ mm}$. На основу дефинисане геометрије механизма, анализирају се брзине платформи механизма за брзину тачке C_2 , која се задаје у G -код програму и има вредност $\vec{v}_{C_2}=10 \text{ mm/min}$. Према једначини (7.19), у анализираном случају брзине платформи механизма имају следеће вредности $\vec{v}_{P_1}=-300 \text{ mm/min}$ и $\vec{v}_{P_2}=50 \text{ mm/min}$.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{P_1} \\ \dot{y}_{P_1} \\ \dot{x}_{P_2} \\ \dot{y}_{P_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & -3 \\ -4 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & -4 & 0 & 5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -30 \\ 0 \\ 50 \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

До истих резултата се може доћи ако се кретање алата (жице) посматра као равно кретање крутог тела (слика 7.14). У том случају се брзина тачке C_2 одређује помоћу векторске једначине (7.20) познате из кинематике крутог тела [112],[113]. Развијен облик једначине (7.20) је дат једначином (7.21).

$$\vec{v}_{C_2} = \vec{v}_{C_1} + \vec{\omega} \times \overline{C_1 C_2} \quad (7.20)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{C_2} \\ \dot{y}_{C_2} \\ \dot{z}_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{C_1} \\ \dot{y}_{C_1} \\ \dot{z}_{C_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ r_x & r_y & r_z \end{bmatrix} \quad (7.21)$$



Слика 7.14 Одређивање брзина платформи машине алатке *МОМА- W* према теорији обртања крутог тела око непокретне тачке

Према слици 7.14, промена оријентације алата у равни Oyz се реализује обртањем око осе која пролази кроз тренутни пол брзина P_V и паралелна је оси Ox . У разматраном случају, тренутни пол брзина P_V се поклапа са тачком C_1 ($P_V \equiv C_1$) и тада важи $\vec{v}_{P_V} = \vec{v}_{C_1} = 0$. Према једначини (7.21), брзина тачке C_2 се одређује једначином (7.22).

$$\vec{v}_{C_2} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{C_2} \\ \dot{y}_{C_2} \\ \dot{z}_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix} = 0 \cdot \mathbf{i} - \omega_x D \cdot \mathbf{j} + 0 \cdot \mathbf{k} \quad (7.22)$$

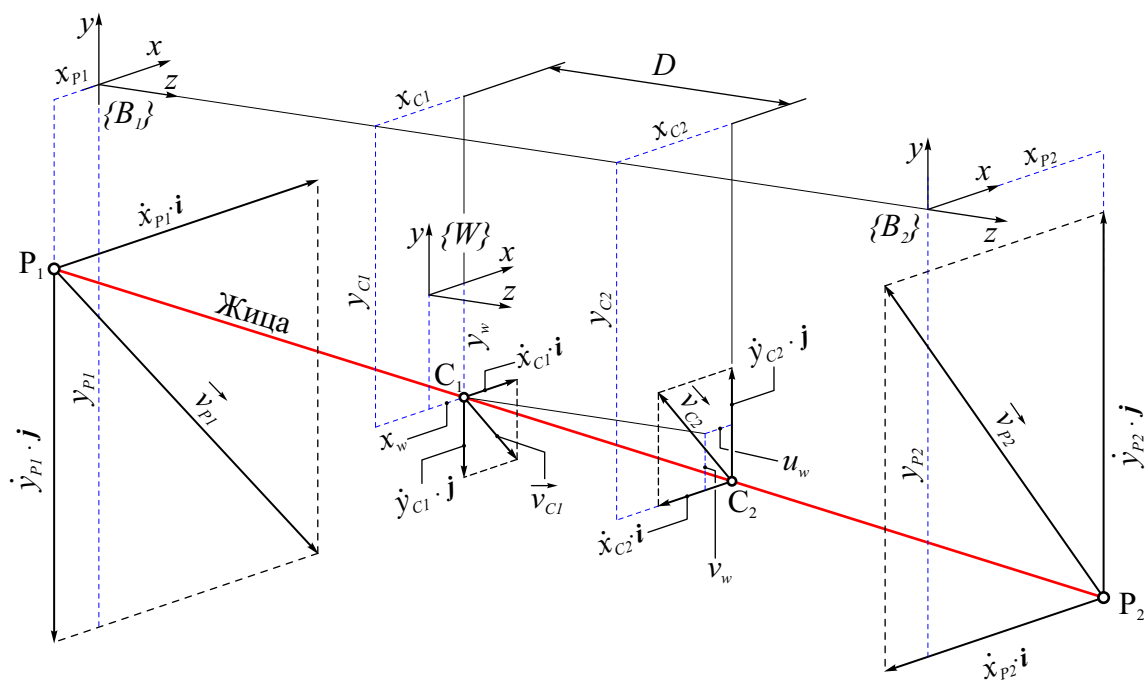
Брзина тачке C_2 се задаје у G -код програму функцијом F . Као у претходној анализи, позната је и усваја се вредност $\dot{y}_{C_2} = 10 \text{ mm/min}$. Са задатом брзином, алат (жица) се обрће у негативном математичком смеру интензитетом $\omega_x = -\dot{y}_{C_2}/D = -10/50 = -0.2 \text{ min}^{-1}$. На основу познате угаоне брзине ω_x , брзине платформи машине алатке *МОМА- W* се одређују као што је одређена и брзина тачке C_2 на основу једначине (7.21). Брзине платформи P_1 и P_2 су дате једначинама (7.23).

$$\begin{aligned}\vec{v}_{P1} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_{P1} \\ \dot{y}_{P1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C^1 z_{P1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ -0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -150 \end{bmatrix} = -30\mathbf{j} \\ \vec{v}_{P2} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_{P2} \\ \dot{y}_{P2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C^1 z_{P2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ -0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 250 \end{bmatrix} = 50\mathbf{j}\end{aligned}\quad (7.23)$$

Анализирани случај је специјалан облик кретања крутог тела. Због непостојања транслаторног кретања ($\vec{v}_{C1}=0$), кретање се своди на обртање крутог тела око непокретне осе. Упоредивањем резултата је потврђено да су једначине (7.13) до (7.18) тачне и могу се користити приликом анализе знатно сложенијих случајева кретања алата током процеса обраде комплексном вишеосном машином алатком *МОМА-В*. Проблематика кретања платформе вишеосне машине алатке *МОМА-В* ће бити детаљније анализирана у будућим истраживањима. На основу претходне анализе и добијених резултата, већ се могу извући одређени закључци. Може се истаћи да на вредности брзина \vec{v}_{P1} и \vec{v}_{P2} у највећој мери утичу растојања платформе механизма од координатног система обрада $\{W\}$. Као што резултати анализе показују, брзине обе платформе машине алатке *МОМА-В* су значајно веће од програмиране брзине обраде, чак и у најповољнијем случају који је анализиран, односно када алат мења оријентацију само у једној равни. Према матричној једначини (7.18), брзине платформе \dot{x}_{P1} , \dot{y}_{P1} , \dot{x}_{P2} и \dot{y}_{P2} би биле значајно веће када би се анализирала реална ситуација у којој током процеса обраде постоје све четири компоненте брзине \dot{x}_{C1} , \dot{y}_{C1} , \dot{x}_{C2} и \dot{y}_{C2} на основу којих током процеса обраде алат врши промену и позиције и оријентације у односу на обрадак. За претходну тврдњу се анализира пример са следећим параметрима: ${}^{B1}z_{C1}=220\text{ mm}$, ${}^{B1}z_{C2}=240\text{ mm}$, ${}^{B1}z_{P1}=0\text{ mm}$ и ${}^{B1}z_{P2}=400\text{ mm}$ и $[\dot{x}_{C1} \ \dot{y}_{C1} \ \dot{x}_{C2} \ \dot{y}_{C2}]^T = [10 \ -12 \ -14 \ 16]^T$. Уврштавањем претходно дефинисаних параметара у једначине (7.14) и (7.17), добијају се брзине платформе P_1 и P_2 које механизам мора да реализује како би се оствариле жељене брзине алата кретањем по програмираним контурама током процеса обраде. Израчунате вредности брзина платформе су дате једначином (7.24).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{P1} \\ \dot{y}_{P1} \\ \dot{x}_{P2} \\ \dot{y}_{P2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & -11 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & -11 \\ -10 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & -10 & 0 & 9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 10 \\ -12 \\ -14 \\ 16 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 254 \\ -296 \\ -226 \\ 264 \end{bmatrix}\quad (7.24)$$

Резултати анализе показују да се релативно мале програмиране брзине кретања алата (\dot{x}_{C1} , \dot{y}_{C1} , \dot{x}_{C2} и \dot{y}_{C2}) реализују веома великим брзинама кретања платформе (\dot{x}_{P1} , \dot{y}_{P1} , \dot{x}_{P2} и \dot{y}_{P2}). Велике вредности брзина платформе су према једначини (7.18) узроковане вредностима коефицијената K_1 и K_2 који према једначинама (7.14) зависе од растојања платформе машине алатке *МОМА-В* од програмираних контура дуж осе Oz што је и приказано на слици 7.15.



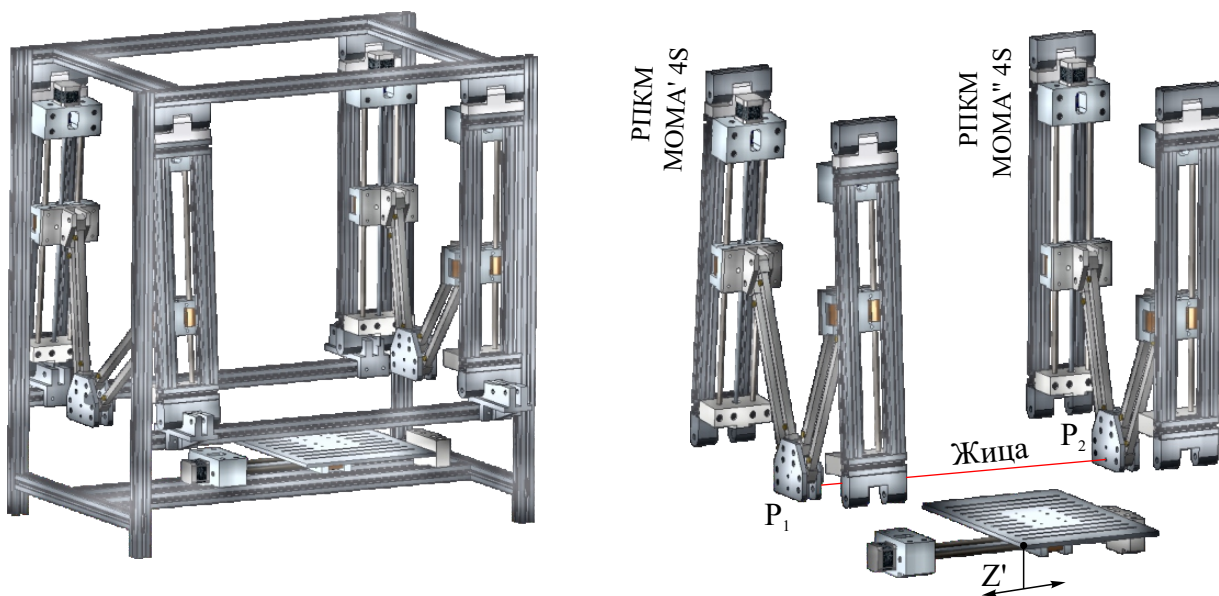
Слика 7.15 Утицај конфигурације машине алатке *МОМА- W* на велике вредности брзина платформи P_1 и P_2

Кретање платформи машине алатке *МОМА- W* реализују стварне унутрашње координате p_1 , p_2 , p_3 и p_4 те у зависности од карактеристика актуатора погонских оса (корачних мотора) постоји могућност да се одређене брзине алата током процеса обраде не могу реализовати. Ово се нарочито односи на конфигурације машине алатке *МОМА- W* велике прецизности као што је конфигурација *МОМА- W* *V4.4* приказане на слици 7.5.в. Конфигурација *МОМА- W* *V4.4* остварује најмање грешку током процеса обраде од свих анализираних конфигурација. Мање грешке обраде су последица већих вредности детерминанти Јакобијан матрица $det(J)$ унутар радних простора употребљених механизма. Већим вредностима $det(J)$ осим што се добија велика прецизност, добијају се и велике вредности \dot{p}_1 , \dot{p}_2 , \dot{p}_3 и \dot{p}_4 за мале програмиране вредности брзине обраде којом су одређене брзине \dot{x}_{C1} и \dot{y}_{C1} , \dot{x}_2 и \dot{y}_{C2} . Примећује се да су велика прецизност и велике брзине кретања платформи машине алатке *МОМА- W* у контрадикторности. Промена вредности коефицијената K_1 и K_2 је један од начина да се задржи велика прецизност, а избегну велике брзине кретања платформи. У идеалном случају, вредности коефицијената би биле $K_1=0$ и $K_2=1$. Са овим вредностима коефицијената K_1 и K_2 Јакобијан матрица дата једначином (7.17) постаје јединична матрица чиме се добијају брзине платформи \dot{x}_{P1} , \dot{y}_{P1} , \dot{x}_{P2} и \dot{y}_{P2} једнаке брзинама \dot{x}_{C1} , \dot{y}_{C1} , \dot{x}_{C2} и \dot{y}_{C2} , респективно. У описаном идеаланом случају, платформа P_1 се креће по површини обратка на којој се налази прва програмирана контура (${}^{B1}z_{C1}=0$) док се платформа P_2 креће по површини на којој се налази друга програмирана контура (${}^{B1}z_{P2}={}^{B1}z_{C2}=D$). Оба наведена услова је практично немогуће испунити јер се од случаја до случаја дебљина обратка D разликује те се намеће потреба за даљим истраживањима која су усмерена ка побољшању кинематичких карактеристика машине алатке *МОМА- W* .

Претходне анализе и тумачења добијених резултата важе само у случају када се пета оса машине алатке *МОМА- W* (оса z) користи само за позиционирање обратка пре почетка процеса обраде док током обраде обрадак стоји непокретан чиме се добијају константне вредности величина K_1 и K_2 . У супротном, ако се обрадак током процеса обраде креће дуж осе z , величине K_1 и K_2 више нису константне па самим тим Јакобијан матрица (7.17) има другачији облик чиме се добијају и другачије вредности брзина платформи употребом једначине (7.18). Ова чињеница ће свакако бити основа будућих истраживања.

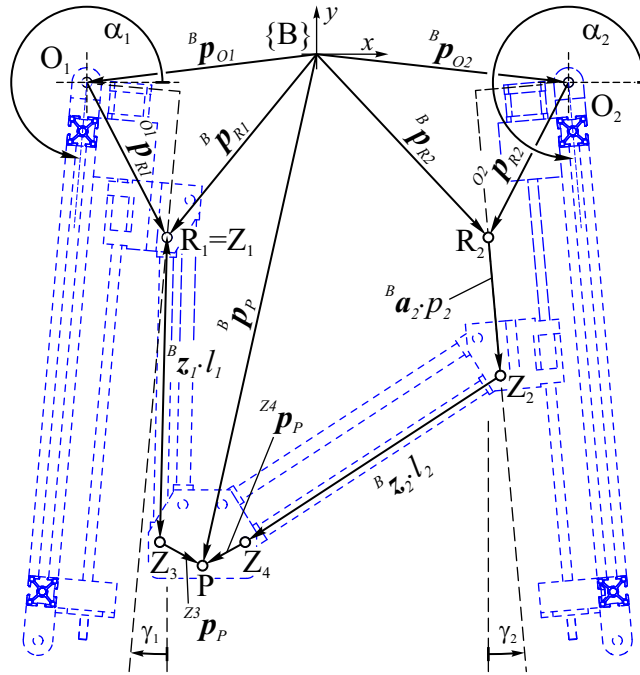
7.2 Комплексна вишеосна машина алатка *МОМА- W 4S*

За разлику од машине алатке *МОМА- W* , машина алатка *МОМА- W 4S* је грађена употребом проширене конфигурације РПКМ-МОМА која је због четири спојке које поседује већ названа *МОМА-4S*. Самим тиме, вишеосној комплексној машини алатки заснованој на проширеној конфигурацији РПКМ-МОМА која је намењена за процес обраде сечења жицом је додељен назив *МОМА- W 4S*. CAD модел машине алатке *МОМА- W 4S* је приказан на слици 7.16.



Слика 7.16 CAD модел комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W 4S*

Проширена конфигурација РПКМ-МОМА, осим по броју спојки и постојању физичке платформе, разликује се од основне по томе што се промена оријентације погонских оса врши обртањем око тачака O_i које се не поклапају са референтним тачкама R_i . На кинематичком моделу проширене конфигурације РПКМ-МОМА (слика 7.17), може се видети да се променом оријентације погонских оса, услед непоклапања тачака O_i и R_i , мењају и позиције референтних тачака у координатном систему $\{B\}$. Из тог разлога су у табели 7.5 као геометријски параметри комплексне вишеосне машине алатке *МОМА- W 4S* дате координате тачака O_i преко којих се помоћу векторске једначине (7.25) дефинисане координате референтних тачака R_i значајних за решавање кинематичких проблема.



Слика 7.17 Кинематички модел проширене конфигурације РПКМ-МОМА употребљене за градњу машине алатке *МОМА-W 4S*

Табела 7.5 Геометријски параметри комплексне вишеосне машине алатке *МОМА-W 4S*

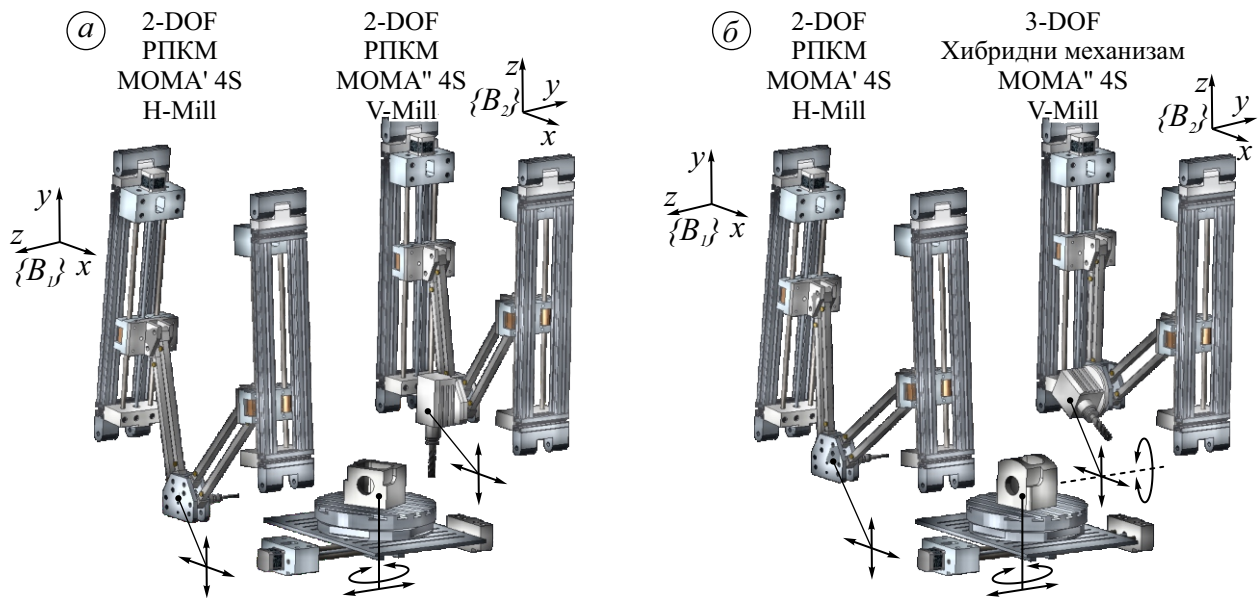
РПКМ	x_{O1}	y_{O1}	x_{O2}	y_{O2}	γ_1	γ_2	l_1	l_2	${}^B p_{R_1}$	${}^B p_{R_2}$
МОМА'	-245	0	245	0	-10	10	310	310	једначина (7.25)	
РПКМ	x_{O3}	y_{O3}	x_{O4}	y_{O4}	γ_3	γ_4	l_3	l_4	${}^B p_{R_3}$	${}^B p_{R_4}$
МОМА''	-245	0	245	0	0	0	280	280	једначина (7.25)	
${}^{B_1} p_{B_2}$	$[0 \ 0 \ 440]^T$									

$${}^B p_{R_i} = {}^B p_{O_i} + \begin{bmatrix} \cos(\gamma_i) & -\sin(\gamma_i) \\ \sin(\gamma_i) & \cos(\gamma_i) \end{bmatrix} \cdot {}^{O_i} p_{R_i} \quad (7.25)$$

Имплементацијом једначина (7.25) у уопштене једначине (5.17) и (5.18) се добијају решења ИКП-а док се имплементацијом једначина (7.25) у једначине (5.19) и (5.20) добијају решења ДКП-а проширене конфигурације РПКМ-МОМА употребљене за градњу машине алатке *МОМА-W 4S*. Уврштавањем једначине (7.25) у уопштене једначине кинематичких проблема (5.17) до (5.20), добијена је група једначина које осим за проширене конфигурације механизма РПКМ-МОМА са слика 5.2 и 7.17 важе и за основну конфигурацију механизма РПКМ-МОМА са слике 3.5. Исто тако, увођењем једначина (7.25) у једначине (7.2) до (7.7) и (7.8) до (7.11), добијају се решења кинематичких проблема која важе и за вишеосну машину алатку *МОМА-W* и за машину алатку *МОМА-W 4S*.

7.3 Комплексна вишеосна машина алатка *МОМА HV-Mill 4S*

Надградњом машине алатке са слике 7.16 модулима са слике 6.1, може се добити низ машина алатки различитих конфигурација. На слици 7.18 су приказане само неке од конфигурација које је могуће реализовати надградњом постојеће машине алатке.



Слика 7.18 Комплексна вишеосна машина алатка намењена за процес обраде глодањем: а) Са шест погонских оса; б) Са седам погонских оса

Машину алатку са слике 7.18.а чине два двоосна реконфигурабилна раванска механизма са паралелном кинематиком *МОМА 4S* проширене конфигурације, а платформе механизма носе по једно главно вретено. Главна вретена имају различиту оријентацију па се уз две погонске осе којима се врши промена оријентације и позиције обратка може вршити обрада призматичних делова са више страна без отпуштања обратка. Машина алатка са слике 7.18.б се разликује од претходне конфигурације по томе што је уместо једног двоосног употребљен троосни реконфигурабилни равански механизам са хибридном кинематиком. Хибридни механизам је конфигуриран тако да главно вретено, осим транслаторних кретања у два правца има могућност промене оријентације око осе управне на раван кретања платформе механизма. Употребом троосног раванског хибридног механизма, стиче се могућност израде делова сложеног облика петоосном обрадом као што је и приказано на слици 7.18.б. За решавање кинематичких проблема, анализе рада и за формирање управљања приказаних машина алатки се могу користити већ изведене генерализоване једначине. Да би се изведене генерализоване једначине могле користити, претходно се морају ускладити конфигурацијама употребљених паралелних механизма водећи рачуна о правцима и смеровима оса координатних система. Како је приказано на сликама 7.18.а и 7.18.б, осе непокретних координатних система $\{B_1\}$ и $\{B_2\}$ везаних за сваки од паралелних механизма имају различите правце и смерове што представља проблем за конфигурирање управљања али и за програмирање приказане комплексне вишеосне машине алатке. Ова проблематика ће бити предмет будућих истраживања која ће за циљ

имати да се на основу досадашњих резултата истраживања конфигурише једна комплексна мултифункционална машина алатака са акцентом на конфигурисање управљања на такав начин да употреба машине алатке не представља проблем програмеру и оператеру *CNC* машине.

Као што је поменуто, израда делова сложене геометрије на приказаној комплексној машини алатки се може вршити без отпуштања припремка. Свођењем броја отпуштања на минималну вредност, умањују се грешке базирања и стезања што представља довољан разлог за даљим истраживачким радом који ће бити првенствено усмерен ка физичкој реализацији неких од приказаних конфигурација комплексних машина алатки, а потом и ка реализацији других конфигурација употребом и комбиновањем различитих модула приказаних на слици [6.1](#).

УПРАВЉАЊЕ И ПРОГРАМИРАЊЕ МАШИНАМА АЛАТКАМА ИЗ КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ ЗАСНОВАНИХ НА *РПКМ-МОМА*

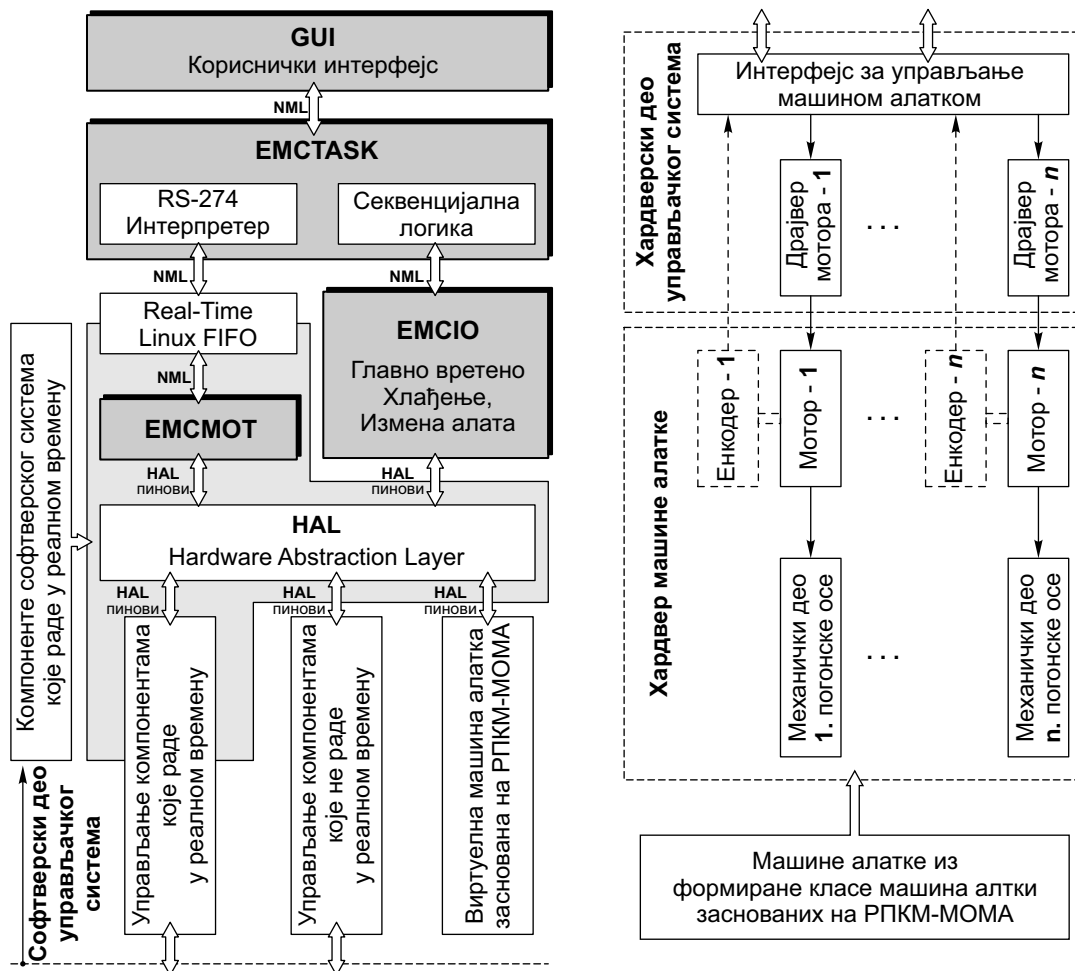
Поред хардверског дела, неизоставни део сваке *CNC* машине алатке су системи за управљање и програмирање *CNC* машином алатком. Домен наведених система у највећој мери обухвата области електротехнике и информационих технологија који су у чврстој спрези са машинством. Данас су за *CNC* машине алатке доступни различити системи управљања и програмирања базирани на *PC* платформи, а користе се како у научно истраживачке сврхе тако и у привреди. Као систем за управљање и програмирање машинама алаткама, који са својим могућностима у потпуности испуњава захтеве неопходне за потпуно конфигурисање једне или чак целе групе машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки заснованих на *РПКМ-МОМА*, наметнуо се софтверски систем отворене архитектуре *LinuxCNC* на *PC* платформи [114]. Софтверски систем *LinuxCNC* се може користити за управљање *CNC* машинама алаткама намењених за конвенционалне и неконвенционалне методе обраде (глодање, стругање, бушење, брушење, сечење ласером, сечење плазмом, сечење жицом, 3D штампа...), за управљање индустријским роботима и машинама алаткама са серијском, паралелном и хибридном кинематиком и др. [114]. Софтверски систем *LinuxCNC* садржи:

- Прилагодљив графички кориснички интерфејс *GUI*¹;
- Интерпретер *G* кода по стандардима *RS-274* и *ISO-6983*;
- Интерполатор путање алата у реалном времену са графичким приказом посредством *GUI*;
- Софтверски имплементираним *PLC*²-ом који се програмира у језику лествичастих дијаграма (*eng. Ladder diagrams*), и користи се за управљање пратећим уређајима. [115]

¹*eng. GUI* (Graphical User Interface) - Графички кориснички интерфејс

²*eng. PLC* (Programmable Logic Controller) - Програмабилни логички контролер

Управљачки систем *LinuxCNC* се састоји од четири основна софтверска модула: **GUI** - Graphical User Interface, **EMCMOT** - Motion Controller³, **EMCIO** - I/O Controller⁴ и **EMCTASK** - Task Coordinatnig Module⁵ [116–119], и омогућава: i) синхронизовано управљање до девет погонских оса, ii) управљање серво и корачним моторима са или без повратне спреге, и iii) управљање машинама алаткама са нетривијалном већ паралелном односно хибридном кинематиком које поседују транслаторне и/или обртне погонске осе. Блок дијаграм структуре управљачког система *Linux CNC* је приказан на слици 8.1.



Слика 8.1 Структура управљачког система заснованог на *LinuxCNC* систему управљања прилагођен формираној класи комплексних машина алатки - (Преузето и дорађено [117])

Модул *EMCMOT* (контролер кретања) је модул који ради у реалном времену и користи *Real-Time Linux FIFO*⁶ бафер да путем *NML*⁷-а са модулом *EMCTASK* врши размену команди, информација о статусу и грешкама у току рада [120,121]. Модул *EMCMOT* је задужен за интерполацију програмиране путање те цикличним прорачунима инверзне и директне

³eng. *Motion Controller* - Контролер кретања

⁴eng. *I/O Controller* - Контролер дискретних улазно/излазних сигнала

⁵eng. *Task Coordinatnig Module* - Контролер процеса

⁶eng. *FIFO (First-In-First-Out)* - Метод управљања подацима и процесима

⁷eng. *NML (Neutral Message Language)* - Неутрални језик порука

кинематике, кроз низ међупозиција и оријентација, алат доводи у програмирану позицију и оријентацију. У оквиру једног циклуса, користећи једначине *ДКП*-а, модул *ЕМСМОТ* према тренутним вредностима унутрашњих координата израчунава позицију и оријентацију алата. На основу тренутне позиције и оријентације алата, користећи једначине *ИКП*-а, *ЕМСМОТ* израчунава нове вредности унутрашњих координата и формира одговарајуће сигнале који се користе за управљање актуаторима погонских оса.

Модул *ЕМЦИО* је задужен за управљање *I/O*⁸ функцијама које нису повезане са кретањима погонских оса машине алатке [118,120]. Према слици 8.1, модул *ЕМЦИО* управља периферним уређајима као што су измењивачи алата, главно вретено, *СВЕ-СТОП* итд. Комуникација између модула *ЕМСМОТ*, модула *ЕМЦИО* и хардвера машине се одвија путем *HAL*⁹-а [122]. Веза између управљачког система *LinuxCNC* и хардвера машине се остварује преко програмабилних *HAL* пинова и хардверских интерфејса. Софтверски систем *LinuxCNC* преко *HAL* пинова управља радом различитих актуатора машине алатке као што су корачни мотори, серво мотори, хидраулички и пнеуматски цилиндри итд. Осим са актуаторима, софтверски систем *LinuxCNC* је преко *HAL* пинова повезан и са мерним системима чиме се остварује потпуна контрола над целим хардвером машине. Преко [122]-а, остварује се веза између модула *ЕМСМОТ* и виртуелне машине алатке која се погони идентичним сигнаlima као и реална машина.

