



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



**Утицај нелинеарности машине
алатке са паралелном кинематиком
на параметре тачности
позиционирања**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
проф. др Слободан Табаковић

Кандидат:
Александер Буда Будимир

Нови Сад, 2025. године



UNIVERSITY IN NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES



The influence of nonlinearity of a machine tool with parallel kinematics on positioning accuracy parameters

DOCTORAL DISSERTATION

Mentor:
prof. dr. Slobodan Tabaković

Candidate:
Alexander Buda Budimir

Novi Sad, 2025.

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Александер Буда Будимир (Alexander Buda Budimir)
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Слободан Табаковић, редовни професор, Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука
Наслов рада:	Утицај нелинеарности машине алатке са паралелном кинематиком на параметре тачности позиционирања
Језик и писмо рада:	Српски језик, ћирилица
Физички опис рада:	Број: Страница: 277 Поглавља: 17 Референци: 158 Табела: 126 Слика: 126 Прилога: 3
Научна област:	Машинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Машине алатке
Кључне речи / предметна одредница:	машине алатке са нелинеарном кинематиком, раванско-паралелна кинематика, O-X glide механизам, тачност позиционирања, метода кретања, ISO 230-2:2014, мерна несигурност тачности позиционирања
Апстракт на језику рада:	Проучавање експлоатационих карактеристика машина алатки (МА) обухвата анализу њихових кинематских карактеристика и њихов утицај на понашање машина у производним условима. МА према кинематској структури се могу поделити на серијске и на паралелне механизме. МА са серијским механизмом карактерише отворена кинематска структура са линеарним кинематским ланцем, док је код МА са паралелним механизмом кинематски ланац затворен и садржи нелинеарне законитости између елемената. Уопштено гледано тачност машина алатки представља једну од основних експлоатационих карактеристика. Редовна провера тачности машине позитивно утиче на квалитет производње, али у исто време захтева доста времена. Због тога време извођења мерења у сврху проналажења евентуалних грешака на машинама негативно утиче на производњу у смислу да је потребно да се заустави машина и да се избаци из строја на неко време. У овом контексту поред тачности и време потребно за извођење експеримента је такође важна експлоатациона карактеристика. Ова докторска дисертација се бави утицајем нелинеарности МА са паралелном кинематиком на параметре тачности позиционирања. У

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају у институцији у штампаном и електронском облику и не коришће се са радом.

	стандарду ISO 230-2:2014 је дефинисан начин провере тачности позиционирања МА помоћу ласерског интерферометра и дата су основне математичке формулације за оцењивање стања машине. Недостатак стандарда је, да не предвиђа утицај нелинеарности на параметре добијене мерењима и постоји реална потреба да се утврди на који начин се манифестују кинематске разлике између серијских и паралелних механизма. Преглед литературе је указао на потребу да се изучи такође и утицај методе кретања (стратегије приступања мерним позицијама) при мерењима тачности позиционирања. Дефинисане су три врсте метода кретања и одређено је време потребно за извршење низа мерења по методама кретања. Мерења су вршена на једној раванско паралелној МА са O-X glide механизмом. Ова врста механизма је конструисана комбинацијом паралелног механизма која омогућава кретање платформе по Z и X оси и машинске структуре која омогућава транслаторно кретање по Y оси. Инверзним и директним кинематским једначинама је дефинисано кретање платформе у простору, које је нелинеарне природе. Дефинисан је коефицијент трансформације, који описује квантитативни утицај нелинеарности по Z координатама између платформе и клизача и који олакшава трансформацију грешака са платформе на клизаче. План експеримента је предвидео утицај нелинеарности и методе кретања као утицајне факторе на параметре тачности позиционирања. Посебно су посматрани резултати тачности позиционирања платформе и трансформисаних вредности на клизаче. Поред тачности позиционирања измерена је и правост МА са O-X glide механизмом. Дефинисани су сви фактори, који су од значаја за мерну несигурност система мерења са ласерским интерферометром. Са посебним освртом на утицај методе кретања на мерну несигурност изазвану утицајем околине. Поред тога анализа добијених резултата експеримента је указала на утицај трансформације грешке, са платформе на клизаче, на резултате мерне несигурности и на избор репрезентативне мерне тачке.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	18.07.2024.
Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Мијодраг Милошевић Члан: др Ђорђе Вукелић Члан: др Зоран Димић Члан: др Саша Живановић Члан, ментор: др Слободан Табаковић
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Budimir Alexander Buda
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	dr. Slobodan Tabaković, professor, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences
Thesis title in English:	The influence of nonlinearity of a machine tool with parallel kinematics on positioning accuracy parameters
Language and script:	Serbian, cyrilic
Physical description:	Number of: Pages: 277 Chapters: 17 References: 158 Tables: 126 Illustrations: 126 Appendices: 3
Scientific field:	Mechanical engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Machine tools
Subject, Key words:	machine tools with nonlinear kinematics, planar-parallel kinematics, O-X glide mechanism, positioning accuracy, movement methode, ISO 230-2:2014, measurement uncertainty of positioning accuracy
Abstract in English:	The study of the exploitation characteristics of machine tools (MT) includes the analysis of their kinematic characteristics and their influence on the behavior of machines in production conditions. Based on their kinematic structure, MT can be categorized into serial and parallel mechanisms. MT with serial mechanism are characterized by an open kinematic structure with a linear kinematic chain, while in MT with parallel mechanism the kinematic chain is closed and contains nonlinear relationships between the elements. Generally speaking, the accuracy of machine tools represents one of their fundamental operational characteristics. Regular accuracy verification positively impacts production quality, but at the same time, it requires significant time. Therefore, the time required to perform measurements aimed at identifying potential machine errors negatively affects production, as the machine needs to be stopped and taken out of operation temporarily. In this context, besides accuracy, the time required to perform an experiment is also an important operational factor.

² The author of the doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authorship,

5b – Statement that the printed and e-version of the doctoral dissertation are identical and authorization to use personal data,

5r – Copyright statement.

The paper and e-versions of Statements are held at the institution and are not included into the printed thesis.

	This doctoral dissertation deals with the influence of nonlinearity of MT with parallel kinematics on positioning accuracy parameters. The ISO 230-2:2014 standard defines the method for verifying the positioning accuracy of MTs using laser interferometry and provides the basic mathematical formulations for assessing the condition of the machine. A notable limitation of the standard is that it does not account for the influence of nonlinearity on measurement-derived parameters, and there is a clear need to determine how kinematic differences between serial and parallel mechanisms manifest. A review of the literature highlighted the need to also study the impact of movement methods (strategies for approaching measurement positions) on the measurement of positioning accuracy. Three types of movement methods were defined, and the time required to perform a series of measurements using each movement method was determined. The measurements were carried out on a planar parallel MT with an O-X glide mechanism. This type of mechanism is constructed from a combination of a parallel mechanism enabling platform movement along the Z and X axes, and a machine structure that allows translational movement along the Y axis. The platform's movement in space, which is of a nonlinear nature, was defined using inverse and direct kinematic equations. A transformation coefficient was defined to describe the quantitative influence of nonlinearity in the Z coordinates between the platform and the sliders, which facilitates the transformation of errors from the platform to the sliders. The experimental plan considered nonlinearity and movement method as influential factors on positioning accuracy parameters. Particular attention was given to the positioning accuracy results of the platform and the transformed values on the sliders. In addition to positioning accuracy, the straightness of the MT with the O-X glide mechanism was also measured. All relevant factors contributing to the measurement uncertainty of the laser interferometry system were defined, with special emphasis on the influence of movement method on measurement uncertainty caused by environmental factors. Furthermore, analysis of the experimental results pointed to the effect of error transformation from the platform to the sliders on the measurement uncertainty outcomes and on the selection of a representative measurement point.
Date of endorsement by the scientific board:	18.07.2024.
Date of defence: (Filled in by the institution)	
Thesis defence board: (title, first name, last name, position, institution)	Chair: dr. Mijodrag Milošević Member: dr. Đorđe Vukelić Member: dr. Zoran Dimić Member: dr. Saša Živanović Member (mentor): dr. Slobodan Tabaković
Note:	

Захвалница

Када се такмичар, односно шампион, са особиним трунке скромности, попне на подијум да преузме медаљу, трофеј или диплому за своје успехе са датог турнира, било то светско првенство или такмичење „богу иза ногу“, увек му код првог корака сине мисао о свим потешкоћама које је прошао да би постигао себи драгоцене циљеве. Након тога увек помисли колико је уживао у уложеном мукотрпном раду да би на крају побрао те медене плодове. Они, мало искуснији и бољи (не да себе увеличавам јер има још шта да се учи), поред свих својих мука и потешкоћа, сете се и људи, који су им помогли да све то превазиђу, и пошаљу им једно мисаоно хвала.

На сличан начин, али ипак на папиру како би траг захвалности остао вечан толико колико вечно овај рад може опстати, у првом и уједно последњем делу доктората желим изразити своју најдубљу захвалност особама, које су ми овај пут улепшале и учиниле подношљивијим, онима који су ме наоружали свим потребним знањем и умећем, и онима који су ме подржали иако не разумеју ни реч од онога што пишем.

Захвалио бих свом ментору, *проф. др Слободану Табаковићу*, који ми је пружио могућност за једну плодну сарадњу и дао све од себе да, наспрам свих недостатака које имам, постигнем свој циљ. Желим да му захвалим на свим саветима које ми је дао, на стрпљењу, на доброј вољи и на великодушности при дељењу свог стручног знања. Такође, желим да му захвалим за интересантне и дубоке разговоре о машинству и о науци уопштено.

Захваљујем члановима комисије за преглед и оцену докторске дисертације, *проф. др Саши Живановићу, проф. др Ђорђу Вукелићу, проф. др Мијодрагу Милошевићу, др Зорану Димићу* који су свим својим сугестијама, примедбама, саветима и смерницама у великој мери допринели да се квалитет докторске дисертације подигне на виши ниво.

Професору *др Милану Зељковићу* са Факултета техничких наука из Новог Сада који је својом стручношћу усмерио истраживања која су довела до израде ове докторске дисертације.

Департаману за производно машинство, Факултета техничких наука, Универзитета у Новом Саду, који је обезбедио потребан простор, сву неопходну инструментацију и опрему за извођење експеримената.

Свим осталим особама које су имале највећи утицај на развој моје инжењерске личности:

Они, илити *деди Ђула*, који је имао велики утицај на мене да постанем инжењер. Од малих ногу ме је учио техници, помогао је да заволим техничке науке, и показао ми како се лако могу покварити ствари, а колико их је тешко поправити.

Разредници, а уједно наставници математике, из средње школе *Бранки Кунић-Фаџан*, на незаборавној и универзалној променљивој „жњ“ и на принципима математике које је предавала и који ме прате од тренутка када сам први пут дошао на њен час.

Захваљујем свом ментору са основних и мастер студија, преминулом, **др Бели Чизмадиа**, и свом консултанту са тих студија **др Имреу Бано**, који су, поред инжењерског знања, успели да поделе са мном естетику, етику и филозофију повезану са инжењерством. Они су својим примером показали како може неко постати изврстан инжењер.

Свим особама блиским мом срцу:

Супрузи Дијани, која је пружила сву потребну емоционалну подршку да завршим свој посао и која је дала пуну подршку у нашем дому за овај успех. Кћерима **Лени и Дијани**, које нису дале да стално радим. Потребно је да се понекад и одморим и опустим.

Целој својој **породици, браћи, сестри и мајци** на једноставним и тривијалним питањима, као и неразумним погледима, који су помогли да се изразим једноставније и разумније, да видим ствари мало из друге перспективе.

А за крај, ономе без ког не бих имао довољно издржљивости да завршим овај пут:

Покојном Оцу Мирану, коме сам посебно захваљан, и желим да својим небеским очима види резултат најважније научене лекције мог живота коју ми је предао: „*Стисни зубе и удри! Не бој се, успећеш! Тако се рађају шампиони!*“

Захваљујем се **свима на које сам мислио док сам писао овај рад**, а који нису наведени.

Ова захвалница, да би била потпуна, мора да садржи и неколико речи на мађарском језику због особа које ће ме само тако разумети.

Annak érdekében, hogy ez a köszönetnyilvánítás teljes legyen és megértse mindenki, aki fontos volt számomra ezen az úton, milyen hatással voltak rám, egy pár magyar szó is el kell, hogy hangozzon feléjük. Kik nem értik eme doktori disszertáció eredeti nyelvezetét, legalább megérthetik mi érzelmeket bújttam el benne.

Köszönetemet szeretném kifejezni **Opának**, nagyapámnak, **Lenkei Gyulának**, aki már kisgyermek korom óta a műszaki gondolkodásmódot tanította, aki nagymértékben hozzájárult, hogy mérnök legyek, aki megszerettette velem a műszaki tudományokat és megmutatta, hogy milyen egyszerűen el lehet rontani dolgokat, de mennyire nehéz őket megjavítani. De meglehet!

Külön köszönetet szeretnék nyilvánítani Alma Materem béli mentoromnak megboldogult **prof. em. Dr. Csizmadia Bélának** és volt konzulensemnek **Dr. Bánó Imrének** akik a mérnöki tudáson túl példájukkal megmutatták mi is tesz egy mérnököt kiválóvá. Köszönöm nekik, hogy a műszaki értelmiségen kívül megosztották velem az esztétika, az etika, a filozófia és a művészet vonatkozásában is a mérnök emberek munkáját és életét, hogy kitágították látóteremet és esélyt adtak rá, hogy több legyek, mint egy egyszerű, mindennapi mérnök.

Köszönetet szeretnék nyilvánítani **családom** azon részének, akik csak magyarul értenek.

Köszönet **mindazoknak, akik eszembe jutottak, míg írtam ezt a művet**, de valami folytán nevük nem került lejegyzésre.

Александер Буда Будимир

Alexander Buda Budimir

Садржај

Кључна документацијска информација

Key words documentation

Захвалница

Списак ознака i

Списак слика..... iv

Списак табела ix

1.	Увод	1
1.1	Полазне хипотезе.....	3
1.2	Предмет и циљ истраживања	4
1.3	Композиција рада	5
2.	Грешке машина алатки.....	8
3.	Принцип мерења тачности позиционирања помоћу ласерског интерферометра	14
3.1	О ласерској интерферометрији	14
3.2	Методологије испитивања тачности машина алатки.....	21
3.3	Стандард ISO 230-2:2014.....	25
3.4	Стратегије кретања при заузимању мерних позиција	30
3.5	Мерни услови и оптимална поставка инструментације	32
4.	Принцип мерења правости помоћу ласерског интерферометра.....	35
5.	Одређивање мерне несигурности система ласерског интерферометра.....	40
5.1	Процена мерне несигурности параметара тачности позиционирања	50
5.2	Карактеристике коришћене мерне инструментације.....	51
6.	Приказ машина алатки са O-X glide механизмом	54
7.	Нелинеарност машина алатки.....	62
7.1	МА са паралелном и хибридном кинематиком	62
7.2	Утицај нелинеарности на рад машина алатки са паралелном кинематиком	64
7.3	Промењена кинематика O-X glide механизма са константним брзинама клизача.....	69
8.	Умиривање система током мерења тачности позиционирања линеарног померања.....	72
8.1	Теоријске основе и циљ	72
8.2	Процедура за одређивање времена умиривања.....	77

8.3	Извршени експерименти валидације.....	78
9.	Одређивање минималног времена заустављања при мерењу МА са O-X glide механизмом.....	83
10.	Провера правости МА са O-X glide механизмом.....	92
10.1	Одступање од правости X осе у правцу Y осе (EYX).....	94
10.2	Одступање од правости X осе у правцу Z осе (EZX).....	96
10.3	Одступање од правости Y осе у правцу X осе (EXY).....	98
10.4	Одступање од правости Y осе у правцу Z осе (EZY).....	100
10.5	Одступање од правости Z осе у правцу X осе (EXZ).....	102
10.6	Одступање од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ).....	104
11.	Провера утицаја околине на мерење са ласерским интерферометром	107
12.	Тачност позиционирања МАНК са O-X glide механизмом	111
12.1	План експеримента.....	111
12.1.1	Излазне перформансе.....	111
12.1.2	Управљани фактори и експериментална поставка	112
12.2	Тачност позиционирања X осе (EXX).....	113
12.3	Тачност позиционирања Y осе (EYY).....	121
12.4	Тачност позиционирања Z осе (EZZ)	128
12.4.1	Оригинална кинематска поставка O-X glide механизма	130
12.4.2	Кинематика при кретању клизача $v_{J0}=\text{const}$	136
12.4.3	Кинематика при кретању клизача $v_{J1}=\text{const}$	142
12.5	Тачност позиционирања клизача J_0 и J_1	148
13.	Утицај методе кретања и нелинеарности на параметре тачности позиционирања	150
13.1	Утицај методе кретања на поновљивост.....	150
13.1.1	Временски оквир посматрања утицаја промене околине.....	150
13.1.2	Одређивање одступања контролне позиције изазвана променом у околини	151
13.1.3	Природа понашања стандардне девијације по различитим методама кретања	157
13.2	Утицај нелинеарности и методе кретања на параметре тачности позиционирања	165
13.2.1	Платформа.....	167
13.2.2	Клизач J_0	171
13.2.3	Клизач J_1	177
13.3	Линеарна оса хибридног механизма	182
14.	Мерна несигурност тачности позиционирања O-X glide механизма	184
14.1	Мерна несигурност тачности позиционирања X осе.....	185

14.2	Мерна несигурност тачности позиционирања Y осе.....	186
14.3	Мерна несигурност тачности позиционирања Z осе	187
14.4	Мерна несигурност тачности позиционирања клизача	190
15.	Анализа добијених резултата	196
15.1	Време заустављања при мерењу	196
15.2	Правост. Зависност између правости и тачности позиционирања.....	197
15.3	Тачност позиционирања	198
15.4	Поновљивост	201
15.5	Линеарна оса паралелног механизма – X оса	202
15.6	ANOVA анализа	202
15.7	Мерна несигурност	203
16.	Закључци.....	209
17.	Литература.....	212
	Прилог А	223
	Прилог Б.....	264
	Прилог В.....	274
	Биографија	
	Изјаве	
	План третмана података	

Списак ознака

<i>ANOVA</i>	Analysis of variance (Анализа варијансе)
<i>CNC</i>	Computer Numerical Control (Рачунарски Нумерички Управљан)
<i>CMM</i>	Coordinate Measuring Machine (Координатни Мерни Систем)
<i>EDM</i>	Electrical Discharge Machining (Електро Ерозивна Обрада)
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization (Међународна Организација за Стандардизацију)
<i>MA</i>	Машина алатка
<i>МАНК</i>	Машина алатки са нелинеарном кинематиком
<i>МАЛК</i>	Машина алатки са линеарном кинематиком
<i>МПК</i>	МА са Паралелном Кинематиком
<i>NC</i>	Numerical Control (Нумерички Управљан)
<i>НУ</i>	Нумерички управљан
<i>NCG</i>	NC-Gesellschaft test part (НУ Тестни радни предмет)
<i>JISB</i>	Japanese Industrial Standards, B series (Јапански Индустијски Стандард, Б серија)
<i>VDI</i>	Verein Deutscher Ingenieure (Асоцијација Немачких Инжењера)
↑	Позиционирање при кретању у позитивном смеру осе
↓	Позиционирање при кретању у негативном смеру осе
α	Угао поларизације ласерског зрака
$\alpha_{J0,J1}$	Угао нагиба спојки
η_s	Време умиривања у зависности од позиције мерне осе
λ	Таласна дужина ласерског зрака
$A \uparrow, \downarrow$	Једносмерна грешка позиционирања по осе
A	Двосмерна грешка позиционирања по осе
B_i	Распон одступања средњих вредности у позицији „i“
B	Максимални распон одступања средњих вредности
$\bar{B}$	Средња вредност распона одступања
d	Растојање вођица клизача од Х осе

$E \uparrow, \downarrow$	Једносмерна систематска грешка позиционирања по оси
E	Двосмерна систематска грешка позиционирања по оси
E_{VE}	Грешка промене околине (енг. <i>enviromental variation error</i> или <i>drift</i>)
f_s	Фреквенција узорковања података
$I(L, \alpha)$	Интензитет ласерског зрака у зависности од промене растојања и угла поларизације
$K_{1,2}$	Коефицијент трансформације
$l_{1,2}$	Дужина спојки
M	Максимална двосмерна грешка позиционирања по оси
n_p	Број пожељне количине добијених вредности позиције
P_i	Мерна позиција
P_{ij}	Стварна позиција
P	Распон одступања позиционирања
P_a	Распон одступања централних вредности позиционирања
P_{smax}	Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања
P_{sj}	Распон одступања појединачних вредности позиционирања у позицији „j“
$p_{1,2}$	Параметар платформе
Q	Фактор сигурности
$R_i \uparrow, \downarrow$	Једносмерна поновљивост позиције по оси у позицији „i“
R_i	Двосмерна поновљивост позиције по оси у позицији „i“
$R \uparrow, \downarrow$	Једносмерна поновљивост позиције по оси
R	Максимална двосмерна поновљивост позиције по оси
$s_{1,2}$	Координате клизача по инверзним кинематским једначинама
$s_i \uparrow, \downarrow$	Стандардна девијација (поновљивост) измерених вредности у позицији "i" при позиционирању из позитивног односно негативног смера
$\bar{s}_j$	Средња вредност стандардне девијације у позицији „j“
T_m	Укупно време мерења
T_p	Минимално потребно време заустављања при мерењу
$\bar{U}$	Централна вредност распона одступања средњих вредности
U_j	Распон одступања средњих вредности у позицији „j“
U_{max}	Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања
u_p	Несигурност једне мерне позиције

u_d	Несигурност изазвана калибрацијом мерног инструмента
u_m	Несигурност изазвана паралелношћу мерног инструмента са осом машине алатки која се проверава
u_T	Мерна несигурност изазвана компензацијом температуре МА
u_{EVE}	Мерна несигурност изазвана променама у околини
u_S	Мерна несигурност изазвана поновљивошћу постављања мерног инструмента
u_{Tr}	Мерна несигурност трансформације
v_f	Брзина помоћног кретања (помак)
X_{ij}	Одступање од позиције
$\bar{x}_i$	Централна вредност одступања у позицији „i“
x_p	X координата платформе
$x_{R1,2}$	Референтна позиција клизача
y_p	Y координата платформе
z_p	Z координата платформе

Списак слика

Слика 1-1.	Шематски приказ развоја МА и појава нових технологија [1].....	3
Слика 2-1.	Објашњење грешке правости и угаоних грешака [26]	11
Слика 2-2.	Абеова грешка код мерног инструмента [30].....	12
Слика 2-3.	Два различита дизајна машина, а) са Абеовом грешком. б) са смањењем Абеове грешке	12
Слика 3-1.	Шематски приказ одређивања линеарног померања помоћу ласерског интерферометра која користи поларизацију за кодирање мерног и референтног ласерског зрака [39]	15
Слика 3-2.	Оптички компоненти хомодине фазне детекције [39].....	15
Слика 3-3.	Дијаграм интензитета He-Ne ласера у вакууму. Фреквенција и таласна дужина су према препорукама CIPM (International Committee for Weights and Measures. Међународни комитет за мере и тежине) [43]	17
Слика 3-4.	Земанова подела ортогонално поларизованог ласерског зрака	17
Слика 3-5.	Промена у таласној дужини ласера у зависности од притиска ваздуха на референтној 50% релативној влажности, при различитим температурама [53].....	18
Слика 3-6.	Промена у таласној дужини ласера у зависности од температуре ваздуха на референтној 50% релативној влажности, при различитим притисцима [53]	19
Слика 3-7.	Промена у таласној дужини ласера у зависности од релативне влажности ваздуха на референтном 1013,25 mbar притиску, при различитим температурама [53]	19
Слика 3-8.	Утицај компензације температуре, притиска и релативне влажности ваздуха на тачност мерења линеарног померања помоћу ласерског интерферометра [53].....	20
Слика 3-9.	Испитивање правости Y осе вертикалног обрадног центра, према стандарду ISO 10791-2 [13].....	22
Слика 3-10.	а) геометрија испитног радног предмета ISO 10791-7, б) геометрија NCG тестног радног предмета [13]	23
Слика 3-11.	Комплет Renishaw ballbar QC20 [67].....	24
Слика 3-12.	Пресек laserbar система за тест кружне интерполације [68].....	25
Слика 3-13.	Расподела резултата мерења у једној мерној позицији „j“	27
Слика 3-14.	Флуктуације измереног растојања ΔL у зависности од мерне дужине L [78].....	30
Слика 3-15.	Линеарна метода кретања [25]	30
Слика 3-16.	Метода клатна [5].....	31
Слика 3-17.	Метода ходочасника [16].....	32
Слика 3-18.	Слика направљена са термо камером у току рада кугличног завојног вретена [13].....	33
Слика 4-1.	Принцип мерења правости помоћу ласерског мерног система [79]	35
Слика 4-2.	Референтна права средње вредности [84].....	36

Слика 4-3.	Референтна права линија дефинисана методом најмањих квадрата [84]	37
Слика 4-4.	Референтна права линија дефинисана крајњим позицијама	37
Слика 5-1.	Одређивање нулте позиције мерења [53]	44
Слика 5-2.	Ласерска глава и ласерски показивач	52
Слика 5-3.	Даљински интерферометар и рефлектор	53
Слика 6-1.	а) X конфигурација механизма б) O конфигурација механизма [95]	54
Слика 6-2.	Кинематски модел механизма у а) X конфигурацији и у б) O конфигурацији [96]	55
Слика 6-3.	Вредности коефицијената трансформације у функцији координате платформе по Z осе	60
Слика 7-1.	Реализација програмиране путање платформе РПКМ-МОМА кретањем од чворне тачке до чворне тачке [138].....	65
Слика 8-1.	Аутоматска провера услова за аквизицију вредности позиције [16]	73
Слика 8-2.	Релативно повећање несигурности у једној мерној позицији.....	75
Слика 8-3.	Период и амплитуда у општем случају умиривања вибрационог система	76
Слика 8-4.	Грешка позиционирања при умиривању	78
Слика 8-5.	Грешка позиционирања при умиривању са умањеним бројем измерених вредности	79
Слика 8-6.	Употребљиви подаци приликом мерења грешке позиционирања	80
Слика 8-7.	Грешка позиционирања машине алатке FM38 при помаку од 1000 mm/min	81
Слика 8-8.	Грешка позиционирања машине алатке FM38 при помаку од 5000 mm/min	81
Слика 9-1.	Промена времена узорковања током провере умиривања X осе	83
Слика 9-2.	Промена времена узорковања током провере умиривања Y осе	84
Слика 9-3.	Промена времена узорковања током провере умиривања Z осе	84
Слика 9-4.	Промена фреквенције узорковања при провери тачности позиционирања Z осе методом кретања клатна	85
Слика 9-5.	Промена одступања у позиционирању током провере умиривања X осе	86
Слика 9-6.	Промена одступања у позиционирању током провере умиривања Y осе	86
Слика 9-7.	Промена одступања у позиционирању током провере умиривања Z осе.....	87
Слика 9-8.	Промена одступања у позиционирању за време умиривања X осе	87
Слика 9-9.	Промена одступања у позиционирању за време умиривања Z осе	88
Слика 9-10.	Промена одступања у позиционирању за време умиривања Y осе	88
Слика 10-1.	Поставка ласерске мерне инструментације за проверу одступања од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ)	92

Слика 10-2.	Поставка ласерске мерне инструментације за проверу одступања од правости X осе у правцу Y осе (EYX).....	93
Слика 10-3.	Поставка ласерске мерне инструментације за проверу одступања правости X осе у правцу Z осе (EZX)	93
Слика 10-4.	Дијаграм одступања од правости X осе у правцу Y осе (EYX).....	95
Слика 10-5.	Дијаграм одступања од правости X осе у правцу Z осе (EZX).....	97
Слика 10-6.	Дијаграм одступања од правости Y осе у правцу X осе (EXY).....	99
Слика 10-7.	Дијаграм одступања од правости Y осе у правцу Z осе (EZY).....	101
Слика 10-8.	Дијаграм одступања од правости Z осе у правцу X осе (EXZ).....	103
Слика 10-9.	Дијаграм одступања од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ).....	105
Слика 11-1.	Софтвер за проверу тачности позиционирања са прикљученом Arduino јединицом.....	107
Слика 11-2.	Arduino јединица са сензорима температуре и влажности ваздуха.....	108
Слика 11-3.	Промена очитане вредности растојања у функцији времена током мировања платформе по X оси због утицаја околине	108
Слика 11-4.	Промена очитане вредности растојања у функцији времена током мировања платформе по Y оси због утицаја околине	109
Слика 11-5.	Промена очитане вредности растојања у функцији времена током мировања платформе по Z оси због утицаја околине.....	109
Слика 12-1.	Постављена мерна опрема за проверу тачности позиционирања X осе.....	113
Слика 12-2.	Ретрорефлектор и интерферометар у нултој позицији мерења током провере X осе.....	114
Слика 12-3.	Механизам са мерном оптиком током провере X осе	114
Слика 12-4.	Тачност позиционирања X осе линеарном методом кретања (EXX).....	116
Слика 12-5.	Тачност позиционирања X осе методом кретања ходочасника (EXX).....	118
Слика 12-6.	Тачност позиционирања X осе методом кретања клатна (EXX)	120
Слика 12-7.	Поставка мерне инструментације за проверу тачности позиционирања Y осе (EYY).....	121
Слика 12-8.	Тачност позиционирања Y осе линеарном методом кретања (EYY).....	123
Слика 12-9.	Тачност позиционирања Y осе методом кретања ходочасника (EYY).....	125
Слика 12-10.	Тачност позиционирања Y осе методом кретања клатна (EYY)	127
Слика 12-11.	Поставка мерних оптичких компоненти за проверу тачности позиционирања Z осе (EZZ)	128
Слика 12-12.	Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања оригиналне кинематике (EZZ)	131
Слика 12-13.	Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника оригиналне кинематике (EZZ)	133
Слика 12-14.	Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна оригиналне кинематике (EZZ)	135
Слика 12-15.	Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања $v_{j0}=\text{const.}$ кинематике (EZZ).....	137

Слика 12-16.	Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника $v_{J0}=\text{const.}$ кинематике (EZZ).....	139
Слика 12-17.	Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна $v_{J0}=\text{const.}$ кинематике (EZZ).....	141
Слика 12-18.	Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања $v_{J1}=\text{const.}$ кинематике (EZZ).....	143
Слика 12-19.	Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника $v_{J1}=\text{const.}$ кинематике (EZZ).....	145
Слика 12-20.	Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна $v_{J1}=\text{const.}$ кинематике (EZZ).....	147
Слика 12-21.	Тачност позиционирања клизача J_0 у 1. експерименталној поставци	149
Слика 12-22.	Тачност позиционирања клизача J_1 у 1. експерименталној поставци	149
Слика 13-1.	Приказ микро и макро циклуса кретања платформе при методи ходочасника (дорађено [16])	151
Слика 13-2.	Линеарна регресија утицаја околине на Z осу.....	152
Слика 13-3.	Полиномијална регресија утицаја околине на X осу	153
Слика 13-4.	Утицај околине на X осу у дискретним временским оквирима за методу клатна	153
Слика 13-5.	Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код X осе за методу клатна	154
Слика 13-6.	Утицај околине на X осу у дискретним временским оквирима за методу ходочасника.....	154
Слика 13-7.	Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код X осе за методу ходочасника	154
Слика 13-8.	Полиномијална регресија утицаја околине на Y осу	155
Слика 13-9.	Утицај околине на Y осу у дискретним временским оквирима за методу клатна	155
Слика 13-10.	Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код Y осе за методу клатна	156
Слика 13-11.	Утицај околине на Y осу у дискретним временским оквирима за методу ходочасника.....	156
Слика 13-12.	Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код Y осе за методу ходочасника	156
Слика 13-13.	Промена стандардне девијације по мерним позицијама X осе у позитивном смеру	158
Слика 13-14.	Централна вредност стандардне девијације дуж X осе у позитивном смеру померања по методама кретања	158
Слика 13-15.	Промена стандардне девијације по мерним позицијама X осе у негативном смеру	158
Слика 13-16.	Централна вредност стандардне девијације дуж X осе у негативном смеру померања по методама кретања.....	159
Слика 13-17.	Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама X осе	159

Слика 13-18.	Централна вредност средње девијације дуж X осе бидирекционог позиционирања по методама кретања.....	160
Слика 13-19.	Промена стандардне девијације по мерним позицијама Y осе у позитивном смеру	160
Слика 13-20.	Централна вредност стандардне девијације дуж Y осе у позитивном смеру померања по методама кретања	161
Слика 13-21.	Промена стандардне девијације по мерним позицијама Y осе у негативном смеру	161
Слика 13-22.	Централна вредност стандардне девијације дуж Y осе у негативном смеру померања по методама кретања.....	161
Слика 13-23.	Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама Y осе	162
Слика 13-24.	Централна вредност средње девијације дуж Y осе бидирекционог позиционирања по методама кретања.....	162
Слика 13-25.	Промена стандардне девијације по мерним позицијама Z осе у позитивном смеру	163
Слика 13-26.	Централна вредност стандардне девијације дуж Z осе у позитивном смеру померања по методама кретања	163
Слика 13-27.	Промена стандардне девијације по мерним позицијама Z осе у негативном смеру	164
Слика 13-28.	Централна вредност стандардне девијације дуж Z осе у негативном смеру померања по методама кретања.....	164
Слика 13-29.	Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама Z осе.....	164
Слика 13-30.	Централна вредност средње девијације дуж Z осе бидирекционог позиционирања по методама кретања.....	165
Слика 13-31.	Упоредивање параметара тачности позиционирања између X осе и клизаче J_0 и J_1	183
Слика 14-1.	Сензор температуре монтиран на мотор клизача J_0	188
Слика 14-2.	Промена кориговане несигурности утицаја температуре	189
Слика 14-3.	Несигурност трансформације клизача J_0 по различитим мерним позицијама	192
Слика 14-4.	Несигурност трансформације клизача J_1 по различитим мерним позицијама	192
Слика 14-5.	Вредности различитих типова несигурности по мерним позицијама провере тачности позиционирања Z осе и трансформације вредности на клизач J_0	193
Слика 14-6.	Несигурност параметара тачности позиционирања B, M, E и A клизача J_0 за линеарну методу кретања.....	194
Слика 15-1.	Промена двосмерне поновљивости позиције R_i дуж мерне осе посебно за платформу и клизаче.....	200
Слика 15-2.	Промена распона одступања дуж Z осе за платформу и за клизаче.....	200

Списак табела

Табела 2-1.	Шира класификација грешака [22]	8
Табела 2-2.	Систематске и случајне грешке машине алатки [22].....	9
Табела 5-1.	Вредности апроксимације за одређивање несигурности изазваним нултом позицијом мерења [53].....	45
Табела 5-2.	Просечна фреквенција узорковања	52
Табела 6-1.	Геометријске параметре за одређивање кинематских једначина O-X glide механизма.....	55
Табела 8-1.	Несигурности из примера стандарда ISO 230-9:2005.....	74
Табела 8-2.	Повећање несигурности у мерној позицији због грешке обраде података.....	75
Табела 8-3.	Гранична вредност несигурности грешке обраде података	75
Табела 8-4.	Статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању	78
Табела 8-5.	Статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању смањених са 7 узорака измерених вредности	79
Табела 8-6.	Подаци за одређивање времена умиривања код приказаног експеримента	79
Табела 8-7.	Статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању код подобних вредности	80
Табела 9-1.	Времена и фреквенције узорковања током провере времена умиривања по осама.....	84
Табела 9-2.	Одређивање времена умиривања вибрације после заустављања кретања по X оси	89
Табела 9-3.	Одређивање времена умиривања вибрације после заустављања кретања по Y оси	89
Табела 9-4.	Одређивање времена умиривања вибрације после заустављања кретања по Z оси.....	89
Табела 9-5.	Минимална времена заустављања по мерним осама.....	90
Табела 9-6.	Репрезентативни параметри за одређивање укупног потребног времена мерења тачности позиционирања	90
Табела 9-7.	Упоредни подаци потребног времена мерења тачности позиционирања репрезентативних метода кретања	91
Табела 10-1.	Вредности добијене током провере одступања од правости X осе у правцу Y осе по свим мерним позицијама (EYX)	94
Табела 10-2.	Одступање од правости X осе у правцу Y осе (EYX).....	95
Табела 10-3.	Вредности добијене током провере одступања од правости X осе у правцу Z осе по свим мерним позицијама (EZX)	96
Табела 10-4.	Одступање од правости X осе у правцу Z осе (EZX).....	97
Табела 10-5.	Вредности добијене током провере одступања од правости Y осе у правцу X осе по свим мерним позицијама (EXY)	98
Табела 10-6.	Одступање од правости Y осе у правцу X осе (EXY).....	99
Табела 10-7.	Вредности добијене током провере одступања од правости Y осе у правцу Z осе по свим мерним позицијама (EZY)	100

Табела 10-8.	Одступање од правости Y осе у правцу Z осе (EZY).....	101
Табела 10-9.	Вредности добијене током провере одступања од правости Z осе у правцу X осе по свим мерним позицијама (EXZ).....	102
Табела 10-10.	Одступање од правости Z осе у правцу X осе (EXZ).....	103
Табела 10-11.	Вредности добијене током провере одступања од правости Z осе у правцу Y осе по свим мерним позицијама (EYZ).....	104
Табела 10-12.	Одступање од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ).....	105
Табела 10-13.	Одступање од правости по свим осама и свим правцима	106
Табела 11-1.	Вредности E_{VE} за осе X, Y и Z са одговарајућим временским оквирима мерења.....	110
Табела 12-1.	Ниво фактора посматраних током експеримената.....	112
Табела 12-2.	Списак експерименталних поставки са одговарајућим нивоима фактора	113
Табела 12-3.	Координате мерних позиција за провере тачности позиционирања X осе.....	114
Табела 12-4.	Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања X осе.....	115
Табела 12-5.	Параметри тачности позиционирања X осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања.....	115
Табела 12-6.	Параметри тачности позиционирања X осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања.....	116
Табела 12-7.	Параметри тачности позиционирања X осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника.....	117
Табела 12-8.	Параметри тачности позиционирања X осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника.....	118
Табела 12-9.	Параметри тачности позиционирања X осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна.....	119
Табела 12-10.	Параметри тачности позиционирања X осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна.....	120
Табела 12-11.	Координате мерних позиција за проверу тачности позиционирања Y осе.....	121
Табела 12-12.	Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Y осе.....	121
Табела 12-13.	Параметри тачности позиционирања Y осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања.....	122
Табела 12-14.	Параметри тачности позиционирања Y осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања.....	123
Табела 12-15.	Параметри тачности позиционирања Y осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника.....	124
Табела 12-16.	Параметри тачности позиционирања Y осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника.....	125
Табела 12-17.	Параметри тачности позиционирања Y осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна.....	126
Табела 12-18.	Параметри тачности позиционирања Y осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна.....	127
Табела 12-19.	Координате мерних позиција за проверу тачности позиционирања Z осе	128

Табела 12-20.	Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Z осе оригиналне кинематске поставке.....	128
Табела 12-21.	Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Z осе $v_{j0}=\text{const.}$ кинематике	129
Табела 12-22.	Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Z осе $v_{j1}=\text{const.}$ кинематике	129
Табела 12-23.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијених 1. експерименталном поставком	130
Табела 12-24.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијених 1. експерименталном поставком	131
Табела 12-25.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијених 4. експерименталном поставком	132
Табела 12-26.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 4. експерименталном поставком	133
Табела 12-27.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком	134
Табела 12-28.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком	135
Табела 12-29.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком	136
Табела 12-30.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком	137
Табела 12-31.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком	138
Табела 12-32.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком	139
Табела 12-33.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком	140
Табела 12-34.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком	141
Табела 12-35.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком	142

Табела 12-36.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком.....	143
Табела 12-37.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 6. експерименталном поставком.....	144
Табела 12-38.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 6. експерименталном поставком.....	145
Табела 12-39.	Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком	146
Табела 12-40.	Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком	147
Табела 12-41.	Вредности коефицијента трансформације клизача по мерним позицијама провере тачности позиционирања Z осе.....	148
Табела 13-1.	Вредности временског оквира за одређивање E_{VE} по осама X, Y и Z	152
Табела 13-2.	Кориговане вредности утицаја промене околине у зависности методе кретања по свакој мерној оси	157
Табела 13-3.	Кориговане вредности мерне несигурности изазвана променама у околини.....	157
Табела 13-4.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ платформе при кретању по Z оси од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	168
Табела 13-5.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ платформе при кретању по Z оси од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	168
Табела 13-6.	ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ платформе при кретању по Z оси од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	169
Табела 13-7.	ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ платформе при кретању по Z оси од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	169
Табела 13-8.	Угао нагиба спојки по мерним позицијама	170
Табела 13-9.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230:2-2014 при кретању платформе по Z оси, исказан кроз утицај фактора на резултате	170
Табела 13-10.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 при кретању платформе по Z оси, исказан кроз утицај фактора на резултате	171
Табела 13-11.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_0 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	172
Табела 13-12.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_0 од 5. до 7. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	172

Табела 13-13.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_0 од 8. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	173
Табела 13-14.	ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_0 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	173
Табела 13-15.	ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_0 од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	174
Табела 13-16.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_0 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 1. део.....	175
Табела 13-17.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_0 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 2. део.....	175
Табела 13-18.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 за клизач J_0 , исказан кроз утицај фактора на резултате	176
Табела 13-19.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_1 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	177
Табела 13-20.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_1 од 5. до 7. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	177
Табела 13-21.	ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_1 од 8. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	178
Табела 13-22.	ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_1 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	179
Табела 13-23.	ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_1 од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате	179
Табела 13-24.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_1 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 1. део.....	180
Табела 13-25.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_1 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 2. део.....	181
Табела 13-26.	ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 за клизач J_1 , исказан кроз утицај фактора на резултате	181
Табела 14-1.	Непроменљиви фактори за одређивање различитих несигурности мерења.....	184
Табела 14-2.	Вредности мерне несигурности у једној позицији по врстама несигурности за X осу.....	185
Табела 14-3.	Вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања по врстама несигурности за X осу	185
Табела 14-4.	Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости код X осе за линеарну методу кретања	186

Табела 14-5.	Вредности мерне несигурности у једној позицији по врстама несигурности за Y осу.....	186
Табела 14-6.	Вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања по врстама несигурности за Y осу	187
Табела 14-7.	Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости код Y осе за методу кретања клатна.....	187
Табела 14-8.	Корекција несигурности $u_{E,MT}$, $u_{M,MT}$ због нелинеарности O-X glide механизма за Z осу линеарном методом кретања за оба клизача.....	188
Табела 14-9.	Вредности мерне несигурности у репрезентативној позицији по врстама несигурности за кретање платформе по Z осе.....	189
Табела 14-10.	Вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања по врстама несигурности за платформу Z осе по методама кретања.....	189
Табела 14-11.	Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости за платформу при кретању по Z осе за линеарну методу кретања	190
Табела 14-12.	Вредности парцијалних извода коефицијента трансформације клизача J_0	191
Табела 14-13.	Вредности парцијалних извода коефицијента трансформације клизача J_1	191
Табела 14-14.	Фактори за одређивање несигурности трансформације.....	191
Табела 14-15.	Несигурност параметара тачности позиционирања R клизача J_0 за линеарну методу кретања.....	194
Табела 14-16.	Вредности несигурности параметара тачности позиционирања клизача J_1	194
Табела 15-1.	Параметри тачности позиционирања X осе са мерним несигурностима	204
Табела 15-2.	Параметри поновљивости позиције X осе са мерним несигурностима по методама кретања	204
Табела 15-3.	Параметри тачности позиционирања Y осе са мерним несигурностима	205
Табела 15-4.	Параметри поновљивости позиције Y осе са мерним несигурностима по методама кретања	205
Табела 15-5.	Параметри тачности позиционирања платформе по Z осе са мерним несигурностима	206
Табела 15-6.	Параметри поновљивости позиције платформе при кретању по Z осе са мерним несигурностима по методама кретања	206
Табела 15-7.	Параметри тачности позиционирања клизача J_0 са мерним несигурностима	207
Табела 15-8.	Параметри тачности позиционирања клизача J_1 са мерним несигурностима	207
Табела 15-9.	Параметри поновљивости позиције клизача J_0 са мерним несигурностима по методама кретања	207
Табела 15-10.	Параметри поновљивости позиције клизача J_1 са мерним несигурностима по методама кретања	208

1. поглавље

Увод

Претечом модерних машина алатки сматрају се механизми и резни алати, конструисани у старом Египту 3000 година п.н.е., које су користили за бушење рупа у дрвету и у каменим стенама. Након њих, стари Грци и Римљани развили су механичке системе који су служили као пресе, млинови на водени погон, као и стругови за резање навоја.

Први стругови за производњу вијака и за поправку сатова појавили су се током 15. века. Све до 18. века развој стругова је стагнирао, првенствено јер су коришћени за производњу декоративних елемената од дрвета. Током 18. века, у Великој Британији стекли су се услови за њихов даљи развој, првенствено због почетка индустријске производње и захтева за новим видовима производње. Енглески механичар, Хенри Моудслиј, 1797. године направио је струг који се сматра претечом данашњих стругова. У конструкцији Моудслијевог струга коришћен је челик, као иновативни материјал, пошто су до тада машине сличног типа прављене од дрвета. Значајан напредак је био развој струга за копирање, којег је дизајнирао Т. Бланкард 1818. године. Један је од најважнијих корака у развоју масовне производње [1].

Почетком I. индустријске револуције појавила се потреба за ефикаснијим и прецизнијим машинама, које су могле задовољити растуће захтеве привреде и друштва. Захтеви модерног друштва и појаве тржишта производа повећали су се и проширили потребу за производњом у односу на оне од пре пар стотина година. Сталан раст резултирао је развојем индустрије чији је фокус био већи обим производње, шири спектар производа и повећана тачност. Целокупан процес је пратио и развој, и производњу машина алатки (МА) као основног покретача индустријске производње. Развој МА у 19. веку махом се одвијао у Великој Британији, у индустријски најразвијенијој држави тадашњег света, а почетком 20. века вођство су преузеле Сједињене Америчке Државе, и то појавом масовне производње, пре свега у аутомобилској индустрији [2].

Електрификација је значајно утицала на развој МА. Машине на моторни погон су преовладале машине на парни погон. Машине алатке са индивидуалним моторним погоном су заменили старије системе [3]. Промена је позитивно утицала на безбедност на раду, на одржавање производних машина и на ефикасност експлоатације. Према Шан [4], увођење електричних погона је такође утицало и на хабање алата. Доказали су да термоелектрични потенцијали током обраде имају утицаја на хабање у зависности од електричних карактеристика МА.

Развој нумеричког управљања у индустрији је имао великог утицаја на МА. Прва МА са нумеричким управљањем (НУ) појавила се 1952. године у Америци. Следила је масовна појава других произвођача, и на сајму у Чикагу 1960. године изложено је чак 80 НУМА [1]. У периоду од 1950. до 1990. могу се разликовати три таласа развоја управљања МА. Први талас је покренут појавом нумеричког управљања, а почетком другог таласа сматра се почетак примене микропроцесора и тзв. микрорачунара у индустрији, док се почетак трећег таласа може везати за појаву персоналног рачунара или РС. Таласи су имали свој

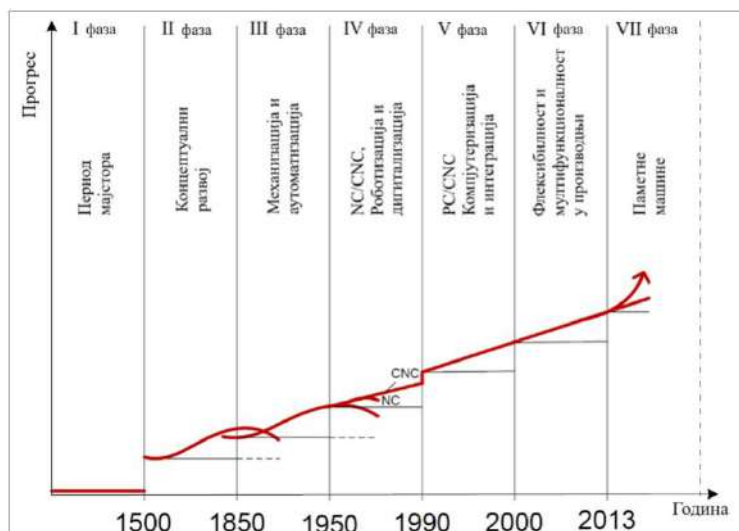
меродаван утицај на даљи развој машина алатки, и сви су повећали степен аутоматизације и дигитализације производње.

Развојем интернета започео је нови циклус у развоју МА. Крај 1990-их и почетак 2000-их окарактерисан је великим променама у развоју МА. Појавом нових индустријских сила (Јапан, Кореја, Кина и Тајван) променили су се учесници на тржишту. Појавиле су се ултрамодерне технологије, које захтевају тачност и поновљивост у областима мерења мањим од једног микрометра. Оптимизација и развој производње омогућили су производњу висококвалитетних производа. Започета је серија иновација у структури МА. Део иновација односио се на структуру МА. Традиционално МА са серијском кинематиком поседују отворени кинематски ланац механичке структуре. На основу тада већ познатог хексапод механизма, појавиле су се МА са паралелном и хибридном кинематиком. Разлог за њихову појаву лежи у великом теоретском динамичком потенцијалу, структуралној крутости и високој прецизности која настаје због затворене кинематске структуре. Њихова необична структура, комплексна кинематика и недостатак стандардизације ограничавајући су фактори који су утицали на спорије прихватање у индустрији. Успешно су се могле позиционирати оне машине које решавају неки специфичан проблем (уско грло) у примени серијских машина алатки [5]. Истраживања МА са паралелним механизмима су се, између осталог, фокусирали на решавање кинематских једначина појединих типова конструкција. Резултат анализа геометријског места тачака доступних извршном органу машине, тј. радни простор, скуп је тачака неправилног геометријског облика, који је последица нелинеарних једначина кинематике. Овакве машине се називају и МА са нелинеарном кинематиком [6].

Према [7], на основу испитивања великог броја експерата из сегмента развоја МА и водећих личности из индустрије, главни правци развоја МА очекују се у:

- Интелигентној производњи преласком из концепције дефинисане стратегијом Индустрија 4.0 у новију Индустрију 5.0;
- Развоју управљачких јединица и омогућавање већег броја фактора за калибрацију МА;
- Дијагностици грешака из базе података помоћу *cloud* технологије;
- Развоју носеће и механичке структуре МА помоћу тополошке оптимизације машине у циљу добијања оптималне крутости и смањење масе машине. Овај правац развоја даје велики простор паралелним механизмима.

На слици 1-1. је приказан шематски развој МА према [1]. Наглашен је прогрес развоја појавом нових технологија и карактеристика МА. Развој МА подељен је у седам фаза.



Слика 1-1. Шематски приказ развоја МА и појава нових технологија [1]

Поред структуре временом се повећала и тачност МА. Покретачи овог развоја су биле разне индустријске гране и специфична поља производње са истакнутим напретком током времена. Рани напредак достигнут је превазилажењем физичких граница кроз адаптивно управљање [8]. Како су се захтеви повећали, појавиле су се технике компензације грешака помоћу којих су се периодичне грешке МА могле ефикасно смањити [9]. Специјалне гране индустрије, као што су авио-индустрија, производња механизма за сатове, производња микроелектронике, војна индустрија заједно са научно-истраживачким гранама као што је астрономија и оптика, имају веома ригорозне захтеве у погледу тачности, што је допринело појави ултрапрецизних компоненти [10].

