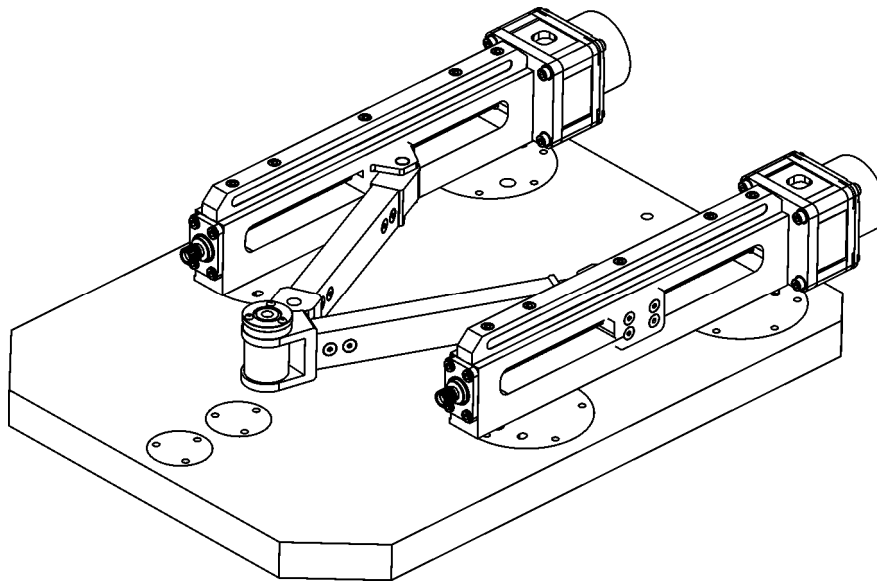


**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Краљице Марије 16**

доц. др Саша Живановић
проф. др Милош Главоњић
доц. др Бранко Кокотовић
Зоран Димић

**СТОНА ДВООСНА РЕКОНФИГУРАБИЛНА МАШИНА СА
ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ – МОМА**

-Техничко решење-



У Београду, 2014. године

Подаци о техничком решењу

Врста техничког решења	Нови производ, М82, Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – мома
Аутори техничког решења	доц. др Саша Живановић, доцент ¹⁾ проф. др Милош Главоњић, ред. проф. ¹⁾ доц. др Бранко Кокотовић, доцент ¹⁾ Зоран Димић, дипл. инж. електр., студент докторских студија ²⁾ ¹⁾ Машински факултет Универзитета у Београду ²⁾ ЛОЛА Институт
Назив техничког решења	СТОНА ДВООСНА РЕКОНФИГУРАБИЛНА МАШИНА СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ – МОМА
За кога је рађено техничко решење	Нови производ, Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА (Модуларна Машина Алатка са управљањем Отворене архитектуре), развијена је на Машинском факултету у Београду, у оквиру пројекта Технолошког развоја ТР035022 "Развој нове генерације домаћих обрадних система".
Ко користи техничко решење	Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА, користи се у настави и истраживањима на Машинском факултету Универзитета у Београду.
Година израде техничког решења	2014.
Верификација резултата	Од стране рецензената: 1. проф. Др Драган Милутиновић, Машински факултет Универзитета у Београду и 2. проф. др Милан Зељковић, Факултет техничких наука, Нови Сад
Ко је прихватио техничко решење	Машински факултет Универзитета у Београду
Примена резултата	Лабораторијски производ

САДРЖАЈ:

1	ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ	4
2	ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ	4
3	СТАЊЕ ТЕХНИКЕ	8
4	СУШТИНА И ДЕТАЉНИ ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА	9
4.1	Суштина техничког решења	9
4.2	Опис механизма	9
4.3	Кинематичко моделирање механизма	14
4.4	Опис пројектоване стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА	21
4.5	Систем управљања и програмирања	26
4.6	Техничке карактеристике	28
4.7	Испитивање стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА	28
5	ЗАКЉУЧАК	32
6	ЛИТЕРАТУРА	33
7	ПРИЛОЗИ	33
7.1	Проспект за стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – МОМА	34
7.2	Документи који су пратили прихватање овог техничког решења	38
	1) Молба Наставно-научном већу за избор рецензената за Техничко решење	
	2) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о именовану рецензената	
	3) Извештај рецензената	
	4) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању техничког решења	
	5) Молба да студенти ТЕХНИКУМА ТАУРУНУМ – ВИШСС користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома за извођење додатних облика наставе.	
	6) Изјава да истраживачи ЛОЛА института користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома у оквиру усавршавања на Машинском факултету у Београду.	

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Техничко решење **Стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА** (у даљем тексту: МОМА) припада области нових производних технологија, односно, генерацији домаћих реконфигурабилних обрадних система.

Савремена производња је заснована на нумерички управљаним машинама алаткама. За програмирање и руковање овим машинама потребна је свеобухватна обука ученика, студената и инжењера. МОМА се базира на двоосном паралелном механизму, који је успостављен као систем саставних елемената, на основу кога се може вршити реконфигурисање како хардверског тако и софтверског (управљачког) дела система. Намењен је за едукацију у: (i) конфигурисању и реконфигурисању, (ii) програмирању и (iii) управљању обрадних система са нумеричким управљањем на бази софтвера отворене архитектуре. Систем је безбедан за рад и не захтева посебне услове. Прототип је направљен за своје потребе и успешно се користи за извођење наставе на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Машине алатке са нумеричким управљањем су активан ресурс, које прати стално усавршавање и даља еволуција. Ово усавршавање се дешава како код произвођача, тако и у научно истраживачким институцијама. У домену управљања НУМА уобичајено је PC-CNC управљање. У пословањима се појачава кооперација, а са њом и реконфигурабилност машина и система.

МОМА је у основи модуларна машина алатка, за коју су успостављени конфигуратори за њено реконфигурисање, на основу расположиве базе модула, у хардверском делу. У домену управљања на бази решења инверзне и директне геометрије машине, реализује се и реконфигурисање адекватног управљања за сваку нову конфигурацију машине.

2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

Истраживања мултифункционалних и реконфигурабилних машина алатки су интензивна и имају доста комплетираних резултата [1,2]. Од тих резултата више их је за мултифункционалне машине алатке. Оне ионако већ постоје као типски обрадни системи који имају широку индустријску примену. Истраживање и развој овких нових обрадних система базирано је на високом нивоу кооперације универзитета, истраживачких института и индустрије.

Ако се говори о такозваној масовној кастомизацији, онда се као један од услова за конципирање и/или прављење машина алатки поставља модуларност, а онда и реконфигурабилност. Овде је главни изазов честа промена производних програма, што онда мења и структуру технолошког система, ако се планира да се он прилагоди новом производном програму, полазећи од његовог стања затеченог на завршетку производног програма, који се управо мења. Правило је да је век машина алатки и њима сличне технолошке опреме дужи од века производног програма, за који су биле инсталисане. Ако се успе да трошкови прилагођавања затечене технолошке опреме буду мањи од набавке и инсталисања нове и да се то уради за краће време, онда се чини могућим приступ помоћу реконфигурисања машина алатки и технолошких система.

Сада се стичу услови да се говори и о машинама за реконфигурабилне технолошке системе, односно за реконфигурабилне машине алатке. Овој класи машина припада и концепција машине МОМА, као реконфигурабилни технолошки модул са паралелном кинематиком и две осе управљања.

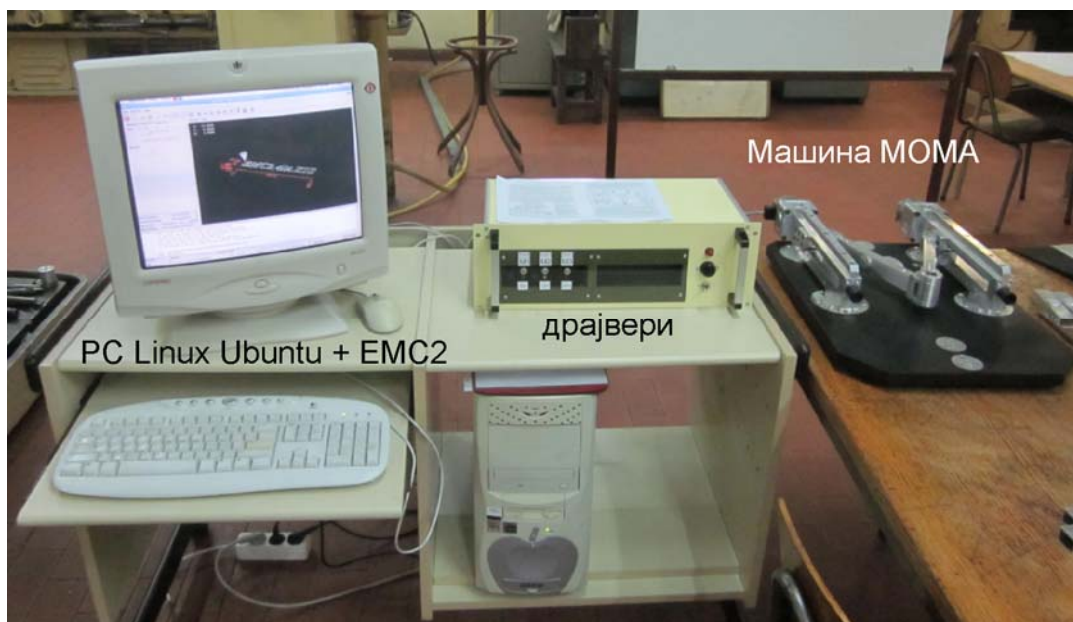
Може се поставити о ово питање: зашто оваква реконфигурабилна машина није сврстана у модуларне машине, него је издвојена у сасвим нову класу машина алатки? Разлог је што се реконфигурабилна машина алатка може увек изнова реконфигурисати за технологију коју треба покренути. Она се сваки пут склапа изнова од модула који су за то планирани. То се може вршити двојако. У првом случају произвођач машине, по позиву, код корисника врши реконфигурисање машине помоћу донетих потребних нових модула. Тада се не врши само препакивање, него и инвестирање у нове модуле. У другом случају сам корисник машине врши њено прилагођавање за наредну технологију, па мора имати резерву модула. Зато се може рећи да је то концепција реконфигурисања помоћу прилагодивих машина.

Раније није била уобичајена адекватна реконфигурабилна машина алатка којом се могу решити проблеми актуелности опреме за едукацију у овој области. Осим тога, ако и постоје едукациони системи, они обично покривају само област едукације у области технологија нумеричког управљања. Овако стечена знања нису применљива на реконфигурабилне машине алатке, виртуелне машине и сличне реурсе дигиталних технологија. Ако се та знања не траже, онда постојећи едукациони системи могу постојати још само док постоје њихови класични еквиваленти у машинској обради и то у индустрији базираној на класичним технологијама нумеричког управљања.

Решење проблема помоћу машина типа МОМА. Примена реконфигурабилне машине типа МОМА омогућава стицање знања у конфигурисању нових машина алатки, њиховом реконфигурисању према програму градње, програмирању и реализацији управљања отворене архитектуре на РС платформи. Ово захтева мала улагања у опрему и обезбеђује високу безбедност и једноставност одржавања, јер за овакаве машине нису потребне индустријске инсталације. Посебно је значајно да примена машина типа МОМА у програмирању машина алатки не захтева промену у понашању инструктора и руковооца у едукацији, јер се овај систем програмира на идентичан начин као и машине са серијском кинематиком. Основна предност је да се машина може реконфигурисати на основу расположивих модула према постављеном задатку.

МОМА се припрема за рад, програмира и користи као да је за професионалне потребе у дигиталном технолошком систему. Систем за управљање опремљен је довољно јаким интерпретером G кода и графичком симулацијом програма. Због тога се могу преузети програми са било ког CAD/CAM система у којем је правилно конфигуриран постпроцесор. У систем је уграђена и виртуелна машина за потребе верификације програма, чиме се решава проблем брзог развоја CAD/CAM система и сталног усавршавања и/или иновирања формата и повећавања дужина програма за обраду применом технологије нумеричког управљања. Систем је у целини реконфигурабилан. Због тога се може саставити конфигурација према посебном захтеву. Систем за управљање се инсталише на РС и има отворену архитектуру. Тај РС је повезан са РС на којем ради CAD/CAM систем. Тиме је успостављен систем за управљање који

припада актуелним системима за нумеричко управљање и програмирање, у којој су управљања типа CNC отворене архитектуре, PC-CNC и USB CNC. У систем је уграђена стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА, која се управља у спољашњим координатама и програмира као машина са серијском кинематиком, са истим бројем оса, тако да таква концепција не представља проблем ни за руковооца ни за програмера.



Слика 2.1 Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА и EMC2 управљање на PC Linux платформи

Новине у Едукационом систему МОМА, могу се сумирати на следећи начин:

- (i) Уграђен је двоосни реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком, уместо уобичајених серијских механизма и тако комплетан машински подсистем двоосне машине, која је главни део овог едукационог система. Овај механизам може да се користи у едукацији за конфигуравање машине алатке, за синтезу управљачких алгоритама за паралелне механизме, али и за увежбавање оптимизације параметара паралелног механизма и компензације грешака, без чега се не може направити добра машина алатка са паралелном кинематиком.
- (ii) За управљање се користи PC. На њему се може имплементирати погодан интерфејс за руковање и програмирање машине. PC је уобичајен и у модерним професионалним обрадним системима, али он у овом систему није индустријског типа, јер се користи у учионицама и/или лабораторијама.
- (iii) Оперативни систем је Linux, са проширењем за рад у реалном времену. У овом случају се користи овај оперативни систем, као опште добро, које развија и одржава једна међународна непрофитна организација. Он је уобичајен и у другим технологијама, својственим дигиталним технолошким системима. Коришћење овог оперативног система је бесплатно.
- (iv) Систем за управљање има модерну отворену архитектуру (EMC2). У овај систем се имплементирају управљачки и компензациони алгоритми за сваку машину посебно. Због тога може да се користи и као учило за конфигуравање система за нумеричко управљање отворене архитектуре. И овај отворени систем се користи као опште добро, које такође развија и одржава једна међународна непрофитна организација. Коришћење овог

система је такође бесплатно, па то битно снижава цену едукационог система MOMA у овде приказаној верзији.

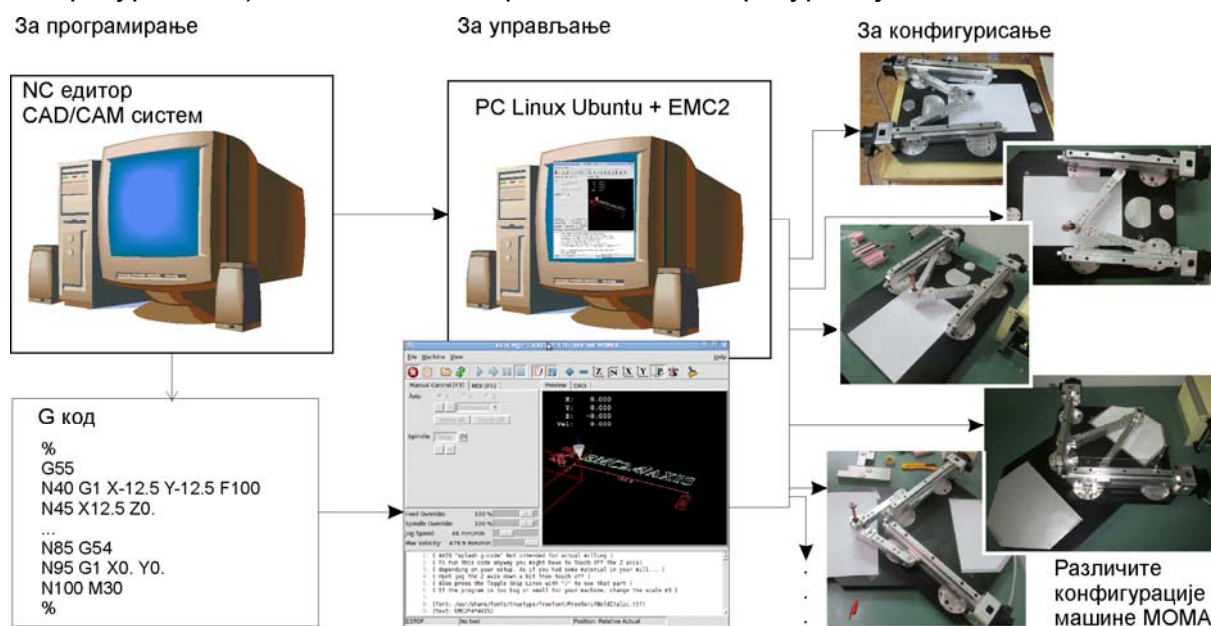
- (v) Програмирање се врши помоћу G кода, без ограничења у односу на припремне и помоћне функције, координатне системе и корекције алата. Задржана је и могућност ручног и параметарског програмирања, ради увежбавања тих метода. Подразумева се да предмет едукације може бити и припрема одабраног CAD/CAM система за програмирање, као и програмирање применом протокола STEP-NC, слика 2.2.



Слика 2.2 Методи програмирања реконфигурабилне машине типа MOMA

- (vi) Управљање и руковање се врши у спољашњим, Декартовим координатама. То руковаоцима и инструкторима за *Едукациони систем MOMA* олакшава рад, поготову ако су раније радили са машинама алаткама са серијском кинематком, што се може сматрати правилном. Разлог је разумљив сам по себи: машине алатке са паралелном кинематиком још немају индустријску примену, па искустава у раду са њима скоро и да нема.

Према томе, сав претходни опис односи се на комплетирану концепцију једног модерног едукационог обрадног система, који у његовом садашњем статусу има назив *Едукациони систем MOMA*. Његова основна структура је показана на слици 2.3 и обухвата ресурсе за програмирање (NC едитор и CAD/CAM систем), за управљање (PC Linux Ubuntu + EMC2) и за машински подсистем (За конфигурисање) за састављање различитих конфигурација машине MOMA.