EMCTASK (Task Executor), је модул који врши интерпретацију *G* и *M* функција *G-кôд* програма те их у одговарајућим тренуцима прослеђује модулима *ЕМСМОТ* и *ЕМЦИО* [119].

Модул *GUI* је намењен за реализацију припремних радњи које су неопходне за исправно извршење припремљеног *G-кôд* програма. Покретање иницијализације машине, довођење оса машине у положаје којима се дефинише позиција координатног система обратка $\{W\}$ односно *G55* (или други) и учитавање и покретање припремљеног *G-кôд* програма су припремне радње које се реализују помоћу модула *GUI*. Модул *GUI* посредством графичког приказа реализоване путање алата омогућава праћење рада машине у реалном времену.

8.1 Конфигурисање управљачког система

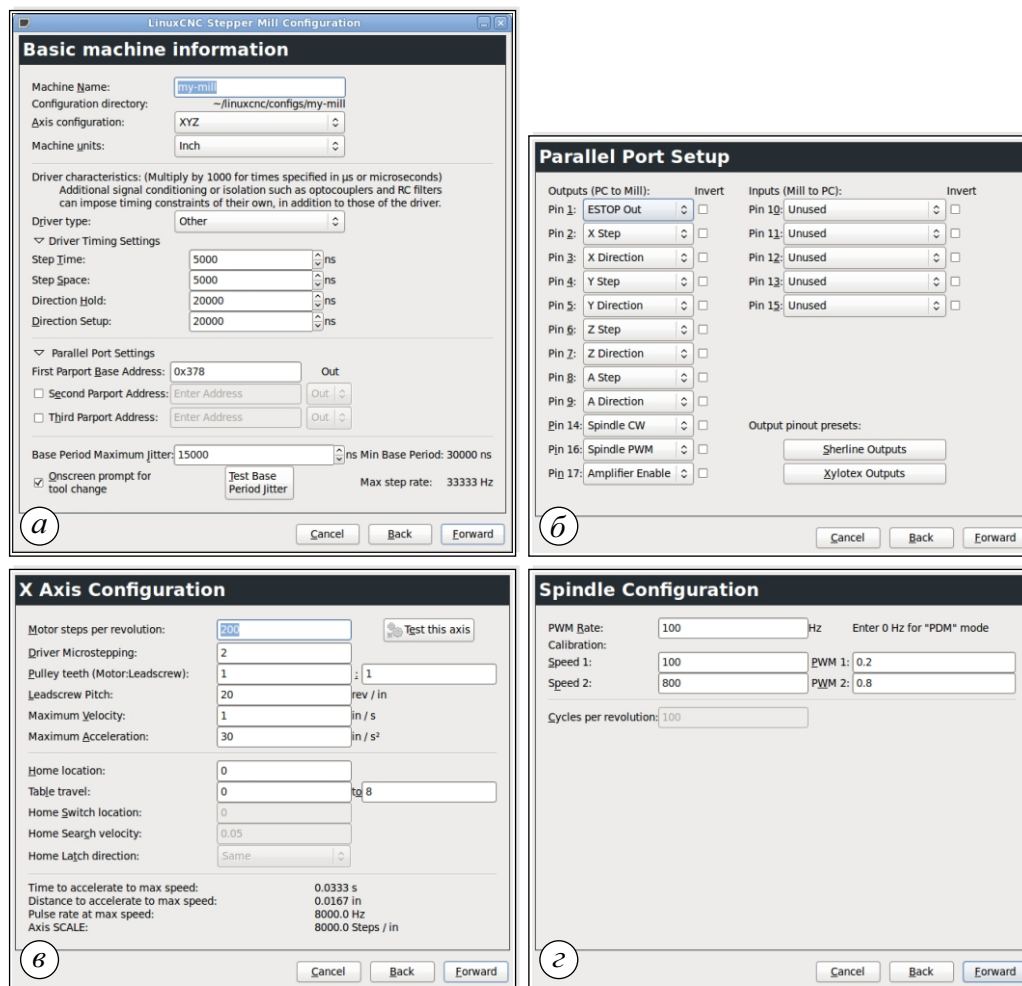
Конфигурисање управљачког система подразумева формирање управљања које одговара хардверу машине алатке. Развој управљачког система базираног на софтверском систему *LinuxCNC* се одвија према успостављеној методологији конфигурисања која обухвата: i) Формирање конфигурационог директоријума и генерисања конфигурационих датотека; ii) Имплементација једначина инверзне и директне кинематике. Кроз *Configuration Wizard*¹⁰ [123], приказан на слици 8.2, конфигурисање управљања се одвија у неколико корака. На самом почетку се дефинише конфигурација машине, број погонских оса, а затим врсте и основни параметара рада мотора (слика 8.2.a). У наставку конфигурисања, дефинишу се сигнали који се доводе

⁸eng. *I/O (Input/Output)* - Улазни/Излазни

⁹eng. *Hal (Hardware Abstraction Layer)* - Део *LinuxCNC* система задужен за проток информација

¹⁰eng. *Configuration Wizard* - Водич за конфигурисање или конфигуратор

на пинове паралелног порта преко кога је машина алатка повезана са управљачким системом *LinuxCNC* (слика 8.2.б). Након конфигурисања паралелног порта, дефинишу се параметри свеке од погонских оса и параметри главног вретена (слике 8.2.в и 8.2.г). Формирањем управљања помоћу конфигуратора, генеришу се конфигурационе датотеке за машину алатку са тривијалном кинематиком. Имплементирањем изведених једначина *ИКП*-а и *ДКП*-а у *LinuxCNC* управљачки систем, формира се управљање за одговарајућу машину [124].



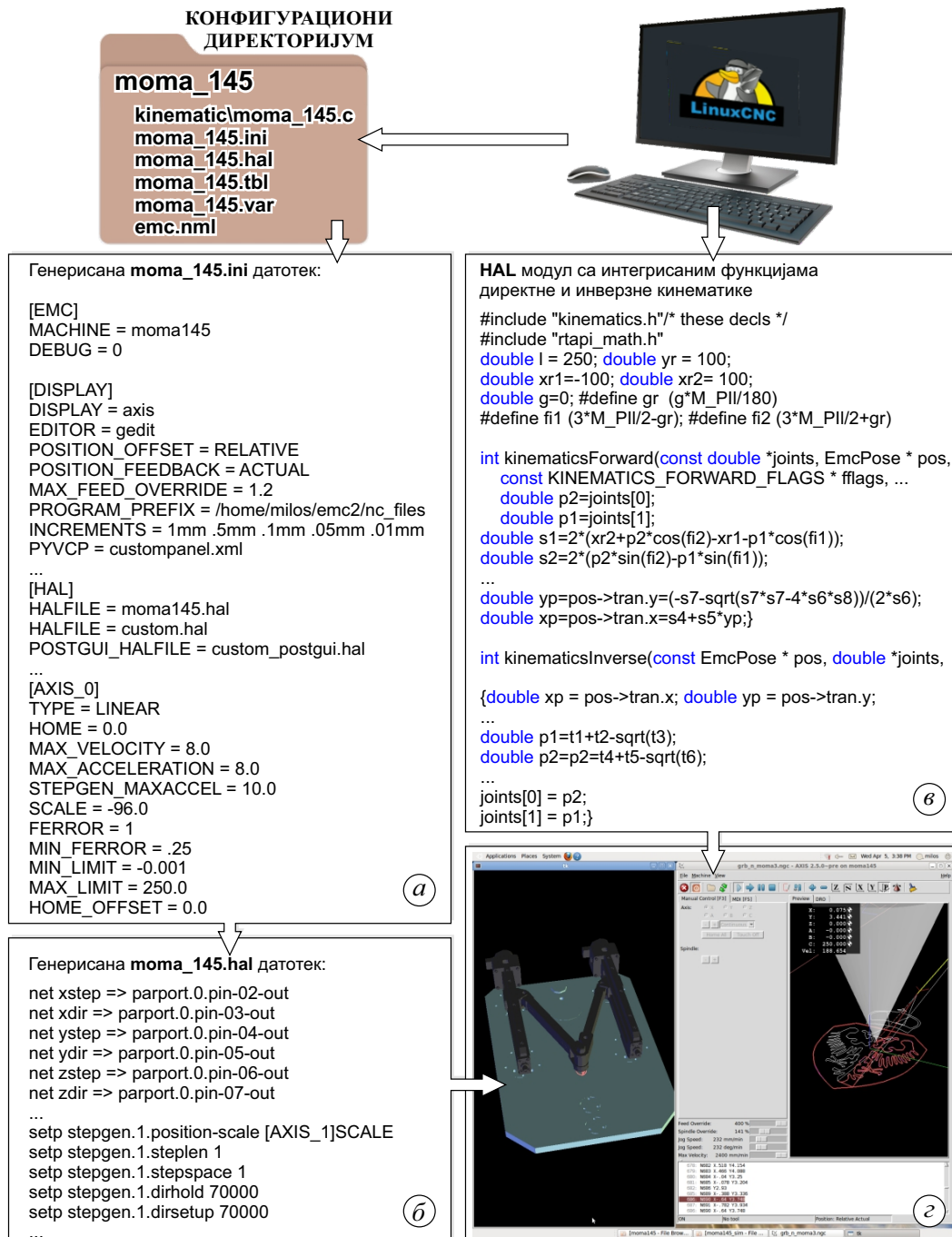
Слика 8.2 Конфигуратор управљачког система *LinuxCNC*: а) Основне информације о машини; б) Подешавање паралелног порта DB-25; в) Конфигурисање погонске осе; г) Конфигурисање главног вретена (Преузето и дорађено [123])

На слици 8.3 је приказан резултат конфигурисања управљачког система за *РПКМ-МОМА* према описаној методологији, а саставни део конфигурационог директоријума су:

- Датотека са екстензијом *.c која садржи изведене једначине кинематичких проблема (3.7) до (3.10) преведене у одговарајући формат, и налази се у поддиректоријума *kinematic*;
- Конфигурациона датотека са екстензијом *.ini у којој се налазе подаци о броју оса машине алатке као и њихове ознаке (за *РПКМ-МОМА*, X и Y). За сваку од оса машине, дефинисане су границе, максимална брзина и убрзање. У *.ini датотеци, за погонске осе означене са

JOINT_0 и *JOINT_1*, налазе се подаци о: типу погонске осе, максималним брзинама и убрзањима, границама ходова, коефицијенту скалирања итд;

- Датотека са екстензијом **.hal* која обезбеђује везе између софтверског управљачког система, хардверског дела машине алатке и корисничког интерфејса путем дефинисаних физичких и софтверских (*Hal*) пинова. На основу параметара који се налазе у **.hal* датотеци, преко дефинисаних пинова, обезбеђен је ток информација и сигнала од управљачког система ка актуаторима у једном смеру као и од сензора машине алатке ка управљачком систему у другом смеру.



Слика 8.3 Конфигурисање управљања за РПКМ-МОМА

8.2 Конфигурисање виртуелне машине

Једна од предности управљачког система *LinuxCNC* је могућност конфигурисања виртуелне *CNC* машине која осим програмиране путање алата, у реалном времену симулира рад стварне машине и то на основу истих информација и сигнала којима се управља и стварном машином. Према слици 8.1, виртуелна машина информације и сигнале добија од *Hardware Abstarction Layer*-а путем *HAL* пинова. Конфигурисање виртуелне машине се врши помоћи *Vismach* модула који је саставни део *LinuxCNC* система [125]. *Vismach* модул је скуп *Python* функција заснованих на *OpenGL*¹¹-у које се користе за креирање 3D модела, а потом и за приказ рада машине у реалном времену [126] [127]. Конфигурисање виртуелне машине обухвата:

- **Креирање *HAL* пинова** помоћу којих се касније врши дефинисање *HAL* кретања оса виртуелне машине. Пример у наставку приказује поступак креирања *HAL* пинови [126].

```
...
c.newpin("joint0", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint1", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint2", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
...
```

- **Креирање саставних делова** виртуелне машине се може вршити на два начина. Први и једноставнији начин је да се постојећи 3D модели саставних делова машине увезу у *Python* скрипту и то у формату *AsciiSTL* или *AsciiOBJ* који су препознатљиви за *Vismach* софтверском модулу на начин како је приказано у наставку [126].

```
...
part = AsciiSTL(filename="path/to/file.stl)
part = AsciiSTL(data="solid part1 facet normal ...")
part = AsciiOBJ(filename="path/to/file.obj)
part = AsciiOBJ(data="v 0.123 0.234 0.345 1.0 ...")
...
```

Други начин за конфигурисање виртуелне машине алатке је креирање и међусобно повезивање упроштених саставних делова виртуелне машине у самом *Python* окружењу користећи геометријске примитиве као што су цилиндри, сфере, призме, плоче троугластог облика итд. употребом синтаксе *Python* програмског језика као у наредном примеру [126].

```
...
cylinder = CylinderX(x1, r1, x2, r2)
cylinder = CylinderY(y1, r1, y2, r2)
cylinder = CylinderZ(z1, r1, z2, r2)
...
```

¹¹eng. *OpenGL* - Програмска библиотека која се користи за рендеровање 2D и 3D графике

```

...
sphere = Sphere(x, y, z, r)
box = Box(x1, y1, z1, x2, y2, z2)
triangle = TriangleXY(x1, y1, x2, y2, x3, y3, z1, z2)
triangle = TriangleXZ(x1, z1, x2, z2, x3, z3, y1, y2)
triangle = TriangleYZ(y1, z1, y2, z2, y3, z3, x1, x2)
...

```

За потребе каснијег формирања склопа виртуелне машине као и за потребе дефинисања кретања покретних делова којима се симулира рад виртуелне машине, неопходно је позиционирати и оријентисати дефинисане саставне делове виртуелне машине на начин како је приказано у наставку [126].

```

...
part1 = Translate([part1], x, y, z)
part1 = Rotate([part1], theta, x, y, z)
...

```

- **Дефинисање кретања** подразумева дефинисање могућих кретања (транслација или ротација) појединих делова виртуелне машине у оквиру склопа целе виртуелне машине. Кретањима се управља информацијама са *HAL* пинова, а дефинисана кретања се користе при симулацији рада машине алатке односно за приказ виртуелне машине током рада стварне машине. У наставку је приказан начин на који се дефинишу транслаторна и обртна кретања покретних делова машине [126].

```

...
part = HalTranslate([part], comp, "hal_pin", xs, ys, zs)
part = HalRotate([part], comp, "hal_pin", angle_scale, x, y, z)
...

```

- **Формирање склопова** виртуелне машине најпре подразумева обједињавање саставних делова виртуелне машине у више појединачних целина које представљају подсклопове виртуелне машине, а потом и формирања склопа целе виртуелне машине обједињавањем формираних подсклопова и појединачних делова који нису додељени ни једном подсклопу [126].

```

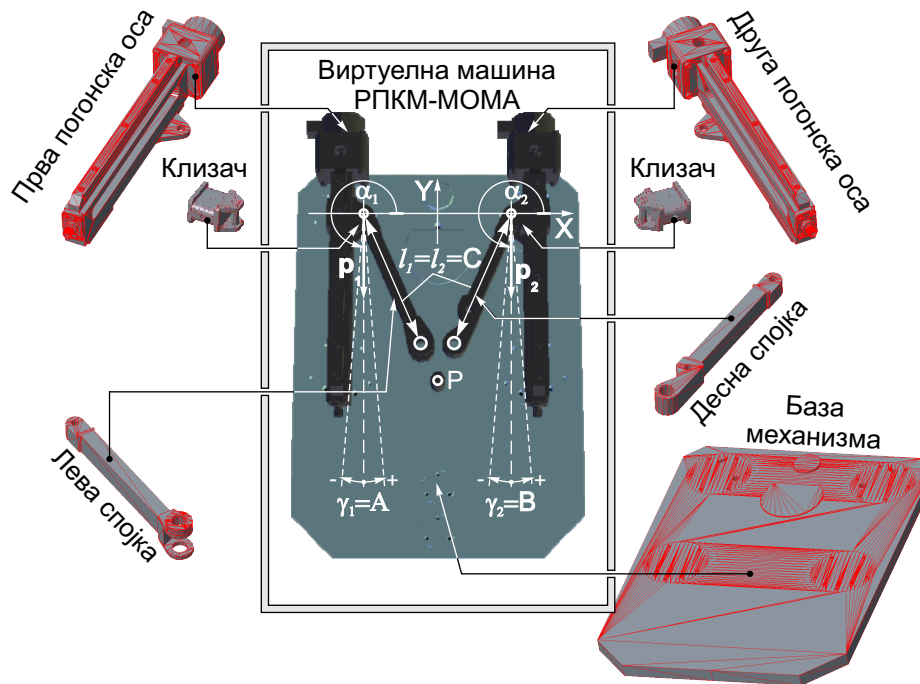
...
part1 = CylinderX(x1, r1, x2, r2)
part2 = Box(x1, y1, z1, x2, y2, z2)
part3 = Collection([part3, part1, part2])
part4 = AsciiSTL(filename="./part4.stl")
part5 = Collection([part5, part3, part4])
...

```

У претходном примеру, приказан је начин на који се формирају склопови (подсклопови) у *Python* окружењу чиме су омогућена кретања свих саставних елемената подсклопа са дефинисаним кретањем једног саставног елемента у оквиру самог подсклопа.

8.3 Виртуелна машина РПКМ-МОМА

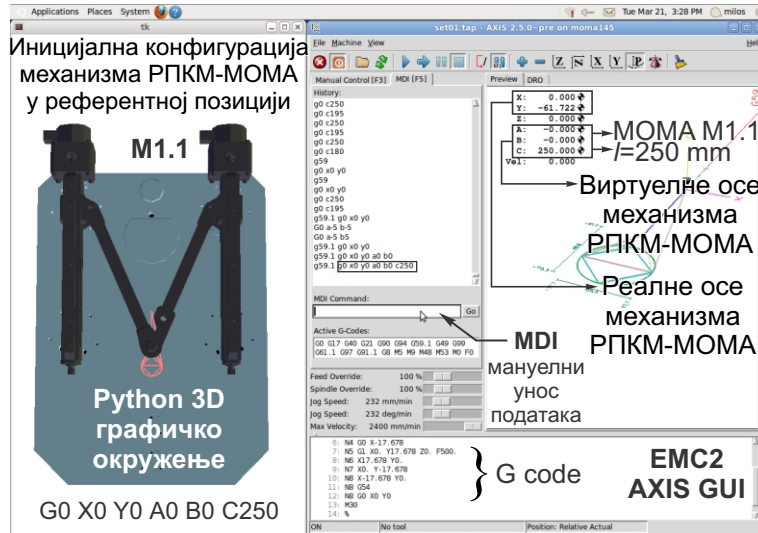
Према претходно описаној процедури и користећи већ припрељене 3D моделе саставних елемената РПКМ-МОМА са слике 3.2 у одговарајућем *AsciiSTL* формату, конфигурирана је виртуелна машина РПКМ-МОМА у *Python* окружењу. Поступак конфигурисања је приказан на слици 8.4, док је резултат конфигурисања виртуелне машине приказан на слици 8.5.



Слика 8.4 Конфигурисање виртуелне машине РПКМ-МОМА

Приликом конфигурисања виртуелне машине са слике 8.4 кориштени су геометријски параметри механизма дати у табели 3.1. Како генерализоване једначине које представљају решења кинематичких проблема (3.7), (3.8) и (3.9) важе за сваку конфигурацију РПКМ-МОМА, створена је могућност и да се формира јединствено реконфигурабилно управљање које се брзо и лако може прилагодити било којој конфигурацији механизма. Како постоје одређена ограничења унутар самог система управљања *LinuxCNC*, то јест управљачки систем може контролисати до девет погонских оса, неопходно је извршити одређена прилагођавања приликом конфигурисања како управљања тако и виртуелне машине. Из тог разлога се из групе различитих конфигурација издвајају конфигурације *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5* као сличне конфигурације које имају исте позиције референтних тачака R_i као и исте вредности геометријских параметара K_{IKP} и K_{DKP} . Узимајући наведене чињенице у обзир, од три типа механизма *МОМА-М1*, *МОМА-М4* и *МОМА-М5* се може конфигурирати 27 конфигурација механизма које се међусобно разликују по дужинама спојки l_i и оријентацијама погонских оса одређених угловима α_i . Управо, наведени параметри су искориштени за формирање виртуелних погонских оса РПКМ-МОМА. Тако, виртуелне осе механизма *A* и *B* се користе за промену оријентације погонских оса, те узимајући у обзир уопштени кинематички модел РПКМ-МОМА са слике 3.5 на основу кога се конфигурише виртуелна машина (слика 8.4),

вредности ових виртуелних оса одговарају помоћним угловима оријентације погонских оса γ_1 и γ_2 . Трећа виртуелна оса C је оса којом се дефинишу дужине обе спојке механизма и има вредност $C=l_1=l_2$. На овај начин је формирана виртуелна машина са пет степени слободe (слика 8.5) од којих се два степена слободe користе за управљање платформом РПКМ-МОМА, а три степена слободe се користе за реконфигурисање виртуелне машине.



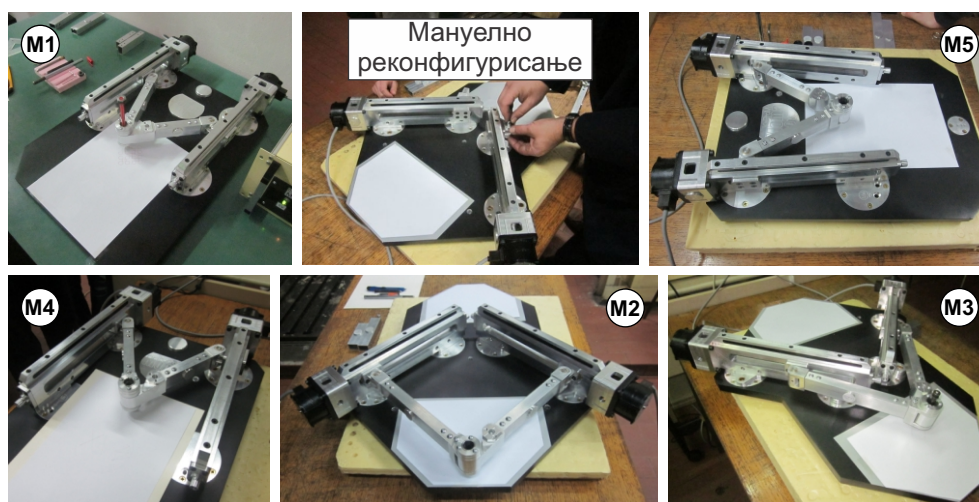
Слика 8.5 Виртуелна машина РПКМ-МОМА у оквиру управљачког система LinuxCNC

Циљ увођења виртуелних оса је да се помоћу њих формира јединствено реконфигурабилно управљање за већи број различитих конфигурација РПКМ-МОМА чиме се избегава формирање више различитих управљања, а за сваку конфигурацију појединачно. Тиме се реконфигурабилност механизма употпуњује, односно реконфигурабилном хардверу механизма је придодато и реконфигурабилно управљање те је поступак реконфигурисања знатно олакшан. Да би овако формирано управљање одговарало конфигурацијама механизма заснованих на три издвојена типа механизма, неопходно је једначине које представљају решења кинематичких проблема ускладити формираној виртуелној машини. Из тог разлога се у једначину 3.4 уместо углова α_1 и α_2 користе углови $3\pi/2 + A$ и $3\pi/2 + B$, а уместо дужина спојки l_i се користи трећа виртуелна оса C па полазне једначине за решавање кинематичких проблема имају нови незнатно измењени облик, а дат је једначинама (8.1). За виртуелну машину РПКМ-МОМА са слике 8.5, у прилогу Пр.1 (Пр.-прилог) је дат садржај датотеке MOMA145.py којиме је конфигурирана виртуелна машина у LinuxCNC управљачком систему.

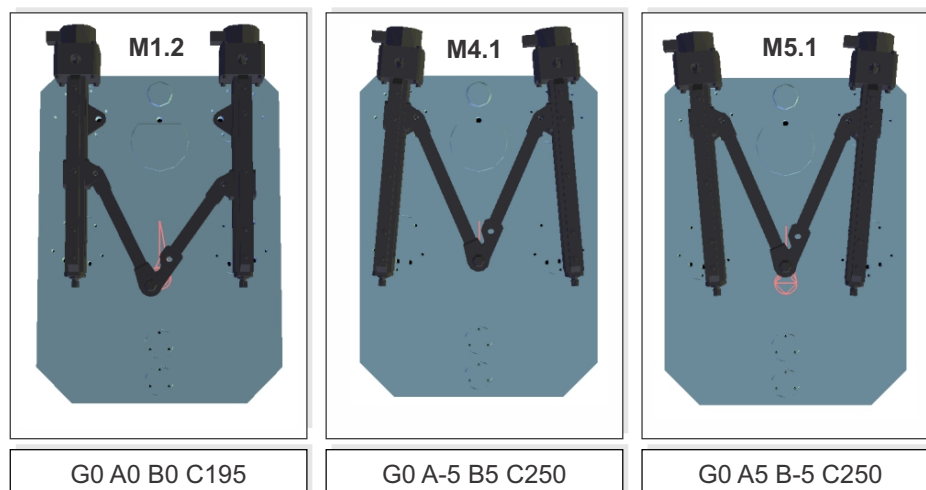
$$\begin{aligned}
 p_1^2 - 2p_1 \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{3\pi}{2} + A\right) & \sin\left(\frac{3\pi}{2} + A\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P - x_{R1} \\ y_P - y_{R1} \end{bmatrix} + \\
 + (x_P - x_{R1})^2 + (y_P - y_{R1})^2 - C^2 = 0
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

$$\begin{aligned}
 p_2^2 - 2p_2 \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{3\pi}{2} + B\right) & \sin\left(\frac{3\pi}{2} + B\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P - x_{R2} \\ y_P - y_{R2} \end{bmatrix} + \\
 + (x_P - x_{R2})^2 + (y_P - y_{R2})^2 - C^2 = 0
 \end{aligned}$$

Решења кинематичких проблема добијених на основу једначина (8.1), у постпроцесорски рачун укључују и виртуелне осе A , B и C чиме се имплементирају једначине кинематичких проблема прилагођавају жељеној конфигурацији машине. Након мануелног реконфигурирања хардверског дела *РПКМ-МОМА* (слика 8.6), управљачки систем се употребом стандардних G -кôд функција реконфигурише и прилагођава тренутној конфигурацији. Реконфигурирањем управљања, мења се и конфигурација виртуелне машине *РПКМ-МОМА* којом се симулира рад реалне машине што се може видети на слици 8.7.



Слика 8.6 Мануелно реконфигурирање хардверског дела *РПКМ-МОМА*



Слика 8.7 Реконфигурирање виртуелне машине *РПКМ-МОМА* стандардним G -кôд функцијама

Са становишта механизма, вредности A , B и C виртуелних оса се могу окарактерисати као спољашње координате механизма с тим да се њиховим задавањем не мења ни једна унутрашња координата механизма већ се решења кинематичких проблема прилагођавају ручном реконфигурирању механизма. У оквиру прилога на крају дисертације је дат садржај датотеке којом је формирано реконфигурабилно управљање *РПКМ-МОМА* као и садржај датотеке којом је према описаној процедури конфигурирана виртуелна машина *РПКМ-МОМА*.

8.4 Програмирање машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки

Предвиђено је да се програмирање машина алатки из формиране класе врши актуеланим и опште прихваћеним методама програмирања тј. помоћу *G-код* програма и употребом његових функција [77]. Резултати досадашњих истраживања везаних за нови начин програмирања применом *STEP-NC* протокола указују на потребу за праћењем трендова из области програмирања *CNC* машина. *STEP-NC* стандард [75,76] је окарактерисан као стандард за напредно управљање машинама алаткама, па је из тог разлога део научно истраживачког рада везаног за ову дисертацију усмерен ка примени тренутних достигнућа из ове области као и постављању основа за будућу примену новог начина програмирања на машине алатке из формиране класе комплексних машина алатки чиме би се цела класа машина алатки сврстала у групу машина алатки нове генерације [80].

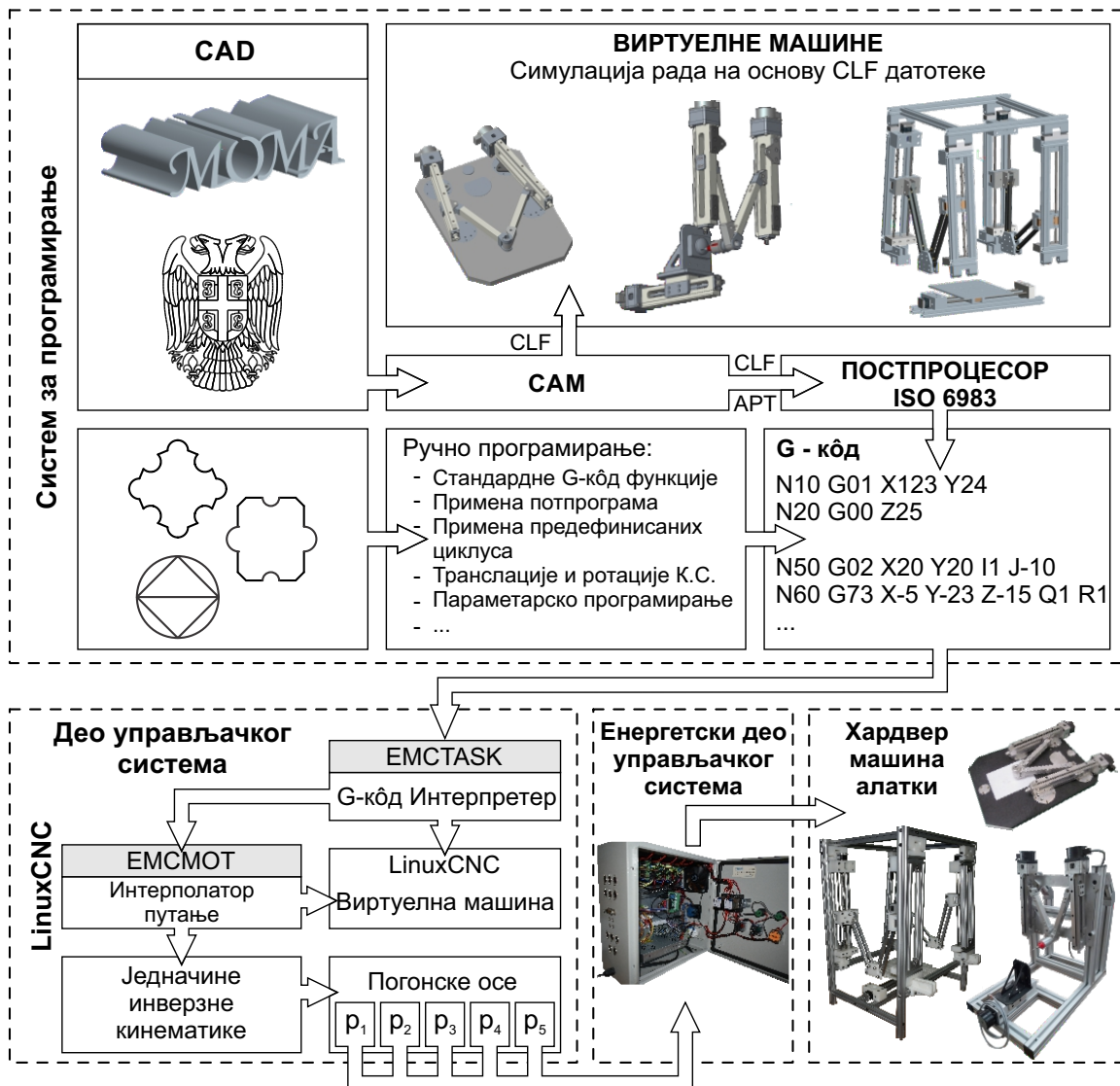
8.4.1 Програмирање према стандарду *ISO-6983*

Програмирање према стандарду *ISO-6983* односно израда програма у *G-код* формату подразумева генерисање програма применом доступног *CAD/CAM* софтверског пакета или ручно (мануелно) писање програма. У оба случаја, израђеним програмима се са скупом функција управљају свим кретањима машине током процеса обраде. То у ствари значи да се израђени програми, без обзира на начин израде, по својим структурама не разликују. Наведени начини израде програма се међусобно разликују само по процедурама које се користе при изради програма. Како је приказано на слици 8.8, припрема програма за машине алатке из формиране класе комплексних машина алатки применом било ког *CAD/CAM* софтверског пакета обухвата следеће кораке:

- израду *2D* или *3D* модела дела који се израђије - *CAD*,
- прописивање технолошког поступка израде на основу геометрије дела дефинисањем: операција, захвата, плана базирања и стезања припремка, алата и режима обраде
- дефинисање путање алата применом одговарајућих стратегијама поштујући прописани технолошки поступак израде - *CAM*,
- израду *CLF*¹² датотеке у *APT*¹³ формату,
- симулација и анализа процеса обраде на виртуелној машини алатки која се са својим геометријским и кинематичким карактеристикама не разликује од машине алатке на којој ће се процес обраде по припремљеном програму реализовати,
- превођење *CLF* датотеке у *G-код* програм применом одговарајућег постпроцесора израђеног по стандарду *ISO-6983* - генерисање *G-код* програма.