Први стандарди са дефинисаним препорукама за димензионисање делова и склопова, као и толеранције којима се регулише тачност машина појавили су се пре око 85 година у виду разних националних и компанијских препорука. Служиле су за комуникацију, међу инжењерима, о геометријским варијацијама које се могу толерисати код производа без угрожавања првобитне функције производа. Временом су препоруке прихваћене у виду стандарда на националном нивоу, а касније су међународно усаглашене. Стандарди су у дужем периоду писани на основу добре инжењерске праксе, без научне потврде. Појавом рачунарских технологија, 1980-их, дошло је до преиспитивања дотадашњих прописа и математички формализам је добио на важности [11]. Данас је ISO (Међународна организација за стандардизацију) најпопуларније и најраспрострањеније тело за стандардизацију у свету.

1.1 Полазне хипотезе

Постављање полазних хипотеза круцијални је део сваког научно-истраживачког рада који подразумева мисаони поступак, који следи након утврђивања одређених чињеница или продубљења сазнања о тим чињеницама. Хипотезом се поставља предвиђање које се научним радом може проверити или се њиме може одредити његова корисност. У науци хипотеза означава неки теоријски став или закључак са одређеним степеном вероватноће [12].

На основу анализе литературе и извршених експерименталних анализа, могу се дефинисати следеће полазне хипотезе:

- Код машина алатки са нелинеарном кинематиком (МАНК) јављају се грешке које су последица различитих кинематских и конструкционих утицаја, што је резултирало великим бројем истраживања на ту тему. Новије методе испитивања запреминске тачности подразумевају примену још нестандардизованих метода испитивања као и специјализовану опрему која је у већини случајева недоступна произвођачима и корисницима машина. Све указује на потребу прилагођавања постојеће методологије коју дефинише стандард ISO 230-2:2014. Хипотеза ће се потврдити низом експеримената, при којима ће се једна специфична раванско-паралелна МА довести у кинематски слично стање оном са серијском кинематиком.
- Нелинеарна кинематика машина алатки са паралелним механизмом повећава мерну несигурност провере тачности машина алатке. Хипотеза ће се потврдити математичком анализом несигурности и њеном адаптацијом у већ постојећи опсег несигурности код машина алатки са серијском кинематиком.
- Параметар метода кретања при провери тачности позиционирања има значајан утицај на параметре тачности позиционирања МА са серијском кинематиком. Због специфичне и променљиве кинематике МАНК, претпоставка је да методе кретања такође имају значајан утицај на проверу тачности позиционирања. Хипотеза ће се проверити експериментално на једној машини алатки са нелинеарном кинематиком.
- Математичке методе које се користе за статистичку евалуацију резултата мерења тачности позиционирања при линеарном кретању извршног органа машине према стандарду се могу примењивати за оцењивање МАНК. Хипотеза се потврђује применом извођења низа провера тачности позиционирања према процедури из стандарда ISO 230-2:2014.

1.2 Предмет и циљ истраживања

Основни циљ истраживања, које се планира у оквиру докторске дисертације, јесте да се утврде и дефинишу параметри, који код МАНК могу утицати на резултате мерења тачности позиционирања. На основу теоријске припреме, извршених мерења и анализе резултата, истраживањем су дефинисане неопходне допуне методологије испитивања и обраде резултата, у складу са поставкама стандарда.

Међу параметрима, који имају утицај на мерење, велики значај има време заустављања кретања мерне осе машине у одређеној мерној позицији. Параметар није прецизно дефинисан постојећим стандардима, иако значајно утиче на процес мерења због динамичких процеса који се јављају приликом заустављања при циклусима мерења различитим брзинама. Циљ дела истраживања је да се утврди процедура одређивања времена заустављања и да се изврши оптимизација у циљу смањења укупног времена мерења уз минималну мерну несигурност узроковану поменутих параметром, што има директан утицај на ефикасност и економичност мерења, и корисницима МА ствара додатне трошкове због застоја производње. Тиме се омогућава проширење примене постојеће методологије за различите брзине и методе кретања што је нарочито значајно код савремених машина алатки које имају изразито велике или изразито мале брзине помоћног кретања.

У важне циљеве дисертације спада и утврђивање које се односи на то да ли метод кретања при мерењу има значајан утицај на параметре провере тачности позиционирања

према стандарду ISO 230-2:2014, као што је то случај и код МА са серијском кинематиком. Фактор има значајан утицај на дужину испитивања, као и на статистичке параметре резултата мерења (број, редослед и сл.).

1.3 Композиција рада

После дефинисања полазних хипотеза, предмета и циља истраживања, у другом поглављу представља се шира слика целокупне проблематике грешака машина алатки (МА) са освртом на поделу и на узроке тих грешака. Помоћу ласерске интерферометрије може се детектовати велики број геометријских грешака на МА. Принципи испитивања приликом провере тачности позиционирања ласерским интерферометром, постојећи стандарди који регулишу начин извршења мерења, и принципи нумеричке анализе измерених података представљени су у трећем поглављу. Ту се дефинишу показатељи, који описују стање машине и параметри који ће се експериментално истражити у контексту нелинеарности, о чему ће се касније опширније писати. Такође, у овом поглављу се наводе и стратегије кретања при мерењима, који су један од управљаних фактора експеримента, као и мерни услови при којим мерења треба да се врше. Поред тачности позиционирања, и правост осе машине представља важну карактеристику. Испитивањем правости осе бави се четврто поглавље, где су дефинисане све математичке везе потребне за израчунавање правости осе машине у правцу појединих оса у складу са стандардима и научном литературом.

У петом поглављу опширно се разматра проблематика мерне несигурности и уводе се сви фактори, коју су од значаја за тачност мерења ласерским интерферометром. Процена мерне несигурности параметара стандарда ISO 230-2:2014 важан је део поменутог поглавља. У поглављу се представља мерна инструментација са свим карактеристикама које су од значаја. Ту се дефинишу све једначине из којих се израчунава мерна несигурност.

У шестом поглављу представљена је МА са O-X *glide* механизмом. Сви експерименти ће се вршити на поменутој машини. Дефинисана је инверзна и директна кинематика, Јакобијан матрица и коефицијент трансформације за поменуту МА. Седмо поглавље обрађује теоријске основе и преглед литературе у вези са нелинеарности МА. Дефинише се математичка веза између грешке позиционирања платформе и грешке позиционирања клизача. Такође се уводи мерна несигурност настала због ове трансформације и даје се теоријска основа за његово израчунавање. У овом поглављу се дефинише и кинематика O-X *glide* механизма, која омогућује кретање платформе по Z оси уз услов да се један од клизача креће константном брзином, што је неопходно за извршење планираног експеримента и да се докаже утицај нелинеарности на параметре тачности позиционирања.

Проблематика умиривања система током заустављања приликом мерења тачности је обрађена у осмом поглављу. Ту су анализиране и теоријске основе за одређивање минималног времена заустављања током мерења и дефинисана је процедура која се треба применити у експериментима. Кроз одговарајући пример расправљало се о утицају времена заустављања на резултате очитаних вредности одступања од позиције. У деветом поглављу су приказане конкретне вредности времена заустављања на основу извршених мерења у складу са претходно дефинисаном процедуром.

Десето поглавље се бави провером правости појединих оса. Приказани су резултати за све три осе и свака оса има два ортогонална правца. Приликом испитивања обрађено је укупно шест показатеља. Један од фактора, који утичу на мерну несигурност током провере тачности позиционирања са ласерским интерферометром, јесте утицај околине.

У поглављу једанаест су приказани резултати провере утицаја околине на мерну несигурност.

Дванаесто поглавље обрађује проблематику мерења тачности позиционирања. У посебној целини, унутар овог поглавља, расправља се о експерименталним поставкама, о утицајним факторима и посматраним параметрима. Опширно је представљен план експеримента. Посебно су анализирани резултати добијени провером тачности позиционирања X, Y и Z осе. Посебну потцелину чине мерења по Z оси у свим експерименталним поставкама и подаци о тачности позиционирања клизача после трансформације.

Утицај методе кретања и нелинеарности на параметре тачности позиционирања доказује се у тринаестом поглављу. За статистичку анализу експеримента коришћена је ANOVA анализа. На почетку поглавља се расправља о утицају методе кретања на поновљивост мерења тачности позиционирања и формирају се закључци у вези са начином одабира временског оквира за одређивање утицаја околине на мерну несигурност. У даљем делу поглавља утицај нелинеарности и метода кретања је анализиран посебно за платформу и клизаче. Посебну целину чини и анализа X осе, која је такозвана линеарна оса паралелног механизма машине. У четрнаестом поглављу се дефинишу вредности мерне несигурности. Одређивање мерне несигурности X и Y осе није захтевало посебну пажњу и извршено је у складу са процедуром дефинисаном у петом поглављу и у складу са стандардом ISO 230-2:2014. Избор репрезентативне позиције за исказивање мерне несигурности Z осе и клизача због нелинеарне природе механизма MA је био посебно разматран и одређене измене су донете у односу на претходно поменути стандард.

У дискусији, у петнаестом поглављу, интерпретирани су добијени резултати експеримента изведеног у оквиру докторске дисертације. Анализирано је време заустављања при мерењу, правост и повезаност између правости и тачности позиционирања код MA са нелинеарном кинематиком, тачност позиционирања појединих оса и поновљивост тачности позиционирања. Интерпретирани су резултати статистичке анализе извршеног експеримента. Направљен је осврт на вредност параметара тачности позиционирања свих оса и клизача са додељеним вредностима мерне несигурности.

Закључци су изнети у шеснаестом поглављу. Образложен је научни допринос докторске дисертације научној и истраживачкој области машина алатки. У оквиру закључка су, према резултатима досадашњег истраживачког рада, дефинисани планови предстојећих истраживања за које постоји и оправданост, и добра основа, а са циљем да се у континуитету настави са научно-истраживачким радом, чиме би се и убудуће давао научни допринос развоју машина алатки са паралелном кинематиком.

На крају докторске дисертације се налазе прилози који садрже табеле и дијаграме, који су неодојиви део дисертације. У прилог А су смештене табеле које садрже податке о добијеним параметрима за сваку експерименталну поставку, дијаграми тачности позиционирања који су формирани у складу са стандардом ISO 230-2:2014 и дијаграми промене стандардне девијације и средње девијације дуж мерних оса. У прилог Б су

табеле, које садрже вредности посматраних параметара по свим експерименталним поставкама за оба клизача. У прилогу В се налазе табеле мерне несигурности тачности позиционирања. Због обимности и прегледности није било оправдано да се све табеле и дијаграми, из претходно наведених прилога, наведу у текстуалном делу.

2. поглавље

Грешке машина алатки

Уопштено гледано, тачност машина алатки представља једну од основних експлоатационих карактеристика. При томе се, имајући у виду да кинематска структура савремених машина може бити различита, разлике између тачности, поновљивости и резолуције морају постојати. Према познатим дефиницијама тачност се описује разликом између стварних и номиналних вредности, која се често назива и „грешком“ [13]. При томе треба имати у виду да тачност и грешка не спадају у исту форму описа одступања. Грешка представља одступање (квантитативна вредност), и она је егзактна вредност, а тачност је мера одступања (квалитативна вредност), и она може бити мања или већа [14,15]. Поновљивост позиције код машина алатки је опсег одступања за исту вредност положаја због случајног извора грешака. Неке референце позивају се на поновљивост као на прецизност. Међутим, у општем смислу, прецизност упућује на квалитативни аспект, укључујући тачност и поновљивост. Резолуција је најмања величина која се може гарантовати за мерни прибор [16]. Због тога би требало да је отприлике један ред величине мањи од тачности машине на којој су уграђени мерни прибори. Резолуција која се може данас реализовати не представља проблем за прецизност машина јер, на пример, тренутни обрадни центри укључују линеарне енкодере резолуције 0,01 μm за затварање петљи положаја осе, а оптички енкодери, који користе дифракционе решетке и ласерску технологију, у могућности су да се спусте испод 10 nm [17–19]. Фотонични енкодер заснован на сликама користи CMOS сензоре слике и FPGA (*енг.* Field Programmable Gate Array) за високо прецизну детекцију позиције, и тако може постићи још већу резолуцију [20].

У литератури се наводи више класификација грешака машина. Према једној [21], грешке се могу поделити према главним изворима грешака на кинематске, термо-механичке, грешке оптерећења, грешке динамичких сила и грешке управљања кретања. По једној широј класификацији [22], постоји већи број категорија које су представљене у табели 2-1.:

Табела 2-1. *Шира класификација грешака [22]*

Геометријске и кинематске грешке	Топлотне грешке
Грешка позиционирања	Аксијално издужење главног вретена
Грешке правости сваке осе	Радијално бацање главног вретена
Грешка валовитости (угаона грешка x осе)	Топлотно извијање главног вретена
Грешка нагињања (угаона грешка y осе)	Дисторзија регија главног вретена
Грешка скретања (угаона грешка z осе)	Експанзија водећег вретена
Абеова грешка	Експанзија и савијање машинског стуба
Грешка промене смера	Експанзија и савијање постоље машине
Грешка у зазору	Топлотно извијање обратка
Грешка нормалности (ортогоналности) између две осе	Топлотне паразитске грешке

Геометријске и кинематске грешке	Топлотне грешке
Грешке контуре сваке осе	<i>Грешке индуковане силом резања</i>
Грешке хистерезе	Грешке нестабилности материјала
Неортогоналност осе	Вибрације
Радијално одступање главног вретена	Еластично извијање обратка
Аксијално одступање главног вретена	Грешке алата
Убрзавање оса	Истрошеност алата
Нагиб главног вретена	Еластично извијање главног вретена
	Паразитске грешке силе резања
Грешке трења и клизања	<i>Грешке прибора</i>
Грешке инерције током убрзавања/кочења	Грешка одмакнутости осе
Грешке склопа машине	Клизање обратка
Паразитски покрети	Деформација обратка
	<i>Грешке управљања</i>
	Грешке серво мотора
	Грешке интерполационих алгоритама
	Појачање сигнала у оквиру петље одређивања положаја у управљању
	Грешке инструментације
	Шум

Грешке се могу класификовати и поделити у систематске и у случајне грешке. Случајне грешке се односе на прецизност резултата, и могу се третирали статистички, на пример, усредњавање се може користити за побољшање прецизности најбоље процењене вредности. Величина таквих грешака може се проценити на основу резултата скупа поновљених мерења и може се смањити са високим бројем запажања. Систематске грешке су оне које се јављају на исти начин при сваком мерењу па се не могу открити само испитивањем резултата. На такав начин шира класификација грешака се може представити у групе, као што је то учињено у табели Табела 2-2.

Табела 2-2. Систематске и случајне грешке машине алатки [22]

Систематске грешке	Случајне грешке
<i>Геометријске и кинематске грешке</i>	
Грешка позиционирања	Грешка промене смера
Грешке правости сваке осе	Грешка контуре сваке осе
Грешка валовитости (угаона грешка x осе)	Грешка хистерезе
Грешка нагињања (угаона грешка y осе)	Радијално одступање главног вретена
Грешка скретања (угаона грешка z осе)	Аксијално одступање главног вретена
Абеова грешка	Грешке трења и клизања
Грешка у зазору	Грешке инерције током убрзавања/кочења
Грешка нормалности између две осе	Грешке склопа машине
Неортогоналност осе	Паразитски покрети
Радијално одступање главног вретена	
Аксијално одступање главног вретена	
Убрзавање оса	

Систематске грешке	Случајне грешке
<i>Топлотне грешке</i>	
Аксијално издужење главног вретена	Радијално ширење главног вретена
Експанзија водећег вретена	Термално извијање главног вретена
Експанзија и савијање машинског стуба	Дисторзија регија главног вретена
Експанзија и савијање машинске постоље	Термално извијање обратка
	Термалне паразитске грешке
<i>Грешке индуковане силом резања</i>	
Еластично извијање обратка	Грешке нестабилности материјала
Истрошеност алата	Вибрације
Еластично извијање главног вретена	Грешке алата
	Паразитске грешке силе резања
<i>Грешке прибора</i>	
Грешка одмакнутости оса	Клизање обратка
	Деформација прибора обратка
<i>Грешке управљања</i>	
Појачање сигнала у оквиру петље одређивања положаја у управљању	Грешке серво мотора
Систематске грешке инструментације	Грешке интерполационих алгоритама
	Шум
	Случајне грешке инструментације

Према [22], грешке су даље класификоване на синхроне и асинхроне. Поновљиве или синхроне компоненте нетачности при обртном кретању понављају се на исти начин при сваком обрту. Непоновљива или асинхрона одступања при кретању су одступања чија фреквенција је умножак фреквенције обртања. Асинхроне нетачности укључују стохастичка померања. Могуће је одредити криве унутрашњег и спољашњег омотача одступања при обртном кретању.

Нагласак докторске дисертације је на геометријским и кинематским грешкама, и, сходно томе, о њима ће се писати мало опширније. Остале врсте грешака се не разматрају истом опширношћу.

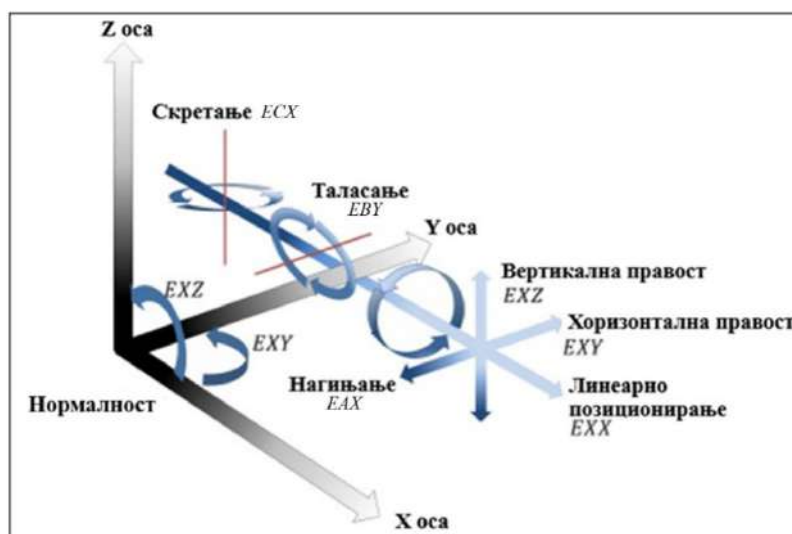
Геометријске и кинематске грешке

Значајан број грешака повезан је са кретањем тела у простору. Грешке настају, или због геометријских грешака компонената машина алатки, или због недостатака у дизајну машина алатки [23].

Грешке позиционирања. Грешка се тиче несигурности линеарног кретања. Нетачности израде или уградње вођица могу изазвати такве грешке које су обично статичне или квазистатичне када се узима у обзир температурни ефекат [24].

Грешка правости. Дефинише се као одступање од правца линије кретања у хоризонталној равни која је нормална на правац кретања [25]. Одступање од правости X осе ће узроковати грешку позиционирања по Y осе. Одступање од правости Y осе ће узроковати грешку позиционирања по X осе.

Грешка равности. Дефинише се као одступање од правца линије кретања у вертикалној равни која је нормална на правац кретања [25]. Одступање тачности у кретању осе X или Y ће проузроковати грешку позиционирања по осе Z.



Слика 2-1. Објашњење грешке правости и угаоних грешака [26]

На слици бр. 2-1. су приказане интерпретације грешака равности и угаоних грешака – угаона грешка нагињања, таласања и скретања са правца. Правац кретања означава стрелица.

Угаона грешка X осе (таласање). Дефинише се као ротација око осе у хоризонталној равни нормалној на правац кретања. Ако се позиција од интереса, која се мери, не налази у центру ротације, тада ће ротација узроковати Абеову грешку у две димензије. За X осу, ротација ће проузроковати Абеову грешку у X и Z смеру. За Y осу, ротација ће узроковати Абеову грешку у Y и Z смеровима. Величина ових грешака може се одредити множењем дужина оствареног померања за коефицијенте који садрже угао таласања.

Угаона грешка Y осе (нагињање). Дефинише се као ротација око осе у хоризонталној равни паралелној правцу путање. Ако се позиција од интереса, која се мери, не налази у центру ротације, тада ће ротација изазвати Абеову грешку у две димензије. За X-осу, ротација ће изазвати Абеову грешку у Z и Y осе. За Y осу, ротација ће изазвати Абеову грешку у X и Z осе. Величина ових грешака може се израчунати множењем дужина оствареног померања, за $\sin$ и $\cos$, угла нагињања.

Угаона грешка Z осе (скретање). Дефинише се као ротација око осе у вертикалној равни нормалној на правац кретања. Ако се позиција од интереса, која се мери, не налази у центру ротације, онда ће ротација проузроковати Абеову грешку у две димензије. Ротационо одступање у осе X или Y довешће до појаве Абеове грешке у осе X и Y. Величина ових грешака може се израчунати множењем дужина оствареног померања, за $\sin$ и $\cos$, угла скретања.

Истраживања у вези повезаности грешке позиционирања и грешке правости су дала различите резултате. У раду [27], доказано је да компензација грешака позиционирања имају позитиван утицај на грешке правости и угаоне грешке, а занемарљив на грешку ортогоналности. Постоји корелација између линеарних и угаоних грешака у призматичним зглобовима машине, што указује на везу између правости и

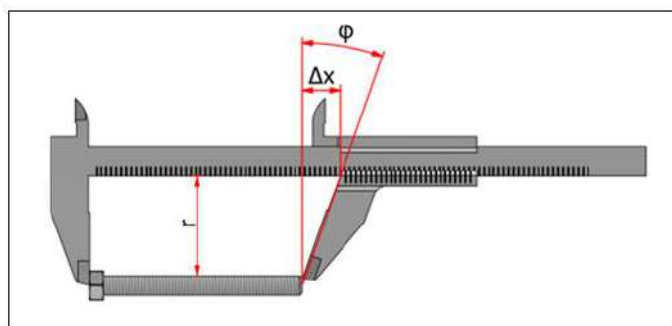
угаоних грешака [28]. Наспрам тога, Мајда [29] је, кроз симулације, доказао да су правост и угаоне грешке независни.

Абеова грешка. Основни принцип говори да дужина коју треба измерити и мерна скала морају бити у истој оси. У случају да се то не испоштује, може доћи до грешке при одређивању позиције дате тачке. У конвенционалним машинама алаткама многи линерани покретни системи не задовољавају Абеов принцип зато што покретна оса не лежи на једној линији са референтном тачком или у њеном тежишту.

Да би се смањио утицај Абеове грешке, могу се предузети следеће мере:

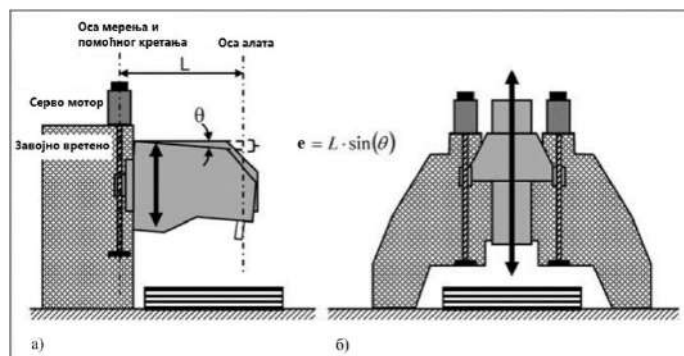
- Машине алатке пројектовати тако, да лежајеви и актуатори буду близу површине за обраду.
- Мерење је потребно извршити што ближе дужини коју желимо измерити.
- У случају да се не могу испоштовати претходне две тачке, онда је треба компензовати са Абеовом грешком.

Грешка се може појавити на више начина. На слици бр. 2-2. приказан је утицај Абеове грешке код мерног инструмента. Веза између настале грешке Δx , удаљености између осе мерења, и осе мерне скале r , и Аббе-овог угла φ је $\Delta x = r \tan \varphi \cong r \varphi$.



Слика 2-2. Абеова грешка код мерног инструмента [30]

На слици бр. 2-3. приказан је начин смањења Абеове грешке са адекватним конструкцијским решењем. На слици а) приказана је машина алатка са С-рамом са једним стубом и завојним вретеном. Као што се може видети, оса алата и мерна линија су одвојене; Абеов принцип из тог разлога није испоштован и због тога је угаона деформација θ преведена у грешку померања $e = L \sin(\theta)$ алата. На слици б) је приказана машина алатка са два стуба и завојна вретена. У овом случају, растојање између осе алата и сваког завојног вретена компензује ефекат угаоног одступања на линеарној оси. Решење је скупље од претходног, али је тачност машине алатке много већа.



Слика 2-3. Два различита дизајна машина, а) са Абеовом грешком. б) са смањењем Абеове грешке

Компензација Абеове грешке представља једноставан и јефтин начин смањења грешака, и због тога су започета истраживања на ту тему [31]. При компензацији дијагоналне запреминске грешке машине узимањем у обзир Абеове грешке у моделу компензације, постиже се бољи резултат него код модела, који не узимају у обзир Абеову грешку, док код линеарне грешке осе нема разлике између добијених резултата [32].

Грешка зазора. Компонента је грешке позиционирања узрокована променом смера кретања [33]. Грешка настаје услед зазора између елемената погонског склопа. Како се растојање повећава, количина кретања на улазу, потребна за покретање вретена, већа је. Повећање растојања резултира у повећању грешке зазора. Грешка зазора се повећава са термичким ширењем и скупљањем механизма. Зазор такође утиче на двосмерну поновљивост. Најчешће коришћен систем за проверу грешке зазора је ласерски интерферометар, али развијен је и систем на основу фотоелектричних сензора [33]. Локализованом модулацијом брзине помоћног кретања, помоћу динамичких модела, могуће је да се компензује грешка зазора [34]. Елиана и остали [35] су развили систем, којим се, без коришћења мерне опреме, може проценити грешка зазора. Метода се заснива на стимулацији и детекцији поремећаја у повратном сигналу серво мотора. Мерења су показала да постављени модел добро може да раздвоји податке са великим шумом од оне које имају стварно компоненту грешке зазора. Ган и остали [36] су отишли још даље. Развили су систем адаптивне и континуалне компензације грешке зазора на основу повратног сигнала серво мотора.

Грешка нормалности (или грешка ортогоналности) између две осе. Стање површине или осе која није, а требало би да буде нормална на другу површину или осу.

3. поглавље

Принцип мерења тачности позиционирања помоћу ласерског интерферометра

3.1 Ласерска интерферометрија

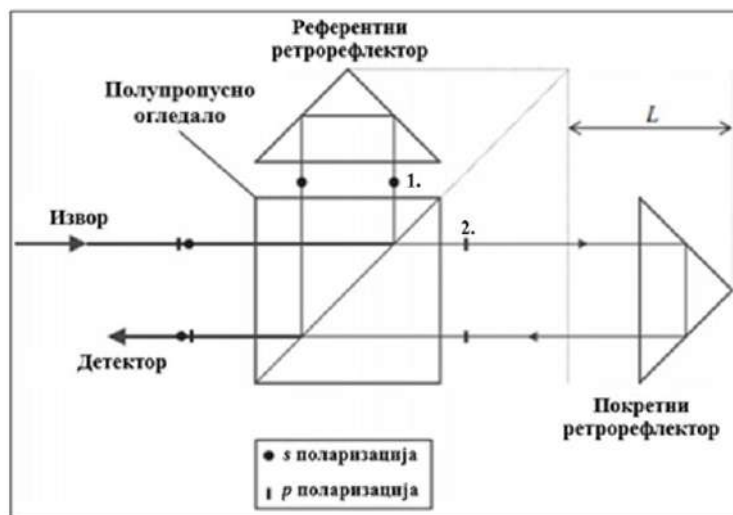
Интерферометрија за мерење померања (енг. Displacement Measuring Interferometry или DMI) поседује вишеструке предности у односу на друге методе праћења положаја [37]. Поред високе резолуције, широког опсега мерења и брзог одзива, ласерски зрак је уједно и виртуелна оса мерења која може проћи директно кроз мерну позицију да би елиминисала Абеову грешку [38].

Основни принцип DMI јесте да се детектује промена у растојању L при евалуацији фазе интерференције $\varphi(L)$ преко њеног утицаја на просечни интензитет $I(L)$. Модерни DMI системи засновани су на електронској детекцији и обради података да би се обезбедило одређивање интензитета у једном опсегу контролисане промене фазе. Одређивање фазе је потребно за одређивање смера кретања, и да се кретање интерполира на мале сегменте. Код већине система ово значи да је потребно кодирање референтног и мерног зрака помоћу поларизације. Помоћу једначине (1) може се описати зависност интензитета од промене мерног растојања и угла поларизације [39].

$$I(L, \alpha) = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos[\varphi(L) + \varphi_0 + \alpha] \quad (1)$$

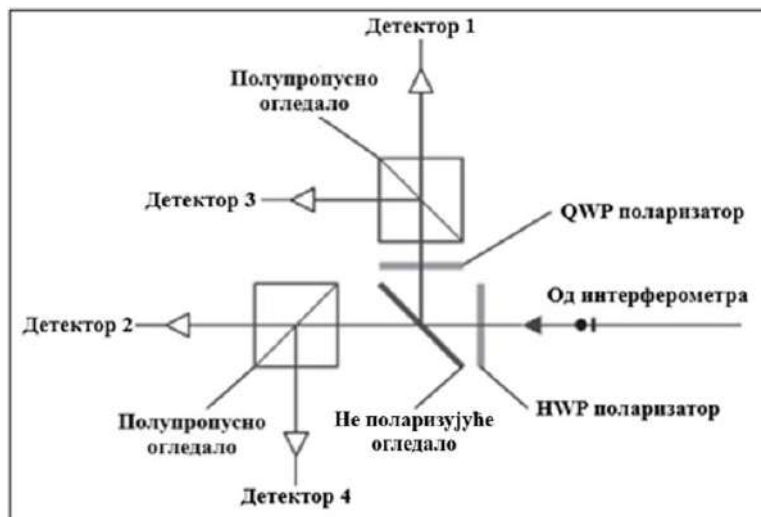
Где је φ_0 константа за изједначавање растојања до предефинисане $L = 0$ позиције, I_1 и I_2 интензитети ласерских зракова, а α угао поларизације.

На слици 3-1. је шематски приказ система поларизујућег интерферометра. Ласерски зрак, из ласерског извора, долази до интерферометра, који дели зрак на два дела: 1. поларизовани зрак се одбија од полупропусног огледала, путује до референтног ретрорефлектора и враћа се до огледала. 2. поларизовани зрак пролази кроз полупропусно огледало, удара у покретни ретрорефлектор и враћа се до полупропусног огледала, у исту тачку, где се и 1. зрак вратио. У заједничкој тачки долази до фазне интерференције два ласерска зрака, и тај интерферирајући зрак се враћа у детектор.



Слика 3-1. Шематски приказ одређивања линеарног померања помоћу ласерског интерферометра која користи поларизацију за кодирање мерног и референтног ласерског зрака [39]

Постоји хомодина и хетеродина техника детекције промене фазе поларизованих ласерских зракова. У хомодианој методи поларизацијске оптике више детектора мери интензитет који је настао статичким фазним променама [40]. На слици 3-2. се може видети пример хомодине детекције. Ознаке QWP и HWP се односе на оптичке елементе који мењају поларизацију светла. QWP (енг. Quarter Wave Plate) је оптички елемент који ствара разлику у фази од четвртине таласне дужине између две различите компоненте поларизованог светла, док HWP (енг. Half Wave Plate) је оптички елемент који ствара разлику у фази од половине таласне дужине између две различите компоненте поларизованог светла.



Слика 3-2. Оптички компоненти хомодине фазне детекције [39]

Четири детектора мере интензитете сигнала са међусобно релативном променом фазе од $\pi/2$.

$$I_j = I(L, \alpha_j) \quad (2)$$

$$\alpha_j = \frac{j \cdot \pi}{2} \quad (3)$$

Фаза се може одредити на основу четири измерена интензитета:

$$\tan(\varphi) = \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} \quad (4)$$

Код хетеродине методе, интензитет интерференције се непрекидно мења по фазама у времену са уклапањем разлике фреквенције између референтног f_2 и мерног f_1 ласерског зрака. Фазна промена у времену је у овом случају функција разлике фреквенција два зрака, која се може описати на следећи начин:

$$\alpha(t) = \Delta f \cdot t, \Delta f = f_2 - f_1 \quad (5)$$

Промена оптичке путање код интерферометра са једном таласном дужином узрокује да се мерни сигнал помери за један циклус у односу на референтни сигнал, што одговара промени у броју нивоа дигитализације у вредности од $2^m - 1$, где је m број битова у аналогно-дигиталном конвертеру. Сходно томе, промена у оптичкој путањи резултира повећањем или смањењем од $\frac{\lambda}{2^m - 1}$ [41].

Према другом, поједностављеном [42], начину објашњења рада система, од стране произвођача опреме за ласерску интерферометрију преферираном, промена растојања се детектује помоћу „светлих“ и „тамних“, тј. ласерских сигнала већег и мањег интензитета. Растојање која одговара промени између максималног и минималног ласерског интензитета може се одредити на основу таласне дужине λ :

$$L_{min} = \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

Када ласер пређе већи пут од половине таласне дужине, онда се пребројавају прелази од јаког ка слабом интензитету, и на тај начин се одређује пређено растојање:

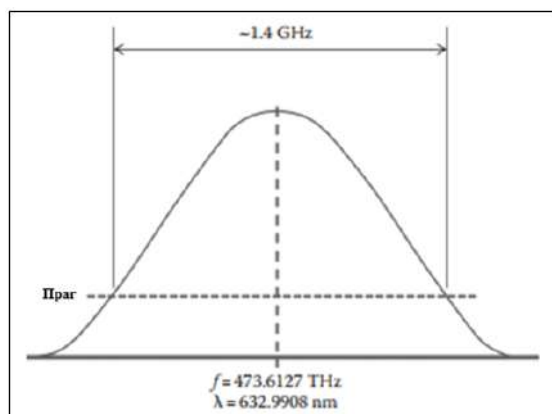
$$L = N \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

Где је N број промена интензитета. У стварности, у складу са хомодином или хетеродином техником детекције, на много већој скали се може одредити промена интензитета, што повећава резолуцију мерења.

Извор светлости за ласерску интерферометрију мора задовољити већи број оптичких и метролошких захтева. Првенствено, таласна дужина и фреквенција ласерског зрака морају бити што стабилнији, не само у датом тренутку, већ и током свог целог животног века. Потребно је да ласер буде кохерентан, компактан, високог нивоа стабилности стања поларизације, и високог квалитета таласа. Још једно практично својство у метрологији јесте видљивост ласера да би се могло лакше подесити, тј. таласна дужина из видљивог спектра [39].

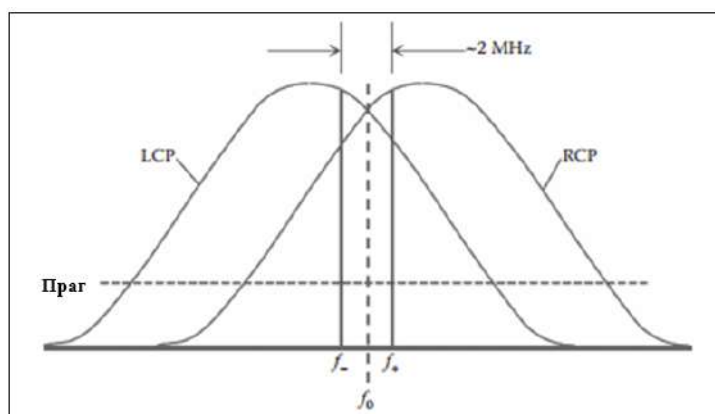
Захтеване услове задовољава Хе-Не ласер са таласном дужином у вакууму од 632,9908 nm. Ласер се користи код свих произвођача опреме за мерење померања ласерском интерферометријом. На слици 3-3. приказан је дијаграм интензитета за Хе-Не ласер. Вредност таласне дужине код DMI технологије је од круцијалног значаја. Пошто се мерења изводе у индустријским условима, потребно је узети у обзир промене таласне дужине у зависности од услова околине. Свака промена у таласној дужини директно утиче на несигурност мерног система који користи ласер. Под околином у контексту МА мисли се на све микроклиматске услове у непосредној близини машине, који утичу на рад машине. Узимају се у обзир температура, влажност ваздуха, притисак, ламинарно

или турбулентно струјање ваздуха, хемијски састав ваздуха и сви остали спољни параметри који могу бити од значаја.



Слика 3-3. Дијаграм интензитета He-Ne ласера у вакууму. Фреквенција и таласна дужина су према препорукама CIPM (International Committee for Weights and Measures. Међународни комитет за мере и тежине) [43]

Први начин обезбеђења велике поузданости ласерских инструмената јесте стабилизација таласне дужине ласера. Може се постићи на 4 начина [39], од којих је, у комерцијалној употреби, најраспрострањенија врста стабилизације тзв. Земанова стабилизација. Метода се заснива на Земановом ефекту [44], а основни принцип рада потиче од уређаја описаног у [45,46]. Једно релативно јако магнетно поље уз ласерски зрак резултује поделом једног ласерског зрака у два ортогонално-кружно поларизована зрака (LCP – лево кружно поларизовани зрак, RCP – десно кружно поларизовани зрак), као што се може видети на слици 3-4. фреквенције новонасталих зракова се налазе изнад и испод оригиналне централне фреквенције f_0 , и означене су са f_+ и f_- . Земанова подела ствара потребну разлику у фреквенцијама за хетеродину интерферометрију, а такође и стабилизује фреквенцију ласерског зрака.



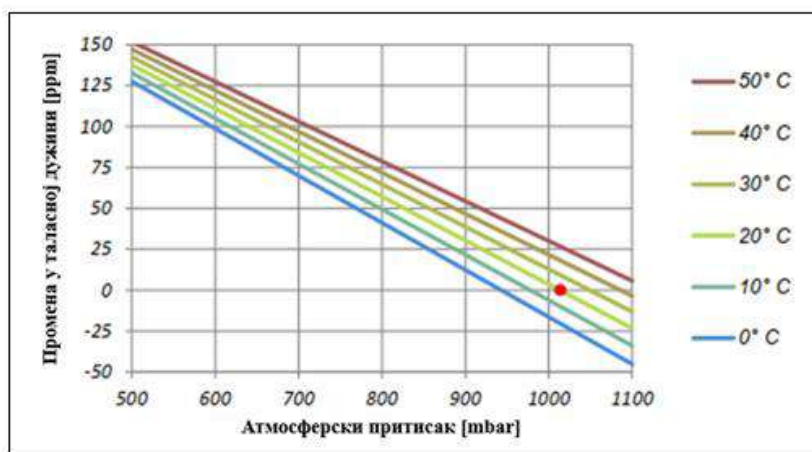
Слика 3-4. Земанова подела ортогонално поларизованог ласерског зрака

Индекс рефракције ваздуха има јако велику важност у пројектовању оптичких компонената и у метрологији. Индекс рефракције је веома темељно изучаван [47–50] и добро су познате његове карактеристике. Индекс рефракције светлости у вакууму је $n_0 = 1$. Индекс рефракције светлости за стандардни ваздух, тј. у условима $P = 101325 \text{ Pa}$, $T = 293,15 \text{ K} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, и $H = 50\%$, износи $n_s \approx 1,0002714$. Таласна дужина светлости у неком медијуму је пропорционална са таласном дужином у вакууму и обрнуто пропорционална са рефракционим индексом тог медијума:

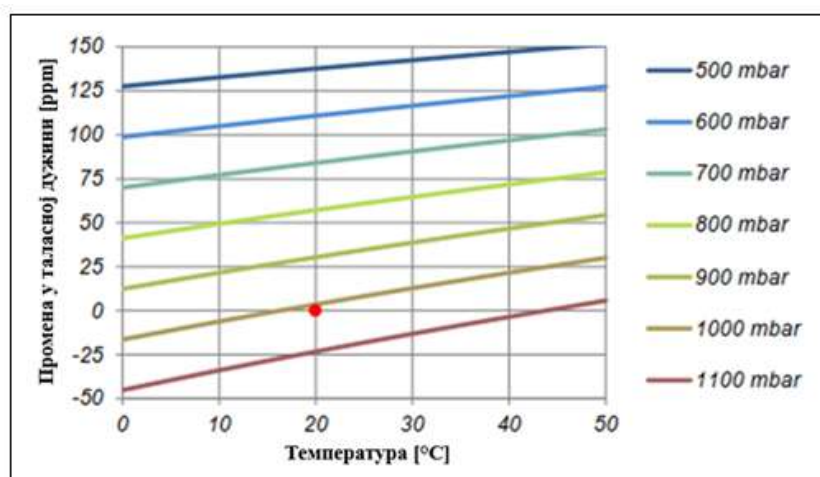
$$\lambda' = \frac{\lambda}{n} \quad (8)$$

Пошто се мерења врше у ваздуху, приликом реализације мерења потребно је извршити компензацију таласне дужине да би ласерски интерферометар обезбедио тачније резултате. Везу између рефракционог индекса и температуре, притиска и релативне влажности, која се користи у метрологији у лабораторијумским условима, тј. близу 20 °C, представио Едлен (Edlén) [48]. Као резултат тога, дефинисана је измењена Едленова једначина која узима у обзир одступање између експериментално мерених и рачунатих вредности [47], [49].

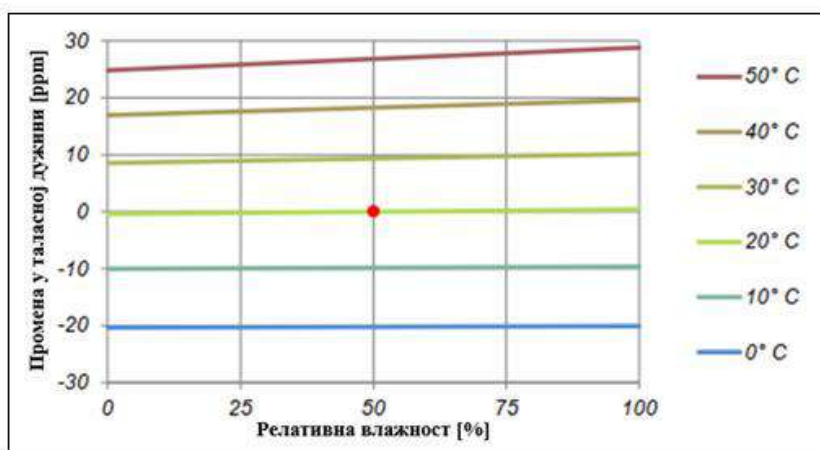
На сликама 3-5., 3-6. и 3-7. приказани су дијаграми са величином промене таласне дужине у зависности од притиска, температуре и релативне влажности ваздуха. Промене су посматране у односу на полазну таласну дужину од 633 nm, што одговара He-Ne ласеру. Као што се може видети, веза између три фактора и таласне дужине уопште није тривијална. Стручна литература [37], [51] наводи и садржај угљендиоксида у ваздуху као значајног фактора који утиче на таласну дужину. Данас има посебно значајну улогу јер су истраживања показала [52] да се количина CO₂ у ваздуху нагло повећала. Ипак, неопходно је напоменути да већина произвођача опреме за мерење дужине применом ласерске интерферометрије не укључује компензацију промене у концентрацији угљендиоксида у ваздуху.



Слика 3-5. Промена у таласној дужини ласера у зависности од притиска ваздуха на референтној 50% релативној влажности, при различитим температурама [53]

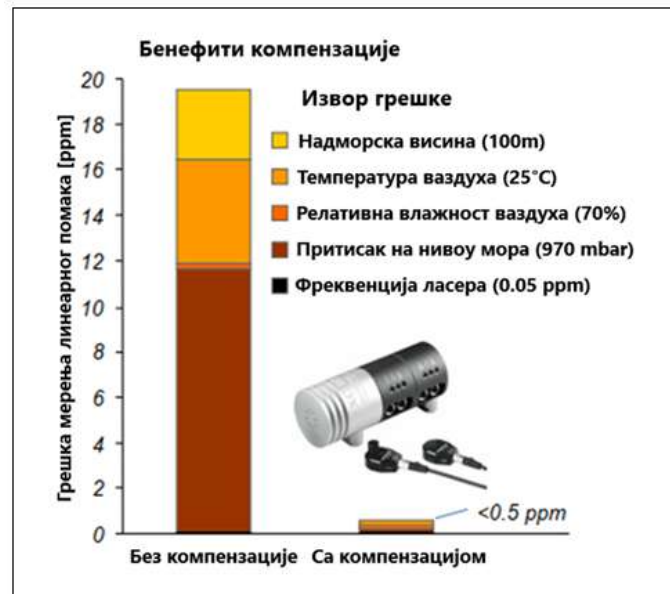


Слика 3-6. Промена у таласној дужини ласера у зависности од температуре ваздуха на референтној 50% релативној влажности, при различитим притисцима [53]



Слика 3-7. Промена у таласној дужини ласера у зависности од релативне влажности ваздуха на референтном 1013,25 mbar притиску, при различитим температурама [53]

Важност компензације индекса рефракције приказан је на слици 3-8. на примеру апроксимације утицаја компензације на грешку мерења линеарног померања са ласерским интерферометром. Доминантну улогу у грешци има некомпензовани атмосферски притисак. Други најзначајнији фактор је температура, а најмање утицаја има стабилност фреквенције ласерског зрака. Без компензације, грешка мерења у представљеним условима може достићи и 20 ppm (part-per-million/део-по-милиону). После компензације, она достиже ниво који је мањи од 0,5 ppm, што је побољшање од 97,5%. Компензација је могућа само у случају да су сви сензори адекватно постављени на релевантне локације, на и око МА, и да је околина разумно стабилна, пошто је реакција сензора, нарочито сензора температуре, много спорија на промене него што је реакција ласерског зрака.



Слика 3-8. Утицај компензације температуре, притиска и релативне влажности ваздуха на тачност мерења линеарног померања помоћу ласерског интерферометра [53]

Аутоматски системи компензације укључују Едленове или Цидорове једначине за израчунавање рефракционог индекса. У случају да се поквари аутоматски систем, а потребно је мануелно компензовати вредности применом формуле, формуле за приближно одређивање рефракционог индекса се могу наћи у раду [54]. Формула (9) је једноставнија од израза који се користе код аутоматске компензације и омогућава да се одмах након мерења израчунају подаци.

$$n = 1 + \frac{7,86 \cdot 10^{-4} p}{273 + t} - 1,5 \cdot 10^{-11} RH \cdot (t^2 + 160) \quad (9)$$

У једначини (9) p представља притисак у kPa, t је температура у °C и RH релативна влажност ваздуха у процентима на скали од 0 до 100. Једначина је важећа само за стандардну He-Ne ласерску таласну дужину која је ≈ 633 nm. Очекивана несигурност једначине је $1,5 \cdot 10^{-7}$ за опсег температуре 0 °C – 35 °C, притиска 50 kPa - 120 kPa, релативне влажности 0% - 100% и концентрације CO₂ 300 $\mu\text{mol/mol}$ - 600 $\mu\text{mol/mol}$. После прерачунавања рефракционог индекса, на једноставан начин може се извршити компензација мерења померања:

$$L_{comp,air} = N \frac{\lambda'}{2} \quad (10)$$

где је $L_{comp,air}$ компензовано померање са новом таласном дужином λ' .

Помоћу једног експеримента у [55], доказано је да извор топлоте близу ласерског зрака може у великој мери пореметити добијене податке при мерењу са ласерским интерферометром. Близу ласерског зрака постављена је боца пуна вреле воде температуре око 57 °C. Промена измерених вредности се са усталих нормалних 0,5 μm повећала на 5 μm . Након уклањања боце, промена измерених вредности се вратила у нормални опсег. Боца са врелом водом је изазвала нагло повећање температуре ваздуха у непосредној близини ласерског зрака, а сензори температуре околине у лабораторији нису детектовали ту промену, што је довело до промене у вредностима читавања. Топао ваздух у приказаном експерименту је утицао додатно и на турбулентност ваздуха. Ласерски зрак је требало да прође кроз ваздух чија структура је постала некохерентна и

кретања ваздушне масе су почела утицати на мерење. Због тога, веома је важно да се при мерењима у што већој мери смањи кретање ваздуха и да се не изазову турбуленције у току кретања.

Компензација експанзионог коефицијента код модерних система мерења линеарног померања са ласерском интерферометријом такође доприноси повећању тачности мерења. Димензије прецизних предмета и елемената МА су дефинисане при стандардним условима, тј. на референтној температури од 20°C. Пошто се мерења врше на температурама различитим од стандардне, елементи МА се шире или смањују у зависности од температурне разлике и на тај начин уводи се у систем још једна, додатна грешка. Да би се избегла ова грешка, у току мерења потребно је вршити мерење температуре репрезентативних делова МА и да се уради компензација са измереним температурама. Циљ овог процеса јесте да се процени линеарно ласерско читавање које би се добило да се мерења врше при стандардној температури [53]. Једначина (10) се може проширити коефицијентом топлотног ширења α и тако добије облик:

$$L_{comp.} = N \frac{\lambda'}{2} (1 - \alpha \Delta T) \quad (11)$$

Где је ΔT разлика у температури дела МА која се проверава у односу на референтних 20 °C.

3.2 Методологије испитивања тачности машина алатки

Испитивање геометријске тачности машина алатки врши се тако што се мери тачност и поновљивост са серијом једноставних тестова позиционирања и обично се ради под условима без оптерећења. Стандарди одређују начине мерења дајући прихватљиве толеранције за линеарне и ротационе осе.

Поступци испитивања успостављају низ мерних тачака, а тачност и поновљивост се мери са неколико апроксимација за сваку мерну позицију. Резултати су одступања равности, паралелност, нормалност линеарних оса и грешке концентричности ротационих оса. Грешке се мере уређајима високе тачности као што су ласерски интерферометри, колиматори или калибрисани лењири, тако да се мерења једноставно обављају а добијене информације су веома тачне.

У циљу генерализације дефиниције тачности и поновљивости, успостављени су неки међународни стандарди. Најважнији су ISO 230-2:2014 [25], JIS B6201-1993 [56], VDI/DGQ 3441 [57] и ASME B5.54 [58]. Стандарди успостављају и процедуре испитивања и статистичке параметре који се мере како би се израчунала тачност и поновљивост за линеарне и ротационе осе машина алатки. Ипак, између ових стандарда постоје значајне разлике, углавном у броју циљних тачака и потребних мерења за одређивање вредности тачности машине.