Слика 2.3 Основна структура Едукационог система MOMA

3. СТАЊЕ ТЕХНИКЕ

Истраживања мултифункционалних и реконфигурабилних машина алатки су интензивна и ове и њима сличне машине могу се сврстати у класу комплексних машина алатки [3]. Комплексна машина алатка је једна од свих, у привременој групи машина, које су другачије од већине осталих по бар једном делу своје структуре, или по бар једној намени. Све машине алатке показане су као група машина, која постоји и која се сваки пут изнова пребројава, тражећи неку машину битно другачију од осталих. Такве специфичне машине се групишу у комплексне. Домен овог техничког решења односи се на машине које припадају групи реконфигурабилних, а тиме и комплексних машина алатки. У том домену је и концепција двоосне реконфигурабилне машине МОМА, која се, као технолошки модул, може уграђивати у хибридни механизам будуће машине алатке. Хибридне конфигурације механизма представљају неку комбинацију серијских и паралелних механизма.

Едукациони систем МОМА базиран је на стоној двоосној реконфигурабилној машини са паралелном кинематиком, са својим управљањем отворене архитектуре. МОМА омогућава следеће едукације: (1) за конфигурисање машина алатки, (2) за управљање машина алатки и (3) за програмирање машина алатки свим расположивим методима.

Двоосни реконфигурабилни паралелни механизам, који је уграђен у МОМА, омогућава да се може конфигурисати, према програму градње, укупно 33 различите конфигурације машина. Систем за управљање отворене архитектуре конфигуриран је на РС платформи, са оперативним системом Linux са проширењем за рад у реалном времену и помоћу јавно доступног софтвера EMC2, у који су имплементирани управљачки алгоритми за систем МОМА. Уместо класичне управљачке јединице користи се стандардни РС, уместо скупог оперативног система за рад у реалном времену користи се Linux са проширењем за такав рад, уместо формата програма саограничењима користи се цео стандардни формат најприближнији формату којим се програмирају машине које имају систем за управљање највећег произвођача таквих система, фирме Fanuc. Овакав приступ омогућава модеран начин програмирања, али и могућност да се систем изнова конфигурише у оквиру едукације за конфигурисање система за нумеричко управљање, сваки пут када се покрене реконфигурисање механизма машине.

Едукациони систем МОМА је конципиран и комплетиран и као учило за едукацију за рад у дигиталним технолошким системима, осим што је и направљен као аутономни обрадни систем са паралелном кинематиком.

Могуће специфичне теме за едукацију. Један преглед типова едукације и тема за њих може се и овако уредити:

- За едукацију у конфигурисању обрадног система теме едукације могу бити: кинематичко моделирање механизма сопствене машине и имплементација управљачких алгоритама у систем за управљање отворене архитектуре на бази тако развијеног кинематичког модела.
- За едукацију у програмирању теме едукације могу бити: ручно програмирање, параметарско програмирање, програмирање помоћу CAD/CAM система и верификација програма на виртуелној машини.

Стратегија и статус развоја Едукационог система МОМА. Систем је у дужем времену у употреби за високошколску едукацију на Машинском факултету Универзитета у Београду. Едукациони систем МОМА је програмирањем, руковањем и реконфигурабилношћу прилагођен парадигми дигиталних технолошких система, у којима је извршена интеграција традиционалних технологија са дигиталним, већином информационим, уведеним помоћу рачунара. Припремљен је да ради у окружењу у којем се врши дигитализовано пројектовање, производња и управљање производњом.

4. СУШТИНА И ДЕТАЉАН ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Основу техничког решења представља развијени реконфигурабилни двоосни механизам са паралелном кинематиком, кинематичко моделирање и управљачки систем отворене архитектуре [4,5] са перформансама какве имају и индустријске машине.

4.1 Суштина техничког решења

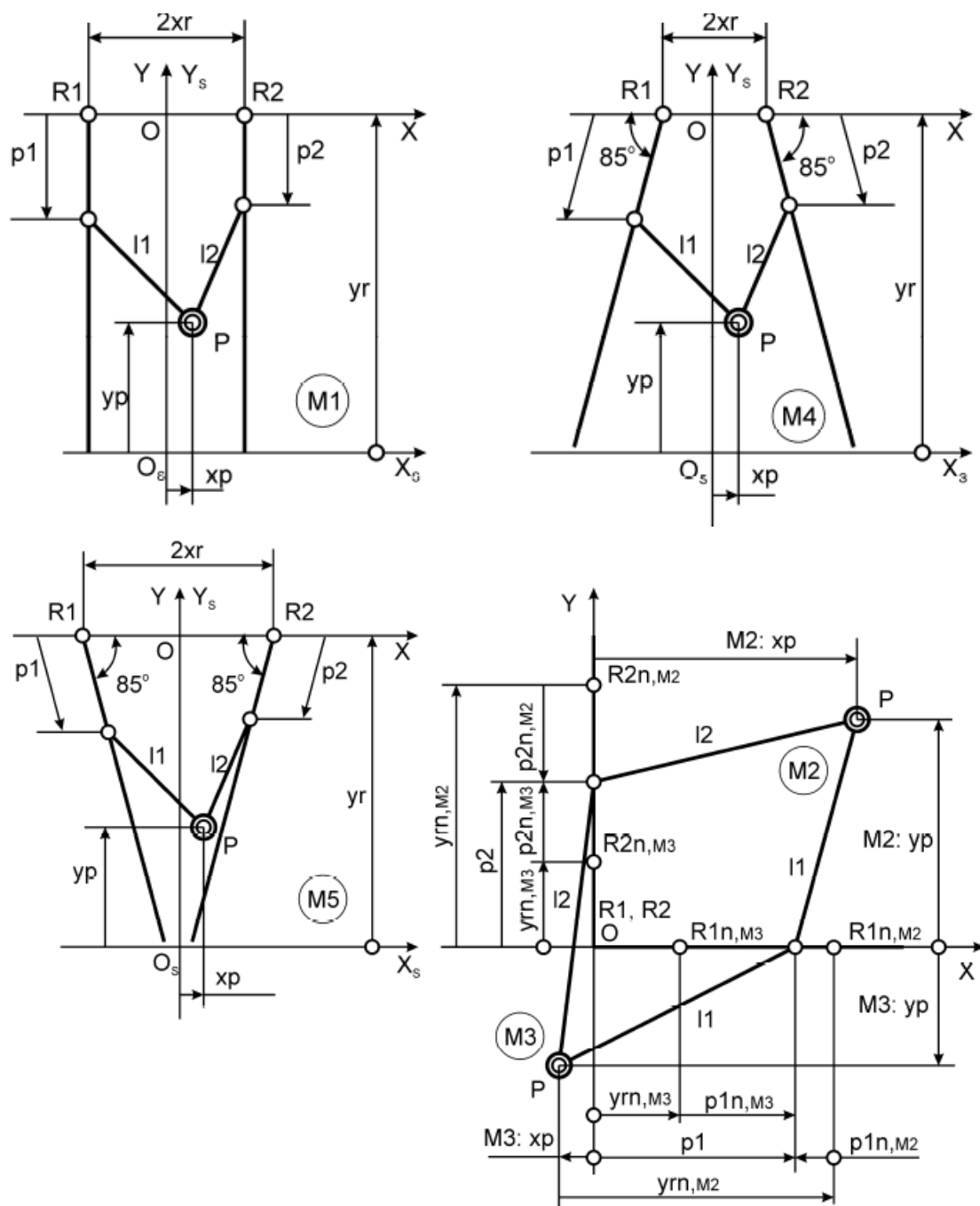
Суштину овог техничког решења чине:

- Равански реконфигурабилни паралелни механизам са 2 степена слободe.
- Специфичан начин кинематичког моделирања, као основе за развој система за управљање и програмирање.
- Развијени систем за управљање отворене архитектуре на PC real-time Linux платформи и са EMC2 (**E**nhanced **M**achine **C**ontrol) управљачким системом.

4.2 Опис механизма

Равански реконфигурабилни паралелни механизам са 2 степена слободe се састоји од две идентичне погонске транслаторне осе по којима се крећу клизачи p_1 и p_2 . Клизачи су помоћу две спојке I_1 и I_2 повезане у паралелни механизам. Спојке I_1 и I_2 су са клизачима повезане обртним зглобовима, а међусобно су повезане у тачки P , такође обртним зглобом. Тачка P је истовремено и тачкаста покретна платформа овог паралелног механизма, у коју се поставља алат, који је, у овом случају, једна писаљка која омогућава исцртавање програмиране путање алата. Реконфигурабилност овог механизма је омогућена захваљујући могућности да погонске транслаторне осе могу да на бази заузимају различите позиције. На слици 4.1 показано је свих пет основних концепција стоне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком (M_1 , M_2 , M_3 , M_4 и M_5), са обележеним референтним тачкама (позицијама) погонских оса и са наведеним полазним параметрима механизма. Референтне тачке паралелног механизма обележене су са R_1 и R_2 . Транслаторна померања клизача обележена су са p_1 и p_2 , а дужине спојки механизма са I_1 и I_2 . Спојке механизма су реализоване у три различите дужине: 250, 195 и 180 mm, што омогућава и промену овог параметра и добијање различитих конфигурација и са аспекта дужине спојки механизма. Карактеристике различитих концепција, по основу положаја погонских оса механизма, могу се исказати на следећи начин:

- Концепција M_1 има узајамно паралелне погонске осе, а основна верзија машине има спојке једнаких дужина.
- Концепција M_2 има узајамно ортогоналне погонске осе, док је спрега две спојке са платформом постављена у први квадрант. Тако је и сам паралелни механизам увек у првом првом квадранту и удаљен довољно од својих сингуларних позиција.



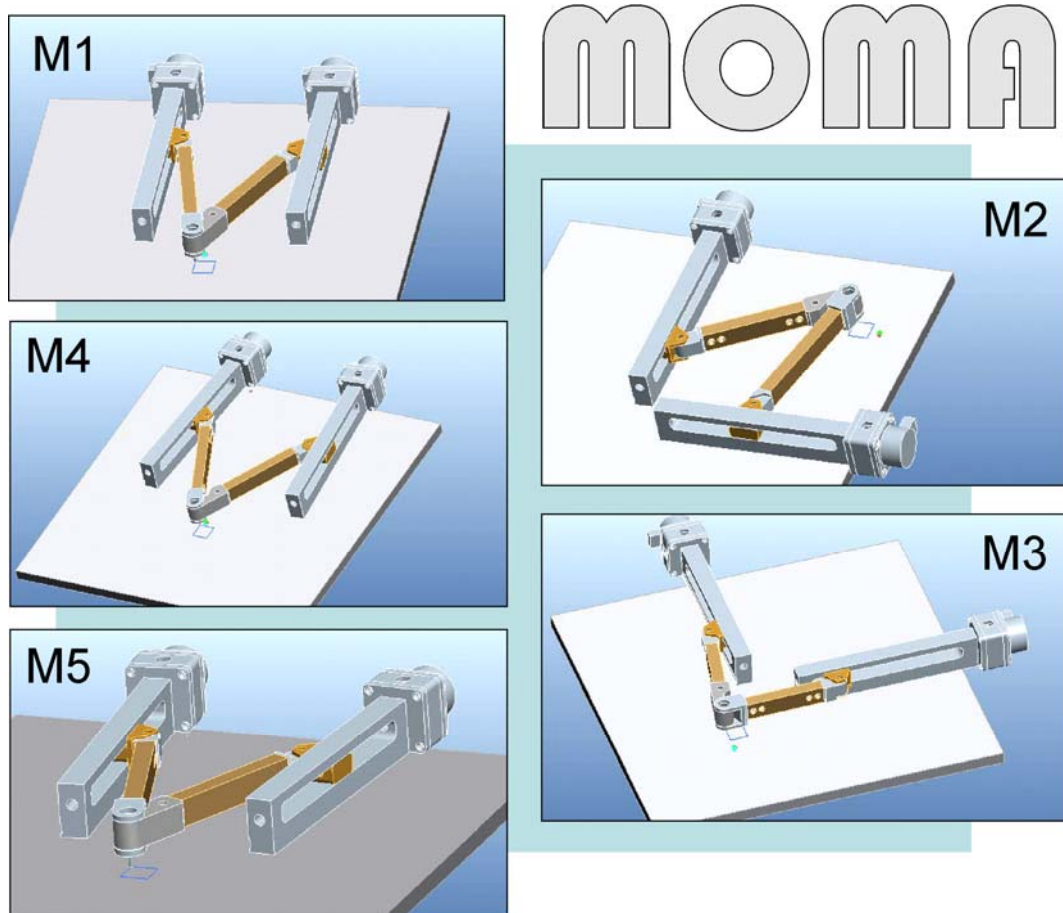
Полазни параметри свих машина:
 $l_1=l_2=250$ mm, за машине M1, M2, M4 и M5, а може и за M3,
 $l_1=l_2=195$ mm, за машину M3, а може и за остале,
 $l_1=l_2=180$ mm, за машину M2, а може и за остале,
 $2x_r=200$ mm,
 $y_r=250$ mm,
 $h=200$ mm, максимални ход погонске осе.
 Ови параметри се користе за прве пробе, а онда се у радним недељама IV и V прописују коначни параметри свих машина.

Алтернативне референтне позиције погонских оса за машине M2 и M3 су:
 $R_{1n,m2}$ и $R_{2n,m2}$, са координатама $y_{rn,m2}$ и $R_{1n,m3}$ и $R_{2n,m3}$, са координатама $y_{rn,m3}$.
 Полазне вредности ових координата су:
 $y_{rn,m2}=250$ mm и $y_{rn,m3}=117$ mm.

Слика 4.1 Основне концепције стоне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком. Приказана је верзија већ коришћена за едукацију.

- Концепција М3 има ортогоналне погонске осе, са паралелним механизмом који је стално у трећем квадранту.
- Концепција М4 има нагнуте погонске осе у односу на правац осе Y координатног система за 5° према спољашњој страни.
- Концепција М5 има нагнуте погонске осе у односу на правац осе Y за 5° према унутрашњој страни.

CAD модели основних варијанти реконфигурабилног паралелног механизма за едукациону машину МОМА приказани су на слици 4.2. То је комбиновани приказ CAD модела и добијене контуре путање алата при симулацији рада машине према задатом програму.



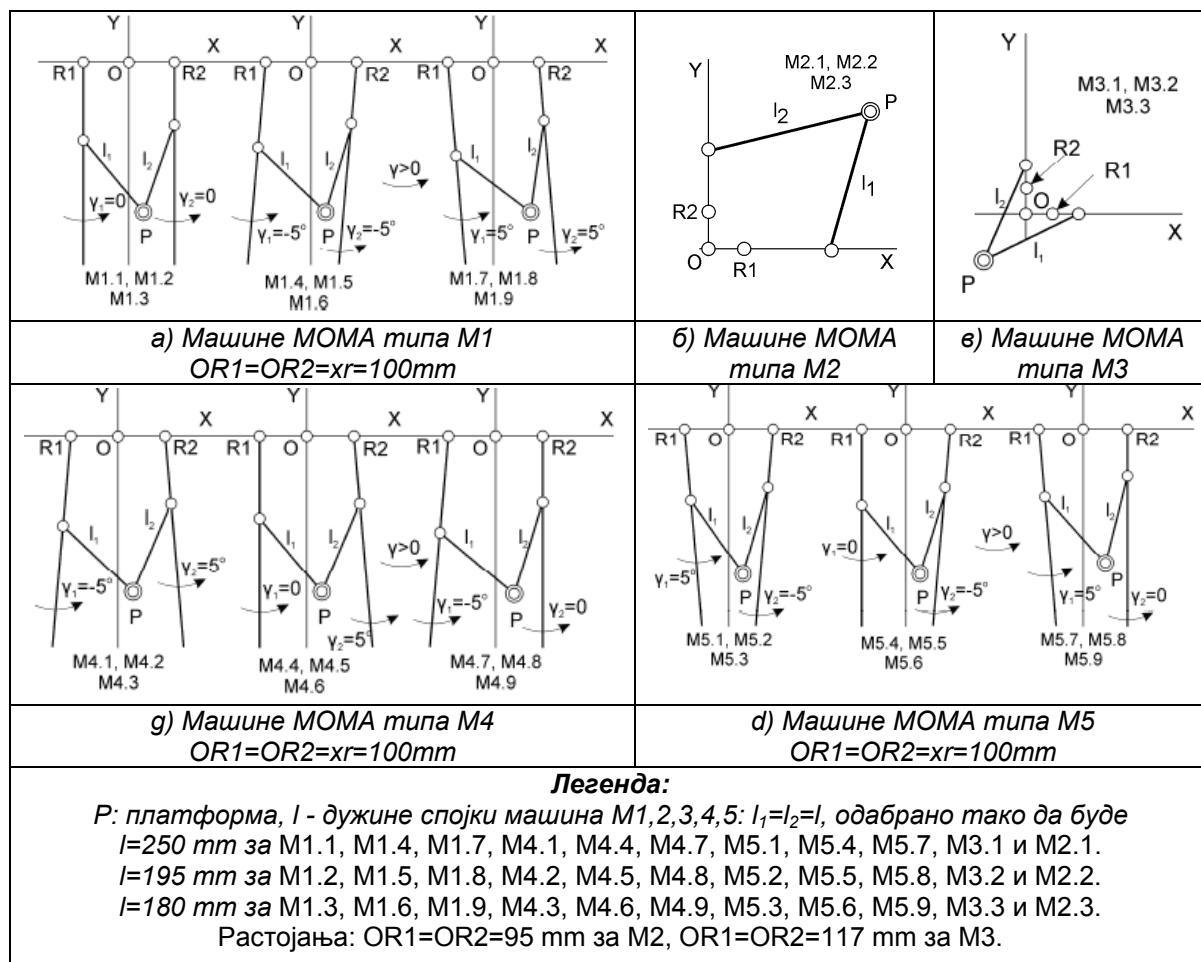
Слика 4.2 CAD модели основних конфигурација стоних реконфигурабилних машина