¹²eng. *CLF* (Cutter Location File) - Датотека са информацијама о путањи алата

¹³eng. *APT* (Automatically Programmed Tool) - Програмски језик дизајниран за програмирање *CNC* машина



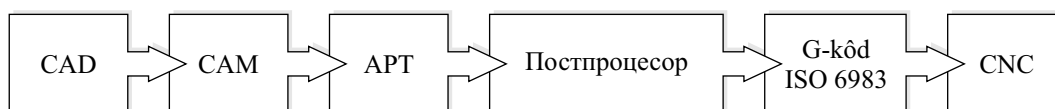
Слика 8.8 Синтеза система за програмирање са управљачким системом LinuxCNC

Насупрот изради програма применом *CAD/CAM* софтверских пакета, приликом ручног писање програма се не користи било какво превођење података из једног облика у други. Ручно писање програма подразумева планирање путање од стране програмера према прописаним режимима обраде, а потом и употреба одговарајучих функција којима ће се планирана путања реализовати. Осим основних, према слици 8.8, ручно програмирање *CNC* машина подразумева и употребу напредних *G* и *M* функција које управљачки систем пружа. Применом нестандартних функција је омогућена употреба параметарског начина програмирања, програма са потпрограмима, предефинисаних циклуса, транслација и ротација координатних система итд., чиме се у извесним случајевима израда *G-код* програма знатно убрзава и поједностављује. У наредном, 9. поглављу, као и у проилозима на крају дисертације су приказани неки од *G-код* програма који су кориштени за верификацију рада машина алатки из формиране класе, а добијени су неком од претходно описаних метода програмирања. Припремљени *G-код* програми (ручно писани или генерисани помоћу *CAD/CAM* софтверског система), након учитавања у *LinuxCNC* управљачки систем су спремни за реализацију након припреме машине

алатке за извршење програма. Према учитаном програму, управљачки систем *LinuxCNC* врши интерполацију путање, а на основу имплементираних једначина кинематичких проблема формира управљачке сигнале којима се управља погонским осама машине алатке и реализују програмирања кретања. Могућности које пружа управљачки систем *LinuxCNC* долазе до пуног изражаја комбиновањем претходно описаних начина програмирања. У наредном поглављу, кроз верификацију рада машина алатки различитих конфигурација, различите намене и различитог броја степени слободе, је приказана израда делова различите геометрије реализацијом *G-код* програма израђених по претходно описаним методама програмирања.

8.4.2 Програмирање према *STEP-NC* протоколу

Програмирање *CNC* машина према *STEP-NC* протоколу или како се још назива *Нови метод програмирања* се у самом приступу разликује од програмирања према стандарду *ISO-6983*. Како је показано у претходним поглављима, програмирање према стандарду *ISO-6983* се заснива на дефинисању кретања алата током процеса обраде, а према прописаној технологији. Од задате геометрије, преко технологије израде па све до реализације израђеног програма на машини (слика 8.9), постоји више конверзија података и информација при чему је ток информација једносмеран [128,129]. Коначни програм који се реализује на *CNC* машини алатки не садржи податке и информације о геометрији дела, о алатима, о машини, о технологији израде дела итд.



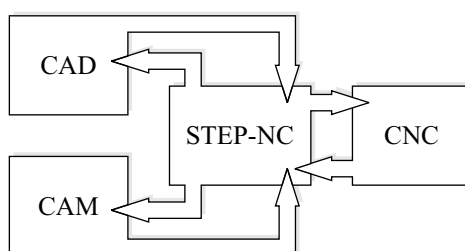
Слика 8.9 Ток информација при програмирању и реализацији програма израђених према стандарду *ISO-6983* (Преузето и дорађено [128,129])

Израда програма према *STEP-NC* протоколу се као код програмирања према стандарду *ISO-6983* заснива на геометрији дела која се посматра као геометрија сачињена од више геометријских примитива (елементарних геометријских облика) које треба направити. Елементарни геометријски облици (примитиви) као што су цеп, жљеб, ребро, степеник, отвор, рупа, навој, равна површина, сфера итд. по аналогији са израдом *3D* модела дела применом *CAD* софтверских пакета, носе назив *Feature*¹⁴-и или *Објекти*. Сходно томе, израда програма према *STEP-NC* протоколу (у оквиру кога је дефинисана израда сваког појединачног елементарног дела геометрије односно израда сваког појединачног *Објекта*) се назива *Објектно програмирање*. Пошто се облици сваког од наведених елементарних примитива могу описати неком математичком релацијом, а димензије одређеним додељеним вредностима, делови *STEP-NC* програма у одређеној мери подсећају на параметарске програме кориштене за верификацију рада машина алатки из формиране класе комплексних машина

¹⁴eng. *Features* - Делови геометрије *3D* модела

алатки, дате у прилозима *Пр.2* и *Пр.4* (*Пр.*-прилог). Ова чињеница може представљати добру основу за будућа истраживања везана за нови начин програмирања, а за сада се за потребе ове докторске дисертације примењују тренутно доступни начини програмирања према *STEP-NC* протоколу као и реализација припремљених програма.

STEP-NC обезбеђује интерфејс који пружа двосмерну размену информација високог нивоа између *CAD/CAM* система и управљачког система *CNC* машине [84,78]. Информације о алату, припремку, геометрији дела са свим припадајућим геометријским примитивима, технологији израде итд. су информације високог нивоа које се крећу кроз затворену петљу машинског система [130,131] и то од *CAD/CAM* система до управљачког система *CNC* машине и обратно, а проток информација је двосмерна (слика 8.10).

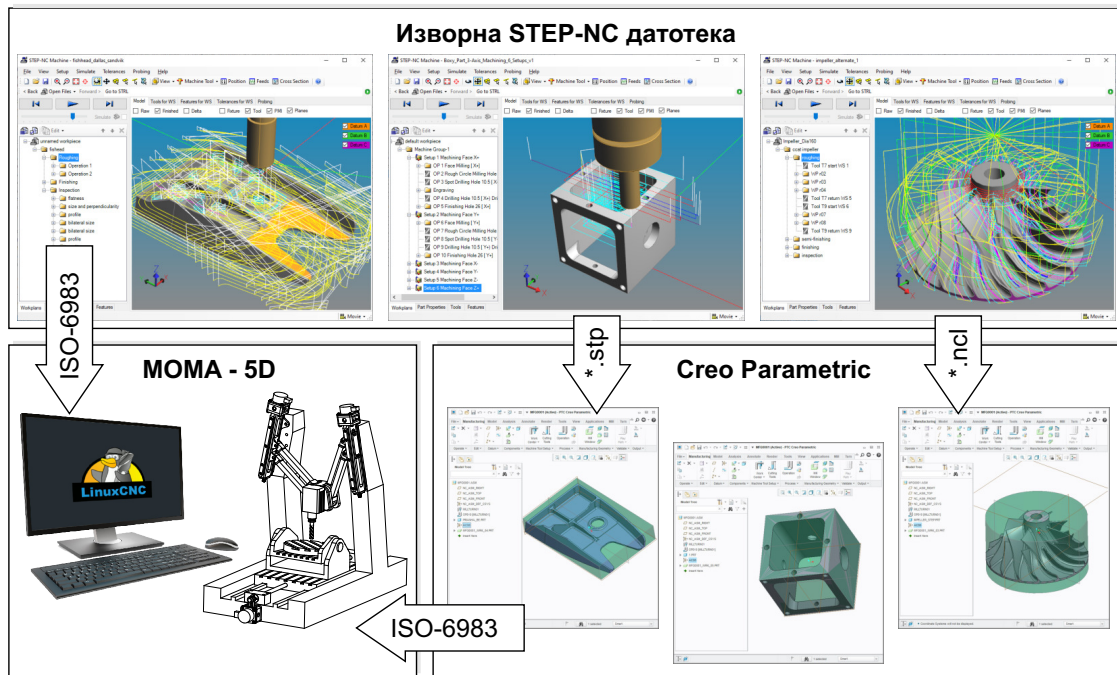


Слика 8.10 Ток информација при програмирању и реализацији програма израђених према *STEP-NC* протоколу (Преузето и дорађено [128],[129])

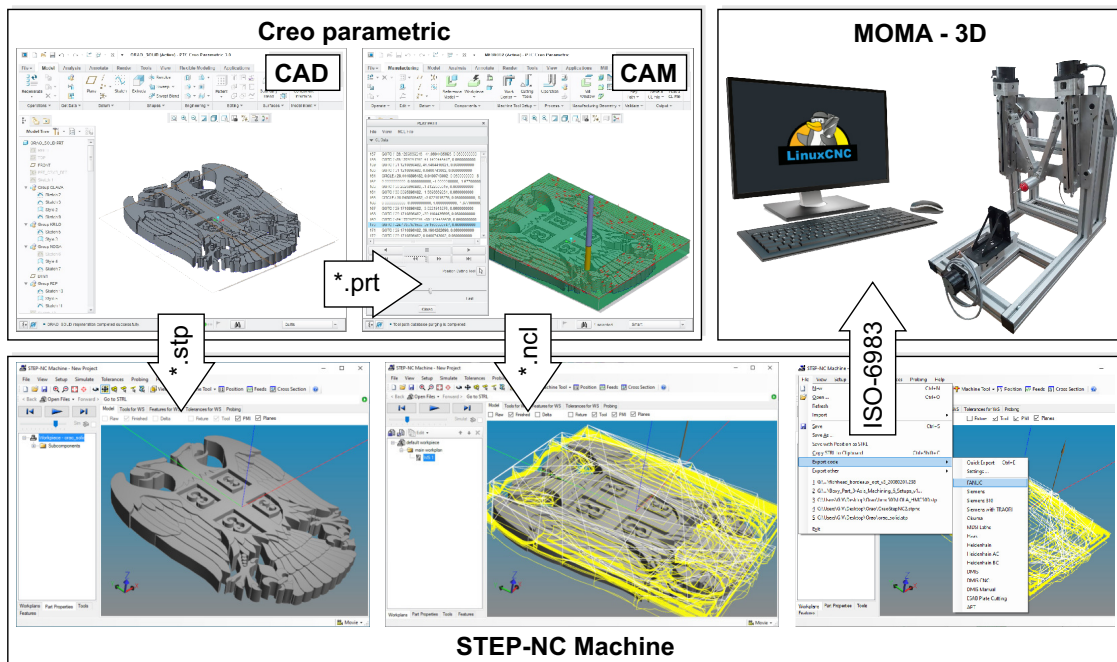
Метод програмирања према стандардима *ISO-14649* и *ISO-10303 AP238* још увек није потпуно применљив јер је и даље у фази истраживања и власништво је неколико истраживачких центара [129]. За сада постоји могућност примене новог начина програмирања према два сценарија и то:

- **Сценарио 1** према коме се користе изворне *STEP-NC* датотеке које осим геометрије садрже све остале информације неопходне за израду дела. Један од софтверских пакета који може интерпретирати и користити информације изворне *STEP-NC* датотеке, а намењен је за управљање *CNC* машинама нове генерације је *STEP-NC Machine*. Софтверски *CAD/CAM* пакети намењени за израду изворних *STEP-NC* датотека нису доступни па се за реализацију сценарија могу користити неке од тренутно доступних датотека [132]. Софтверски пакет *STEP-NC Machine* пружа могућност да се на основу информација о путањи алата у оквиру *STEP-NC* датотеке постпроцесирањем добије програм у *G-код* формату или да се путања алата извезе у **.APT* формату која се потом постпроцесира у неком од доступних *CAD/CAM* софтверских пакета (слика 8.11) чиме се добија програм спреман за реализацију на *CNC* машини.
- **Сценарио 2** се заснива на учитавању *3D* модела у *STEP* формату и датотеке која садржи информације о алату, помоћном прибору и путањи алата (*CL* датотека) у софтверски пакет *STEP-NC Machine*. Учитане датотеке се припремају у неком од доступних *CAD/CAM* софтверских система, а учитавањем у *STEP-NC Machine* је могуће формирати *STEP-NC* датотеку која садржи све неопходне информације за реализацију поступка

обrade. Управљачке јединице које подржавају *STEP-NC* програме су доступне уском броју корисника па из тог разлога није могуће израђивати делове реализацијом програма припремљеног на описан начин. Према *Сценарију 2*, на основу информација о путањи алата која се налази у формираној *STEP-NC* датотеци, а помоћу постпроцеса који је уграђен у *STEP-NC Machine* се генерише *G-кôд* програм за одговарајућу *CNC* машину како је и приказано на слици 8.12.



Слика 8.11 *STEP-NC Machine*: Сценарио 1



Слика 8.12 *STEP-NC Machine*: Сценарио 2

Према оба сценарија показана на сликама 8.11 и 8.12, примена новог начина програмирања према стандарду *ISO-14649* се своди на реализацију програма који одговара стандарду *ISO-6983* односно, *STEP-NC* програм за који тренутно нису доступни управљачки системи се употребом постпроцесора преводи у *G-код* програм који је разумљив за тренутно доступне управљачке системе. Користећи тренутне могућности, нови начин програмирања је примењен и на неке од машина алатки из класе машина алатки заснованих на *PDKM-MOMA*, а добијени резултати су приказани у наредном поглављу.

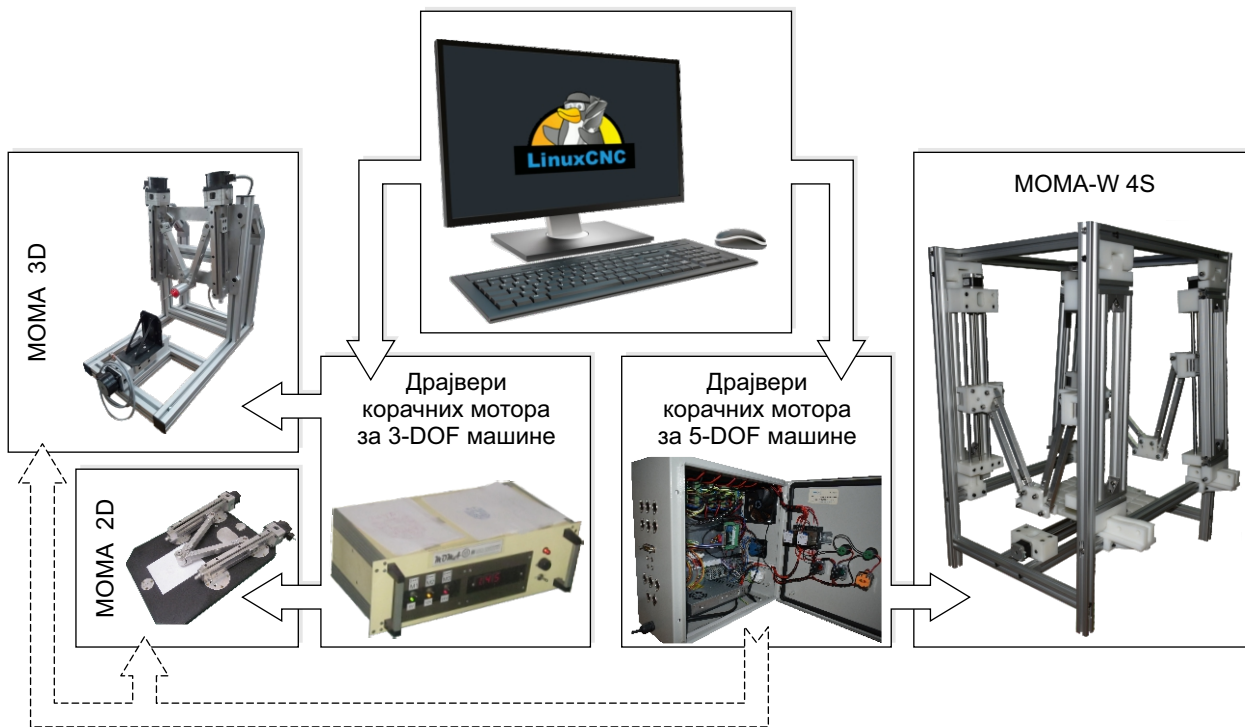
ВЕРИФИКАЦИЈА РАДА МАШИНА АЛАТКИ ИЗ ФОРМИРАНЕ КЛАСЕ МАШИНА АЛАТКИ ЗАСНОВАНИХ НА *РПКМ-МОМА*

У оквиру овога поглавља су приказане експерименталне поставке три машине алатке из формиране класе које се међусобно разликују по конфигурацији, броју степени слобводе и по намени. Верификацијом рада приказаних машина, потврђена је исправност уопштених и генерализованих једначина из поглавља 3.4 и 5.2 које представљају решења ИКП-а и ДКП-а на основу којих је формирано реконфигурабилно управљање. За верификацију рада су одабране следеће машине алатке:

- Двоосна машина алатка *МОМА-2D* која се користи за исцртавање контура на папиру, а заснована је на основној конфигурацији двоосног раванског паралелног механизма са паралелном кинематиком (слика 3.1).
- Троосна машина алатка *МОМА-3D* која се користи за обраду материјала глодањем. Машину алатку чини двоосни равански паралелни механизам са паралелном кинематиком (слика 3.1) основне конфигурације и серијски додата трећа оса. Према оријентацији алата, машина алатка се сврстава у групу машина алатки хоризонталног типа (слика 6.3).
- Вишеосна комплексна машина алатка *МОМА-W 4S* намењена за сечења пенастих материјала усијаном жицом. Вишеосна машина алатка је сачињена од два двоосна реконфигурабилна механизма са паралелном кинематиком проширеног типа (слика 5.4) па је називу *МОМА-W* додата ознака *4S*.

Управљачки систем одабраних машина алатки чине већ описани софтверски систем *Linux-CNC* (EMC2) и хардверски део управљања кога чине драјвери корачних мотора погонских оса. За машине алатке *МОМА-2D* и *МОМА-3D* се користе универзални драјвери корачних мотора

који се могу користити за све машине алатке из формиране класе комплексних машина алатки које имају до три степена слободе (слика 9.1). Постојећи драјвери се не могу користити за управљање машинама алаткама из формиране класе комплексних машина алатки (слике 6.3 до 6.5 и 7.1) које поседују више од три степена слободе. За групу машина алатки, које поседују до пет степени слободе, направљен нов хардверски део управљачког система који се може користити и за управљање машинама алаткама *МОМА-2D* и *МОМА-3D* (слика 9.1).

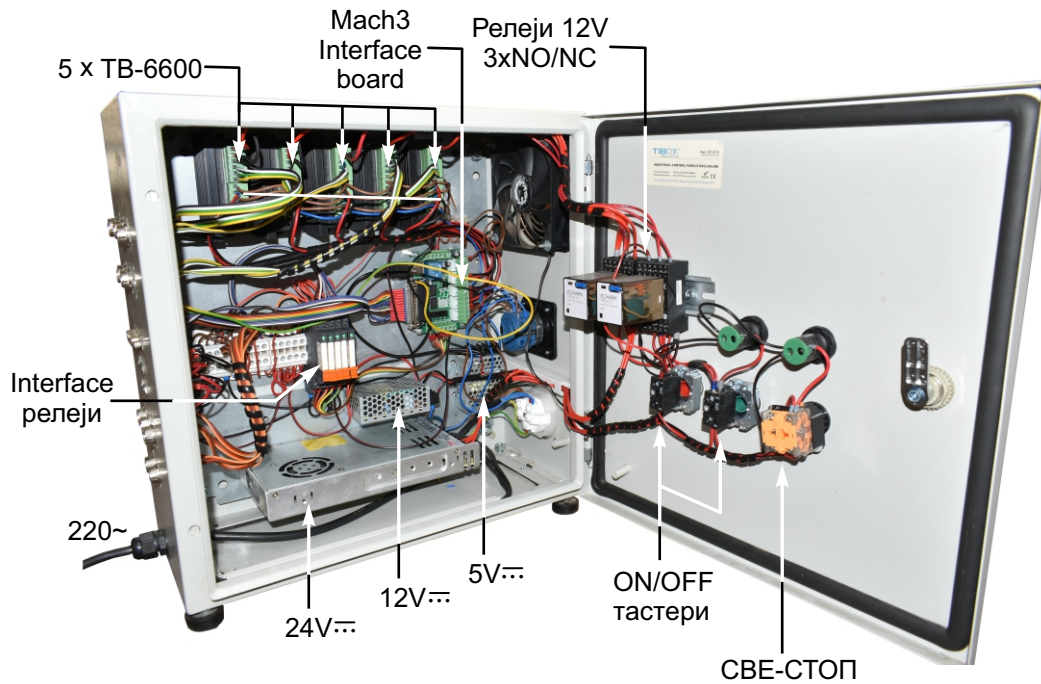


Слика 9.1 Експериментална поставка за верификацију рада машина алатки заснованих на основној и проширеној конфигурацији РПКМ-МОМА

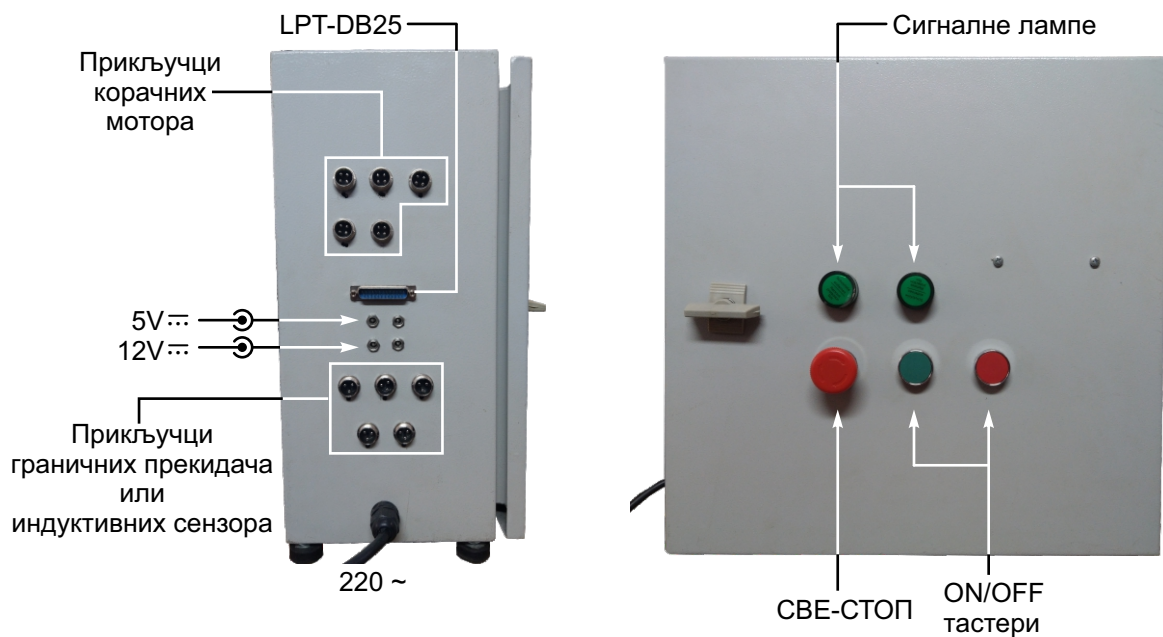
Енергетски део управљачког система са слике 9.2 садржи следеће електро-компоненте: i) Драјвере корачних мотора *TB-6600* [133]; ii) Изворе напајања једносмерне струје напона *24V*, *12V* и *5V* са пратећим прикључцима, iii) Тастере и прекидаче за стављање у погон и искључивање драјвера корачних мотора; iv) Сигурносни "СВЕ-СТОП" прекидач; v) Интерфејс релеји релеји напајања; vi) "MACH3 5Axis Interface Board" [134], [135]. Компоненте енергетског дела управљачког система су преко паралелног порта *LPT-DB25* повезани са рачунаром док су преко прве групе *DIN* прикључака корачни мотори и мотор главног вретена повезани са драјверима, а преко друге групе *DIN* прикључака су индуктивни сезори (или гранични прекидачи) повезани са "MACH3 5Axis Interface Board" (слике 9.2 и 9.3).

Енергетски део управљачког система је пројектован тако да испуњава све захтеве који су неопходни за конфигурисање управљања на бази *LinuxCNC* управљачког система и то за било коју машину алатку из формиране класе комплексних машина алатки. Поштујући ограничења самог софтверског дела управљачког система објашњена у поглављу 8.3, енергетски део управљачког система са конфигурисаним реконфигурабилним управљањем у

оквиру софтверског дела управљачког система чини једну целину и може се користити за било коју групу машина алатки без икаквих потреба за накнадним изменама и надоградњама. Енергетски део управљачког система се може користити и уз друге софтверске системе намењене за управљање *CNC* машина као што су *Mach3 Control System*[135] и *NC-Studio*[136] што ће свакако бити предмет будућих истраживања.



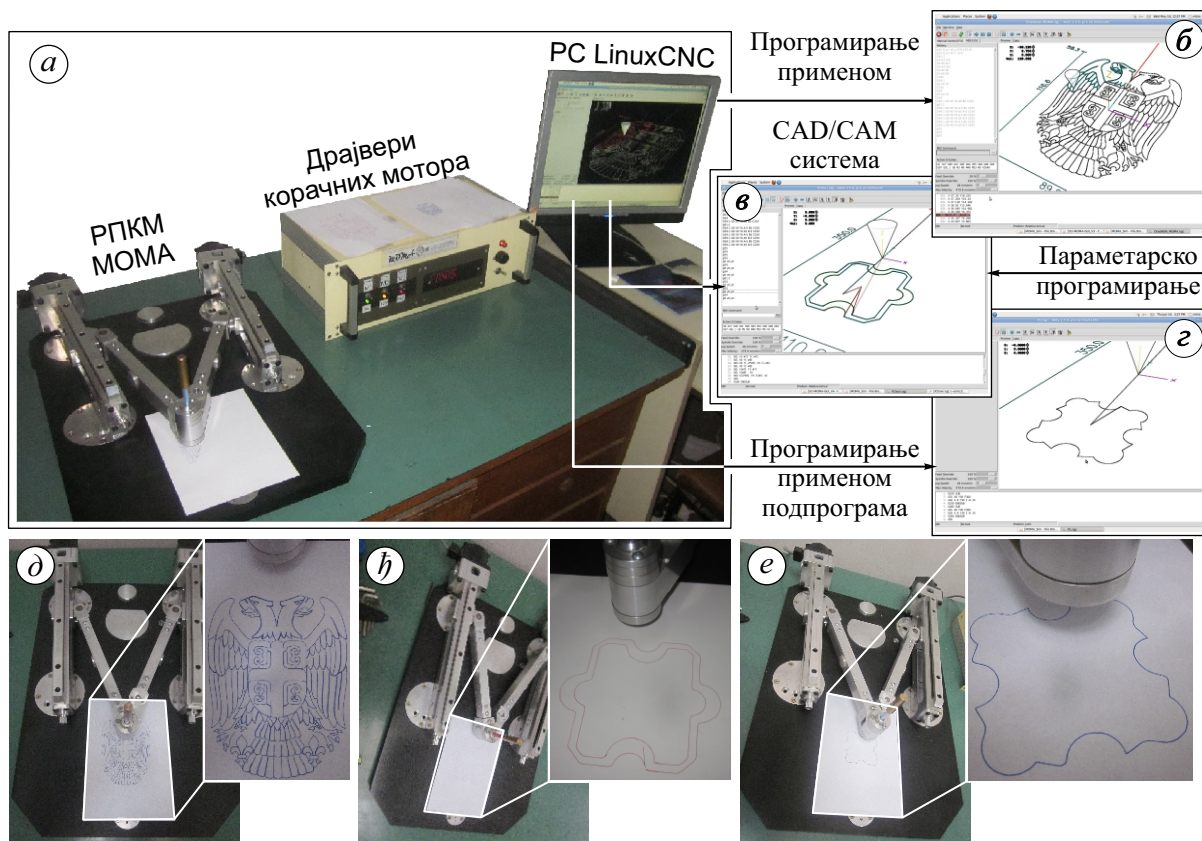
Слика 9.2 Енергетски део управљачког система машина алатки из формиране класе комплексних машина алатки



Слика 9.3 Спољашњи прикључци енергетског дела управљачког система

9.1 Верификација рада машине алатке *МОМА-2D*

Експериментална поставка машине алатке *МОМА-2D* је приказана на слици 9.4.а и чине је: i) двоосни равански реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком - *РПКМ МОМА*; ii) драјвери корачних мотора и iii) *LinuxCNC* управљачки систем. За верификацију рада машине алатке *МОМА-2D* је припремљен већи број програма у *G-код* формату при чему су у оквиру самих програма кориштене основне и напредне функције за програмирање.



Слика 9.4 Верификација рада двоосне машине алатке *МОМА-2D*: а) Експериментална поставка; б), в), з) Путање алата у *LinuxCNC* окружењу; д), њ), е) Реализоване путање алата (Преузето и дорађено [74])

Основни циљеви верификације рада машине алатке *МОМА-2D* су: i) да се потврди исправност изведених генерализованих једначина кинематичких проблема; ii) да се за формирано реконфигурабилно управљање потврде постављене тезе; iii) да се потврди идентичан начин програмирања традиционалних *CNC* машина са серијском кинематиком и машина алатки заснованих на *РПКМ-МОМА* без обзира на саму конфигурацију механизма. Исто тако, верификацијом рада машине алатке *МОМА-2D* се потврђује могућност употребе напредних техника програмирања које пружа *LinuxCNC* управљачки систем. Као што је приказано на слици 9.4, програми израђени за верификацију машине алатке *МОМА-2D* су према начину програмирања подељени у три групе и то: i) програми добијени *CAD/CAM* софтверским пакетима; ii) параметарски програми; iii) програми са потпрограмима.

9.1.1 Верификација рада програмима добијених применом *CAD/CAM* софтверских пакета

За израду програма је кориштен софтверски пакет *Creo Parametric* у коме је израђен *CAD* модел контуре на основу кога је у оквиру модула *Manufacturing* генерисан програм за троосну *CNC* глодалицу. Израда *G-код* програма применом различитих *CAD/CAM* софтверских пакета је тренутно актуелна и широко распрострањена метода програмирања *CNC* машина алатки, па се за израду програма применом *CAD/CAM* софтверског пакета *Creo Parametric* дају само најелементарнија објашњења. Путања алата је дефинисана применом *Trajectory* стратегије обраде при чему се водило рачуна о томе да се програм припрема за двоосно раванску машину алатку *MOMA-2D* код које не постоји могућност удаљавања алата (фломастера) од обратка (папира) па се контура мора исцртати у једном потезу. За експеримент је одабрана контура двоглавог орла за коју је на слици 9.4.б приказана путања алата у *LinuxCNC* окружењу, а на слици 9.4.д је приказана исцртана контура.