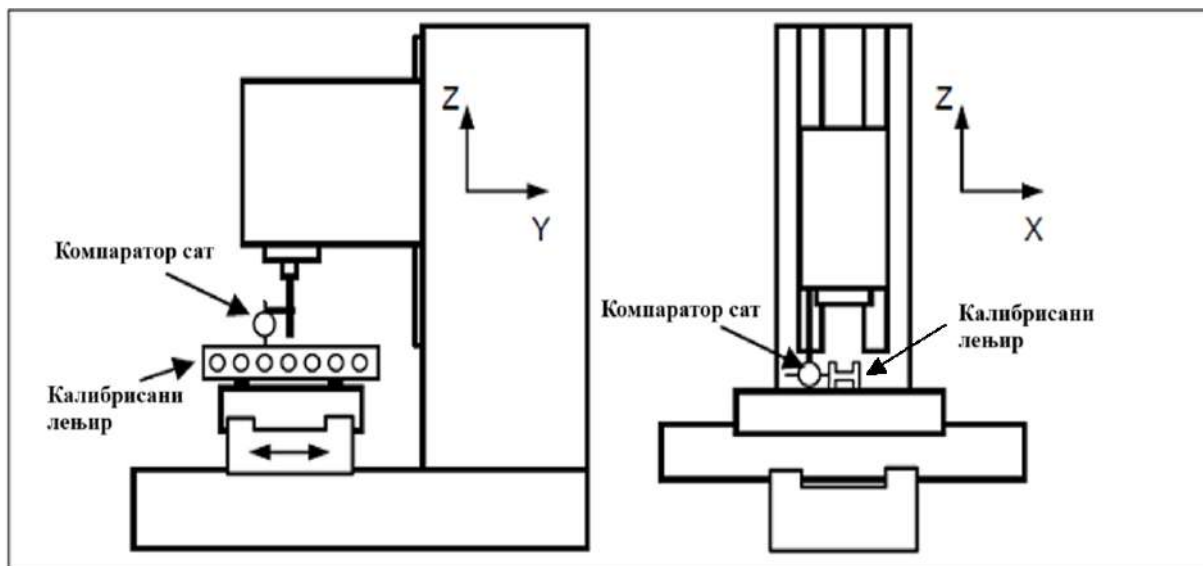
ISO 230-2 је вероватно највише прихваћен стандард на свету. При испитивању према овом стандарду, треба задовољити следеће услове:

- Јединствена температура: сва испитивања се морају изводити на температури од 20 °C
- Циклус загревања: сва испитивања укључују циклус загревања како би били симулирани стварни услови рада машине.

- Једносмерно и двосмерно приближавање: сви тестови укључују једносмерно и двосмерно приближавање циљним позицијама.
- Број циљних тачака: линеарне осе захтевају најмање 5 циљних тачака по метру, а ротационе осе захтевају најмање 3 циљне позиције на 90°.
- Број мерења по циљној позицији: сваки тест захтева најмање 5 испитивања по циљној позицији и по смеру кретања.

Јапански индустријски стандард JISB6201 представља нестатистички прорачун тачности и поновљивости. Испитивања сваке осе заснивају се на мерењу три циљне позиције дуж целе осе, две крајње позиције и средњој позицији кретања у правцу једне од нумерички управљаних оса. При позиционирању у циљне позиције креће се само у једном смеру и стварни положај мери се ласерским интерферометром и упоређује са читавањем позиције управљачког система (CNC). Грешку представља разлика између две вредности. Тачност се мери максималном грешком од три грешке позиционирања, израчунато као $\pm \frac{1}{2}$ грешке позиционирања. На исти начин, вредност поновљивости мери се низом тестова за сваку мерну позицију. Потребно је урадити најмање седам апроксимација за сваку мерну позицију. Узимајући у обзир да постоје само три циљне позиције, поновљивост се израчунава за 21 мерење и дефинише са $\pm \frac{1}{2}$ максималне вредности поновљивости измерене у једној од три циљне позиције.

Процена тачности и поновљивости са стандардом JISB6201 резултира нижим нумеричким вредностима од ISO 230-2 због мањег броја мерних тачака и нестатистичког израчунавања мерних вредности. Међутим, ISO резултати су много кориснији у погледу стварне прецизности машина алатки (у општем термину прецизности) јер се грешке у раду машина алатки користе за праћење статистичке расподеле. Слика 3-9. приказује мерење равности осе Y за вертикални обрадни центар пратећи ISO 10791-2. Равност се мери у две нормалне равни (YZ и XZ) да би се добила просторна равност. У овом случају, испитивања се изводе калибрисаним лењиром и компаратор сатом.



Слика 3-9. Испитивање равности Y осе вертикалног обрадног центра, према стандарду ISO 10791-2 [13]

ISO 230 је основни за неколико ISO стандарда који дефинишу конкретнија испитивања тачности за машине алатке. Наиме, ISO 230-1 описује опште концепте равности и управности дефинишући основне методе мерења. ISO 230-2, као што је

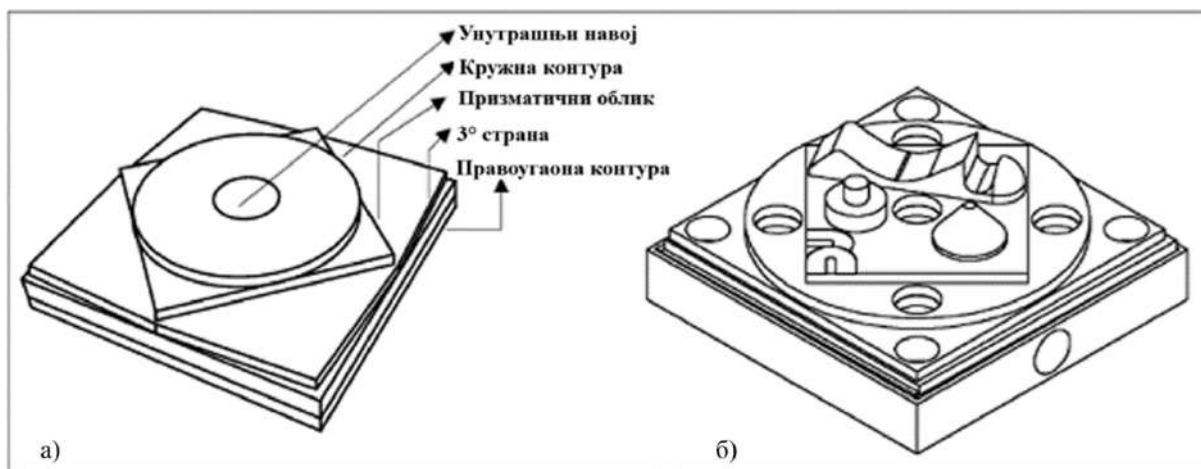
претходно описано, дефинише тачност и поновљивост. Постоје различити ISO стандарди за:

- CNC стругове (ISO 13041)
- обрадне центре (ISO 10791)
- порталне глодалице (ISO 8636)
- EDM машине за обраду жицом (ISO 14137)
- EDM машине са пуном електродом (ISO 11090)
- вертикалне машине за брушење (ISO 1985) и многе друге типове машина.

Радни предмет (израдак) за испитивање

Имајући у виду да корисници машина алатки најлакше могу да протумаче стање и исправност машина на стварним резултатима обраде, последња група испитивања укључује проверу радне тачности на тестном радном предмету за проверу понашања обрадног центра за глодање у стварним радним условима. Глодање подразумева интерполације са три или пет оса.

Према ISO 10791-7:1998 стандарду, на слици 3-10. а) приказана је комбинација круга, квадрата, контуре трапеза са четири различита угла и квадрата са углом од 3° . За добијање реалног резултата, стандард препоручује обраду дела на средишњој тачки машине по X, Y и Z оси. Када се испитни радни предмет изради, стандард дефинише низ мерења као што су управност, паралелност, кружност. Међутим, тест ISO 10791-7 не укључује сложене површине, док многи корисници захтевају високу прецизност за вишеосну обраду. Због тога су у последњих неколико година развијени многи тестни радни предмети као што је NCG са слике 3-10. б).



Слика 3-10. а) геометрија испитног радног предмета ISO 10791-7, б) геометрија NCG тестног радног предмета [13]

Тестни радни предмети за испитивање су широко распрострањени и могу се видети на многим сајмовима или изложбеним салонима како би се демонстрирале могућности машина алатки, али ниједан од њих још није обухваћен ISO стандардима. Већина пројектованих делова за испитивање су за 3-осне обрадне центре, међутим, потражња за 5-осним обрадним центрима се брзо повећава и недостају специфични делови и тестови за валидацију машина алатки са оваквом комплексном кинематском структуром. Стандард ISO 230 дефинише опште смернице за проверу тачности позиционирања ротационих оса, али не предлаже тестове за процену грешке интерполације између две ротационе осе или комбинације линеарно-ротационих оса. Због тога је у фази

реализације већи број истраживачких пројектата како би се употпунили тренутни стандарди [59].

Остале методе за одређивање грешака машина алатки

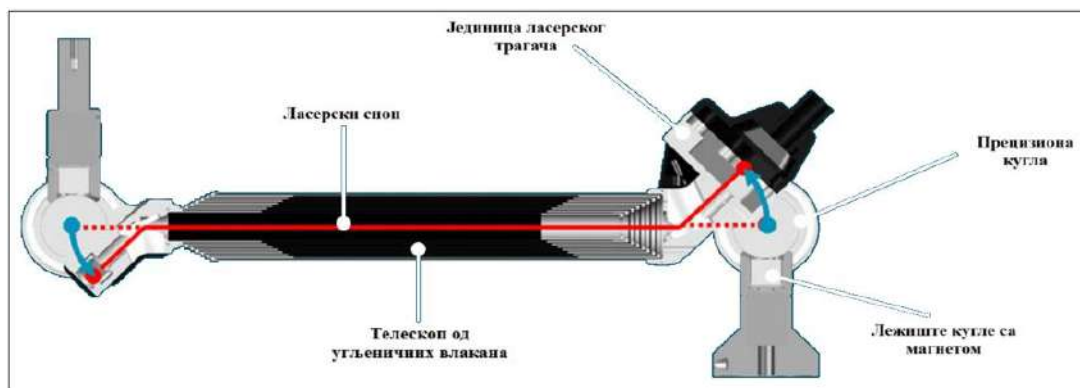
Тест кружне интерполације, који се типично изводи помоћу уређаја са давачем промене дужине интегрисаног у телескопски штап (болбар, енг. *ballbar*), најшире је прихваћено и коришћено индиректно мерење тачности машина алатки. Методу је први приказао Брајен [60] као средство за испитивање високопрецизних стругова, касније је стандардизован, и данас је регулисан у оквиру ISO 230-4:2022 стандарда [61]. Користи се приликом провере стања и компензације грешака вишеосних машина алатки [62], ултрапрецизних машина алатки [63] и машина алатки са паралелном кинематиком [64]. Уређај је, у суштини, сензор помераја између две веома прецизно израђене куглице. Куглице се постављају на радни сто машине и у главно вретено. Након постављања, врши се тест кружне интерполације стола машине алатке у односу на вретено машине алатке померањем стола или главног вретена, у зависности од конфигурације машине алатке [61]. На слици 3-11. приказан је Renishaw QC20 *ballbar* уређај, који је, у односу на претходну верзију QC10, опремљен бежичном комуникацијом са предајником. Недостатак уређаја је опсег мерења од 2mm ($\pm 1\text{mm}$). Постоје екстензије, али свака промена дужине захтева рекалибрацију уређаја. Да би превазишли овај недостатак, развијен је телескопски *ballbar* систем [65], који захтева калибрацију при свакој дискретној дужини. Доказало се да различити размаци између телескопских позиција дају боље резултате у односу на фиксне размаче. Ванг и остали [66] су развили систем који има шест могућих мерних дужина и потребан је само један калибрациони циклус за коришћење.



Слика 3-11. Комплет Renishaw ballbar QC20 [67]

Комбинацијом ласерске интерферометрије и теста кружне интерполације, конструисан је тзв. *laserbar* [68]. Систем користи ласерски интерферометар да би мерио растојање између две тачке, од којих је фиксиран за радни сто, а други за вретено. Ласерски интерферометар се налази унутар ваљкастог телескопа од угљених влакана,

који повезује две високопрецизне лопте. Лопте омогућују окретање око хоризонталне и вертикалне осе у широком опсегу.



Слика 3-12. Пресек laserbar система за тест кружне интерполације [68]

Ласерски трагачи (енг. *Laser tracker*) су преносиви координатни мерни системи (СММ) који мере тродимензионални координатни положај од циља који може бити један сферично монтиран ретрорефлектор. Уређај снима удаљеност два угла ротације дајући податке о положају у сферном координатном систему [69]. Предност у односу на друге методе представља могућност мерења запреминске тачности машина алатки. Систем омогућава да се из једне поставке мерне инструментације са великом поузданошћу могу одредити геометријске грешке МА у великом делу радног простора [70]. Резултати калибрације запреминске грешке помоћу ласерског трагача дају добре резултате, али у овом случају стратегија мерења и позиција уређаја имају велики утицај на резултате мерења [71]. Да би смањили утицај позиције, Вендт и остали [72] су развили тзв. мултилатерациону методологију при којој се ласерска глава помера у више позиције. Други су даље истражили утицај шума и размештаја ласерске главе [73]. Комбинација више метода провере стања машина алатки користи се за евалуацију и потврду постављених нових методологија. Тако су потврдили ефикасност система калибрације робота за обраду ласерским трагачем у реалном времену помоћу ballbar-a [74].

3.3 Стандард ISO 230-2:2014

Стандардом ISO 230-2:2014 [25] дефинисане су методе за испитивање и оцену тачности и поновљивости позиционирања нумерички управљаних машина алатки директним мерењем појединачних оса на машини. Методе се подједнако примењују на линеарне и ротационе осе. Стандард се првенствено користи за одређивање тачности позиционирања нумерички управљаних оса МА са серијском кинематиком, као и других машина, као што је симулациони систем са 6 степени слободе [75]. Методе се не примењују када се врши истовремено испитивање више оса. Део ISO 230 стандарда може се користити за упоредна испитивања, периодичну верификацију, компензацију грешака машине итд.

Услови испитивања у стандарду предвиђају услове околине, стање машине и процедуру мерења.

Произвођач/добављач машине је обавезан да пропише услове радне средине машине у погледу температуре прихватљиве за рад машине да би се обезбедила предвиђена тачност. Информације треба да садрже, спецификацију максималног одступања

температуре околине у току рада, (амплитудни и фреквенцијски опсег одступања) као и атмосферски притисак и влажност ваздуха. Корисник је дужан да обезбеди прихватљиву топлотну околину за испитивање перформанси машина алатки на месту уградње.

У лабораторијским условима, мерење димензија се изводи у условима када предмет мерења има температуру 20 °C. Уколико није могуће обезбедити захтевану температуру околине, резултати мерења се усклађују увођењем корекције за фактор ширења између оса система за позиционирање (или радног предмета/носача алата) и мерне опреме, и свођењем на температуру 20 °C. Мерење се може извршити мерним сензором уз кориговање појединачне измерене вредности или мерењем услова околине и математичком корекцијом вредности мерења при обради резултата.

Машина и, ако је релевантно, опрема за експеримент треба да буду довољно дуго у просторији за испитивање да би постигли топлотно стабилно стање пре извођења мерења. Потребно је да буду заштићене од промаје и спољних утицаја, као што су сунчеви зраци, радијатори, грејачи ваздуха и остало.

Приликом испитивања је потребно да машина буде у потпуности опремљена и оспособљена за рад. Ако је неопходно нивелисање и испитивање геометријске тачности, треба га извршити у потпуности пре почетка провере тачности позиционирања. У случају да се користе уграђени алгоритми компензације, потребно је назначити у извештају за испитивање. Сва испитивања треба да се врше у стању без оптерећења, значи без постављеног обрата.

Испитивању машина алатки при нормалним условима треба претходити одговарајућа фаза загревања, која је дефинисана од стране произвођача/добављача или је установљено договором између корисника и произвођача/добављача.

Испитивање тачности позиционирања за поједине осе, врши се дуж максимално доступног сегмента осе за "m" мерних позиција (положаја). Мерне позиције се бирају тако да међусобна растојања буду контролисано неравномерно распоређена, тј. ради се о "m" изабраних проба са индексом "i". У сваку мерну позицију извршни орган (клизач) машине алатке долази више пута и то из оба смера кретања. Тако се добија "n" појединачних измерених вредности за дефинисане мерне позиције које су означене индексом "j".

При томе су дефинисани појмови:

Мерна позиција, P_i – крајња програмирана позиција покретног дела машине;

Стварна позиција, P_{ij} – измерена крајња позиција покретног дела машине i-тог и j-те мерне позиције;

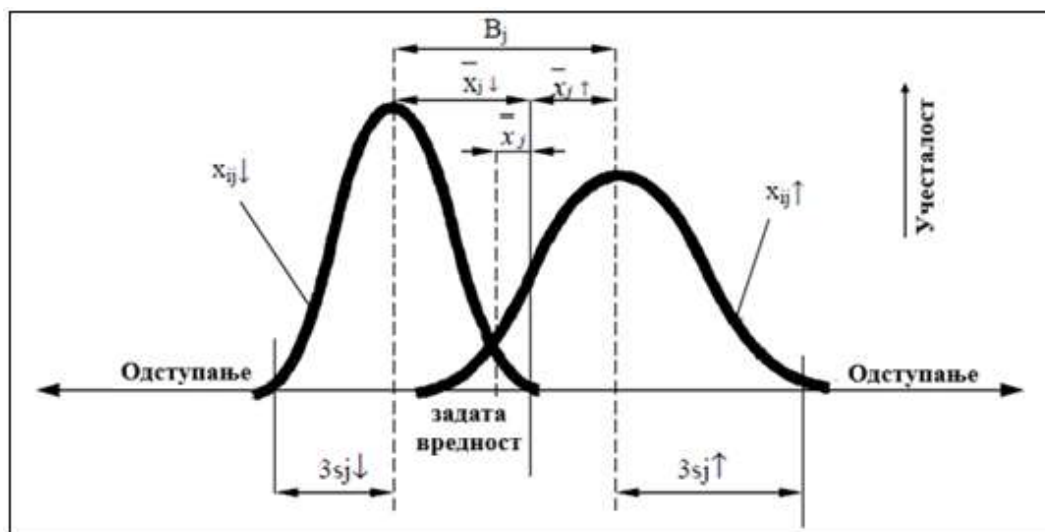
Одступање од позиције, X_{ij} – стварна крајња позиција покретног дела машине минус мерна позиција:

$$X_{ij} = P_{ij} - P_i$$

Смерови позиционирања за изабрану мерну позицију означавају се са:

- ↑ - позитиван смер (у правцу кретања позитивне осе +X, +Y, +Z),
- ↓ - негативан смер (у правцу кретања негативне осе -X, -Y, -Z).

Како се ради о грешкама случајног карактера, расподела ових вредности има облик нормалне расподеле, као што се може видети на слици 3-13.



Слика 3-13. Расподела резултата мерења у једној мерној позицији „j“

За овако дефинисан закон расподеле измерених вредности у једној позицији, при позиционирању у оба смера могуће је израчунати поједине параметре, како следи у наставку:

Средња вредност појединачних измерених вредности при позиционирању из позитивног, односно из негативног смера - $\bar{x}_i \uparrow$ и $\bar{x}_i \downarrow$

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (12)$$

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (13)$$

Централна вредност одступања у позицији „i“ при двосмерном позиционирању представља систематско одступање од вредности у позицији „i“ - $\bar{x}_i$

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (14)$$

Распон одступања средњих вредности у позицији „i“ - B_i

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (15)$$

Максимални распон одступања средњих вредности - B

$$B = \max[|B_i|] \quad (16)$$

Средња вредност распона одступања - $\bar{B}$

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (17)$$

Стандардна девијација (поновљивост) измерених вредности у позицији „i“ при позиционирању из позитивног односно негативног смера - s_i↑ и s_i↓. Обухвата серију од n прилаза позицији у једном смеру P_i.

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_{ij} \uparrow)^2} \quad (18)$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_{ij} \downarrow)^2} \quad (19)$$

Једносмерна поновљивост позиције у правцу осе у позицији "i" - $R_i \uparrow$ и $R_i \downarrow$

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (20)$$

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (21)$$

Вредност се може интерпретирати и тако, као интервал између максималног и минималног одступања од средње вредности са интервалом поверења од 95,45%, тј. 2σ .

Двосмерна поновљивост позиције у правцу осе - R_i

$$R_i = \max[2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (22)$$

Једносмерна поновљивост позиције у правцу осе - $R \uparrow$ и $R \downarrow$

$$R \uparrow = \max[R_i \uparrow] \quad (23)$$

$$R \downarrow = \max[R_i \downarrow] \quad (24)$$

Максимална двосмерна поновљивост позиције у правцу осе - R

$$R = \max[R_i] \quad (25)$$

Једносмерна систематска грешка позиционирања у правцу осе - $E \uparrow$ и $E \downarrow$

$$E \uparrow = \max[x_i \uparrow] - \min[x_i \uparrow] \quad (26)$$

$$E \downarrow = \max[x_i \downarrow] - \min[x_i \downarrow] \quad (27)$$

Двосмерна систематска грешка позиционирања у правцу осе - E

$$E = \max[x_i \uparrow; x_i \downarrow] - \min[x_i \uparrow; x_i \downarrow] \quad (28)$$

Максимална двосмерна грешка позиционирања у правцу осе - M . Разлика између алгебарских максимума и минимума највећих двосмерних вредности позиционирања у било којој позицији дуж осе.

$$M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] \quad (29)$$

Једносмерна грешка позиционирања у правцу осе - $A \uparrow$ и $A \downarrow$

$$A \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (30)$$

$$A \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (31)$$

Двосмерна грешка позиционирања у правцу осе - A . Вредност добијена комбиновањем максималне двосмерне систематске грешке позиционирања и одступања од поновљивости при двосмерном позиционирању коришћењем фактора проширења $k=2$.

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow; \bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (32)$$

Показатељи оцењивања тачности позиционирања према препоруци VDI/DGQ 3441 и ISO стандарда су у неким случајевима исти или слични. Стручна литература [76], [77] се бавила поређењем тих стандарда и анализом разлика између критеријума за вредновање.

Термини који су идентични у обе методе испитивања су:

- Средња вредност појединачних измерених вредности при позиционирању из позитивног односно из негативног смера - $\bar{x}_i \uparrow$ и $\bar{x}_i \downarrow$
- Стандардна девијација (поновљивости) измерених вредности у позицији "i" при позиционирању из позитивног, односно негативног смера - $s_i \uparrow$ и $s_i \downarrow$
- Централна вредност одступања у позицији "i" при двосмерном позиционирању представља систематско одступање у позицији "i" - $\bar{x}_i$

У односу на ISO 230-2 стандард уводе се нове ознаке и једначине за следеће термине:

Средња вредност стандардне девијације у позицији x_j - $\bar{s}_j$

$$\bar{s}_j = \frac{s_j \uparrow + s_j \downarrow}{2} \quad (33)$$

Распон одступања појединачних вредности позиционирања у позицији „j“ - P_{sj}

$$P_{sj} = 6\bar{s}_j \quad (34)$$

Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{smax}

$$P_{smax} = P_{sjmax} \quad (35)$$

Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a

$$P_a = |\bar{x}_{imax} - \bar{x}_{imin}| \quad (36)$$

Идентичан са М из ISO 230-2.

Распон одступања позиционирања - P

$$P = [\bar{x}_i + 1/2(U_j + P_{sj})]_{max} - [\bar{x}_i - 1/2(U_j + P_{sj})]_{min} \quad (37)$$

Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j

$$U_j = |\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow| \quad (38)$$

Идентичан са V_i из ISO 230-2.

Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$

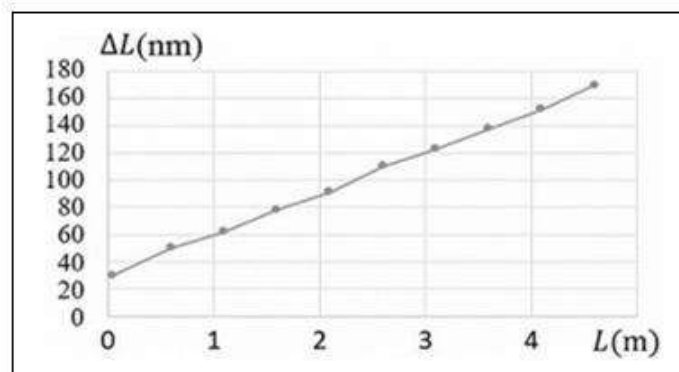
$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j \quad (39)$$

Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - U_{max}

$$U_{max} = \max[U_j] \quad (40)$$

Идентичан са В из ISO 230-2.

Мерењима је доказано да се повећањем величине, односно дужине мерне осе, линеарно смањује тачност мерења [78]. На слици 3-14. може се видети да се код оса чија дужина прелази 2000 mm грешка, која се додатно јавља у мерењима, достиже вредност од 0,1 μm (100 nm), чиме она постаје значајна за резултате тачности позиционирања. Због тога стандард ISO 230-2:2014 мерења дели на осе дужине испод и изнад 2000 mm.



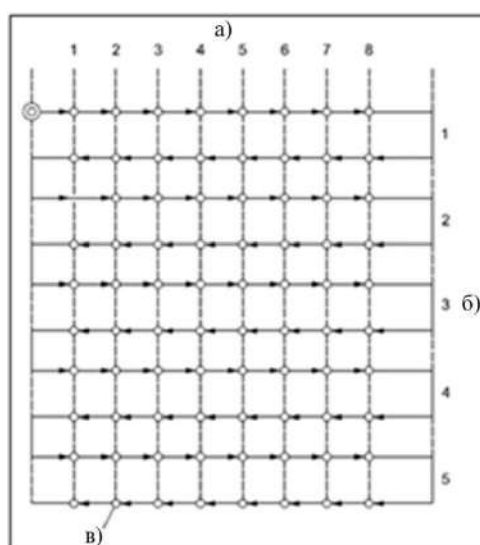
Слика 3-14. Флукуације измереног растојања ΔL у зависности од мерне дужине L [78]

3.4 Стратегије кретања при заузимању мерних позиција

С обзиром на то да се завојно вретено са рецикулацијом куглица загрева услед ослобађања енергије трења током мерења, вретено се издужује током мерења, што се одражава на резултат мерења када се користе системи за индиректно мерење позиције. Стога су у литератури [79] дефинисане три различите стратегије кретања за заузимање мерних позиција. Стратегије се могу назвати још и методама кретања.

За све методе мерења важно је да се евидентира што више мерних места и да се свакој мерној позицији приступи најмање пет пута. Да би се избегле периодичне грешке, размаци мерних тачака треба да буду различити. Смернице и стандарди истичу да се мора поштовати толеранција положаја коју је одредио произвођач машине (дозвољено укупно одступање у радном опсегу осе машине) без обзира на метод мерења [79]. Број позиција за мерење се означава са m , а број циклуса приступања мерним позицијама се означава са n .

Линеарну методу, која се често користи, а и стандард ISO 230-2 је препоручује, карактерише кратка дужина путање мерења и кратко време мерења за цео поступак. На слици 3-15. приказан је принцип приступања мерним позицијама линеарном методом кретања.



- а) Позиција i ($m=8$)
- б) Циклус j ($n=5$)
- в) Мерне позиције

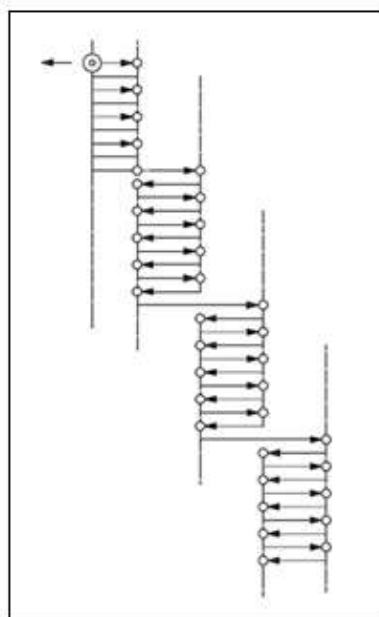
Слика 3-15. Линеарна метода кретања [25]

Због времена потребног за приближавање првој мерној позицији из различитих смерова, издужење завојног вретена је приметно као резултат загревања, у опсегу промене смера и промене положаја. Укупно време мерења за линеарну методу кретања од тренутка покретања до тренутка повратка у првобитну позицију може се одредити помоћу следеће једначине

$$T_{m,lin.} = 2nmT_p + \frac{2nL}{v_f} \quad (41)$$

где је v_f помак.

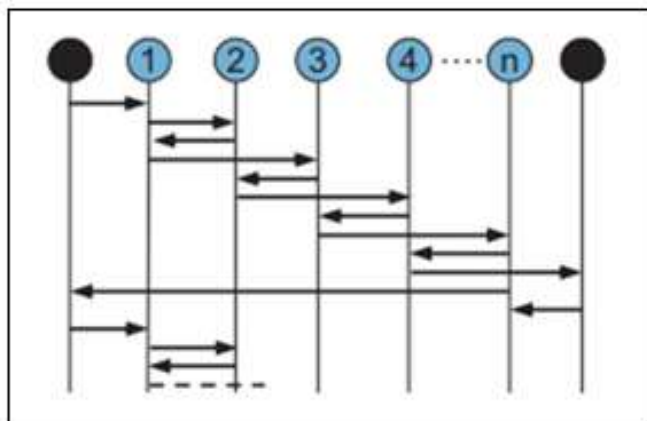
Друга метода која се помиње у стручној литератури [25,42,79] је метода клатна, чији принцип је приказан на слици 3-16.



Слика 3-16. Метода клатна [5]

Методом клатна се остварује најмањи померај када се свим мерним позицијама приближава из различитих смерова, али и већи временски померај за бележење различитих мерних позиција. Утицај температуре се појављује као систематска компонента грешке у одступању током позиционирања, док на опсег промене смера и распон позиције готово не утиче загревање машине. Укупно време мерења од тренутка покретања до тренутка повратка у првобитну позицију се, за методу клатна, може одредити помоћу једначине (42).

$$T_{m,klat.} = 2n(m-1)T_p + \frac{2(n+1)L}{v_f} \quad (42)$$



Слика 3-17. Метода ходочасника [16]

Код методе ходочасника (други назив према [16] је метода корака), слика бр. 3-17. време померај при приступању свим мерним позицијама из различитих смерова је мало, али због веће дужине мерне путање време мерења за цео поступак мерења је дуже. Ефекти температуре на месту промене смера се надокнађују, али се промене дужине повезане са температуром, јављају унутар испитиване осе, што је приметно у делу систематске грешке. Укупно време мерења од тренутка покретања до тренутка повратка у првобитну позицију се, за методу ходочасника, може одредити помоћу следеће једначине

$$T_{m,hod.} = 2nmT_p + \frac{n(3L - l_0 - l'_0)}{v_f} \quad (43)$$

где је l_0 растојање између почетне позиције (улазни положај) мерења и прве мерене позиције, а l'_0 је растојање између последње мерне позиције и излазне позиције.

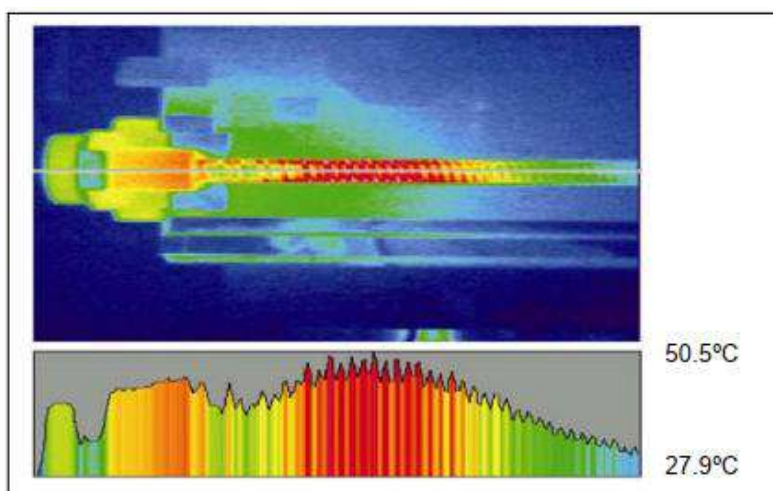
У стручној литератури [80] приказани су резултати истраживања избора методе кретања на резултате провере тачности позиционирања МА. Посматрана су у исто време три различита фактора, метода кретања, брзина линеарног померања и време заустављања. Према речима аутора, брзина линеарног померања и време заустављања нису имали значајан утицај на све посматране параметре, па се они могу и занемарити. Глобално гледајући, метода кретања је имала највећи утицај на грешке систематског карактера, као што су двосмерна систематска грешка позиционирања и максимална двосмерна грешка позиционирања. Најбољи резултати су добијени када се експеримент изводио методом клатна, а линеарна метода и метода ходочасника су имале слично неутралан утицај на разлике по питању тачности.

3.5 Мерни услови и оптимална поставка инструментације

Одабир коефицијента термичког ширења може да има значајан утицај на резултате мерења. При одабиру вредности коефицијента за одређени део МА првенствено треба да се узму у обзир подаци добијени од произвођача опреме. У случају да нису доступни, коефицијенте треба усвојити из одговарајућих референтних табела. Као пример утицаја грешке приликом усвајања података, може се узети грешка која настаје ако је стварна вредност коефицијента $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, а приликом мерења буде коришћена вредност $6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Тиме се у комплетно испитивање уноси систематска додатна грешка од 1

ppm/°C. У случајевима када су температуре много изнад стандардне, грешка постаје значајна. Код елемената МА састављених од различитих материјала (хибридних елемената) и композитних материјала, треба обратити посебну пажњу на одабир коефицијента термичког ширења због температурне зависности [81].

Стандард испитивања тачности машина алатки прописује услове испитивања према којима се мерења геометријских грешака МА врше у радном стању машине. То значи да је потребно обезбедити услове околине и стања машине који су слични или исти условима експлоатације. Први корак представља загревање МА до постизања стабилне радне температуре током целог процеса обраде. Тако се обезбеђују услови који умањују ефекте топлотног ширења изазваног температурним варијацијама. Циклус загревања у случајевима испитивања радне тачности или испитивања главног вретена машине треба да буде реализован у складу са условима рада ако је могуће. То је неопходно због тога што загревање, при брзинама помоћног кретања или главног кретања које су значајно различити у односу на радне, не долази до стабилних вредности температуре, што доводи до грешака у топлотном ширењу [13]. Завојна вретена са рецикулацијом куглица, која се користе у подсистемима за помоћно кретање машина алатки, конвертују ротационо кретање у линеарно са око 90% ефикасности [82]. Преостали део енергије се претвара у топлоту и због тога вретено постаје извор топлоте унутар МА, што се може видети на слици 3-18. Термалне варијације унутар кугличног вретена се у циљу анализе у процесу пројектовања машина могу симулирати [83]. Топлотна дистрибуција и деформација се мењају највише у аксијалном смеру. Поменута појава на директан начин утиче на грешке у позиционирању. Критичне тачке у вези са загревањем вретена су места контакта са лежајевима. Поред вретена, други извори топлоте су и мотори, који обезбеђују кретање елемената МА.



Слика 3-18. Слика направљена са термо камером у току рада кугличног завојног вретена [13]

Места, на која се постављају температурни сензори, бирају се у складу са положајем топлотних извора, као и у складу са циљевима мерења које обављају.

Сензори који мере температуру, притисак и влажност ваздуха, приликом мерења се постављају тако да не буду на већој висини него ласер и да буду довољно далеко од свих спољних извора топлоте и извора турбуленције. Тако се обезбеђује мерење у реалним условима околине.

Сензори за мерење температуре материјала за компензацију коефицијента топлотног ширења треба да се поставе на места која одређују основни циљ мерења. Према [58], основни циљеви мерења могу бити следећи:

- 1. циљ - калибрација МА у складу са националним или интернационалним стандардима прихватљивости машина алатки.

Неопходно је да се поштују процедуре дефинисане стандардом. Описани су циклуси загревања, који експанзиони коефицијенти треба да се користе, и где треба да се ставе сензори температуре.

- 2. циљ - процена тачности позиционирања линеарне осе за случај да МА ради у стандардним условима.

Током монтаже МА, превоза или рекалибрације, долази до изражаја поменутог циља. Други циљ често подудара са првим циљем. Да би се постигао овај циљ, сензоре температуре материјала потребно је поставити на радни сто или на други масиван део машинске структуре који није близу било ком извору топлоте, као што је мотор, зупчаници, куглично вретено и остало. За коефицијент термичког ширења треба изабрати вредност која најбоље описује управљачку повратну спрегу.

- 3. циљ - процена тачности повратне спреге линеарних оса МА.

Процена тачности повратне спреге се користи код дијагностике елемената управљачке повратне спреге МА. Врши при претпоставци да су провере са циљевима 1. и 2. извршене, и потребно је урадити проверу тачности система повратне спреге на стандардној температури. У овом случају, ласерски зрак се поставља што паралелније и ближе стварној оси која се проверава. Сензор температуре се треба поставити што ближе систему повратне спреге и коефицијент термичког ширења треба поставити на вредност која описује повратну спрегу.

- 4. циљ - процена тачности обраде на МА.

Процедура је корисна за оптимизацију геометријске тачности обратка који се производи у условима термички неконтролисане спреге, када се коефицијент термичког ширења обратка и система повратне спреге МА значајно разликују. Коефицијент термичког ширења треба поставити на вредност која описује обрадак. Сензор температуре треба поставити на локацију где је температура најприближнија температури обратка.

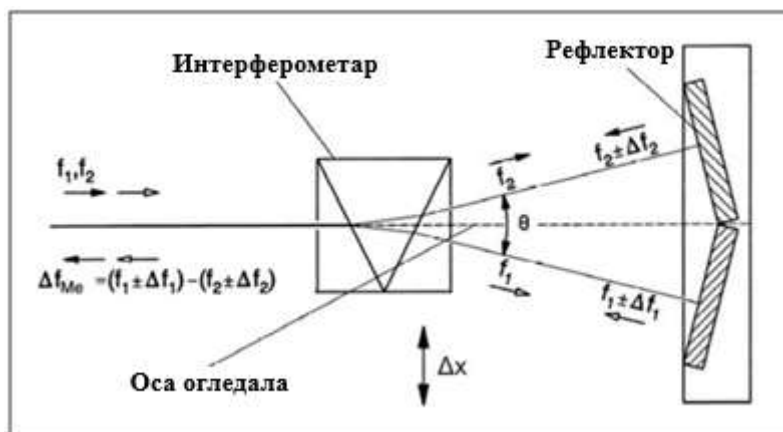
Разлике у резултатима мерења, која се врше у складу са претходно дефинисаним циљевима, могу бити значајни, нарочито ако се мења температура машине у току рада.

4. поглавље

Принцип мерења правости помоћу ласерског интерферометра

Метода мерења правости помоћу ласерског интерферометра је обухваћена стандардом ISO 230-1:2012 [84].

Двофреквентни ласерски зрак, који излази из ласерске главе, преноси се кроз призматични оптички интерферометар. Како је композитни индекс рефракције (преламања светлости) призме различит у две површине поларизације, које разликују фреквенције ласера f_1 и f_2 , f_1 и f_2 излазе из призме под малим углом θ ка рефлектору, где се рефлектују од две површине огледала. Унутар рефлектора се налазе огледала постављена под прецизним углом, који одговара углу призматичног интерферометра, f_1 и f_2 се рекомбинују унутар призме и, коаксијално са излазним зраком, враћају до парцијалног огледала у адаптеру правости. Највећи део повратног сигнала се рефлектује ка доњем огледалу, које га даље одбија у доњи отвор на ласерској глави. На слици 4-1. приказан је принцип мерења правости помоћу ласерске интерферометрије. Мери се релативни померај Δx између интерферометра и осе огледала, који се налази у рефлектору, настао услед одступања од правости посматране осе. Да ли ће мерење бити у хоризонталној или вертикалној равни зависи од оријентације огледала и интерферометра.



Слика 4-1. Принцип мерења правости помоћу ласерског мерног система [79]

Релативни померај између призме и огледала, утиче на разлику у оптичким дужинама путања између два ласерска зрака проузрокујући тако разлику у бројевима акумулираних наизменичних црно-белих пруга, добијених интерференцијом или дифракцијом. Померање склопа огледала, у односу на ласерске зраке, доводи до продужавања путање ласерског зрака са исте стране на коју се склоп огледала помера, и до скраћења путање ласерског зрака са супротне стране. Померањем интерферометра, у односу на осу склопа огледала, долази до промене дужине оптичке путање унутар призме, која је пропорционална разлици индекса рефракције специфичних за сваку

површину поларизације. У оба случаја, за релативно померање x , управно на правац кретања зрака, број акумулираних црно-белих пруга ће бити једнак $2 \sin \frac{\theta}{2}$, где θ представља угао између ласерских зрака. Међутим, ако се ласерски зрак помера у односу на осе огледала, свака промена дужине путање у ваздушном простору балансира се компензацијом разлике оптичке дужине путање унутар призме.

У случају да се интерферометар помера у односу на огледало, онда мали помераји интерферометра, по свим правцима и осама, не доводе до разлике у путањама и тако не утичу на тачност мерења.

Да би се добила тачна вредност на дисплеју, број црно-белих пруга мора бити помножен са реципрочном вредношћу израза $2 \sin \frac{\theta}{2}$, која за коришћену вредност θ износи 36. Електронски проширивач резолуције се користи да би обавио овај посао, а θ је око 11,5 степени за интерферометре кратког опсега, а један десети део код дугог опсега.

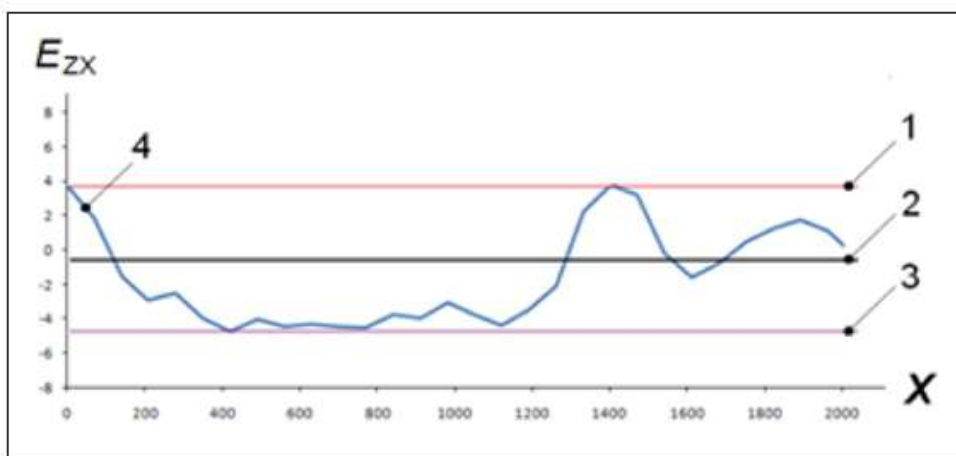
Мерење правости се врши n пута дуж осе која се проверава у оба смера. Размаци између мерних позиција не смеју бити већи од 25 mm за осе дужине до 250 mm. За дуже осе, интервал, тј. размак између мерних тачака не сме бити већи од 1/10 дужине осе.

Одступање од правости осе је растојање функционалне, стварне позиције мерења од референтне праве линије путања дуж осе. Величина којом се оперише, приликом одређивања одступања од правости, јесте средња вредност одступања од правости у свакој мерној позицији.

Можемо разликовати три начина одређивања референтне праве линије:

1. Средња вредност референтне праве линије

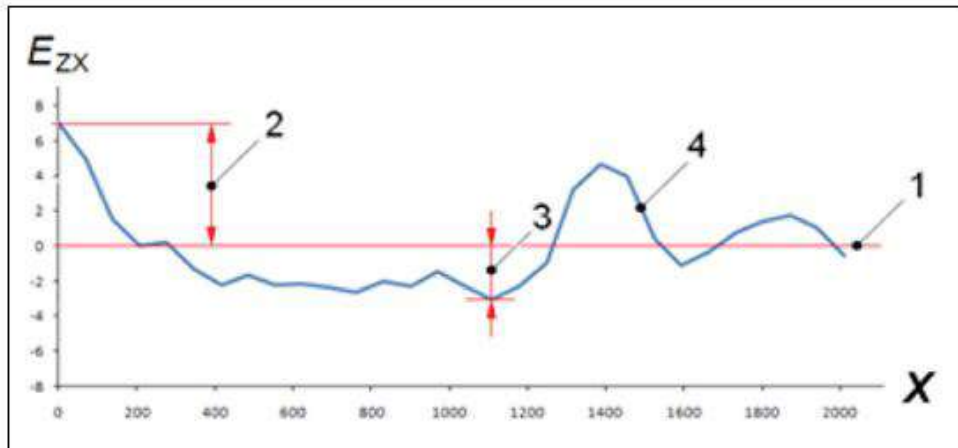
Средња вредност референтне праве линије је аритметичка средина две паралелне праве у равни провере правости која обухвата измерене вредности одступања правости са најмањом разликом. На слици 4-2. приказан је, кроз пример за једну имагинарну X осу, принцип дефиниције референтне праве линије помоћу средње зоне минимума. Ознаке на датој слици имају следећа значења: X – имагинарна оса, E_{zx} – правост X осе у правцу Z осе, 1 – Горњи минимум референтне зоне праве линије, 2 – Средња вредност референтне праве линије, 3 – Доњи минимум референтне зоне праве линије.



Слика 4-2. Референтна права средње вредности [84]

2. Референтна линија најмањих квадрата

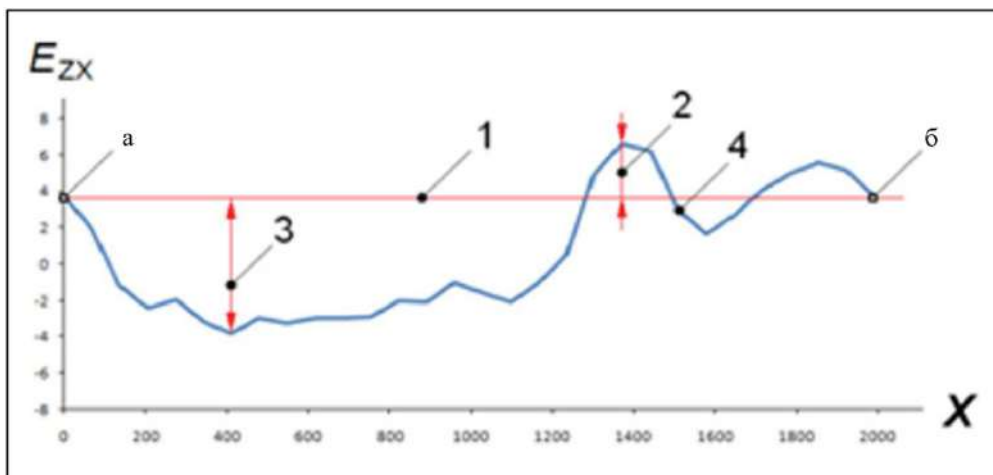
Референтна линија најмањих квадрата је права линија, која се одређује помоћу методе најмањих квадрата. На слици 4-3. приказан је кроз пример, за једну имагинарну X осу, принцип дефиниције референтне праве линије помоћу методе најмањих квадрата. Ознаке на датој слици имају следећа значења: X – имагинарна оса, E_{ZX} – правост X осе у правцу Z осе, 1 – Референтна права линија одређена помоћу методе најмањих квадрата, 2 – највеће позитивно одступање правости, 3 – највеће негативно одступање правости, 4 – измерена вредност одступања правости.



Слика 4-3. Референтна права линија дефинисана методом најмањих квадрата [84]

3. Референтна линија дефинисана крајњим позицијама

Референтна линија дефинисана крајњим позицијама је права линија, која повезује прву и последњу позицију мерења правости осе. На слици 4-4. приказан је пример за једну имагинарну X осу, принцип дефиниције референтне праве линије спајањем прве и последње позиције мерења. На слици, ознаке имају следећа значења: X – имагинарна оса, E_{ZX} – правост X осе у правцу Z осе, 1 – Референтна права линија одређена помоћу крајњих тачака, 2 – највеће позитивно одступање правости, 3 – највеће негативно одступање правости, 4 – измерена вредност одступања правости, а – прва позиција мерења, б – последња позиција мерења.



Слика 4-4. Референтна права линија дефинисана крајњим позицијама

Референтна линија према овој процедури одређује се помоћу једначине праве кроз две тачке, једначина (44), где X координата прве тачке (x_1) одговара првој мерној позицији по посматраној осе, X координата друге тачке (x_2) одговара последњој мерној позицији по посматраној осе, Y координата прве тачке (y_1) одговара очитаној вредности са ласерског интерферометра у првој мерној позицији по посматраној осе и Y координата друге тачке (y_2) одговара очитаној вредности са ласерског интерферометра у последњој мерној позицији по посматраној осе.

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x_1\right) \quad (44)$$

За мерења правости осе, израчунавање одступања од правости врши се на два начина, у зависности од тога да ли је извршено поравнање ласерског зрака и посматране осе машине или не.

- Поравнавање је извршено када је у првој и последњој позицији мерења на мерној осе одступање од правости 0. У том случају одступање од правости се одређује према обрасцу:

$$\Delta P_{ZX} = x_{sr,max} - x_{sr,min} \quad (45)$$

где је ΔP_{ZX} одступање од правости X осе мерено у правцу Z осе, $x_{sr,max}$ максимална средња вредност резултата мерења одступања од правости X осе мерено у правцу Z осе, $x_{sr,min}$ минимална средња вредност резултата мерења одступања од правости X осе мерено у правцу Z осе

- Уколико није извршено поравнавање осе машине са ласерским зраком, онда одступање од правости средње вредности резултата мерења одређујемо према обрасцу:

$$\Delta P_{ZX} = X_{LMS} - X_S \quad (46)$$

где је ΔP_{ZX} – одступање од правости X осе мерено у правцу Z осе, X_{LMS} – вредност коју показује ласерски показивач, X_S – вредност која се прорачунава због нагиба осе машине, у односу на ласерски зрак, при чему се она одређује помоћу једначине

$$X_S = m \cdot z + b \quad (47)$$

где је m – коефицијент правца праве која спаја прву и последњу позицију мерења, z – величина померања дуж осе Z у датој мерној позицији, b – одсечак на X осе, која се одређује тако да за $Z = 0$ буде $X_S = 0$.

Ибараки и Хируја [85] су развили систем по којем се у исто време могу мерити 2D грешке кретања линеарних оса МА помоћу регулације правца ласерског интерферометра. По овој процедури, у исто време се може проверавати тачност позиционирања, правост и равност појединих линеарних оса. Врше се два испитивања у исто време: 1) директно мерење грешке у позиционирању две линеарне осе и 2) мерење растојања до ретрорефлектора, који је позициониран на правоугаоној путањи, при чему се стално регулише правац ласерског зрака ласерског интерферометра. Предност система је у томе што је потребан један ласерски интерферометар, и кроз једну експерименталну поставку се може проверити више показатеља МА. Ово у великој мери убрзава и поједностављује проверу тачности МА.

На проверу правости, утицај има начин монтаже оптичких компонената. Постоји разлика у случајевима када се ретрорефлектор или интерферометар монтира на радни сто машине. Тако се, према [86], разликују две поставке:

- **Поставка А** – Интерферометар је непокретан. Генерално, поставка би се требала користити у случају кад се проверава релативно померање између прибора и главног вретена. Распоред даје увид у тачност обрадака који ће бити обрађен на машини. пошто показује грешке правости главног вретена релативно у односу на координатни систем обратка. Поставка је препоручена у америчком стандарду ASME B5.54 када се проверавају машине са покретним радним столом.
- **Поставка Б** – Ретрорефлектор је непокретан. Поставка је препоручљива када се траже геометријске грешке у једној позицији машине. На пример, када се прати путања једне конкретне тачке покретног радног стола наспрам координатног система машине. Поставка даје информације о квалитету конструкције машине, али не и нужно са коликом тачношћу ће вршити обраду.

5. поглавље

Одређивање мерне несигурности система ласерског интерферометра

Под мерном несигурношћу се подразумева максимална прихватљива грешка мерења током мерења са одређеном вероватноћом., тако да несигурност означава опсег грешке са датом вероватноћом [13].