У оквиру сваке основне концепције механизма постоје и подваријанте, које се могу добити различитим комбиновањем нагнутости сваке погонске осе и различитим дужинама спојки. Тако се могу добити следећи механизми:

- М1.1, М1.2, М1.3 - паралелне погонске осе са правцем осе Y и са три различите комбинације дужина спојки,
- М1.4, М1.5, М1.6 - паралелне погонске осе и нагнуте према правцу осе Y за 5° улево, са три различите комбинације дужина спојки,
- М1.7, М1.8, М1.9 - паралелне погонске осе и нагнуте према правцу осе Y за 5° удесно, са три различите комбинације дужина спојки,
- М2.1, М2.2, М2.3 - ортогоналне погонске осе, са паралелним механизмом у првом првом квадранту, са три различите комбинације дужина спојки,

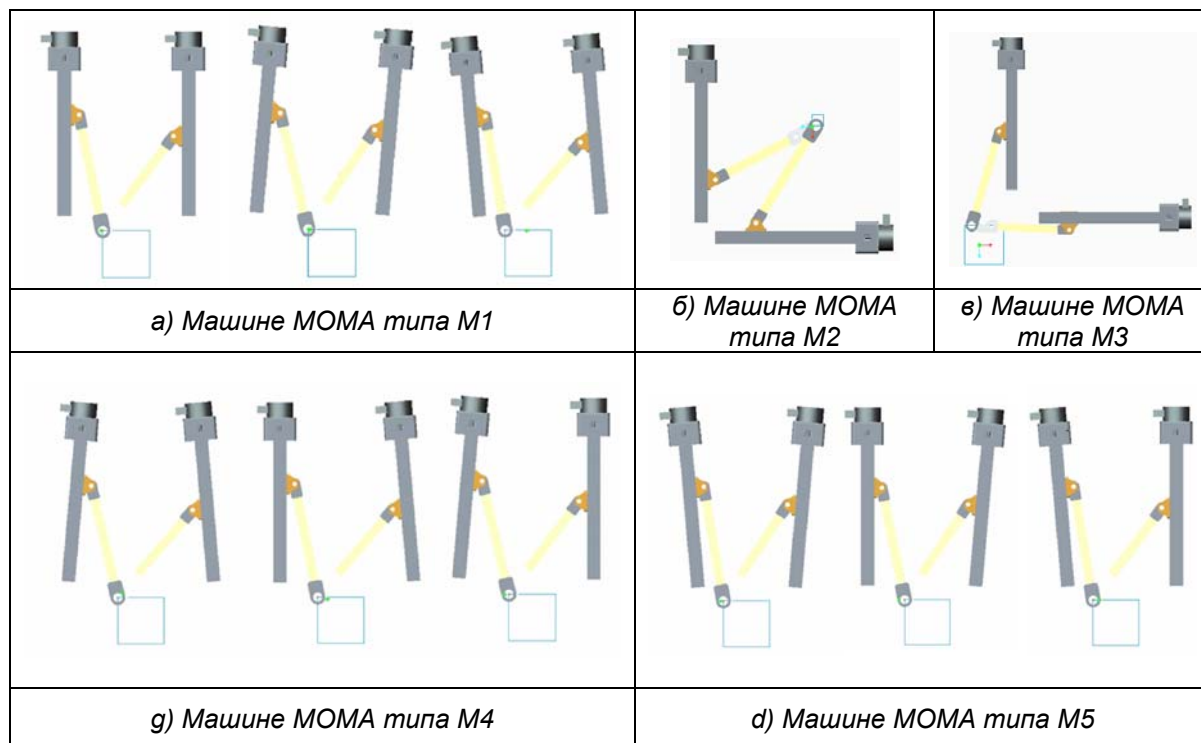
- M3.1, M3.2, M3.3 - ортогоналне погонске осе, са паралелним механизмом у трећем првом квадранту, са три различите комбинације дужина спојки,
- M4.1, M4.2, M4.3 - нагнуте погонске осе у односу на правац осе Y за 5° према спољашњој страни, са три различите комбинације дужина спојки,
- M4.4, M4.5, M4.6 – лева погонска оса паралелна, десна нагнута у односу на правац осе Y за 5° према спољашњој страни, са три различите комбинације дужина спојки,
- M4.7, M4.8, M4.9 – лева погонска оса нагнута у односу на правац осе Y за 5° према спољашњој страни, десна погонска оса у правцу осе Y, са три различите комбинације дужина спојки,
- M5.1, M5.2, M5.3 – нагнуте погонске осе у односу на правац осе Y за 5° према унутрашњој страни, са три различите комбинације дужина спојки,
- M5.4, M5.5, M5.6 – лева погонска оса у правцу осе Y, десна нагнута у односу на правац осе Y за 5° према унутрашњој страни, са три различите комбинације дужина спојки и
- M5.7, M5.8, M5.9 – лева погонска оса нагнута у односу на правац осе Y за 5° према унутрашњој страни, десна погонска оса у правцу осе Y, са три различите комбинације дужина спојки.

Све побројане конфигурације реконфигурабилног паралелног механизма, са укупно 33 подваријанте, показане су на слици 4.3, заједно са основним бројним подацима о габариту тих конфигурација и правилима за бирање мера.



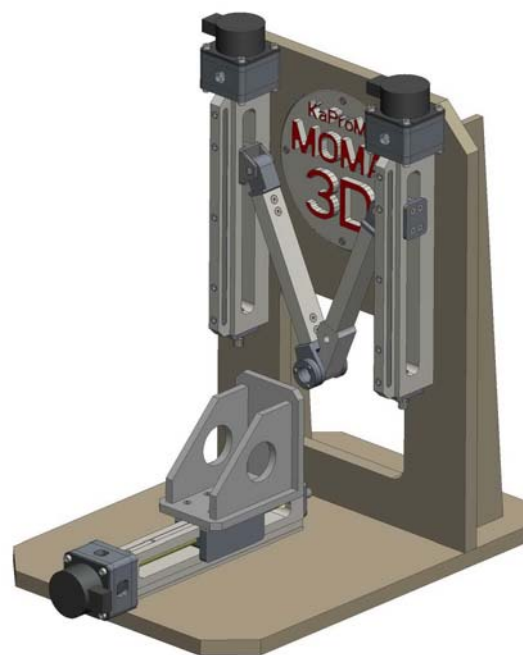
Слика 4.3 Подваријанте машина у оквиру сваког од типова реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком

На слици 4.4. су упоредо приказани и CAD модели свих подваријанти реконфигурабилног паралелног механизма. Свака од подваријанти се може добити различитим комбиновањем нагнутости сваке погонске осе и различитим дужинама спојки. Ово је комбиновани приказ CAD модела и добијене контуре путање алата при симулацији рада машине по једном задатом програму.



Слика 4.4 CAD модели подваријанти машина у оквиру сваког од типова

Варијантност структуре већ приказаног основног реконфигурабилног двоосног паралелног механизма омогућава, по дефиницији, широку применљивост овог механизма као технолошког модула за вертикалне и хоризонталне троосне машине алатке са хибридном кинематиком. На пример, могућа је примена овог употребљеног двоосног паралелног механизма, са још једном додатом серијском транслаторном осом, ради добијања троосне машине алатке са хибридном кинематиком. То је показано на слици 4.5. На овај начин се могу надоградити све основне варијанте механизма М1, М4 и М5, укључујући и све подваријанте. На слици 4.5 је показана основна варијанта машине М1, односно, њена подваријанта М1.1, заједно са додатом хоризонталном транслаторном осом, која је на овој машини оса Z.



Слика 4.5 Концепт троосне стоне реконфигурабилне машине алатке МОМА

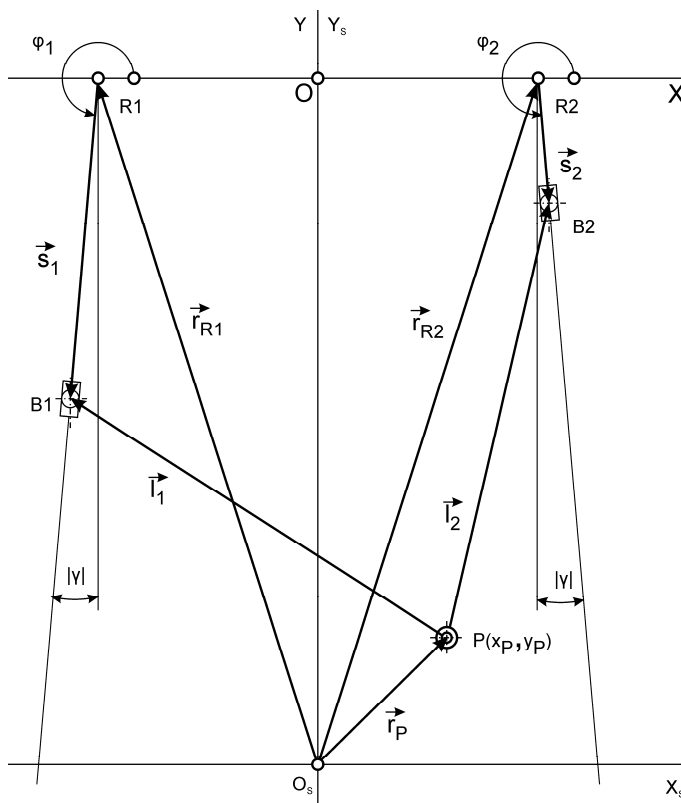
4.3 Кинематичко моделирање механизма

У овом поглављу се разматра кинематичко моделирање двоосног паралелног механизма. За варијанте механизма типа М1, М4 и М5 су дати уопштени модели за решавање инверзне и директне геометрије, док су за варијанте М2 и М3 изведена решења за сваку варијанту посебно.

Поставка самог геометријског модела уопштене концепције паралелног механизма за машине типа М1, М4 и М5, као полазне основе и за поставку модела за лако решавање и инверзног, али и директног геометријског проблема, дата је на слици 4.6.

Решавање је урађено у систему $O_s(X_s, Y_s)$. Ознаке на слици 4.6 имају следећа значења:

- референтне тачке погонских оса су редом $R1(-x_R, y_R)$ и $R2(x_R, y_R)$, где су $x_R = 100$ и $y_R = 250$ mm;
- параметар оријентације погонских оса је угао γ . За варијанту М1 је $\gamma = 0^\circ$, за М4 је $\gamma = 5^\circ$ и за М5 је $\gamma = -5^\circ$;
- угао орта погонске осе је обележен са φ . Он износи $\varphi_1 = 3\pi/2 - \gamma$ за прву осу, док је за другу осу $\varphi_2 = 3\pi/2 + \gamma$;
- Координате назначених вектора су: $\vec{r}_P(x_P, y_P)$, $\vec{r}_{R1}(-x_R, y_R)$, $\vec{r}_{R2}(x_R, y_R)$, $\vec{l}_1(l_{1x}, l_{1y})$, $|\vec{l}_1| = l$, $\vec{l}_2(l_{2x}, l_{2y})$, $|\vec{l}_2| = l$, $\vec{s}_1(p_1 \cos(\varphi_1), p_1 \sin(\varphi_1))$, $|\vec{s}_1| = p_1$, док је за другу погонску осу $\vec{s}_2(p_2 \cos(\varphi_2), p_2 \sin(\varphi_2))$, $|\vec{s}_2| = p_2$;
- референтни координатни систем машине је у $O(X, Y)$. У њему се врше сва израчунавања у вези са управљањем и програмирањем;
- Параметри машина су: (x_R, y_R, γ, l) , где је l - дужина спојки.



Слика 4.6 Модел машина М1, М4 и М5 у систему $O_s(X_s, Y_s)$

Израчунавање ће овде бити започето помоћу вектора, па настављено решавањем (система) квадратних једначина. Прво ће проблем бити постављен помоћу вектора са слике 4.6, па ће бити решен инверзни, а онда и директни геометријски проблем. На крају ће бити наведени неки резултати пробног рачуна, који је намењен да се провере добијена решења инверзног и директног геометријског проблема.

Поставка проблема. Прати се процедура по којој се полази са векторским рачуном. Саставе се следеће две једначине према слици 4.6:

$$\vec{r}_P + \vec{l}_1 = \vec{r}_{R1} + \vec{s}_1 \quad (1) \quad \text{и} \quad \vec{r}_P + \vec{l}_2 = \vec{r}_{R2} + \vec{s}_2 \quad (2) \quad (G1)$$

Када се у групи једначина (G1) уведу познате координате вектора добија се следећа група једначина:

$$\begin{cases} x_P \\ y_P \end{cases} + \begin{cases} l_{1x} \\ l_{1y} \end{cases} = \begin{cases} -x_R \\ y_R \end{cases} + \begin{cases} p_1 \cos(\varphi_1) \\ p_1 \sin(\varphi_1) \end{cases} \quad (1) \quad \text{и} \quad \begin{cases} x_P \\ y_P \end{cases} + \begin{cases} l_{2x} \\ l_{2y} \end{cases} = \begin{cases} x_R \\ y_R \end{cases} + \begin{cases} p_2 \cos(\varphi_2) \\ p_2 \sin(\varphi_2) \end{cases} \quad (2) \quad (G2)$$

Група једначина (G2) се преводи у следећу:

$$\begin{cases} l_{1x} = -x_R - x_P + p_1 \cos(\varphi_1) \\ l_{1y} = y_R - y_P + p_1 \sin(\varphi_1) \end{cases} \quad (1) \quad \text{и} \quad \begin{cases} l_{2x} = x_R - x_P + p_2 \cos(\varphi_2) \\ l_{2y} = y_R - y_P + p_2 \sin(\varphi_2) \end{cases} \quad (2) \quad (G3)$$

Решење инверзног геометријског проблема (ИГП): Зна се да је $l_{1x}^2 + l_{1y}^2 = l^2$.

Због тога се дигну на квадрат леве и десне стране у (1) у (G3), а онда тако степеноване једначине саберу. То се уради и са једначинама (2) у (G3). Резултат је следећи систем квадратних једначина:

$$\begin{aligned} p_1^2 - 2((x_R + x_P)\cos(\varphi_1) - (y_R - y_P)\sin(\varphi_1))p_1 + (x_R + x_P)^2 + (y_R - y_P)^2 - l^2 &= 0 \quad (1) \\ p_2^2 + 2((x_R - x_P)\cos(\varphi_2) + (y_R - y_P)\sin(\varphi_2))p_2 + (x_R - x_P)^2 + (y_R - y_P)^2 - l^2 &= 0 \quad (2) \end{aligned} \quad (G4)$$

Сада се уведу смене:

$$\begin{aligned} v_1 &= -((x_R + x_P)\cos(\varphi_1) - (y_R - y_P)\sin(\varphi_1)), \quad v_2 = (x_R + x_P)^2 + (y_R - y_P)^2 - l^2, \\ v_3 &= +((x_R - x_P)\cos(\varphi_2) + (y_R - y_P)\sin(\varphi_2)), \quad v_4 = (x_R - x_P)^2 + (y_R - y_P)^2 - l^2. \end{aligned} \quad (G5)$$

После ових смена добија се следеће компактно решење инверзног геометријског проблема ових машина:

$$p_1 = -v_1 - \sqrt{v_1^2 - v_2} \quad \text{и} \quad p_2 = -v_3 - \sqrt{v_3^2 - v_4}. \quad (G6)$$

У (G6) су већ одабрана употребљива решења, од два могућа. По њима се могу управљати и програмирати машине М1, М4 и М5, свака са својим параметрима.

Решење директног геометријског проблема (ДГП). За ову прилику се група једначина (G4) треба преуредити у следећи облик, који је погодан за решавање директног геометријског проблема:

$$\begin{aligned} x_P^2 + y_P^2 + 2(x_R - p_1 \cos(\varphi_1))x_P - 2(y_R + p_1 \sin(\varphi_1))y_P + \\ + x_R^2 - 2x_R p_1 \cos(\varphi_1) + p_1^2 + y_R^2 + 2y_R p_1 \sin(\varphi_1) - l^2 &= 0 \quad (1) \\ x_P^2 + y_P^2 - 2(x_R + p_2 \cos(\varphi_2))x_P - 2(y_R + p_2 \sin(\varphi_2))y_P + \\ + x_R^2 + 2x_R p_2 \cos(\varphi_2) + p_2^2 + y_R^2 + 2y_R p_2 \sin(\varphi_2) - l^2 &= 0 \quad (2) \end{aligned} \quad (G7)$$

У (G7) се одузме (2) од (1) и добијена линеарна једначина реши по x_P . Резултат је следећи:

$$\begin{aligned} x_P &= v_8 y_P + v_9, \\ \text{где је} & \\ v_5 &= 2(x_R(p_1 \cos(\varphi_1) + p_2 \cos(\varphi_2)) - y_R(p_1 \sin(\varphi_1) - p_2 \sin(\varphi_2))) - p_1^2 + p_2^2, \\ v_6 &= 2(p_1 \sin(\varphi_1) - p_2 \sin(\varphi_2)), \quad v_7 = 2(2x_R - p_1 \cos(\varphi_1) + p_2 \cos(\varphi_2)), \quad v_8 = v_6/v_7, \quad v_9 = v_5/v_7. \end{aligned} \quad (G8)$$

Овако израчунато x_P је унето у (2) у (G7) и добијена квадратна је једначина по y_P . Њено употребљиво решење за M1, M4 и M5 је:

$$y_P = \frac{-v_{12} - \sqrt{v_{12}^2 - 4v_{11}v_{13}}}{2v_{11}}, \text{ где је}$$

$$v_{10} = x_R^2 + y_R^2 + p_2^2 + 2x_R p_2 \cos(\varphi_2) + 2y_R p_2 \sin(\varphi_2) - l^2, \quad v_{11} = 1 + v_8^2, \quad (G9)$$

$$v_{12} = 2v_8 v_9 - 2v_8 x_R - 2v_8 p_2 \cos(\varphi_2) - 2y_R - 2p_2 \sin(\varphi_2),$$

$$v_{13} = v_9^2 - 2v_9 x_R - 2v_9 p_2 \cos(\varphi_2) + v_{10}.$$

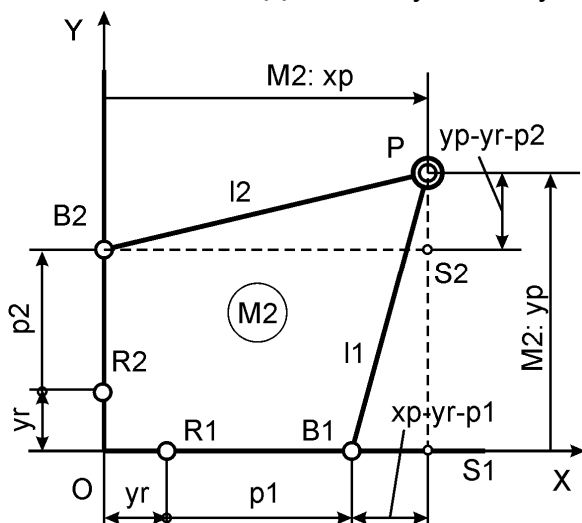
Ова решења ИГП и ДГП ваља још боље уредити, да би се рачун са константама издвојио из понављаног рачуна, како се не би разна израчунавања вишеструко понављала итд. Тако би се управљање учинило ефикаснијим. Пре имплементације ових решења ИГП и ДГП, треба извршити пробни рачун, да би се видело да ли се узајамно прате та два решења, да би све трајало краће. Овде је урађен један кратак пробни рачун.