9.1.2 Верификација рада параметарским програмима

Параметарски програми су програми намењени за израду делова истог облика али различитих димензија. За разлику од техничких (радионичких) цртежа, геометрија дела на цртежу који се користи за израду параметарског програма није строго дефинисана одређеним бројним вредностима већ параметрима чија се вредност од случаја до случаја може мењати према потребама. Током извршавања програма, управљачки систем машине алатке на основу задатих вредности параметара и на основу успостављених математичких релација између појединих параметара израчунава позицију и/или оријентацију алата коју реализује као да је у питању обичан *G-код* програм. На овај начин се један параметарски *G-код* програм може користити за израду читаве фамилије сличних делова чиме се првенствено у великој мери штеди време у процесу производње, а потом се и у многостепеном олакшава рад програмера и оператера на *CNC* машини алатки. За потребе верификације рада машине алатке *MOMA-2D*, састављен је параметарски програми којим се на папиру исцртавају сличне раванске фигуре. На слици 9.4.в су приказане путање алата у *LinuxCNC* окружењу за две контуре добијене променама вредности параметара у самом програму. Исцртане контуре су приказане на слици 9.4.ђ. Параметарски програм са кратким објашњењима је дат у прилогу *Пр.2*, а облик контуре и успостављени параметри су приказани на слици *Сп.1* (*Сп.*-слика прилога).

У програму датом у прилогу *Пр.2* је приказан један од два начина којим се параметрима додељују одређене бројне вредности. Позивањем потпрограма функцијом "*O100 CALL*", параметрима се по редоследу додељују вредности које су наведене иза функције за позивање потпрограма. Бројне вредности се могу доделити параметрима и директним путем. У овом случају, функције везане за потпрограм (*O100 CALL*, *O100 SUB* и *O100 ENDSUB*) се изостављају, а параметрима се на самом почетку програма додељују бројне вредности на начин

који је приказан у прилогу *Пр.2*. Објашњења за приказани програм су дата у заградама. Први начин којим се додељују бројне вредности параметима је нешто непрегледнији од другог али је зато доста погоднији за примену у случајевима када се потпрограм не налази у главном програму. У случају када се потпрограм смештен у засебну датотеку која је снимљена на рачунару, позива се током извршавања главног програма. Тада не постоји потреба за отварањем и дорађивањем потпрограма пре почетка реализације главног програма. У оба случаја је од изузетне важности да се познаје структура параметарског програма (потпрограма) како би се параметрима који фигуришу у програму доделиле исправне бројне вредности.

9.1.3 Верификација рада програмима са потпрограмима

Често се користе приликом израде делова код којих постоји идентична геометрија на различитим позицијама готовог дела (нпр. отвори, рупе, цепови, острва, канали...). Приликом израде појединачних сегмената, путање алата су исте у локалном координатном систему датог сегмента али на различитим позицијама у односу на координатни систем обратка. У таквим ситуацијама, врх алата се доводи у одговарајућу позицију у координатном систему обратка, а потом се позива потпрограм који се извршава у локалном координатном систему сегмента. Према описаној процедури главни програм се знатно скраћује, а писање програма се поједностављује. На слици *9.4.2* је приказана путања алата у *LinuxCNC* окружењу која се реализује наизменичним позивањем два потпрограма уз употребу функције за ротирање координатног система обратка око осе *Oz* за задати угао. На приказаном примеру, координатни систем припремка је уједно и локални координатни систем. У оквиру прилога *Пр.2* је дат програм са кратким објашњењима, чијом се реализацијом исцртава контура са слике *9.4.e* је. У прилогу *Пр.2* на слици *Cn.2* је скицама приказано на који начин се уз позивање потпрограма након ротације координатног система исцртава жељена контура.

Верификација рада машине алатке *МОМА-2D* са *LinuxCNC* управљачким системом је показала да са становишта програмирања, машине алатке из формиране класе пружају могућности које пружају и комерцијалне машине алатке па самим тиме могу одговорити свим постављеним захтевима. Наведене методе програмирања као и њихова међусобна комбинација ће бити кориштене за верификацију рада и других машина алатки заснованих на механизму *РПКМ-МОМА* које су анализиране у овој докторској дисертацији али и оних машина алатки које ће бити предмет будућих истраживања.

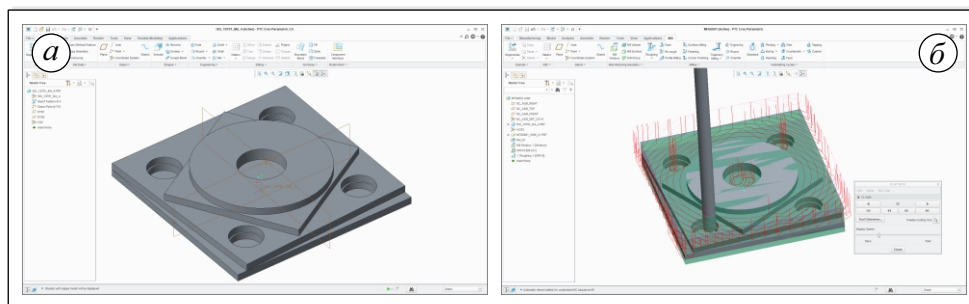
9.2 Верификација рада машине алатке *МОМА-3D*

Као што је већ споменуто, машина алатка *МОМА-3D* је троосна хибридна машина алатка намењена за процес обраде глодањем, а према оријентацији алата се може окарактерисати као глодалица хоризонталног типа. Предвиђено је да се машина алатка *МОМА-3D* користи у едукационе сврхе при чему се осим на конфигурирање реконфигурабилног управљања акценат ставља и на програмирање машине алатке. У складу са објашњењима датим у

поглављу 8.4, за верификацију рада машине алатке *МОМА-3D* су одабрани различити делови, при чеми су програми у *G-код* формату за израду делова припремљени и добијени на три различита начина. За управљање хибридном троосном машином алатком *МОМА-3D* се користи управљачки систем *LinuxCNC*. Реализацијом припремљених *G-код* програма којима се на машини алататки *МОМА-3D* израђују изабрани делови, потврђује се исправност изведених генерализованих једначина кинематичких проблема као и могућност индиректне реализације програма израђених према стандардима *ISO-14649* и *ISO-10303 AP238*.

9.2.1 Верификација рада програмима добијених применом *CAD/CAM* софтверских пакета

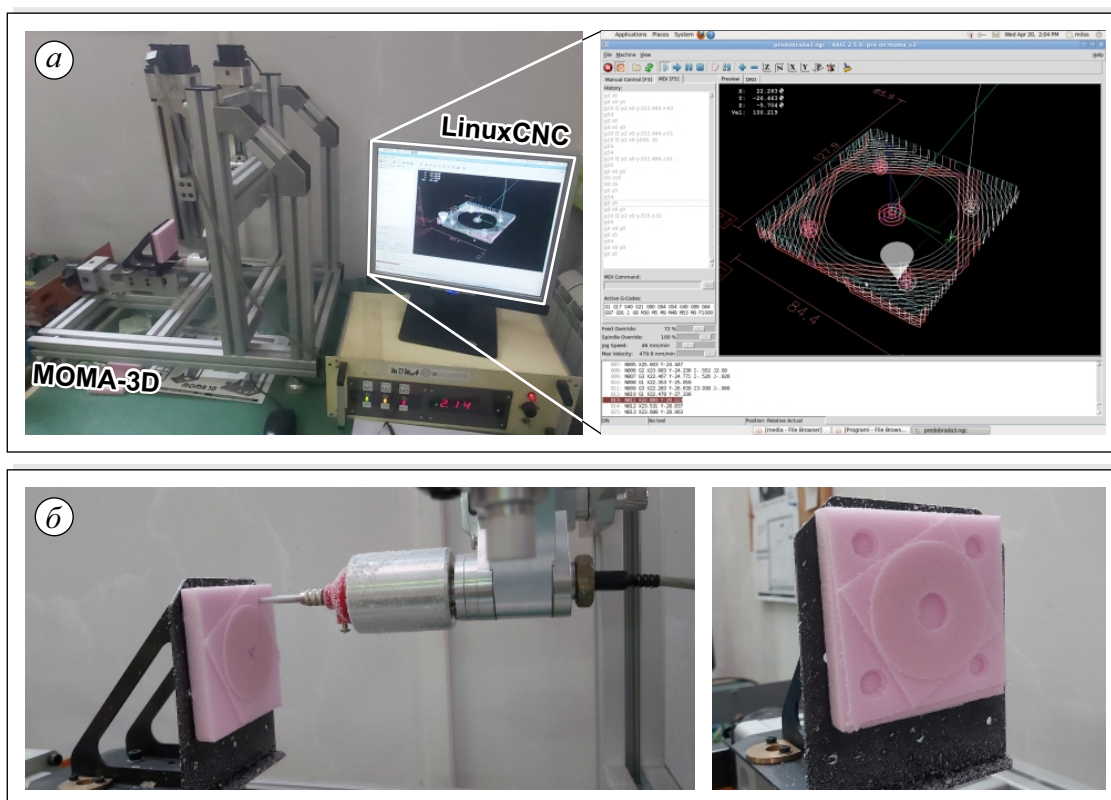
Реализацијом *G-код* програма припремљеног помоћу *CAD/CAM* софтверског пакета се потврђује исправност једначина које су кориштене за конфигурисање реконфигурабилног управљања машине алатке *МОМА-3D*. За конфигурисање управљања су кориштене једначине које представљају решења кинематичких проблема раванског реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком *РПКМ-МОМА* и једначине које представљају решења тривијалних кинематичких проблема треће погонске осе. За верификацију рада машине алатке *МОМА-3D* програмом који је добијен применом *CAD/CAM* софтверског пакета *PTC Creo Parametric*, изабран је тест део приказан на слици 9.5.a, за кога су димензије и облик прописани стандардом *ISO 10791-7:1998* [137].



Слика 9.5 Тест део *ISO 10791-7:1998* - *Creo Parametric* : а) 3D модел; б) Симулација путање за дефинисану технологију израде дела

Тест део са слике 9.5.a са димензијама које прописује стандард *ISO 10791-7:1998* није могуће израдити на машини алатки *МОМА-3D* због величине корисног радног простора машине. Узимајући у обзир резултате анализе величина и облика радних простора различитих конфигурација раванског паралелног механизма *РПКМ-МОМА*, димензије тест дела су умањене и прилагођене конфигурацијама *МОМА-М1.i*, *МОМА-М4.i* и *МОМА-М5.i* ($i=1,2,3$) раванског реконфигурабилног механизма са паралелном кинематиком *РПКМ-МОМА* (слика 3.3). На основу 3D модела тест дела, у софтверском пакету *Creo Parametric* је дефинисан технолошки поступак израде дела који обухвата израду средишње рупе, израду средишњег цилиндричног дела, израду заротираног квадратног дела, израду закренуте две странице

и израду четири рупе на ћошковима дела. Симулација путање алата према дефинисаним стратегијама обраде је приказана на слици 9.5.6. Технолошким поступком израде је дефинисан само један алат (вретенасто глодало пречника $d=3mm$), тако да се може креирати само једна *CLF* датотека у којој се налазе све информације везане за путању алата. Користећи одговарајући постпроцесор имплементиран у софтверски *CAD/CAM* систем *Creo Parametric*, на основу формиране *CLF* датотеке је генерисан програм у *G-код* формату (стандард *ISO-6983*) који машина алатка *MOMA-3D* са *LinuxCNC* управљачким системом може реализовати. На слици 9.6.a је приказана путања алата за уčitан *G-код* програм којим се израђује тест део, а на слици 9.6.б је приказан процес израде тест дела као и израђен тест део.



Слика 9.6 Израда тест дела на машини алатки *MOMA-3D*: а) Путања алата у *LinuxCNC* окружењу; б) Процес израде и израђен тест део

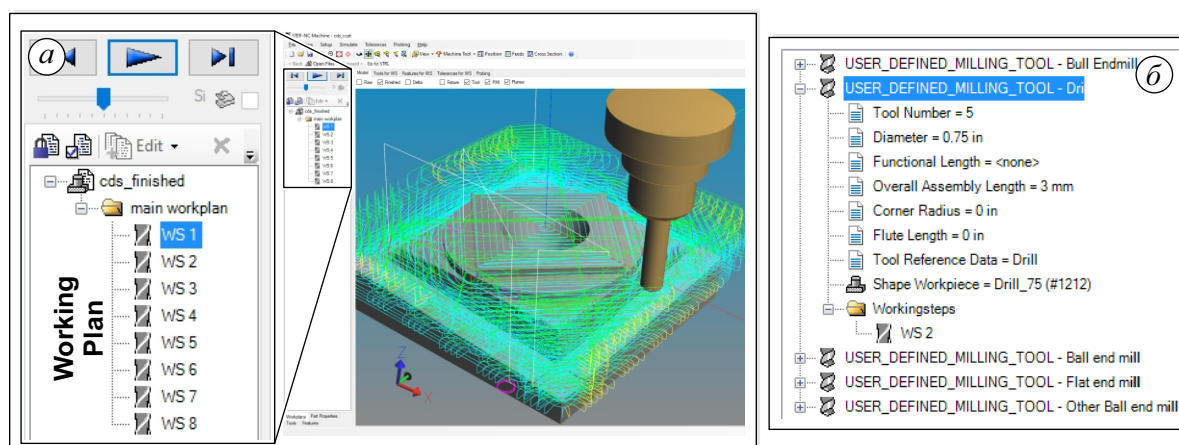
9.2.2 Верификација рада применом *STEP-NC* протокола

Верификација рада машине алатке *MOMA-3D* програмима израђених по стандардима *ISO 14949* и *ISO 10303 AP238* показује могућност примене нове методе програмирања према *STEP-NC* протоколу. Пошто је употреба *STEP-NC* протокола у извесној мери ограничена како у погледу хардвера машина алатки тако и у погледу софтвера, верификација рада машине алатке *MOMA-3D* је урађена на тренутно доступне начине. Према објашњењима датим у поглављу 8.4, користећи софтверски пакет *STEP-NC Machine*, рад машине алатке *MOMA-3D* је верификован реализацијом припремљених програма према описаном *Сценарију 1* и према описаном *Сценарију 2*.

Сценарио - 1

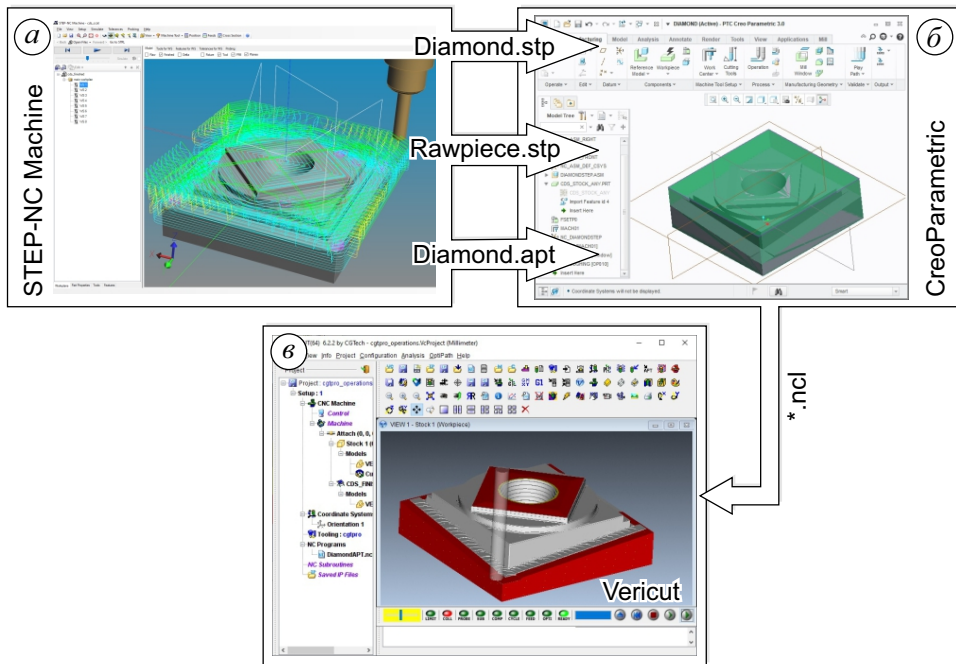
За верификацију рада машине алатке *MOMA-3D* уз примену *STEP-NC* протокола према *Сценарију 1*, изабран је пробни део ”*Circle Diamond Square Part*” или како се још назива ”*NAS979*”. За изабран пробни део *STEP-NC* датотека са екстензијом *.238 је доступна за слободно преузимање на [132]. Део *NAS979* је кориштен за најранија теститања *STEP-NC* протокола и то за троосне и петоосне машине алатке па је као такав уз одређене измене погодан и за верификацију рада машине алатке *MOMA-3D*. Екстензија преузете изворне *STEP-NC* датотеке *.238 (по стандарду *ISO 10303 AP238*) исто као и екстензија *.stpnc указује на садржај датотеке који софтверски пакет *STEP-NC Machine* може да интерпретира и реализује.

У оквиру изворне *STEP-NC* датотеке, за пробни део *NAS979* је у оквиру плана обраде (*Working Plan*) дефинисана технологија израде дела. Како је приказано на слици 9.7.a, план обраде се састоји од захвата (*Working Step-WS*), а за сваки од захвата је дефинисан алат којим се захват реализује (слика 9.7.б).

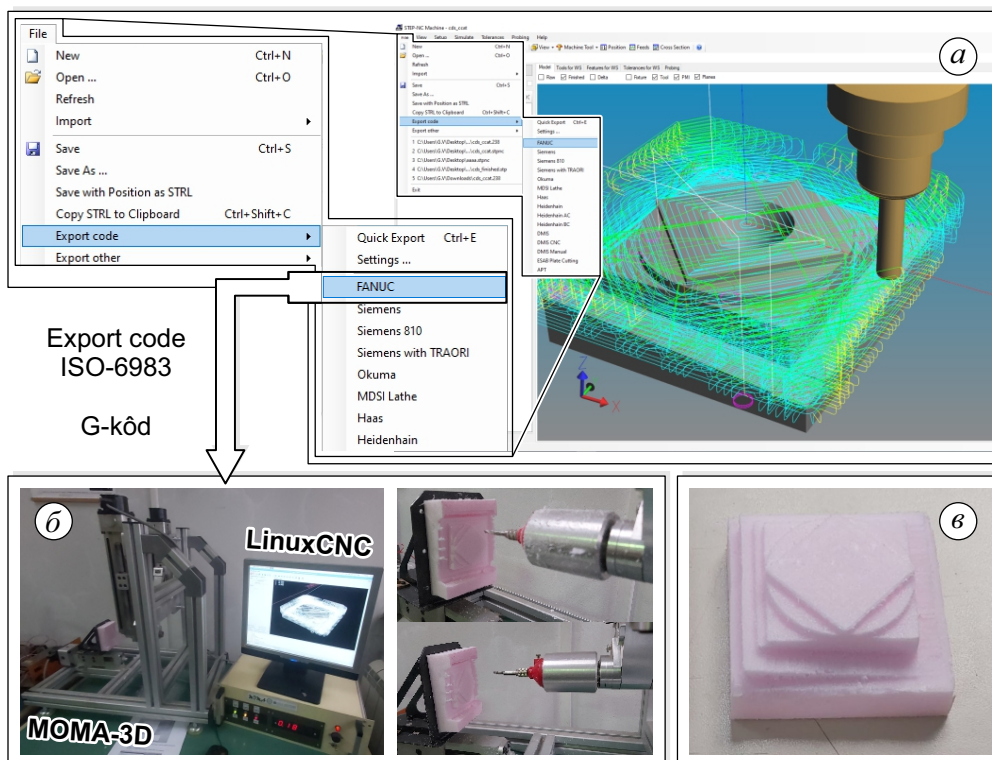


Слика 9.7 *STEP-NC Machine* - Сценарио 1: а) Дефинисани захвати и симулација путање алата за израду дела *NAS979*; б) План алата према дефинисаној технологији израде дела

Пошто са тренутно доступним ресурсима није могуће директно интерпретирати и реализовати изворне *STEP-NC* датотеке, према *Сценарију 1* и могућностима које пружа софтверски пакет *STEP-NC Machine*, верификација рада машине алатке *MOMA-3D* подразумева реализацију *G-кôд* програма генерисаног постпроцесором који је имплементиран у сам софтверски систем *STEP-NC Machine*. Пре саме реализације генерисаног *G-кôд* програма, извршена је провера технологије израде дела помоћу *CAD/CAM* софтверског пакета *Creo Parametric*. Наиме, из софтверског пакета *STEP-NC Machine* су извежене засебне датотеке које описују геометрију издатка, геометрију припремка и дефинисане путање алата (слика 9.8.a), уčitане у софтверски пакет *Creo Parametric* (слика 9.8.б) и на крају проверене симулацијом уклањања материјала (слика 9.8.в). Након провере, користећи постпроцесор за *Fanuc* управљачку јединицу који од свих понуђених највише одговара *LinuxCNC* управљачком систему, генерисан је и реализован *G-кôд* програм на машини алатки *MOMA-3D*. Верификација рада машине алатке *MOMA-3D* по описаној процедури је приказана на слици 9.9.



Слика 9.8 Провера путање алата дефинисане у изворној STEP-NC датотеци: а) Симулација путање алата у STEP-NC Machine; б) Creo Parametric - CAM модул са увеженим датотекама из STEP-NC Machine софтверског пакета; в) Vericut - Симулација скидања материјала

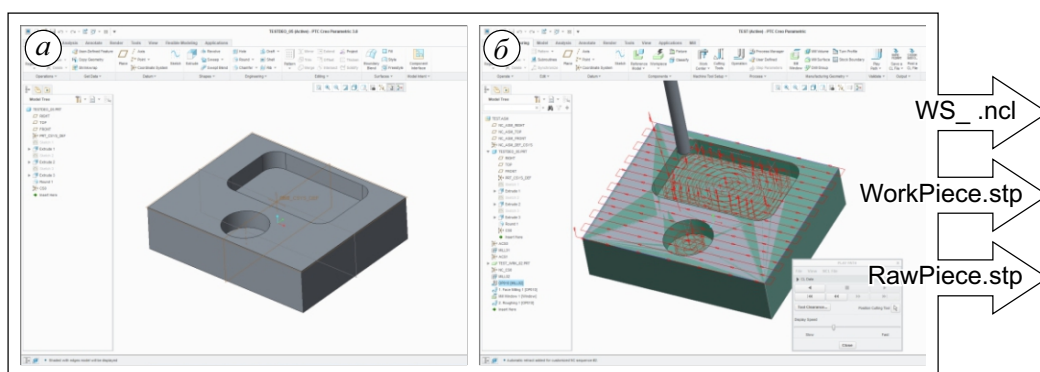


Слика 9.9 Верификација рада машине алатке MOMA-3D применом STEP-NC протокола према Сценарију 1: а) STEP-NC Machine са учитаном изворном датотеком; б) Процес обраде на машини алатки MOMA-3D; в) Израђен део

Технологија израде дела са слике 9.7 обухвата и грубу и фину обраду конусног удубљења на средини дела вретенастим глодалом са заобљеним ивицама. Због непоседовања одговарајућег алата, из плана обраде су одстрањени захвати којима се израђује конус, а потом је на већ описан начин генерисан *G-код* програм за израду дела на машини алатке *MOMA-3D*. Анализом геометрије дела, установљено да габаритне мере превазилиазе радни простор машине алатке па је применом одговарајућег софтвера добијени *G-код* програм скалиран како би се могао реализовати на машини алатке *MOMA-3D*. Резултат верификације, односно израђен део са описаним изменама програма је приказан на слици 9.9.в.

Сценарио - 2

Тест део (слика 9.10.а) за кога је геометрија прописана стандардом *ISO 14649-11:2004* [138] је кориштен за верификацију рада машине алатке *MOMA-3D* уз припрему *STEP-NC* програма према *Сценарију - 2*.

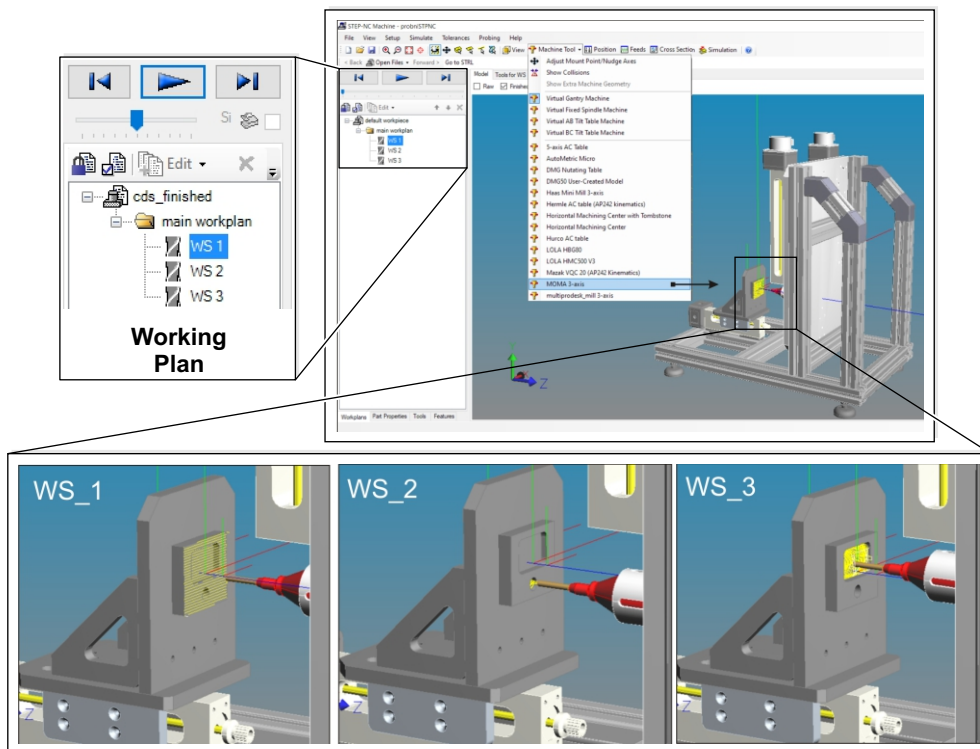


Слика 9.10 Тест део *ISO 14649-11:2004* - *Creo Parametric* : а) 3D модел; б) Симулација путање алата током процеса израде дела

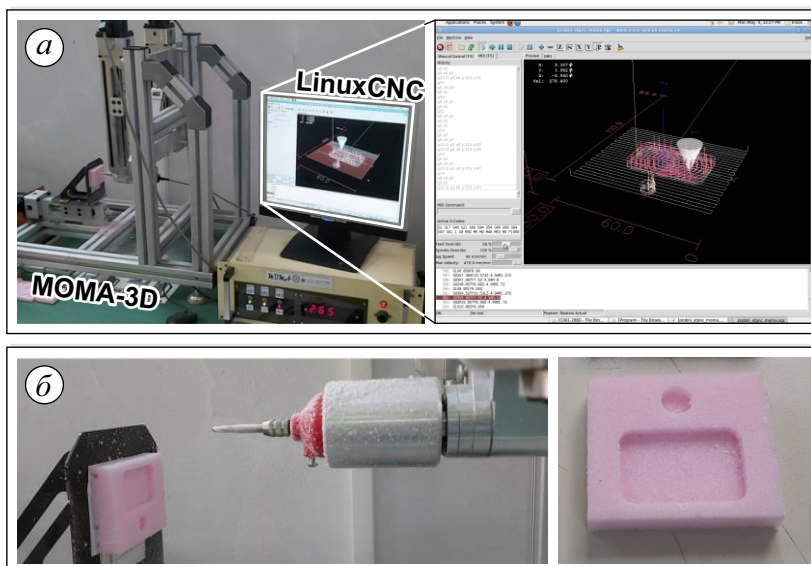
У оквиру *Manufacturing* модула *CAD/CAM* софтверског пакета *Creo Parametric*, дефинисана је технологија израде дела (слика 9.10.б) која обухвата следеће захвате: i)чеона обрада равне површине (поравнавање); ii)израда цепа цилиндричног облика; iii)израда цепа правоугаоног облика. У софтверском пакету *Creo Parametric* је формирана *.ncl која садржи информације о путањи алата, датотека *WorkPiece.stp* која садржи информације о облику и димензијама дела и датотека *RawPiece.stp* која садржи информације о облику и димензијама припремка. Учитавањем претходно наведених датотека као и претходно припремљеног 3D модела алата у *STEP-NC Machine* софтверски пакет, урађени су сви неопходни кораци за формирање новог пројекта. Уз учитан 3D модел машине алатке *MOMA-3D* из базе доступних машина, добија се симулација процеса израде дела са слике 9.10.а. Снимањем пројекта у одговарајућем формату (са екстензијом *.stpnc или *.238), део са слике 9.10.а је могуће израдити на било којој машини алатки чија управљачка јединица подржава програме израђене према *STEP-NC* протоколу.

Као што је већ споменуто, машина алатка *MOMA-3D* са својом управљачком јединицом не подржава програме израђене по *STEP-NC* протоколу, исто као и у *Сценарију 1* применом одговарајућег постпроцесора имплементираниог у софтверски пакет *STEP-NC Ma-*

chine, генерисан је G -код програм и уčitан у управљачки систем машине алатке *LinuxCNC*. Путања алата у *LinuxCNC* окружењу према G -код програму генерисаном у *STEP-NC Machine* софтверском пакету је приказана на слици 9.12.a, а израђен део је приказани на сликама 9.12.б.



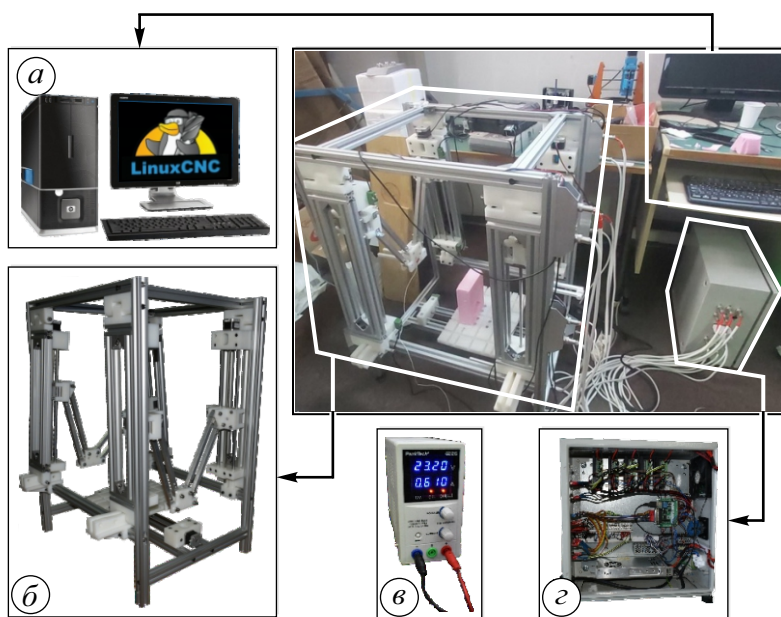
Слика 9.11 Симулација рада машине алатке *MOMA-3D* у *STEP-NC Machine* окружењу - Сценарио 2 - (Преузето и дорађено [139])



Слика 9.12 Верификација рада машине алатке *MOMA-3D* применом *STEP-NC* протокола према Сценарију 2: а) *STEP-NC Machine* симулација путање алата у *LinuxCNC* окружењу; б) Процес обраде на машини алатки *MOMA-3D* и израђен део - (Преузето и дорађено [139])

9.3 Верификација рада машине алатке *МОМА-В 4S*

Експериментална поставка комплексне машине алатке *МОМА-В 4S* коју чине хардверски део машине, управљачки систем и лабораторијско напајање које поседује могућност регулисања једносмерног напона $U=0-30V$ и струје $I=0-10A$ је приказана на слици 9.13. Као алат је кориштена *Cekas* жица пречника $d=0.12mm$, која се због своје отпорности на високе температуре користи за прављење грејача намењених за различите уређаје (грејалице, шпорети, бојлери итд.). Сви делови су израђени са приближно истим режимима обраде и то: јачина струје $I \approx 0.5A$, напон $U \approx 22V$ и брзина помоћног кретања $F \approx 150mm/s$. Наведене вредности су вредности са којима је започет сваки процес обраде, а према потреби су кориговане на напајању (јачина струје I) и/или у *LinuxCNC* окружењу (брзина помоћног кретања F).