Према [87], дефиниција несигурности, наведена у Међународном речнику метрологије, не даје потпуно и задовољавајуће објашњење о значењу појма и потребне су корекције. Дефиниција мерне несигурности треба да обухвати опис по коме се мерна несигурност посматра као дескриптивни параметар закључка о томе где је права вредност мерне величине.

Деф.: Закључује се, из низа хипотеза, укључујући физичке и статистичке моделе, при претпоставци да никаква непозната систематска грешка не утиче на мерење, да је мерна несигурност, према експерименталним резултатима, ненегативан параметар који карактерише опсег вредности унутар ког се налази права вредност мерне величине.

Несигурност је, према томе, израз, којим се објашњава чињеница да мерна величина и резултат, добијен мерењем, немају егзактну вредност, већ представља дисперзију бесконачно великог броја могућих вредности око једног резултата, који је конзистентан из перспективе запажања, података и познавања физичког света и са променљивим нивоима кредибилитета могу се описати мерне величине [88].

Уколико се подаци, добијени мерењем, могу описати Гаусовом кривом вероватноће, онда се измерена вредност x може описати помоћу очекиване средње вредности $\bar{x}$ и опсегом грешке Δx у општем облику:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (48)$$

У инжењерској пракси уобичајено је користити статистичку значајност од 95%, и у том случају

$$\Delta x = ts = 1,96s \approx 2s \quad (49)$$

где је t фактор из Студентовог t -теста, а s стандардна девијација [89].

Према [88], могу се разликовати Тип А и Тип Б евалуације стандардне несигурности. Евалуацију Тип А користимо у случају када најбоља доступна процена очекивања или очекиване вредности μ_k променљиве величине x и за које је n независних запажања x_k добијена под истим условима мерења је аритметичка средина или просек $\bar{x}$ од n запажања:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (50)$$

Експериментална варијанса p посматрања, која процењује варијансу σ^2 расподеле x се одређује на следећи начин:

$$s^2(x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (51)$$

Позитивни корен варијансе се назива експерименталном стандардном девијацијом $s(x_k)$.

Варијанса средње вредности се може одредити помоћу следеће једначине:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_k)}{n} \quad (52)$$

Када је x_i одређен на основу аритметичке средине p независних поновљених посматрања, $u(x_i) = s(\bar{x})$ представља стандардну несигурност добијену из евалуације Тип А.

Евалуација Тип Б се користи у случају, када за процену x_i од улазне величине X_i , која се није добила помоћу поновљених посматрања, повезана процењена варијанса или стандардна несигурност је одређена помоћу научне процене основане на доступним информацијама о могућем променљивости вредности X_i . Скуп информација на основу које се процењује варијанса може да садржи: податке претходних мерења, искуствене податке, опште познавање понашања и особина релевантних материјала и инструмената, спецификације произвођача, податке обезбеђене од стране калибрационих тела, као и несигурности повезане са референтним подацима узетих из приручника.

Опсег грешке или мерна несигурност се одређује на следећи начин [90]:

$$U = k u_c \quad (53)$$

где је u_c комбинована дисперзија, а k је фактор покривености.

Комбинована дисперзија:

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + \sum u_i^2} [\mu m] \quad (54)$$

u_r – сума утицајних фактора који имају строго позитивну корелацију $[\mu m]$

$$u_r = \sum u_j \quad (55)$$

u_j – дисперзија утицајних фактора који имају строго позитивну корелацију $[\mu m]$

u_i – дисперзија утицајних фактора који нису у корелацији $[\mu m]$

Дисперзија u_i се може добити статистичком анализом експерименталних података или кроз друге методе, као што су знање, искуство и научно нагађање. У случају да процена даје могући опсег утицајних фактора који нису у корелацији, онда се дисперзија

одређује помоћу горње a^+ и доње a^- границе дискретне расподеле (одговара Тип Б евалуацији):

$$u_i = \frac{a^+ - a^-}{2\sqrt{3}} \quad (56)$$

Фактор покривености, који се одређује помоћу Студентовог t фактора за ефективни степен слободе V_{eff} на нивоу поверења p .

$$k = \frac{1}{2} t_{(1+p)} x V_{eff} \quad (57)$$

Ефективни степен слободе се може одредити помоћу Welch-Satterthwaite формуле [88], која гласи:

$$V_{eff} = \frac{u_{c(y)}^4}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u_i^4(x_i)}{v_i}} \quad (58)$$

Стандард ISO 230-9:2005 дефинише вредност $k=2$, тако да у даљим прорачунима ће се та вредност користити. Ова вредност одговара статистичкој значајности вероватноће од 95%.

Мерна несигурност средње вредности одређује се посебно за факторе који имају строго позитивну корелацију и посебно за факторе који нису у корелацији.

- За факторе који имају строго позитивну корелацију

$$u(\bar{x}) = \sum \frac{\partial \bar{x}}{\partial x_i} \cdot u_{xj} \quad (59)$$

$$u(\bar{x}) = u_x$$

- За факторе који нису у корелацији

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{xj}^2} \quad (60)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} u_x$$

где је n број поновљених мерења.

Несигурност стандардне девијације се одређује на следећи начин:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (61)$$

$$u(s) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial s}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{xi}^2} = u_x \sqrt{\frac{1}{n-1}} \quad (62)$$

где је s стандардна девијација, n број поновљених мерења, а $u(s)$ несигурност стандардне девијације.

Мерна несигурност током одређивања тачности позиционирања је опширно описана у оквиру стандарда ISO 230-9:2005.

На мерења линеарног позиционирања, према [90], значајан утицај имају следећи фактори:

1. Калибрација мерног инструмента - u_d .
2. Паралелност мерног инструмента са осом алатке МА која се проверава - u_m .
3. Компензација температуре МА када је температура околине различита од 20°C - u_T .
4. Грешка промене околине $^1(E_{VE})$ у току мерења, то јесте утицај промене температуре и густине ваздуха на мерни инструмент и/или на МА која се проверава - u_{EVE} .
5. Поновљивост постављања мерне инструментације мерног инструмента - u_s .

Несигурност једне позиције мерења се одређује комбинацијом ових пет фактора несигурности, који нису у корелацији. Тако у складу са једначином (54) мерна несигурност једне дате позиције мерења тачности позиционирања помоћу ласерског интерферометра се одређује на следећи начин:

$$u_p = \sqrt{u_d^2 + u_m^2 + u_T^2 + u_{EVE}^2 + u_s^2} [\mu m] \quad (63)$$

Већина фактора зависи од дужине мерења, тако да је несигурност различита за сваку посматрану позицију дуж осе МА. Као прва процена узима се у обзир несигурност најудаљеније позиције од ласерског интерферометра.

1. Несигурност изазвана калибрацијом мерног инструмента - u_d .

Мерна инструментација се треба редовно калибрисати. После калибрисања, овлашћена институција издаје сертификат о калибрацији, у коме су назначене вредности корекционог фактора k и несигурности калибрације $U_{calibration}$. Калибрација се врши према динамици коју прописује произвођач мерне опреме, али најчешће на сваких годину дана.

$$u_d = \frac{U_{calibration}}{k} [\mu m] \quad (64)$$

У случају да калибрација није извршена уопште или је од последњег калибрисања прошло више времена него је то дефинисао произвођач, могу се користити подаци о мерној несигурности дати од стране произвођача. У том случају се мерна несигурност одређује на основу тачности мерног инструмента. Код ласерске интерферометрије важно је истаћи да на мерну несигурност, поред тачности инструмента, утиче још и резолуција и стабилност таласне дужине ласерског зрака.

Несигурност се задаје као конкретна вредност у μm или као скала са граничним вредностима a^+ и a^- ($\pm a$) у ppm.

¹ Напомена аутора: У поглављу 3.1 претходно већ је дефинисано, да под околином се подразумевају микроклиматски услови у непосредној близини, који директно утичу на рад посматране машине.

Резолуција спада у факторе које нису у корелацији, а стабилност таласне дужине и тачност мерног инструмента су у строго позитивној корелацији. Сходно томе, несигурност мерног инструмента се одређује помоћу следећих једначина:

$$u_d = \sqrt{u_{d,estimate}^2 + u_{d,resolution}^2} [\mu m] \quad (65)$$

$$u_{d,estimate} = u_{accuracy} + u_{wavelength} [\mu m] \quad (66)$$

$$u_{accuracy} = \frac{a_{accuracy}^+ - a_{accuracy}^-}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{L}{1000} [\mu m] \quad (67)$$

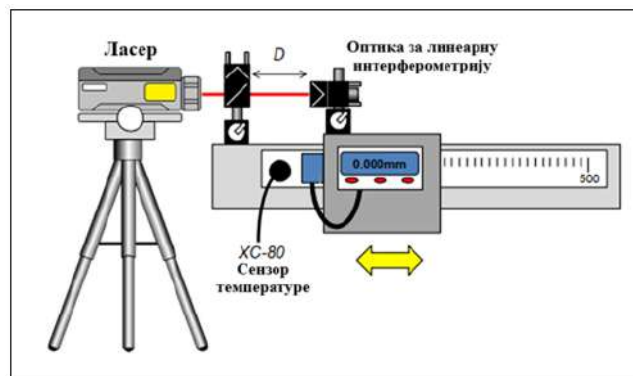
$$u_{wavelength} = \frac{a_{wavelength}^+ - a_{wavelength}^-}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{L}{1000} [\mu m] \quad (68)$$

$$u_{d,resolution} = \frac{r}{2\sqrt{3}} [\mu m] \quad (69)$$

где је $u_{d, estimate}$ процењена несигурност мерног инструмента из фактора који су у строго позитивној корелацији, $u_{d, resolution}$ представља несигурност мерног инструмента изазвану резолуцијом r , L [mm] је мерна дужина, $a_{accuracy}^+$ је вредност горње границе скале тачности инструмента, $a_{accuracy}^-$ је вредност доње границе скале тачности инструмента, $a_{wavelength}^+$ је вредност горње границе скале стабилности таласне дужине, $a_{wavelength}^-$ је вредност доње границе скале стабилности таласне дужине.

Грешка одређивања нулте позиције мерења (енг. dead-path error)

Да би се ефикасно компензовале грешке мерења позиционирања линеарних оса у нестабилним условима околине (температура, притисак и релативна влажност ваздуха), веома је важно да се интерферометар и ретрорефлектор поставе веома близу један другог, и да се тада дефинише нулта позиција мерења, као што је приказано на слици 5-1. Растојање између ретрорефлектора и интерферометра у нултој позицији је означена са D . Ако оптичке компоненте нису довољно близу једна другој када се дефинише нулта позиција, и околина се притом мења, тада ће ласерско читавање показивати одступања у нултој позицији. Одступање најчешће настаје због термодинамичких промена ваздуха и материјала оптичких елемената [53]. Грешка нулте позиције мерења се може занемарити у случају да је мерење у таквим контролисаним условима, у којима промена температуре износи максимално $\pm 0,5$ °C, промена притиска максимално ± 1 hPa, а промена релативне влажности максимално $\pm 20\%$ и да $D \leq 10$ mm [78].



Слика 5-1. Одређивање нулте позиције мерења [53]

У индустријским условима често се не може поставити мерна инструментација тако да растојање D буде мање од 10 mm. У том случају, може се урадити процена несигурности због грешке нулте позиције мерења. У табели 5-1. приказане су вредности за апроксимацију према променама околине.

Табела 5-1. Вредности апроксимације за одређивање несигурности изазваним нултом позицијом мерења [53]

Коефицијент промене	Величина
$\Delta a_{\text{pressure}} [\mu\text{m}/\text{mbar} \cdot \text{mm}]$	0,27
$\Delta a_{\text{temperature}} [\mu\text{m}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}]$	0,96
$\Delta a_{\text{humidity}} [\mu\text{m}/10\% \cdot \text{mm}]$	0,1

Фактори температуре, притиска и релативне влажности нису у корелацији [39]. Несигурности које произлазе из њих се могу одредити на следећи начин:

$$u_{DP,p} = \Delta p_{DP} \cdot D \cdot u(a_p) [\mu\text{m}] \quad (70)$$

$$u(a_p) = \frac{\Delta a_{\text{pressure}}}{2\sqrt{3}} \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{mbar} \cdot \text{mm}} \right] \quad (71)$$

где је $u_{DP,p}$ несигурност одређивања нулте позиције изазвана променом притиска ваздуха од тренутка одређивања нулте позиције, Δp_{DP} је промена притиска ваздуха од тренутка одређивања нулте позиције у mbar , D растојање између ретрорефлектора и интерферометра у нултој позицији у mm , $u(a_p)$ је дисперзија промене притиска, а $\Delta a_{\text{pressure}}$ је коефицијент промене притиска при постављању нулте позиције,

$$u_{DP,t} = \Delta T_{DP} \cdot D \cdot u(a_t) [\mu\text{m}] \quad (72)$$

$$u(a_t) = \frac{\Delta a_{\text{temperature}}}{2\sqrt{3}} \left[\frac{\mu\text{m}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}} \right] \quad (73)$$

где је $u_{DP,t}$ несигурност одређивања нулте позиције изазвана променом температуре ваздуха од тренутка одређивања нулте позиције, ΔT_{DP} је промена температуре ваздуха од тренутка одређивања нулте позиције у $^{\circ}\text{C}$, D растојање између ретрорефлектора и интерферометра у нултој позицији у mm , $u(a_t)$ је дисперзија промене температуре, а $\Delta a_{\text{temperature}}$ је коефицијент промене температуре при постављању нулте позиције,

$$u_{DP,h} = \Delta h_{DP} \cdot D \cdot u(a_h) [\mu\text{m}] \quad (74)$$

$$u(a_h) = \frac{\Delta a_{\text{humidity}}}{2\sqrt{3}} \left[\frac{\mu\text{m}}{10\% \cdot \text{mm}} \right] \quad (75)$$

где је $u_{DP,h}$ несигурност одређивања нулте позиције изазвана променом релативне влажности ваздуха од тренутка одређивања нулте позиције, Δh_{DP} је промена релативне влажности ваздуха од тренутка одређивања нулте позиције у корацима од 10%, D је растојање између ретрорефлектора и интерферометра у нултој позицији у mm , $u(a_h)$ је дисперзија промене релативне влажности, а $\Delta a_{\text{humidity}}$ је коефицијент промене релативне влажности при постављању нулте позиције.

Променом температуре, после одређивања нулте позиције мерења, аутоматски долази до експанзије МА, што доводи до експанзионе грешке која је у вези са нултом

позицијом, тј. до промене вредности D . Пошто се растојање D променило, број таласа који могу стати између ретрорефлектора и интерферометра ће се променити, што доводи до промене очитане вредности са ласерског интерферометра [53]. И поред тога што се врши аутоматска компензација температуре, ефективно систем за компензацију не детектује да постоји додатна промена у мерењу, и сходно томе не врши компензацију са термичком експанзијом [39]. У складу са тим, потребно је узети у обзир и ову врсту несигурности:

$$u_{DP,m} = \Delta T_{DP} \cdot D \cdot u(\alpha) [\mu m] \quad (76)$$

где је $u_{DP,m}$ несигурност одређивања нулте позиције изазвана променом дужине материјала због термичке експанзије, ΔT_{DP} је промена температуре карактеристичног дела МА, где се врши мерење температуре ради компензације, од тренутка одређивања нулте позиције у $^{\circ}C$, D је растојање између ретрорефлектора и интерферометра у нултој позицији у mm , $u(\alpha)$ је дисперзија експанзионог коефицијента МА у $\frac{\mu m}{mm \cdot ^{\circ}C}$.

Помоћу једначина (70), (72), (74) и (76) може се одредити укупна несигурност која настаје из грешке одређивања нулте позиције мерења:

$$u_{DP} = \sqrt{u_{DP,p}^2 + u_{DP,t}^2 + u_{DP,h}^2 + u_{DP,m}^2} [\mu m] \quad (77)$$

Као и комбинована несигурност изазвана калибрацијом мерног инструмента:

$$u_{d,combined} = \sqrt{u_{DP}^2 + u_d^2} [\mu m] \quad (78)$$

У случају да се мерна инструментација постави тако да се u_{DP} може занемарити, није потребно извршити комбинацију несигурности.

Треба напоменути да код система мерења, заснованим на принципима ласерске интерферометрије, постоје још два фактора која утичу на несигурност мерења. То су несигурности изазване грешком електронских компонената и нелинеарношћу оптичких елемената. Величина грешке изазвана електронским компонентама одговара резолуцији ласерског интерферометра. У случају да је резолуција 1 nm , грешка износи $\pm 1 \text{ nm}$. Нелинеарност оптичких компоненти има значајнији утицај и она код одређених оптичких компоненти износи чак $\pm 4,2 \text{ nm}$. Додуше, грешка нелинеарности је фиксна и различита је за сваки интерферометар [91]. Може се видети да су ове вредности много испод микронске величине и због тога се оне занемарују.

2. Несигурност изазвана паралелношћу мерног инструмента са осом машине алатки која се проверава - u_m

При мерењима са ласерским интерферометром, ласерски зрак треба да буде паралелан са осом МА која се анализира. Паралелност се проверава анализом интензитета повратног ласерског зрака из интерферометра. Стабилност интензитета ласерског зрака може да падне максимално на 95%. Ако интензитет ласерског зрака није одговарајући, и буде испод 5% максималне снаге, систем ће исписати грешку и рестартоваће мерење. Паду интензитета сигнала од 95% одговара паралелност у границама од $\Delta_{misalignment} = \pm 4 \text{ mm}$. У случају да се прате инструкције произвођача о поставци инструментације, паралелност се може смањити и на $\Delta_{misalignment} = \pm 1 \text{ mm}$. Пошто су ове вредности милиметарске величине, код мерних дужина које су испод 300 mm , ова несигурност може постати значајна и у великој мери може утицати на добијене

резултате [25]. Због тога треба посветити посебну пажњу на правилно постављање система.

Несигурност изазвана паралелношћу мерног инструмента са осом машине алатке која се проверава u_m може се израчунати из $\Delta L_{misalignment}$, разлике између измерене дужине и стварне дужине.

$$\Delta L_{misalignment} = L(1 - \cos\gamma) \cdot 1000[\mu m] \quad (79)$$

$$u_m = \frac{\Delta L_{misalignment}}{2\sqrt{3}} [\mu m] \quad (80)$$

где је γ угао неподударања са осом мерења. γ се може одредити помоћу једноставне тригонометрије:

$$\sin\gamma = \frac{\Delta_{misalignment}}{L} [^\circ] \quad (81)$$

3. Несигурност изазвана компензацијом температуре МА - u_T

Ако су мерења вршена на температури различитим од 20 °C, потребно је извршити компензацију измерених вредности због температурне разлике. Ова компензација температуре је уведена због мерног инструмента за мерење температуре и због експанзионог коефицијента МА или обратка.

Претпоставља се да несигурности мерења температуре и експанзионог коефицијента нису у корелацији. Према томе, укупна несигурност изазвана компензацијом температуре МА се одређује на следећи начин:

$$u_T = \sqrt{u_{M,MT}^2 + u_{M,D}^2 + u_{E,MT}^2 + u_{E,D}^2} [\mu m] \quad (82)$$

где је $u_{M,MT}$ несигурност због мерења температуре МА или обратка, или несигурност због разлике у температури између мерног инструмента и прибора МА. Ова несигурност зависи од коефицијента термалног ширења МА $\alpha \left[\frac{\mu m}{mm \cdot ^\circ C} \right]$, дужине мерења и несигурности мерног инструмента $u(\theta)$. У случају да се не располаже калибрационим сертификатом, у коме је наведена несигурност мерног инструмента, иста се може проценити на основу мерног опсега (a_θ^+ и a_θ^-), коју задаје произвођач сензора за температуру.

$$u_{M,MT} = \alpha \cdot L \cdot u(\theta) [\mu m] \quad (83)$$

$$u(\theta) = \frac{a_\theta^+ - a_\theta^-}{2\sqrt{3}} [^\circ C] \quad (84)$$

Параметар $u_{M,D}$ је несигурност због мерења температуре мерног инструмента. Пошто се врши аутоматска компензација експанзије инструмента, и несигурност ове компензације је узета у обзир у мерну несигурност инструмента, вредност $u_{M,D}$ се узима као нула.

Параметар $u_{E,MT}$ је несигурност због експанзионог коефицијента МА или обратка. Препорука је да се узме минимални опсег од 10% од вредности коефицијента α , а никако не мање од $0,002 \left[\frac{\mu m}{mm \cdot ^\circ C} \right]$. Вредност се прерачунава у стандардну девијацију помоћу једначине (56) и тако минимална вредност несигурности из експанзионог коефицијента је

$$u(\alpha)_{min} = \frac{0,002}{2\sqrt{3}} = 0,0006 \left[\frac{\mu m}{mm \cdot ^\circ C} \right] \quad (85)$$

$$u_{E,MT} = \Delta T \cdot L \cdot u(\alpha) [\mu m] \quad (86)$$

где је ΔT разлика температуре околине у односу на референтну $20^\circ C$, тј. $\Delta T = T - 20^\circ C$, T је температура МА или обратка, а $u(\alpha)$ дисперзија коефицијента топлотног ширења.

Параметар $u_{E,D}$ је несигурност због експанзионог коефицијента мерног инструмента. Симулације фактора, на које утиче промена температуре, показале су да несигурност експанзионог коефицијента МА су већег реда и значајнији су у односу на несигурност експанзионог коефицијента мерног инструмента [78]. Због тога се може занемарити. Стандард ISO 230-9 прописује да се ова вредност може узети као нула у случају да извештај о несигурности мерног инструмента не садржи поменуто компоненту.

Као што је већ описано у поглављу 3.5, избор положаја сензора температуре је од круцијалног значаја и утиче на суштину, и на циљ мерења. У извештају, о испитивању мерења тачности позиционирања, потребно је назначити тачну позицију сензора.

4. Мерна несигурност изазвана променама у околини (енг. enviromental variation error E_{VE} или drift) - u_{EVE}

Током мерења могу да се промене микроклиматски услови, инструментација и МА може да се промени, што утиче на исказане вредности мерног система. Ова варијација изазвана променама околине се може проверити помоћу тзв. *ETVE* или *drift* теста [92]. Пре провере тачности позиционирања постави се ласерска мерна инструментација и посматра се промена у читавању резултата мерења у условима испитивања у екстремној позицији мерења, на највећој удаљености између ретрорефлектора и интерферометра, што значи да се узимају подаци о девијацији контролне позиције. Време извођења *drift* теста треба да одговара најмање дужини трајања провере тачности позиционирања, али пожељно је да буде дуже. Добијени резултати се исказују на дијаграму и потребно је исказати вредности измерене температуре околине и позиције у односу на крајњу позицију. На дијаграму се означава област која одговара дужини мерења и дефинише разлика између максималне и минималне вредности девијације контролне позиције. Након тога се бира област са највећим нагибом криве промене девијације. Ово је разлог што је пожељно, да дужина провере утицаја промене у околини буде дужи од времена потребног за проверу тачности позиционирања. На овај начин се може добити величина E_{VE} , која се прерачунава у стандардну девијацију u_{EVE} .

$$u_{EVE} = \frac{E_{VE}}{2\sqrt{3}} [\mu m] \quad (87)$$

Вредност не садржи поновљивост МА, пошто се дата оса проверава само у једној позицији, која се не помера.

Мерна несигурност изазвана променама околине увек повећава вредност стандардне девијације рачунате за једносмерну поновљивост и двосмерну поновљивост.

$$s_{i,corr,\uparrow} = \sqrt{s_{i\uparrow}^2 - u_{EVE}^2} [\mu m] \quad (88)$$

$$s_{i,corr.,\downarrow} = \sqrt{s_{i\downarrow}^2 - u_{EVE}^2} [\mu m] \quad (89)$$

$$R_{i,corr.,\uparrow} = 4s_{i,corr.,\uparrow} [\mu m] \quad (90)$$

$$R_{i,corr.,\downarrow} = 4s_{i,corr.,\downarrow} [\mu m] \quad (91)$$

$$R_{i,corr.} = \max \left[\frac{R_{i,corr.,\uparrow} + R_{i,corr.,\downarrow}}{2} + |B_i|; R_{i,corr.,\uparrow}; R_{i,corr.,\downarrow} \right] [\mu m] \quad (92)$$

$$R_{corr.,\uparrow} = \max[R_{i,corr.,\uparrow}] [\mu m] \quad (93)$$

$$R_{corr.,\downarrow} = \max[R_{i,corr.,\downarrow}] [\mu m] \quad (94)$$

$$R_{corr.} = \max[R_{i,corr.}] [\mu m] \quad (95)$$

где је $s_{i,corr.,\uparrow}$ или $\downarrow$ коригована вредност једносмерне стандардне несигурности у $\uparrow$ или $\downarrow$ смеру, $R_{i,corr.,\uparrow}$ или $\downarrow$ коригована вредност једносмерне поновљивости позиционирања у позицији i у $\uparrow$ или $\downarrow$ смеру, $R_{i,corr.}$ коригована двосмерна поновљивост позиционирања у позицији i , $R_{corr.,\uparrow}$ или $\downarrow$ коригована вредност једносмерне поновљивости позиционирања, $R_{corr.}$ коригована вредност двосмерне поновљивости позиционирања.

Типичне вредности у индустријским условима су у распону од 1 $\mu m/m$, односно 3 $\mu m/m$ за 15 минута и 5 $\mu m/m$ за 60 минута [93]. Нагле промене у околини не утичу одмах на МА или на механичке мерне компоненте, већ они реагују у складу са својом топлотном инерцијом. Тако да претходно назначене вредности се могу узети као просечне за индустријске услове. У случају оптичких мерних инструмената, као што је и ласерски интерферометар, нагле промене имају непосредан утицај на резултате мерења [37].

5. Несигурност изазвана поновљивошћу постављања мерног инструмента – u_S .

Тачност и поновљивост линеарног позиционирања варира између различите линије мерења, у случају да покретна оса има покрете таласања и/или скретања. Величина угла нагиба таласања и/или скретања је тај који има утицај на тачност позиционирања [94]. Поред тога, Абеова грешка између две осе мерења такође утиче на проверу тачности позиционирања. Интерферометри су посебно погодни за конфигурације мерења дизајниране да минимизирају Абеову грешку јер успостављају виртуелну осу мерења која нема механичке сметње са другим деловима МА. Одређивање линије мерења је једноставно код мерне скале, а код ласера то није толико очигледно и једноставно, и зависи од врсте интерферометра и циља [39]. У случају да се подаци, добијени провером тачности линеарног позиционирања, користе за одређивање запреминске тачности МА, онда је неопходно одредити тачну локацију мерне осе унутар радног простора МА.

$$u_S = \frac{\Delta L_S}{2\sqrt{3}} [\mu m] \quad (96)$$

$$\Delta L_S = \frac{\sqrt{2} O_{ABBE} D_{Angle}}{1000} [\mu m] \quad (97)$$

У овим једначинама ΔL_S је промена дужине мерења због поновљивости постављања мерног система. O_{ABBE} је величина Абеовог помераја, која ће између две поставке бити око 50 mm, а када се користе прибори прилагођени за поновно постављање мерне инструментације, онда се она може смањити и испод 1 mm. D_{Angle} је одступање изазвано

таласањем и/или скретањем у $[\mu m/m]$. ISO толеранција за таласање и/или скретање је $50 \mu m/m$, за случај да не постоји извештај о мерењу ових вредности.

5.1 Процена мерне несигурности параметара тачности позиционирања

Као што је већ у поглављу 3.3 наведено, постоји већи број параметара које ISO 230-2:2014 узима у обзир при процени стања МА и који треба да се искажу као резултати мерења тачности позиционирања. За све параметре је могуће проценити несигурност.

- Процена несигурности једносмерне поновљивости позиције по оси – $U(R \uparrow, R \downarrow)$

Процена несигурности једносмерне поновљивости позиције по оси је могућа само за осе максималне дужине хода од 2000 mm. Несигурност не зависи од калибрације мерног инструмента, од температурне компензације МА или од поставке мерне инструментације. Мале промене у позицији поставке се посматрају као некритичне и занемарује се њихов утицај. Једини фактор који утиче на мерење је промена околине. У складу са тим, несигурност се одређује помоћу једначине:

$$u(R \uparrow, R \downarrow) = 4 \sqrt{\frac{1}{n-1}} u_{EVE} [\mu m] \quad (98)$$

$$U(R \uparrow, R \downarrow) = 2u(R \uparrow, R \downarrow) [\mu m] \quad (99)$$

где је n број извршених мерних циклуса, $u(R \uparrow, R \downarrow)$ девијација једносмерне поновљивости позиције по оси.

- Процена несигурности распона одступања средњих вредности – $U(B)$

Фактори који утичу на несигурност распона одступања средњих вредности су несигурност изазвана променама у околини u_{EVE} и несигурност изазвана поставком мерне инструментације u_s . Фактор u_{EVE} се мења током сваког циклуса мерења, стога она није у корелацији унутар мерења, а наспрам тога, u_s се не мења током циклуса мерења, тако да је он у строго позитивној корелацији. На основу ових претпоставки, несигурност распона одступања средњих вредности се одређује на следећи начин:

$$u(B) = 2 \sqrt{\frac{u_{EVE}^2}{n} + u_s^2} [\mu m] \quad (100)$$

$$U(B) = 2u(B) [\mu m] \quad (101)$$

где је n број извршених мерних циклуса, $u(B)$ девијација распона одступања средњих вредности.

- Процена несигурности максималне двосмерне поновљивости по оси – $U(R)$

Процена несигурности максималне двосмерне поновљивости по оси је могућа само за осе максималне дужине хода од 2000 mm. У принципу, двосмерна поновљивост је сума једносмерне поновљивости и распона одступања средњих вредности. Те две компоненте нису у корелацији, тако да се несигурност одређује на следећи начин:

$$u(R) = \sqrt{u^2(B) + u^2(R \uparrow, R \downarrow)} [\mu m] \quad (102)$$

$$U(R) = 2u(R) [\mu m] \quad (103)$$

где је $u(R)$ девијација максималне двосмерне поновљивости по оси.

- Несигурност систематских грешака - $U(M, E, E \uparrow, E \downarrow)$

Све систематске грешке зависе од средњих вредности рачунатих на основу целокупног циклуса мерења, који је, према препоруци стандарда, минимум 5. За несигурност систематских грешака утицајни фактори су свих пет претходно посматраних фактора, тј. калибрација мерног инструмента, температурни утицаји, поставка мерне инструментације, паралелност мерног инструмента са осом машине алатке и промена околине. Сходно томе, несигурност се одређује на следећи начин:

$$u(M, E, E \uparrow, E \downarrow) = \sqrt{u_D^2 + u_M^2 + u_T^2 + u_S^2 + \frac{u_{EVE}^2}{n}} [\mu m] \quad (104)$$

$$U(M, E, E \uparrow, E \downarrow) = 2u(M, E, E \uparrow, E \downarrow) [\mu m] \quad (105)$$

где је $u(M, E, E \uparrow, E \downarrow)$ девијација појединих параметара, а n број извршених мерних циклуса (код $E, E \uparrow, E \downarrow$ $n=5$, а код M $n=10$). Систематске грешке представљају разлику између максимума и минимума дуж осе мерења МА. Пошто су појединачни фактори процењени за целу дужину посматране осе, а максимуми и минимуми су генерално лоцирани близу крајева осе, процена само у крајњој позицији у већини случајева је задовољавајућа.

- Несигурност тачности позиционирања - $U(A, A \uparrow, A \downarrow)$

Процена несигурности тачности позиционирања је могућа само за осе максималне дужине хода од 2000 mm. Вредности тачности позиционирања су сума систематских грешака и једносмерне поновљивости позиције. Ове две компоненте нису у корелацији. Сходно томе, несигурност се може одредити помоћу следећих једначина:

$$u(A, A \uparrow, A \downarrow) = \sqrt{u^2(E) + u^2(R \uparrow, R \downarrow)} [\mu m] \quad (106)$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow) = 2u(A, A \uparrow, A \downarrow) [\mu m] \quad (107)$$

где је $u(A, A \uparrow, A \downarrow)$ девијација појединих параметара.

5.2 Карактеристике коришћене мерне инструментације

Коришћен је ласерски систем НР 5526А који се састоји од ласерске главе, аналогног показивача, интерферометра, ретрорелфектора, аутоматског компензатора, термичких сензора и сензора за влагу и притисак.

- Ласерска глава НР 5500С, фабрички број: 1920А02247.

Тип ласера: Земан стабилизовани двофреквентни He-Ne ласер, таласне дужине 632,9908 nm. Максимална снага: 1 mW.

Пречник ласерског зрака 6 mm.

Дозвољени максимум губитка снаге ласера је 95%.

Стабилност ласерског зрака: краткорочна $\pm 0,002$ ppm; дугорочна $\pm 0,02$ ppm

Резолуција: у нормалном и глатком режиму $0,1 \mu m = 100 nm$, што одговара $m=3$ bit систему и таласној дужини ласера. $r = \frac{\lambda}{2^m - 1} = \frac{632,9908}{2^3 - 1} = 90,43 nm \approx 100 nm$.

Максимална брзина при мерењима: 182m/min.

Домет мерења: 40m.

Класа II електричне изолације.

На слици 5-2. је приказана ласерска глава и ласерски показивач.



Слика 5-2. Ласерска глава и ласерски показивач

- Ласерски показивач HP 5505A, фабрички број: 2240A02798.

Аналогни показивач са 9 цифара. Могућност одабира између нормалног и глатког режима рада. Просечна фреквенција узорковања зависи од параметра који се мери. Тако је различито за мерење померања, брзине, угла итд. У табели 5-2. су приказане вредности које дефинише произвођач.

Табела 5-2. Просечна фреквенција узорковања

Мерење	Фреквенција узорковања
Растојање	40 Hz
Брзина	30 Hz
Угао	25Hz
Правост	
Не максимална резолуција	
Максимална резолуција	5 Hz

- Аутоматски компензатор HP5510A, фабрички број: 2044 A 02748.

Уз аутоматски компензатор иде и сензор ваздуха типа HP10751A, који мери температуру ваздуха, релативну влажност и притисак. Максимална грешка сензора температуре је $\pm 0,35$ °C. Временска константа је 15s.

Сензор притиска ваздуха: тачност $\pm 0,74$ mmHg, опсег влажности 20-100 %. Временска константа је <1s.

Постоје и сензори температуре типа HP10757A за компензацију коефицијента термичког ширења, опремљене са магнетом, ради лакше монтаже на машину. Домет мерења сензора је 0 °C - 50 °C.

Тачност компензације коефицијента термичког ширења је у домету ± 100 ppm/°C.

Аутоматска компензација ласерског зрака омогућава у различитим режимима рада, да стабилност ласерског зрака буде у границама $\pm 1,5$ ppm за $T_{\text{operating}} = 20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, $\pm 1,7$ ppm за $T_{\text{operating}} = 15-25^\circ\text{C}$ и ± 3 ppm за $T_{\text{operating}} = 0-40^\circ\text{C}$.

- Даљински интерферометар и ретрорефлектор су представљени на слици 5-3.

Интерферометар HP 10565B, серијски број 1948 A 02458.

Ретрорефлектор HP 10550B, серијски број 1216 A 02458.



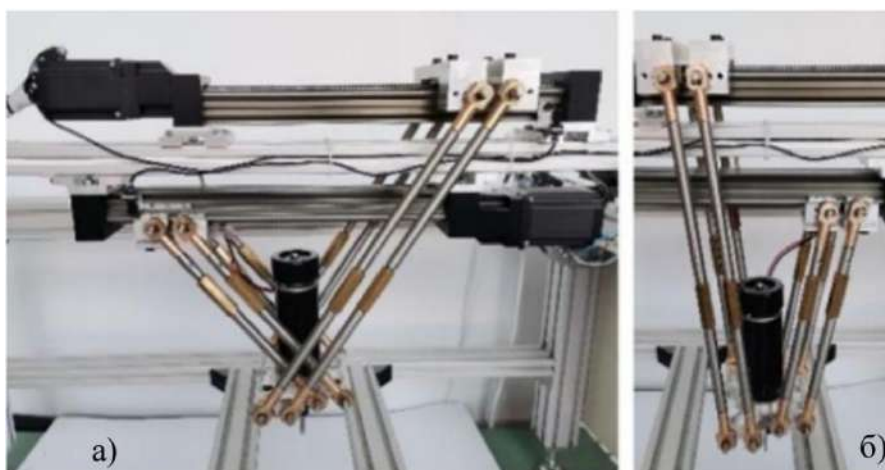
Слика 5-3. Даљински интерферометар и рефлектор

Ради се о оптици која је намењена за рад у индустријским условима. Због је отпорна на влагу, вибрације и блаже ударе.

6. поглавље

Приказ машина алатки са O-X glide механизмом

Експериментални део истраживања спроведеног у оквиру дисертације је реализован на МА са O-X glide механизмом. Овај тип механизма је настао комбиновањем паралелног механизма који омогућава кретање платформе по Z и X осе и машинске структуре која омогућава транслаторно кретање по Y осе. Механизам омогућава могућност поставке у две позиције у укрштеној X позицију, где се спојке, које држе платформе, укрштају и у опруженој O позицију где се спојке не укрштају. Одавде долази и назив O-X glide. На слици 6-1. је приказан механизам у обе варијанте положаја.

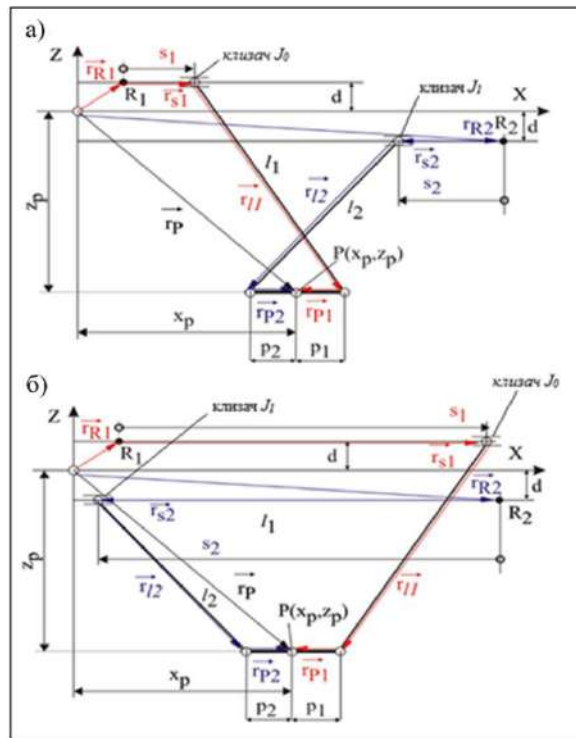


Слика 6-1. а) X конфигурација механизма б) O конфигурација механизма [95]

Равански паралелни механизам се састоји од покретне платформе која је повезана са спојкама фиксних дужина помоћу зглобова. На другом крају спојки се налазе клизачи, који се крећу по сопственим вођицама у једном правцу, тј. имају један степен слободе кретања. Да би се повећала аутономија клизача, они су вертикално постављени на одређеном растојању. Хибридизација механизма је постигнута додавањем серијске Y осе.

Актуатори коришћени за покретање клизача су корачни мотори са могућношћу рада у квадратурном моду. Корак мотора је $1,8^\circ$. Пошто ради у квадратурном моду, резолуција позиционирања мотора је 4 пута већа, тј. $0,45^\circ$. На основу узајамног односа корака мотора и корака завојног вретена, дефинисан је број корака мотора да би клизач направио корак од 1mm. У овом случају, мотор треба направити 400 корака да би клизач направио померање од 1mm. Овај податак се посебно назначује при дефинисању кинематике у софтверу управљања МА. Из овога директно следи да клизачи имају резолуцију $\frac{1}{400} \frac{\text{mm}}{\text{корак}} = 2,5 \frac{\mu\text{m}}{\text{корак}}$. Ако се узме да је то јединица помераја, онда теоријска резолуција клизача је $r = 2,5 \mu\text{m}$.

У контексту докторске дисертације, анализа кинематике машине је најважнији део целог приказа. Првенствено она одређује понашање машине у различитим тачкама радног простора и даје релевантне информације за управљање. Кинематски модел приказан на слици 6-2. даје одличну полазну тачку за дефинисање инверзне и директне кинематике помоћу којих се могу дефинисати кретања клизача J_0 , J_1 и J_2 , као и платформе $P(x_p, y_p, z_p)$. Кретање платформе по Y оси је тривијално због серијског механизма и покретање се врши помоћу клизача J_2 са координатама s_3 . Кретање платформе у X - Z равни већ није толико тривијално. Тамо кретање платформе обезбеђује паралелно кретање клизача J_0 и J_1 са одговарајућим координатама s_1 и s_2 , који се још зову и унутрашњим координатама механизма. R_1 и R_2 су референтне позиције, d је удаљеност клизача од X осе, l_1 и l_2 су дужине спојки.



Слика 6-2. Кинематски модел механизма у а) X конфигурацији и у б) O конфигурацији [96]

Дефинисање и анализа кинематике O-X glide механизма је детаљно описана у радовима [95–100].

Вредности геометријских параметара механизма су константни и представљени су у табели бр. 6-1.

Табела 6-1. Геометријске параметре за одређивање кинематских једначина O-X glide механизма

Дужина спојки [mm]	l_1	391
	l_2	260
Параметар платформе [mm]	p_1	3,5
	p_2	26,5
Растојање клизача од X осе [mm]	d	65,5
Референтна позиција за X конфигурацију [mm]	x_{R_1}	0
	x_{R_2}	385
Референтна позиција за O конфигурацију [mm]	x_{R_1}	300
	x_{R_2}	285

Полазне векторске једначине на основу слике бр. 6-2. се могу написати у следећем облику.

$$\vec{r}_p = \vec{r}_{R_1} + \vec{r}_{s_1} + \vec{r}_{l_1} + \vec{r}_{p_1} \quad (108)$$

$$\vec{r}_p = \vec{r}_{R_2} + \vec{r}_{s_2} + \vec{r}_{l_2} + \vec{r}_{p_2} \quad (109)$$

Овај општи облик се може написати помоћу свих X и Z координата и тада се добија:

- за X конфигурацију

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ z_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{R_1} \\ d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s_1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} l_{1x} \\ -l_{1z} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -p_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (110)$$

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ z_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{R_2} \\ -d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -s_2 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -l_{2x} \\ -l_{2z} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (111)$$

- за O конфигурацију

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ z_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{R_1} \\ d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s_1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -l_{1x} \\ -l_{1z} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -p_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (112)$$

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ z_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{R_2} \\ -d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -s_2 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} l_{2x} \\ -l_{2z} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (113)$$

Када се ове једначине среде по координатама спојки и напишу по Z и X координати добијају се облици:

- за X конфигурацију

$$\begin{aligned} l_{1x} &= x_p - x_{R_1} - s_1 + p_1 \\ l_{1z} &= d - z_p \end{aligned} \quad (114)$$

$$\begin{aligned} l_{2x} &= x_{R_2} - s_2 - x_p + p_2 \\ l_{2z} &= -d - z_p \end{aligned} \quad (115)$$

- за O конфигурацију

$$\begin{aligned} l_{1x} &= x_{R_1} + s_1 - x_p - p_1 \\ l_{1z} &= d - z_p \end{aligned} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} l_{2x} &= x_p - x_{R_2} + s_2 - p_2 \\ l_{2z} &= -d - z_p \end{aligned} \quad (117)$$

Користећи Питагорину теорему за спојке l_1 и l_2 можемо написати услов $l_1^2 = l_{1x}^2 + l_{1z}^2$ и $l_2^2 = l_{2x}^2 + l_{2z}^2$. Једначине (114)-(117) се квадрирају и помоћу претходног услова дефинишу се дужине спојки:

- за X конфигурацију

$$\begin{aligned} l_1^2 &= (x_p - x_{R_1} - s_1 + p_1)^2 + (d - z_p)^2 \\ l_2^2 &= (x_{R_2} - s_2 - x_p + p_2)^2 + (-d - z_p)^2 \end{aligned} \quad (118)$$

- за O конфигурацију

$$\begin{aligned} l_1^2 &= (x_{R_1} + s_1 - x_p - p_1)^2 + (d - z_p)^2 \\ l_2^2 &= (x_p - x_{R_2} + s_2 - p_2)^2 + (-d - z_p)^2 \end{aligned} \quad (119)$$

Када се једначине (118) и (119) реше по координатама клизача, добијамо једначине инверзне кинематике:

- за X конфигурацију

$$\begin{aligned} s_1 &= x_p - x_{R_1} + p_1 - \sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2} \\ s_2 &= -x_p + x_{R_2} + p_2 - \sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2} \end{aligned} \quad (120)$$

- за O конфигурацију

$$\begin{aligned} s_1 &= x_p - x_{R_1} + p_1 + \sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2} \\ s_2 &= -x_p + x_{R_2} + p_2 + \sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2} \end{aligned} \quad (121)$$

Решења инверзне кинематике указују на то да решења једначина по позицијама платформе су једнаке за обе конфигурације, само је разлика у предзнаку испред корена. То указује на дуалност решења, од којих се једно односи на укрштену, а друго на опружену конфигурацију. Решења инверзне кинематике су веома једноставна и лако се могу користити при дефиницији управљања машине [96].

За решавање директних једначина кинематике генерални облик се може написати на следећи начин:

$$P(x_p, y_p, z_p) = f(s_1, s_2, s_3) \quad (122)$$

Процедура аналитичког решавања директне кинематике почиње са одузимањем једначине за клизач s_2 од једначине за клизач s_1 која је описан у скупу једначина (118) за X конфигурацију и скупу једначина (119) за O конфигурацију. Линеарна једначина која се може решити по координатама платформе има следећи облик:

$$t_3 x_p + t_4 z_p + t_5 = 0 \quad (123)$$

Решења одузимања за оба конфигурације су исте, зато није потребно да посебно изводе једначине. Директна кинематика за оба случаја поставке механизма је иста [97].

Решавањем линеарне једначине добијамо везу између координата платформе:

$$x_p = t_7 z_p + t_6 \quad (124)$$

Када се једначина (124) уврсти у (123), добијамо квадратну једначину за z_p :

$$t_8 z_p^2 + t_9 z_p + t_{10} = 0 \quad (125)$$

За претходне једначине уведене су следеће смене:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= x_{R_1} + s_1 - p_1 \\
 t_2 &= x_{R_2} - s_2 + p_2 \\
 t_3 &= 2(t_2 - t_1) \\
 t_4 &= -4d \\
 t_5 &= t_1^2 - t_2^2 - l_1^2 + l_2^2 \\
 t_6 &= -\frac{t_5}{t_3} \\
 t_7 &= -\frac{t_4}{t_3} \\
 t_8 &= 1 + t_7^2 \\
 t_9 &= 2(t_6 - t_1)t_7 - 2d \\
 t_{10} &= (t_6 - t_1)^2 + d^2 - l_1^2
 \end{aligned} \tag{126}$$

Представљена квадратна једначина, са становишта кинематике машине, има само једно употребљиво решење. Она се може наћи нумеричком провером исправности добијене вредности z_p , тако што се уврсте вредности координата клизача и геометријских карактеристика машине. Овом методом се утврдило да је крајњи облик директног кинематског проблема следећи:

$$\begin{aligned}
 z_p &= \frac{-t_9 - \sqrt{t_9^2 - 4t_8t_{10}}}{2t_8} \\
 x_p &= t_7z_p + t_6
 \end{aligned} \tag{127}$$

Следећи корак анализе кинематике је одређивање сингуларитета. У сингуларитету, паралелни механизам може добити један или више степена слободе, што узрокује онемогућавање рада управљања. У сингуларним тачкама се јављају више могућих решења израза, што резултује падом крутости механизма. Због тога, при раду машине веома је важно да се обезбеди да се елементи механизма у току рада не налазе у сингуларним тачкама [101].

Важан корак у анализи сингуларитета механизма има анализа Јакобијан матрице. Јакобијан матрица се добија из парцијалних извода по координатама платформе инверзне кинематике. У општем облику за O-X glide механизам, Јакобијан матрица се може изразити на следећи начин:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(s_1)}{\partial x_p} & \frac{\partial f(s_1)}{\partial z_p} \\ \frac{\partial f(s_2)}{\partial x_p} & \frac{\partial f(s_2)}{\partial z_p} \end{bmatrix} \tag{128}$$

Тако да се Јакобијан матрица, на основу једначина (120) и (121), може написати у облику

- за X конфигурацију

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z_p - d}{\sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2}} \\ -1 & \frac{z_p + d}{\sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}} \end{bmatrix} \quad (129)$$

- за O конфигурацију

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-(z_p - d)}{\sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2}} \\ -1 & \frac{-(z_p + d)}{\sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}} \end{bmatrix} \quad (130)$$

Вредност детерминанте Јакобијан матрице је следећа:

- за X конфигурацију

$$\det(J) = \frac{(z_p + d)\sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2} + (z_p - d)\sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}}{\sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}\sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2}} \quad (131)$$

- за O конфигурацију

$$\det(J) = -\frac{(z_p + d)\sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2} + (z_p - d)\sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}}{\sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}\sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2}} \quad (132)$$

Вредности детерминанте Јакобијан матрице зависе од позиције платформе по Z оси, као што се да приметити из једначина. Обе конфигурације имају исту апсолутну вредности $\det(J)$, а предзнак означава о којој конфигурацији је реч. Због тога се даље анализира само X поставка машине. То је учињено због тога што су се експерименти изводили у X поставци машине. У позицијама, где вредност детерминанте Јакобијан матрице добија вредност нула, налазе се такозвани сингуларитети. Сингуларитети паралелног механизма представљају позиције у којима машина губи могућност управљања, и могу се појавити бесконачно велике силе у зглобовима механизма [102].

Елементи Јакобијан матрице се појављују у анализи брзина клизача током кретања платформе. Ако се одреди временска зависност појединих променљивих величина на основу инверзне кинематике, могу се израчунати брзине клизача у зависности од позиције платформе.

Једначина (120) добија форму

$$\begin{aligned} s_1(t) &= x_p(t) - x_{R_1} + p_1 - \sqrt{l_1^2 - (z_p(t) - d)^2} \\ s_2(t) &= -x_p(t) + x_{R_2} + p_2 - \sqrt{l_2^2 - (z_p(t) + d)^2} \end{aligned} \quad (133)$$

Први извод једначине по времену даје следећи облик:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= v_{p,x}(t) + v_{p,z}(t) \frac{z_p(t) - d}{\sqrt{l_1^2 - (z_p(t) - d)^2}} \\ v_2(t) &= -v_{p,x}(t) + v_{p,z}(t) \frac{z_p(t) + d}{\sqrt{l_2^2 - (z_p(t) + d)^2}} \end{aligned} \quad (134)$$

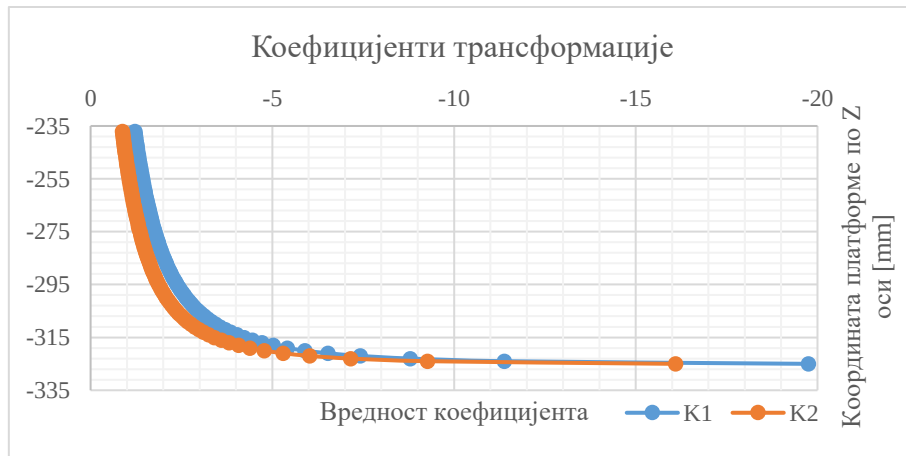
Увођењем коефицијента трансформације K_1 и K_2 поједностављују се једначине и добијају следећу форму:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= v_{p,x}(t) + v_{p,z}(t)K_1(t) \\ v_2(t) &= -v_{p,x}(t) + v_{p,z}(t)K_2(t) \end{aligned} \quad (135)$$

При чему

$$\begin{aligned} K_1(t) &= \frac{z_p(t) - d}{\sqrt{l_1^2 - (z_p(t) - d)^2}} \\ K_2(t) &= \frac{z_p(t) + d}{\sqrt{l_2^2 - (z_p(t) + d)^2}} \end{aligned} \quad (136)$$

Вредност коефицијента трансформације зависи од позиције платформе по Z оси, али не зависи од конфигурације машине, што је приказано на дијаграму 6-3.