Резултати пробног рачуна за машине M1, M4 и M5. Заједнички параметри за све три машине су: $x_R = 100 \text{ mm}$, $y_R = 250 \text{ mm}$, $l = 250 \text{ mm}$. Машине се разликују по параметру γ , како је назначено на слици 4.6 (за машину M1 је $\gamma = 0^\circ$, за машину M4 је $\gamma = 5^\circ$ и за машину M5 је $\gamma = -5^\circ$). У параметре ваља уврстити и: $\varphi_1 = 3\pi/2 - \gamma_R$, $\gamma_R = \gamma\pi/180$, $\varphi_2 = 3\pi/2 + \gamma_R$, као и $s_{F1} = \sin(\varphi_1)$, $c_{F1} = \cos(\varphi_1)$, $s_{F2} = \sin(\varphi_2)$ и $c_{F2} = \cos(\varphi_2)$. Прво је решаван ДГП, за неколико одабраних позиција погонских оса. Једна од тих позиција је и она која је служила за проверу решења ИГП (у табlici 4.1 та позиција је дата у осенченој врсти). Потом је решен ИГП за тако добијена решења за ДГП, да се потврде полазне позиције погонских оса. Сви резултати овог пробног рачуна су дати у табlici T4.1 и то са умереним бројем децималних места, да би били прегледнији. На основу ове пробе је закључено да су приказана решења ИГП и ДГП коректна и да се могу даље користити у синтези система за управљање овим машинама.

T4.1 Резултати пробног рачуна за машине M1, M4 и M5 по групама образаца (G1)-(G9). Ознаке су као у тексту.

Машина		M1		M4		M5	
Погонске осе		x_P [mm]	y_P [mm]	x_P [mm]	y_P [mm]	x_P [mm]	y_P [mm]
$\rho_1 = 50$ $\rho_2 = 50$	[mm]	0	-29.1288	0	-26.9869	0	-30.7915
$\rho_1 = 20$ $\rho_2 = 70$		-55.2401	-15.9605	-50.4926	-14.6143	-59.7538	-16.9411
$\rho_1 = 70$ $\rho_2 = 20$		55.2401	-15.9605	50.4926	-14.6143	59.7538	-16.9411
$\rho_1 = 0$ $\rho_2 = 0$		0	20.8712	0	20.8712	0	20.8712
$\rho_1 = 103.7574$ $\rho_2 = 119.1707$				-15.0	-85.0		
$\rho_1 = 97.3671$ $\rho_2 = 108.7741$						-15.0	-85.0

У наставку овог поглавља дат је и пример решавања инверзног и директног геометријског проблема за машину типа М2. Геометријски модел за поставку решавања ИГП И ДГП за ову машину показан је на слици 4.7.



Легенда: Основни параметри машине типа М2, коришћени у овом рачуну:

Дужине спојки механизма: $l_1=l_2$.

Референтне тачке (позиције) погонских оса: R1 и R2.

Удаљеност референтних тачака од координатног почетка O је $y_r = 95$ mm.

Координате позиција погонских оса машине мере се од референтних тачака R1 и R2 и означене су са p_1 , и p_2 .

Координате платформе P: P (x_p, y_p).

Слика 4.7 Геометријски модел машине типа М2

Израчунавање је вршено геометријски, па настављено решавањем (система) квадратних једначина. Прво је решен инверзни геометријски проблем. Посматрањем правоуглих троуглова ΔB_1S_1P и ΔB_2S_2P и применом Питагорине теореме, могу се написати следеће једначине:

$$\Delta B_1S_1P: (x_p - y_r - p_1)^2 + y_p^2 = l^2 \quad (1) \quad \Delta B_2S_2P: (y_p - y_r - p_2)^2 + x_p^2 = l^2 \quad (2)$$

$$p_1^2 - 2(x_p - y_r)p_1 + (x_p - y_r)^2 + y_p^2 - l^2 = 0 \quad (3) \quad (G10)$$

$$p_2^2 - 2(y_p - y_r)p_2 + (y_p - y_r)^2 + x_p^2 - l^2 = 0 \quad (4)$$

Група једначина (G10) сређивањем и израчунавањем по p_1 и p_2 даје решења инверзног геометријског проблема:

$$p_1 = x_p - y_r - \sqrt{l^2 - y_p^2} \quad (5) \quad \text{и} \quad p_2 = y_p - y_r - \sqrt{l^2 - x_p^2} \quad (6) \quad (G11)$$

У решавање директног геометријског проблема полази се од једначина (3) и (4) у групи једначина (G10) и добија се:

$$p_1^2 - 2x_p p_1 + 2y_r p_1 + x_p^2 - 2x_p y_r + y_r^2 + y_p^2 - l^2 = 0 \quad (7)$$

$$p_2^2 - 2y_p p_2 + 2y_r p_2 + y_p^2 - 2y_p y_r + y_r^2 + x_p^2 - l^2 = 0 \quad (8) \quad (G12)$$

Одузимањем једначине (8) од једначине (7), из групе једначина (G12), после сређивања и увођења смена добија се:

$$x_p = \frac{p_2 + y_r}{p_1 + y_r} \cdot y_p + \frac{p_1^2 - p_2^2 + 2y_r(p_1 - p_2)}{2(p_1 + y_r)} \quad (9)$$

$$x_p = t_1 \cdot y_p + t_2 \quad (10)$$

$$\text{Смене: } t_1 = \frac{p_2 + y_r}{p_1 + y_r},$$

$$t_2 = \frac{p_1^2 - p_2^2 + 2y_r(p_1 - p_2)}{2(p_1 + y_r)} \quad (G13)$$

Једначина (10) из (G13) се уврсти у једначину (7). Добија се квадратна једначина по y_p и њу треба решити.

$$p_1^2 - 2(t_1 \cdot y_p + t_2)p_1 + 2y_r p_1 + (t_1 \cdot y_p + t_2)^2 - 2(t_1 \cdot y_p + t_2)y_r + y_r^2 + y_p^2 - l^2 = 0 \quad (G14)$$

После сређивања и увођења смена добија се:

$$t_3 y_p^2 + t_4 y_p + t_5 = 0, \quad (G15)$$

где су уведене следеће смене:

$$t_3 = 1 + t_1^2, \quad t_4 = 2t_1 t_2 - 2t_1 p_1 - 2t_1 y_r, \quad t_5 = p_1^2 - 2t_2 p_1 + 2y_r p_1 + t_2^2 - 2t_2 y_r + l^2. \quad (G16)$$

Решење директног геометријског проблема се добија као решење квадратне једначине (G15):

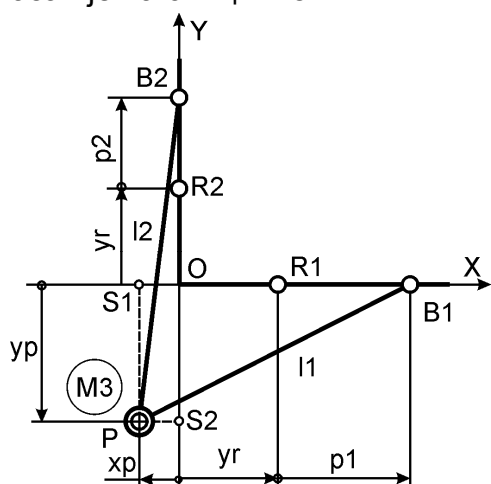
$$y_p = \frac{-t_4 \pm \sqrt{t_4^2 - 4t_3 t_5}}{2t_3}, \text{ где се узима предзнак + испред корена, па је употребљиво}$$

$$\text{решење за } y_p: y_p = \frac{-t_4 + \sqrt{t_4^2 - 4t_3 t_5}}{2t_3}.$$

Тако се добија и коначно комплетно решење ДГП:

$$\begin{aligned} x_p &= t_1 \cdot y_p + t_2 \\ y_p &= \frac{-t_4 + \sqrt{t_4^2 - 4t_3 t_5}}{2t_3} \end{aligned} \quad (G17)$$

Преостало је још решавање инверзног и директног геометријског проблема за машину типа М3. Геометријски модел за поставку решавања ИГП И ДГП показан је на слици 4.8.



Слика 4.8 Геометријски модел машине типа М3

Легенда: Основни параметри машине типа М3, коришћени у овом рачуну:

Дужине спојки механизма: $l_1=l_2$.

Референтне тачке (позиције) погонских оса: R1 и R2.

Удаљеност референтних тачака од координатног почетка је $y_r=117$ mm.

Координате погонских оса машине, мерене од референтних тачака R1 и R2, су p_1 и p_2 .

Координате платформе P: P (x_p, y_p).

Израчунавање је вршено геометријски. Прво је решен инверзни геометријски проблем. Посматрањем правоуглих троуглова $\Delta B_1 S_1 P$ и $\Delta B_2 S_2 P$ и применом Питагорине теореме, могу се написати једначине:

$$\Delta B1S1P: (p_1 + y_r - x_p)^2 + y_p^2 = l^2 \quad (1) \quad \Delta B2S2P: (p_2 + y_r - y_p)^2 + x_p^2 = l^2 \quad (2) \quad (G18)$$

Из једначина (G18) сређивањем се лако добија решење ИГП по p_1 и p_2 :

$$p_1 = x_p - y_r + \sqrt{l^2 - y_p^2} \quad (3) \quad p_2 = y_p - y_r + \sqrt{l^2 - x_p^2} \quad (4) \quad (G19)$$

У решавање директног геометријског проблема полази се од једначина (1) и (2) из групе једначина (G18) и добија се:

$$(p_1 + y_r)^2 - 2(p_1 + y_r)x_p + x_p^2 + y_p^2 - l^2 = 0 \quad (5) \\ (p_2 + y_r)^2 - 2(p_2 + y_r)y_p + y_p^2 + x_p^2 - l^2 = 0 \quad (6) \quad (G20)$$

Одузимањем једначине (6) од једначине (5), из групе једначина (G20) и после сређивања и увођења смена, добија се:

$$x_p = \frac{(p_1 + p_2 + 2y_r)(p_1 - p_2)}{2(p_1 - y_r)} + \frac{p_2 + y_r}{p_1 + y_r} \cdot y_p = 0 \quad \text{Смене:} \\ v_1 = \frac{(p_1 + p_2 + 2y_r)(p_1 - p_2)}{2(p_1 - y_r)} \quad (G21) \\ x_p = v_1 + v_2 \cdot y_p \quad (7) \quad v_2 = \frac{p_2 + y_r}{p_1 + y_r}$$

Једначина (7) из (G21) се уврсти у једначину (5). Добија се квадратна једначина по y_p коју треба решити.

$$(1 + v_2^2)y_p^2 + 2(v_1v_2 - p_2 - y_r)y_p + (p_2 + y_r)^2 + v_1^2 - l^2 = 0 \quad (G22)$$

После сређивања и увођења смена добија се:

$$v_3 y_p^2 + v_4 y_p + v_5 = 0, \quad (G23)$$

где су уведене следеће смене:

$$v_3 = 1 + v_2^2 \quad v_4 = 2(v_1v_2 - p_2 - y_r) \quad v_5 = v_1^2 - 2p_1v_1 - 2y_rv_1 + (p_1 + y_r)^2 - l^2 \quad (G24)$$

Решење директног геометријског проблема се добија као решење квадратне једначине (G23):

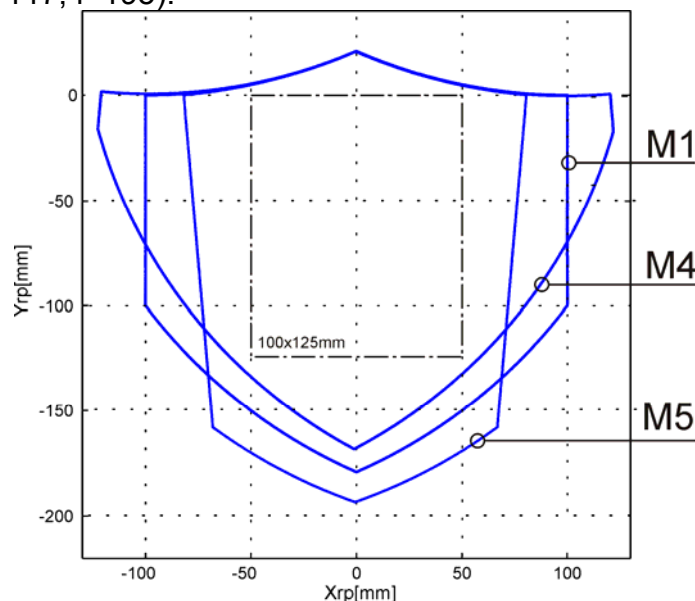
$$y_p = \frac{-v_4 \pm \sqrt{v_4^2 - 4v_3v_5}}{2v_3}, \quad \text{где се бира предзнак минус испред корена, па је}$$

коначно решење ДГП:

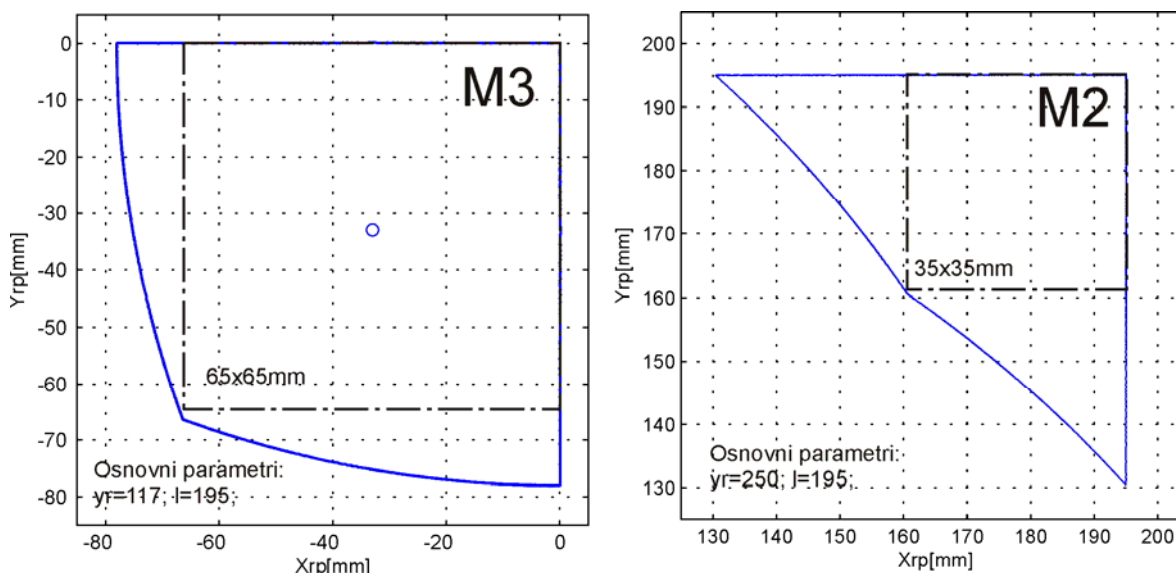
$$x_p = v_1 + v_2 \cdot y_p \\ y_p = \frac{-v_4 - \sqrt{v_4^2 - 4v_3v_5}}{2v_3} \quad (G25)$$

Анализа радног простора.

Анализа радног простора за паралелне механизме је врло значајна због утврђивања правилног омеђеног простора, у који се може поставити обрадак, односно конутура која се програмира. Ова анализа треба да се спроведе за конкретне изабране параметре, за сваку кофигурацију машине, пре њеног конфигурисања и припреме за рад. У наставку се дају прикази контура радног простора за све основне типове машина и то, на слици 4.9 за машине типа M1, M4 и M5 (са основним параметрима $x_r=100$, $y_r=250$, $l=250$) и на слици 4.10 за машине типа M2 (са основним параметрима $y_r=250$, $l=195$) и M3 (са основним параметрима $y_r=117$, $l=195$).