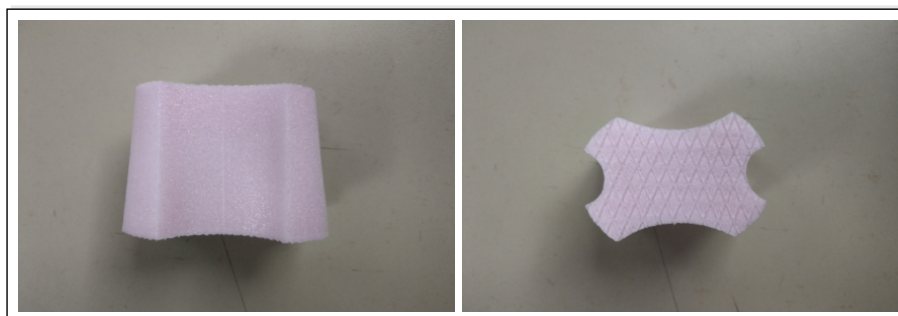


Слика 9.13 Експериментална поставка комплексне машине алатке *МОМА-В 4S*: а) Систем управљања и програмирања заснован на *LinuxCNC* софтверском систему; б) Хардверски део машине алатке; в) Лабораторијско напајање $U=0-30V$ и $I=0-10A$; г) Драјвери корачних мотора

Осим потврде исправности изведених једначина кинематичких проблема комплексне машине алатке *МОМА-В 4S*, верификација рада има за циљ и да се утврде могућности које МА са својим хардверским и софтверским делом пружа. Из тог разлога су одабрани делови различитих облика и димензија, за чију израду су кориштени *G-код* програми добијени раличитим методама програмирања. Реализацијом припремљених програма се обезбеђује само транслаторно кретање алата или транслаторно кретање алата са променом оријентације. Делови који се израђују на комплексној машини алатки *МОМА-В 4S* се могу сврстати у неку од следећих група: делови једноставног облика, делови сложеног облика, танкозиди делови, делови израђени са променом оријентације жице, делови већих дужина, делови израђени параметарским програмима и програмима са потпрограмима и делови израђени обрадом спољшње и унутрашње контуре. За сваку од наведених група су у тексту после описа

експерименталне поставке комплексне машине алатке *МОМА-В 4S*, по поглављима приказани репрезентативни примери са кратким одговарајућим објашњењима. При изради делова из сваке од група, пре саме реализације програма, вршене су провере исправности програма као и могућност њихове реализације на комплексној машини алатки *МОМА-В 4S*. За одређене делове, провера је рађена у оквиру коришћеног *CAD/CAM* софтверског пакета. Ови делови се израђују транслаторним кретањем алата (жице) без промене оријентације алата током обраде па су путање платформи механизма током процеса обраде идентична контурама које дефинишу геометрију дела. Самим тиме, узимајући у обзир величину и облике корисних радних простора употребљених паралелних механизма, лако се може утврдити да ли се процес обраде може реализовати на комплексној машини алатки *МОМА-В 4S* или не.

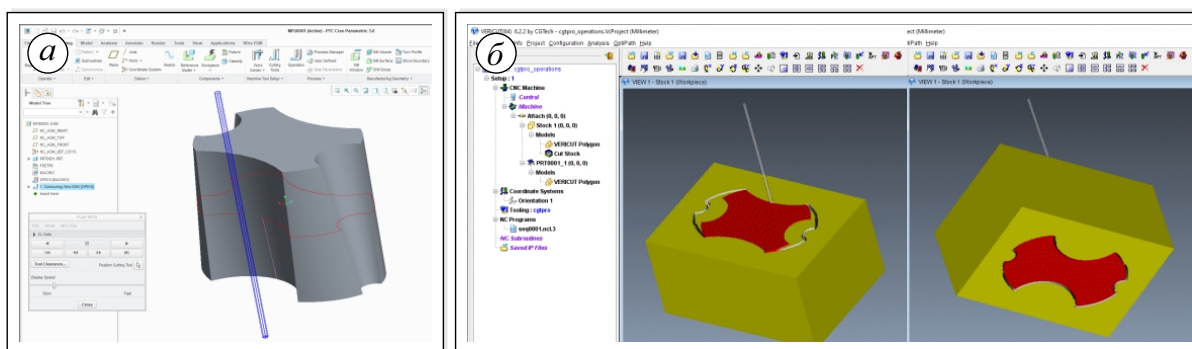
За другу групу делова за чију израду је неопходна промена оријентација жице током процеса обраде, у оквиру коришћеног *CAD/CAM* софтверског пакета није могуће проверити могућност реализације припремљеног програма на комплексној машини алатки *МОМА-В 4S*. Један од таквих делова је и део приказан на слици 9.14. Кориштени *CAD/CAM* софтверски пакет пружа могућност симулације кретања алата током процеса обраде чак и ако алата током процеса обраде мења оријентацију. Међутим, ни један од познатих *CAD/CAM* софтверских пакета не пружа могућност симулације рада комплексних машина алатки као што је машина алатка *МОМА-В 4S*. Узимајући у обзир величине и облике радних простора употребљених паралелних механизма, не може се са сигурношћу тврдити да је могуће израдити одређени део на комплексној машини алатки *МОМА-В 4S* реализацијом припремљеног програма.



Слика 9.14 Конвексно конкавни пробни део

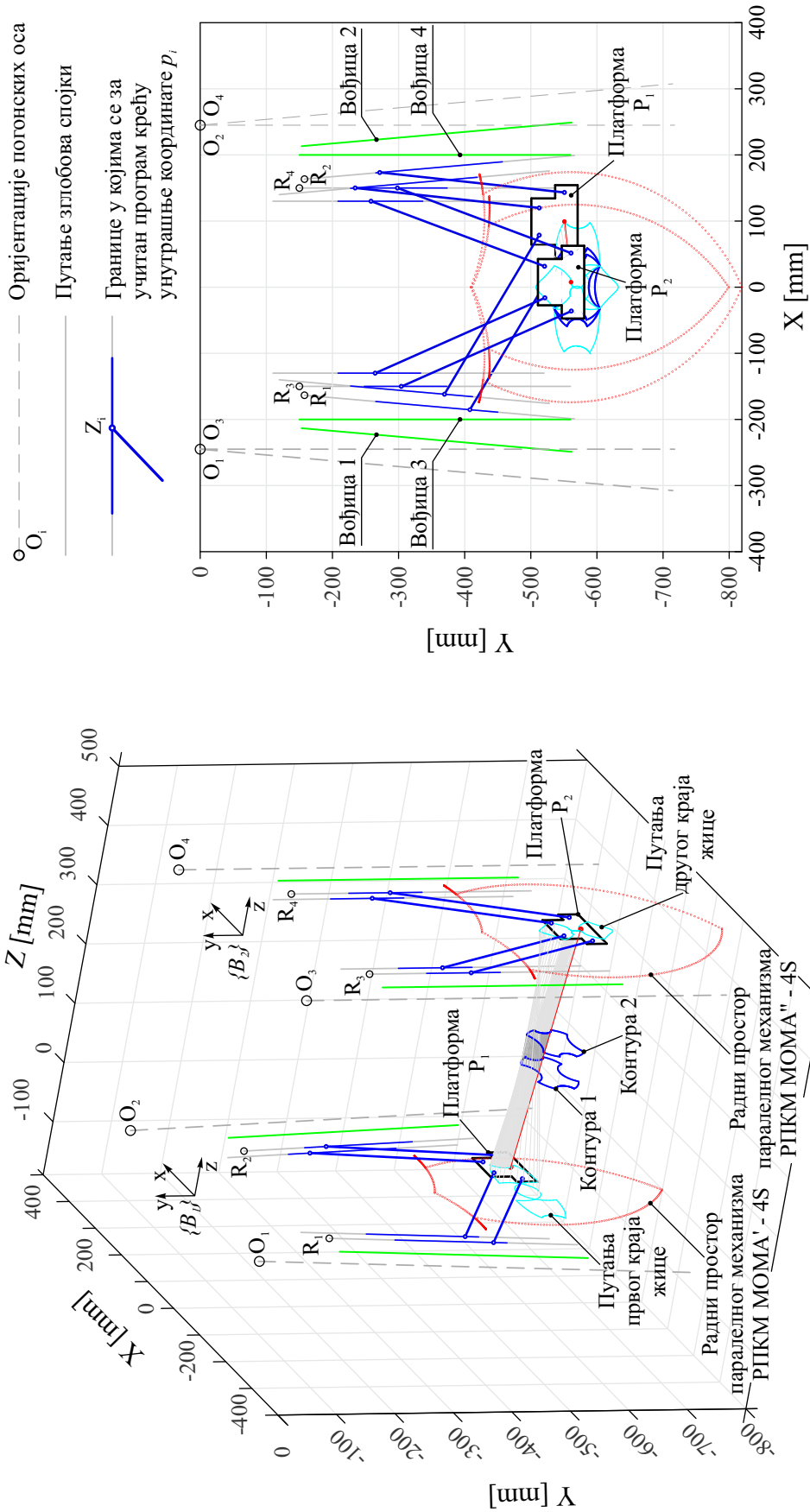
3D модел дела са слике 9.14 је израђен у *CAD/CAM* софтверском пакету *Creo Parametric* у коме је и генерфисан *G-код* програм за израду дела на комплексној машини алатки *МОМА-В 4S*. Као што се може видети на слици 9.15.а, кориштени *CAD/CAM* софтверском пакет може да прикаже кретање алата током процеса обраде али, оно што је од значаја за процес израде дела са слике 9.14 су и путање крајева жице који су причвршћени за платформе паралелних механизма машине алатке *МОМА-В 4S* као и симулација рада целе машине током реализације учитаног програма. Симулација кретања алата током процеса обраде у *Vericut* окружењу је приказна на слици 9.15.б. На основу слике 9.15 се може закључити да добијени резултати нису употребљиви из разлога што кориштени *CAD/CAM* софтверски пакет не приказује путање крајева жице као ни симулацију рада машине током процеса обраде што је од значај приликом припреме програма.

Такође, *Vericut* модул не приказује промену оријентације алата током процеса обраде. *Vericut* модул током симулације обраде приказује кретање алата по оној контури која је у *G-код* програму дефинисана координатама x и y (слика 9.15.б) при чему се прави грешка у приказу кретања алата по контури која је *G-код* програму дефинисана координатама u и v (9.15.в). Јасно је да се добијени резултати не могу користити за било какве анализе рада комплексне машине алатке *MOMA-W 4S*.



Слика 9.15 Анализа путање алата за израду конвексно конкавног дела: а) У *CAD/CAM* софтверском пакету *Creo Parametric*; б) У *Vericut* окружењу

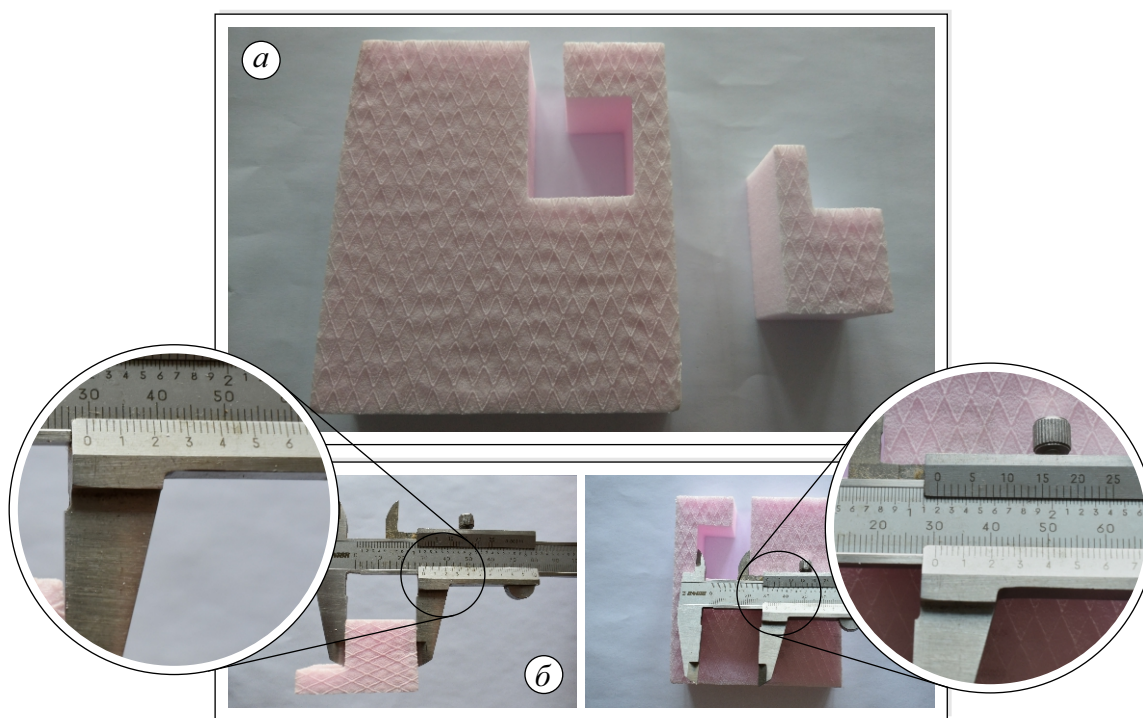
Како је пре саме израде дела на комплексној машини алатки *MOMA-W 4S* неопходно проверити припремљен програм, због описаних недостатака које поседује кориштен *CAD/CAM* софтверском пакет, развијена ја *MATLAB* апликација намењена за проверу и анализу програма који ће бити реализовани на комплексној машини алатки *MOMA-W 4S*. Прва верзија апликација је била развијена са циљем да се након учитавања припремљеног *G-код* програма ицртају путање по којима се платформе механизма крећу током процеса обраде и тиме обезбеђују кретање жице по програмираним контурама. Даљим развојем, истим методама које су кориштене за развој апликација описаних у претходним поглављима, у апликацију су имплементирани једначине које представљају решења кинематичких проблема комплексне машине алатке *MOMA-W 4S*. Поред приказа програмиране путање алата и путање платформи паралелних механизма, унапређена апликација се сада може користити за анализу рада комплексне машине алатке *MOMA-W 4S* током целог процеса обраде. Приказ анализе једног програма развијеном апликацијом је дат на слици 9.16. Као што се види на приказаном примеру, развијена апликација приказује изглед програмираних контура, путање крајева жице за учитан програм, радне просторе употребљених паралелних механизма и кретање механизма током процеса обраде. Приказана апликација представља виртуелну машину алатку која у потпуности симулира рад комплексне машине алатке *MOMA-W 4S*, а једначине кориштене за њен развој, кориштене су и за конфигурирање управљања и дате су у прилогу [Пр.3](#). Овако развијена апликација у многоме олакшава анализе програма припремљених за израду делова на комплексној машини алатки *MOMA-W 4S*. Уз анализе које пружа *CAD/CAM* софтверски пакет, кориштена је за проверу програма припремљених за израду делова на машини алатки *MOMA-W 4S*.



Слика 9.16 Анализа рада комплексне машине алатке МОМА-*W* 4*S* развијеном апликацијом

9.3.1 Делови једноставног облика

Делови једноставног облика се израђују кратким *G-код* програмима састављеним без употребе *CAM/CAM* софтверских пакета. Делови из ове групе су првенствено израђени ради провере тачности остварених мера на израђеним деловим али и да се потврди могућност једноставног мануелног (ручног) програмирања комплексне машине алатке *МОМА-W 4S* употребом основних *G-код* функција. Један из палете направљених делова једноставног облика је приказан на слици 9.17.а док су на слици 9.17.б приказане остварене спољашње и унутрашње мере. Како је *G-код* програмом задато да се алат (жица) креће по ивицама квадрата димензија $30 \times 30 \text{ mm}$, остварене мере показују да дошло до одступања од $\approx 0.5 \text{ mm}$. За грешке у оствареним димензијама приликом израде делова са слике 9.17, не може се рећи ни да су мале ни да су велика. Грешке у оствареним мерама се могу умањити избором других режима обраде, а добијени податак се може користити приликом израде будућих делова.

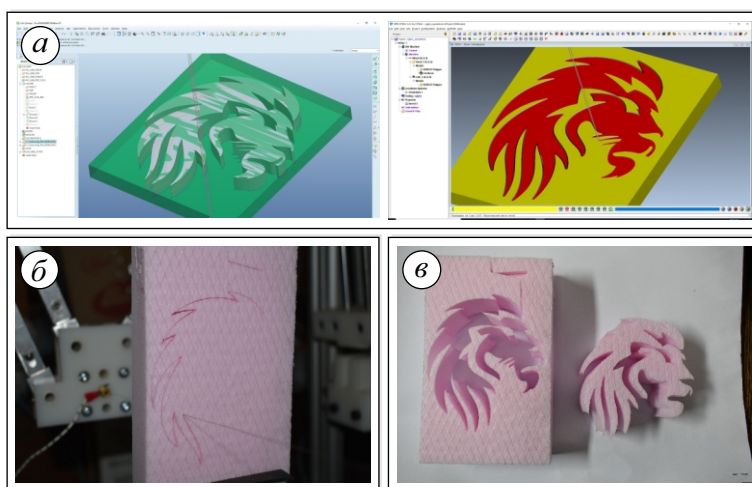


Слика 9.17 Делови једноставног облика: а) Израђени делови; б) Провера остварених мера

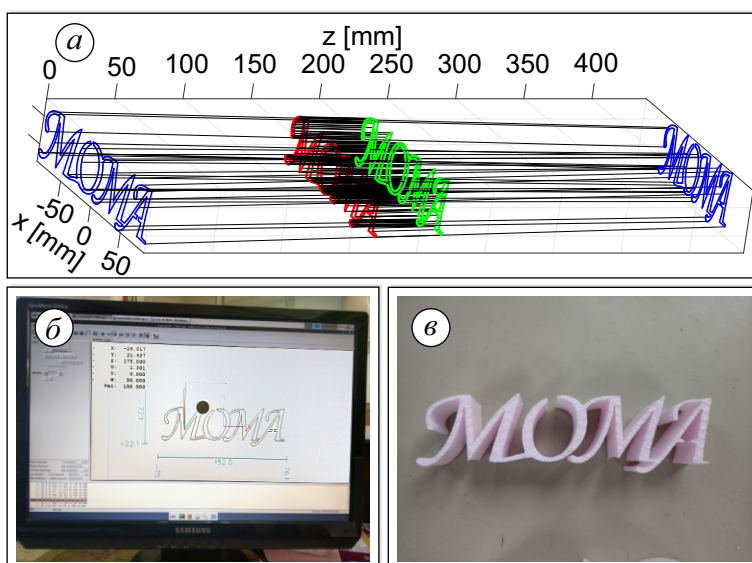
Израда програма за *CNC* машине намењене за процес обраде сечења жицом подразумева и компнзацију пречника алата (жице) како би се оствариле жељене мере. Добијени резултати су добри али могу бити још бољи уз примену одговарајућих режима обраде. За одређивање оптималних режима обраде је неопходно израдити велик број делова једноставног облика, истих и различитих димензија, а са различитим режимима обраде. На основу добијених података, могуће је успоставити корелација између режима обраде и тачности остварених мера. Дефинисање оптималних режима обраде при сечењу пенастих материјала усијаном жицом превазилази оквире докторске дисертације па се неће разматрати али ће свакако бити предмет будућих истраживања.

9.3.2 Делови сложеног облика и танкозидни делови

Сврха израде делова сложеног облика је да се потврди могућност употребе постпроцесора имплементираног у кориштени *CAD/CAM* софтверски пакет према коме су постављене полазне једначине за решавање кинематичких проблема комплексне машине алатке *МОМА-W 4S*. Израдом делова сложеног облика се провера технолоичности израде делова сечењем пенастих материјала усијаном жицом при чему се пажња обраћа на ситне детаље израђеног дела. Израда репрезентативних примера из ових група је приказана на сликама 9.18 и 9.19. Провера програма је рађена у кориштеном *CAD/CAM* софтверском пакету и у претходно приказаној апликацији за анализу рада комплексне машине алатке *МОМА-W 4S*.



Слика 9.18 Израда дела сложеног облика - лавља глава: а) Симулација путање алата у *Pro-Engineer* и *Vericut* окружењу; б) Процес израде дела; в) Израђен део

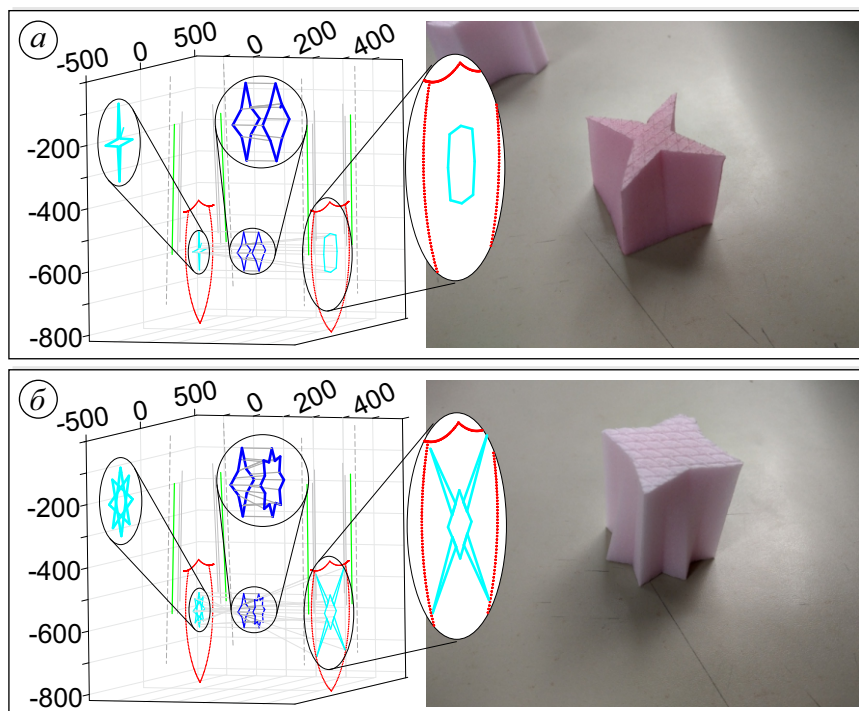


Слика 9.19 Израда танкозидног дела - лого *МОМА*: а) Симулација путање алата у *MATLAB* развијеној апликацији; б) Путања алата у софтверском систему *LinuxCNC*; в) Готов део

У прилогу *Пр.4*, на сликама *Сн.3*, *Сн.4* и *Сн.5* су приказани респективно, грб *Црвене Звезде*, грб *Академије техничких струковних студија Београд* и *Склоп планетраног механизма*, израђени на комплексној машини алатки *MOMA-W 4S* реализацијом програма припремљених *CAD/CAM* софтверским пакетом *CreoParametric*. Процеси израде и израђени делови "Лого центра за нове технологије, катедре за производно машинство Машинског факултета у Београду" и "Лого Јупитер конференције" који спадају у групу танкозидних делова су приказани на сликама *Сн.6.а* и *Сн.6.б* у истом прилогу.

9.3.3 Делови израђени променом оријентација жице

За верификацију рада комплексне машине алатке *MOMA-W 4S* израђени су делови са нагнутиим страницама. За израду делова са нагнутиим страницама, неопходно је да алат (жица) током процеса обраде мења своју оријентацију. Израдом делова са нагнутоим страницама, у потпуности се потврђује исправност изведених кинематичких једначина комплексне машине алатке *MOMA-W 4S* јер, током процеса обраде алат (жица) мења своју оријентацију и у *Oxz* и у *Oyz* равни, чиме се добијају међусобно различите путање платформи паралелних механизма које се уз то и разликују од програмираних контура. Због једноставне геометрије изабраних делова (слика 9.20), програми за израду су мануелно (ручно) писани. Када се нагласи да изабрани делови поседују једноставну геометрију, подразумева се да су две контуре по којима се током процеса обраде креће алата (жица), сачињене од праволинијских сегмената како се и може видети на слици 9.20.

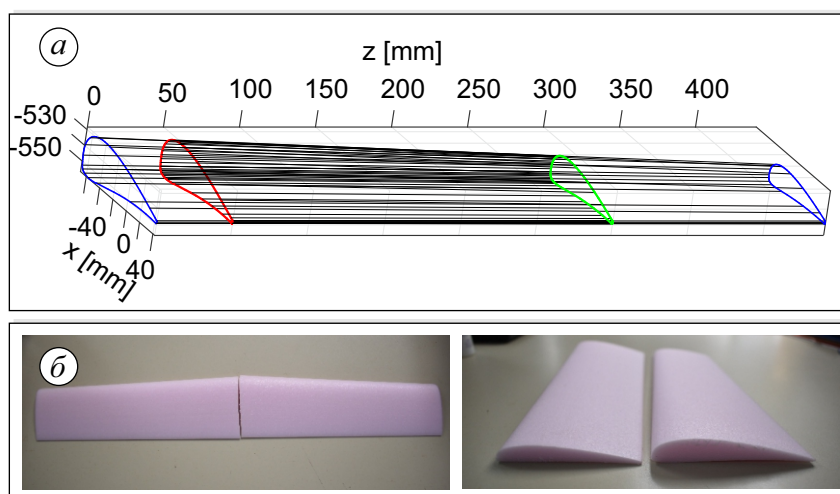


Слика 9.20 Делови са нагнутиим страницама израђени променом оријентације жице:
а) Четворокрака звезда; б) Четворокрако-осмокрака звезда

Одређивање координата карактеристичних тачака обе контуре као и израда $G\text{-}k\hat{o}d$ програма за израду делова једноставне геометрије уз промену оријентације алата, не представља већи проблем. Геометрија изабраних делова је једноставна, а програми за израду делова су кратки. Због промене оријентације жице, посматрано из угла кинематике, сама израда делова није једноставна и постоји могућност да се делови због облика и величине радног простора машине $МОМА\text{-}W\ 4S$ не могу изградити. За проверу $G\text{-}k\hat{o}d$ програма припремљених за израду одабраних делова се користи развијена апликација за анализу рада комплексне машине алатке $МОМА\text{-}W\ 4S$, а резултати анализе програма су уз израђене делове приказани на слици 9.20. У наредним поглављима су приказани још неки примери делова израђених реализацијом програма којима се током процеса обраде мења оријентација жице. Делови у наредним поглављима су сврстани у засебне групе јер се због своје специфичне геометрије или због методе израде програма разликују од до сада приказаних делова. У прилогу *Пр.4* на сликама *Сн.7* и *Сн.8* су приказани још неки од делова који су израђени реализацијом $G\text{-}k\hat{o}d$ програма који су израђени помоћу CAD/CAM софтверског пакета *Creo Parametric*.

9.3.4 Делови већих дужина

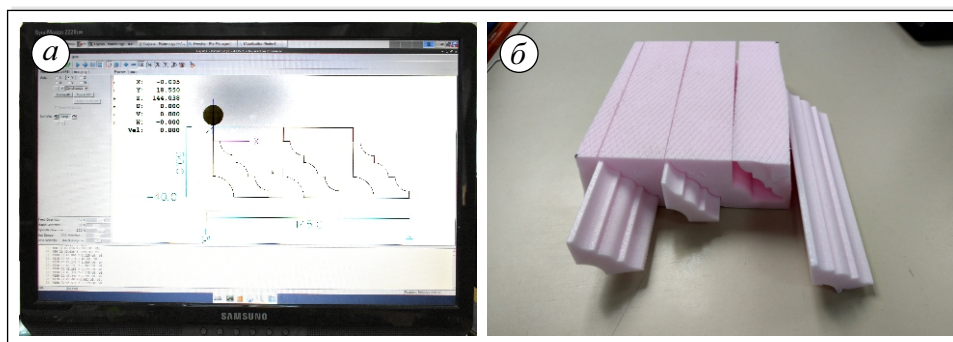
Израђени делови који су сврстани у неку од претходно описаних група имају дебљину 30 mm или 50 mm што је у ствари дебљина табле стиродура из које је исецан припремак. Припремци су на машину алатку $МОМА\text{-}W\ 4S$ постављани усправно и тако стезани. Условно говорећи, величина "D" (дебљина стиродура) за припремак постављен на описан начин има хоризонталан правац. Приликом израде делова већих дужина, припремак се поставља хоризонтално, а величина "D" (дебљина стиродура) има вертикалан праваца. У погледу процеса обраде, за овако постављен припремак, дужина припремка је дебљина дела који се израђује. Карактеристичан пример дела веће дужине је аеро профил приказан на слици 9.21.



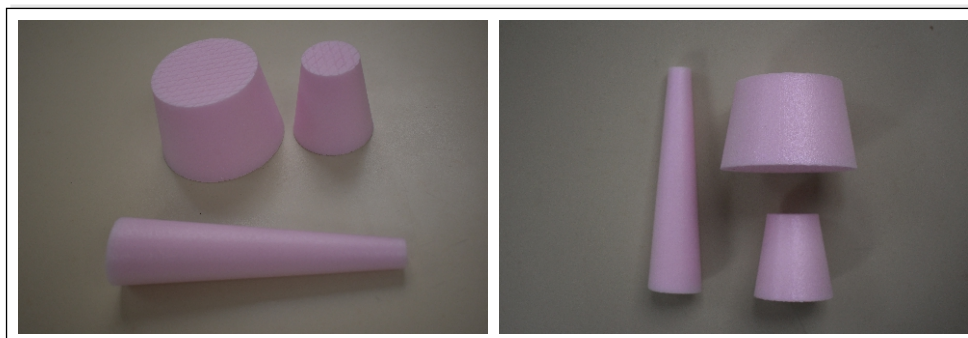
Слика 9.21 Дугачак део израђен променом оријентације жице током процеса обраде - аеро профил: а) Симулација путање алата у $MATLAB$ окружењу; б) Готов део

9.3.5 Делови израђени параметарским програмима и програмима са потпрограмима

Израдом украсних лајсни (слика 9.22) и конуса различитих димензија (слика 9.23), потврђена је могућност примене напредних метода програмирања приликом израде програма намењених за реализацију на комплексној машини алатки *МОМА-W 4S*. Осим тога, потврђена је и могућност комбиновања различитих метода програмирања при чему се израђени делови према својој геометрији или према начину програмирања могу сврстати и у неку од претходно разматраних група делова. Тако, украсне јасне дужине $L=150\text{mm}$ приказане на слици 9.22.б, могу се сврстати и у групу дугачких делова. Програм у *G-код* формату је делом ручно написан (главни део програма), а делом је генерисан применом *CAD/CAM* софтверског пакета *Creo Parametric* (потпрограм). Приликом израде украсних лајсни, у главном делу програма се позиционира координатни система *G55*, а потом се позива потпрограм генерисан *CAD/CAM* софтверским пакетом *Creo Parametric* којим је дефинисано кретање алата по задатој контури. Програм за израду украсних лајсни је дат у прилогу [Пр.4](#).