Слика 6-3. Вредности коефицијената трансформације у функцији координате платформе по Z оси

Максимална и минимална вредност Z координате платформе зависе од радног простора и према [96] оне износе $z_{p,\min} = -325,5 \text{ mm}$, $z_{p,\max} = -236,1179 \text{ mm}$

Ако се анализирају и убрзања машине, потребно је одредити извод једначине (135) по времену. Она има следећи скраћени облик:

$$\begin{aligned} a_1(t) &= a_{p,x}(t) + a_{p,z}(t)K_1(t) + v_{p,z}(t)\dot{K}_1(t) \\ a_2(t) &= -a_{p,x}(t) + a_{p,z}(t)K_2(t) + v_{p,z}(t)\dot{K}_2(t) \end{aligned} \quad (137)$$

где су $\dot{K}_1(t)$ и $\dot{K}_2(t)$ први изводи коефицијената трансформације по времену [99].

$$\begin{aligned} \dot{K}_1(t) &= v_{p,z}(t) \cdot \frac{l_1^2}{\sqrt{\left(l_1^2 - (z_p(t) - d)^2\right)^3}} \\ \dot{K}_2(t) &= v_{p,z}(t) \cdot \frac{l_2^2}{\sqrt{\left(l_2^2 - (z_p(t) + d)^2\right)^3}} \end{aligned} \quad (138)$$

7. поглавље

Нелинеарност машина алатки

Једна од највећих измена у структури машина алатки, од њиховог настанка до данас, последица је увођења погонских елемената помоћног кретања који немају директну линеарну зависност са кретањем извршног органа машине (алата).

У пракси је најчешће последица кинематске структуре код којих кретање алата у правцу једне (спољашње) осе машине настаје као резултат алгебарског математичког израза који описује зависност кретања спољашње осе машине кретањима више погонских елемената или трансформације која настаје преносом кретања путем одговарајућег механизма.

Овакав облик кинематске структуре, код машина алатки, има за последицу низ специфичности које се односе на кинематске и динамичке параметре кретања, тачност, крутост и др.

7.1 МА са паралелном и хибридном кинематиком

Код машина алатки са серијском кинематиком веза између актуатора (мотора) и извршног дела машине (нпр. глодала код глодалице или платформе) је линеарна, тј. њихова кинематска структура формира ланац и радни простор је дефинисан линеарним односом између кретања главног вретена и платформе. Због тога, МА са серијским или „традиционалним“ механизмима, представљају машине алатке са линеарном кинематиком, скраћено МАЛК.

МА, са паралелном кинематиком (МПК), базиране су на паралелним механизмима, и данас се могу експлицитно препознати и сматрати машинама алаткама нове генерације. Паралелни механизми се могу класификовати [103] у три главне групе:

- механизам са спојкама константне дужине и обртним оснаженим зглобовима,
- механизам са телескопским, односно са спојкама променљиве дужине и
- механизам са спојкама константне дужине и трансляторним оснаженим зглобовима.

Поред наведених, постоје и посебне варијанте механизма МА са паралелном кинематиком код којих се кинематска веза, између покретне и непокретне платформе (базе), остварује путем више зглобно везаних спојки, кабловима [104].

МПК у односу на МАЛК по особинама крутости, динамике, радног простора и кинематике се доста разликују. Постоје особине у којима имају предности, али не могу да се забораве и недостаци.

Већина извора међу предности МПК убраја већу крутост [13,101], али истраживања о крутости машина алатки, са паралелним и серијским механизмима, дала су различите

результате. У раду [105] се доказује да паралелни механизми, у односу на серијске, имају много мању структурну крутост, због чега су им контрола и прецизност отежани, нарочито код хексапод механизма. Наспрам поменутог истраживања, [106,107] нуде већу структурну крутост и динамичке карактеристике. Уведен је нови индекс у вези са проценом МА на основу крутости [108], али нису директно упоређени серијски и паралелни механизми.

Код серијских МА, због отвореног кинематског ланца, сваки зглоб носи оптерећење са додатком масе следећег зглоба. Због тога су потребни већи и јачи актуатори. Наспрам тога, МПК распоређују оптерећење по спојкама, стварају равнотежу у унутрашњим силама структурних елемената машине. Оваква конфигурација доводи до смањења сила, и момента силе у актуаторима, повећавајући поновљивост МПК [109].

Карактеристика паралелних механизма је да се мотори, који служе за покретање спојки, налазе на непокретном делу машине или близу њега, без већих померања самог мотора током обраде. Пошто мотори представљају највећи део масе манипулатора, оваква конфигурација омогућава дизајн платформе са смањеном масом. Оваква дистрибуција масе резултира добрим инерцијалним карактеристикама и дозвољава рад при великим брзинама, смањену потрошњу у електричној енергији и побољшаним вибрацијским карактеристикама [110,111].

Радни простор МПК се може дефинисати као пресек радног простора свих његових зглобова. Због тога је радни простор значајно мањи у односу на радни простор серијских механизма. Корисни део и облик радног простора такође много одступа, не само од серијских, већ и МПК. Сваки механизам захтева посебну пажњу приликом анализе радног простора. Ова особина се може видети у великом броју примера, као што су [110,112–114]. Због комплексности радног простора и индустријских захтева, разне методе су развијене за оптимизацију радног простора [115,116]. Посебна врста анализе радног простора обухвата предикцију колизије када је неопходно кретањима избећи објекат који се налази унутар радног простора [117,118].

Да би се добиле најбоље карактеристике серијских и паралелних механизма, започет је процес такозване хибридизације МА, што значи спајање серијских и паралелних механизма. Традиционални метод обухвата повезивање n ($n \geq 2$) механизма покретне и непокретне платформе, при чему најмање једна треба да буде паралелни механизам. Јединствени приступ, који се назива хибридизација механизма, јесте да се један серијски механизам угради унутар паралелног механизма, што у великој мери мења његове укупне перформансе [119,120].

Хибридизација највећи утицај има на промену радног простора. Код трансляторних оса, најочигледнија је промена [121], али и код ротационих оса се такође користи за побољшање перформанси [113].

За нелинеарни паралелни манипулатор, резултат геометријског места тачака доступних извршном органу машине, скуп је тачака неправилног геометријског облика, за које је карактеристично да ће померање унутрашњих координата за одређени инкремент резултирати различитим инкрементом померања спољашњих координата (а самим тим и алата). То је последица нелинеарних једначина кинематике која доводи и до нехомогености радног простора. Закривљеност радног простора машине са паралелном кинематиком представља унутрашњу карактеристику саме машине. Ово зависи од конфигурације машине алатки са паралелном кинематиком у функцији од позиције и оријентације [122]. Овакве машине алатке се називају машине алатке са нелинеарном кинематиком, скраћено МАНК.

7.2 Утицај нелинеарности на рад машина алатки са паралелном кинематиком

Матрица закривљености је кључни индекс нелинеарности и има велики значај у одређивању нелинеарности кретања МПК [122]. Ванг и остали су, код МПК, увели, на основу [123], оцењивање механизма на основу закривљености.

Према [124], нелинеарна карактеристика МПК значајно утиче на тачност путање алата приликом интерполације. Доказао да на грешку интерполације брзина платформе нема утицаја. У раду је вршена анализа МА чији механизам је заснован на Стјуартовој платформи, где се померање покретне платформе остварује спојкама (ногама) променљиве дужине. Стјуартова платформа се структурно доста разликује у односу на О-Х *glide*. Из тога произлази да није могуће повући паралелу између два механизма у погледу утицаја брзине платформе на грешку интерполације.

Доказано је да грешка, настала услед нелинеарне карактеристике паралелних механизма, зависи од дужине путање платформе, независно да ли је реч о линеарном или о кружном кретању [125,126].

Хуанг и остали [127], анализирали су један механизам, где се помоћу три актуатора реализује транслаторно кретање. Сваки актуатор је повезан на једну централну платформу са две спојке. Принцип рада је веома сличан раду О-Х *glide* механизму. Доказали су да најмање горње ограничење грешке интерполације $\sup(\epsilon)$ зависи од позиције платформе, физичких параметара МПК, интерполационог периода и програмиране брзине.

Са становишта кинематске структуре, пресудну улогу, у одређивању тачности машина алатки са паралелном кинематиком, има анализа Јакобијан матрице. У радовима [128,129] истиче се њен значај, при чему [130] предлаже мере осетљивости на грешке засноване на сингуларним вредностима матрице, а [131] развија стратегије за кинематску калибрацију и компензацију грешке. У раду [132] се даље истражује однос између Јакобијан матрице и агилности МА, док се у раду [133] примењује моделирање грешака и анализа осетљивости на конкретној МПК са 5 степени слободе демонстрирајући практичне импликације ових концепата.

Јакобијан матрице се обично користе за одређивање параметара динамичког понашања, сингуларитета у радном простору, као и у анализи манипулабилности и осетљивости различитих типова механизма. У раду [134] је приказана анализа Јакобијан матрице и представљена нова методологија у анализи радног простора, сингуларитета и осетљивости код 3-PSP (3 осни - Паралелно, Серијско-Паралелни систем) паралелног робота са специфичном архитектуром.

У раду [135] је анализирана грешка кинематике код МАНК, која има 4 транслаторна актуатора. Показано је да $\det(J)$ има везе са грешком кинематике. Додатно је развијена нова методологија за одређивање грешке интерполације, коју је упоредио са МОС (eng. Median Osculating Circle – Метода средње осцилирајуће кружнице) методом, која је највише распрострањена у литератури. Грешка интерполације и грешка кинематике су различити изрази коришћени за опис исте појаве.

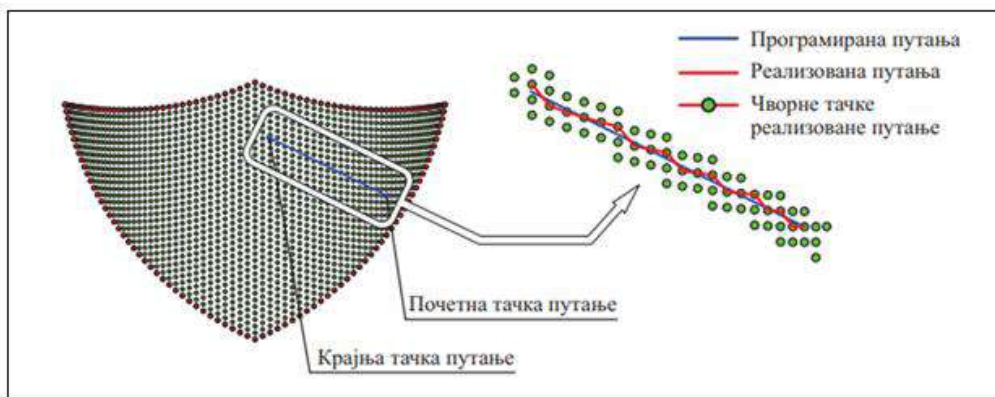
У неким литературама, [136], [137], грешка интерполације се зове и као „*chord error*“.

Где је најмања вредност детерминанте Јакобијан матрице $\det(J)$, или највећа вредност детерминанте инверзне Јакобијан матрице, тамо је најмања вредност грешке

кинематике или интерполационе грешке МАНК [135]. У исто време, где је најмања вредност $\det(J)$, тамо је најмања и резолуција [138]. Према овом току размишљања, тамо где је најмања резолуција, тамо је и најмања грешка кинематике.

У раду [139] уочено је да постоји тенденција раста геометријских грешака према спољним границама радног простора, а у раду [140] је разматрана симетричност и променљивост грешке кинематике унутар радног простора.

Једна од битних карактеристика МА је резолуција радног простора. Резолуција механизма МА се може посматрати као могући померај извршног органа (негде се назива завршни уређај) механизма. Код МА са серијском кинематиком резолуција је једнака минималној промени унутрашњих координата Δp и она важи за сваку тачку радног простора $\Delta p = \Delta x = \Delta y = \Delta z$, док код механизма са паралелном кинематиком то не важи због њихових конструкција, геометрије и начина рада. Променом једне од унутрашњих координата паралелног механизма, завршни уређај се неће кретати у правцу и смеру промене унутрашње координате, а и вредности помераја су различити $\Delta p \neq \Delta x \neq \Delta y \neq \Delta z$. У разним зонама радног простора, при праволинијском кретању платформе, реализована путања се не поклапа са програмираном, и величина грешке резолуције се јавља непредвидиво, а и максимална вредност грешке резолуције се мења у зависности од Јакобијан матрице [138]. На слици 7-1. је приказано како се то манифестује код једног типа комплексних МА са паралелном кинематиком.



Слика 7-1. Реализација програмиране путање платформе РПКМ-МОМА кретањем од чворне тачке до чворне тачке [138]

Грешка резолуције, тј. одступање стварне путање од планиране, смањује се са смањењем резолуције [141], [142]. Повећава се густина мреже и онда се може добити много прецизнија позиција.

Код МАНК, правилнијско (линеарно) кретање платформе по једној оси, због нелинеарности МА, даје нелинеаран утицај код актуатора. Код О-Х *glide* механизма, нелинеарност се квантификује помоћу коефицијената трансформације K_1 и K_2 . Ови коефицијенти су, у суштини, елементи Јакобијан матрице. Претходно описана нелинеарна веза ствара нелинеарну грешку интерполације и нелинеарну резолуцију МА унутар свог радног простора. За време мерења тачности позиционирања, према ISO 230-2 стандарду, константном брзином се креће по праволинијској путањи. При тој путањи, механизам пролази кроз делове радног простора, који имају различиту резолуцију и грешку интерполације. Због тога би, при мерењима, требало да се повећава несигурност добијених података тачности позиционирања који се трансформишу са платформе на клизаче. Ова грешка има математичку везу са коефицијентима трансформације, односно са Јакобијан матрицом.

Измерене вредности одступања од позиције потребно је да се трансформишу са координатног система платформе на координатни систем клизача. Трансформација грешке у генералном облику се може написати као:

$$dy = f'(x)dx \quad (139)$$

где је dy грешка позиционирања актуатора, dx грешка позиционирања платформе (она се мери), при чему $y = f(x)$ једначина инверзне кинематике. Када се ово опише за О-Х *glide* механизам, онда се добију следеће крајње једначине трансформације грешке:

$$ds_{1,i} = -K_{1,i}dz_{p,i} \quad (140)$$

$$ds_{2,i} = -K_{2,i}dz_{p,i} \quad (141)$$

где су $ds_{1,i}$ и $ds_{2,i}$ грешке позиционирања клизача у i -тој позицији мерења, $dz_{p,i}$ је грешка позиционирања платформе по Z оси, $K_{1,i}$ и $K_{2,i}$ су коефицијенти трансформације у i -тој позицији мерења.

Када се прерачунавају (трансформишу) вредности одступања од позиције са платформе на клизаче, онда може доћи до грешке при прорачуну, која узрокује несигурност добијеног резултата. Да бисмо сазнали који су то фактори, који утичу на трансформацију, потребно је да анализирамо коефицијент трансформације. Генерални облик трансформације грешке, према [89], у случају функције са више променљивих, може се написати у следећем облику:

$$dy = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| dx_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| dx_2 + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| dx_n \quad (142)$$

Ако се вредности dx_i узимају приближно као распон грешке особине x_i , онда на основу једначине (142) се може рачунати распон грешке параметра.

На основу једначине (136) и претходно описаног принципа, може се одредити распон грешке коефицијента трансформације помоћу следеће једначине:

$$\Delta K_1 = \left| \frac{\partial K_1}{\partial z_p} \right| \Delta z_p + \left| \frac{\partial K_1}{\partial d} \right| \Delta d + \left| \frac{\partial K_1}{\partial l_1} \right| \Delta l_1 \quad (143)$$

$$\Delta K_2 = \left| \frac{\partial K_2}{\partial z_p} \right| \Delta z_p + \left| \frac{\partial K_2}{\partial d} \right| \Delta d + \left| \frac{\partial K_2}{\partial l_1} \right| \Delta l_2 \quad (144)$$

Парцијални изводи су следећи:

$$\frac{\partial K_1}{\partial z_p} = \frac{l_1^2}{\sqrt{(l_1^2 - (z_p - d)^2)^3}}, \quad \frac{\partial K_2}{\partial z_p} = \frac{l_2^2}{\sqrt{(l_2^2 - (z_p + d)^2)^3}} \quad (145)$$

$$\frac{\partial K_1}{\partial d} = \frac{-l_1^2}{\sqrt{(l_1^2 - (z_p - d)^2)^3}}, \quad \frac{\partial K_2}{\partial d} = \frac{l_2^2}{\sqrt{(l_2^2 - (z_p + d)^2)^3}} \quad (146)$$

$$\frac{\partial K_1}{\partial l_1} = \frac{-l_1(z_p - d)}{\sqrt{(l_1^2 - (z_p - d)^2)^3}}, \quad \frac{\partial K_2}{\partial l_2} = \frac{-l_2(z_p + d)}{\sqrt{(l_2^2 - (z_p + d)^2)^3}} \quad (147)$$

Може се закључити да апсолутне вредности парцијалних извода зависе од дефинисаних геометријских величина механизма (d, l_1 и l_2) и од положаја платформе по Z оси (z_p) и они су нелинеарни по Z оси. Из тога следи да несигурност трансформације јесте нелинеарна дуж Z осе. Поред тога парцијални изводи по z_p и d имају исте вредности, док парцијални извод по l_1 је, за ову поставку машине са дефинисаним геометријским величинама спојки и осталих елемената, мањи од остала два парцијална извода.

Неслагања између номиналних и стварних геометријских параметара модела, у комбинацији са еквивалентним заменама и заокруживањем високог реда у процесу моделирања, доводе до потребе за решавањем једначина и одређивања грешака у моделирању [143].

Следећи корак у одређивању распона грешке коефицијента трансформације је да се дефинишу вредности распона грешке појединих елемената ($\Delta z_p, \Delta d, \Delta l_1$ и Δl_2).

- Δz_p – ова вредност одговара одступању од позиције у датој мерној позицији која се мери ласерским интерферометром. Ту се посматра утицај колико тачно смо рекли да је позиција платформе тамо где се треба налазити према унапред дефинисаном програму кретања, јер, ако није у претходно дефинисаној позицији, онда је и вредност коефицијента трансформације другачије.
- $\Delta d, \Delta l_1$ и Δl_2 – На одређивање ових грешака утичу 3 фактора:
 - Тачност дефинисања геометријских мера делова машине.

Наиме, када се производе делови, они се праве са одређеном границом толеранције, и већ то указује, да може да постоји неко одступање. Или, ако се врши накнадна провера величине назначених елемената, онда тачност одређивања тих дужина се може узети као грешка којом се рачуна.

- Утицаји спољних сила, који доводе до еластичног издужења/скраћења делова.

Ова вредност се може занемарити јер промене дужине, због унутрашњих сила у конструкцији, занемарљиво су мале. То се доказује најједноставније - ако се претпоставља поједностављени модел, у ком се посматра само спојка на чијем крају се јавља сила $F=50N$ пречника $d=30\text{ mm}$ од алуминијума, па је $E_{Al}=68GPa$, онда истезање спојке ϵ_{rod} због утицаја силе се може одредити на следећи начин:

$$\epsilon = \frac{4F}{d^2 \pi E} = \frac{4 \cdot 50N}{30^2 mm^2 \cdot \pi \cdot 68000N/mm^2} = 2,34 \cdot 10^{-3} \mu m \quad (148)$$

Треба напоменути да се мерења провере тачности позиционирања раде у квази статичком стању, без оптерећења насталог услед обраде. У супротном, јављале би се силе које би, врло могуће, биле толике да би имале значајан утицај на резултате мерења.

- Температурни утицаји.

На већим дужинама, као што је то случај код спојки, линеарно ширење код већих температура може да доведе до већег одступања. Температурни утицаји се посматрају у односу на $20^\circ C$. Важан је и избор коефицијента термичког ширења. Код МА са *O-X glide* механизмом и спојке и цела структура је од алуминијума и зато $\alpha_{Al} = 2,39 \times 10^{-5} [K^{-1}]$. Када се општа једначина за линеарно топлотно издужење [144] изрази за спојке, добија се следећи облик:

$$\Delta l_{1,2T} = \Delta T \cdot l_{1,2} \cdot \alpha_{Al} [\mu m] \quad (149)$$

За меру d , ради једноставнијег сагледавања ситуације, усваја се иста линеарна законитост између промене температуре и промене њене вредности, као што је то случај код дужине спојки, па је аналогно претходној једначини

$$\Delta d_T = \Delta T \cdot d \cdot \alpha_{Al} [\mu m] \quad (150)$$

- Заједнички утицај два фактора која се посматрају (температура и несигурност величине) се одређује геометријском средином. Пошто нису у корелацији, и поједини фактори добијају облик, као што се може видети у следећим једначинама:

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_m^2 + \Delta d_T^2} \quad (151)$$

$$\Delta l_{1/2} = \sqrt{\Delta l_{1/2,m}^2 + \Delta l_{1/2,T}^2} \quad (152)$$

где Δd_m и $\Delta l_{1/2,m}$ су грешке повезане са дефинисањем геометријске мере, Δd_T и $\Delta l_{1/2,T}$ су грешке изазваним променама у температури.

Код свих ових посматрања, ради једноставнијег сагледавања проблема, спојке су узете као једна хомогена алуминијска шипка, али у стварности, спојке се састоје из 5 различитих делова и два различита материјала, од алуминијума и од месинга.

Овом проценом смо добили могући опсег коефицијента трансформације са границама $\pm \Delta K_1$ и $\pm \Delta K_2$ дискретне расподеле, што нам даје могућност одређивања несигурности трансформације користећи Тип Б евалуацију и једначину (56). Једначина (153) је несигурност трансформације.

$$u_{Tr} = \frac{\Delta K_{1/2} - (-\Delta K_{1/2})}{2\sqrt{3}} = \frac{\Delta K_{1/2}}{\sqrt{3}} \quad (153)$$

Што је већа вредност коефицијента трансформације, то је резолуција платформе већа. Због тога је већа несигурност да се карактеристична тачка платформе, чија позиција се мери, не налази у предвиђеној позицији. Пошто се резолуција мења у радном простору, тако је и несигурност променљива у различитим позицијама мерења. Код О-Х *glide* механизма, она се мења само по Z оси.

Процењена несигурност изазвана грешком интерполације ε се израчунава на следећи начин:

$$u_{interp.} = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{3}} [\mu m] \quad (154)$$

Грешка интерполације код МАНК са 3 степена слободe [127], чији механизам ради на истим принципима као и О-Х *glide* механизам, у зонама максималних вредности $det(J)$, износи $\varepsilon = 4,18 \cdot 10^{-5} \mu m$ при брзини платформе $F = 10.000 \text{ mm/min}$ и периода интерполације $\tau = 10 \text{ ms}$. У раду је доказано и то да повећање брзине платформе у граничним зонама, при периоду интерполације $\tau = 10 \text{ ms}$, повећава грешку интерполације. При брзинама $F = 30.000 \text{ mm/min} = 500 \text{ mm/s}$, грешка интерполације достиже вредност $\varepsilon = 3,5 \cdot 10^{-3} \mu m$, што и даље није значајно, а и при тим брзинама се достиже граница опсега мерења ласерским интерферометром, што прописује произвођач. Претходно приказане вредности грешке интерполације указују на

занемарљиву величину утицаја интерполације на несигурност тачности позиционирања при релативно малим брзинама помоћног кретања.

Када се изврши прорачун несигурности трансформације једначина (63), добија следећи облик:

$$u_P = \sqrt{u_d^2 + u_m^2 + u_T^2 + u_{EVE}^2 + u_s^2 + u_{Tr}^2} [\mu m] \quad (155)$$

Ово значи да се несигурност у датој мерној позицији мења. Због нелинеарне природе механизма по мерним позицијама, вредност u_{Tr} је променљива, и у свакој мерној позицији ће бити различита. Репрезентативна вредност мерне несигурности, по оси у једној позицији, узима се за најудаљенију позицију према препоруци стандарда ISO 230-2:2014. То је због тога што је тамо највећи утицај термичких појава, и тамо је највећа вредност u_P . Код МАНК, резолуција зависи од позиције платформе у радном простору, и промена резолуције, дуж Z осе, не мора да се повећава са удаљавањем од нулте позиције мерења. Другим речима, ако се платформа креће од нулте позиције до последње, удаљеност се повећава, па се и несигурност термичког ширења повећава, а несигурност трансформације може да се смањује, или ће на средини осе бити највећа. То све зависи од конструкције и механизма МАНК. Зато треба да се обрати посебна пажња при одабиру репрезентативне позиције јер, опет, у зависности од механизма, могуће је да несигурност, изазвана трансформацијом, може бити много већа него што је u_T .

Што се тиче несигурности параметара мерења тачности позиционирања, трансформација зависи од одступања од позиције. У складу са тим, једначине (100) и (104) мењају облик у следећи:

$$u(B) = 2 \sqrt{\frac{u_{EVE}^2}{n} + u_s^2 + u_{Tr}^2} [\mu m] \quad (156)$$

$$u(M, E, E \uparrow, E \downarrow) = \sqrt{u_D^2 + u_M^2 + u_T^2 + u_s^2 + \frac{u_{EVE}^2}{n} + u_{Tr}^2} [\mu m] \quad (157)$$

За прорачун несигурности мерења нелинеарних оса, када се добијени резултати исказују за појединачне актуаторске осе, препоручљиво је користити претходно дефинисане једначине.

7.3 Промењена кинематика O-X *glide* механизма са константним брзинама клизача

Да би се могао проверити евентуални утицај на променљивост резолуције, унутар радног простора за Z осу на параметре провере тачности позиционирања, методама које прописује стандард ISO 230-2:2014, потребно је да се обезбеде услови које прописује претходно поменути стандард. Разлика између МАНК и МАЛК, према тим прописима, јесте константна брзина кретања. Пошто се код серијских механизма клизачи, током мерења, крећу константном брзином, као и платформа због линеарне везе, треба да се обезбеди константност брзине и код O-X *glide* механизма. Нелинеарни механизам посматране машине из геометријских разлога не допушта да се програмира тако да кретање платформе константном брзином по Z осе буде праћен константном брзином

кретања неких од клизача. Али могућа је таква конфигурација у којој се сваки клизач посебно програмира на такав начин да се креће константном брзином, други клизач са променљивом брзином, а платформа са променљивом брзином, али праволинијски по Z оси. Претходно је доказано [80] да, при релативно малим брзинама помоћног кретања, промена брзине нема значајан утицај на параметре тачности позиционирања. Ако се обезбеди оваква кинематика механизма, онда се може упоредити значај променљивости брзине на параметре тачности позиционирања, а са тим и да се обједини и утицај резолуције јер је променљивост брзине директно повезана са резолуцијом.

За постизање жељене кинематике први услов је да се платформа мора кретати изричито по Z оси. Ово је потребно да би се могло урадити мерење помоћу ласерског интерферометра, пошто оно није у могућности да испрати велика одступања од паралелности покретне осе јер се губи сигнал, што доводи до аутоматског заустављања мерења и губљења података. Други услов је да се померај дефинише тако да се једна оса креће константном брзином.

Први услов се може обезбедити ако се из једначина (120) за инверзну кинематику посебно извуку вредности координата платформе z_p . У том случају добијамо следеће облике:

$$z_p = d \pm \sqrt{l_1^2 - (s_1 - x_p + x_{R1} - p_1)} \quad (158)$$

$$z_p = -d \pm \sqrt{l_2^2 - (s_2 + x_p - x_{R2} - p_2)} \quad (159)$$

При решавању инверзне кинематике у корист z_p добијају се два могућа резултата од којих само један има решења која одговарају кинематској поставци. Ово се да проверити за дискретне позиције клизача и одмах се може закључити која варијанта од две могуће даје задовољавајуће резултате. После провере једначине, добијају коначни облик:

$$z_p = d - \sqrt{l_1^2 - (s_1 - x_p + x_{R1} - p_1)} \quad (160)$$

$$z_p = -d - \sqrt{l_2^2 - (s_2 + x_p - x_{R2} - p_2)} \quad (161)$$

Овим смо дефинисали кретање по Z оси. Додуше, посебно за два клизача. Да би се задовољио други услов да се један клизач креће константном брзином, а други клизач променљивом брзином, при чему платформа се креће праволинијски по Z оси, потребно је да дефинишемо кретање једног клизача у функцији кретања другог клизача, тј. да се одреди $s_1(s_2)$ и $s_2(s_1)$. Из (160) и (161) се добија:

$$d - \sqrt{l_1^2 - (s_1 - x_p + x_{R1} - p_1)} = -d - \sqrt{l_2^2 - (s_2 + x_p - x_{R2} - p_2)} \quad (162)$$

Ова једначина се сада може решити посебно за s_1 и s_2 . За оба клизача се добијају два могућа решења и слично z_p за дискретну позицију s_1 и s_2 потребно је проверити која варијанта једначине даје одговарајуће резултате. Крајњи облици кретања клизача у функцији другог клизача су

$$s_1(s_2) = x_D + p_1 - \sqrt{l_1^2 - \left(\sqrt{l_2^2 - (s_2 - x_L - p_2)^2} + 2d \right)^2} \quad (163)$$

$$s_2(s_1) = x_L + p_2 - \sqrt{l_2^2 - \left(\sqrt{l_1^2 - (s_1 - x_p + x_{R1} - p_1)^2} - 2d \right)^2} \quad (164)$$

При чему $x_D = x_p - x_{R1}$ и $x_L = x_{R2} - x_p$ се уводе као нове константе, пошто при праволинијском кретању платформе по Z оси значи да неће бити кретања по X оси и зато ће x_p бити константан током целе путање. Вредност x_p се може унапред одредити, и та вредност се узима за средину радног простора, пошто у том случају платформа има највећу дужину путања по Z оси.

Управљање МА са O-X *glide* механизмом се реализује применом софтверског управљачког система *LinuxCNC*. Овај програмски систем отворене архитектуре омогућава да се управља машином само помоћу инверзних кинематских једначина. Дефинисањем управљачког система се дефинишу једначине позиције клизача. Да би се обезбедило одговарајуће кретање, које је уједно компатибилно са G кодом, један клизач се постави као променљив по X координати, а други клизач добије одговарајућу кинематску функцију. Конкретно, дефинисали смо да померај клизача J_0^2 одговара G код померају по X оси, а да померај клизача J_1 буде дефинисан једначином (164). Исти принцип важи и у обрнутом случају. На овакав начин смо добили праволинијско кретање платформе по Z оси са константном брзином једног клизача.

Једначина $s_1(s_2)$ даје резултат да се клизач J_1 креће константном брзином, а клизач J_0 променљивом, а једначина $s_2(s_1)$ даје резултат да се клизач J_0 креће константном брзином, а клизач J_1 променљивом.

² Подсетник аутора: Називи клизача су J_0 и J_1 . Те ознаке се користе и у кинематици машине алатке. Али при дефинисању координата клизача, користе се променљиве s_1 и s_2 . Померају клизача J_0 одговарају координате s_1 , а померају клизача J_1 одговарају координате s_2 .

8. поглавље

Умиривање система током мерења тачности позиционирања линеарног померања

8.1 Теоријске основе и циљ

Један од важнијих елемената експерименталног испитивања представља исправан избор параметара мерења чије вредности нису прецизиране стандардом. Један од таквих параметара, који може имати значајан утицај на резултате, јесте време мировања у оквиру ког се умирује мерни систем у циљу преузимања веродостојне вредности померања приликом мерења тачности позиционирања.

У припремној фази истраживања, за један од циљева, постављен је избор адекватног времена умиривања система при мерењу, и на основу њега, време заустављања, а тиме се постиже оптимизација времена испитивања. Ово има директан утицај на ефикасност и економичност мерења пошто је за ове типове мерења потребно да се заустави производња макар за једну смену, што корисницима МА ствара додатне трошкове због неискористивости машине. Мерење траје дужи временски период пошто је захтевно постављање инструментације и велики је број тачака у којима је потребно измерити резултате.

Веза између структуре МА и грешке инерције код МА је сложена и вишеструка. Јанг [145] наглашава утицај инерционих сила на динамичку грешку централне тачке алата, посебно код високо брзинских МА са више нумерички управљаних оса. Ово даље истражује Генг [146] који идентификује нелинеарну везу између координата положаја оса ротације и оријентације алата, што доводи до одступања од потребне равни и погоршања тачности. Видијарто [147] наглашава важност проучавања динамичког понашања МА, посебно у вези са сложеним вибрационим режимима на које утичу позиције оса и конфигурација МА. Студије заједно указују на међусобну интеракцију између структуре машине и грешке инерције, као и потребу за свеобухватним моделирањем и стратегијама корекције.

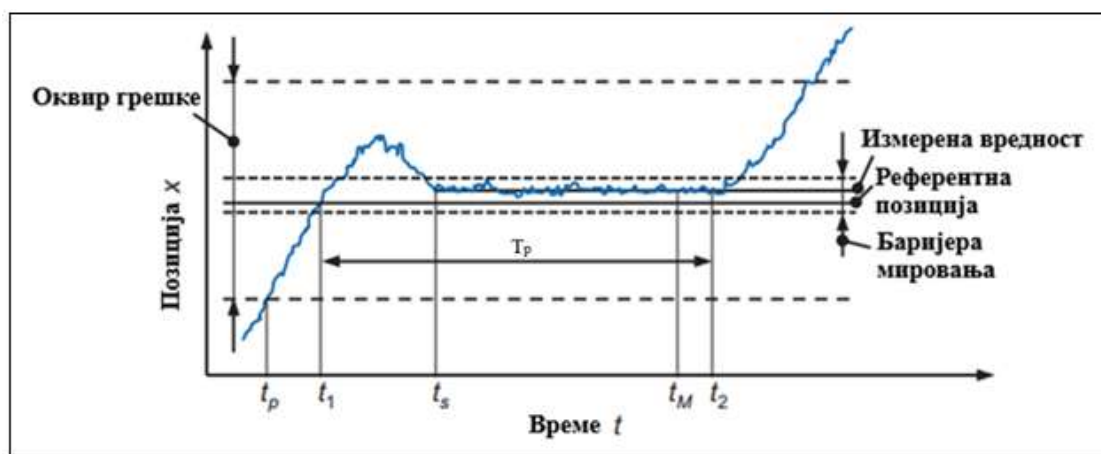
Динамичка грешка изазвана силама инерције у правцу померања зависи од позиције у другим осама. Убрзање по X оси изазива вибрације у Y и Z осама, убрзање по Y оси изазива вибрације по X и Z осама, а по Z оси изазива вибрације по X и Y осама. У литератури [145] је препоручен модел за опис позиционе зависности структуралних динамичких грешака, и сила инерција, и предложен модел који даје могућност за израчунавање динамичке грешке када је правац линеарног померања у различитим позицијама, тј. у различитим деловима радног простора. Препоручени математички модели садрже параметре које су у вези са структуром МА.

Однос између помака и грешке инерције МА је сложен, и под утицајем је различитих фактора. Жанг [148] је открио да, при великој брзини и убрзању, момент инерције мора

бити стриктно ограничен да би се побољшале карактеристике система. Андолфато [149] је истакао улогу програмираног помака у динамичким геометријским грешкама које зависе од скретања структуре машине током убрзања осе. Нишио [150] је предложио методу симулације за предвиђање утицаја грешака у кретању укључујући оне које се односе на утицај система помоћног кретања на обрађене површине. Студије заједно сугеришу да брзина померања може утицати на грешку инерције, посебно при великим брзинама и убрзањима, и да на овај однос утичу различити системски параметри.

Досада су мерења вршена тако што се у мерним позицијама заустави мерна оптика, пусти се да се систем умири одређено време. Дужина мировања се одређивала искључиво искуствено, тј. чекајући да се мерење вредности на дисплеју ласерског интерферометра смире. Након тога се, у току обраде података, део, за који се мислило да није адекватан због велике разлике између узастопних вредности, одбацивао. На такав начин се смањила несигурност измерених података.

За аутоматизовано узимање података, према [16], произвођачи опреме ласерског интерферометра користе алгоритам који резултира поједностављеном корисничком активношћу. Према тој процедури проверава се да ли је стварна позиција у предефинисаном оквиру грешке. О томе сведочи и слика бр. 8-1. Ако је овај услов задовољен, врши се референтна провера да је промена вредности позиције унутар задатог временског оквира испод предефинисане вредности (баријера мировања). После мировања, мерни систем сачека одређено време које је око 70% времена мировања машине, док систем за аквизицију не меморише вредност позиције. Сви поменути параметри се могу специфицирати у зависности од захтева мерења.



Слика 8-1. Аутоматска провера услова за аквизицију вредности позиције [16]

На претходној слици променљиве имају следеће значење: t_p – време када је машина ушла у предефинисани оквир грешке, t_1 – време када машина достигла жељену позицију, t_s – почетак мировања, t_M – тренутак, када се узимала вредност позиције, t_2 – тренутак кретања у следећу мерну позицију, T_p – време заустављања при мерењу.

Систем даје добре резултате у случају да се добро познаје машина. Недостатак је да се узима податак само у једном тренутку, а не просек вредности позиције из једног предефинисаног временског интервала јер, због утицаја спољашњих временских фактора, може доћи до значајне промене у том датом тренутку у односу на остале вредности из времена мировања машине. Поред тога, ако се не познаје структура и стање машине, потребан је већи број мерења да би се оптимизовало време заустављања при мерењу.

У циљу побољшања, потребно је увести научно-систематску методу за одређивање смирености система у току мерења тачности позиционирања помоћу ласерског интерферометра која може допринети оптимизацији извођења укупног времена мерења провере тачности позиционирања.

За одређивање минималне вредности времена заустављања при мерењу потребно је измерити период колико дуго треба да се умири систем. На то треба да се дода минималан број узоркованих података који су потребни да би се могло статистички, са великом вероватноћом, тврдити да средња вредност јесте тачан положај у датој мерној позицији. Минималан број узоркованих података се множи са фактором 1,25 (степен сигурности). Време, на основу броја узоркованих података, може се израчунати из броја узорковања по секунди.

У општем случају, минимално потребно време заустављања при мерењу T_p се рачуна на основу следеће једначине:

$$T_p = \eta_s + n_p \cdot f_s \cdot \frac{1}{1 - 2Q} \quad (165)$$

где је η_s време умиривања у зависности од позиције мерне осе и помака v_f , n_p број пожељне количине добијених вредности положаја ($n_p \geq 10$), f_s фреквенција узорковања података и Q фактор сигурности ($Q = 10\% - 20\%$).

Помоћу инверзне анализе можемо одредити граничну вредност девијације података за време умиривања да бисмо могли тврдити да оно нема значајан утицај на несигурност целокупног мерења.

У стандарду ISO 230-9:2005 наводи се пример процене мерне несигурности за мерење тачности позиционирања линеарног померања помоћу ласерског интерферометра при побољшаним индустријским условима. У табели 8-1. су приказане несигурности из наведеног примера. Вредности у табели се могу одредити помоћу једначине (63). Наведена једначина се може кориговати на начин да се узме у обзир и несигурност, настала грешком у обради података, и добије облик:

$$u_p = \sqrt{u_d^2 + u_m^2 + u_T^2 + u_{EVE}^2 + u_S^2 + u_{pd}^2} [\mu m] \quad (166)$$

где је u_{pd} несигурност настала грешком обраде података.

Табела 8-1. Несигурности из примера стандарда ISO 230-9:2005

$u_d [\mu m]$	$u_m [\mu m]$	$u_{M,MT} [\mu m]$	$u_{E,MT} [\mu m]$	$u_T [\mu m]$	$u_{EVE} [\mu m]$	$u_S [\mu m]$	$u_p [\mu m]$
0,9	0,1	1,2	1	1,6	0,5	0	1,9

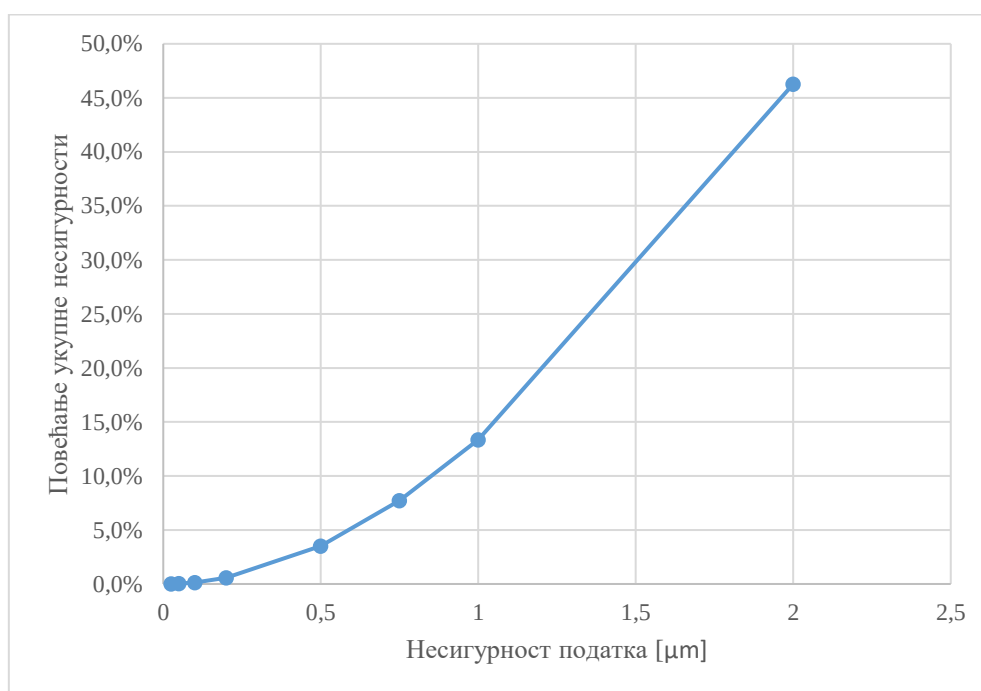
У случају да се у цели систем укључи и несигурност због обраде података, вредност несигурности у мерној позицији ће се повећавати. У табели 8-2. приказане су вредности релативног повећавања несигурности у мерној позицији, а такође и на дијаграму са слике 8-2. Релативно повећавање се одређује на следећи начин:

$$\delta_u = \frac{u_p - u'_p}{u'_p} \cdot 100[\%] \quad (167)$$

при чему је u'_p несигурност без утицаја грешке обраде података.

Табела 8-2. Повећање несигурности у мерној позицији због грешке обраде података

$u_{pd} [\mu m]$	$u_p [\mu m]$	δ_u
0	1,87	-
0,025	1,87	0,0%
0,05	1,87	0,0%
0,1	1,88	0,1%
0,2	1,88	0,6%
0,5	1,94	3,5%
0,75	2,02	7,7%
1	2,12	13,4%
2	2,74	46,3%



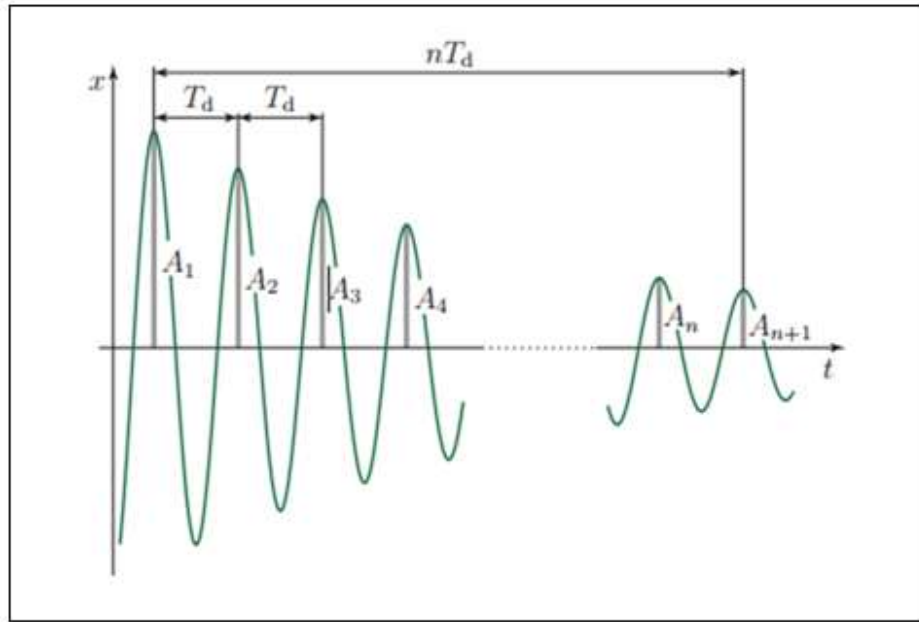
Слика 8-2. Релативно повећање несигурности у једној мерној позицији

Максималне вредности релативног повећања због амплитуде могу бити 1%, да би се могло тврдити да се може занемарити несигурност настала обрадом података. На основу овог критеријума и помоћу једначине (167) може се одредити гранична вредност несигурности настала грешком у обради података, што је приказано у табели 8-3.

Табела 8-3. Гранична вредност несигурности грешке обраде података

δ_u	$u_p' [\mu m]$	$u_{p,1\%} [\mu m]$	$u_{pd,1\%} [\mu m]$
1%	1,87	1,8887	0,32

Математички опис вибрација даје могућност да се на основу мерења може одредити време умиривања. Према [151] мерењем се могу одредити параметри система који вибрирају. На слици 8-3. је приказан период и амплитуда умиривања вибрационог система у општем случају.



Слика 8-3. Период и амплитуда у општем случају умиривања вибрационог система

Период се одређује на следећи начин:

$$T_{d,m} = \frac{t(A_{n+1}) - t(A_1)}{n} \quad (168)$$

где је n број амплитуда, $t(A_{n+1})$ време прошло од почетка посматрања вибрације до максималног одступања у истом смеру A_{n+1} .

Логаритамски декремент се одређује на следећи начин - Λ_m :

$$\Lambda_m = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_{n+1}} \quad (169)$$

Релативни фактор пригушења - ζ_m :

$$\zeta_m = \frac{\Lambda_m}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda_m^2}} \quad (170)$$

Индекс m означава, да је реч о мереном податку.

Пошто желимо да одредимо колико времена треба да прође до тренутка постизања квазистатичког стања, потребно је дефинисати за коју вредност амплитуде сматрамо да је настало квази-статичко стање и да се одреди број периода потребних да се амплитуда вибрације се смањи до тог нивоа.

У складу са претходно реченим број периода се одређује на следећи начин:

$$n_{ks} = \frac{1}{\Lambda_m} \ln \frac{A_1}{A_{ks}} \quad (171)$$

где је n_{ks} број периода да се постигне квази статичко стање, A_{ks} је амплитуда од које се може сматрати да је настало квази статичко стање.

На основу броја амплитуда се може одредити време умиривања система - η_s :

$$\eta_s = n_{ks} \cdot T_{d,m} \quad (172)$$

Могу се занемарити утицаји промене околине, као што су температура, притисак и релативна влажност, у сегменту мерења умиривања система који се односи конкретно на део када се успорава и умирује систем, пошто промене нису довољно велике и нису довољно брзе у условима мерења предвиђеним стандардом ISO 230-2:2014 да би имале значајан утицај на добијене податке. Временски оквири, у којима се умирује систем приликом испитивања, су толико кратки да се неће јавити грешке настале променом у околини.

8.2 Процедура за одређивање времена умиривања

Мерења времена умиривања треба да се врше у истим осама у којима ће се вршити испитивање тачности позиционирања линеарног кретања према ISO 230-2:2014 стандарду. Предвиђена је мерна опрема која ради на принципима ласерског интерферометра. У случају запреминске провере тачности позиционирања, у свим осама које чине позиције провере треба да се изврши провера времена умиривања.

Први корак је провера да ли су оптике адекватно монтиране на МА. При мањој брзини помоћног кретања, до 500 mm/min , проверава се стабилност експерименталне поставке. У случају да се утврди да постоје знакови могућих већих осцилација елемената машине које би угрозиле опрему, потребно је извршити ремонтaжу.

После иницијалне провере приступа се главној провери.

Брзина помоћног кретања, за проверу умиривања система, треба да одговара брзини помоћног кретања при провери тачности позиционирања линеарног кретања. У случају да се проверавају МА намењене за високобрзинску обраду, након иницијалне провере да ли је опрема добро фиксирана на релативно малој брзини, постепено се исто проверава стабилност система при већим брзинама.

Препорука је да се мерење понови макар пет пута на истој брзини да би се могли статистички обрадити подаци, а да мерење не захтева пуно времена.

На основу добијених података се одређује максимално време умиривања од пет понављања и оно се рачуна као време умиривања.

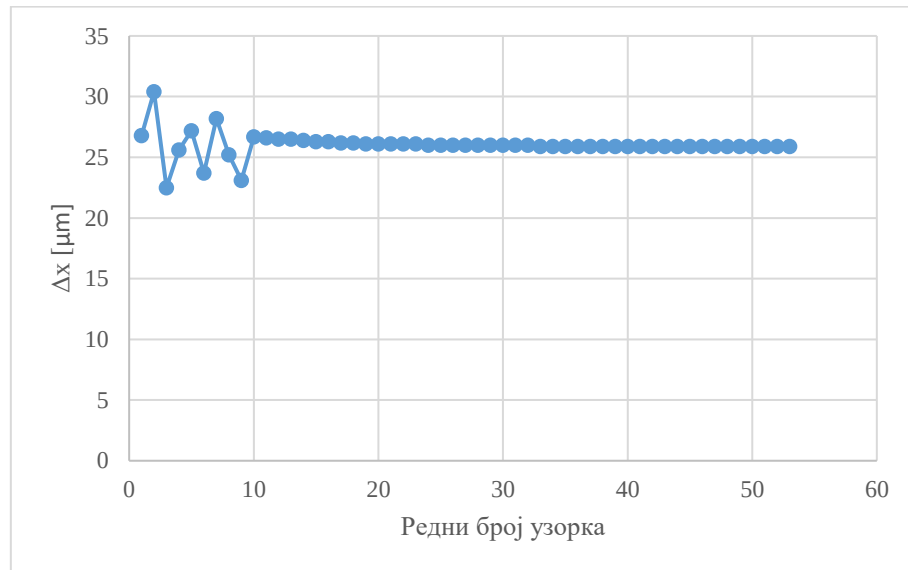
При анализи података, добијених провером тачности позиционирања линеарног кретања према стандарду ISO 230-2:2014, услов за умиривање треба бити исти, као што је то и принцип одређивања константе умирености према предложеној процедури.