Слика 4.9 Радни простори машина типа M1, M4 и M5 ($x_r=100$, $y_r=250$, $l=250$)



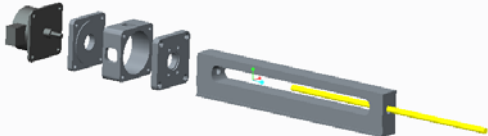

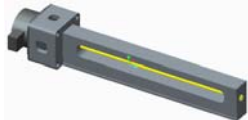

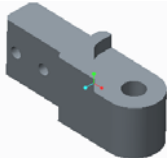


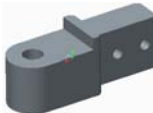
















Слика 4.10 Радни простори машина типа M2 и M3 ($y_r=117$ $l=195$)

На сликама 4.9 и 4.10 показан је и омеђен максимални геометријски правилан део радног простора, који је уписан у максимални достиживи радни простор машине. Овај омеђени радни простор се користи за безбедно и сигурно постављање програмиране контуре у границе радног простора.

4.4 Опис пројектоване стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА

За пројектовану реконфигурабилну машину алатку неопходно је успоставити система саставних елемената, или модуларни систем, са базом расположивих модула и правилима помоћу којих је могуће њено реконфигурисање. Систем саставних елемената стоне реконфигурабилне машине МОМА, за двоосни механизам са паралелном кинематиком, најлакше може бити представљен морфолошком матрицом, као што је показано на слици 4.11.

Модули	Реализације				
Базе	 B145		 B23		
Актуатори					
Зглобови					
Спојке					...
Тип	M1	M2	M3	M4	M5
Конфигурисан и модел машине					
Машина МОМА					

Слика 4.11 Морфолошка матрица пет основних конфигурација реконфигурабилне машине МОМА

На слици 4.11 су показане основне функционалне целине као што су: базе, актуатори, зглобови и спојке, као и план градње са примерима конфигурисаних склопова CAD модела и физичких реализација за основне конфигурације реконфигурабилне машине од M1 до M5. Маchine типова M1, M4 и M5, користе исту базу B145, док маchine типова M2 и M3 користе базу B23. Актуатори

паралелног механизма су идентични за све типове машина. Спојке користе идентичне обртне зглобове и могу бити у већ помињане три номиналне дужине (250, 195 и 180 mm).

Редослед послова за конфигурисање и/или реконфигурисање и припрему за рад на машини је следећи:

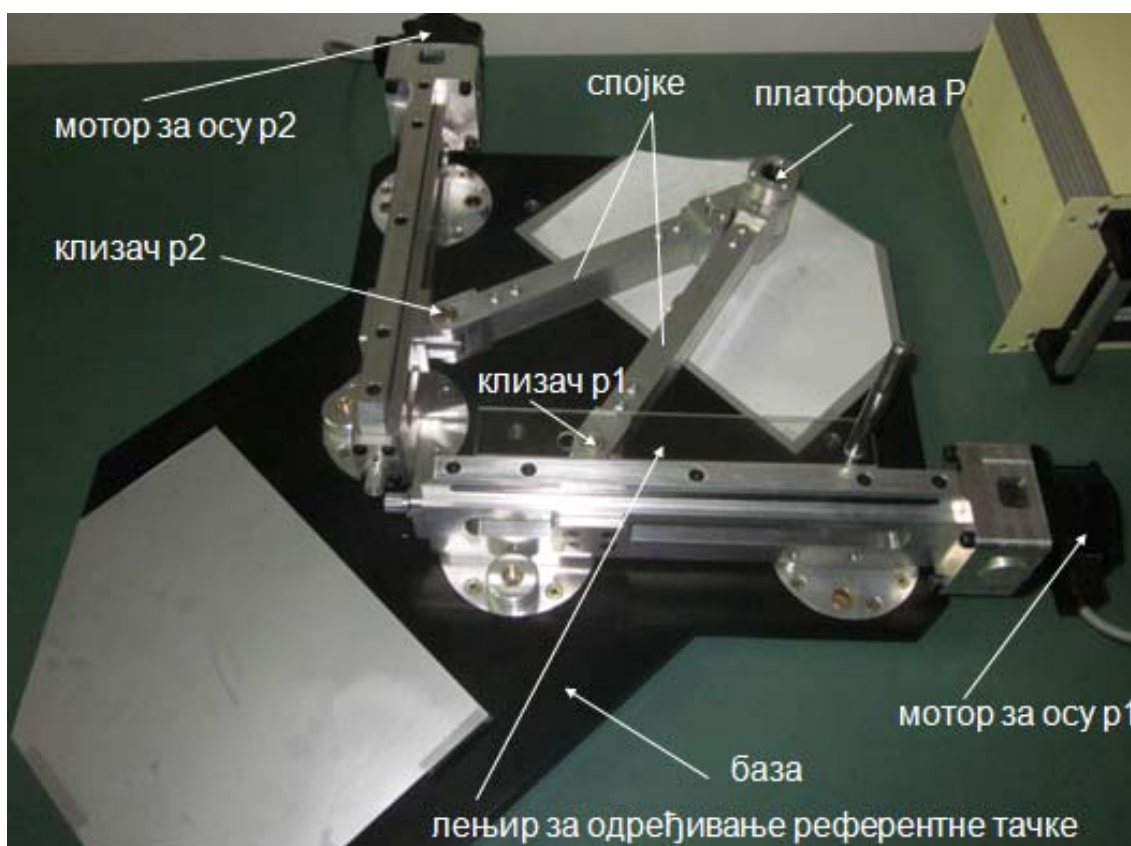
- (1) Конфигурисање и склапање хардвера машине, на сонову морфолошке матрице са слике 4.11, за изабрани тип машине МОМА и према задатим параметрима.
- (2) Конфигурисање управљачког софтвера EMC2, које укључује проверу основних параметара машине и једначина инверзне и директне кинематике, које су имплементирани у софтвер за управљање и њихово прилагођавање за изабрани тип машине МОМА.
- (3) Довођење оса конфигурисане машине МОМА у референтни положај, тако да положаји оба клизача имају вредност нула ($p_1=0$ и $p_2=0$).
- (4) Када је машина доведена у референтни положај, потребно је поставити нулту тачку G54. То је нулта тачка која је активна по укључењу машине. За њено постављање потребно је израчунати координате положаја платформе када су оба клизача у референтном положају ($p_1=0$ и $p_2=0$).
- (5) Програмирање се врши у координатном систему обратка, за који је одабрана нулта тачка G55. Најбоље је да се G55 постави у средини изабраног радног простора. Зато је потребно израчунати координате пресека дијагонала изабраног радног простора.
- (6) Када је машина припремљена за рад и када су дефинисане нулте тачке G54 и G55, може се приступити постављању папира за цртање у границама изабраног радног простора, или адекватног припрема и потребног алата, ако се врши обрада глодањем.
- (7) По завршетку припреме машине за рад, приступа се припреми G кода у расположивом окружењу за програмирање ове машине (ручно или применом CAD/CAM система).
- (8) Пре пуштања машине у рад припремљени G код треба верификовати симулацијом путање алата у расположивом програму за симулацију.
- (9) Завршна верификација рада машине остварује се исцртавањем програмиране контуре на машини МОМА, или обрадом датог дела.
- (10) На крају се врши анализа оствареног рада и комплетирање извештаја о раду на машини МОМА.

У наставку се даје илустрација ове процедуре конфигурисаним хардвером и софтвером машине МОМА за тип M2. Радно место за овако конфигурирану машину показано је на слици 4.12 и чине га: рачунар са инсталираним PC Linux Ubuntu OS и EMC2 управљачким софтвером, погонска јединица са драјверима и напајањем и конфигурирана машина МОМА. На слици 4.13 је показана конфигурирана машина МОМА типа M2 у референтном положају ($p_1=0$ и $p_2=0$).

За референтни положај машине усвојене су референтне позиције за случај када су клизачи на $ug=95$ mm од координатног почетка. С обзиром да постоје рупе у бази за тачно одређивање положаја на 250 mm од координатног почетка, направљен је лењир са рупама, за прецизно одмеравање координата база погонских оса, као што је показано на сликама 4.13 и 4.14.

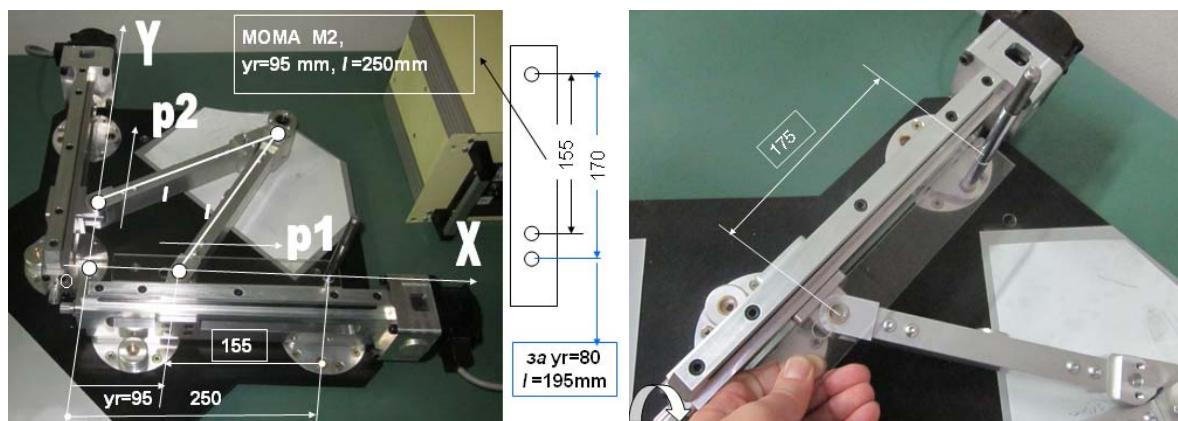


Слика 4.12 Радно место за машину МОМА типа М2



Слика 4.13 Приказ машине МОМА типа М2 у референтном положају

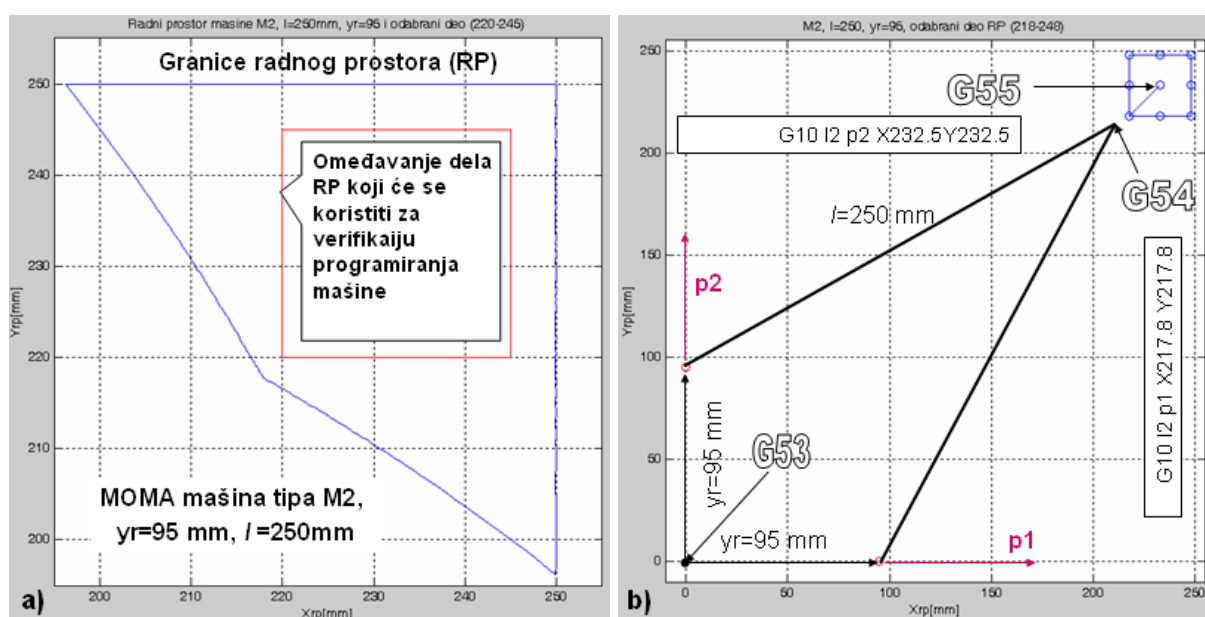
Илустрација постављања референтних тачака на машини помоћу еталон лењира показана је на слици 4.14. На еталон лењиру постоје три рупе. Са једне стране лењира је једна рупа која се чивијом поставља на растојању 250 mm, а друге две су на 155 mm (за параметре машине $\gamma=95$ mm и $l=250$ mm) и 170 mm (за параметре машине $\gamma=80$ mm и $l=195$ mm). У ручном режиму се клизачи доведу близу референтне позиције, а онда се финим ручним окретањем доведу у позицију да осовиница клизача упадне у други отвор на еталон лењиру. Овај је поступак врло важан за геометријску тачност машине.



Слика 4.14 Постављање машине МОМА типа М2 у референтни положај за $yr=95$ mm помоћу еталон лењира са рупама

За остале типове машина МОМА постоје припремљени отвори у базама машина В145 и В23, који представљају маркере за референтне позиције клизача. Клизачи се доведу близу те позиције, затим се извади осовиница и чивијом позиционира клизач према референтном отвору. Ова процедура је лако остварива зато што су мотори погонских оса корачни.

Приказ радног простора машине и омеђеног и издвојеног радног простора за машину МОМА М2 показан је на слици 4.15а. Све контуре, које се програмирају за обраду на машини МОМА типа М2, треба да буду унутар омеђеног радног простора. Приликом конфигурисања машине треба поставити и нулте тачке. Нулта тачка G53 је апсолутна нула машине. Нулта тачка, активна по укључењу је G54 и она треба да се постави тако да машина у референтном положају има координате платформе $X=0$ и $Y=0$. То се остварује командом G10 L2 p2 X217.8 Y217.8, где су координате X и Y координате положаја платформе када су координате клизача p1 и p2 једнаки нули. Нулта тачка G55 је нулта тачка за програмирање и њен положај треба да буде у границама омеђеног радног простора. Најбоље је да то буде у средини, па је за пример на слици 4.15б команда за постављање ове нулте тачке G10 L2 p2 X232.5 Y232.5.



Слика 4.15 Радни простор машине МОМА М2 и нулте тачке на машини

За конфигурисану и припремљену машину за рад учитава се припремљени програм (G код). Припремљени програм претходно проверити у расположивом NC едитору, који има могућност симулације или приказа програмиране путање алата, слика 4.16а. Учитавањем програма у софтвер EMC2 такође се добија исцртана контура у прозору за приказ путање алата у графичком корисничком интерфејсу Axis, слика 4.16б, што је додатна провера. Завршна верификација програма остварује се исцртавањем контуре на машини МОМА, слика 4.16в. На крају рада треба комплетирати извештај о оствареном раду на машини.




Пример једног програма за обраду задате контуре

```

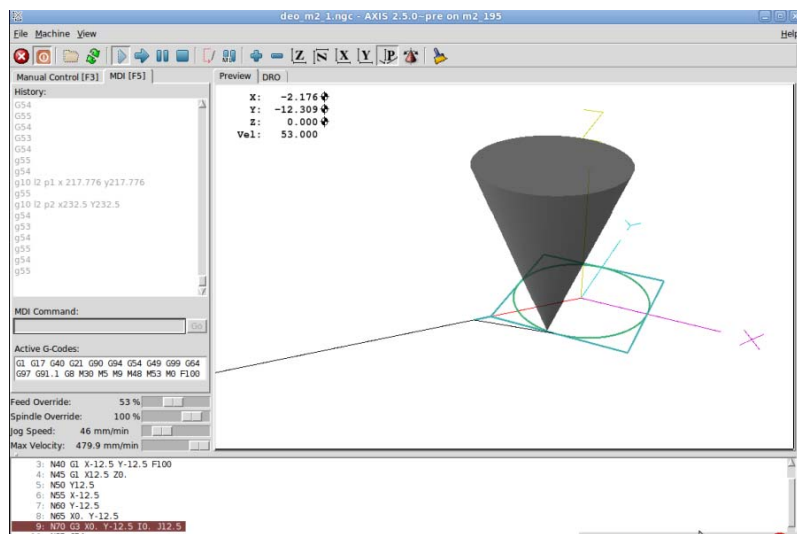
%
G55 ← Нулта тачка
N40 G1 X-12.5 Y-12.5 F100
N45 X12.5 Z0.
N50 Y12.5
N55 X-12.5
N60 Y-12.5
N65 X0. Y-12.5
N70 G3 X0. Y-12.5 I0. J12.5
N85 G54
N95 G1 X0. Y0.
N100 M30
%
                    
```

} Опис контуре

} Повратак у референтну позицију машине

← Пример симулације програмиране путање

а) Пример једног програма са верификацијом путање у NC едитору



б) Екран софтвера EMC2 (Axis GUI)



в) Верификован програм на машини

Слика 4.16 Пример једне програмиране контуре са верификацијом исцртавањем контуре на машини

4.5 Систем управљања и програмирања

Полазећи од основне идеје да стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА буде директно применљива у окружењу за програмирање конвенционалних, серијских CNC машина алатки, користећи постојеће CAD/CAM системе и G код, развијен је управљачки систем отворене архитектуре. Систем је базиран на PC real-time Linux платформи и EMC2 софтверу [4] за управљање машина алатки (тима и серијских и паралелних машина алатки и робота). Софтверски систем EMC2 је креиран у NIST-у (*National Institute of Standards and Technology*) [5] и представља отворени софтвер (GPL - *General Public License*).

Развој система се одвијао у више фаза. Кинематички модул, базиран на једначинама из решења проблема инверзне и директне кинематике (поглавље 4.3), за све типове машина МОМА, програмиран је у језику C и интегрисан у EMC2 софтвер. Конфигурисано управљање се једноставно реконфигурише за сваки тип машине МОМА, променом одговарајућих параметара у модулу за кинематику. Пример интегрисаног решења директног геометријског проблема у модулу за кинематику у формату C софтвера за управљање машином EMC2, за машину МОМА типа M2, показан је на слици 4.17.

ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ

```

double l = 250;
double yr = 95;

int kinematicsForward(const double *joints,
                    EmcPose * pos,
                    const KINEMATICS_FORWARD_FLAGS * fflags,
                    KINEMATICS_INVERSE_FLAGS * iflags)
{
    double p1=joints[0];
    double p2=joints[1];

    double t1=(p2+yr)/(p1+yr);
    double t2=(p1*p1-p2*p2+2*yr*(p1-p2))/(2*(p1+yr));
    double t3=1+t1*t1;
    double t4=2*t1*t2-2*t1*p1-2*t1*yr;
    double t5=p1*p1-2*t2*p1+2*yr*p1+t2*t2-2*t2*yr+yr*yr-1*1;

    double yp=pos->tran.y=(-t4+sqrt(t4*t4-4*t3*t5))/(2*t3);
    double xp=pos->tran.x=t1*yp+t2;
    pos->tran.z = joints[2];
    pos->a = joints[3];
    pos->b = joints[4];
    pos->c = joints[5];
    pos->u = joints[6];
    pos->v = joints[7];
    pos->w = joints[8];

    return 0;
}
    
```

$t_1 = \frac{p_2 + y_r}{p_1 + y_r}, t_2 = \frac{p_1^2 - p_2^2 + 2y_r(p_1 - p_2)}{2(p_1 + y_r)}$

Смене
 $t_3 = 1 + t_1^2$
 $t_4 = 2t_1 t_2 - 2t_1 p_1 - 2t_1 y_r$
 $t_5 = p_1^2 - 2t_2 p_1 + 2y_r p_1 + t_2^2 - 2t_2 y_r + y_r^2$

$y_p = \frac{-t_4 + \sqrt{t_4^2 - 4t_3 t_5}}{2t_3}$
 $x_p = t_1 \cdot y_p + t_2$

ДГП

Пример синтаксе за једначине ДГП за машине типа M2

$p_1 = \text{Joints}[0]$
 $p_2 = \text{Joints}[1]$

Слика 4.17 Фрагменти фајла за кинематику у формату C софтвера EMC2 са имплементираним једначинама ДГП за машину МОМА типа M2

Пример интегрисаног решења инверзног геометријског проблема у модулу за кинематику у формату C софтвера за управљање машином EMC2, за машину МОМА типа M2, показан је на слици 4.18. То је други важан део софтвера којим се систем за управљање прилагођава одабраној машини.

```

int kinematicsInverse(const EmcPose * pos,
                    double *joints,
                    const KINEMATICS_INVERSE_FLAGS * iflags,
                    KINEMATICS_FORWARD_FLAGS * fflags)
{
    double xp = pos->tran.x;
    double yp = pos->tran.y;

    double p1=-yr+xp-sqrt(1*1-yp*yp);
    double p2=-yr+yp-sqrt(1*1-xp*xp);

    joints[0] = p1;
    joints[1] = p2;
    joints[2] = pos->tran.z;
    joints[3] = pos->a;
    joints[4] = pos->b;
    joints[5] = pos->c;
    joints[6] = pos->u;
    joints[7] = pos->v;
    joints[8] = pos->w;

    return 0;
}

```

$$p_1 = x_p - y_r - \sqrt{l^2 - y_p^2}$$

$$p_2 = y_p - y_r - \sqrt{l^2 - x_p^2}$$

$$p_1 = \text{Joints}[0]$$

$$p_2 = \text{Joints}[1]$$

ИГПА

$$p_1 = \text{Joints}[0]$$

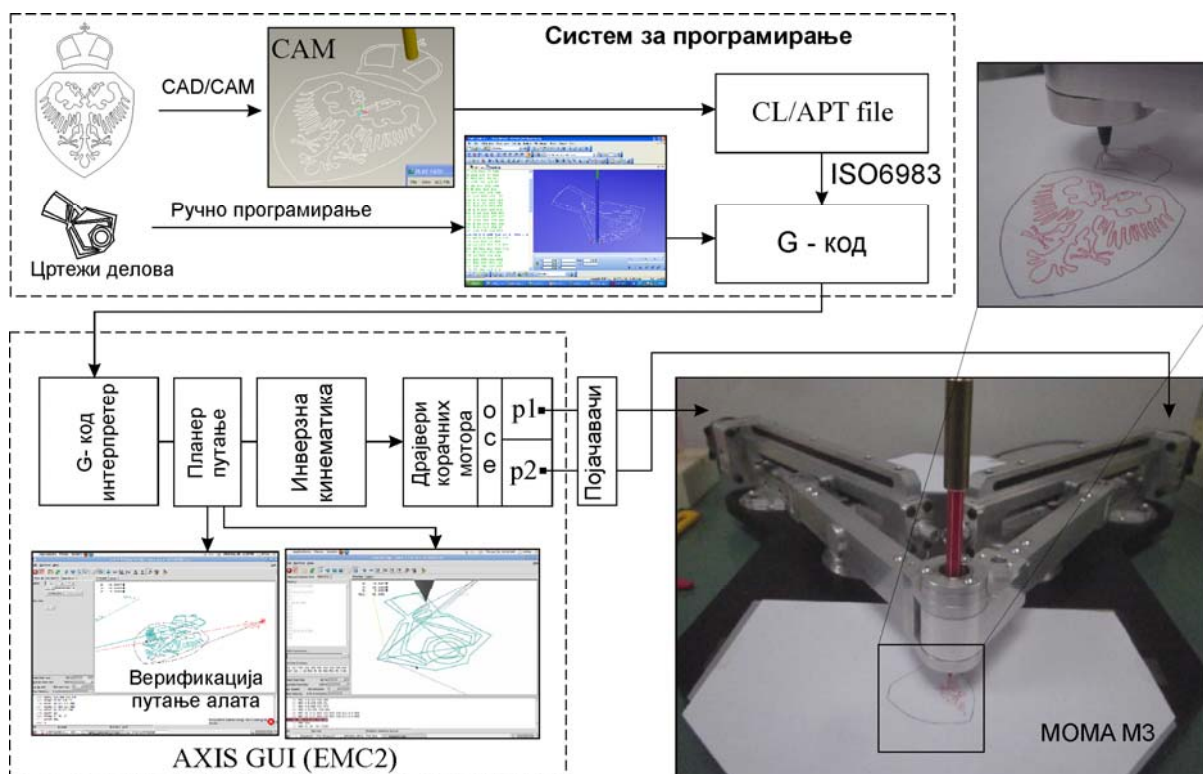
$$p_2 = \text{Joints}[1]$$

Пример синтаксе за једначине ИГП за машине типа M2

Слика 4.18 Фрагменти фајла за кинематику у формату C софтвера EMC2 имплементираних једначина ИГП за машину МОМА типа M2

На слици 4.19 је показана упрошћена структура комплетног система управљања и програмирања са назначеним основним елементима EMC2 система. Као што се види са слике 4.19, програмирање је конвенционално, при чему се користи постпроцесор за превођење CL-формата у G код. У току читавања G кода EMC2 софтвер извршава и графичку симулацију путање алата. На основу нацртане путање може се одмах проценти да ли је преузети програм коректан за планирану обраду, чак и да није вршена нека од уобичајених његових претходна верификација.

Програмирање се реализује свим расположивим методима, од ручног до примене CAD/CAM система. Ако се програмирање врши применом CAD/CAM система, после програмирања неке контурне обраде врши се симулација путање алата и добија CL APT фајл. Путања алата, односно CL APT фајл се постпроцесира сагласно стандарду RS274 D, којим је прописан G код. Овде чак није потребно конфигурисати нови постпроцесор, већ је могуће користити неки од стандардних расположивих постпроцесора за машине са серијском кинематиком и Faпис управљањем, које нуди одабрани CAD/CAM систем. Добијени G код је улаз за EMC2, где се тај G код интерпретира и шаље у планер путање. Овде поново можемо видети приказ путање алата и извршити симулацију кретања алата у систему EMC2. Приликом симулације програма обраде долази до заустављања даљег извршења уколико било која од оса прекорачи своје границе. На тај начин је обезбеђено да на машину не може да оде програм који се не може реализовати. Затим следи прерачунавање путање алата, помоћу једначина инверзне кинематике, на стварна кретања погонских оса машине и слање појачаних сигнала на оба корачна мотора преко драјвера. Као крајњи резултат се добија исцртана, или обрађена програмирана контура.



Слика 4.19 Структура система управљања и програмирања

4.6 Техничке карактеристике

Техничке карактеристике и техничке могућности овог обрадног система дате су у проспекту у Прилогу 7.1. Овде се ради о едукационом комплету, па нису битне бројне вредности перформанси машине, по којима се може оценити њена производност, статичка крутост, стабилност, производност и слично. Важније од тога јесу следеће перформансе овог комплета:

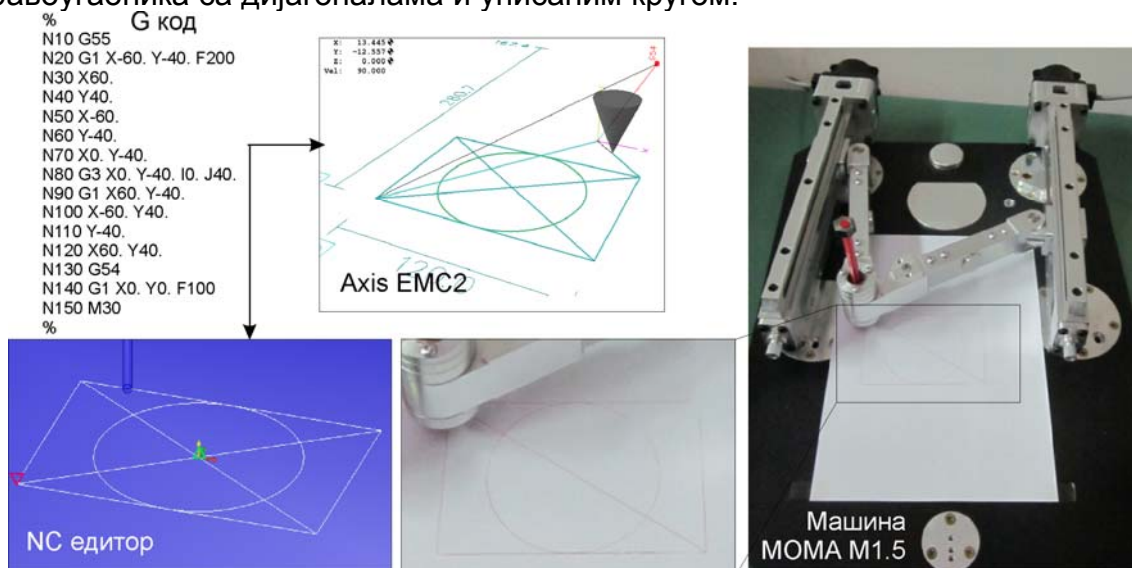
- Заснован је на РС са реконфигурабилним софтвером за управљање и има могућност прилагођавања параметара машине за сваки од понуђених типова машина МОМА.
- Омогућава реконфигурабилност хардвера машине за све показане конфигурације машине МОМА.
- Прихвата програме такорећи неограничене дужине и са стандардним форматом G кода. Уобичајено је да се програм покреће са диска РС. Формално, интерпретер му је подешен за дијалект NGC G кода.

4.7 Испитивање стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА

С обзиром да је реч о сложену производу развијене су адекватне процедуре за испитивање његове тачности. Коначна верификација плана управљања и програмирања стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА остварена је кроз конфигурисање сваке од приказаних варијанти машине са припадајућим управљањем. За тако конфигуриране машине остварен је њихов пробни рад исцртавањем програмираних контура у границама радног простора. Тако је постављено прво и најважније испитивање: провера да ли систем за управљање коректно планира путању алата и да ли алат заиста води по тој путањи. За то испитивање се користе типске контуре.

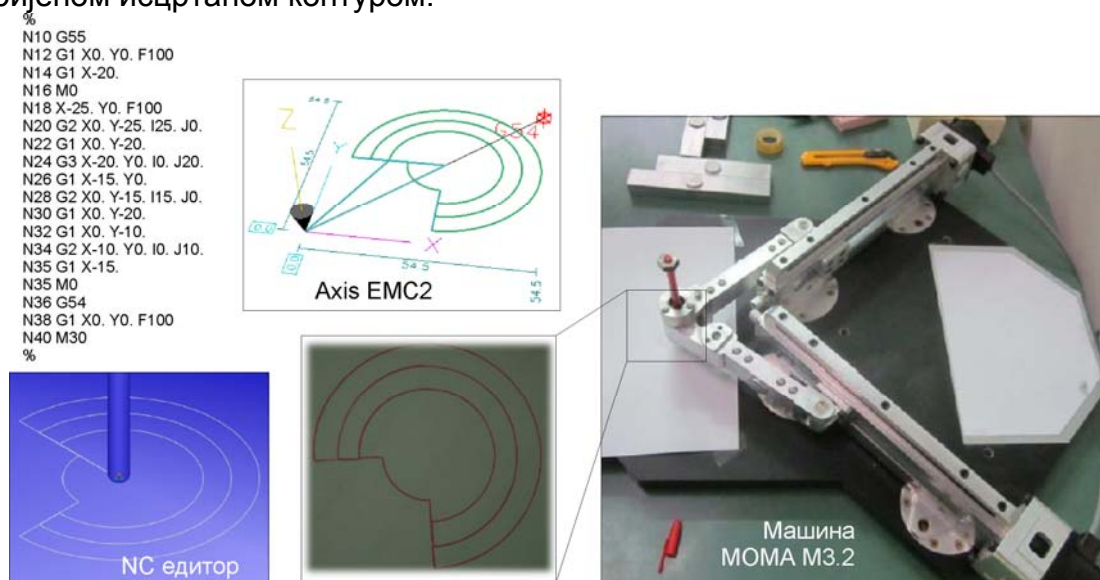
За потребе експеримента су све мере разматраних програмираних пробних контура подешене према величини радног простора, а положаји пробних контура у координатном систему машине одређени су према положају контура радног простора сваке машине посебно.

На слици 4.20 показана је прва пробна контура са G кодом, симулираном путањом алата у едитору и окружењу Axis EMC2, као и пример машине МОМА М1.5 у раду са добијеном исцртаном контуром. Изабрана контура је облика правоугаоника са дијагоналама и уписаним кругом.



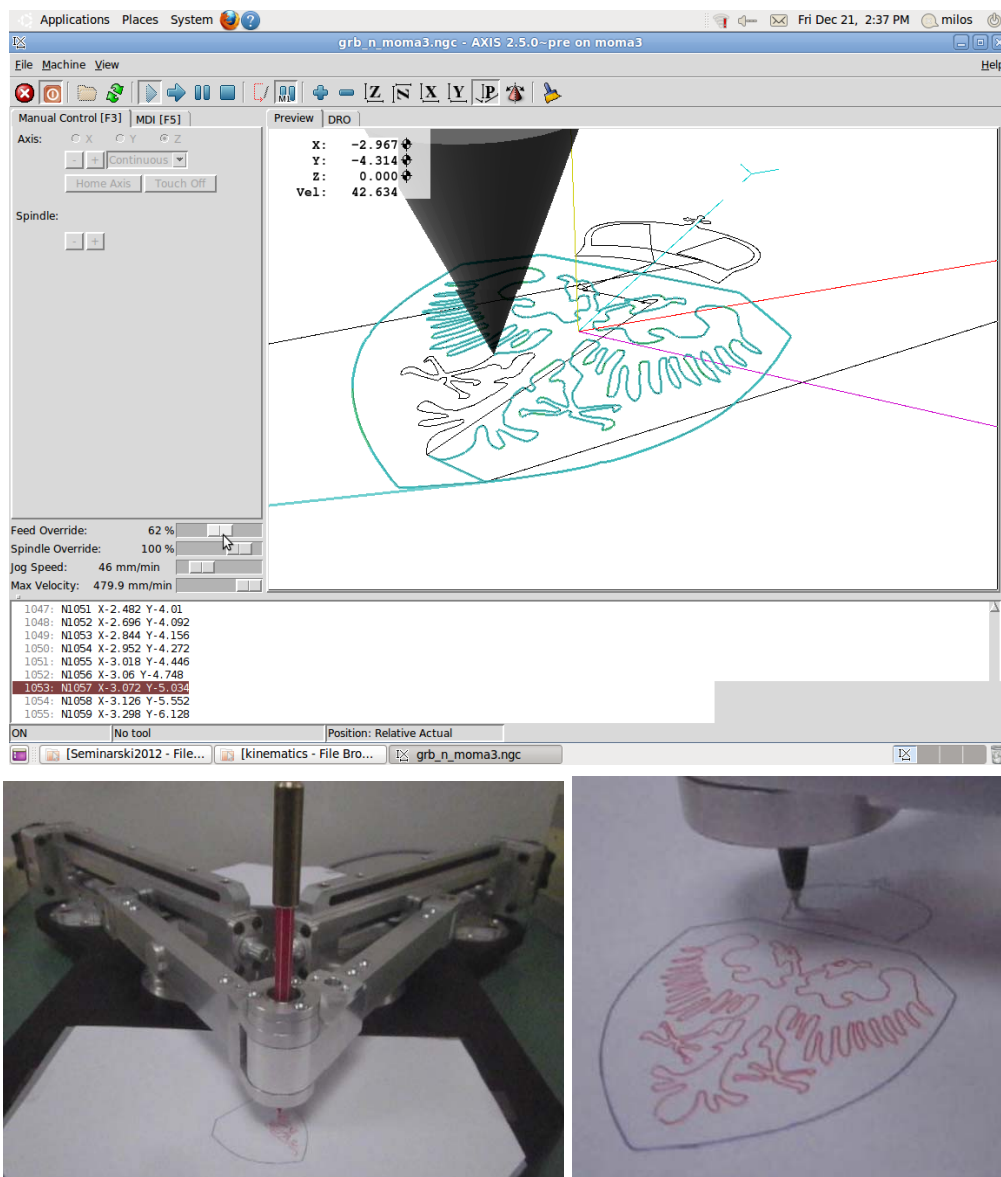
Слика 4.20 Пробни рад машина МОМА М1.5

На слици 4.21 показана је друга пробна контура, са концентичним круговима, за проверу кружне интерполације, са приказом G кода, симулиране путање алата у едитору и окружењу Axis EMC2, као и пример машине МОМА М3.2 у раду са добијеном исцртаном контуром.