Слика 9.22 Украсне лајсне - делови израђени употребом потпрограма: а) Путања алата у софтверском систему *LinuxCNC*; б) Израђени делови



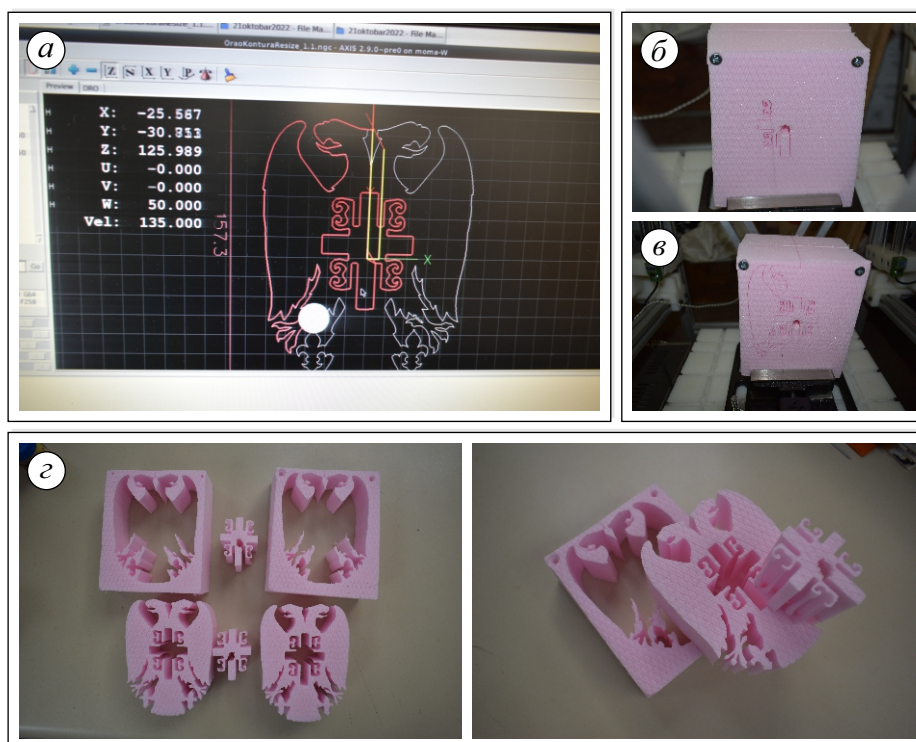
Слика 9.23 Делови израђени параметарским програмом - зарубљени конуси различитих димензија

Параметарски програм за израду конуса је дат у прилогу [Пр.4](#). Као што се може видети, на самом почетку програма су дате вредности параметара којима су дефинисане вредности пречника доње и горње основе конуса (D и d), висина конуса (дебљина израђеног дела W) и

координате центара кругова доње и горње основе (X_c, Y_c, x_c и y_c). У оквиру формиране петље, на основу једначина кругова доње и горње основе (#7, #8 и #9, #10), управљачки систем *LinuxCNC* израчунава вредности координата које се користе за реализацију кретања алата по жељеним контурама (X, Y, U и V). Једноставном променом вредности параметара на почетку параметарског програма, добијени су конуси различитог облика и величина.

9.3.6 Делови израђени обрадом спољашње и унутрашње контуре

За израду делова обрадом спољашње и унутрашње контуре, неопходно је припремити и реализовати два G -код програма. Један програм је намењен за израду унутрашње, а други за израду спољашње контуре на делу. За израду G -код програма се може применити било која од претходно описаних метода. На слици 9.24 је приказан поступак израде грба Републике Србије (двоглави орао) при чему су програми и за унутрашњу и за спољашњу контуру генерисани *CAD/CAM* софтверским пакетом *Creo Parametric*. Поступак израде и провера G -код програма су објашњени у претходним поглављима па се на примеру двоглавог орла не приказују.



Слика 9.24 Израда грба Републике Србије обрадом унутрашње и спољашње контуре: а) Путања алата у софтверском систему *LinuxCNC*; б) Процес обраде унутрашње контуре; в) Процес обраде спољашње контуре; г) Израђени делови

Координатни систем обратка ($G55$) у коме је писан програм за израду унутрашње контуре (слика 9.24.б) се налази на средини унутрашње контуре. Пре реализације програма, на припремку је направљен отвор, а позиција отвора на припремку је уједно и позиција координатног система ($G55$). Кроз отвор је провучена жица и причвршћена за платформе паралелних

механизама. Након обављене описане процедуре, машина алатка *МОМА-*W* 4S* је спремна за реализацију припремљеног програма. Тек након израђене унутрашње контуре може се приступити изради спољашње контуре (слика 9.24.6). Програм за израду спољашње контуре је писан у координатном систему (*G56*). Пре реализације програма за израду спољашње контуре, жица је извучена из припремка, а потом поново причвршћена за платформе паралелних механизма тако да се налази изван спољашње контуре. Описану процедуру је неопходно урадити да се током реализације програма за израду спољашње контуре израдак не би оштетио приликом позиционирања жице на самом почетку програма. Позиције координатних система (*G55*) и (*G56*) кориштених за израду двоглавог орла са слике (9.24.2) се у приказаном примеру поклапају. Описана метода се може користити и у случајевима када координатни системи (*G55*) и (*G56*) немају исту позицију на припремку. У том случају, неопходно је знати релативну позицију једног координатног система у односу на други или позиције координатних система у односу на неки трећи координатни систем (нпр. координатни систем машине *G54*).

Процедура којом је израђен грб Републике Србије је уобичајена процедура која се примењује на индустријским машинама алаткама намењених за израду делова од метала *W-EDM* методом обраде. Тако, уз претходно израђене делове на комплексној машини алатки *МОМА-*W* 4S* је потврђена исправност, функционалност и употребљивост целог концепта машине. Резултати верификације рада машине алатке *МОМА-*W* 4S*, као и резултати анализа приказаних у претходним поглављима, осим што су оправдали градњу машине алатке дали су и повод за даљим развојем па чак и разлог за градњу машине алатке за примену у индустријским условима.

ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација и научно истраживачки рад су усмерени ка изучавању машина алатки са паралелном кинематиком, машина алатки са хибридном кинематиком које представљају комбинацију серијских и паралелних механизма и на крају комплексних машина алатки које се у погледу врсте механизма не могу сврстати ни у једну од три наведене групе. Као полазна тачка научно истраживачког рада је послужио постојећи двоосни равански реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком *РПКМ-МОМА* чијом анализом се дошло до значајних резултата. Добијени резултати су послужили као основа за даља истраживања која су за циљ имала дефинисање формализма за конфигурисање и градњу вишеосних машина алатки. Како је основа истраживачког рада једна реконфигурабилна машина алатка, наметнуо се концепт класе машина алатки заснованих на *РПКМ-МОМА*. У оквиру формиране класе, машине алатке се међусобно могу разликовати по броју степени слободе, конфигурацији, карактеристикама, намени итд. Због својих недостатака механизам *РПКМ-МОМА* није у потпуности задовољавао потребе за формирање једне класе машина алатки. Недостаци *РПКМ-МОМА* су отклоњени развојем проширене конфигурације *РПКМ-МОМА* чиме се број машина алатки у оквиру формиране класе значајно проширио. Велики број машина алатки у оквиру формиране класе је наметнуо проблем избора одговарајуће машине која ће на најбољи начин одговорити постављеним захтевима у погледу броја степени слободе, величине корисног радног простора, прецизности, крутости, итд. Тако, из формиране класе машина алатки се могу одабрати више од једне конфигурације које могу испунити постављене захтеве али се поставља питање која је од неколико могућих конфигурација најпогоднија. Свакако, избор одређене конфигурације зависи од резултата које дају анализе приказане у оквиру ове дисертације.

Због сложене геометрије, анализа чак и најједноставнијих механизма са паралелном и хибридном кинематиком је компликована. Анализе машина алатки из формиране класе су знатно отежане због постојања великог броја различитих конфигурација механизма *РПКМ-МОМА* за које је потребно утврдити одређене карактеристике. Како се било које анализа

не би посматрала као засебна, приликом постављања проблема, тежило се ка формирању генерализованих једначина које важе за сваку конфигурацију механизма машине алатке унутар формиране класе. Пошто је у оквиру докторске дисертације акценат стављен на машине алатке које поседују само трансляторне погонске осе, генерализовање математичких једначина је ишао у том смеру. Користећи полазне генерализоване једначине, изведене су једначине које представљају решења кинематичких проблема и чине основу за различите анализе *РПКМ-МОМА*. Користећи генерализоване једначине кинематичких проблема основне конфигурације *РПКМ-МОМА*, као и једначине изведене из једначина *ИКП*-а и *ДКП*-а, развијена је апликација *МОМА-GUI* која се користи за анализу основних конфигурација *РПКМ-МОМА*. Недостатак развијене апликације је тај што се анализе не могу применити на механизме засноване на проширеној конфигурацији *РПКМ-МОМА*. Развој нове верзије апликације ће бити предмет будућих истраживања.

Кад је реч о проширеној конфигурацији *РПКМ-МОМА*, полазне једначине и једначине које представљају решења кинематичких проблема су такође генерализоване. Приликом извођења, искориштена је сличност основне и проширене конфигурације *РПКМ-МОМА*, тако да су новодобијене једначине уопштеније. Уз употребу одговарајућих вредности за неке од параметара механизма, новодобијене једначине важе за све конфигурације *РПКМ-МОМА*, било да се ради о основној или проширеној конфигурацији механизма. Употребом усвојених параметара инверзне и директне кинематике K_{IKP} и K_{DKP} , респективно, изведене једначине се могу користити и за анализе оних конфигурација *РПКМ-МОМА* које нису разматране у овој докторској дисертацији, а произилазе из вишеструкости решења кинематичких проблема. Увођењем параметара K_{IKP} и K_{DKP} , број машина алатки унутар формиране класе машина алатки се у великој мери повећао, чиме се и сам избор одређене конфигурације намењене за одређени процес побољшао. Већина машина алатки у оквиру формиране класе, намењене су за реализацију процеса обраде глодањем. Одређене машине алатке у овим формиране класе се уз минималне и брзе измене могу прилагодити некој од неконвенционалних метода обраде као што су брза израда прототипова (3D-штампа), сечење ласером и гравирање, сечење плазмом итд. Прилагођавање машине алатке наведеним процесима обраде не утиче на кинематику па им у докторској дисертацији није посвећена пажња. Маchine алатке намењене за наведене процесе се сврстају у привремену засебну групу *Других Машина Алатки* унутар формиране класе. У исту групу се и сврстава развијена машина алатка *МОМА-W 4S* намењена за процес обраде сечења пенастих материјала усијаном жицом. Према досадашњим сазнањима, не постоји вишеосна машина алатка исте или сличне конфигурације, а анализе саме машине алатке *МОМА-W 4S* су дале веома битне резултате који ће се користити у будућим истраживањима. Од многих анализа, издваја се анализа резолуције механизма *РПКМ-МОМА* као и анализа грешке обраде машине алатке *МОМА-W 4S*. Приказани резултати показују да се употребом одређених конфигурација грешка обраде може значајно умањити, чак и до те мере да је сама грешка обраде мања од резолуције погонских оса употребљених механизма.

Свака машина алатка унутар формиране класе захтева систем управљања прилагођен конфигурацији саме машине. Са становишта хардверског дела и/или у погледу намене, машине алатке унутар формиране класе су реконфигурабилне. Да би се реконфигурабилност употпунила, формирано је и реконфигурабилно управљање применом *LinuxCNC* управљачког система. Развојем реконфигурабилног управљања, омогућио је да се при након реконфигурисања хардверског дела машине, сам управљачки систем брзо и лако прилагоди новој конфигурацији. За развој реконфигурабилног управљачког система, кориштене су генерализоване једначине које представљају решења *ИКП*-а и *ДКП*-а. На основу генерализованих једначина имплементираних у управљачки систем, формиране су виртуелне погонске осе механизма којима се управља основним *G-код* функцијама. Виртуелне погонске осе се користе за прилагођавање управљања реконфигурисаном хардверу машине алатке. Реконфигурабилно управљање је за сада формирано само за двоосни механизам *РПКМ-МОМА*. Предмет будућих истраживања је даљи развој реконфигурабилног управљања у складу са могућностима које управљачки систем *LinuxCNC* пружа. Исправност генерализованих једначина које представљају решења *ИКП*-а и *ДКП*-а је потврђена експериментима реализованим на машинама алаткама *МОМА-2D*, *МОМА-3D* и *МОМА-W 4S*. За реализацију експеримената су кориштени програми израђени ручно или генерисани помоћу рачунара и то према стандарду *ISO-6983* али и коришћењем тренутних могућности за програмирање *CNC* применом *STEP-NC* стандарда. Овиме је машинама алаткама из формиране класе машина алатки створена могућност да се сврстају у групу машина алатки нове генерације.

Постављен концепт класе комплексних машина алатки, заснован је на уопштеном поступку пројектовања и конфигурисања појединих подсистема машине у складу са постављеним потребама. Не узимајући у обзир чињеницу да су поједине машине алатке унутар формиране класе саме по себи комплексне, сложеност постављеног концепта се огледа у великом броју различитих конфигурација механизма које се могу користити за градњу машине алатке и њених подсистема. Анализе и процедуре приказане у докторској дисертацији засноване су на генерализацији постављеног проблема. На основу резултата истраживачког рада, успостављен је формализам којим се будућа пројектовања, конфигурисања и израде машина алатки из формираног класе знатно олакшавају. Према успостављеном формализму, и обједињавањем различитих научних области попут рачунарског програмирања, математике, кинематике, електротехнике, аутоматике, машинске обраде и др. направљене су машине алатке *МОМА-3D* и *МОМА-W 4S*. За машину алатку *МОМА-2D* формирано је ново реконфигурабилно управљање. Остварени резултати представљају значајан научни допринос.

Приказане анализе, процедуре и остварени резултати нису довољни за потпуно конфигурисање и пројектовање било које од машина алатки из формиране класе што указује на правце будућих истраживања. Један од праваца истраживања ће бити додатно уопштавање постојећих генерализованих једначина које обухватају и обртне осе машина алатки за које су у докторској дисертацији постављене основе. Други од праваца истраживања је веза између грешке обраде

и расподеле детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$. Приказани резултати указују на то да се грешке обраде смањују са повећањем вредности $\det(J)$, што у ствари значи да су грешке обраде најмање у близини сингуларитета који се по природи ствари морају избегавати. Најбољи пример је анализирана конфигурација *МОМА-М2*. Циљ овог истраживања ће бити подељен у два дела и то: i) успостављање математичке међузависности између грешке обраде и вредности $\det(J)$ и то најпре за појединачне конфигурације *РПКМ-МОМА*, а потом и за групу различитих конфигурација *РПКМ-МОМА*; ii) успостављање процедуре према којој се долази до оптималног односа величине радног простора и грешке обраде. Као неизбежани праваци истраживања су и даља конфигурирања управљачког система, развоји виртуелних машина алатки у различитим окружењима као и праћење и примена нових достигнућа из области новог начина програмирања применом *STEP-NC* стандарда који представља адекватан метод за програмирање модерних и будућих машина алатки које еволуирају ка машинама са израженом кооперативношћу са окружењем.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chao Liu, Hrishikesh Vengayil, Ray Y. Zhong, Xun Xu: A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.48: pp. 13–24, 2018. DOI:10.1016/j.jmsy.2018.02.001.
- [2] Koren Yoram, Heisel Uwe, Jovane Francesco: Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals*, Vol.48(2): pp. 527–540, 1999. DOI:10.1016/S0007-8506(07)63232-6.
- [3] Koren Yoram, Moshe Shpitalni: Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing System*, Vol.29(4): pp. 130–141, 2010. DOI:10.1016/j.jmsy.2011.01.001.
- [4] Dimić Zoran, Milutinović Dragan, Živanović Saša, Mitrović Stefan: Metod konfigurisanja upravljačkog sistema otvorene arhitekture rekonfigurabilnog robota za obradu. 40. JUPITER konferencija, NU-Roboti-FTS, Zbornik radova ISBN 978-86-7083-893-2, pp. 3.12–3.15, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016.
URL: http://cent.mas.bg.ac.rs/jupiter/zbornik_2016.pdf.
- [5] Nei Paz, Marcus Americano: 4-Axis CNC Milling Machine for Production of Dental Prosthesis. *XXIII Congresso Brasileiro de Automática*, November 2020. DOI:10.48011/asba.v2i1.1293.
- [6] Mathew Rynes, Leila Ghanbari, Daniel Schulman: Assembly and operation of an open-source, computer numerical controlled (CNC) robot for performing cranial microsurgical procedures. *Nature Protocols*, Vol.15: pp. 1992–2023, 2020. DOI:10.1038/s41596-020-0318-4.
- [7] P.W. Anggoro, A.A. Anthony, B. Bawono, J. Jamari, A. Bayuseno: CNC milling of EVA foam with varying hardness for custom orthotic shoe insoles and process parameter optimization. *Journal of Mechanical Engineering and Science*, Vol.13(3): pp. 5347–5370, 2019. DOI:10.15282/jmes.13.3.2019.10.0436.
- [8] Wes McGee, Jelle Feringa, Asbjørn Søndergaard: Processes for an architecture of volume. In Sigrid Brell-Çokcan and Johannes Braumann, editors, *Rob | Arch 2012*, pp. 62–71, Vienna, 2013. Springer Vienna. DOI:10.1007/978-3-7091-1465-0_5.
- [9] D. Stewart: A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.180(1): pp. 371–386, 1965.
- [10] Živanović Saša: Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom - magistarska teza. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2000.

- [11] Živanović Saša: Parallel Kinematic Machines. *International Journal of Production Engineering and Computers*, Vol.3(3): pp. 49–54, 2000.
- [12] G. Stengele: Cross Hüller Specht Xperimental. *Processing Center with new Hybrid Kinematic, Proc. 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar*, pp. 609–627, 2002.
- [13] Manfred Weck, Dirk Staimer: Parallel kinematic machine tools, current state and future potentials. *CIRP Annals*, Vol.51(2):pp. 671–683, 2002. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61706-5.
- [14] Zbyněk Šika, Vojtěch Hamrle, Michael Valášek, Petr Beneš: Calibrability as additional design criterion of parallel kinematic machines. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.50:pp. 48–63, 2012. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2011.12.001.
- [15] Jun Wu, Jinsong Wang, Tiemin Li, Liping Wang: Dynamic analysis of the 2-DOF planar parallel manipulator of a heavy duty hybrid machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.34(3): pp. 413–420, 2007. DOI:10.1007/s00170-006-0605-4.
- [16] Jun Wu, Jinsong Wang, Tiemin Li, Liping Wang: Analysis and Application of a 2-DOF Planar Parallel Mechanism. *Journal of Mechanical Design*, Vol.129(4): pp. 434–437, 2006. DOI:10.1115/1.2437800.
- [17] Wu Jun, LI Tiemin, Liu Xinjun, Wang Liping: Optimal kinematic design of a 2-DOF planar parallel manipulator. *Tsinghua science and technology*, Vol.12(3): pp. 269–275, 2007. DOI:10.1016/S1007-0214(07)70040-8.
- [18] Jun Wu, Jinsong Wang, Liping Wang: Optimal Kinematic Design and Application of a Redundantly Actuated 3DOF Planar Parallel Manipulator. *Journal of Mechanical Design*, Vol.130(5): pp.054503, Mart 2008. DOI:10.1115/1.2890118.
- [19] Tian Huang, Zhanxian Li, Meng Li, Derek G. Chetwynd, Clement M. Gosselin: Conceptual design and dimensional synthesis of a novel 2-DOF translational parallel robot for pick-and-place operations. *Journal of Mechanical Design*, Vol.126: pp. 449–455, 2004. DOI:10.1115/1.1711822.
- [20] Manfred Weck, Jochen Asbeck, Peter Leibinger, Boris Vites: Device for machining, and/or assembling of workpiece, u.s. patent 5919014, Jul 1999. URL: <https://patents.justia.com/patent/5919014#history>.
- [21] Valentina Mattioni, Edoardo Ida, Marco Carricato: Design of a planar cable-driven parallel robot for non-contact tasks. *MDPI Applied Sciences, Special Issue Modelling and Control of Mechatronic and Robotic Systems*, Vol.11(20), 2021. ISSN 2076-3417. DOI:10.3390/app11209491.
- [22] Hanwei Liu, Clément Gosselin, Thierry Laliberté: Conceptual Design and Static Analysis of Novel Planar Spring-Loaded Cable-Loop-Driven Parallel Mechanisms. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 4(2), 2012. DOI:10.1115/1.4005568.

-
- [23] Seungkil Son, Taejung Kim, Sanjay E. Sarma, Alexander Slocum: A hybrid 5-axis CNC milling machine. *Precision Engineering*, Vol.33(4): pp. 430–446, 2009. DOI:10.1016/j.precisioneng.2008.12.001.
- [24] Landers G. Robert: Reconfigurable Machine Tools. *CIRP Annals*, Vol.50(1): pp. 269–274, 2001. DOI:10.1016/S0007-8506(07)62120-9.
- [25] Moon Yong-Mo, Kota Sridhar: Design of Reconfigurable Machine Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.124(2):pp. 480–483, 04 2002. DOI:10.1115/1.1452748.
- [26] Dragan Milutinović, Miloš Glavonjić, Nikola Slavković, Zoran Dimić, Saša Živanović, Branko Kokotović, Ljubodrag Tanović: Reconfigurable Robotic Machining System Controlled and Programmed in a Machine Tool Manner. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.53: pp. 1217–1229, 2011. DOI:10.1007/s00170-010-2888-8.
- [27] Z. M. Bi. Development and Control of a 5-Axis Reconfigurable Machine Tool. *Journal of Robotics*, Vol.2011:pp. 480–483, 06 2011. DOI:10.1155/2011/583072.
- [28] Haiqiang Zhang, Hairong Fang, Yuefa Fang, Bingshan Jiang: Workspace analysis of a hybrid kinematic machine tool with high rotational applications. *Applied Mathematics for Engineering Problems in Biomechanics and Robotics*, 2018:1024–123X, 2018. DOI:10.1155/2018/2607497.
- [29] Tao Sun, Yimin Song, Yonggang Li, Jun Zhang: Workspace Decomposition Based Dimensional Synthesis of a Novel Hybrid Reconfigurable Robot. *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.2 (3): pp. 031009(1–8), 07 2010. DOI:10.1115/1.4001781.
- [30] Milutinović Milan, Slavković Nikola, Milutinović Dragan: Kinematic Modelling of Hybrid Parallel-Serial Five-Axis Machine Tool. *FME Transaction, Scientific Journal published by the Faculty of Mechanical Engineering*, Vol.41(1): pp. 1–10, 2013. URL: www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol41/1/01_dmilutinovic.pdf.
- [31] Yair Shneur: Reconfigurable machine tool: Cnc machine for milling, grinding and polishing. *Procedia Manufacturing*, Vol.21: pp. 221–227, 2018. DOI:10.1016/j.promfg.2018.02.114.
- [32] J. Padayachee, G Bright, I. Masekamela: Modular reconfigurable machine tools: Design, control and evaluation. *South African Journal of Industrial Engineering*, Vol.20:pp.127 – 143, 2009. ISSN 2224-7890. URL:http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-78902009000200011&nrm=iso.
- [33] Jared Padayachee, Glen Bright: Modular machine tools: Design and barriers to industrial implementation. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.31(2): pp. 92–102, 2012. DOI:10.1016/j.jmsy.2011.10.003.
- [34] Tosliiniichi Moriwaki: Multi-functional machine tool. *CIRP Annals*, Vol.57(2): pp. 736–749, 2008. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.004.
-

- [35] Tanio K. Tanev: Kinematics of a hybrid (parallel–serial) robot manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.35(9):pp.1183–1196, 2000. DOI:10.1016/S0094-114X(99)00073-7.
- [36] Sergiu-Dan Stan, Vistrian Maties, Radu Balan: Optimal design of parallel kinematics machines with 2 degrees of freedom. *Parallel Manipulators*, chapter 14. IntechOpen, Rijeka, 2008. DOI:10.5772/5436.
- [37] X.Z. Zheng, H.Z. Bin, Y.G. Luo: Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.23: pp. 925–930, 2004. DOI:10.1007/s00170-003-1782-z.
- [38] L. Romdhane: Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.34(7): pp. 1037–1055, 1999. DOI:10.1016/S0094-114X(98)00079-2.
- [39] Chong Zhao, Hongwei Guo, Rongqiang Liu et al: Actuation distribution and workspace analysis of a novel 3(3rrls) metamorphic serial-parallel manipulator for grasping space non-cooperative targets. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.139: pp. 424–442, 2019. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2019.04.019.
- [40] Yi Lu, Zhuohong Dai: Dynamics model of redundant hybrid manipulators connected in series by three or more different parallel manipulators with linear active legs. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.103:pp. 222–235, 2016. ISSN 0094-114X. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.003.
- [41] Asbjørn Søndergaard, Jelle Feringa, Toke Nørbjerg, Kasper Steenstrup, David Brander, et al: *Robotic Hot-Blade Cutting*, pp. 150–164. Springer International Publishing, Cham, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-26378-6_11.
- [42] Qi Hao, Bo Liu, Mingxin Wang, Jing Zhou: Performance optimization of a 2-DOF parallel mechanism based on multiple indices. *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1250–1255, 2016. DOI:10.1109/ICMA.2016.7558741.
- [43] Sanjay Darvekar, A. B. Koteswara Rao, S. Shankar Ganesh, K. Ramji: Optimal design and development of a 2-DOF PKM-based machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.67: pp. 1609–1621, 2013. DOI:10.1007/s00170-012-4594-1.
- [44] Ridha Kelaiaia, Olivier Company, Abdelouahab Zaatri: Multiobjective optimization of a linear delta parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.50: pp. 159–178, 2012. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.004.
- [45] J. P. Merlet: Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots. *Journal of Mechanical Design*, Vol.128(1): pp. 199–206, 2005. DOI:10.1115/1.2121740.
- [46] R. Yáñez-Valdez, M. Ruiz-Torres, E. Morales-Sánchez, E. Castillo-Castañeda, J.A. Briones-León: Resolution of a 3RRR Planar Parallel Mechanism. *Electromechanical and Systems Engineering, Applied Mechanics and Materials*, Vol.15: pp. 61–66. Trans Tech Publications Ltd, 2009. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.15.61.

-
- [47] R.Y. Valdez, E.M. Sánchez, M.R. Torres, E.C. Castañeda: Methodology for calculating the resolution of a planar parallel mechanism. *2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA '08)*, pp. 467–471, 2008. DOI:10.1109/CERMA.2008.52.
- [48] Mansoor Ghazi, Qasim Nazir, Sajid Ullah Butt, Aamer Ahmed Baqai: Accuracy Analysis of 3-RSS Delta Parallel Manipulator. *28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing FAIM2018*, Vol.17, pp. 174–182, June 11-14, 2018. DOI:10.1016/j.promfg.2018.10.033.
- [49] Idumudi Venkata, Sai Prathyush, Arshad Javed: Kinematic error modeling of a parallelogram arm of the delta robot and its dimensional optimization. *Advances in Industrial Machines and Mechanisms*, pp. 137–147. Springer Singapore, 2021. DOI:10.1007/978-981-16-1769-0_13.
- [50] Andrey V. Kochetkov, T.N. Ivanova, Ludmila V. Seliverstova, Oleg V. Zakharov: Kinematic Error Modeling of Delta 3D Printer. *Intelligent Manufacturing and Materials, Vol.1037 of Materials Science Forum*, pp. 77–83. Trans Tech Publications Ltd, 2021. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.77.
- [51] Xu Jinghua, Feng Xueqing, Cen Jun, Zhang Shuyou: Precision forward design for 3D printing using kinematic sensitivity via Jacobian matrix considering uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.110: pp. 3257–3271, 2022. DOI:10.1007/s00170-020-05940-4.
- [52] O.V. Zakharov, K.G. Pugin, T.N. Ivanova: Modeling and analysis of delta kinematics FDM printer. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.2182(1): pp.012069, mar 2022. DOI:10.1088/1742-6596/2182/1/012069.
- [53] Marko Jovanović, Mirko Raković, Bojan Tepavčević, et al: Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels. *Automation in Construction*, Vol.74:28–38, 2017. DOI:10.1016/j.autcon.2016.11.003.
- [54] Ramsey F. Hamade, Firas Zeineddine, Barbar Akle, Ahmad Smaili: Modelangelo: a subtractive 5-axis robotic arm for rapid prototyping. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.21(2):133–144, 2005. DOI:10.1016/j.rcim.2004.06.004.
- [55] Asith Abeysinghe, Shameera Abeysiriwardena, Roshan Nanayakkarawasam, et al.: Development of a numerically controlled hot wire foam cutting machine for wing mould construction. *2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, 2016.
- [56] S. H. Lee, D. G. Ahn, D. Y. Yang: Calculation and verification of rotation angle of a four-axis hotwire cutter for transfer-type variable lamination manufacturing using expandable polystyrene foam. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.22: pp. 175–183, 2003. DOI:10.1007/s00170-002-1456-2.
-

- [57] X. Cheng, Z.G. Wang, S. Kobayashi, K. Nakamoto, K. Yamazaki: Development of a six-axis wire electrical discharge machine for the fabrication of micro end mills. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol.223(2): pp. 121–131, 2009. DOI:[10.1243/09544054JEM1299](https://doi.org/10.1243/09544054JEM1299).
- [58] Mu-Tian Yan, Chen-Wei Huang, Chi-Cheng Fang, Chia-Xuan Chang: Development of a prototype micro-wire-edm machine. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.149(1): pp. 99–105, 2004. DOI:[10.1016/j.jmatprotec.2003.10.057](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.057).
- [59] Yunn-Shiuan Liao, Shun-Tong Chen, Chang-Sheng Lin: Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.15(2): pp. 245–253, 2004. DOI:[10.1088/0960-1317/15/2/001](https://doi.org/10.1088/0960-1317/15/2/001).
- [60] Saša Živanović: *Razvoj edukacione mašine sa paralelnom kinematikom*. Posebna izdanja, Zadužbina Andrejević, 2012. ISBN 978-86-525-0019-2.
- [61] Hace Aleš, Jezernik Karel: Control system for the waterjet cutting machine. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.9(4):pp. 627–635, December 2004. DOI:[10.1109/TMECH.2004.839045](https://doi.org/10.1109/TMECH.2004.839045).
- [62] Saša Živanović, Zoran Dimić, Vorkapić Nikola, Mitrović Stefan: Configuring of 3 Axis mini CNC Machine Tool with Control System Based on LinuxCNC. *14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2019*, pp. 15–28, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, May 2019.
- [63] Leonardo Romero Muñoz, Moises García Villanueva, Mario Santana Gómez: Development of a computer numerically controlled router machine with 4 degrees of freedom using an open architecture. *2013 IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1–6, 2013. DOI:[10.1109/ROPEC.2013.6702719](https://doi.org/10.1109/ROPEC.2013.6702719).
- [64] Aleksandar Rakić, Saša Živanović, Zoran Dimić, Mladen Knežević: Digital twin control of multi-axis wood CNC machining center based on LinuxCNC. *BioResource*, Vol.16(1): pp. 1115–1130, 2021. DOI:[10.15376/biores.16.1.1115-1130](https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1115-1130).
- [65] Alberto J. Alvares, J.S. Toquica, Eduardo José Lima, Marcelo Henrique Souza Bomfim: Retrofitting of ASEA IRB2-S6 industrial robot using numeric control technologies based on LinuxCNC and MACH3-MatLab. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 2148–2153, 2017. ISBN 978-1-5386-3742-5. DOI:[10.1109/ROBIO.2017.8324737](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324737).
- [66] Nikola Slavković, Zoran Dimić, Saša Živanović, Milan Milutinović: Kinematic Modeling of 5-axis Horizontal Milling Machine Emulated From Vertical Articulated Robot. *FME Transactions*, Vol.46:pp. 46–56, 2018. DOI:[10.5937/fmet1801046S](https://doi.org/10.5937/fmet1801046S).