МА су подложне утицајима разних вибрација. Да би се избегао утицај на мерења провере тачности позиционирања, стандард ISO 230-1:2012 [84] прописује једну кратку процедуру за проверу појаве вибрација. Према тој процедури, после поставке инструментације, радни сто се помери до средине дела путања која је намењена за проверу и проверава се да ли има одступања у читаним вредностима. Ово одступање треба да буде мање од 10% од толеранције за дати тест. Посебно се наглашава да се може смањити утицај вибрација са адекватном монтажом мерне опреме на позиције, за које се поуздано зна да не подлежу овим утицајима.

8.3 Извршени експерименти валидације

Експеримент, описан у првом делу ове главе, служи за валидацију постављених теоријских основа, и рађен је на хоризонталном обрадном центру FM38.

Предвиђено растојање x' од интерферометра до програмиране координате је била 300 mm. После заустављања, добијени су стварни подаци удаљености, и тако грешка позиционирања, која је приказана на дијаграму са слике 8-4. Статистички показатељи, на основу података из претходно поменутог дијаграма, могу се видети у табели 8-4.

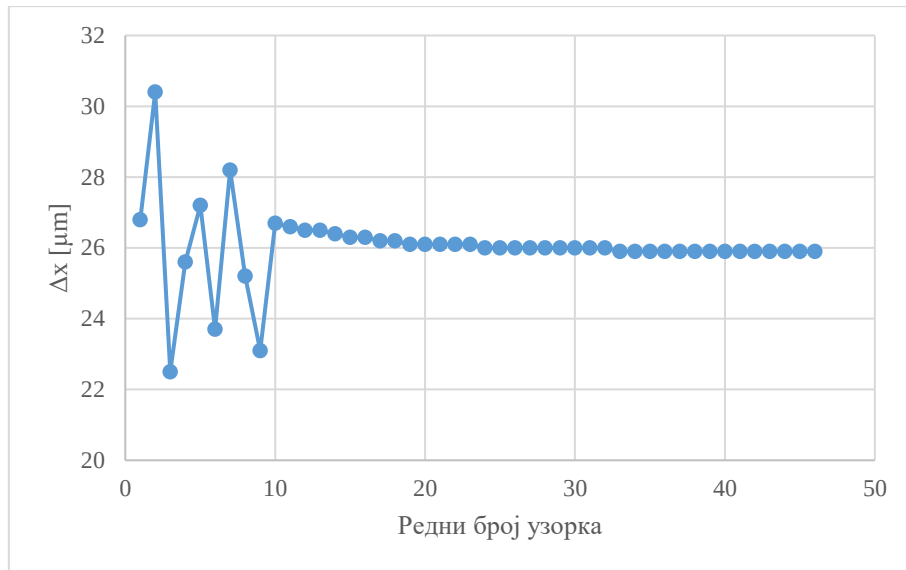


Слика 8-4. Грешка позиционирања при умиривању

Табела 8-4. Статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању

$\Delta(\bar{x})$ [μm]	26,01509	n [ком.]	53
$\sigma(x)$ [μm]	1,02889	t [s]	3,03
$\sigma^2(x)$ [μm^2]	1,058614	k	2
$\sigma^2(\bar{x})$ [μm^2]	0,019974	U [μm]	0,282658
$\sigma(\bar{x})$ [μm]	0,141329		

Може се видети да је услов $U < 0,32$ задовољен због тога што је обезбеђен довољан број узорка. У случају да се мерење вршило краће за 0,3 s, одбацило би се $n=7$ адекватних вредности грешке позиционирања, што узрокује да статистички подаци не би били одговарајући, као што се може видети на дијаграму са слике 8-5. и у табели 8-5.



Слика 8-5. Грешка позиционирања при умиривању са умањеним бројем измерених вредности

Табела 8-5. Статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању смањених са 7 узорака измерених вредности

$\Delta(\bar{x})$ [μm]	26,03261	n [ком.]	46
$\sigma(x)$ [μm]	1,104949	t [s]	$\approx 2,3$
$\sigma^2(x)$ [μm^2]	1,220913	k	2
$\sigma^2(\bar{x})$ [μm^2]	0,026542	U [μm]	0,325832
$\sigma(\bar{x})$ [μm]	0,162916		

При условима

- квази-статичко стање се узима у обзир када се амплитуда смањи до 0,1 μm .
- фреквенција узорковања $f_s = 20 \text{ Hz}$
- најмањи број узорака $n \geq 10$
- фактор сигурности $Q = 10\%$

корекција подобности је дала резултате који су приказани на дијаграму, слика 8-6. Време умиривања се одређује помоћу једначина (168)-(172) и вредност је приказана у табели 8-6.

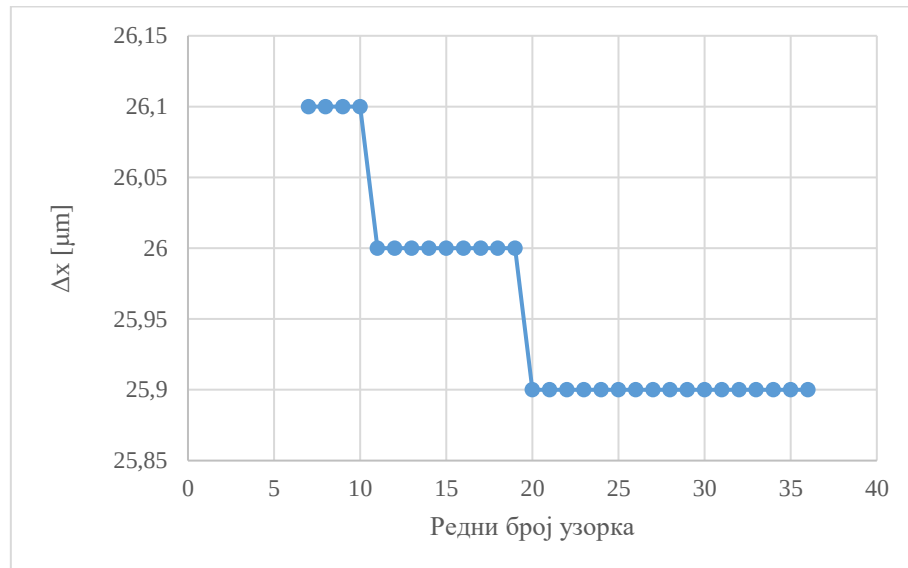
Табела 8-6. Подаци за одређивање времена умиривања код приказаног експеримента

A_1 [μm]	4,27	Λ_m	0,671244	η_s	0,971658
A_4 [μm]	0,57	ζ_m	0,106227		
n	3	n_{ks}	5,592895		
A_{ks} [μm]	0,1	$T_{d,m}$ [s]	0,173731		

На основу овог времена умиривања, може се одредити да се првих 17 података о тачности позиционирања може одбацити. Додатно је смањен број узорака, и за фактор сигурности са почетка и краја скупа података.

Минимално време умиривања се може одредити за ову експерименталну поставку помоћу једначине (165), и она износи

$$T_p = 0,97 + 30 \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{1 - 0,2} = 2,845 \text{ s}$$



Слика 8-6. Употребљиви подаци приликом мерења грешке позиционирања

У табели 8-7. приказани су статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању код подобних вредности. Може се видети да је избор подобних података био успешан. Несигурност која настаје из читавања података је занемарљива.

Табела 8-7. Статистички показатељи измерених вредности грешке позиционирања при умиривању код подобних вредности

$\Delta(\bar{x}) [\mu\text{m}]$	25,95667
$\sigma(x) [\mu\text{m}]$	0,072793
$\sigma^2(x) [\mu\text{m}^2]$	0,005299
$\sigma^2(\bar{x}) [\mu\text{m}^2]$	0,000177
$\sigma(\bar{x}) [\mu\text{m}]$	0,01329

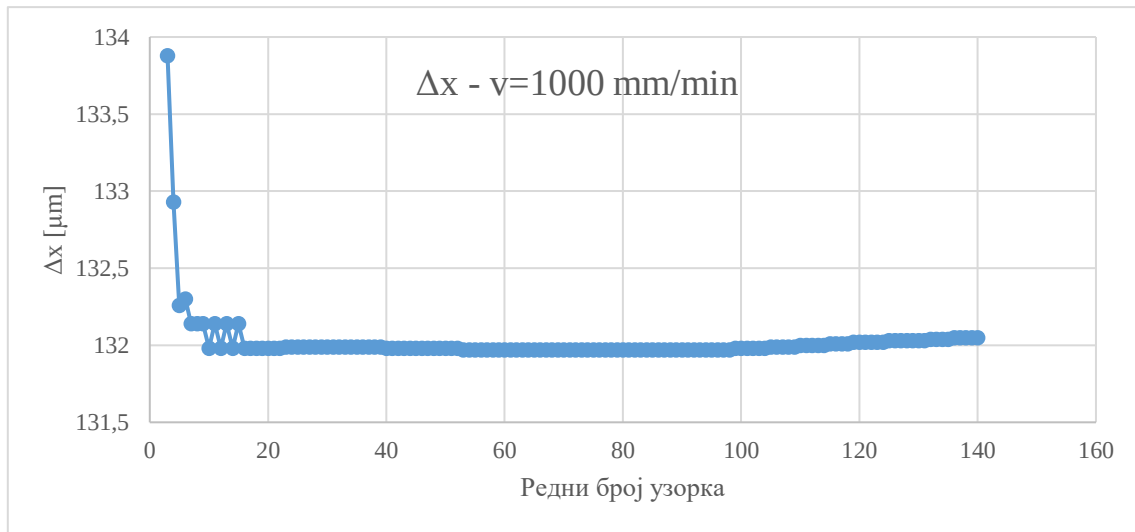
n [ком.]	30
k	2
U [μm]	0,02658

Из добијених резултата се може закључити да најефикаснији начин смањења несигурности јесте отклањање неподобних података. У супротном случају, потребно је драстично продужити време стајања да би обезбедили довољно велики број података који обезбеђују статистичку сигурност, да грешке позиционирања на почетку умиривања немају значајан утицај.

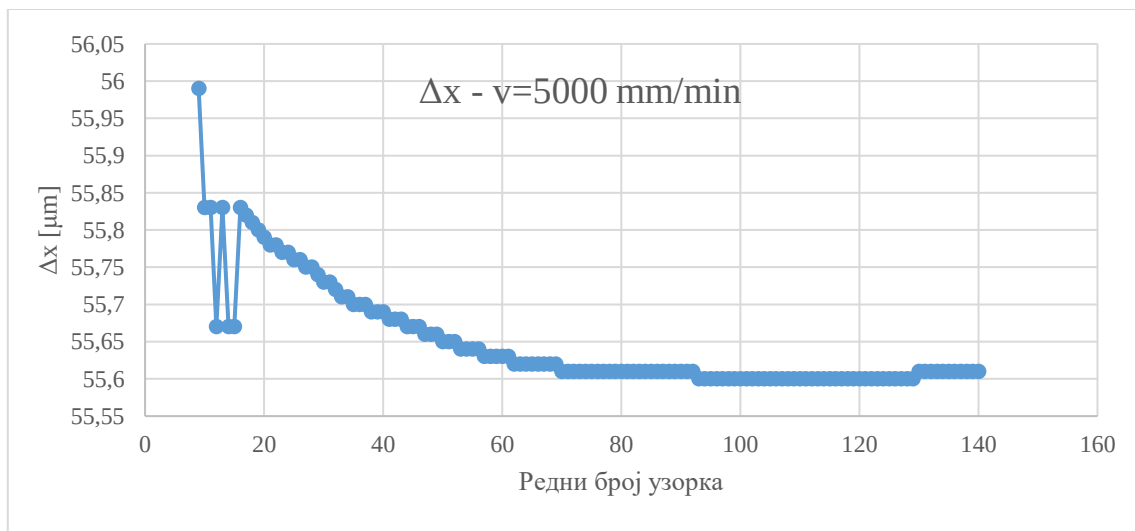
Други експеримент је вршен на хоризонталном обрадном центру FM38.

Експеримент је извођен при пет различитих брзина: 1000 mm/min, 2000 mm/min, 3000 mm/min, 4000 mm/min и 5000 mm/min.

Код свих пет брзина, умиривање је имало криву сличну оној која је приказана на дијаграмима са слика 8-7. и 8-8.



Слика 8-7. Грешка позиционирања машине алатке FM38 при помаку од 1000 mm/min



Слика 8-8. Грешка позиционирања машине алатке FM38 при помаку од 5000 mm/min

Треба истаћи да се водило посебно рачуна о начину монтирања оптике на МА, што је довело до минимализације могућности настанка вибрација.

Код оба случаја је приметно благо смањење вредности грешке позиционирања, а затим благо повећање. У овом раду се нећемо бавити разлозима ове појаве, али она може бити основ за будућа истраживања.

Није било могуће израчунати време умиривања према претходно дефинисаној теорији. Разлог за то лежи у начину управљања серво мотора. Код МА које користе серво моторе, постоји благо приближавање мерној позицији.

Да би се овај део истраживања аутоматизовао, у смислу процене и одбацивања неподобних података у току мерења, алгоритам треба да садржи следеће кораке:

1. Услов за умиривање, тј. постизање квазистатичког стања је да се амплитуда смањи до 0,1 μm . Ово значи да промена између следеће две вредности може бити

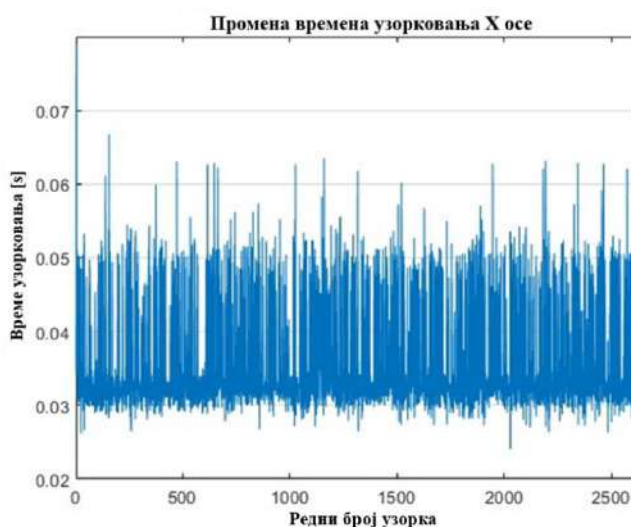
максимално $0,2 \mu\text{m}$ (дупла амплитуда) и да та промена треба да буде трајна, тј. да макар код 5 узастопних вредности ова промена стоји.

2. Одређивање редног броја првог и последњег податка за које важи овај услов. Одбацивање са овог смањеног интервала првих и последњих 10%.
3. Из преостале количине података се извлачи просек и та вредност се може узети као релевантан за даље прорачуне.

9. поглавље

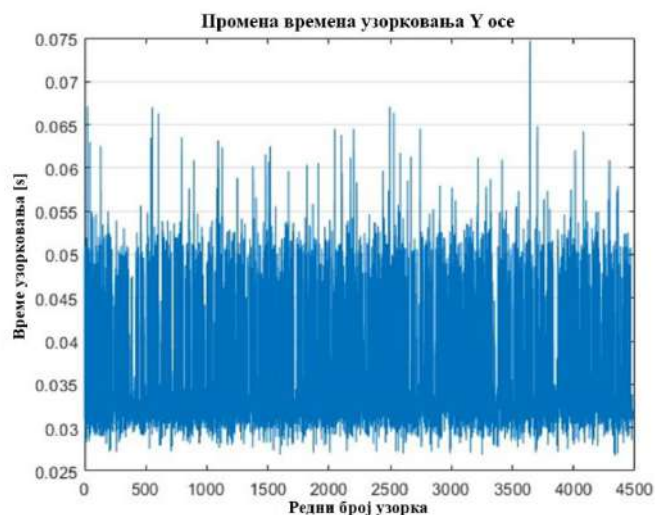
Одређивање минималног времена заустављања при мерењу МА са O-X *glide* механизмом

За што прецизније одређивање времена заустављања при мерењу, потребно је знати тачно време узорковања мерне позиције са ласерског интерферометра. Према документацији која нам је на располагању, фреквенција узорковања је 40 Hz, што одговара времену узорковања од 0,025s. Чињеница је да електронске компоненте за пренос информација са ласерског дисплеја на рачунар на коме се врши архивирање и обрада резултата, као и коришћени софтверски систем *Matlab* утичу на време узорковања и продужавају га. Због тога је код сваког мерења времена вршена анализа времена умиривања и реалне фреквенције узорковања података са ласерског интерферометра. На слици 9-1. приказан је дијаграм времена узорковања за X осу. Са претходно поменуте слике се може закључити да време узорковања није константно током мерења и оно варира од 0,025s до 0,065s.



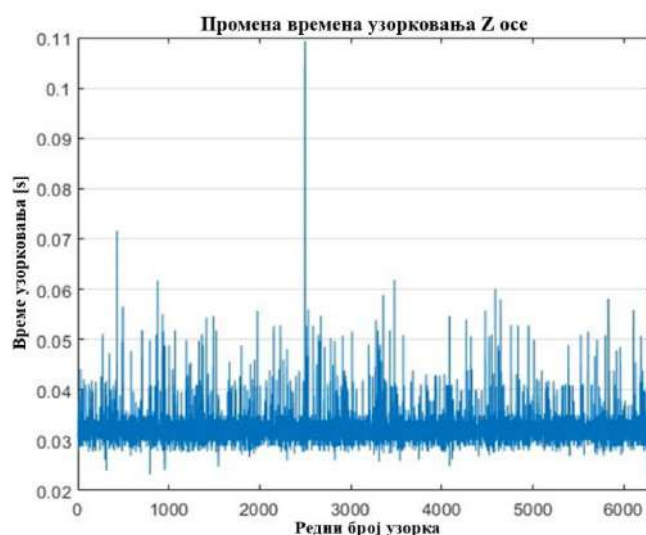
Слика 9-1. Промена времена узорковања током провере умиривања X осе

На слици 9-2. приказан је дијаграм времена узорковања за Y осу. Са ове слике се може закључити да време узорковања није константно ни током мерења ове осе и да оно варира од 0,025s до 0,075s, што је већи распон у односу на оно што се појављује код X осе.



Слика 9-2. Промена времена узорковања током провере умиривања Y осе

На слици 9-3. приказан је дијаграм времена узорковања за Z осу. Са ове слике се може закључити да време узорковања није константно током мерења и оно варира од 0,025s до 0,1s што је највећи распон у односу на претходне две осе.



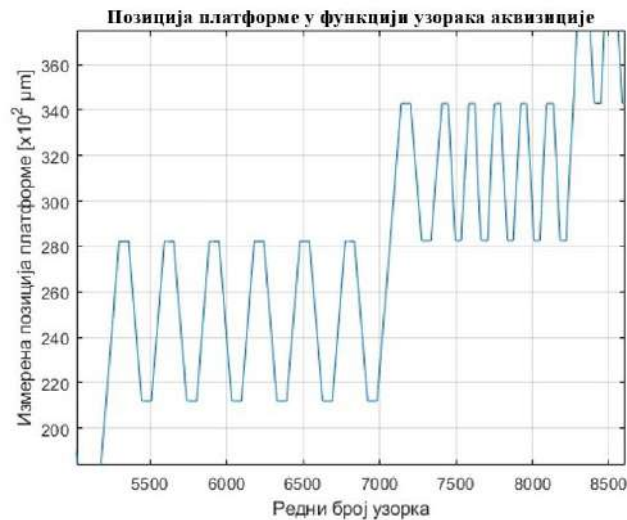
Слика 9-3. Промена времена узорковања током провере умиривања Z осе

За потребе одређивања времена умиривања t_u , одређена је средња вредност времена узорковања ($t_{u, sr.}$) по свакој осе посебно, и стандардна девијација $\sigma(t_{u, sr.})$ поменутих података. Добијени резултати су приказани у табели 9-1. Ове вредности су коришћене касније за израчунавање времена између максимума амплитуда.

Табела 9-1. Времена и фреквенције узорковања током провере времена умиривања по осама

	X	Y	Z
$t_{u, sr.}$ [s]	0,0371	0,0371	0,0328
$\sigma(t_{u, sr.})$ [s]	0,0078	0,0084	0,0037
f_s [Hz]	26,95	26,95	30,49

При обради података, добијених приликом провере тачности позиционирања Z осе, при стратегији приласка мерним позицијама методом клатна, примећена је промена у фреквенцији узорковања, што се може видети и на слици 9-4.

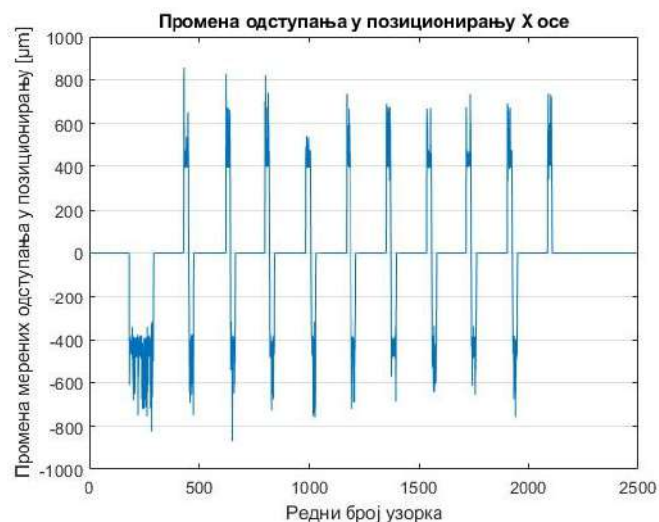


Слика 9-4. Промена фреквенције узорковања при провери тачности позиционирања Z осе методом кретања клатна

Са слике 9-4. види се промена у броју узорака за време мировања платформе, тј. у сегменту графика у коме крива има константну вредност. Пошто је платформа у свакој мерној позицији стајала временски онолико колико је било задато управљачким програмом, једино логично објашњење може бити промена времена узорковања. Ова промена је настала од провере 4. позиције, конкретно од 7649. аквизираног узорака. Од тог тренутка, користила се нова средња вредност времена узорковања која износи 0,0515558s.

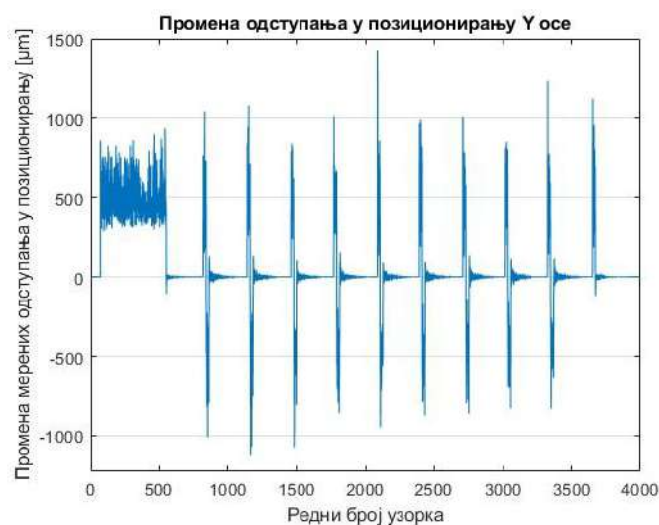
Провера времена умиривања је вршена према процедури описаној у поглављу 8. Изабрана је једна репрезентативна позиција по посматраној оси којој се приближавало 11 пута константном брзином. Током мерења се није посматрала могућност променљивости времена умиривања по различитим позицијама дуж мерене осе.

На слици 9-5. приказана је промена одступања у позиционирању током провере времена умиривања X осе. Делови дијаграма, где промена није једнака нули, представљају кретање платформе. Платформа је програмирана да се креће константном брзином, што значи да би промена требала бити константна, али због променљивости времена узорковања стиче се утисак да се платформа креће променљивом брзином.



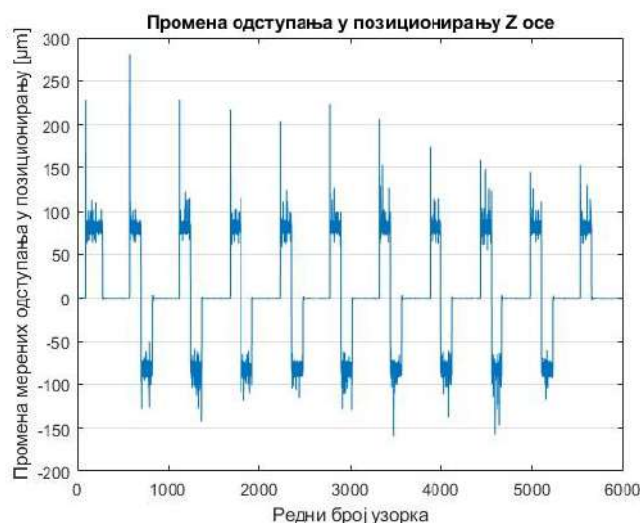
Слика 9-5. Промена одступања у позиционирању током провере умиривања X осе

Слично као што је урађено при провери умиривања X осе, на сликама 9-6. и 9-7., приказана је промена одступања у позиционирању током провере времена умиривања Y и Z осе. На сликама 9-8., 9-9. и 9-10. су посебно истакнути делови када се умирује платформа. То указује и на разлике које постоје између три осе. Највећа амплитуда и најдуже трајање вибрација се може видети код Y осе на слици 9-10. Разлог за такву појаву је у конструкцији Y осе где постоји погонски склоп који обезбеђује вођење осе само са једне стране, док се са друге стране налази клизач са покретним елементима. Због тога постоји повлачење једне стране у односу на другу и то изазива „споро умиривање“. Поред тога, због инерције, крај, код кога нема погона, жели да настави своје првобитно кретање. Приликом заустављања током мерења, крај који поседује погонске елементе се заустави, а супротни крај настави кретање, што због еластичности механизма изазива осцилаторно кретање. На сликама 9-8. и 9-9. су приказане осцилације које се јављају током кретања по X и Z оси. Код обе осе осцилације се појављују кратко после заустављања при мерењу платформе. Разлог за то је крута конструкција O-X glide механизма. Разлика код X и Z осе се може објаснити ефектом које крутост механизма има у X конфигурацији у којој су вршена мерења. Очекивано је да би у O распореду било обрнуто.



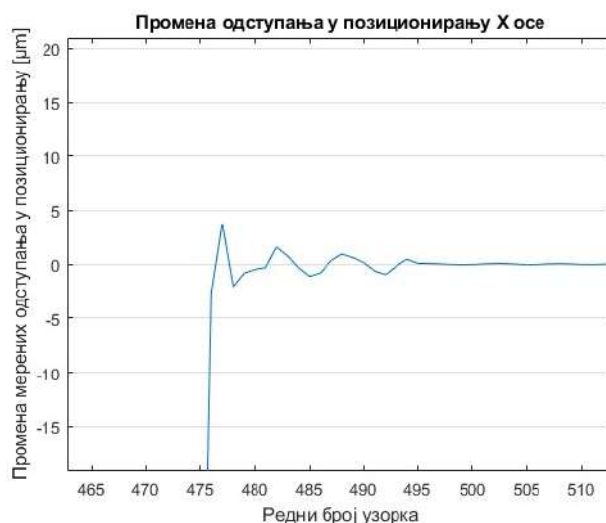
Слика 9-6. Промена одступања у позиционирању током провере умиривања Y осе

Промена одступања код Z осе, што је приказано на слици 9-7., код мерних позиција, много је мирнија него што је то случај код Y осе. Када покретна платформа мирује, онда је вредност промене једнака нули.



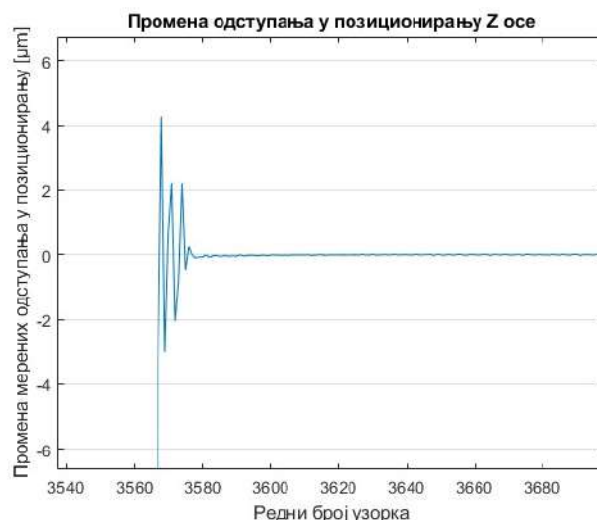
Слика 9-7. Промена одступања у позиционирању током провере умиривања Z осе

На слици 9-8. види се да код једне мерне позиције свега пар таласања се јавља при вибрацији после заустављања платформе која се кретала по X осе.



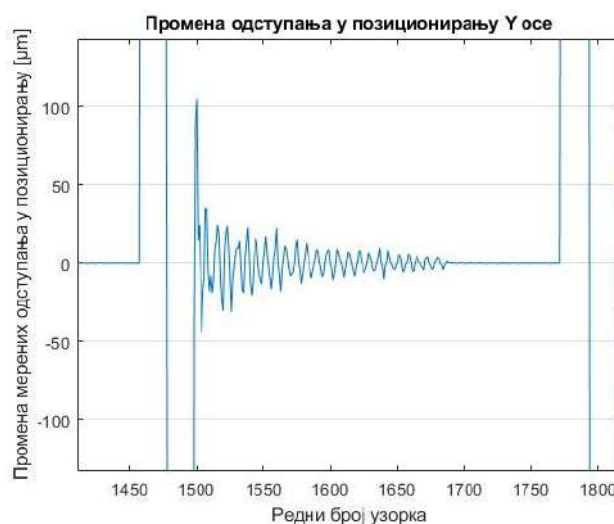
Слика 9-8. Промена одступања у позиционирању за време умиривања X осе

Исто тако, на слици 9-9. се види одступање од позиције за Z осу у једној датој позицији мировања. Код Z осе, таласање траје мало краће него што је то случај код X осе, док амплитуде имају сличне величине.



Слика 9-9. Промена одступања у позиционирању за време умиривања Z осе

Наспрам претходне две осе, код Y осе и амплитуда је већа а и таласање траје дуже. То је приказано на слици 9-10.



Слика 9-10. Промена одступања у позиционирању за време умиривања Y осе

У току реализације експеримента, није свако заустављање дало резултате који би се могли искористити за анализу времена заустављања. Код X осе 7. заустављање, а код Z осе 10. и 11. заустављање нису дали адекватне резултате у погледу неконзистентности смањења амплитуде. Због тога се они одбацују.

После одстрањења неодговарајућих заустављања, добиле су се све вредности које су биле потребне за одређивање минималног времена заустављања током мерења.

У табелама 9-2., 9-3. и 9-4. приказани су резултати провере времена умиривања система после заустављања кретања по одговарајућим осама. Параметри су објашњени у претходном поглављу.

Табела 9-2. Одређивање времена умиривања вибрације после заустављања кретања по X оси

P.б.	n _A	b _u	T _{d,m} [μm]	A ₁ [μm]	A _{n+1} [μm]	n=n _A -1	Λ _m	ζ _m	n _{ks}	η _s
1.	3	10	0,1237	1,27	0,48	2	0,4865	0,0772	5,2243	0,6461
2.	4	17	0,1577	3,79	0,47	3	0,6958	0,1101	5,2242	0,8237
3.	3	11	0,1360	1,26	0,47	2	0,4931	0,0782	5,1386	0,6990
4.	2	5	0,0928	1,58	0,79	1	0,6931	0,1097	3,9819	0,3693
5.	4	18	0,1670	2,37	0,65	3	0,4312	0,0685	7,3407	1,2255
6.	2	6	0,1113	1,11	0,47	1	0,8594	0,1355	2,8008	0,3117
7.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8.	3	12	0,1484	1,11	0,1	2	1,2035	0,1881	2,0000	0,2968
9.	3	11	0,1360	1,42	0,32	2	0,7450	0,1178	3,5612	0,4844
10.	2	6	0,1113	2,06	1,27	1	0,4837	0,0768	6,2546	0,6961
									Максимум	1,2255
									Просек	0,6170
									Девијација	0,2961

Табела 9-3. Одређивање времена умиривања вибрације после заустављања кретања по Y оси

P.б.	n _A	b _u	T _{d,m} [μm]	A ₁ [μm]	A _{n+1} [μm]	n=n _A -1	Λ _m	ζ _m	n _{ks}	η _s
1.	19	134	0,2617	17,24	1,74	18	0,1274	0,0203	40,4198	10,5760
2.	27	203	0,2789	127,01	2,85	26	0,1460	0,0232	48,9388	13,6509
3.	23	166	0,2678	131,72	3,16	22	0,1696	0,0270	42,3666	11,3443
4.	25	180	0,2671	104,87	3,63	24	0,1401	0,0223	49,6292	13,2570
5.	26	187	0,2668	152,16	3,16	25	0,1550	0,0247	47,2821	12,6165
6.	28	200	0,2650	90,79	2,85	27	0,1282	0,0204	53,1316	14,0799
7.	27	193	0,2652	93,95	3,79	26	0,1235	0,0196	55,4383	14,7020
8.	26	186	0,2654	134,44	1,68	25	0,1753	0,0279	41,0952	10,9070
9.	21	149	0,2632	113,72	2,69	20	0,1872	0,0298	37,5852	9,8937
10.	32	240	0,2783	116,57	0,29	31	0,1934	0,0308	36,5043	10,1573
11.	31	226	0,2705	120,05	1,26	30	0,1519	0,0242	46,6808	12,6258
									Максимум	14,7020
									Просек	12,1646
									Девијација	1,6700

Табела 9-4. Одређивање времена умиривања вибрације после заустављања кретања по Z оси

P.б.	n_A	b_u	$T_{d,m}$ [μm]	A_1 [μm]	A_{n+1} [μm]	$n=n_A-1$	Λ_m	ζ_m	n_{ks}	η_s
1.	2	2	0,0328	0,95	0,32	1	1,0881	0,1706	2,0689	0,0679
2.	3	5	0,0547	4,11	0,53	2	1,0242	0,1609	3,6284	0,1984
3.	3	6	0,0656	1,58	0,95	2	0,2544	0,0404	10,8508	0,7118
4.	2	4	0,0656	1,26	0,79	1	0,4668	0,0741	5,4274	0,3560
5.	3	6	0,0656	3,01	0,12	2	1,6111	0,2484	2,1132	0,1386

P.б.	n_A	b_u	$T_{d,m}$ [μm]	A_1 [μm]	A_{n+1} [μm]	$n=n_A-1$	Λ_m	ζ_m	n_{ks}	η_s
6.	2	11	0,1804	1,58	0,02	1	4,3694	0,5709	0,6317	0,1140
7.	4	8	0,0656	4,27	0,25	3	0,9460	0,1489	3,9686	0,2603
8.	3	6	0,0656	1,42	0,45	2	0,5746	0,0911	4,6177	0,3029
9.	3	6	0,0656	3,48	2,05	2	0,2646	0,0421	13,4152	0,8800
									Максимум	0,8800
									Просек	0,3367
									Девиијација	0,2792

На основу добијених вредности времена умиривања система, може се одредити најмање потребно време заустављања у току мерења при конкретним условима за минималан број пожељне количине добијених вредности положаја (n_p) и фактора сигурности (Q), помоћу једначине (165). Све вредности минималног времена заустављања клизача приликом мерења су приказане у табели 9-5.

Табела 9-5. Минимална времена заустављања по мерним осама

n_p	Q	T_{px} [s]	T_{py} [s]	T_{pz} [s]
20	10%	2,1530	15,6295	1,7000

Из представљених вредности се може закључити да ће код X и Z осе време заустављања бити релативно кратко и да неће имати велики утицај на дужину мерења. Због конструктивних специфичности при провери тачности позиционирања Y осе, мора се посветити посебна пажња времену заустављања и оно је значајно веће у односу на друге осе.

У табели 9-6. сумирани су подаци који су потребни за одређивање времена мерења према једначинама (41), (42) и (43). Ово су фиктивне вредности, и на основу њих, и претходно израчунатих вредности времена заустављања, приказују се разлике између оса са становишта времена целокупног мерења.

Табела 9-6. Репрезентативни параметри за одређивање укупног потребног времена мерења тачности позиционирања

n	6
m	9
L [mm]	300
v_f [mm/min]	800
v_f [mm/s]	13,3

Према приказаним параметрима, време мерења за X осу износи 8,5 минута, за Z осу 7,6 минута, а за Y осу износи 32,5 минута. Ово представља значајну разлику у реализацији мерења.

Што се тиче разлике између метода кретања, на једном примеру се може добро доказати разлика у временима мерења. У табели 9-7. сакупљене су репрезентативне вредности.

Табела 9-7. Упоредни подаци потребног времена мерења тачности позиционирања репрезентативних метода кретања

		Линеарна	Ходочасник	Клатно
T_m	[s]	1954,8	2085,3	1812,6
	[min]	32,58	34,755	30,21

Може се закључити да је највише времена требало за реализацију мерења методом ходочасника, а најкраће је трајала метода клатна.

10. поглавље

Провера правости МА са O-X *glide* механизмом

Провера правости O-X *glide* механизма омогућава увид у опште стање машине. Применом овог испитивања се добија потпуна слика о реалним могућностима машине и може се извршити много прецизнија процена мерне несигурности тачности позиционирања помоћу ласерског интерферометра.

У току експерименталног испитивања, спроведеног у току израде докторске дисертације, проверена је правост X, Y и Z осе у свим нормалним правцима. Мерења су вршена према „В“ експерименталној поставци са фиксним рефлектором дефинисаној у поглављу 4. Референтна линија је дефинисана применом методе крајњих тачака. Провера правости је вршена и у позитивном и у негативном смеру кретања, слично као што се то ради и код провере тачности позиционирања.

Постоји разлика у мерним позицијама правости и тачности позиционирања. Разлика настаје због тога што за проверу правости стандард прописује да мерне позиције треба да буду на једнаким међусобним удаљеностима, док то није случај код провере тачности позиционирања, где је стандардом и препорукама тражено да размаци између мерних позиција буду различити.

Мерење у свакој позицији је поновљено пет пута.

На сликама 10-1., 10-2. и 10-3. приказана је поставка мерне инструментације за проверу правости машине алатке са нелинеарном кинематиком са O-X *glide* механизмом.



Слика 10-1. Поставка ласерске мерне инструментације за проверу одступања од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ)



Слика 10-2. Поставка ласерске мерне инструментације за проверу одступања од правости X осе у правцу Y осе (EYX)



Слика 10-3. Поставка ласерске мерне инструментације за проверу одступања правости X осе у правцу Z осе (EZX)

10.1 Одступање од правости X осе у правцу Y осе (EYX)

У табели 10-1. приказане су добијене вредности очитане са ласерског интерферометра на свим мерним позицијама. У табели 10-2. приказане су средње вредности добијених података, као и израчунате вредности одступања на основу једначине референтне линије и одступања од правости.

Табела 10-1. Вредности добијене током провере одступања од правости X осе у правцу Y осе по свим мерним позицијама (EYX)

Координата мерне позиције [mm]	Добијене вредности - ↑ [μm]					Добијене вредности - ↓ [μm]				
-60	58,32	59,04	59,76	60,84	59,04	43,2	44,64	44,28	46,08	46,44
-50	169,92	171,36	172,44	172,8	171,36	159,84	160,92	160,92	162,00	162,72
-40	287,28	288,00	289,08	289,08	288,36	280,08	280,44	280,44	281,88	282,24
-30	413,28	414,72	416,16	416,16	416,16	403,56	403,56	405	405,72	405,36
-20	528,12	529,92	531,00	531,00	530,64	519,84	520,2	520,2	521,28	521,28
-10	650,16	651,24	652,32	651,96	651,96	644,04	644,04	644,4	645,48	645,12
0	766,80	769,32	769,32	769,68	769,68	761,04	761,04	761,4	762,48	762,48
10	891,36	892,8	893,16	894,24	894,6	886,32	886,32	887,4	888,84	888,84
20	1024,92	1026	1026	1026,36	1027,08	1022,04	1022,04	1022,4	1023,12	1023,12
30	1142,64	1143,36	1143,72	1144,08	1144,08	1138,68	1139,04	1139,76	1139,76	1139,4
40	1265,04	1266,48	1266,84	1266,12	1267,56	1261,08	1261,8	1261,8	1261,8	1261,8
50	1399,32	1400,04	1401,48	1400,04	1401,84	1395,72	1395,72	1395,72	1395,72	1395,72

На основу једначине (44), и описа из стандарда ISO 230-1:2012 [84], добија се следећи облик једначине референтне линије за позитиван, негативан смер и бидирекциону проверу правости, које добијају следеће облике:

- Позитиван смер

$$y = 12,19222 \cdot (x + 60) + 59,4 \quad (173)$$

- Негативан смер

$$y = 12,27993 \cdot (x + 60) + 44,928 \quad (174)$$

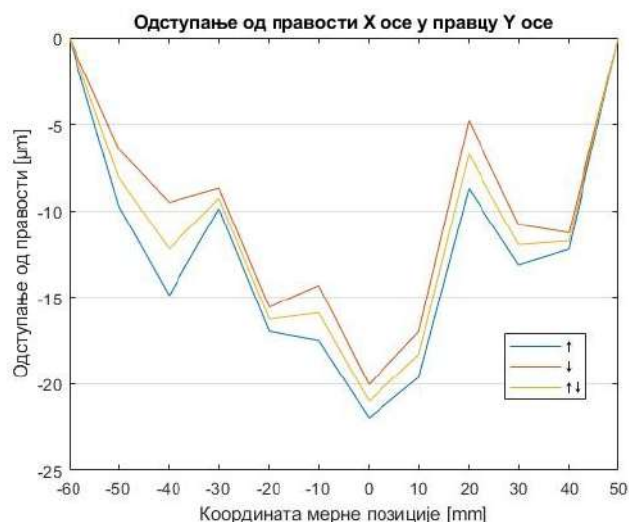
- Бидирекционо

$$y = 12,23607 \cdot (x + 60) + 52,164 \quad (175)$$

Табела 10-2. Одступање од правости X осе у правцу Y осе (EYX)

Координата мерне позиције [mm]	Просек добијених вредности [μm]			Вредност на онсову једначине праве [μm]			Одступање од правости [μm]		
	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓
-60	59,4	44,928	52,164	59,4	44,928	52,164	0,00	0,00	0,00
-50	171,576	161,28	166,428	181,3222	167,7273	174,52473	-9,75	-6,45	-8,10
-40	288,36	281,016	284,688	303,2444	290,5265	296,88545	-14,88	-9,51	-12,20
-30	415,296	404,64	409,968	425,1665	413,3258	419,24618	-9,87	-8,69	-9,28
-20	530,136	520,56	525,348	547,0887	536,1251	541,60691	-16,95	-15,57	-16,26
-10	651,528	644,616	648,072	669,0109	658,9244	663,96764	-17,48	-14,31	-15,90
0	768,96	761,688	765,324	790,9331	781,7236	786,32836	-21,97	-20,04	-21,00
10	893,232	887,544	890,388	912,8553	904,5229	908,68909	-19,62	-16,98	-18,30
20	1026,072	1022,544	1024,308	1034,777	1027,322	1031,0498	-8,71	-4,78	-6,74
30	1143,576	1139,328	1141,452	1156,7	1150,121	1153,4105	-13,12	-10,79	-11,96
40	1266,408	1261,656	1264,032	1278,622	1272,921	1275,7713	-12,21	-11,26	-11,74
50	1400,544	1395,72	1398,132	1400,544	1395,72	1398,132	0,00	0,00	0,00

Добијени резултати правости X осе су приказани и у облику дијаграма на слици 10-4.



Слика 10-4. Дијаграм одступања од правости X осе у правцу Y осе (EYX)

Највећа вредност одступања од правости X осе у правцу Y осе износи 21,97μm у позитивном смеру кретања.

10.2 Одступање од правости X осе у правцу Z осе (EZХ)

У табели 10-3. приказане су добијене вредности очитане са ласерског интерферометра на свим мерним позицијама. У табели 10-4. приказани су просеци добијених вредности, као и израчунате вредности на основу једначине референтне линије и одступања од правости.

Табела 10-3. Вредности добијене током провере одступања од правости X осе у правцу Z осе по свим мерним позицијама (EZХ)

Координата мерне позиције [mm]	Добијене вредности - ↑ [μm]					Добијене вредности - ↓ [μm]				
-60	-30,6	-30,24	-29,88	-30,6	-29,52	-29,88	-29,52	-29,88	-29,52	-29,52
-50	-86,66	-87,48	-86,94	-87,48	-86,76	-88,2	-88,56	-87,48	-88,20	-87,48
-40	-146,88	-146,16	-146,88	-146,16	-146,88	-151,92	-151,2	-151,92	-151,2	-151,2
-30	-214,92	-215,64	-214,92	-214,92	-214,92	-223,56	-223,56	-223,2	-223,2	-222,48
-20	-289,08	-289,8	-289,08	-289,8	-289,08	-296,28	-295,2	-294,84	-294,84	-295,2
-10	-362,16	-362,16	-362,16	-362,16	-361,44	-366,12	-366,48	-366,12	-366,12	-365,76
0	-429,84	-429,84	-430,2	-430,2	-429,84	-433,8	-433,08	-433,08	-432,36	-433,08
10	-483,12	-482,76	-483,12	-482,76	-483,12	-482,04	-482,76	-482,04	-482,04	-482,04
20	-539,64	-539,64	-540,36	-539,64	-539,64	-535,68	-534,6	-534,6	-534,24	-534,6
30	-599,4	-599,4	-600,12	-599,76	-599,76	-593,28	-593,64	-593,28	-593,64	-593,28
40	-653,4	-653,76	-653,58	-653,4	-653,4	-646,56	-646,56	-646,2	-646,56	-646,56
50	-711	-711	-711	-711	-711	-704,88	-704,88	-704,16	-704,88	-704,88

На основу једначине (44) и описа из стандарда ISO 230-1:2012 [84], добије се следећи облик једначине референтне линије за позитиван, негативан смер и бидирекциону проверу правости, које добијају следеће облике:

- Позитиван смер

$$y = -6,18938 \cdot (x + 60) + 30,168 \quad (176)$$

- Негативан смер

$$y = -6,13702 \cdot (x + 60) + 29,664 \quad (177)$$

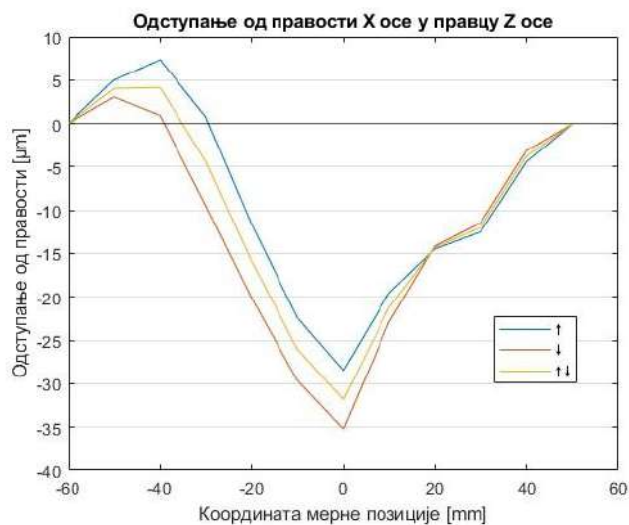
- Бидирекционо

$$y = -6,1632 \cdot (x + 60) + 29,916 \quad (178)$$

Табела 10-4. Одступање од правости X осе у правцу Z осе (EZХ)

Координата мерне позиције [mm]	Просек [μm]			Вредност на онсову једначине праве [μm]			Одступање од правости [μm]		
	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓
-60	-30,168	-29,664	-29,916	-30,168	-29,664	-29,916	0,00	0,00	0,00
-50	-87,064	-87,984	-87,524	-92,0618	-91,0342	-91,548	5,00	3,05	4,02
-40	-146,592	-151,488	-149,04	-153,956	-152,404	-153,18	7,36	0,92	4,14
-30	-215,064	-223,2	-219,132	-215,849	-213,775	-214,812	0,79	-9,43	-4,32
-20	-289,368	-295,272	-292,32	-277,743	-275,145	-276,444	-11,62	-20,13	-15,88
-10	-362,016	-366,12	-364,068	-339,637	-336,515	-338,076	-22,38	-29,61	-25,99
0	-429,984	-433,08	-431,532	-401,531	-397,885	-399,708	-28,45	-35,19	-31,82
10	-482,976	-482,184	-482,58	-463,425	-459,255	-461,34	-19,55	-22,93	-21,24
20	-539,784	-534,744	-537,264	-525,319	-520,625	-522,972	-14,47	-14,12	-14,29
30	-599,688	-593,424	-596,556	-587,212	-581,996	-584,604	-12,48	-11,43	-11,95
40	-653,508	-646,488	-649,998	-649,106	-643,366	-646,236	-4,40	-3,12	-3,76
50	-711	-704,736	-707,868	-711	-704,736	-707,868	0,00	0,00	0,00

Добијени резултати правости X осе у правцу Z осе су приказани и у облику дијаграма на слици 10-5.



Слика 10-5. Дијаграм одступања од правости X осе у правцу Z осе (EZХ)

Највећа вредност одступања од правости X осе у правцу Z осе износи 38,24 μm у негативном смеру кретања.

10.3 Одступање од правости Y осе у правцу X осе (EXY)

У табели 10-5. приказане су добијене вредности очитане са ласерског интерферометра на свим мерним позицијама. У табели 10-6. приказане су средње вредности добијених резултата, као и израчунате вредности на основу једначине референтне линије и одступања од правости.