Слика 4.21 Пробни рад машина МОМА М3.2

На слици 4.22 показана је трећа пробна контура за тестирање програмирања применом CAD/CAM система, на примеру исцртавања контуре грба Немањића. На слици је показана симулирана путања у окружењу Axis EMC2, као и пример машине МОМА М3.1 у раду, са добијеном исцртаном контуром.

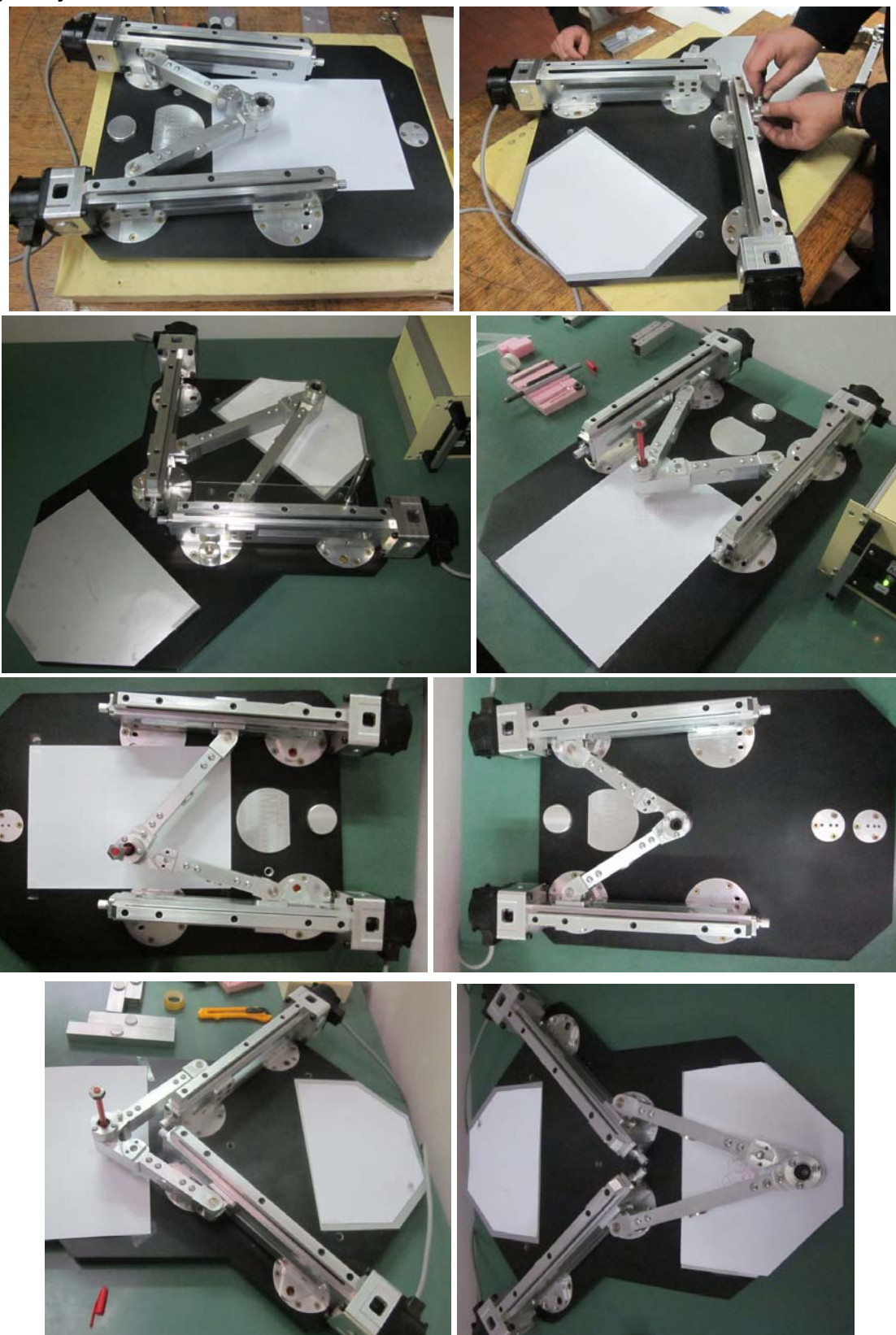


Слика 4.22 Пробни рад машине МОМА типа М3.1

Неки од детаља током пробног рада су:

- Изглед и проверене габаритне мере добијених контура потврђују концепт израчунавања у систему за управљање.
- Позиционирање у границама радног простора је било добро. Помоћу програмирања позиције врха писача, да се поклопи са координатним почетком локалног координатног система на контури, добијено је добро поклапање програмираних и потрбних позиција, на основу чега је у оцени тачности позиционирања добијен позитиван закључак.
- Изглед исцртаних елемената геометрије на програмираним контурама потврђује исправност поставки позиција референтних тачака на погонским осама. Тиме је верификована и геометријка тачност машине.
- За програмирање обрађиваних делова на стоној троосној машини коришћени су различити типови програмирања, од ручног, до примене CAD/CAM система, без икаквих сметњи.

На слици 4.23 је дата илустрација пробног рада на различитим конфигурацијама машине типа МОМА. За сваку од приказаних конфигурација је конфигурисан и адекватни систем за управљање. После завршеног комплетирања сваке од показаних машина остаје неупотребљено: два пара спојки и једна основна плоча, а од система алата алат или писаљка.



Слика 4.23 Примери различитих конфигурација машине МОМА

5. ЗАКЉУЧАК

Стана двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА (*Едукациони систем МОМА*) конципирана је, направљена, тестирана и примењена у едукацији на Машинском факултету Универзитета у Београду и то првенствено у оквиру наставе на предмету Машине алатке М.

Ова машина може да представља значајан допринос у едукацији за развој и коришћење машина алатки нове генерације, као што су реконфигурабилне машине алатке и машине алатке са паралелном кинематиком, које су реализоване на бази управљања отворене архитектуре. То истовремено даје основу за успостављање метода за прављење квалитетних, чак и неуобичајених машина алатки за сопствене потребе. Специфичне машине алатке могу бити тада коришћене за успостављање нових производних програма не оптерећујући цену тако добијеног новог производа трошковима свог развоја. Највеће уштеда је у том случају у комплетирању система за управљање таквог обрадног система. Ако је тако развијена машина алатка намењена за неки нови процес, онда је и управљање тим процесом могуће комплетирати такође са прихватљивим трошковима.

Може се рећи да је машина МОМА део једног комплетног едукационог радног места (*Едукационог система МОМА*), намењеног за обуку и увежбавање следећих вештина, потребних за технологије нумеричког управљања на свим нивоима образовања и у свим индустријским условима: (i) за конфигурисање обрадног система помоћу машине алатке са паралелном кинематиком и једног модерног система за управљање отворене архитектуре, који је базиран на РС и (ii) за програмирање глодалица за контурну обраду помоћу САМ система. По правилу се тада користе програми који су у формату G кода и на дијалекту NGC (**N**ext **G**eneration **C**ontrol).

У овако конципираном едукационом комплету омогућено је реконфигурисање и хардвера (саме машине) и софтвера (система за управљање), али и увежбавање процедуре за развој сасвим новог типа обрадног система.

Управљачку јединицу чини један РС са оперативним системом Linux, са додатком који му омогућава да може да ради у реалном времену и системом за нумеричко управљање отворене архитектуре EMC2. Оба ова софтвера су доступна бесплатно. Могу да се користе и за прављење индустријских машина. Због тога и машина МОМА, као техничко решење, има све перформансе система за програмирање и управљање као и индустријске машине.

Планирано је: (i) да се ова машина и даље усавршава имплементацијом прототипа система за управљање и програмирање на бази стандарда из група стандарда ISO14649 и ISO10303, са посебном припремом за програмирање по протоколу ISO10303-238; (ii) да се започну истраживања у домену мезо и микро технологија обраде резањем, за које би ова машина била полазна експериментална база; (iii) да се двоосни реконфигурабилни механизам искористи да би се вршиле пробе са технологијом додавања материјала и то слој по слој; (iv) да се додавањем треће серијске осе машина преведе у троосну машину алатку са хибридном кинематиком; (v) да се конципира и нова генерација ове машине са чистом паралелном кинематиком итд.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] T. Moriwaki, Multi-functional machine tool, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57(2008)736-749
- [2] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, HV Brussel, Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, 1999, Vol. 48/2, pp. 527-540.
- [3] M. Glavonjić, Kompleksne mašine alatke, Podsetnik za temu AN-7, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, decembar 2012, http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma_bsc/pdf_m/ha7_m.pdf
- [4] EMC - Enhanced Machine controller web site - www.linuxcnc.org. Посећиван је у континуитету, па и за време израде овог Елабората. Са тог сајта потиче и инсталација система EMC2 за управљање отворене архитектуре.
- [5] NIST - National Institute of Standards and Technology web site - www.nist.gov. Посећиван је у континуитету, па и за време израде овог Елабората. Ту је започет развој система за управљање EMC2. Прво је комплетиран систем RCS (**R**eal-time **C**ontrol **S**ystem), као референтни модел за управљање интелигентних система, па је тај пакет рутина за управљање у реалном времену препуштен конзорцијуму linuxcnc на даљи слободан развој.

7. ПРИЛОЗИ

У наставку су следећа два прилога, који су саставни део овог Елабората и прилог са документима који су пратили ово техничко решење. Ти прилози су следећи:

ПРИЛОГ 7.1 Проспект за стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком **мом**а и

ПРИЛОГ 7.2 Документи који су пратили прихватање овог техничког решења

- 1) Молба Наставно-научном већу за избор рецензената за Техничко решење
- 2) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о именовану рецензената
- 3) Извештај рецензената
- 4) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању техничког решења
- 5) Молба да студенти ТЕХНИКУМА ТАУРУНУМ – ВИШСС користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома за извођење додатних облика наставе.
- 6) Изјава да истраживачи ЛОЛА института користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома у оквиру усавршавања на Машинском факултету у Београду.

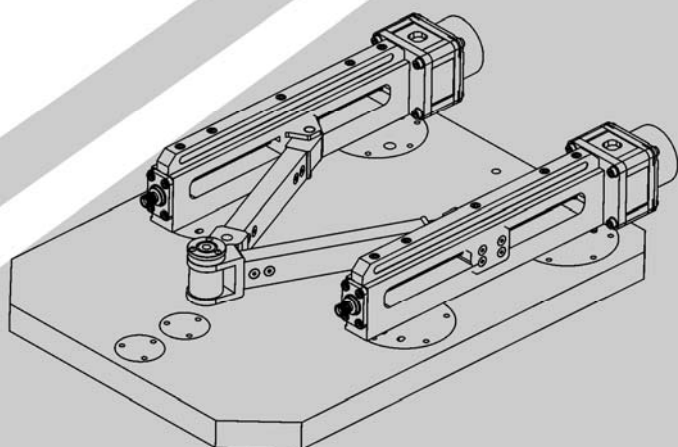
ПРИЛОГ 7.1. Проспект за стону двоосну реконфоигурабилну машину са паралелном кинематиком **moma**

Стона двоосна
реконфигурабилна
машина
са паралелном
кинематиком
moma



Универзитет у Београду Машински факултет

Катедра за
производно машинство



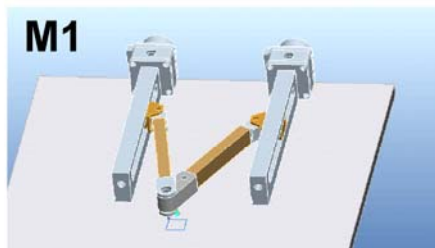
Центар за нове
технологије



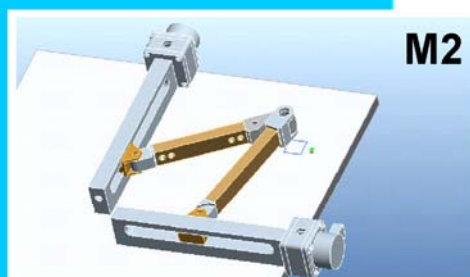
moma

ОСНОВНЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ МОМА

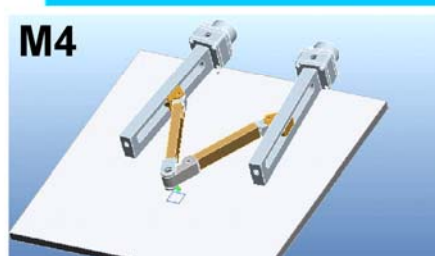
Равански реконфигурабилни паралелни механизам са 2 степена слободe се састоји од две идентичне погонске транслаторне осе по којима се крећу клизачи p_1 и p_2 . Клизачи су помоћу две спојке l_1 и l_2 повезане у паралелни механизам. Спојке l_1 и l_2 су са клизачима повезане обртним зглобовима, а међусобно су повезане у тачки P такође обртним зглобом. Тачка P је истовремено и тачкаста покретна платформа овог паралелног механизма у који се поставља алат, који је у овом случају у ствари писач који омогућава исцртавање програмиране путање алата. Реконфигурабилност овог механизма је омогућена захваљујући могућности да погонске транслаторне осе могу на бази да заузимају различите положаје.



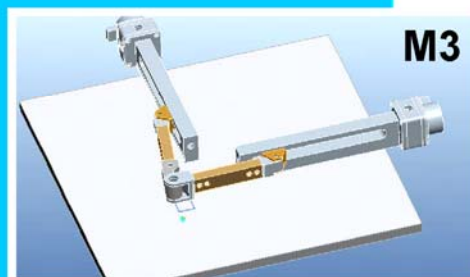
M1



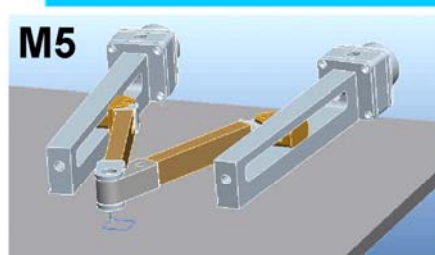
M2



M4

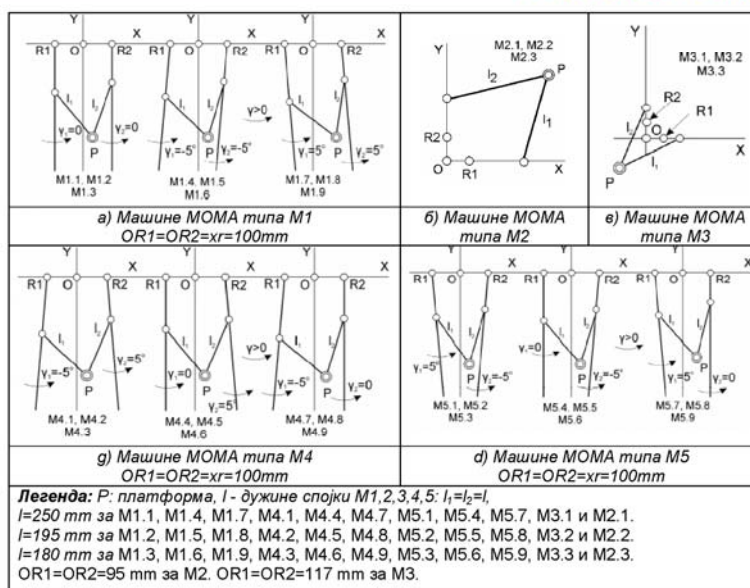


M3



M5

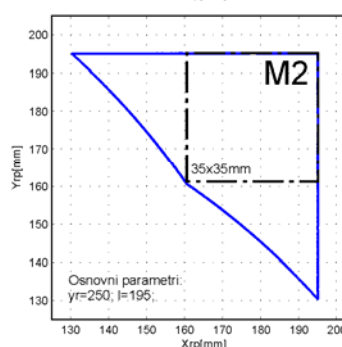
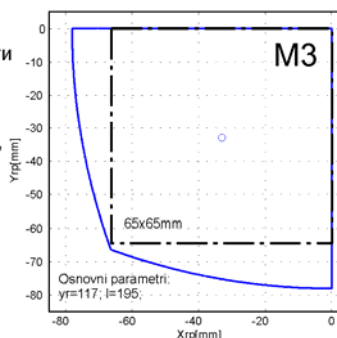
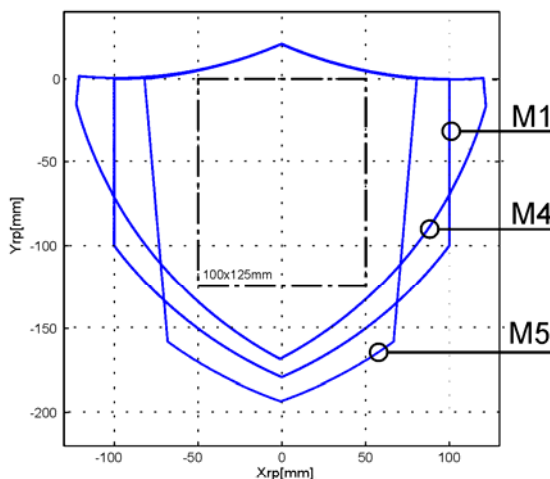
СВЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ МОМА



РАДНИ ПРОСТОР

Анализа радног простора за паралелне механизме је врло значајна због утврђивања правилног омеђеног простора у који можемо поставити контуру коју програмирамо. Ова анализа треба да се спроведе за конкретне изабране параметре за сваку конфигурацију машине пре њеног конфигуросања и припреме за рад.