-
- [67] Li Tongtong, Yang Tao, Yang Zelin, Liu Shuxuan, Li Jianming: Development of hardware-in-loop simulation platform for collaborative robots based on linuxcnc and v-rep. *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 1323–1328, 2018. DOI:10.1109/ICMA.2018.8484611.
- [68] Saša Živanović, Slobodan Tabaković, Milan Zeljković, Zoran Dimić: Modelling and analysis of machine tool with parallel–serial kinematics based on O-X glide mechanism. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol.43: pp. 456, 2021. DOI:10.1007/s40430-021-03171-6.
- [69] Slobodan Tabaković, Saša Živanović, Zoran Dimić, Milan Zeljković: Programming of 3-Axis Hybrid Kinematics CNC Machine for Rapid Prototyping Using Subtractive and Additive Processes. *Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology*, Vol.6(4): pp. 16–21, 2021.
- [70] Saša Živanović, Miloš Glavonjić, Dragan Milutinović: Configuring A Mini-Laboratory and Desktop 3-Axis Parallel Kinematic Milling Machine. *Strojniški vestnik*, Vol.61(1): pp. 33–42, 2015. DOI:10.5545/sv-jme.2013.1619.
- [71] Miloš Glavonjić, Dragan Milutinović, Saša Živanović, Zoran Dimić: Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*, Vol.46:pp. 51–60, 2010. DOI:10.1007/s00170-009-2070-3.
- [72] Feng Huo, GeokSoon Hong, AunNeow Poo: Extended development of linuxcnc for control of a delta robot. *2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, pp. 114–118, 2015. DOI:10.1109/ICAMechS.2015.7287139.
- [73] Mike Lynch: Parametric Programing for Computer Numerical Control. *Machine Tools and Touch Probes*. Societe of Manufacturing Engineers - SME, 1997.
- [74] Vasilić Goran, Živanović Saša, Kokotović Branko, Dimić Zoran: Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.33: pp. 3407–3421, 2019. DOI:10.1007/s12206-019-0636-z.
- [75] ISO 14649-10:2004. Industrial Automation Systems and Integration - Physical Device Control - Data model for computerized numerical controllers - Part 10: General process data. URL: www.iso.org/standard/40895.html.
- [76] ISO 10303-238:2007. Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 238: Application protocol: Application interpreted model for computerized numerical controllers. URL: www.iso.org/standard/38036.html.
- [77] ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration - numerical control of machines - program format and definitions of address words. URL: www.iso.org/standard/34608.html.
-

- [78] Firman Ridwan, Xun Xu: Realization CNC Controller Enable Machine Condition Monitoring Architecture Based on STEP-NC Data Model. *Advanced Materials Research*, Vol.383-390: pp. 990–994, 2012. DOI:[10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.990](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.990).
- [79] Po Hu, Zhenyu Han, Hongya Fu, Dedong Han: Architecture and implementation of closed-loop machining system based on open STEP-NC controller. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.83: pp. 1361–1375, 2015. DOI:[10.1007/s00170-015-7631-z](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7631-z).
- [80] Saša Živanović, Radovan Puzović: Wire EDM Machining Simulations Based on STEP-NC Program. *Tehnički vjesnik*, Vol.23(6): pp. 1831–1838, 2016. DOI:[10.17559/TV-20151122180547](https://doi.org/10.17559/TV-20151122180547).
- [81] Juan S. Toquica, Sasa Zivanovic, Renan Bonnard, et al.: STEP-NC-based machining architecture applied to industrial robot. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol.41(314), 2019. DOI:[10.1007/s40430-019-1811-y](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1811-y).
- [82] Saša Živanović, Nikola Slavković, Dragan Milutinović: An approach for applying step-nc in robot machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49: pp. 361–373, 2018. DOI:[10.1016/j.rcim.2017.08.009](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.08.009).
- [83] Dejan Lukić, Saša Živanović, Jovan Vukman, Mijodrag Milošević, et al.: The Possibilities for Application of STEP-NC in Actual Production Conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.32(7): pp. 3317–3328, 2018. DOI:[10.1007/s12206-018-0634-6](https://doi.org/10.1007/s12206-018-0634-6).
- [84] Saša Živanović, Goran Vasilic: A New CNC Programming Method Using STEP-NC Protocol. *FME Transactions*, Vol.45: pp. 149–158, 2017. DOI:[10.5937/fmet1701149Z](https://doi.org/10.5937/fmet1701149Z).
- [85] Živanović Saša, Glavonjić Miloš, Kokotović Branko, Dimić Zoran: Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA. *Tehničko rešenje (Novi laboratorijski proizvod)*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [86] Goran Vasilic, Sasa Zivanovic: Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.149: pp. 103833, 2020. ISSN 0094-114X. DOI:[10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833).
- [87] Živanović Saša, Vasilić Goran: Variants of Configuring the 2-Axis Reconfigurable Parallel Mechanism - MOMA. *Proceedings of 2nd International Scientific Conference, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA*, pp. 33–40, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, BiH, Republic of Srpska, 2014.
- [88] Vasilić Goran, Živanović Saša: Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma - MOMA. 40. JUPITER konferencija, NU-Roboti-FTS, Zbornik radova ISBN 978-86-7083-893-2, pp. 3.47–3.54, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016. URL: http://cent.mas.bg.ac.rs/jupiter/zbornik_2016.pdf.

-
- [89] Vasilic Goran, Živanović Saša: Modelling and Analysis of 2-Axis Reconfigurable Parallel Mechanism MOMA with Translatory Actuated Joints. *TECHNNICS - magazine of the union of engineers and technicians of Serbia*, Special edition: pp. 59–66, 2016. DOI:10.5937/tehnika1601057V.
- [90] Pu Zhang, Zhenqiang Yao, Zhengchun Du: Global performance index system for kinematic optimization of robotic mechanism. *Journal of Mechanical Design*, Vol.136: pp. 031001 1–11, 2014. DOI:10.1115/1.4026031.
- [91] Goran Vasilic, Saša Živanović: Uticaj Rezolucije Ravanskog Paralelnog Mehanizma na Tačnost Kompleksne Mašine Alatke za Proces Obrade Sečenja Žicom. 42. JUPITER konferencija, NU-Roboti-FTS, Zbornik radova ISBN 978-86-6060-055-6, pp. 3.106–3.115, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2020. URL: http://cent.mas.bg.ac.rs/jupiter/zbornik_2020.pdf.
- [92] Satya Mandal: *Elementary Linear Algebra - Linear transformation*. Department of Mathematics, University of Kansas, 2020. URL: <http://mandal.ku.edu/math290/m290NotesChSIX.pdf>.
- [93] Widnall Sheila: *Open Course, Lecture03: Vectors, Matrices and Coordinate Transformations, online publication*. MIT Massachusetts Institute of Technology, 2020. URL:http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-07-dynamics-fall-2009/lecture-notes/MIT16_07F09_Lec03.pdf.
- [94] George W. Collins: *The Foundations of Celestial Mechanics, Chapter 2 - Coordinate Systems and Coordinate Transformations*. NASA Astrophysics Data System (ADS) - Virtual Library, 2004. URL: <http://ads.harvard.edu/books/1989fcm..book/Chapter2.pdf>.
- [95] *Rotation Matrices - I*, pp. 34–41. Springer Netherlands, Dordrecht, 2002. ISBN 978-0-306-47123-0. DOI:10.1007/0-306-47123-X_4.
- [96] Qicheng Ding, Weing Wang, Zhong Jiang, Jing Zhang, Li Du, Jiexiong Ding: RTCP Detection for Five-Axis CNC Machine Tool Dynamic Performance Based on 8-Shape Trajectory. *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1709–1714, August 4-7, 2019. DOI:10.1109/ICMA.2019.8816386.
- [97] Tim Rooker, Graeme Potts, Keith Worden, Nikolaos Dervilis, Jon Stammers: Comparing Approaches for Multi-Axis Kinematic Positioning in Machine Tools. *Journal of Engineering Manufacture*, Vol.235(10): pp. 1698–1711, 2021. DOI:10.1177/09544054211019668.
- [98] Rufeng Xu, Zhitong Chen, Fanjun Meng, Qianjian Guo: A Five-Axis Tool Length Compensation Method Using the Numerical Control Program With Macro Variable. *Journal of Engineering Manufacture*, Vol.229(7): pp. 1157–1163, 2014. DOI:10.1177/0954405414559077.
- [99] R. Aidan, J. Padayachee, G. Bright: Research and Development of a 5-Axis Hybrid Kinematic CNC Machine. *24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, pp. 1–6, 2017. DOI:10.1109/M2VIP.2017.8211489.
-

- [100] Rida T. Farouki, Chang Yong Han, Shiqiao Li: Inverse Kinematics for Optimal Tool Orientation Control in 5-Axis CNC Machining. *Computer Aided Geometric Design*, vol.31(1): pp. 13–26, 2014. DOI:10.1016/j.cagd.2013.11.002.
- [101] Serdar Kucuk, Zafer Bingul: Inverse Kinematics Solutions for Industrial Robot Manipulators With Offset Wrists. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.53: pp. 1983–1999, 2014. DOI:10.1016/j.apm.2013.10.014.
- [102] Tao Huang, Xiao-Ming Zhang, Jürgen Leopold, Han Ding: Tool orientation planning in milling with process dynamic constraints: A minimax optimization approach. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.140(11): pp. 111002, 2018. DOI:10.1115/1.4040872.
- [103] Goran Vasilic, Sasa Zivanovic, Branko Kokotovic: Modelling and analysis of 3-axis reconfigurable hybrid kinematics mechanism with translatory actuated joints. In Vidosav Majstorovic and Zivana Jakovljevic, editors, *Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies*, pp. 429–441, Cham, 2017. Springer International Publishing. DOI:10.1007/978-3-319-56430-2_32.
- [104] Goran Vasilić, Saša Živanović: Analiza Radnog Prostora Rekonfigurabilnog Četvoroosnog Mehanizma sa Hibridnom Kinematikom za Proces Obrade Sečenja Žicom. 41. JUPITER konferencija, NU-Roboti-FTS, Zbornik radova ISBN 978-86-7083-978-6, pp. 3.45–3.53, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2018.
URL: http://cent.mas.bg.ac.rs/jupiter/zbornik_2018.pdf.
- [105] Vasilić Goran, Živanović Saša, Kokotović Branko, Dimić Zoran, Milutinović Milan: Configuring a Class of Machines Based on Reconfigurable 2DOF Planar Parallel Mechanism. *CN-NTech 2021: Current Problems in Experimental and Computational Engineering*, Vol.323, pp. 179–197. Springer, Cham, 2021. DOI:10.1007/978-3-030-86009-7_10
- [106] Kun Sun, Bo Li, Liang Fang, Qingguang Ye: A novel rapid prototyping system for expandable polystyrene. *Rapid Prototyping Journal*, Vol.17(1): pp. 17–27, 2011.
DOI:10.1108/13552541111098590.
- [107] Xin-Jun Liu, Jinsong Wang, Kun-Ku Oh, Jongwon Kim: A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol.39: pp. 209–225, 2004. DOI:10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68.
- [108] Javier Ros, Roberto Yoldi, Aitor Plaza, Xabier Iriarte: Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation of a Hexaglide Type Parallel Manipulator on a Real Machine Controller. *New Trends in Mechanism and Machine Science*, pp. 587–597. Springer Netherlands, 2013. ISBN 978-94-007-4902-3.
- [109] Weiyang Lin, Bing Li, Xiaojun Yang, Dan Zhang: Modelling and control of inverse dynamics for a 5-dof parallel kinematic polishing machine. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.10(8): pp. 314–335, 2013. DOI:10.5772/54966.

-
- [110] PTC Pro/EENGINEER, Januar 2022.
URL: <http://www.ptc.com/en/products/creo/pro-engineer>.
- [111] Ayman Yousef, M. H. Mostafa: Simulation and Implementation of Multiple Unipolar Stepper Motor Position Control in the Three Stepping Modes using Microcontroller. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol.4(1): pp. 29–40, 2016.
URL: <http://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/5790>.
- [112] Nikola Mladenović: *Mehanika II-Kinematika*. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 27. marta 80, Beograd, 1996. ISBN 86-7083-284-4.
- [113] Lazar Rusov: *Mehanika -Kinematika*. IDP Naučna knjiga, Uzun-Mirkova 5, Beograd, 1992. ISBN 86-23-21112-X.
- [114] EMC2-LinuxCNC, Feb. 2022.
URL: <http://linuxcnc.org/>.
- [115] EMC2-LinuxCNC, Feb. 2022.
URL: http://linuxcnc.org/docs/2.4/html/common_Getting_EMC.html.
- [116] Tomislav Staroveški, Danko Brezak, Toma Udiljak: LinuxCNC - The Enhanced Machine Controller: Application and an Overview. *Tehnički Vjesnik*, 20(6): pp. 1103–1110, 2013.
URL: <https://hrcak.srce.hr/file/165776>.
- [117] Tomislav Staroveški, Danko Brezak, Toma Udiqak, Dubravko Majetić: Implementation of a Linux-Based CNC Open control System. *12th International scientific conference on production engineering - CIM2009*, pp. 209–216. Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, 2009.
- [118] EMC2-User Manual V2.4, X 2011.
www.linuxcnc.org/docs/2.4/EMC2_User_Manual.pdf.
- [119] EMC-Components, Feb.2022.
www.wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?EMC_Components.
- [120] Feng Huo, GeokSoon Hong, AunNeow Poo: Extended Development of LinuxCNC for Control of a Delta Robot. *2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, pp. 114–118, 2015. DOI:10.1109/ICAMechS.2015.7287139.
- [121] William Shackleford, Frederick Proctor, John Michaloski: The neutral message language: A model and method for message passing in heterogeneous environments. *Robotics and Applications; Robotic and Manufacturing Systems Recent Results in Research, Development and Applications*, 8th International Symposium, TSI Press, 2000-06-01 2000.
URL: http://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823366.
- [122] The HAL (Hardware Abstarction Layer) HandBook, 25.Jun 2007.
URL: http://linuxcnc.org/docs/2.1/HAL_User_Manual.pdf.
-

- [123] Mesa Configuration Wizard, Februar 2022.
 URL: http://linuxcnc.org/docs/2.5/html/config/pncconf.html#_gui_configuration.
- [124] Kinematics in EMC2, Februar 2022.
 URL: http://linuxcnc.org/docs/2.4/html/motion_kinematics.html.
- [125] Saša Živanović, Zoran Dimić: Virtuelna petoosna mašina alatka integrisana sa sistemom programiranja i upravljanja. *TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije*, Vol.68(3): pp. 397–404, 2019. DOI:10.5937/tehnika1903397Z.
- [126] Vismach, Februar 2022.
 URL: https://linuxcnc.org/docs/html/gui/vismach.html#_start_the_script.
- [127] Vismach, Februar 2022.
 URL: <https://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?Vismach>.
- [128] X.W Xu, Q. He: Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.20 (2): pp. 101–109, 2004. DOI:10.1016/j.rcim.2003.08.003.
- [129] Živanović Saša, Miloš Glavonjić: Methodology for Implementation Scenarios for Applying Protocol STEP-NC. *Journal of Production Engineering*, Vol.17(1): pp. 71–74, 2014.
- [130] Christophe Danjou, Julien Le Duigou, Benoît Eynardb: Manufacturing Knowledge Management Based on STEP-NC Standard: a Closed-Loop Manufacturing Approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol.30(9): pp. 995–1009, 2016. DOI:10.1080/0951192X.2016.1268718.
- [131] Po Hu, Zhenyu Han, Hongya Fu, Dedong Han: Architecture and Implementation of Closed-loop Machining System Based on Open STEP-NC Controller. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.83: pp. 1361–1375, 2016. DOI:10.1007/s00170-015-7631-z.
- [132] STEP-NC Data Sets - Sample AP238 files for testing, validation and conformance checking, Mart 2022. URL: www.ap238.org/stepncfiles/.
- [133] TB6600 Stepper Motor Driver User Guide, Mart 2022.
 URL: <https://usermanual.wiki/Document/TB660020User20Guide20V12.1280230395/view>.
- [134] User manual of 5Axis Breakout Board, Mart 2022. URL: www.vallder.com/images/product_details_images/mach3_5-axis_board/Mach3-5-Axis-Interface%20Board.pdf.
- [135] Mach3 CNC Controller Software Installation and Configuration, Mart 2022.
 URL: www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill_Install_Config.pdf.
- [136] Ncstudio-V8, Weihong Engraving Machine's Motion Control System, User Manual, Mart 2022.
 URL: www.ltcnc.cn/static/upload/file/20180511/1525999428207575.pdf.

-
- [137] ISO 10791-7:1998. Test conditions for machining centres – part 7: Accuracy of finished test pieces, 1998. URL: www.iso.org/standard/24692.html.
- [138] ISO 14649-11:2004. Industrial automation systems and integration — Physical device control — Data model for computerized numerical controllers — Part 11: Process data for milling. URL: www.iso.org/standard/40896.html.
- [139] Saša Živanović, Goran Vasilić, Branko Kokotović, Nikola Vorkapić, Zoran Dimić, Nikola Slavković: Konfigurisawe i verifikacija rekonfigurabilne mašine sa hibridnom kinematikom moma v3. *COMETA 2022, 6th International Scientific Conference*, pp. 46–55, Jahorina, B&H, Republic of Srpska. University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications. URL: <http://cometa.ues.rs.ba/Zbornik2022/2-312%20Zivanovic.pdf>

ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1 : Конфигурисање виртуелне машине *РПКМ-МОМА* у оквиру *LinuxCNC* управљачког система

```
#!/usr/bin/python2.4
# This program is free software; you can redistribute it and/or modify
# it under the terms of the GNU General Public License as published by
# the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or
# (at your option) any later version.
#
# This program is distributed in the hope that it will be useful,
# but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
# MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
# GNU General Public License for more details.
# You should have received a copy of the GNU General Public License
# along with this program; if not, write to the Free Software
# Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA

# link description
# link1 - stationary base
# link2 .. GV - the 6 moving parts of the robot, numbered form base to end effector

from vismach import *
import hal
import math
import sys
import emc

for setting in sys.argv[1:]: exec setting

c = hal.component("moma145_sim")
c.newpin("joint0", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint1", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint2", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint3", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint4", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("joint5", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("axis.0", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("axis.1", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.newpin("axis.2", hal.HAL_FLOAT, hal.HAL_IN)
c.ready()

work = Capture()
Track

#tool goes here
tool = Capture()

#provide some reference frames
world_coords = Capture()

#i shouldnt have to do this
foo = Collection([world_coords, Sphere(0,0,0)])
foo = Translate([foo],0,0,0)
```

```

# "tooltip" for backplot will be the tip of the tool, for now GV
tooltip = Capture()
tool = Collection([tooltip, tool])
tool = Translate([tool],0,-229.128,2)

GV = AsciiSTL(filename="gv.stl")
GV = Collection([GV, tool])
GV = Translate([GV],0,-229.128,-44)

GV_coords = Capture()
GV_joint = Sphere(0,0,0,10)
GV_joint = Collection([GV_joint, GV_coords])
GV_joint = Translate([GV_joint],0,-229.128,44)

p2_coords = Capture()
p2_joint = Sphere(0,0,0,2)
p2_joint = Collection([p2_joint, p2_coords])
p2_joint = Translate([p2_joint],100,0,44)

strut2p = AsciiSTL(filename="spojka2p.stl")
strut2p = HalTranslate([strut2p],c,"joint5",0,0,1)
strut2k = AsciiSTL(filename="spojka2k.stl")
strut2 = Collection([strut2p, strut2k])
strut2 = Color([0.3,0.3,0.3,1],[strut2])
strut2 = Track([strut2],p2_coords,GV_coords,world_coords)

p1_coords = Capture()
p1_joint = Sphere(0,0,0,2)
p1_joint = Collection([p1_joint, p1_coords])
p1_joint = Translate([p1_joint],-100,0,44)

strut1p = AsciiSTL(filename="spojka1p.stl")
strut1p = HalTranslate([strut1p],c,"joint5",0,0,1)
strut1k = AsciiSTL(filename="spojka1k.stl")
strut1 = Collection([strut1p, strut1k])
strut1 = Color([0.3,0.3,0.3,1],[strut1])
strut1 = Track([strut1],p1_coords,GV_coords,world_coords)

GV = Translate([GV],0,2*229.128,44)
GV_joint = Translate([GV_joint],0,229.128,0)
GV = Color([0.3,0.3,0.3,1],[GV,GV_joint])
GV = HalTranslate([GV],c,"axis.0",1,0,0)
GV = HalTranslate([GV],c,"axis.1",0,1,0)
GV = HalTranslate([GV],c,"axis.2",0,0,1)

osa_II = AsciiSTL(filename="sklop_p2.stl")
klizac_p2 = AsciiSTL(filename="klizac_p2.stl")
klizac_p2 = Collection([klizac_p2,p2_joint])
klizac_p2 = HalTranslate([klizac_p2],c,"joint1",0,-1,0)

osa_II = Collection([osa_II,klizac_p2])
osa_II = Color([0.3,0.3,0.3,1],[osa_II])
osa_II = Translate([osa_II],-100,0,-44)
osa_II = HalRotate([osa_II],c,"joint4",1,0,0,1)
osa_II = Translate([osa_II],100,0,44)

```

```

# "tooltip" for backplot will be the tip of the tool, for now GV
osa_I = AsciiSTL(filename="sklop_p1.stl")
klizac_p1 = AsciiSTL(filename="klizac_p1.stl")
klizac_p1 = Collection([klizac_p1,p1_joint])
klizac_p1 = HalTranslate([klizac_p1],c,"joint0",0,-1,0)

osa_I = Collection([osa_I,klizac_p1])
osa_I = Color([0.3,0.3,0.3,1],[osa_I])
osa_I = Translate([osa_I],100,0,-44)
osa_I = HalRotate([osa_I],c,"joint3",1,0,0,1)
osa_I = Translate([osa_I],-100,0,44)

postolje = AsciiSTL(filename="asm_postolje_paralel_asm_5.stl")
postolje = Color([0.7,0.9,0.9,0],[postolje])
postolje = Collection([osa_I, osa_II,postolje])

# stationary base
moma145_sim = Collection([postolje, GV, strut1, strut2])
model = Collection([work,moma145_sim,foo])
main(model, tooltip, work,1000)

```


ПРИЛОГ 2 : Програми за верификацију рада двоосног раванског механизма са паралелном кинематиком *РПКМ-МОМА*

• **Параметарски програм са потпрограмом**

G17 G21 G40 G49 G55 G90

O100 CALL [0] [0] [70] [40] [10] [5] [5]

(-Tumačenje-)

(Izvršenjem drugog reda programa, poziva se potprogram pri čemu parametri uzimaju sledeće vrednosti)

(#1=0 X_C - koordinata centra konture)
 (#2=0 Y_C - koordinata centra konture)
 (#3=70 L - širina konture)
 (#4=40 H - visina konture)
 (#5=10 l - širina zarubljenog čoška ($l/45^\circ$))
 (#6=5 R_1 - spoljašnji radijus)
 (#7=5 R_2 - unutrašnji radijus)

#8=[[#3-2*#7-2*#5]/2] (Izračunavanje vrednosti za parametar #8 na osnovu zadatih vrednosti parametara sa početka programa ($(L-2*R_2-2*l)/2$))

#9=[[#4-2*#7-2*#6]/2] (Izračunavanje vrednosti za parametar #9 na osnovu zadatih vrednosti parametara sa početka programa ($(H-2*R_2-2*R_1)/2$))

(U nastavku, tokom izvršenja programa upravljački sistem na osnovu dodeljenih ili izračunatih vrednosti parametara izračunava poziciju vrha alata)

O100 SUB (Početak potprograma)

G00 X[#1] Y[#2]

G01 X[#7] Y[-#4/2] F500

G91

G01 X[#8] Y[0]

G01 X[#7] Y[#7]

G01 Y[#9]

G03 X[0] Y[2*#6] I0 J[#6]

G01 Y[#9]

G01 X[-#7] Y[#7]

G01 X[-#8]

G02 X[-2*#7] Y[0] I[-#7] J[0]

G01 X[-#8]

G01 X[-#7] Y[-#7]

G01 Y[-#9]

G03 X[0] Y[-2*#6] I0 J[-#6]

G01 Y[-#9]

G01 X[#7] Y[-#7]

G01 X[#8]

G02 X[2*#7] Y[0] I[#7] J[0]

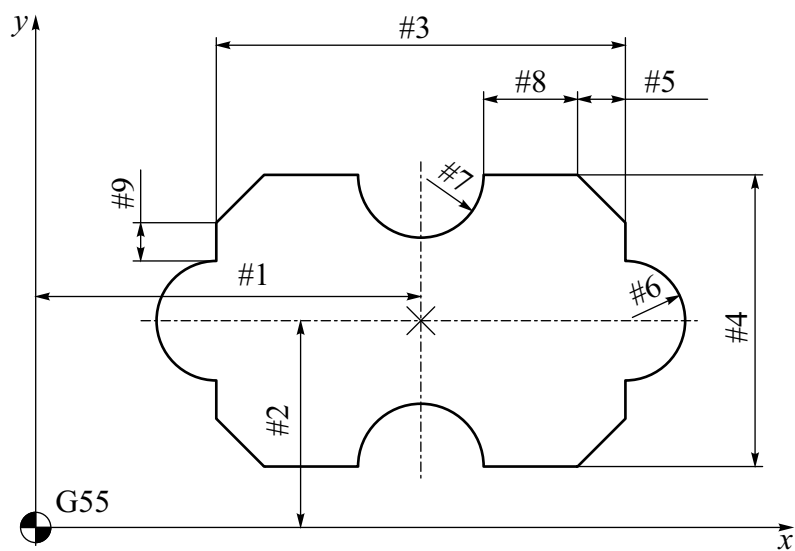
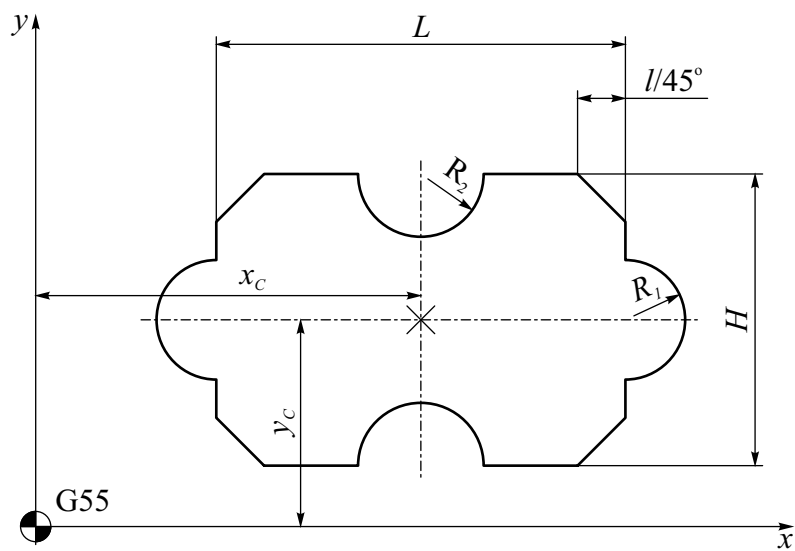
O100 ENDSUB (Kraj potprograma)

G90

G00 X[#1] Y[#2]

M30

%



Слика Сп.1 Скица типске контуре за коју је дат параметарски програм

• **Програм са потпрограмом и ротацијом координатног система**

```

O100 SUB          (Početak prvog potprograma)
G01 X8 Y30 F300
G02 X-8 Y30 I-8 J0
O100 ENDSUB      (Kraj prvog potprograma)

O200 SUB          (Početak drugog potprograma)
G01 X8 Y30 F300
G03 X-8 Y30 I-8 J0
O200 ENDSUB      (Kraj drugog potprograma)

(GLAVNI PROGRAM)
(Naizmenično pozivanje potprograma nakon rotacije koordinatnog sistema oko ose Oz za 45°)

G17 G21 G40 G49 G55 G90
G01 X0 Y0 F500
O100 CALL

G10 L2 P2 R45
O200 CALL

G10 L2 P2 R90
O100 CALL

G10 L2 P2 R135
O200 CALL

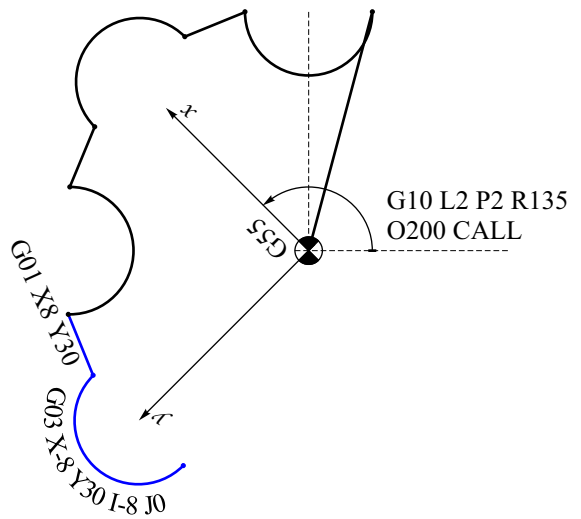
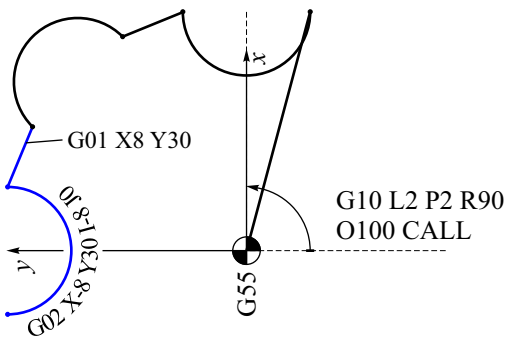
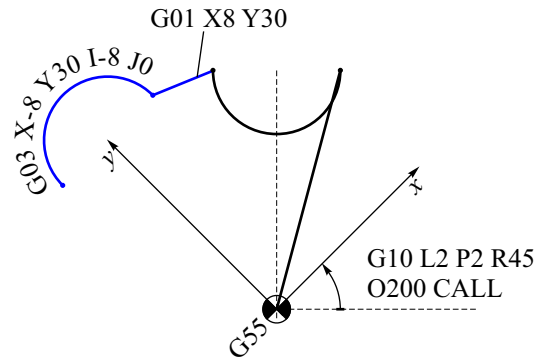
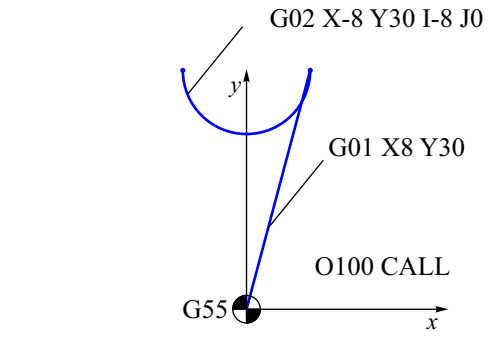
G10 L2 P2 R180
O100 CALL

G10 L2 P2 R225
O200 CALL

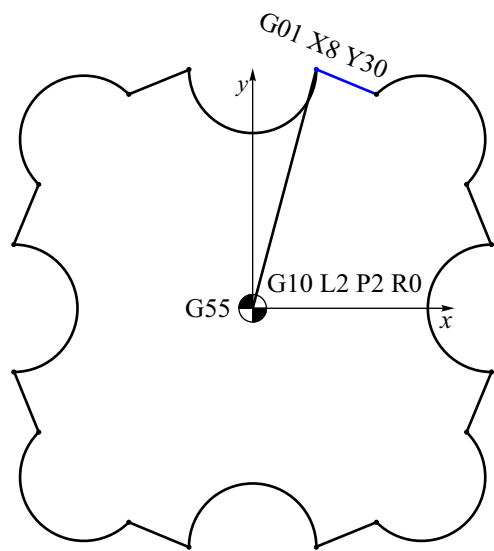
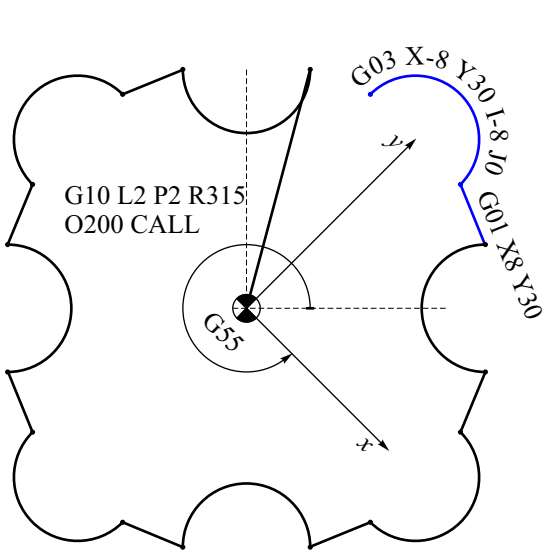
G10 L2 P2 R270
O100 CALL

G10 L2 P2 R315
O200 CALL

G10 L2 P2 R0
G01 X8 Y30
M30
%
```



...