Табела 10-5. Вредности добијене током провере одступања од правости Y осе у правцу X осе по свим мерним позицијама (EXY)

Координата мерне позиције [mm]	Добијене вредности - ↑ [μm]					Добијене вредности - ↓ [μm]				
5	17,64	20,88	20,88	19,44	21,96	25,92	27,72	24,3	27,72	27,72
25	116,64	120,6	120,6	122,4	123,48	134,64	136,08	134,64	137,16	136,8
45	240,84	239,58	239,4	240,84	241,92	246,96	245,88	246,96	248,4	247,68
65	367,2	369	366,48	369,36	370,44	358,56	359,28	358,92	360,72	360,72
85	496,08	497,88	496,8	496,44	498,24	487,8	487,44	488,52	488,88	489,96
105	623,52	624,96	624,24	624,6	624,6	617,76	618,48	619,56	619,92	619,2
125	752,04	754,92	753,84	753,12	754,2	749,16	749,16	748,08	750,96	749,88
145	881,28	882	882	882	883,08	882	882	880,92	882	882
165	1016,64	1014,48	1014,12	1014,12	1014,84	1014,84	1015,92	1015,2	1015,2	1017,36
185	1148,04	1149,48	1148,04	1149,12	1148,04	1149,84	1148,76	1149,12	1150,92	1151,28
205	1280,52	1282,86	1282,32	1281,6	1283,4	1286,28	1285,2	1285,56	1286,28	1287,36
225	1417,32	1416,6	1416,6	1417,68	1417,32	1422,36	1420,56	1423,08	1423,08	1422,36
245	1553,76	1551,96	1551,6	1552,32	1552,32	1558,08	1557,36	1559,16	1558,8	1558,44
265	1679,04	1678,32	1679,04	1677,96	1677,6	1688,76	1688,76	1688,76	1688,76	1687,68
285	1803,24	1802,52	1803,24	1803,24	1802,16	1809,72	1810,08	1810,08	1810,08	1809,72
305	1925,28	1924,56	1926	1925,64	1923,84	1928,16	1929,24	1926,36	1929,78	1928,16
325	2041,92	2039,04	2039,76	2042,64	2042,64	2044,8	2044,08	2040,84	2046,6	2043,72

На основу једначине (44) и описа из стандарда ISO 230-1:2012 [84], добија се следећи облик једначине референтне линије за позитиван, негативан смер и бидирекциону проверу правости, које добијају следеће облике:

- Позитиван смер

$$y = 6,3158 \cdot (x - 5) + 20,16 \quad (179)$$

- Негативан смер

$$y = 6,3042 \cdot (x - 5) + 26,676 \quad (180)$$

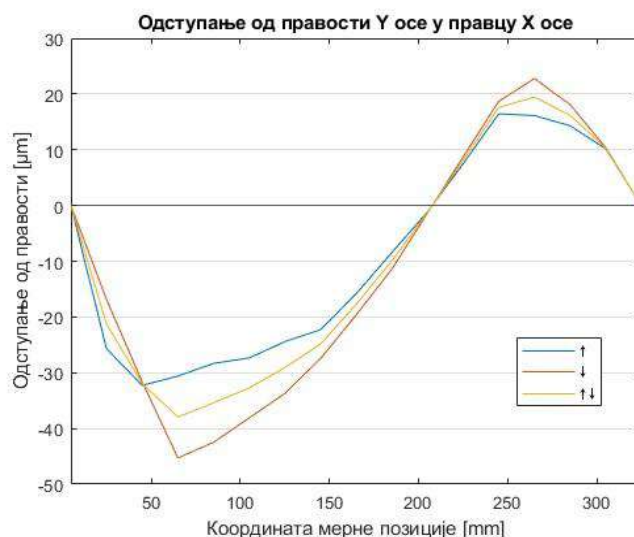
- Бидирекционо

$$y = 6,30996 \cdot (x - 5) + 23,418 \quad (181)$$

Табела 10-6. Одступање од правости Y осе у правцу X осе (EXY)

Координата мерне позиције [mm]	Просек [μm]			Вредност на онсову једначине праве [μm]			Одступање од правости [μm]		
	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓
5	20,16	26,676	23,418	20,16	26,676	23,418	0	0	0
25	120,744	135,864	128,304	146,475	152,7593	149,6171	-25,731	-16,8953	-21,3131
45	240,516	247,176	243,846	272,79	278,8425	275,8163	-32,274	-31,6665	-31,9703
65	368,496	359,64	364,068	399,105	404,9258	402,0154	-30,609	-45,2858	-37,9474
85	497,088	488,52	492,804	525,42	531,009	528,2145	-28,332	-42,489	-35,4105
105	624,384	618,984	621,684	651,735	657,0923	654,4136	-27,351	-38,1083	-32,7296
125	753,624	749,448	751,536	778,05	783,1755	780,6128	-24,426	-33,7275	-29,0768
145	882,072	881,784	881,928	904,365	909,2588	906,8119	-22,293	-27,4748	-24,8839
165	1014,84	1015,704	1015,272	1030,68	1035,342	1033,011	-15,84	-19,638	-17,739
185	1148,544	1149,984	1149,264	1156,995	1161,425	1159,21	-8,451	-11,4412	-9,94612
205	1282,14	1286,136	1284,138	1283,31	1287,509	1285,409	-1,17	-1,3725	-1,27125
225	1417,104	1422,288	1419,696	1409,625	1413,592	1411,608	7,479	8,69625	8,087625
245	1552,392	1558,368	1555,38	1535,94	1539,675	1537,808	16,452	18,693	17,5725
265	1678,392	1688,544	1683,468	1662,255	1665,758	1664,007	16,137	22,78575	19,46137
285	1802,88	1809,936	1806,408	1788,57	1791,842	1790,206	14,31	18,0945	16,20225
305	1925,064	1928,34	1926,702	1914,885	1917,925	1916,405	10,179	10,41525	10,29712
325	2041,2	2044,008	2042,604	2041,2	2044,008	2042,604	0	0	0

Добијени резултати правости Y осе у правцу X осе су приказани и у облику дијаграма на слици 10-6.



Слика 10-6. Дијаграм одступања од правости Y осе у правцу X осе (EXY)

Највећа вредност одступања од правости Y осе у правцу X осе износи 68,07 μm у негативном смеру кретања.

10.4 Одступање од правости Y осе у правцу Z осе (EZY)

У табели 10-7. су приказане добијене вредности очитане са ласерског интерферометра на свим мерним позицијама. У табели 10-8. су приказани просеци добијених вредности, као и израчунате вредности на основу једначине референтне линије и одступања од правости.

Табела 10-7. Вредности добијене током провере одступања од правости Y осе у правцу Z осе по свим мерним позицијама (EZY)

Координата мерне позиције [mm]	Добијене вредности - ↑ [μm]					Добијене вредности - ↓ [μm]				
5	40,68	44,64	44,28	43,56	43,2	50,4	49,32	49,32	48,96	48,96
25	180,36	189,72	189,36	187,2	185,76	209,88	209,52	208,08	207,72	207,36
45	320,04	325,44	325,08	324	323,28	348,84	351,36	350,64	349,92	348,48
65	460,08	463,32	463,32	462,96	462,24	483,12	484,56	484,56	482,76	482,4
85	596,52	599,04	600,48	599,04	599,04	621	621	621,36	619,92	618,3
105	730,08	734,4	734,04	733,68	732,96	754,92	755,64	753,84	753,84	753,48
125	864,36	868,32	867,6	868,32	866,16	887,04	887,76	887,76	886,68	887,04
145	992,88	997,56	997,56	997,2	994,68	1017,36	1016,64	1017	1016,28	1014,48
165	1121,4	1126,44	1126,44	1123,56	1123,92	1145,52	1146,24	1146,24	1145,16	1144,08
185	1245,6	1247,4	1247,76	1245,96	1245,24	1267,56	1267,56	1268,28	1266,84	1267,2
205	1366,2	1370,52	1368,72	1368,72	1367,28	1388,16	1389,24	1388,88	1388,16	1387,8
225	1480,68	1485	1482,12	1482,84	1479,96	1500,84	1503	1502,64	1502,28	1500,48
245	1589,76	1595,52	1594,8	1594,44	1593	1615,32	1616,4	1616,76	1616,04	1615,32
265	1687,32	1694,88	1694,7	1690,2	1692,36	1717,92	1720,08	1720,08	1718,28	1716,84
285	1786,32	1786,32	1787,4	1787,04	1786,32	1811,52	1812,6	1812,96	1812,24	1810,08
305	1871,28	1877,4	1874,52	1874,52	1873,08	1892,16	1895,76	1893,96	1893,96	1891,8
325	1954,80	1956,24	1958,4	1956,96	1955,88	1961,28	1964,16	1965,24	1963,44	1961,64

На основу једначине (44) и описа из стандарда ISO 230-1:2012 [84], добија се следећи облик једначине референтне линије за позитиван, негативан смер и бидирекциону проверу правости, које добијају следеће облике:

- Позитиван смер

$$y = 5,9787 \cdot (x - 5) + 43,272 \quad (182)$$

- Негативан смер

$$y = 5,9805 \cdot (x - 5) + 49,392 \quad (183)$$

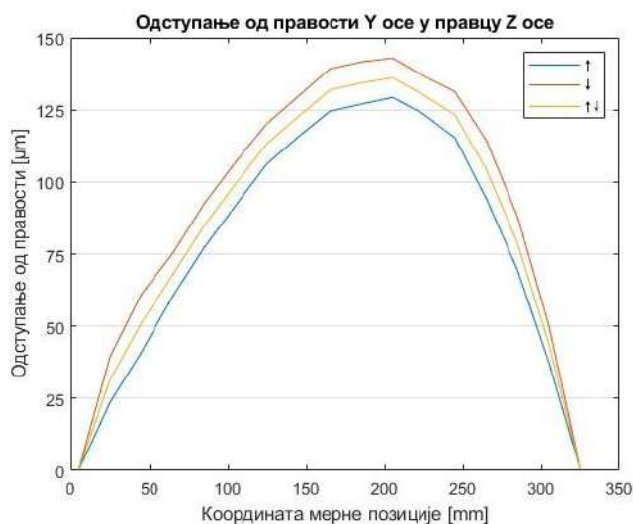
- Бидирекционо

$$y = 5,9796 \cdot (x - 5) + 46,332 \quad (184)$$

Табела 10-8. Одступање од правости Y осе у правцу Z осе (EZY)

Координата мерне позиције [mm]	Просек [μm]			Вредност на онсову једначине праве [μm]			Одступање од правости [μm]		
	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓
5	43,272	49,392	46,332	43,272	49,392	46,332	0	0	0
25	186,48	208,512	197,496	162,846	169,002	165,924	23,634	39,51	31,572
45	323,568	349,848	336,708	282,42	288,612	285,516	41,148	61,236	51,192
65	462,384	483,48	472,932	401,994	408,222	405,108	60,39	75,258	67,824
85	598,824	620,316	609,57	521,568	527,832	524,7	77,256	92,484	84,87
105	733,032	754,344	743,688	641,142	647,442	644,292	91,89	106,902	99,396
125	866,952	887,256	877,104	760,716	767,052	763,884	106,236	120,204	113,22
145	995,976	1016,352	1006,164	880,29	886,662	883,476	115,686	129,69	122,688
165	1124,352	1145,448	1134,9	999,864	1006,272	1003,068	124,488	139,176	131,832
185	1246,392	1267,488	1256,94	1119,438	1125,882	1122,66	126,954	141,606	134,28
205	1368,288	1388,448	1378,368	1239,012	1245,492	1242,252	129,276	142,956	136,116
225	1482,12	1501,848	1491,984	1358,586	1365,102	1361,844	123,534	136,746	130,14
245	1593,504	1615,968	1604,736	1478,16	1484,712	1481,436	115,344	131,256	123,3
265	1691,892	1718,64	1705,266	1597,734	1604,322	1601,028	94,158	114,318	104,238
285	1786,68	1811,88	1799,28	1717,308	1723,932	1720,62	69,372	87,948	78,66
305	1874,16	1893,528	1883,844	1836,882	1843,542	1840,212	37,278	49,986	43,632
325	1956,456	1963,152	1959,804	1956,456	1963,152	1959,804	0	0	0

Добијени резултати правости Y осе у правцу Z осе су приказани и у облику дијаграма на слици 10-7.



Слика 10-7. Дијаграм одступања од правости Y осе у правцу Z осе (EZY)

Највећа вредност одступања од правости Y осе у правцу Z осе износи $142,96\mu\text{m}$ у координати 205mm у негативном смеру кретања.

10.5 Одступање од правости Z осе у правцу X осе (EXZ)

У табели 10-9. приказане су добијене вредности очитане са ласерског интерферометра на свим мерним позицијама. У табели 10-10. приказани су просеци добијених вредности, као и израчунате вредности на основу једначине референтне линије и одступања од правости.

Табела 10-9. Вредности добијене током провере одступања од правости Z осе у правцу X осе по свим мерним позицијама (EXZ)

Координата мерне позиције [mm]	Добијене вредности - ↑ [μm]					Добијене вредности - ↓ [μm]				
-15	27	27,36	27,72	24,84	25,92	92,52	95,04	92,16	89,28	88,2
-20	69,84	73,44	75,6	71,64	73,08	127,08	129,24	129,6	127,08	126,72
-25	117,72	121,68	121,68	120,96	118,8	185,04	188,28	189,36	188,28	188,28
-30	150,84	153	154,08	152,64	151,92	233,64	235,08	234	236,88	235,08
-35	207,36	207	211,32	208,8	207,72	273,24	274,86	275,4	275,04	277,02
-40	248,04	247,68	248,04	248,04	245,16	269,28	270,72	270,72	272,52	271,44
-45	305,28	302,4	302,04	300,96	298,8	303,48	303,48	302,04	300,96	299,88
-50	378,36	376,92	376,56	375,12	372,96	376,92	376,2	377,28	374,04	371,52
-55	456,48	454,32	453,96	453,6	450,72	462,6	458,64	459	454,68	454,32
-60	504,36	505,44	505,8	504,36	450,72	519,84	520,92	521,28	519,12	519,12

На основу једначине (44) и описа из стандарда ISO 230-1:2012 [84], добија се следећи облик једначине референтне линије за позитиван, негативан смер и бидирекциону проверу правости, које добијају следеће облике:

- Позитиван смер

$$y = -10,3904 \cdot (x + 15) + 26,568 \quad (185)$$

- Негативан смер

$$y = -9,5248 \cdot (x + 15) + 91,44 \quad (186)$$

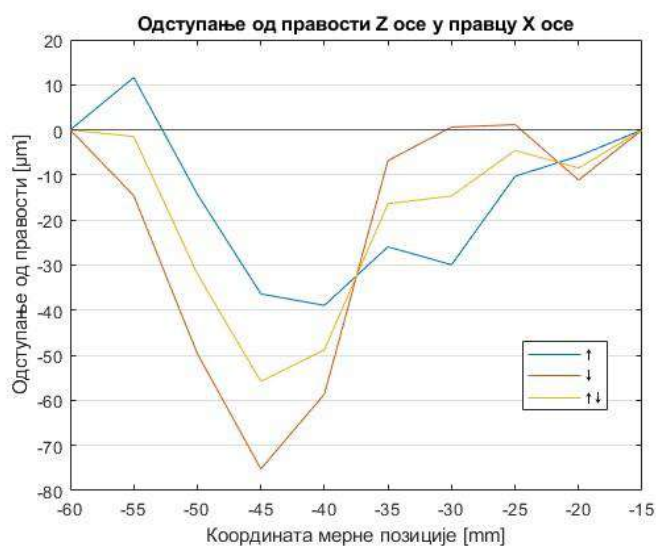
- Бидирекционо

$$y = -9,9576 \cdot (x + 15) + 59,004 \quad (187)$$

Табела 10-10. Одступање од правости Z осе у правцу X осе (EXZ)

Координата мерне позиције [mm]	Просек [μm]			Вредност на онсову једначине праве [μm]			Одступање од правости [μm]		
	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓
-15	26,568	91,44	59,004	26,568	91,44	59,004	0	0	0
-20	72,72	127,944	100,332	78,52	139,064	108,792	-5,8	-11,12	-8,46
-25	120,168	187,848	154,008	130,472	186,688	158,58	-10,304	1,16	-4,572
-30	152,496	234,936	193,716	182,424	234,312	208,368	-29,928	0,624	-14,652
-35	208,44	275,112	241,776	234,376	281,936	258,156	-25,936	-6,824	-16,38
-40	247,392	270,936	259,164	286,328	329,56	307,944	-38,936	-58,624	-48,78
-45	301,896	301,968	301,932	338,28	377,184	357,732	-36,384	-75,216	-55,8
-50	375,984	375,192	375,588	390,232	424,808	407,52	-14,248	-49,616	-31,932
-55	453,816	457,848	455,832	442,184	472,432	457,308	11,632	-14,584	-1,476
-60	494,136	520,056	507,096	494,136	520,056	507,096	0	0	0

Добијени резултати правости Z осе у правцу X осе су приказани и у облику дијаграма на слици 10-8.



Слика 10-8. Дијаграм одступања од правости Z осе у правцу X осе (EXZ)

Највећа вредност одступања од правости Z осе у правцу X осе износи 76,38 μm у негативном смеру кретања.

10.6 Одступање од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ)

У табели 10-11. приказане су добијене вредности очитане са ласерског интерферометра на свим мерним позицијама. У табели 10-12. приказани су просеци добијених вредности, као и израчунате вредности на основу једначине референтне линије и одступања од правости.

Табела 10-11. Вредности добијене током провере одступања од правости Z осе у правцу Y осе по свим мерним позицијама (EYZ)

Координата мерне позиције [mm]	Добијене вредности - ↑ [μm]					Добијене вредности - ↓ [μm]				
-15	236,7	215,28	218,52	213,84	204,84	232,2	228,96	216,36	200,88	189,36
-20	357,84	329,4	327,96	320,4	308,88	366,12	367,2	358,02	345,60	334,8
-25	500,4	478,08	476,28	471,24	459,39	507,24	511,92	509,04	499,68	491,4
-30	660,96	644,04	644,4	641,16	632,88	642,24	649,44	645,12	642,6	638,28
-35	764,64	758,88	764,64	767,52	758,88	744,12	754,92	755,64	752,76	748,08
-40	823,68	812,88	823,32	820,44	821,16	775,8	786,96	791,64	792,36	794,52
-45	917,64	906,84	910,8	903,6	902,16	806,4	815,76	817,56	816,48	824,4
-50	961,2	957,96	963,72	960,48	957,6	857,88	855,72	853,56	857,52	863,64
-55	913,68	918,36	928,44	924,12	928,44	818,64	826,92	833,04	839,16	843,84
-60	788,4	804,96	819,72	817,92	831,96	732,24	747,72	757,8	763,92	769,68

На основу једначине (44) и описа из стандарда ISO 230-1:2012 [84], добија се следећи облик једначине референтне линије за позитиван, негативан смер и бидирекциону проверу правости, које добијају следеће облике:

- Позитиван смер

$$y = -13,2168 \cdot (x + 15) + 217,836 \quad (188)$$

- Негативан смер

$$y = -12,016 \cdot (x + 15) + 213,552 \quad (189)$$

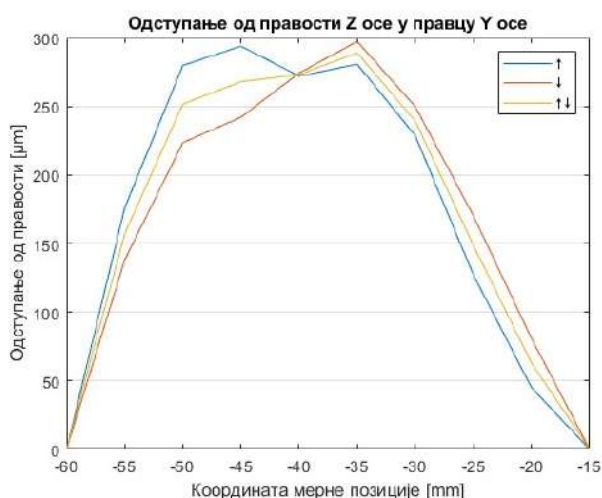
- Бидирекционо

$$y = -12,6164 \cdot (x + 15) + 215,694 \quad (190)$$

Табела 10-12. Одступање од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ)

Координата мерне позиције [mm]	Просек [μm]			Вредност на онсову једначине праве [μm]			Одступање од правости [μm]		
	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓	↑	↓	↑↓
-15	217,836	213,552	215,694	217,836	213,552	215,694	0	0	0
-20	328,896	354,348	341,622	283,92	273,632	278,776	44,976	80,716	62,846
-25	477,078	503,856	490,467	350,004	333,712	341,858	127,074	170,144	148,609
-30	644,688	643,536	644,112	416,088	393,792	404,94	228,6	249,744	239,172
-35	762,912	751,104	757,008	482,172	453,872	468,022	280,74	297,232	288,986
-40	820,296	788,256	804,276	548,256	513,952	531,104	272,04	274,304	273,172
-45	908,208	816,12	862,164	614,34	574,032	594,186	293,868	242,088	267,978
-50	960,192	857,664	908,928	680,424	634,112	657,268	279,768	223,552	251,66
-55	922,608	832,32	877,464	746,508	694,192	720,35	176,1	138,128	157,114
-60	812,592	754,272	783,432	812,592	754,272	783,432	0	0	0

Добијени резултати правости Z осе у правцу Y осе су приказани и у облику дијаграма на слици 10-9.



Слика 10-9. Дијаграм одступања од правости Z осе у правцу Y осе (EYZ)

Највећа вредност одступања од правости Z осе у правцу Y осе износи 297,23 μm у координати -35mm у негативном смеру кретања.

Када се упореде вредности највећег одступања од правости сваке осе, као што је то представљено у табели 10-13., може се закључити да Z оса, у правцу Y осе конструкционо, и у изведеном стању, даје најлошије резултате. Исто тако, Y оса у правцу Z осе у много већој мери одступа од правости у односу на преостале две. Најмања одступања измерена за X осу у оба ортогонална правца, а поред тога све равни повезане са X осом имају побољшану правост у односу на друге ортогоналне парове. Разлог за то може да лежи у томе што је линеарна оса паралелног механизма, која има побољшане карактеристике у односу на уобичајене серијске осе.

Табела 10-13. Одступање од правости по свим осама и свим правцима

Главна оса	Ортогонална оса	Највеће одступање од правости [μm]		
		↑	↓	↑↓
X	Y	21,97	20,04	21,00
	Z	35,81	38,24	35,96
Y	X	48,73	68,07	57,41
	Z	129,28	142,96	136,12
Z	X	50,57	76,38	55,80
	Y	293,87	297,23	288,99

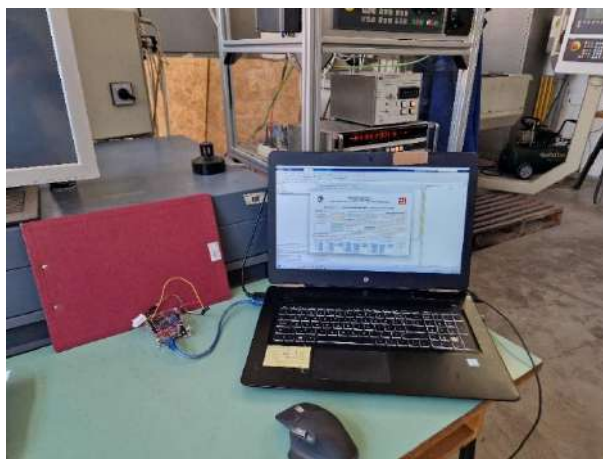
Даља анализа правости у контексту утицаја нелинеарности МА на правост није вршена пошто није тема доктората, али може бити један од смерова будућих истраживања.

11. поглавље

Провера утицаја околине на мерење са ласерским интерферометром

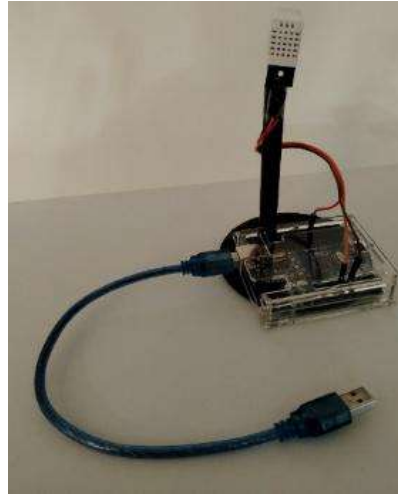
На основу описане процедуре из поглавља 5, извршене су све потребне провере утицаја околине на мерење са ласерским интерферометром. У експерименталном делу истраживања коришћен је наменски развијен софтвер за проверу тачности позиционирања, који је способан да у исто време снима податке са ласера, уређаја за компензацију утицаја околине и са екстерног сензора температуре.

Поставка експеримента са софтвером је приказана на слици 11-1. На сликама 11-3., 11-4. и 11-5. приказани су добијени резултати. Из представљених дијаграма могу се одредити вредности E_{VE} , које су исказане у табели 11-1. За мерење растојања је коришћен већ претходно представљен ласерски систем, а узорковање вредности температуре околине је вршено помоћу *Arduino UNO* контролерске картице и са сензором температуре типа *DHT22* интегрисаног у модул тачности $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, која се може видети на слици 11-2. За потребе узорковања два посебна система мерења (ласер и температура околине) за које је написан наменски програм у софтверу *Matlab* верзије *R2024a update 5* (24.1.0.2653294). Узорковање је вршено просечно сваких 3,3 секунди.



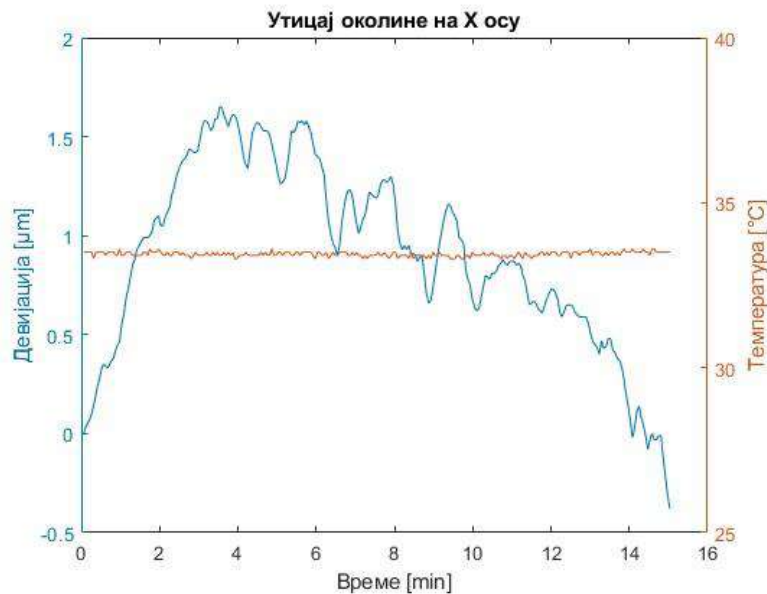
Слика 11-1. Софтвер за проверу тачности позиционирања са прикљученом *Arduino* јединицом

Arduino UNO, контролерска картица, заснована је на микроконтролеру *Atmega328*. Има 14 дигиталних излазних/улазних пинова, 6 аналогних улаза, керамички резонатор од 16MHz и могућност конекције са рачунаром преко *USB* порта. Ово омогућава широку употребу у разним истраживачким и развојним задацима као једна једноставна електронска платформа за повезивање великог броја сензора. На слици 11-2. приказан је *Arduino Uno* контролер са повезаним модулом за мерење температуре и влаге.



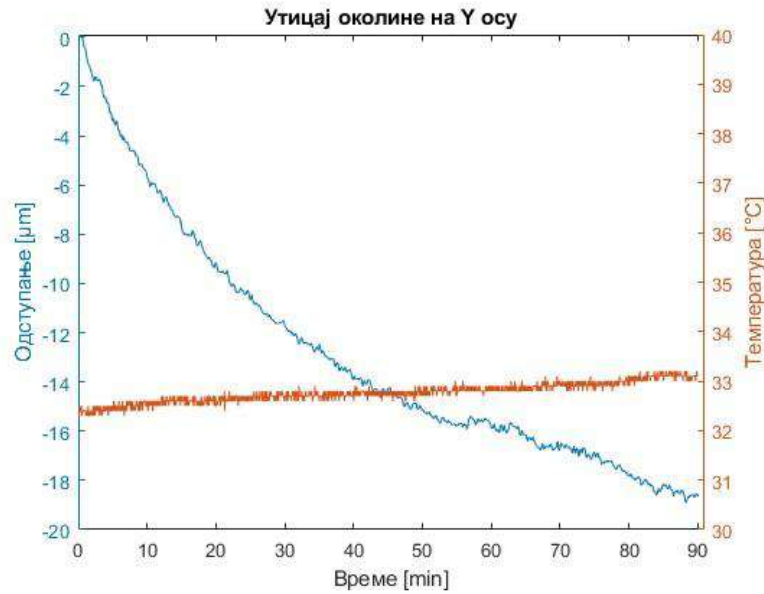
Слика 11-2. Arduino јединица са сензорима температуре и влажности ваздуха

Слика 11-3. приказује резултате провере утицаја околине или *drift* теста (описаног у поглављу 5) за X осу. Наранџастом бојом је означена температура околине, а плавом бојом девијација, тј. одступање од мерне позиције током мировања платформе. Максимално одступање је изнад $1,5\mu\text{m}$.



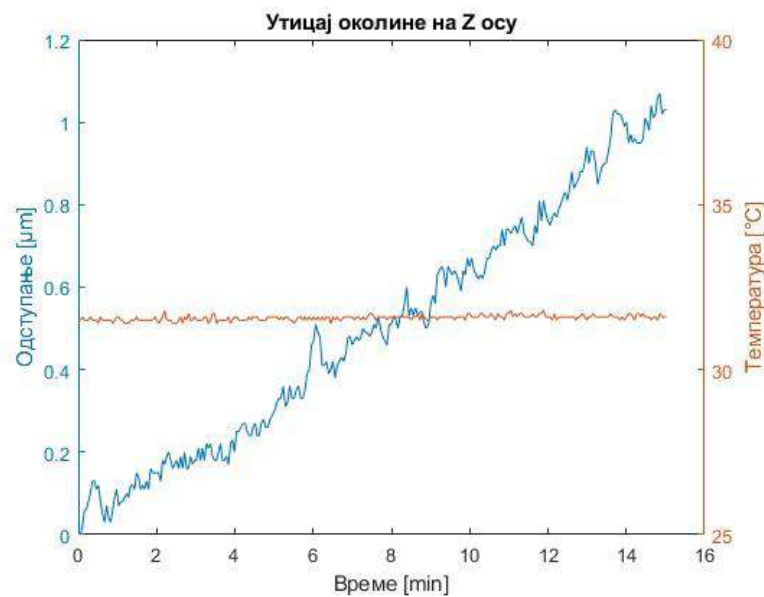
Слика 11-3. Промена очитане вредности растојања у функцији времена током мировања платформе по X оси због утицаја околине

Слика 11-4. приказује резултате провере утицаја околине или *drift* теста за Y осу. Наранџастом бојом је означена температура околине, а плавом бојом девијација, тј. одступање од мерне позиције током мировања платформе. Максимално одступање је $19\mu\text{m}$.



Слика 11-4. Промена очитане вредности растојања у функцији времена током мировања платформе по Y оси због утицаја околине

Слика 11-4. приказује резултате провере утицаја околине или *drift* теста за Z осу. Наранџастом бојом је означена температура околине, а плавом бојом девијација, тј. одступање од мерне позиције током мировања платформе. Максимално одступање је нешто више од 1 μm .



Слика 11-5. Промена очитане вредности растојања у функцији времена током мировања платформе по Z оси због утицаја околине

Табела 11-1. Вредности E_{VE} за осе X, Y и Z са одговарајућим временским оквирима мерења

	X оса	Y оса	Z оса
$E_{VE} [\mu m]$	1,66	13,07	0,74
Дужина мерења [min]	9	37	11
Временски оквир [min]	5,5 – 14,5	0 - 37	0-11

Ове вредности ће се користити за даље одређивање несигурности мерења изазваним утицајем околине.

12. поглавље

Тачност позиционирања МАНК са *O-X glide* механизмом

У поглављу 3 је опширно описана процедура и теоријске основе провере тачности позиционирања МА. Ова процедура се првенствено односи на МА са серијском кинематиком. Да би се могло тврдити са сигурношћу да је та процедура применљива и на МАНК, и да се оцењивање карактеристика тачности оса и машина може вршити истим статистичким и математичким методама, потребно је било извршити серију експеримената тачности позиционирања на једној МАНК.

На МАНК са *O-X glide* механизмом извршена су мерења провере тачности позиционирања за све три њене осе, по реду X, Y и Z. При мерењу, придржавало се свих претходно дефинисаних процедура ради повећања поузданости мерења и смањења спољних утицаја. Резултати тих мерења су приказани у складу са методологијом приказивања резултата дефинисаних стандардом ISO 230-2:2014. Поред тога, обрада резултата је вршена и према препоруци VDI/DGQ 3441 да би се уочиле разлике и евентуални утицаји експерименталних поставки и на показатеље које прописује немачка препорука.

У току мерења, свака оса се посматра посебно због својих кинематских карактеристика. Y оса је чиста серијска што има линеарну кинематску карактеристику. X оса је линеарна оса паралелног механизма. Z је оса која има у потпуности нелинеарну кинематску карактеристику са паралелним механизмом.

12.1 План експеримента

12.1.1 Излазне перформансе

Параметри који се посматрају у току експерименталног испитивања подударају са параметрима, које и стандард, и коришћена препорука прописују за описивање стања машине. Да би се боље разумели параметри, прво су анализирани са становишта сличности, и може се закључити:

а) Заједнички параметри за стандард и препоруку

- одступање од позиције,
- стандардна девијација.

б) према ISO 230-2 (посматрају се параметри, који се користе за оцењивање тачности машине)

- максимални распон одступања средњих вредности – B ,
- средња вредност распона одступања – $\bar{B}$,
- једносмерна поновљивост позиције у правцу осе – $R \uparrow$ и $R \downarrow$,

- максимална двосмерна поновљивост позиције у правцу осе – R,
- једносмерна систематска грешка позиционирања у правцу осе - $E \uparrow$ и $E \downarrow$,
- двосмерна систематска грешка позиционирања у правцу осе – E,
- максимална двосмерна грешка позиционирања у правцу осе – M,
- једносмерна грешка позиционирања у правцу осе- $A \uparrow$ и $A \downarrow$,
- двосмерна грешка позиционирања у правцу осе – A.

в) према VDI/DGQ 3441

- максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{smax} ,
- распон одступања централних вредности позиционирања - P_a (пошто је идентичан са максималном двосмерном грешком позиционирања у правцу осе, неће се посебно разматрати при анализи добијених података о тачности позиционирања),
- распон одступања позиционирања – P,
- централна вредност распона одступања средњих вредности – $\bar{U}$,
- максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - U_{max} (пошто је идентичан са максималним распон одступања средњих вредности, неће се посебно разматрати при анализи добијених података о тачности позиционирања).

12.1.2 Управљани фактори и експериментална поставка

Фактори који ће се варирати током експеримента су:

- метода кретања,
- нелинеарност кинематике.

Ови фактори су дискретни, тј. не постоје међувредности између два нивоа. У табели 12-1. приказани су нивои претходно назначених фактора.

Табела 12-1. Ниво фактора посматраних током експеримената

Фактори	Нивои		
	1	2	3
Нелинеарност кинематике	$v_{j0}, v_{j1} \neq const.$	$v_{j0} = const.$	$v_{j1} = const.$
Метода кретања	Линеарна	Ходочасник	Клатно

Мора се посебно назначити да експерименталне поставке важе само за проверу тачности позиционирања Z осе пошто она има нелинеарну кинематску карактеристику, док код других оса, мерења ће се вршити само по методама кретања. У табели 12-2. приказане су све експерименталне поставке са одговарајућим нивоима управљаних фактора.

Табела 12-2. Списак експерименталних поставки са одговарајућим нивоима фактора

Експериментална поставка	Нивои фактора	
	Метода кретања	Нелинеарност
1.	1	1
2.	1	2
3.	1	3
4.	2	1
5.	2	2
6.	2	3
7.	3	1
8.	3	2
9.	3	3

12.2 Тачност позиционирања X осе (EXX)

На сликама 12-1., 12-2. и 12-3. приказана је поставка мерне инструментације за проверу тачности позиционирања X осе према методологији описаној у поглављу 3. Ласерска глава је постављена паралелно са X осом. Ради смањења утицаја грешке одређивања нулте позиције, интерферометар и ретрорефлектор у нултој позицији су на међусобној удаљености мањој од 10 милиметара, као што се може видети са слике 12-2.



Слика 12-1. Постављена мерна опрема за проверу тачности позиционирања X осе



Слика 12-2. Ретрорефлектор и интерферометар у нултој позицији мерења током провере X осе



Слика 12-3. Механизам са мерном оптиком током провере X осе

Провера је вршена у координатама које су приказане у табели 12-3. Растојање између излазних (нултих) тачака је 186 милиметара. Због специфичног облика радног простора изабран је доњи део радног простора, који одговара нижим Z координатама. Координате су исказане у координатном систему машине и зато су у оквиру од 90 до -93 милиметара. У овој зони кретање платформе по X оси је најдуже и ту се могло урадити мерење са највећим бројем мерних тачака, а да размак између њих буде адекватан.

Табела 12-3. Координате мерних позиција за провере тачности позиционирања X осе

i	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	0.'
Координата X осе [mm]	93	90	65	28	0	-31	-57	-90	-93
Координата Y осе [mm]	45,025								
Координата Z осе [mm]	-70,118								

Спољни параметри, утицајни на мерење, и који се користе за аутоматску компензацију утицаја околине, приликом мерења, ласером су приказани у табели 12-4. T_M је температура машине, T_A је температура околине, p_A је притисак ваздуха и h_A је релативна влажност ваздуха.

Табела 12-4. Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања X осе

Метода кретања	T_M [°C]	T_A [°C]	p_A [mmHg]	h_A [%]
Линеарна	37,5	33,4	750	23
Клатно	38,6	33,5	750	23
Ходочасник	39,2	32,7	748,8	31

- Тачност позиционирања X осе линеарном методом кретања

У табелама 12-5. и 12-6. су приказани резултати мерења тачности позиционирања X осе линеарном методом кретања.

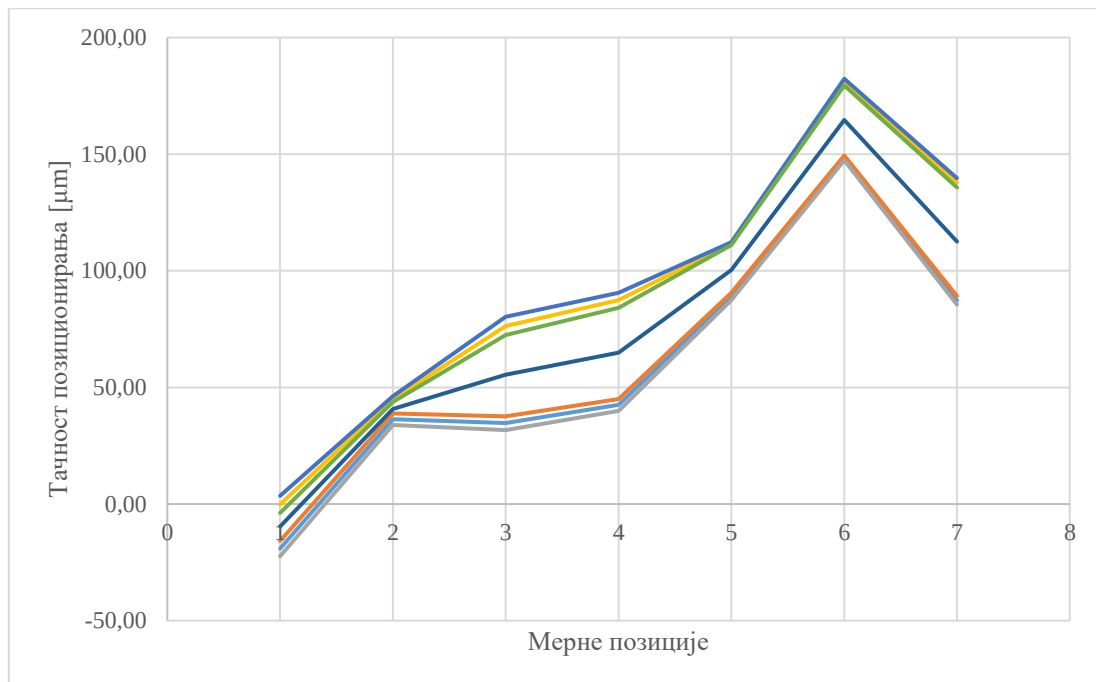
Табела 12-5. Параметри тачности позиционирања X осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Мерна позиција - P_i [μm]	3	28	65	93	124	150	183
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	-21,59	34,56	32,45	73,82	87,75	111,32	147,59
$j = 2$	-19,87	36,06	34,64	74,94	88,69	111,49	148,18
$j = 3$	-17,55	37,87	36,07	76,34	89,56	112,10	148,91
$j = 4$	-18,59	37,19	35,83	78,09	89,64	111,41	148,54
$j = 5$	-17,98	36,22	34,23	78,36	89,15	111,61	148,66
Средње једносмерно одступање од позиције - $\bar{x}_i$ [μm]	-19,12	36,38	34,65	76,31	88,96	111,59	148,38
Централна вредност одступања - $\bar{x}_i$ [μm]	-9,63	40,72	55,48	64,92	100,27	164,62	112,52
Распон одступања средњих вредности - B_i [μm]	-18,97	-8,67	-41,67	-44,86	-22,63	-32,49	-50,43
Стандардна девијација - s [μm]	1,64	1,83	1,25	1,26	0,77	0,51	0,71
Једносмерна поновљивост - R_i [μm]	6,54	7,32	5,02	5,81	3,09	1,23	2,85
Двосмерна поновљивост - R_i [μm]	25,90	12,43	48,50	50,60	24,79	34,95	54,26
Параметар	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна				
Максимални распон одступања - B [μm]	-	-	50,43				
Средња вредност распона одступања - $\bar{B}$ [μm]	-	-	-31,39				
Поновљивост по оси - R [μm]	6,54	7,86	54,26				
Систематска грешка - E [μm]	167,49	181,02	199,99				
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M [μm]	-	-	174,26				
Грешка позиционирања - A [μm]	171,79	186,11	204,68				

Табела 12-6. Параметри тачности позиционирања X осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Мерна позиција - P_i [mm]	3	28	65	93	124	150	183
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,73	0,94	1,71	1,44	0,54	0,61	0,96
Положај расподела у позицији - P_{Sj} [μm]	10,40	5,65	10,26	8,62	3,24	3,68	5,74
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	18,97	8,67	41,67	44,86	22,63	32,49	50,43
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	10,40						
Позициона девијација - P_a [μm]	174,26						
Несигурност позиционирања - P [μm]	207,02						
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	31,39						

На слици 12-4. је приказана тачност позиционирања X осе, која је измерена, док се платформа кретала линеарном методом кретања.



Слика 12-4. Тачност позиционирања X осе линеарном методом кретања (EXX)

- Тачност позиционирања X осе методом кретања ходочасника

У табелама 12-7. и 12-8. приказани су резултати мерења тачности позиционирања X осе методом кретања ходочасника.

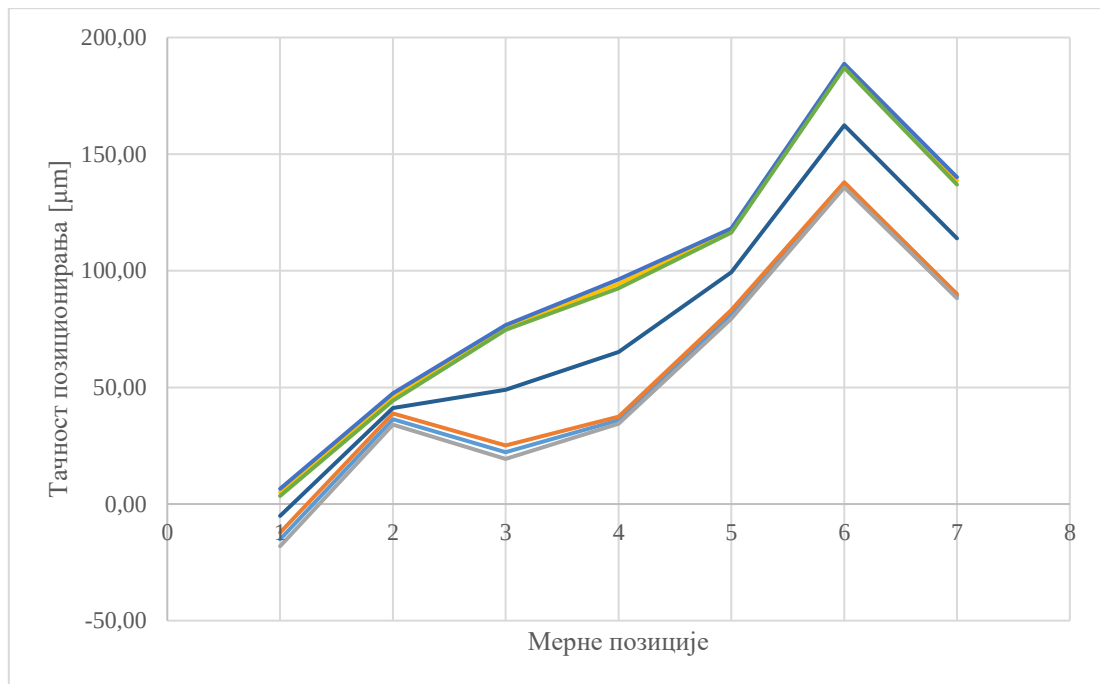
Табела 12-7. Параметри тачности позиционирања X осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Мерна позиција - P_i [mm]	3	28	65	93	124	150	183
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	-13,59	4,68	22,83	35,55	79,87	136,67	187,73
2	-15,83	4,96	22,88	35,19	82,07	136,72	187,57
3	-13,95	5,14	22,39	37,40	81,56	137,19	188,46
4	-16,40	6,11	22,51	35,77	82,25	137,55	188,20
5	-16,07	4,04	20,48	36,08	80,60	136,16	187,32
6	-17,13	4,19	19,65	36,13	81,85	137,45	187,60
Средње једносмерно одступање од позиције - $\bar{x}_i$ ↑ [μm]	-15,17	4,99	22,22	36,00	81,27	136,86	187,86
Централна вредност одступања - $\bar{x}_i$ [μm]	-5,09	41,12	48,95	65,21	99,29	162,36	113,85
Распон одступања средњих вредности - B_i [μm]	-20,16	-9,45	-53,47	-58,43	-36,04	-51,00	-49,40
Стандардна девијација - s_i [μm]	1,45	0,76	1,45	0,76	0,94	0,55	0,43
Једносмерна поновљивост - R_i [μm]	5,82	3,06	5,80	3,04	3,77	2,18	1,73
Двосмерна поновљивост - R_i [μm]	24,59	13,40	57,39	61,86	38,82	52,96	51,86
Параметар	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна				
Максимални распон одступања - B [μm]	-	-	58,43				
Средња вредност распона одступања - $\bar{B}$ [μm]	-	-	-39,71				
Поновљивост по оси - R [μm]	5,82	3,81	61,86				
Систематска грешка - E [μm]	152,03	182,87	203,03				
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M [μm]	-	-	167,45				

Табела 12-8. Параметри тачности позиционирања X осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Мерна позиција - P_i [mm]	3	28	65	93	124	150	183
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,11	0,99	0,98	0,86	0,69	0,49	0,62
Положај расподела на позицији - P_{sj} [μm]	6,66	5,92	5,89	5,14	4,17	2,93	3,70
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	20,16	9,45	53,47	58,43	36,04	51,00	49,40
Максимално растурање - P_{smax} [μm]	6,66						
Позициона девијација - P_a [μm]	167,45						
Несигурност позиционирања - P [μm]	207,82						
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	39,71						

На слици 12-5. је приказана тачност позиционирања X осе, која је измерена, док се платформа кретала методом кретања ходочасника.



Слика 12-5. Тачност позиционирања X осе методом кретања ходочасника (EXX)

- Тачност позиционирања X осе методом кретања клатна

У табелама 12-9. и 12-10. су приказани резултати мерења тачности позиционирања X осе методом кретања клатна.

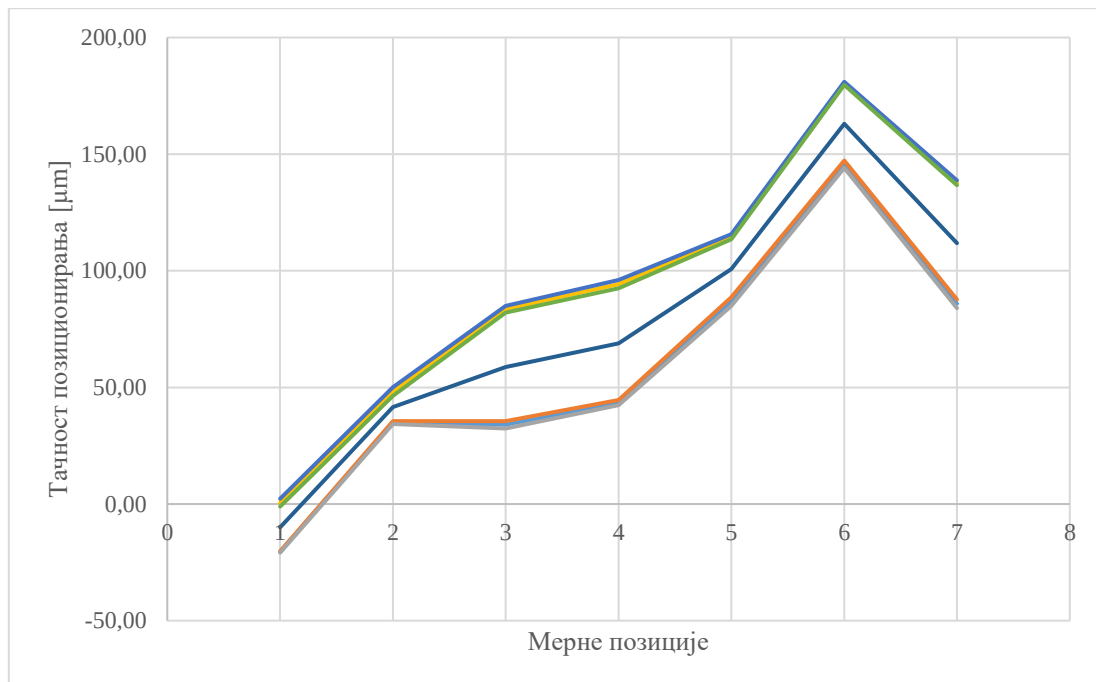
Табела 12-9. Параметри тачности позиционирања X осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.								
Мерна позиција - P_i [mm]	3	28	65	93	124	150	183								
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑								
Одступање од позиције - x_{ij} [μm]	j = 1	-20,53	1,63	34,52	47,22	34,17	83,89	43,66	94,85	88,12	115,29	146,75	180,80	86,80	138,04
	2	-20,44	0,40	34,78	47,96	32,80	82,81	42,52	92,75	85,95	114,79	146,27	180,56	86,86	138,11
	3	-20,63	0,62	34,86	47,62	33,66	84,34	43,57	94,24	85,86	114,83	145,14	180,19	85,68	136,81
	4	-20,79	-0,67	35,11	49,31	34,72	83,78	44,03	94,51	86,93	114,00	145,10	180,00	85,42	137,73
	5	-20,44	0,92	35,32	49,03	34,53	82,77	43,59	94,87	87,12	114,04	145,07	180,11	84,71	137,68
Средње једносмерно одступање од позиције - $\bar{x}_i$ ↑, ↓ [μm]	-20,56	0,58	34,92	48,22	719	33,98	83,52	43,48	94,24	86,79	114,59	145,67	180,33	85,90	137,67
Централна вредност одступања - $\bar{x}_i$ [μm]	-9,99	41,57	58,75	68,86	100,69	163,00	111,78								
Распон одступања средњих вредности - B_i [μm]	-21,14	-13,31	-49,54	-50,77	-27,80	-34,67	-51,78								
Стандардна девијација - s_i [μm]	0,15	0,84	0,30	0,90	0,77	0,70	0,56	0,88	0,93	0,56	0,79	0,34	0,93	0,52	
Једносмерна поновљивост - R_i [μm]	0,59	3,35	1,22	3,61	3,08	2,80	2,26	3,50	3,72	2,23	3,15	1,34	3,70	2,07	
Двосмерна поновљивост - R_i [μm]	23,11	15,72	52,48	53,65	30,77	36,92	54,67								
Параметар	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна												
Максимални распон одступања - B [μm]	-	-	51,78												
Средња вредност распона одступања - $\bar{B}$ [μm]	-	-	-35,57												
Поновљивост по оси - R [μm]	3,72	3,61	54,67												
Систематска грешка - E [μm]	166,23	179,75	200,90												
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M [μm]	-	-	172,99												
Грешка позиционирања - A [μm]	168,10	182,10	201,87												

Табела 12-10. Параметри тачности позиционирања X осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Мерна позиција - P_i [mm]	3	28	65	93	124	150	183
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,49	0,60	0,74	0,72	0,74	0,56	0,72
Положај расподела на позицији - P_{sj} [μm]	2,95	3,62	4,41	4,32	4,46	3,37	4,33
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	21,14	13,31	49,54	50,77	27,80	34,67	51,78
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	4,46						
Позициона девијација - P_a [μm]	172,99						
Несигурност позиционирања - P [μm]	204,06						
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	35,57						

На слици 12-6. је приказана тачност позиционирања X осе, која је измерена, док се платформа кретала методом кретања клатна.