Овде су показане контуре радног простора за све основне типове машина и то за машине типа M1, M4 и M5 (са основним параметрима $xg=100$ $yg=250$ $l=250$) и за машине типа M2 (са основним параметрима $yg=250$ $l=195$) и M3 (са основним параметрима $yg=117$ $l=195$).



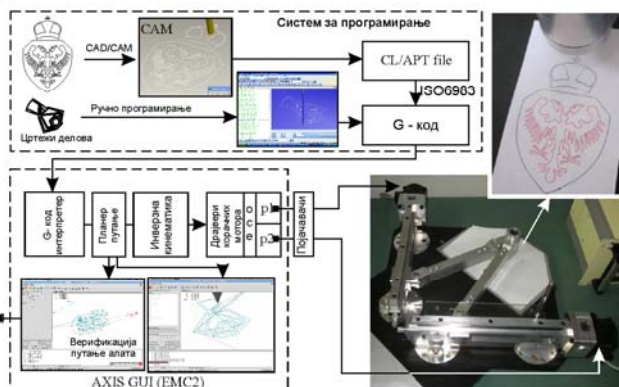
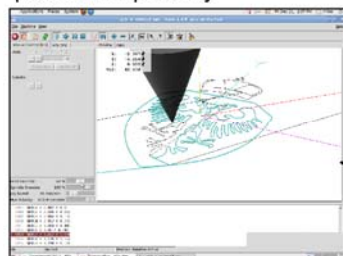
УПРАВЉАЊЕ И ПРОГРАМИРАЊЕ

Систем за управљање и програмирање има следеће особине:

- (1) Користи се уобичајено окружење за програмирање глодалица, а постпроцесором је само прилагођен формат програма.
- (2) Интерфејс за руковоаца машине је прилагођен по правилима као за вертикалне глодалице.
- (3) Користи се EMC2 систем за управљање отворене архитектуре на PC-Linux платформи.

EMC2

- Ручно програмирање у G - коду
- Програмирање применом CAD/CAM система
- Програмско управљање
- JOG управљање
- Прорачун свих кретања у реалном времену



PC-Linux - EMC2

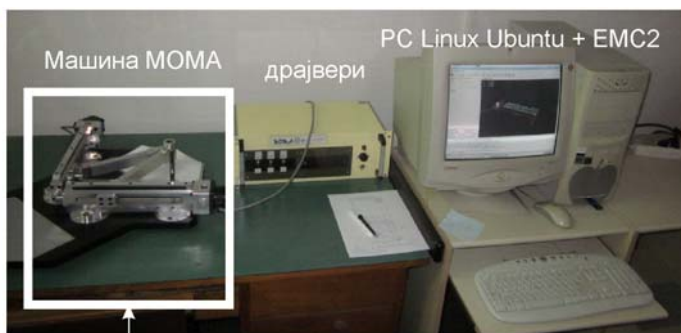
- Linux оперативни систем за рад у реалном времену (Debian, Ubuntu)

Кинематички модул у EMC2 је базиран на једначинама из решења проблема инверзне и директне кинематике, за све типове машина MOMA, програмиран је у језику C и интегрисан у EMC2 софтвер. Конфигурирано управљање се једноставно реконфигурише за сваки тип машине MOMA, променом одговарајућих параметара у модулу за кинематику.

Стана двоосна
реконфигурабилна
машина
са паралелном
кинематиком

moma

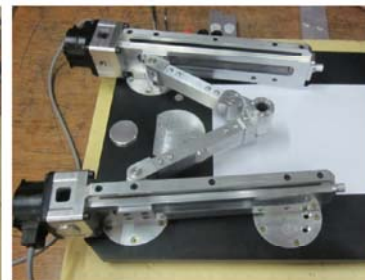
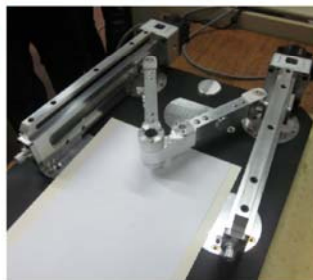
Примена реконфигурабилне машине типа МОМА, омогућава стицање знања у конфигурацији нових машина алатки, њиховом реконфигурацији према програму градње, програмирању и реализацији управљања отворене архитектуре на РС платформи.



Решења инверзне и директне кинематике за све конфигурације машине МОМА интегрисана су у језгро EMC2 софтвера. Формат програма који користи EMC2 заснива на G коду по стандарду RS274 и слична је формату програма које користе Fanuc CNC системи.

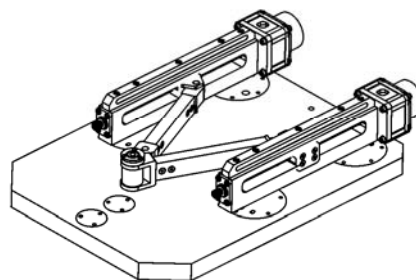


Различите конфигурације



ADRESA

Универзитет у Београду,
Машински факултет
Катедра за производно машинство
Краљице Марије 16,
11120 Београд 35, СРБИЈА
<http://www.mas.bg.ac.rs/>
<http://cent.mas.bg.ac.rs/mpk/index.htm>



ПРИЛОГ 7.2

Документи који су пратили прихватање овог техничког решења

(сваки од ових докумената је на по једној страни,
осим документа број 3, који је на три стране)

- 1) Молба Наставно-научном већу за избор рецензената за Техничко решење
- 2) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о именовању рецензената
- 3) Извештај рецензената.
- 4) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању техничког решења
- 5) Молба да студенти ТЕХНИКУМА ТАУРУНУМ – ВИШСС користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома за извођење додатних облика наставе.
- 6) Изјава да истраживачи ЛОЛА института користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома у оквиру усавршавања на Машинском факултету у Београду.

НУЧНО НАСТАВНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ	
-АРХИВА-	
Број:	157/1
Датум:	02-06-2014
Краљице Марије 16, 11120 Београд 35	

Предмет: Молба за избор рецензената техничког решења

Молимо Научно наставно веће да за Техничко решење:

**СТОНА ДВООСНА РЕКОНФИГУРАБИЛНА МАШИНА СА
ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ – МОМА**

аутора:

доц. др Саша Живановић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду,
проф. др Милош Главоњић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду,
доц. др Бранко Кокотовић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду,
Зоран Димић, дипл. инж. ел., ЛОЛА Институт

које је реализовано на Машинском факултету Универзитета у Београду, у оквиру пројекта Технолошког развоја ТР035022 "Развој нове генерације домаћих обрадних система", који је финансијски подржало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у периоду 2012 - 2013. године, именује два рецензента.

Наш предлог је да рецензију овог техничког решења изврше:

Проф. др Драган Милутиновић, Машински факултет Универзитета у Београду
Проф. др Милан Зељковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

У Београду, 02. јун 2014.

С поштовањем,


доц. др Саша Живановић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 1157/2
ДАТУМ: 06.06.2014.

На основу захтева доц. др Саше Живановића, бр. 1157/1 од 02.06.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 05.06.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења под насловом: „**Стана двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком - мома**“, чији су аутори: доц. др Саша Живановић, дипл.инж.маш., Универзитет у Београду Машински факултет, проф. др Милош Главоњић, дипл.инж.маш., Универзитет у Београду Машински факултет, доц. др Бранко Кокотовић, дипл.инж.маш., Универзитет у Београду Машински факултет, Зоран Димић, дипл.инж.ел., ЛОЛА Институт, именују:

- проф. др Драган Милутиновић, Машински факултет у Београду и
- проф. др Милан Зељковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



² Д Е К А Н
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ	
- АРХИВ -	
Број:	1157/3
Датум:	14-07-2014
Крљице Марије 16, 11120 Београд 35	

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду, број 1157/2 од 06. 06. 2014. године, именовани смо за рецензенте Техничког решења под насловом "Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА", реализованог у оквиру пројекта ТР-35022, чији су аутори:
доц. др Саша Живановић, дипл.маш.инж, проф. др Милош Главоњић, дипл.маш.инж,
доц. др Бранко Кокотовић, дипл.маш.инж, Зоран Димић, дипл.инж.ел, истраживач, студент докторских студија

На основу прегледа Елабората овог техничког решења и увида у објављене радове о њему подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење "Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА", аутора доц. др Саше Живановића, проф. др Милоша Главоњића, доц. др Бранка Кокотовића и Зорана Димића, дипл.инж.ел, приказано је Елаборатом на 38 страница формата А4 писаних фонтом величине 12 pt са нормалним проредом. Елаборат има пет поглавља, списак коришћене литературе и два прилога. Садржи 26 слика и једну таблицу у основном делу текста, један проспект на 4 стране у Прилогу 7.1 и списак комплета документације која прати признавање овог техничког решења, Прилог 7.2. Наслови поглавља су:

1. Област на коју се техничко решење односи
2. Технички проблем
3. Стање технике
4. Суштина и детаљан опис техничког решења
5. Закључак
6. Литература
7. Прилози

Техничко решење припада области нових производних технологија, односно, најновијој генерацији машина алатки и реализовано је у оквиру пројекта ТР-35022 "Развој нове генерације домаћих обрадних система", који подржава Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије.

Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА (у даљем тексту МОМА) користи се и као учило у настави на групи предмета Машине алатке на Машинском факултету Универзитета у Београду.

У поглављу *Област на коју се техничко решење односи* дат је приказ намене техничког решења за (i) конфигуравање и реконфигуравање, (ii) програмирање и (iii) управљање обрадних система са нумеричким управљањем на бази софтвера отворене архитектуре.

У поглављу *Технички проблем* детаљно су приказане иновационе компоненте Едукационог система МОМА: (1) Уграђен је двоосни реконфигурабилни механизам са паралелном кинематиком, уместо уобичајених серијских механизма и тако комплетан машински подсистем двоосне машине, који је главни део овог едукационог система; (2) за управљање се користи РС на коме је имплементиран погодан интерфејс за руковање и програмирање машине; (3) оперативни систем је Linux, са проширењем за рад у реалном времену; (4) систем за управљање има модерну отворену архитектуру (EMC2) у који се имплементирају управљачки и компензациони алгоритми за сваку машину посебно; (5) програмирање се врши помоћу G кода, без ограничења у односу на припремне и помоћне функције и

Стана двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – MOMA.
Извештај рецензената.

координатне системе; (6) предмет едукације може бити и припрема одабраног CAD/CAM система за програмирање, као и програмирање применом протокола STEP-NC.

У поглављу *Стање технике* детаљно је показан значај промене традиционалног концепта у пројектовању и градњи машина алатки увођењем паралелне и хибридне кинематике. Домен овог техничког решења односи се на машине које припадају групи реконфигурабилних, а тиме и комплексних машина алатки. У том домену је и концепција двоосне реконфигурабилне машине MOMA, која се, као технолошки модул, може уграђивати у хибридни механизам будуће машине алатке. За Едукациони систем MOMA потом су дате: технолошке могућности, могуће специфичне теме за едукацију и стратегија и статус даљег развоја.

У поглављу *Суштина и детаљан опис техничког решења* аутори наводе свој концепт који је базиран на: (i) сопствено развијеном раванском паралелном механизму са 2 степена слободе, (ii) специфичном начину кинематичког моделирања и (iii) на развијеном управљачком систему отворене архитектуре на бази софтвера EMC2 (Enhanced Machine Control) на PC real-time Linux платформи. Поглавље *Суштина и детаљан опис техничког решења* обухвата следеће целине:

- 4.1 Суштина техничког решења.
- 4.2 Опис механизма.
- 4.3 Кинематичко моделирање механизма.
- 4.4 Опис пројектоване стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – MOMA
- 4.5 Систем управљања и програмирања.
- 4.6 Техничке карактеристике.
- 4.7 Испитивање стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – MOMA.

На почетку овог поглавља наведена је суштина техничког решења. Потом је концизно описан уграђени двоосни паралелни механизам машине, па је приказан његов кинематички модел. Помоћу тог модела су решени инверзни и директни кинематички проблем. У опису пројектованих варијанти реконфигурабилних машина типа MOMA показани су CAD модели прототипова, као и облик и мере радних простора. Потом су детаљно описани систем за управљање отворене архитектуре и окружење и процедура за програмирања машине помоћу G кода за једну изабрану варијанту машине MOMA M2. Техничке карактеристике и могућности развијене Стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – MOMA, дате су у проспекту у Прилогу 7.1 Елабората. Поред приказане методологије развојног испитивања машине, показани су и примери исцртаних пробних контура, добијених током верификације рада на различитим варијантама машина типа MOMA.

У оквиру *Закључка* се наводи да је развијена Стана двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – MOMA, део Едукационог система MOMA који омогућава, едукацију за реконфигурисање и хардвера (саме машине) и софтвера (система за управљање) и за програмирање глодалица свих типова помоћу CAM система и формата G кода на дијалекту NGC (Next Generation Control), без ограничења у односу на дужину програма, транслације координатних система обратка, расположиве припремне и помоћне функције и слично. Управљачку јединицу чини један PC са оперативним системом Linux, са додатком који му омогућава да може да ради у реалном времену и систем за нумеричко управљање отворене архитектуре EMC2 чији се код може слободно користити, модификовати и дистрибуирати (*GNU General Public License*).

За даљи развој аутори планирају: (1) да се Едукациони систем MOMA и даље усавршава имплементацијом прототипа система за управљање и програмирање на бази стандарда из група стандарда ISO14649 и ISO10303, са посебном припремом за програмирање по протоколу ISO10303-238, (2) да се започну истраживања у домену мезо и микро технологија

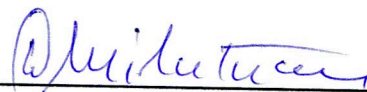
Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – МОМА.
Извештај рецензената.

обrade резањем, за које би овај систем био полазна експериментална база, (3) да се искористи могућност да се на машинама овог типа врше и пробе са технологијом додавања материјала и то слој по слој, (4) да се додавањем треће серијске осе машина преведе у троосну машину алатку са хибридном кинематиком, (5) да се конципира и нова генерација ове машине са чистом паралелном кинематиком итд.

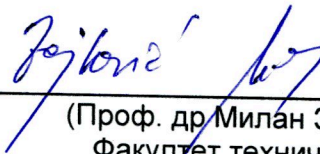
На крају Елабората су прилози. У Прилогу 7.1 је Проспект за Стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – МОМА, која је главни машински део овог техничког решења. У Прилогу 7.2 је списак комплета пратеће документације за признавање овог техничког решења.

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења **"Стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА"** јасно су приказали и теоријски обрадили комплетну структуру техничког решења. Приказане могућности стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА јасно указују да ово техничко решење представља допринос у развоју нових машина алатки са паралелном кинематиком и едукационих система за технологије нумеричког управљања. Предлажемо Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да се нови производ **"Стоне двоосне реконфигурабилне машине са паралелном кинематиком – МОМА"** прихвати као ново техничко решење.



(Проф. др Драган Милутиновић,
Машински факултет,
Београд)



(Проф. др Милан Зељковић,
Факултет техничких наука,
Нови Сад)

У Београду и Новом Саду, јула 2014. године

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 1157/4
ДАТУМ: 18.07.2014.

На основу захтева доц. др Саше Живановића, бр. 1157/1 од 02.06.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 17.07.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење под насловом: „**Стана двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком - мома**“, чији су аутори: доц. др Саша Живановић, дипл.инж.маш., Универзитет у Београду Машински факултет, проф. др Милош Главоњић, дипл.инж.маш., Универзитет у Београду Машински факултет, доц. др Бранко Кокотовић, дипл.инж.маш., Универзитет у Београду Машински факултет, Зоран Димић, дипл.инж.ел., ЛОЛА Институт,

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



2 Д Е К А Н
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

ТЕХНИКУМ ТАУРУНУМ
ВИСОКА ИНЖЕЊЕРСКА ШКОЛА СТРУКОВНИХ СТУДИЈА
Београд-Земун, Наде Димић 4
Број: 01-1063
Датум: 02. Септембар 2014.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Катедра за производно машинство

БЕОГРАД
Краљице Марије 16

Предмет: Молба за одобрење да студенти ТЕХНИКУМА ТАУРУНУМ – ВИШСС користе стону двоосну реконфигурабилну машину са паралелном кинематиком – мома

Стона двоосна реконфигурабилна машина са паралелном кинематиком – мома, користила би се за извођење додатних облика наставе на предметима: Машинска обрада 1, Пројектовање технолошких процеса и Аутоматизација производних процеса.

Аутори овог техничког решења су:

доц. др Саша Живановић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду,
проф. др Милош Главоњић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду,
доц. др Бранко Кокотовић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду,
Зоран Димић, дипл. инж. ел., ЈОЛА Институт.



ДИРЕКТОР

[Handwritten signature]

Naš znak:

1008

Datum:

3.9.2014.

Predmet: Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – moma

Prototip stone dvoosne rekonfigurabilne mašine sa paralelnom kinematikom – moma, je razvijen na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

Ovaj prototip sa tehničkim rešenjem su razvili autori: doc. dr Saša Živanović, dipl. inž. maš., Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, prof. dr Miloš Glavonjić, dipl. inž. maš., Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, doc. dr Branko Kokotović, dipl. inž. maš., Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu i Zoran Dimić, dipl. inž. el., LOLA Institut, u okviru projekta TR-35022 („Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema“).

S obzirom da je prototip stone dvoosne rekonfigurabilne mašine sa paralelnom kinematikom – moma kompletno završen koristimo ga za konfigurisanje i rekonfigurisanje, programiranje i upravljanje obradnih sistema sa numeričkim upravljanjem na bazi softvera otvorene arhitekture, u okviru usavršavanja naših istraživača na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

Beograd, 03.09.2014



v.d. direktora

Vladimir Kvrđić