Слика Сп.2 Скица типске контуре за коју је дат програм са потпрограмима

ПРИЛОГ 3 : Једначине кинематичких проблема вишеосне машине алатке *MOMA-W 4S* имплементиране у *LinuxCNC* управљачки систем

```
/******  
* Description: momwkins.c  
* Non-Trivial kinematics for multy-axis complex machine MOMA-W 4S  
* Derived from a work by Fred Proctor & Will Shackelford  
* License: GPL Version 2  
* System: Linux  
* Copyright (c) 2004 All rights reserved.  
*****/  
  
#include "kinematics.h" /* these decls */  
#include "rtapi_math.h"  
  
/******  
/***** MOMA1 *****/  
/*****  
  
double ZP1P2=440;  
  
double l1=280;  
double l2=280;  
  
double xo1=-245;  
double yo1=0;  
double xo2=245;  
double yo2=0;  
  
double o1r1x=95;  
double o1r1y=-150;  
double o2r2x=-95;  
double o2r2y=-150;  
  
double LPx11=44.00;  
double LPx12=-44.00;  
double LP1y=0.00;  
  
double gama1s=-5;  
double gama2s=5;  
  
#define alfa1S (270+gama1s)  
#define alfa2S (270+gama2s)  
#define gama1R (gama1s*M_PI/180)  
#define gama2R (gama2s*M_PI/180)  
#define alfa1R (alfa1S*M_PI/180)  
#define alfa2R (alfa2S*M_PI/180)  
  
#define cg1 (cos(gama1R))  
#define sg1 (sin(gama1R))  
#define cg2 (cos(gama2R))  
#define sg2 (sin(gama2R))
```

```

#define ca1 (cos(alfa1R))
#define sa1 (sin(alfa1R))
#define ca2 (cos(alfa2R))
#define sa2 (sin(alfa2R))

#define xr1 (xo1+cg1*o1r1x-sg1*o1r1y)
#define yr1 (yo1+sg1*o1r1x+cg1*o1r1y)
#define xr2 (xo2+cg2*o2r2x-sg2*o2r2y)
#define yr2 (yo2+sg2*o2r2x+cg2*o2r2y)

/*****/
/***** MOMA2 *****/
/*****/

double l3=280;
double l4=280;

double xo3=-245;
double yo3=0;
double xo4=245;
double yo4=0;

double o3r3x=95;
double o3r3y=-150;
double o4r4x=-95;
double o4r4y=-150;

double LPx21=44.00;
double LPx22=-44.00;
double LP2y=0.00;

double gama3s=0;
double gama4s=0;

#define alfa3S (270+gama3s)
#define alfa4S (270+gama4s)
#define gama3R (gama3s*M_PI/180)
#define gama4R (gama4s*M_PI/180)
#define alfa3R (alfa3S*M_PI/180)
#define alfa4R (alfa4S*M_PI/180)

#define cg3 (cos(gama3R))
#define sg3 (sin(gama3R))
#define cg4 (cos(gama4R))
#define sg4 (sin(gama4R))

#define ca3 (cos(alfa3R))
#define sa3 (sin(alfa3R))
#define ca4 (cos(alfa4R))
#define sa4 (sin(alfa4R))

#define xr3 (xo3+cg3*o3r3x-sg3*o3r3y)
#define yr3 (yo3+sg3*o3r3x+cg3*o3r3y)
#define xr4 (xo4+cg4*o4r4x-sg4*o4r4y)
#define yr4 (yo4+sg4*o4r4x+cg4*o4r4y)

```

```

int kinematicsForward(const double *joints,
                    EmcPose * pos,
                    const KINEMATICS_FORWARD_FLAGS * fflags,
                    KINEMATICS_INVERSE_FLAGS * iflags)

{
double D = 10;
double p1 = joints[0];
double p2 = joints[1];
double p3 = joints[6];
double p4 = joints[7];
double z1b1 = joints[2];
double z2b1 = joints[2] + D;

/***** MOMA1 *****/

double v11=2*(p1*ca1+xr1+LPx11);
double v12=2*(p1*sa1+yr1+LP1y);
double v13=p1*p1+2*p1*(ca1*(xr1+LPx11)+sa1*(yr1+LP1y))+
            +(xr1+LPx11)*(xr1+LPx11)+(yr1+LP1y)*(yr1+LP1y)-11*11;
double v14=2*(p2*ca2+xr2+LPx12);
double v15=2*(p2*sa2+yr2+LP1y);
double v16=p2*p2+2*p2*(ca2*(xr2+LPx12)+sa2*(yr2+LP1y))+
            +(xr2+LPx12)*(xr2+LPx12)+(yr2+LP1y)*(yr2+LP1y)-12*12;
double v17=(v16-v13)/(v14-v11);
double v18=(v12-v15)/(v14-v11);
double v19=1+v18*v18;
double v110=2*v17*v18-v11*v18-v12;
double v111=v17*v17-v11*v17+v13;

double yp1=(-v110-sqrt(v110*v110-4*v19*v111))/(2*v19);
double xp1=v17+yp1*v18;

/***** MOMA2 *****/

double v21=2*(p3*ca3+xr3+LPx21);
double v22=2*(p3*sa3+yr3+LP2y);
double v23=p3*p3+2*p3*(ca3*(xr3+LPx21)+sa3*(yr3+LP2y))+
            +(xr3+LPx21)*(xr3+LPx21)+(yr3+LP2y)*(yr3+LP2y)-13*13;
double v24=2*(p4*ca4+xr4+LPx22);
double v25=2*(p4*sa4+yr4+LP2y);
double v26=p4*p4+2*p4*(ca4*(xr4+LPx22)+sa4*(yr4+LP2y))+
            +(xr4+LPx22)*(xr4+LPx22)+(yr4+LP2y)*(yr4+LP2y)-14*14;
double v27=(v26-v23)/(v24-v21);
double v28=(v22-v25)/(v24-v21);
double v29=1+v28*v28;
double v210=2*v27*v28-v21*v28-v22;
double v211=v27*v27-v21*v27+v23;

double yp2=(-v210-sqrt(v210*v210-4*v29*v211))/(2*v29);
double xp2=v27+yp2*v28;

```

```

/***** MOMA-W *****/

double x=(z1b1)/(ZP1P2)*(xp2-xp1)+xp1;
double y=(z1b1)/(ZP1P2)*(yp2-yp1)+yp1;

double u=(z2b1)/(ZP1P2)*(xp2-xp1)+xp1;
double v=(z2b1)/(ZP1P2)*(yp2-yp1)+yp1;

pos->tran.x = x;
pos->tran.y = y + 434.679;
pos->tran.z = joints[2];
pos->a = joints[3];
pos->u = u;
pos->v = v + 434.639;
return 0;
}

int kinematicsInverse(const EmcPose * pos,
                    double *joints,
                    const KINEMATICS_INVERSE_FLAGS * iflags,
                    KINEMATICS_FORWARD_FLAGS * fflags)
{
double D = 10;
double x1=pos->tran.x;
double y1=pos->tran.y - 434.679;
double x2=pos->tran.x + pos->u;
double y2=pos->tran.y + pos->v - 434.639;

double z1b1=pos->tran.z;
double z2b1=pos->tran.z + D;
double z1b2=pos->tran.z - ZP1P2;
double z2b2=(pos->tran.z + D)-ZP1P2;

double xp1=-z1b1/(z2b1-z1b1)*(x2-x1)+x1;
double yp1=-z1b1/(z2b1-z1b1)*(y2-y1)+y1;
double xp2=-z1b2/(z2b2-z1b2)*(x2-x1)+x1;
double yp2=-z1b2/(z2b2-z1b2)*(y2-y1)+y1;

double t1=xp1-xr1-LPx11;
double t2=yp1-yr1-LPy1;
double t3=t1*ca1+t2*sa1;
double t4=t1*t1+t2*t2-11*11;
double t5=xp1-xr2-LPx12;
double t6=yp1-yr2-LPy1;
double t7=t5*ca2+t6*sa2;
double t8=t5*t5+t6*t6-12*12;
double t9=xp2-xr3-LPx21;
double t10=yp2-yr3-LPy2;
double t11=t9*ca3+t10*sa3;
double t12=t9*t9+t10*t10-13*13;
double t13=xp2-xr4-LPx22;
double t14=yp2-yr4-LPy2;
double t15=t13*ca4+t14*sa4;
double t16=t13*t13+t14*t14-14*14;

```

```
double p1=t3-sqrt(t3*t3-t4);
double p2=t7-sqrt(t7*t7-t8);
double p3=t11-sqrt(t11*t11-t12);
double p4=t15-sqrt(t15*t15-t16);

joints[0] = p1;
joints[1] = p2;
joints[2] = pos->tran.z;
joints[3] = pos->a;
joints[6] = p3;
joints[7] = p4;
return 0;
}

/* implemented for these kinematics as giving joints preference */
int kinematicsHome(EmcPose * world,
                  double *joint,
                  KINEMATICS_FORWARD_FLAGS * fflags,
                  KINEMATICS_INVERSE_FLAGS * iflags)
{
    *fflags = 0;
    *iflags = 0;
    return kinematicsForward(joint, world, fflags, iflags);
}

KINEMATICS_TYPE kinematicsType()
{
    return KINEMATICS_BOTH;
}

#include "rtapi.h" /* RTAPI realtime OS API */
#include "rtapi_app.h" /* RTAPI realtime module decls */
#include "hal.h"

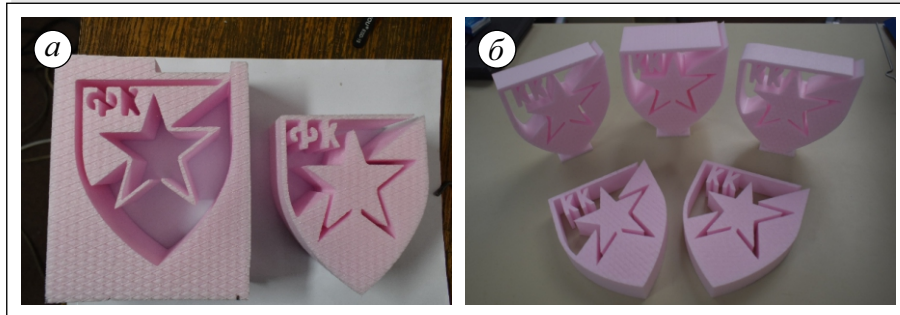
EXPORT_SYMBOL(kinematicsType);
EXPORT_SYMBOL(kinematicsForward);
EXPORT_SYMBOL(kinematicsInverse);
MODULE_LICENSE("GPL");

int comp_id;
int rtapi_app_main(void) {
    comp_id = hal_init("momwkins");
    if(comp_id > 0) {
        hal_ready(comp_id);
        return 0;
    }
    return comp_id;
}

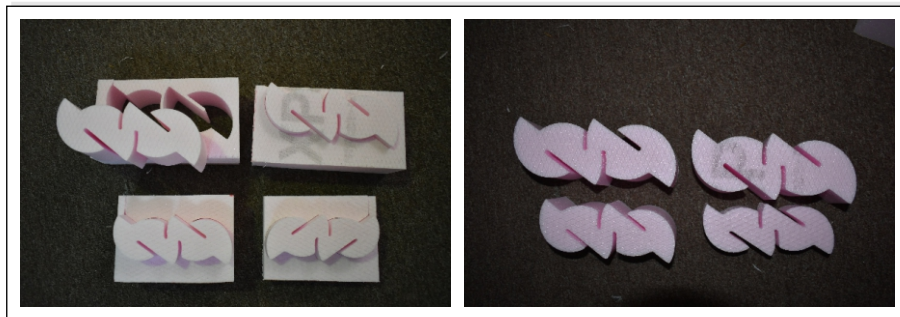
void rtapi_app_exit(void) { hal_exit(comp_id); }
```

**ПРИЛОГ 4 : Делови израђени на комплексној машини алатки
MOMA-W 4S**

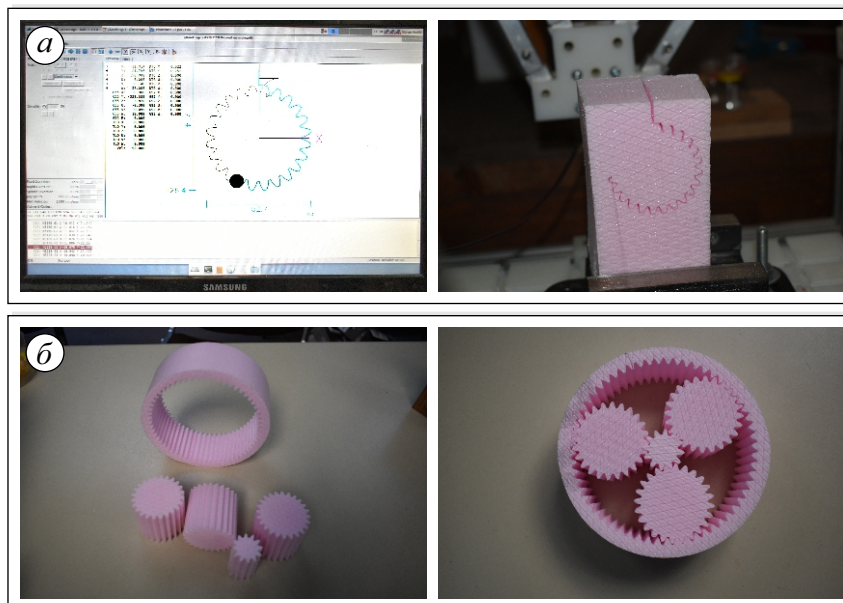
- Делови сложеног облика и танкозидни делови



Слика Сп.3 Грб: а)Фудбалског клуба Црвена звезда; б)Кошаркашког клуба Црвена звезда



Слика Сп.4 Лого Академије техничких струковних студија Београд

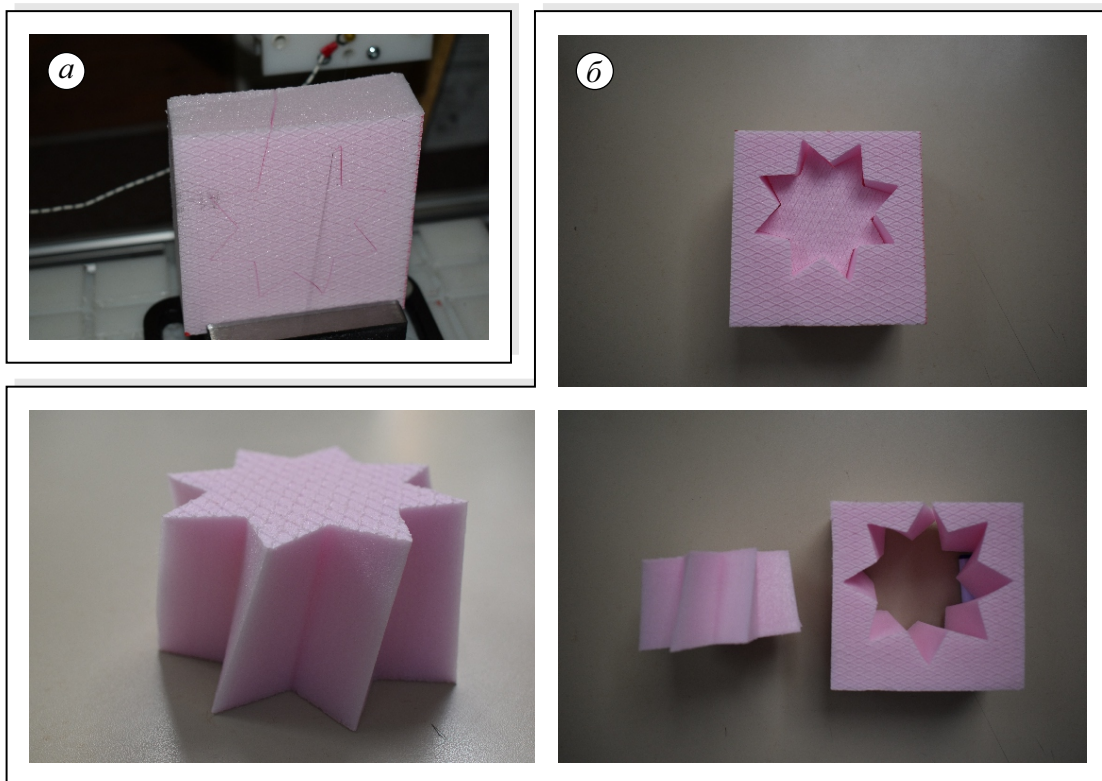


Слика Сп.5 Планетарни механизам: а)Пућања алата у LinuxCNC окружењу и поступакизраде; б)Израђени делови склопа и склоп механизма

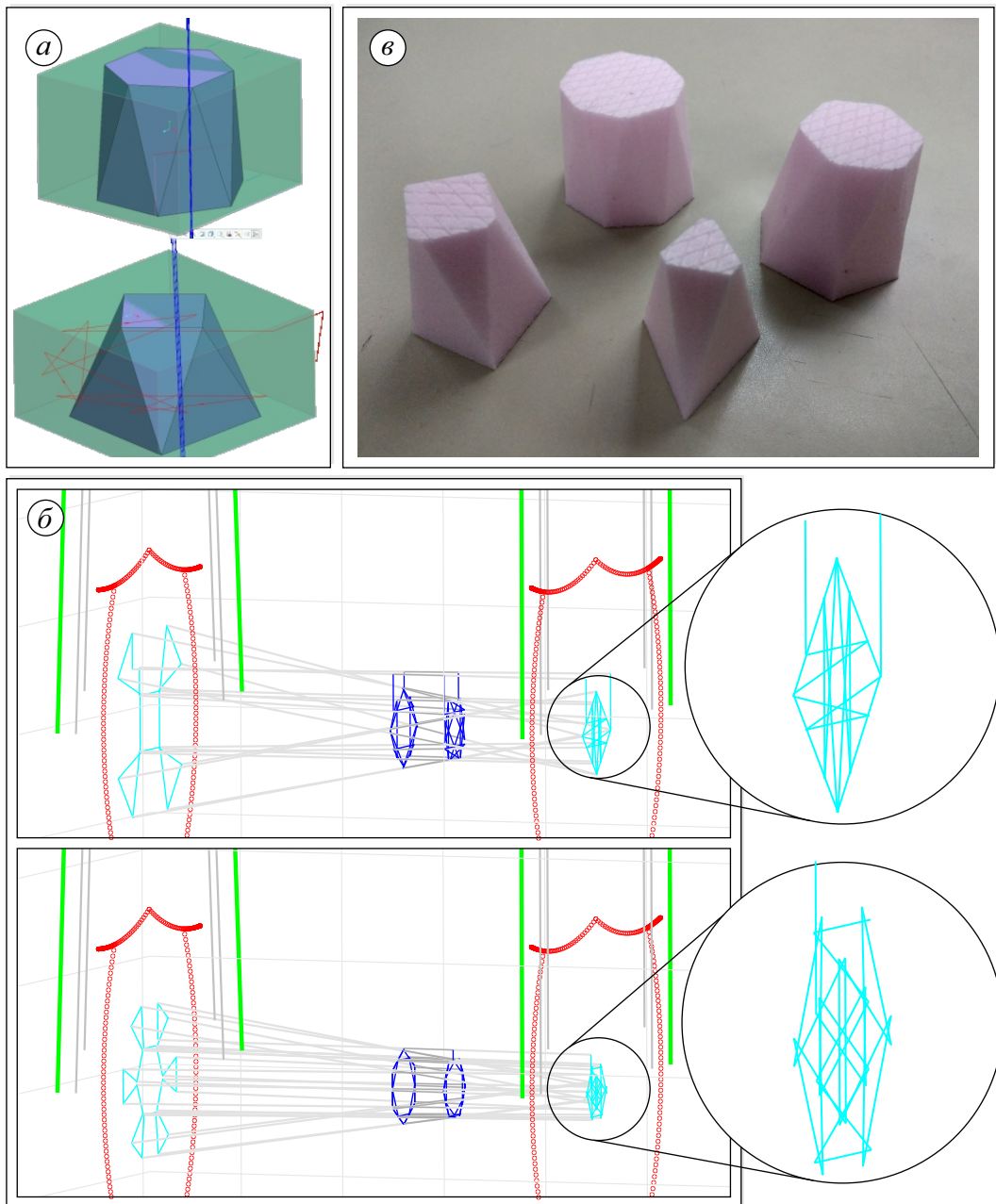


Слика Сп.6 Танкозидни делови израђени на машини алатки MOMA-W 4S: а)Лого центра за нове технологије катедре за производно машинство Машинског факултета у београду - процес израде и израђену делови; б)Лого Јупитер конференције - процес израде и израђену делови

• Делови израђени променом оријентација жице



Слика Сп.7 Шестокрака увијена звезда: а)Процес израде; б)Израђени делови



Слика Сп.8 Делови облика дијаманта: а)3D модели и симулације путање алата у CAD/CAM софтверском систему за израду осмостраног и дванаестостраног дијаманта; б)Симулација рада машине алатке MOMA-W 4S у развијеној MATLAB апликацији; в)Израђени делови.

• Програм са потпрограмом за израду украсних лајсни уз примену функције за транслацију координатног система

```

G90 G21 G17 G55 G40 G49
G0 W150
G00 Z100

O100 CALL
G10 L20 P2 X-50
O100 CALL
G10 L20 P2 X-50
O100 CALL
G10 L20 P2 X-50
O100 CALL
M30
%

O100 SUB
N30 G0 X0. Y10. U0. V0.
N60 G1 X5. Y0. U0. V0. F200
N70 G1 X5.004 Y-.283 U0. V0.
N80 G1 X5.016 Y-.565 U0. V0.
N90 G1 X5.036 Y-.848 U0. V0.
N100 G1 X5.064 Y-1.129 U0. V0.
N110 G1 X5.1 Y-1.41 U0. V0.
N120 G1 X5.144 Y-1.689 U0. V0.
N130 G1 X5.195 Y-1.967 U0. V0.
N140 G1 X5.255 Y-2.244 U0. V0.
N150 G1 X5.322 Y-2.518 U0. V0.
N160 G1 X5.397 Y-2.791 U0. V0.
N170 G1 X5.48 Y-3.061 U0. V0.
N180 G1 X5.571 Y-3.329 U0. V0.
N1190 G1 X25. Y-25. U0. V0.
N1200 G1 X30. Y-25. U0. V0.
. . .
. . .
. . .
N2420 G1 X2.42 Y-25.197 U0. V0.
N2430 G1 X2.078 Y-25.145 U0. V0.
N2440 G1 X1.734 Y-25.101 U0. V0.
N2450 G1 X1.39 Y-25.065 U0. V0.
N2460 G1 X1.044 Y-25.036 U0. V0.
N2470 G1 X.698 Y-25.016 U0. V0.
N2480 G1 X.352 Y-25.004 U0. V0.
N2490 G1 X.006 Y-25. U0. V0.
N2500 G1 X0. Y-25. U0. V0.
N2510 G1 X0. Y0. U0. V0.
N2510 G1 X0. Y10. U0. V0.
O100 ENDSUB

```

• **Параметарски програм за израду зарубљеног конуса**

```
G90 G21 G17 G55 G40 G49
G0 W50
G00 Z100

#1=60                                (D)
#2=30                                (d)
#3=[(#1-#2)/2]
#4=0                                  (Ugao)
#5=0                                  (Xc)
#6=0                                  (Yc)
#55=0                                 (xc)
#66=0                                 (yc)

G1 Y[#6+#1/2+10] F200
G1 X[#5+#1/2+10] F200
G1 Y[#6] F200

O100 WHILE [#4 LE 360]
  #7=[#5+#1/2*cos[#4]]                ("X" koordinata tačke na konturi 1)
  #8=[#6+#1/2*sin[#4]]                ("Y" koordinata tačke na konturi 1)
  #9=[#55+#2/2*cos[#4]]               ("x" koordinata tačke na konturi 2)
  #10=[#66+#2/2*sin[#4]]              ("y" koordinata tačke na konturi 2)
  #11=[#7-#9]                          (Izračunavanje koordinate "U")
  #12=[#8-#10]                         (Izračunavanje koordinate "V")
  G1 X[#7] Y[#8] U[#11] V[#12] F200
  #4=[#4+1]
O100 ENDWHILE

G1 Y[#6+#1/2+10] U0 V0 F200
M30
%
```


БИОГРАФИЈА

Горан В. Василић је рођен 22.VII 1977.год. у Београду. Завршио је основну школу "Јован Стерија Поповић" на Новом Београду. Након завршене основне школе уписује средњу електро-техничку школу "Раде Кончар" смер Електро-техничар погона. Током школовања показује склоности ка електроници, аудио техници, аутоматици, програмирању, машинству и своја интересовања усклађује са својим хобијима као што су израда аудио појачала, ручно прављење звучника и аудио система, прављење једноставних система управљања итд.

Петогодишње основне академске студије уписује 1996.год. на Машинском факултету у Београду. Дипломирао је на катедри за *Војно машинство*, а дипломски рад је између осталог обухватао и израду корисничког програма за прорачун и анализу оптерећења артиљеријског оруђа. Овиме, Горан В. Василић стиче академско звање *Дипломирани инжењер машинства (дипл.инж.маш)*.

Школске 2011./2012. поново уписује Машински факултет у Београду и то *Мастер академске студије* и опредељује се за модул *Производно машинство*. На мастер академским студијама стиче нова знања из области везаних за производне технологије као што су CNC машине алатке, Индустриски роботи, Аутоматизација производње, 3D моделирање и симулација итд. која представљају прекретницу за будућа интересовања и предстојећу каријеру. Од Машинског факултета добија похвале за остварен одличан успех у I и II години мастер академских студија. Током мастер академских студија завршава обуку за рад у софтверском пакету *Autodesk Inventor* и учествује на јавном конкурс *Петар Дамјановић* са пројектом "3D Модел индустријског робота" у целости реализовног у софтверском пакету *Autodesk Inventor Professional*. Дипломски (M.Sc.) рад под називом *"Реконструкција учила МОМА-2 у троосну машину алатку"* одбраћен 22.VII 2013.год. је представљао полазну основу за докторске студије које као *Мастер инжењер машинства (маст.инж.маш)* уписује у децембру 2013. године.

Током докторских студија до пуног изражаја долазе знања и вештине којима Горан В. Василић располаже, а за приказане резултате прима похвале од више професора. Истичу се похвале проф. др Слободана Љ. Радојевића, професора математике на Машинском факултету у Београду за примену математичких алата који до сада нису кориштени за решавање проблема везаних за паралелне механизме као и похвале од стране ментора проф. др Саше Т. Живановића и проф. др Драгана С. Милутиновића за предложен концепт комплексне вишеосне машине алатке за чију реализацију су осим из машинства примењена знања из многих других области.

Од почетка докторских студија па до одбране докторске дисертације, Горан В. Василић је објавио више научних радова у домаћим и међународним часописима од којих су најважнији радови објављени у часописима "*Mechanism and Machine Theory*" категорије M21, "*Journal of Mechanical Science and Technology*" категорије M23 и "*FME Transaction*" категорије M24. На домаћим и страним конференцијама је саопштио и публиковао више радова у којима су презентовани резултати научно истраживачког рада. Истиче се учешће на конференцији "*CNN Tech 2021 - International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies*", потом на конференцији "*NewTECH 2017 - International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies*", као и учешћа на више "*ЈУПИТЕР конференција*" организованих од стране Катедре за производно машинство Машинског факултета у Београду. На свим нивоима студија, а посебно на докторским, Горан В. Василић показује своју интердисциплинарност чиме своја знања из: више математике, механике, електро-технике, аутоматике, програмирање микроконтролера и *PLC*-а, *3D* моделирања, машинске обраде, програмирања *CNC* машина и рачунарског програмирања, користи за решавање постављених проблема што у великој мери примењује при изради докторске дисертације.

Горан В. Василић је још током студија започео своју радну каријеру. Као хонорарни сарадник је радио у *Београдском драмском позоришту* као дизајнер расвете и програмер радног пулта за управљање расветом на сцени. Као дипломирани машински инжењер је волонтерски радио на два пројекта у компанији *Teams design* где стиче знања из напредних техника моделирања. Као дипломирани машински инжењер је радио у компанији *Alpina Dolomit* која се бави производњом каменог агрегата. Богато искуство из производних технологија стиче у компанији *TehnoIN* где је радио на: изради *3D* модела производа, пројектовању алата за бризгање пластике, пројектовању алата за обликовање лима, изради програма за *CNC* машине, пројектовању електрода за *EDM* неконвенционалну методу обраде. Искуство употпуњује током сарадње са компанијом *Tehno-Plast* која се бави машинском обрадом и израдом алата за бризгање пластике.

Као асистент у настави, 2014. год. почиње да ради у *Високој инжењерској школи струковних студија - ТЕХНИКУМ ТАУРВУМ*. Убрзо потом добија звање наставник вештина при чему се задужује за реализацију наставе (предавања и/или вежбе) и одржавање испита на основним и специјалистичким струковним студијама из предмета везаних за производне технологије и то: Обрада метала деформисањем, НУ обрадни системи, Пројектовање производа применом рачунара, Аутоматизација производних процеса, Мерење и контрола, Системи контроле у производном инжењерству, *3D* моделирање у инжењерству, Технологије и програмирање *CNC* система. Од 2021. год. ради као наставник вештина у *Одсеку за саобраћај машинство и инжењерство заштите, Академије техничких струковних студија Београд* и додатно се задужује за реализацију наставе и одржавање испита из предмета: Програмирање *CNC* система 1 и Програмирање *CNC* система 2 на основним струковним студијама, као и за одржавање вежби на мастер струковним студијама из предмета: Неконвенционалне методе обраде, Параметарско

програмирање *CNC* машина, *CNC* машине нове генерације и Виртуелне *CNC* машине.

У оквиру *Академије техничких струковних студија Београд* је био руководилац пројекта ”Унапређење студијског програма Машинско инжењерство увођењем у наставни процес савремени *CAD/CAM* софтверски пакет”, а у оквиру пројекта ”Унапређење знања и вештина студената у области аутоматизације и дигитализације на студијама машинства” је био члан тима одговоран за израду модуларних система управљања заснованих на програмабилним логичким контролерима намењених за аутоматизацију производње. Пројекте је финансирало *Министарство просвете, науке и технолошког развоја* у оквиру активности ”Развој високог образовања”. Истраживачким радом и публикованим научним радовима у којима презентује остварене резултате, даје свој допринос у реализацији пројекта ”Развој нове генерације домаћих обрадних система” на *Катедри за производно машинство, Машинског факултета у Београду*, такође финансираног од стране *Министарства просвете, науке и технолошког развоја*.

ИЗЈАВЕ ДОКТОРАНДА

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Горан Василић

Број индекса: Д20/2013

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНЕ КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини и у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 05.V 2023. год.

Потпис докторанда

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Горан Василић
Број индекса: Д20/2013
Студијски програм: Докторске академске студије
Машинско инжењерство
Наслов рада: Концепцијско пројектовање једне
класе комплексних машина алатки
Ментор: др Саша Живановић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради архивирања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 05.V 2023. год.

Потпис докторанда

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНЕ КЛАСЕ КОМПЛЕКСНИХ МАШИНА АЛАТКИ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима сам предао у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију архивирану у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Београду, 05.V 2023. год.

Потпис докторанда

1. **Ауторство.** Дозвољено умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела и прераде ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољено умножавање, дистрибуција и јавно саопштавање дела и прераде ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце.
3. **Ауторство - некомерцијално – без прераде.** Дозвољено умножавање, дистрибуција и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
4. **Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољено умножавање, дистрибуција и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом.
5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољено умножавање, дистрибуција и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце.
6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољено умножавање, дистрибуција и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.