Слика 12-6. Тачност позиционирања X осе методом кретања клатна (EXX)

12.3 Тачност позиционирања Y осе (EYY)

На слици 12-7. приказана је поставка мерне инструментације за проверу тачности позиционирања Y осе. Ласерска глава је постављена паралелно са Y осом. Y оса је серијска и она са тачке нелинеарности није релевантна, али са становишта опште анализе стања машине јесте.



Слика 12-7. Поставка мерне инструментације за проверу тачности позиционирања Y осе (EYY)

Провера је вршена у координатама који су приказани у табели 12-11. Растојање између излазних (нултих) тачака је 380 милиметара, што приближно одговара пуној радној путањи Y осе.

Табела 12-11. Координате мерних позиција за проверу тачности позиционирања Y осе

i	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	0'
Координата Y осе [mm]	380	375	330	280	236	190	143	99	50	5	0
Координата X осе [mm]	0										
Координата Z осе [mm]	0										

Спољни параметри, утицајни на мерење а који се користе за аутоматску компензацију ласера, приказани су у табели 12-12.

Табела 12-12. Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Y осе

Метода кретања	$T_M [^{\circ}C]$	$T_A [^{\circ}C]$	$p_A [mmHg]$	$h_A [\%]$
Линеарна	41,7	33,6	752,8	23
Клатно	41,9	34,1	752,6	23
Ходочасник	37,8	32,5	749,3	30

- Тачност позиционирања Y осе линеарном методом кретања

У табелама 12-13. и 12-14. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Y осе линеарном методом кретања.

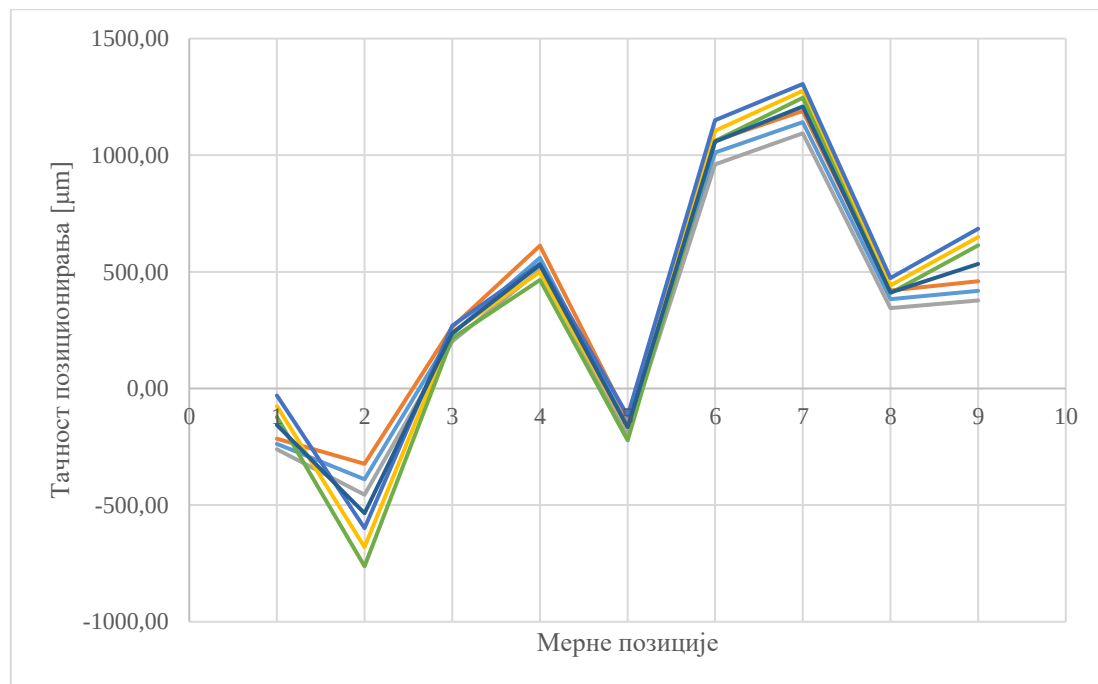
Табела 12-13. Параметри тачности позиционирања Y осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Одступање од површе - x_y [mm]	$j = 1$	-255,73	-90,26	-397,23	-621,05	227,84	231,65	562,02	490,13
	2	-222,85	-70,55	-375,13	-637,05	256,48	227,09	593,42	530,19
	3	-250,34	-40,55	-398,20	-692,16	276,61	233,48	512,37	478,40
	4	-242,61	-98,60	-442,71	-719,03	223,44	250,84	561,76	500,80
	5	-248,68	-60,45	-342,43	-706,16	246,97	262,15	565,72	488,38
	6	-227,58	-96,58	-379,64	-705,83	215,85	246,15	562,53	521,15
Средње једносмерно одступање од површе [mm]	-237,97	-76,17	-389,22	-680,31	232,86	241,89	559,64	499,84	462,72
Централна вредност одступања [mm]	-157,07	-534,77	237,28	529,74	-165,95	1058,27	1208,79	411,89	533,47
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-161,80	291,09	-9,03	59,80	6,45	-93,95	-134,10	-59,27	-229,89
Стандардно девијација - s_i [mm]	11,23	23,09	33,12	40,90	15,49	13,44	26,20	17,63	26,41
Једносмерна пажљивост - P_i [mm]	44,94	92,36	132,49	163,61	61,95	53,76	104,78	70,52	105,66
Двосмерна пажљивост - P_i [mm]	230,45	439,14	66,88	147,45	92,28	190,02	211,41	129,08	307,02
Параметар [mm]	Једносмерно ↑	Двосмерно ↓							
Максимални распон одступања - B	-	-	291,09						
Средња вредност распона одступања	-	-	-36,74						
Пажљивост по оси - P	132,49	163,61	439,14						
Систематски греша - E	1530,96	1956,15	1956,15						
Максимални двосмерно греша позиционирања - M	-	-	1743,56						
Греша позиционирања - A	1645,00	2067,47	2067,47						

Табела 12-14. Параметри тачности позиционирања Y осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	17,16	37,01	14,46	21,91	21,46	24,02	19,33	17,45	19,28
Положај расподела на позицији - P_{ij} [μm]	102,97	222,07	86,78	131,48	128,74	144,13	115,97	104,71	115,69
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	161,80	291,09	9,03	59,80	6,45	93,93	134,10	59,27	229,89
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	222,07								
Позициона девијација - P_a [μm]	1743,56								
Несигурност позиционирања - P [μm]	2125,17								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	116,15								

На слици 12-8. је приказана тачност позиционирања Y осе, која је измерена, док се платформа кретала линеарном методом кретања.



Слика 12-8. Тачност позиционирања Y осе линеарном методом кретања (EYY)

- Тачност позиционирања Y осе методом кретања ходочасника

У табелама 12-15. и 12-16. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Y осе методом кретања ходочасника.

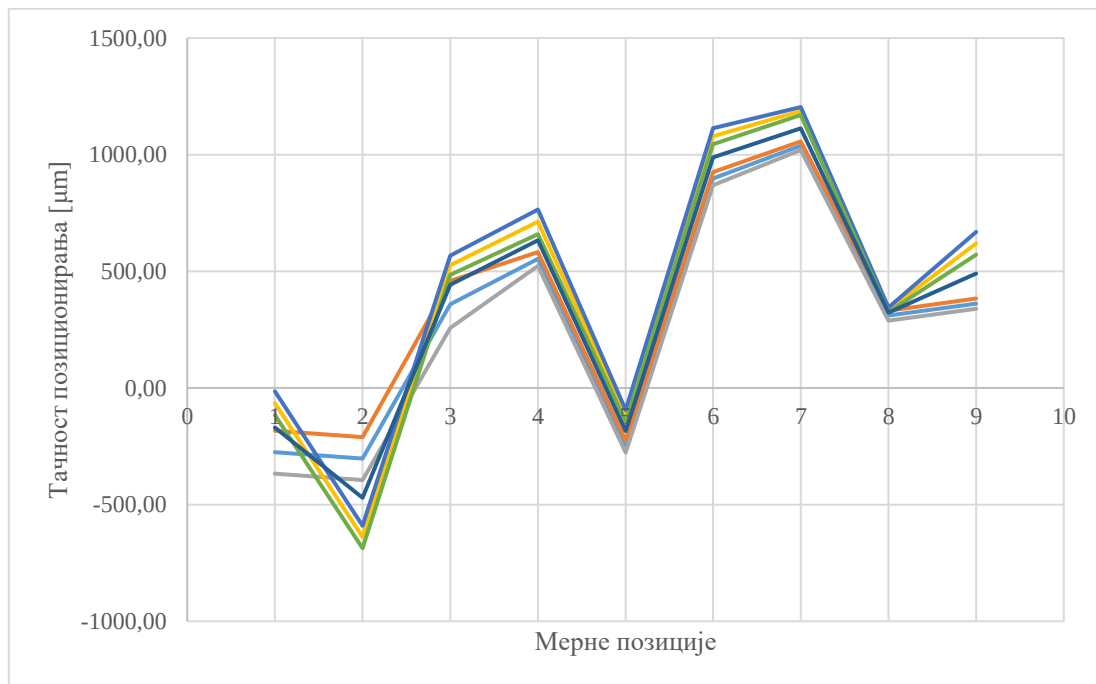
Табела 12-15. Параметри тачности позиционирања Y осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Одступање од позиције - x_j [mm]	$j = 1$	-333.84	-81.13	-361.71	-659.75	260.42	530.39	548.86	740.37
	2	-324.76	-96.97	-359.99	-674.62	354.71	504.34	539.76	726.79
	3	-270.21	-59.69	-260.30	-610.50	379.95	535.49	536.53	724.92
	4	-270.63	-79.70	-284.99	-630.21	393.12	503.76	566.40	715.86
	5	-227.54	-44.26	-285.17	-621.23	365.92	557.75	552.24	697.31
	6	-226.50	-29.07	-264.38	-636.57	395.89	524.47	573.87	667.07
Средње једнакмерно одступање од позиције [mm]	-275.58	-65.14	-302.76	-638.78	358.33	526.03	552.94	712.05	-251.01
Централни вредност одступања [mm]	-170.36	-470.77	442.18	632.50	-183.39	988.17	1112.79	322.56	490.40
Расход одступања средњих вредности - B_i [mm]	-210.44	336.02	-167.70	-159.11	-131.24	-181.67	-148.71	-24.80	-258.93
Стандардна девијација - s_i [mm]	46.00	25.49	46.16	24.13	50.49	20.41	14.69	26.43	14.28
Једнакмерна плављивост - R_i [mm]	184.02	101.94	184.63	96.51	201.96	81.65	58.77	105.70	57.14
Двосмерна плављивост - R_i [mm]	353.42	476.59	309.50	241.35	183.11	245.03	184.00	55.62	329.50
Параметар [mm]	Једнакмерна ↑	Једнакмерна ↓	Двосмерна						
Максимални расход одступања - B	-	-	336.02						
Средња вредност раслива одступања	-	-	-105.17						
Плављивост по оси - R	201.96	105.70	476.59						
Систематска грешка - E	1341.19	1825.92	1825.92						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	1583.55						
Грешка позиционирања - A	1451.85	1891.12	1891.12						

Табела 12-16. Параметри тачности позиционирања Y осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	35,75	35,14	35,45	20,56	12,97	15,84	8,82	7,71	17,64
Положај расподела на позицији - P_{sj} [μm]	214,47	210,85	212,71	123,35	77,80	95,04	52,94	46,24	105,86
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	210,44	336,02	167,70	159,11	131,24	181,67	148,71	24,80	258,93
Максимално растурање - P_{smax} [μm]	214,47								
Позициона девијација - P_a [μm]	1583,55								
Несигурност позиционирања - P [μm]	1957,81								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	179,85								

На слици 12-9. приказана је тачност позиционирања Y осе, која је измерена, док се платформа померала методом кретања ходочасника.



Слика 12-9. Тачност позиционирања Y осе методом кретања ходочасника (EYY)

- Тачност позиционирања Y осе методом кретања клатна

У табелама 12-17. и 12-18. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Y осе методом кретања клатна.

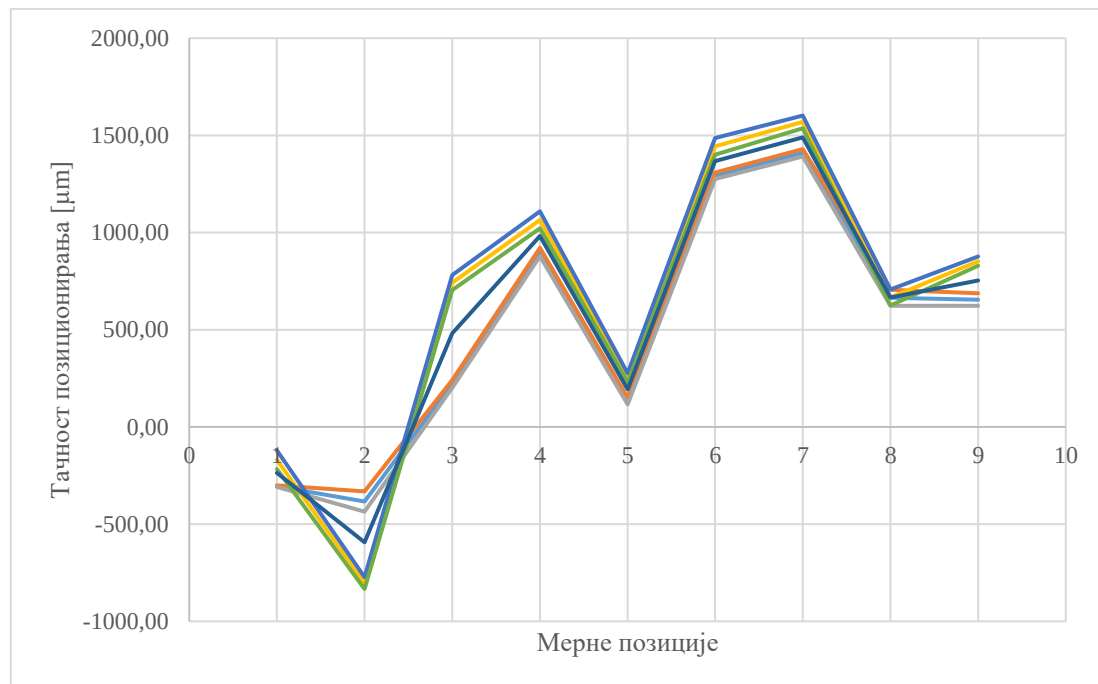
Табела 12-17. Параметри тачности позиционирања Y осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Одступање од позиције - x_j [mm]	j = 1	-307,21	-123,86	-420,92	-785,08	230,91	768,97	905,44	1093,00
	2	-305,84	-184,26	-412,67	-807,73	213,60	728,21	910,78	1051,27
	3	-302,44	-190,11	-372,61	-807,66	220,36	727,62	886,83	1066,98
	4	-303,14	-169,22	-363,92	-784,12	235,21	763,39	895,88	1079,91
	5	-307,37	-162,79	-363,42	-821,13	212,07	724,25	890,51	1068,74
	6	-305,59	-179,11	-368,23	-813,92	214,54	740,45	911,37	1031,60
Средње једнакмерно одступање од позиције [mm]	-305,26	-168,23	-383,63	-803,77	221,11	742,15	900,14	1065,25	133,29
Цели радна вредност одступања [mm]	-236,75	-593,45	481,63	982,69	193,01	1367,56	1489,61	665,25	753,91
Расход одступања средње вредности - B_i [mm]	-137,04	419,65	-521,03	-165,11	-1194,3	-151,59	-138,72	-2,34	-197,68
Стандардна девијација - s_i [mm]	2,06	23,89	26,04	15,29	9,76	19,49	10,54	21,58	8,32
Једнакмерно повлађивање - R_i [mm]	8,23	95,56	104,14	61,16	39,05	77,95	42,15	86,31	33,27
Двосмерно повлађивање - R_i [mm]	188,93	502,30	579,53	229,34	158,43	209,65	210,48	84,80	253,08
Параметар [mm]	Једнакмерно ↑	Двосмерно ↓							
Максимални расход одступања - B	-	-	419,65						
Средња вредност расхoda одступања	-	-	-114,81						
Повлађивање по оси - R	104,14	95,56	579,53						
Систематска грешка - E	1793,88	2372,25	2372,25						
Максимално двосмерно грешка повлађивања - M	-	-	2083,06						
Грешка повлађивања - A	1864,94	2435,59	2435,59						

Табела 12-18. Параметри тачности позиционирања Y осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	12,97	20,66	14,63	16,06	9,75	14,51	12,94	20,61	13,85
Положај расподела на позицији - P_{sj} [μm]	77,84	123,98	87,75	96,34	58,51	87,09	77,64	123,69	83,10
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	137,04	419,65	521,03	165,11	119,43	151,59	158,72	2,34	197,68
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	123,98								
Позициона девијација - P_a [μm]	2083,06								
Несигурност позиционирања - P [μm]	2473,05								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	208,07								

На слици 12-10. је приказана тачност позиционирања Y осе, која је измерена, док се платформа кретала методом кретања клатна.



Слика 12-10. Тачност позиционирања Y осе методом кретања клатна (EYY)

12.4 Тачност позиционирања Z осе (EZZ)

На слици 12-11. приказана је поставка мерне оптике (ретрорефлектора, интерферометра и огледала) за проверу тачности позиционирања Z осе. Ласерска глава је постављена тако да зрак, који пада на огледало, па се прелама под углом од 90° , буде паралелан са Z осом.



Слика 12-11. Поставка мерних оптичких компоненти за проверу тачности позиционирања Z осе (EZZ)

Провера је вршена у координатама које су приказане у табели 12-19. Растојање између излазних (нултих) тачака је 65 милиметара. Због специфичног облика радног простора, изабран је средишњи део радног простора који одговара $X=0$ координати. У овој зони, кретање платформе по Z осе је најдуже, и ту се могло урадити мерење са највећим бројем мерних тачака, а да размак између њих буде адекватан.

Табела 12-19. Координате мерних позиција за проверу тачности позиционирања Z осе

i	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	0.'
Координата Z осе [mm]	-65	-60	-50,5	-44	-37,5	-31	-24,5	-18	-11,5	-5	0
Координата X осе [mm]	0										
Координата Y осе [mm]	124,659										

Спољни параметри, утицајни на мерење, и који се користе за аутоматску компензацију ласера, приказани су у табелама 12-20., 12-21. и 12-22. посебно за сваку кинематску поставку.

Табела 12-20. Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Z осе оригиналне кинематске поставке

Метода кретања	$T_M [^\circ\text{C}]$	$T_A [^\circ\text{C}]$	$p_A [\text{mmHg}]$	$h_A [\%]$
Линеарна	39,3	34,5	747,5	23%
Клатно	39,3	34,5	747,5	23%
Ходочасник	36,3	34,3	749	32%

Табела 12-21. Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Z осе $v_{J0} = \text{const.}$ кинематике

Метода кретања	$T_M [^{\circ}\text{C}]$	$T_A [^{\circ}\text{C}]$	$p_A [\text{mmHg}]$	$h_A [\%]$
Линеарна	36,7	33,4	749	32%
Клатно	37,8	33,5	749,1	31%
Ходочасник	38,6	33,5	749	31%

Табела 12-22. Параметри околине за компензацију утицаја околине приликом мерења ласером током провере тачности позиционирања Z осе $v_{J1} = \text{const.}$ кинематике

Метода кретања	$T_M [^{\circ}\text{C}]$	$T_A [^{\circ}\text{C}]$	$p_A [\text{mmHg}]$	$h_A [\%]$
Линеарна	38,9	33,5	749	32%
Клатно	39,2	33,6	749	32%
Ходочасник	39,6	33,5	749	30%

12.4.1 Оригинална кинематска поставка O-X glide механизма

- Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања – 1. експериментална поставка

У табелама 12-23. и 12-24. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе линеарном методом кретања.

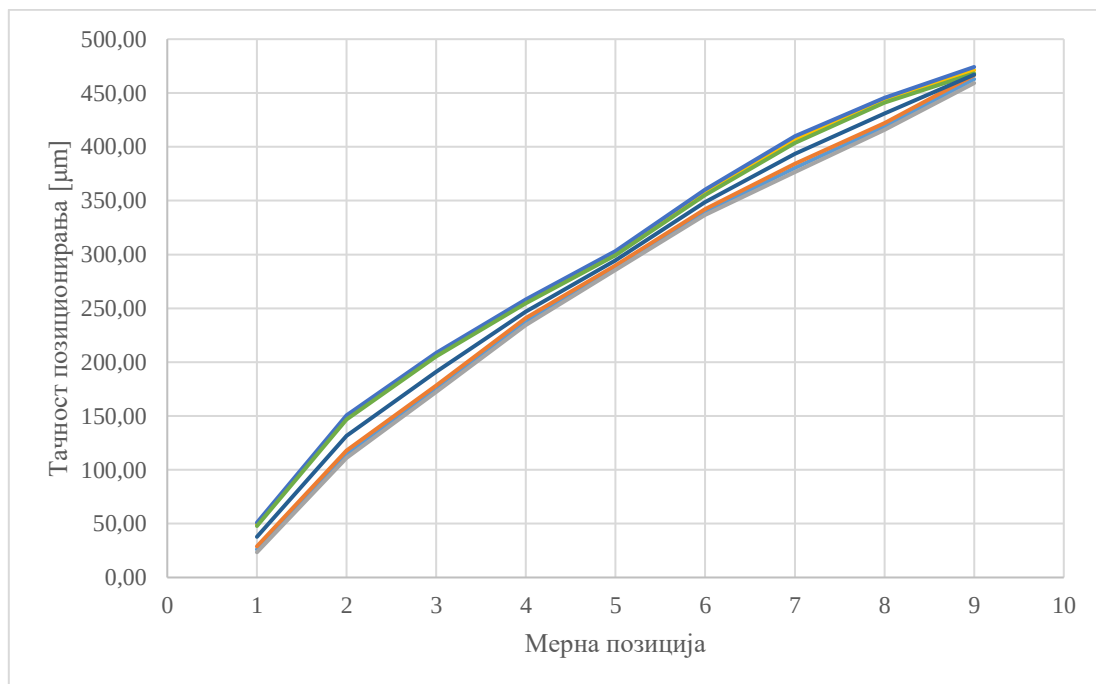
Табела 12-23. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијених 1. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	145	190	236	280	330	375
Смер померања									
$j = 1$	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Одступање од померања - τ_{ij} [μm]	23.83	48.91	111.52	147.92	172.60	207.54	235.51	255.23	286.01
2	25.29	48.33	113.53	147.60	174.73	203.92	236.34	256.08	286.90
3	26.56	49.54	115.26	148.02	176.39	206.34	237.92	256.19	287.74
4	26.73	49.35	115.37	148.96	175.77	206.91	237.56	256.82	287.98
5	26.98	49.55	115.28	149.64	175.71	207.71	239.36	257.27	288.18
6	27.52	50.67	116.24	150.01	176.90	207.99	239.69	257.57	289.11
Средње квадратно одступање од померања [μm]	26.15	49.39	114.53	148.69	175.28	207.07	237.66	256.53	287.65
Централно средње одступање [μm]	37.77	131.61	191.18	247.10	294.69	348.63	395.58	431.11	467.02
Релативно одступање средњег одступања - B_i [%]	-23.24	-34.16	-31.78	-18.87	-13.68	-18.25	-26.31	-24.44	-8.34
Стандардни девијација - s_i [μm]	1.36	0.78	1.72	1.00	1.46	0.82	1.65	0.86	1.07
Релативно показатељ - R_i [%]	5.43	3.12	6.87	3.99	5.83	3.28	6.60	3.45	4.30
Доксмерна погрешност - R_i [μm]	27.51	39.59	36.34	23.89	17.74	23.38	33.37	29.89	14.98
Доксмерна									
Параметар [μm]	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна	Доксмерна
Максимални релативни одступања - B	-	-	-	-	-	-	-	-	-8.34
Средња вредност релативних одступања	-	-	-	-	-	-	-	-	-22.12
Погрешност по оси - R	7.82	6.29	39.59	445.04	421.80	421.80	421.80	421.80	421.80
Систематска грешка - E	436.70	421.80	421.80	421.80	421.80	421.80	421.80	421.80	421.80
Максимални доксмерна грешка померања - M	-	-	-	-	-	-	-	-	-429.25
Грешка померања - d	443.06	426.35	426.35	426.35	426.35	426.35	426.35	426.35	426.35

Табела 12-24. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијених 1. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,07	1,36	1,14	1,26	1,02	1,29	1,76	1,36	1,66
Положај расподела на позицији - P_{Sy} [μm]	6,41	8,14	6,83	7,54	6,09	7,73	10,58	8,18	9,96
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	23,24	34,16	31,78	18,87	13,68	18,23	26,31	24,44	8,34
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	10,58								
Позициона девијација - P_a [μm]	429,25								
Несигурност позиционирања - P [μm]	453,22								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	22,12								

На слици 12-12. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала линеарном методом код оригиналне кинематике.



Слика 12-12. Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања оригиналне кинематике (EZZ)

- Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасник – 4. експериментална поставка

У табелама 12-25. и 12-26. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе методом кретања ходочасника.

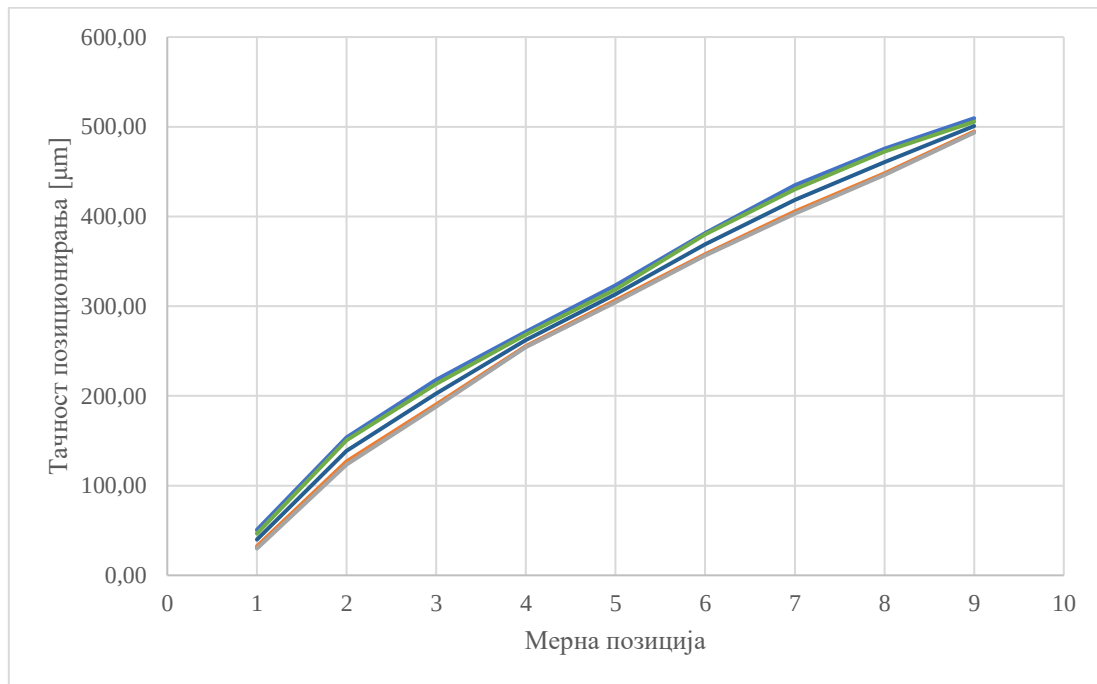
Табела 12-25. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијених 4. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Одступање од позиције - x_{ij} [mm]	$j = 1$	30.54	47.44	126.03	151.89	189.87	214.90	255.22	269.46
	2	31.04	48.10	124.43	151.16	190.05	214.64	254.95	268.93
	3	30.64	48.34	124.19	151.21	188.63	216.32	254.72	269.41
	4	30.59	48.06	124.31	152.17	189.13	214.40	254.86	269.93
	5	31.82	49.59	125.89	153.04	189.10	216.15	254.82	270.52
	6	31.94	50.21	125.74	152.83	188.91	217.32	254.75	270.90
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	31.10	48.62	125.10	152.05	189.28	215.62	254.89	269.86	305.41
Централна вредност одступања [mm]	39.86	138.57	202.45	262.37	313.17	368.94	418.44	460.66	500.79
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-17.53	-26.95	-26.34	-14.97	-15.52	-23.68	-28.26	-26.66	-13.48
Стандардна девијација - s_i [mm]	0.64	1.05	0.79	0.56	1.15	0.74	0.59	1.10	0.45
Једносмерна покривљивост - R_i [mm]	2.54	4.20	3.49	3.16	2.23	4.60	0.74	2.97	1.31
Двосмерна покривљивост - R_i [mm]	20.90	30.28	29.76	16.82	19.10	25.15	31.65	29.30	16.05
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални растни одступања - B	-	-	-	-	-	-	-	-	-13.48
Средња вредност растних одступања	-	-	-	-	-	-	-	-	-21.49
Покривљивост по оси - R	3.49	4.91	31.65						
Систематска грешка - E	462.95	458.91	476.44						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	460.93						
Грешка позиционирања - A	464.84	462.96	479.66						

Табела 12-26. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 4. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,84	0,83	0,85	0,46	0,90	0,37	0,85	0,66	0,64
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	5,06	4,99	5,13	2,78	5,37	2,20	5,08	3,97	3,85
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	17,53	26,95	26,34	14,97	15,52	23,68	28,26	26,66	13,48
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	5,37								
Позициона девијација - P_α [μm]	460,93								
Несигурност позиционирања - P [μm]	480,89								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	21,49								

На слици 12-13. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала методом ходочасника код оригиналне кинематике.



Слика 12-13. Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника оригиналне кинематике (EZZ)

- Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна – 7. експериментална поставка

У табелама 12-27. и 12-28. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе методом кретања клатна.

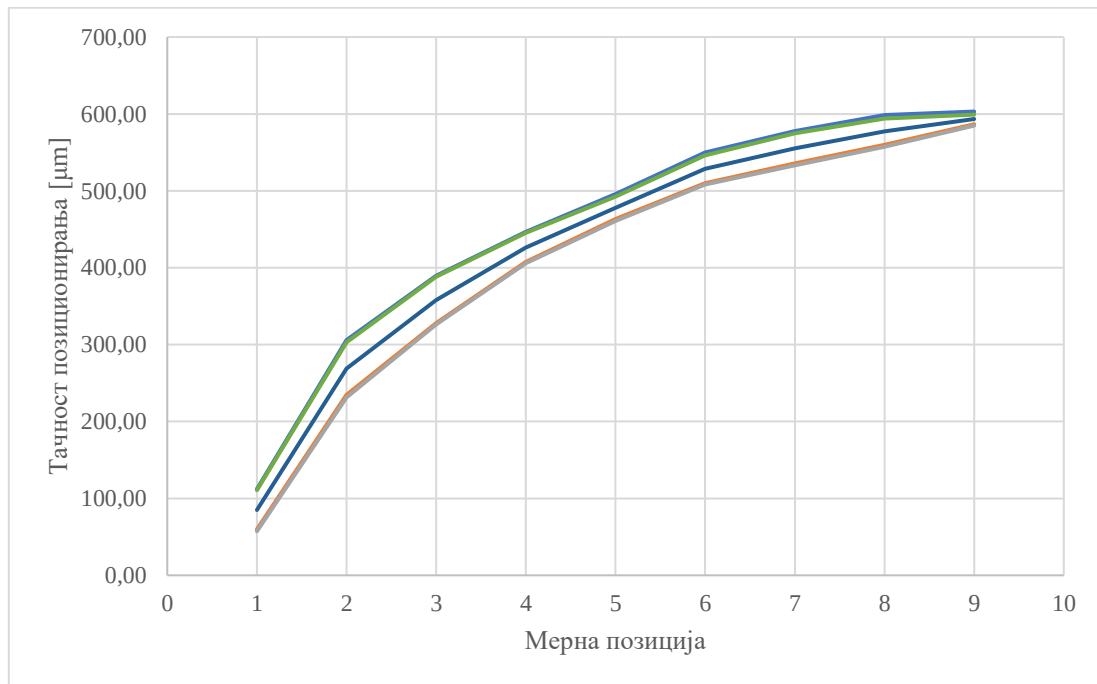
Табела 12-27. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Средње позиционирање	$j=1$	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
		24,47	45,92	111,89	147,17	173,29	205,67	234,60	257,21
	2	23,86	45,59	112,13	146,53	173,20	205,92	234,55	257,30
	3	23,91	45,98	112,69	146,69	172,89	205,85	234,72	257,62
	4	23,94	45,80	112,66	147,10	173,43	205,53	234,87	257,63
	5	24,25	45,88	112,93	146,76	172,85	205,71	235,12	257,29
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	6	23,88	45,73	112,88	147,38	172,95	205,79	234,58	257,66
		24,05	45,82	112,53	146,94	173,10	205,75	234,74	257,45
	Средње једносмерно одступање од позиције [mm]								
	Централна вредност одступања [mm]	34,94	129,73	189,42	246,10	295,40	349,62	431,89	469,53
	Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-21,76	-34,41	-32,64	-22,71	-19,76	-25,71	-28,26	-12,19
	Стандардна девијација - s_i [mm]	0,25	0,14	0,32	0,24	0,14	0,22	0,20	0,20
Једносмерна тачност - P_i [mm]	1,00	0,57	1,69	1,30	0,95	0,56	0,88	0,82	0,82
Двосмерна тачност - P_i [mm]	22,55	35,90	33,40	23,56	21,56	27,58	31,48	30,94	14,42
Параметар [mm]		Једносмерна ↑		Једносмерна ↓		Двосмерна			
Максимални распон одступања - B		-	-	-	-	-12,19	-	-	-
Средња вредност распона одступања		-	-	-	-	-25,22	-	-	-
Почетна вредност по оси - P		1,99	3,38	35,90	451,57	434,59	431,65	453,63	453,63
Систематска грешка - E		439,38	429,81	451,57	434,59	431,65	453,63	453,63	453,63
Максимално двосмерно грешка позиционирања - M		-	-	-	-	-	-	-	-
Грешка позиционирања - A		440,56	431,65	453,63	453,63	453,63	453,63	453,63	453,63

Табела 12-28. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,20	0,37	0,19	0,21	0,45	0,47	0,49	0,67	0,56
Положај расподела на позицији - P_{sj} [μm]	1,18	2,24	1,13	1,28	2,70	2,80	2,94	4,03	3,36
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	21,76	34,41	32,64	22,71	19,76	25,71	29,51	28,26	12,19
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	4,03								
Позициона девијација - P_a [μm]	434,59								
Несигурност позиционирања - P [μm]	453,84								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	25,22								

На слици 12-14. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала методом клатна код оригиналне кинематике.



Слика 12-14. Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна оригиналне кинематике (EZZ)

12.4.2 Кинематика при кретању клизача $v_{j0} = \text{const.}$

- Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања – 2. експериментална поставка

У табелама 12-29. и 12-30. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе линеарном методом кретања.

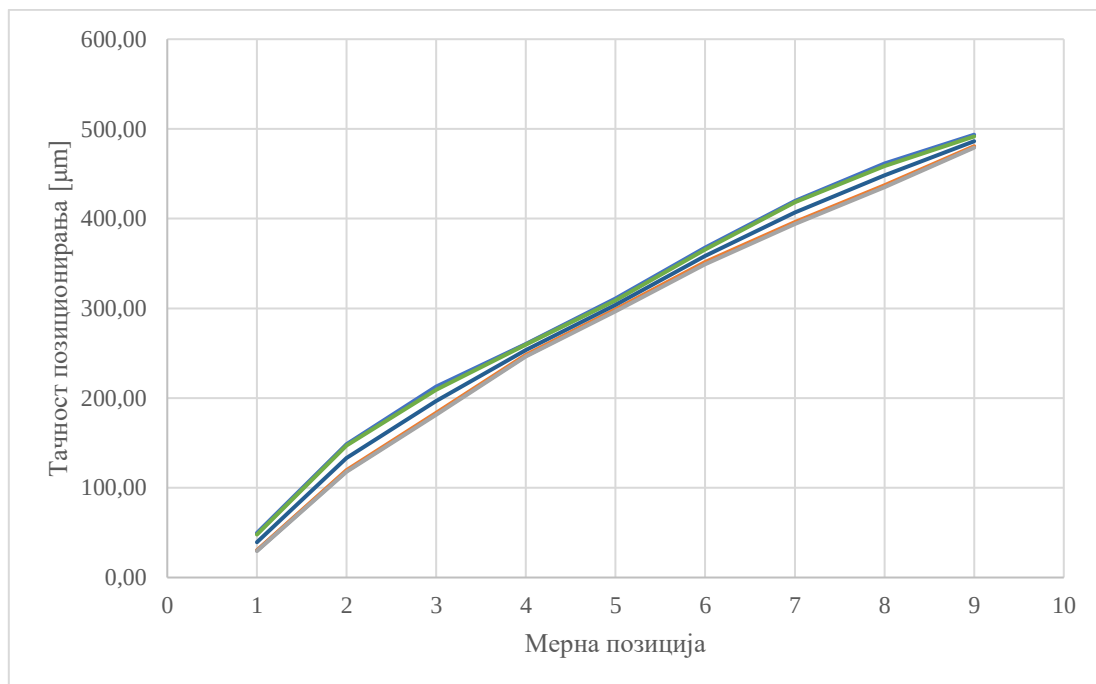
Табела 12-29. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања									
Одступање од путање - ϵ_i [mm]	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	1	119,64	148,21	211,75	247,91	259,92	298,39	310,81	350,39
	2	118,50	147,70	211,98	247,00	260,26	297,96	310,05	349,56
	3	118,56	147,23	211,06	246,89	259,81	297,36	309,92	350,48
	4	118,77	148,45	209,76	246,87	260,07	297,04	309,65	351,07
Средње једносмерно одступање од путање [mm]	5	118,35	147,88	211,58	247,26	259,99	298,36	309,39	349,70
	6	118,34	147,61	210,42	247,17	259,78	297,91	309,66	350,93
	29,90	118,69	147,85	211,09	247,18	259,97	297,84	309,91	350,56
	39,33	133,27	196,74	253,38	303,87	359,45	407,07	448,13	486,26
	-18,86	-29,15	-28,71	-12,79	-12,07	-16,20	-23,95	-24,00	-12,66
	0,20	0,49	0,44	0,39	0,18	0,62	0,58	0,47	0,75
Стандардна девијација - s_i [mm]	0,81	1,76	1,97	1,55	0,71	2,48	2,33	1,86	2,98
Једносмерно повлазност - R _i [mm]	20,15	31,01	31,56	13,92	14,14	18,59	25,94	26,43	14,44
Двосмерна повлазност - R _i [mm]	31,01	31,01	31,56	13,92	14,14	18,59	25,94	26,43	14,44
Промена [mm]									
Максимална одступања - B	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Средња вредност раста одступања	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Повлазност по оси - R	2,48	3,43	3,156	1,55	1,55	2,48	2,33	1,86	2,98
Систематска грешка - E	451,03	443,83	462,69	446,93	446,93	446,93	446,93	446,93	446,93
Максимална грешка позиционирања - M	451,03	443,83	462,69	446,93	446,93	446,93	446,93	446,93	446,93
Грешка позиционирања - A	451,03	443,83	462,69	446,93	446,93	446,93	446,93	446,93	446,93

Табела 12-30. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,32	0,46	0,71	0,28	0,52	0,60	0,50	0,61	0,44
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	1,93	2,78	4,27	1,70	3,10	3,59	3,01	3,63	2,66
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	18,86	29,15	28,71	12,79	12,07	16,20	23,93	24,00	12,66
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	4,27								
Позициона девијација - P_α [μm]	446,93								
Несигурност позиционирања - P [μm]	464,98								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	19,82								

На слици 12-15. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала линеарном методом код $v_{j0} = \text{const.}$ кинематике.



Слика 12-15. Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања $v_{j0}=\text{const.}$ кинематике (EZZ)

- Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника – 5. експериментална поставка

У табелама 12-31. и 12-32. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе методом кретања ходочасника.

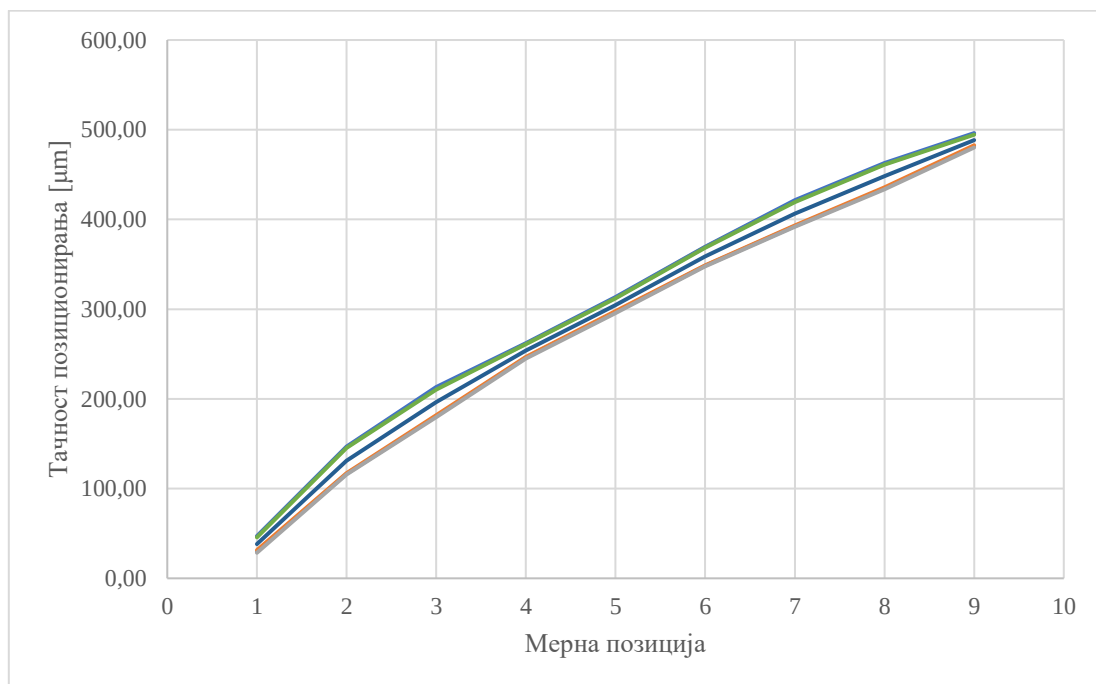
Табела 12-31. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Одступање од позиције - x_{ij} [mm]	j = 1	116,70	146,42	181,22	212,06	246,64	261,90	296,54	312,28
	2	30,56	116,85	146,40	181,10	211,94	246,03	261,60	295,86
	3	30,20	116,71	146,25	180,31	211,27	245,69	261,44	297,23
	4	29,86	115,90	145,84	180,52	210,78	245,46	261,41	296,47
	5	29,33	116,03	146,00	180,68	212,77	245,98	261,17	297,09
	6	28,89	116,44	145,35	179,66	212,28	245,11	261,49	296,29
Средње једнамерно одступање од позиције [mm]	29,93	116,44	146,04	245,82	261,50	348,27	368,95	406,55	488,39
Централна вредност одступања [mm]	38,16	131,24	196,22	253,66	304,61	358,61	406,55	448,38	488,39
Распон одступања средње вредности - B_i [mm]	-16,46	-29,60	-31,27	-15,68	-16,07	-20,68	-27,90	-27,20	-13,93
Стандардна девијација - s_i [mm]	0,71	0,39	0,41	0,53	0,24	0,31	0,40	0,52	0,61
Једнамерно повлазност - R_i [mm]	2,85	1,37	1,58	2,11	0,96	1,24	1,59	2,41	2,44
Двосмерна повлазност - R_i [mm]	18,57	31,21	33,84	17,22	17,92	21,71	29,74	29,20	16,03
Покритије [mm]	Једнамерно ↑	Једнамерно ↓	Двосмерно						
Максимални распон одступања - B	-	-	-13,93						
Средња вредност распона одступања	-	-	-22,09						
Повлазност по оси - R	2,85	2,87	33,84						
Систематска грешка - E	451,50	448,96	465,43						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	450,23						
Грешка позиционирања - A	454,15	450,53	467,74						

Табела 12-32. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,53	0,40	0,64	0,38	0,46	0,26	0,46	0,50	0,53
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	3,17	2,41	3,86	2,31	2,78	1,55	2,77	3,00	3,16
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	16,46	29,60	31,27	15,68	16,07	20,68	27,90	27,20	13,93
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	3,86								
Позициона девијација - P_a [μm]	450,23								
Несигурност позиционирања - P [μm]	468,59								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	22,09								

На слици 12-16. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала методом ходочасника код $v_{j0} = \text{const.}$ кинематике.



Слика 12-16. Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника $v_{j0} = \text{const.}$ кинематике (EZZ)

- Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна – 8. експериментална поставка

У табелама 12-33. и 12-34. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе методом кретања клатна.

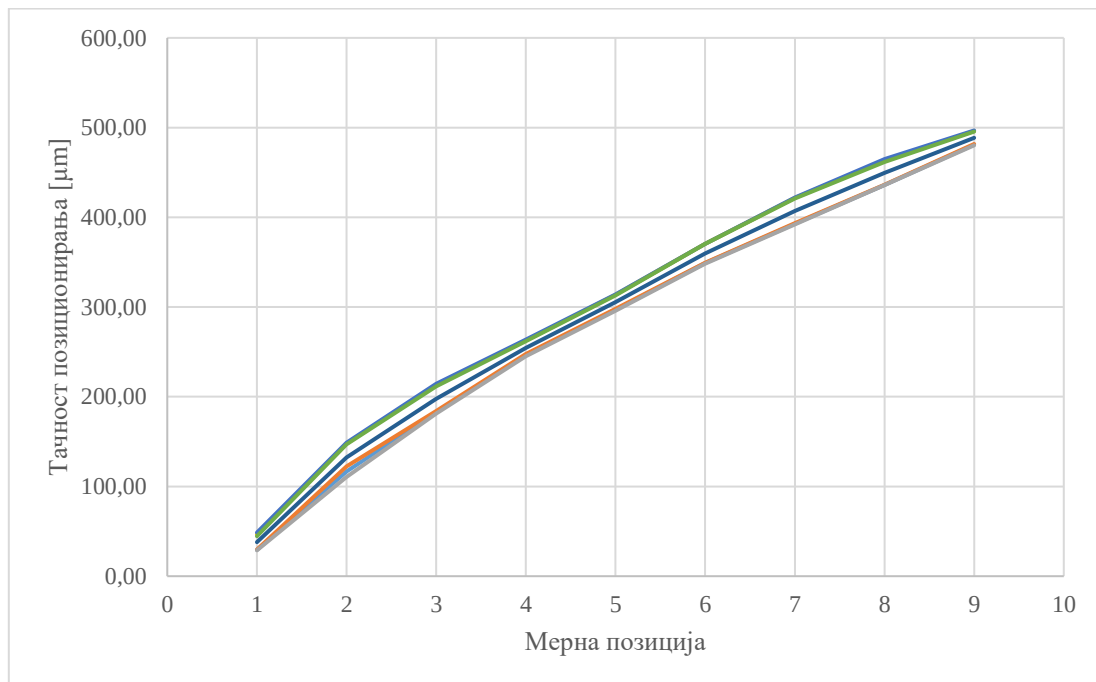
Табела 12-33. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком

i	L	2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.	
		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Мерна позиција - P, [mm]	5	29,46	45,32	113,29	148,00	184,06	213,91	247,24	263,51	297,83	313,67	349,22	370,31	393,58	421,95	436,25	463,13
Смер позиционирања	j = 1	29,24	45,38	112,51	148,51	182,77	212,83	246,95	262,90	297,38	313,70	349,16	370,30	392,83	421,32	436,07	462,43
	2	29,37	46,93	117,97	147,75	182,45	212,38	246,50	262,63	296,93	313,34	348,70	370,36	392,76	421,42	436,17	462,93
	3	29,47	47,45	118,65	147,16	182,96	212,10	245,94	262,46	296,64	313,33	348,64	370,26	392,63	421,68	436,16	464,81
	4	29,08	46,88	118,79	148,30	182,01	212,59	245,82	262,40	296,53	313,52	348,62	370,24	392,63	421,83	436,06	463,40
	5	28,96	47,54	118,21	147,59	181,83	213,68	245,85	262,44	296,43	314,01	348,42	370,36	392,36	421,81	436,14	462,96
	6	29,26	46,59	116,54	147,88	182,68	212,91	246,38	262,72	296,96	313,59	348,79	370,31	392,80	421,67	436,14	463,28
Средња једнакмерна одступање од померања [mm]		37,92		132,21		197,80		254,55		305,28		359,55		407,23		449,71	
Централна вредност одступања [mm]		-17,32		-31,35		-30,23		-16,34		-16,64		-21,51		-28,87		-27,14	
Распон одступања средњих вредности - B, [mm]		0,21	0,99	2,92	0,49	0,80	0,73	0,61	0,43	0,55	0,26	0,32	0,05	0,41	0,25	0,07	0,82
Стандардна девијација - s, [mm]		0,83	3,97	11,70	1,95	3,20	2,90	2,44	1,71	2,18	1,03	1,28	0,20	1,65	0,99	0,28	3,26
Једнакмерна повнјавност - R, [mm]		19,72		38,18		33,29		18,42		18,24		22,26		30,19		28,91	
Двосмерна повнјавност - R ₁ , [mm]																	16,54
Променљиве	Једнакмерна ↑	Једнакмерна ↓	Двосмерна														
	Максимални распон одступања - B	-	-	-	-15,17												
	Средња вредност распона одступања	-	-	-	-22,73												
	Повнјавност по оси - R	11,70	3,97		38,18												
	Систематска грешка - E	451,74	449,59		466,91												
	Максимално двосмерно грешка позиционирања - M	-	-	-	450,66												
Грешка позиционирања - A	452,91		452,19		467,94												

Табела 12-34. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,60	1,71	0,76	0,52	0,40	0,19	0,33	0,44	0,34
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	3,60	10,24	4,58	3,12	2,41	1,11	1,98	2,66	2,06
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	17,32	31,35	30,23	16,34	16,64	21,51	28,87	27,14	15,17
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	10,24								
Позициона девијација - P_a [μm]	450,66								
Несигурност позиционирања - P [μm]	469,74								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	22,73								

На слици 12-17. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала методом клатна код $v_{j0} = \text{const.}$ кинематике.



Слика 12-17. Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна $v_{j0}=\text{const.}$ кинематике (EZZ)

12.4.3 Кинематика при кретању клизача $v_{J1} = \text{const}$.

- Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања – 3. експериментална поставка

У табелама 12-35. и 12-36. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе линеарном методом кретања.

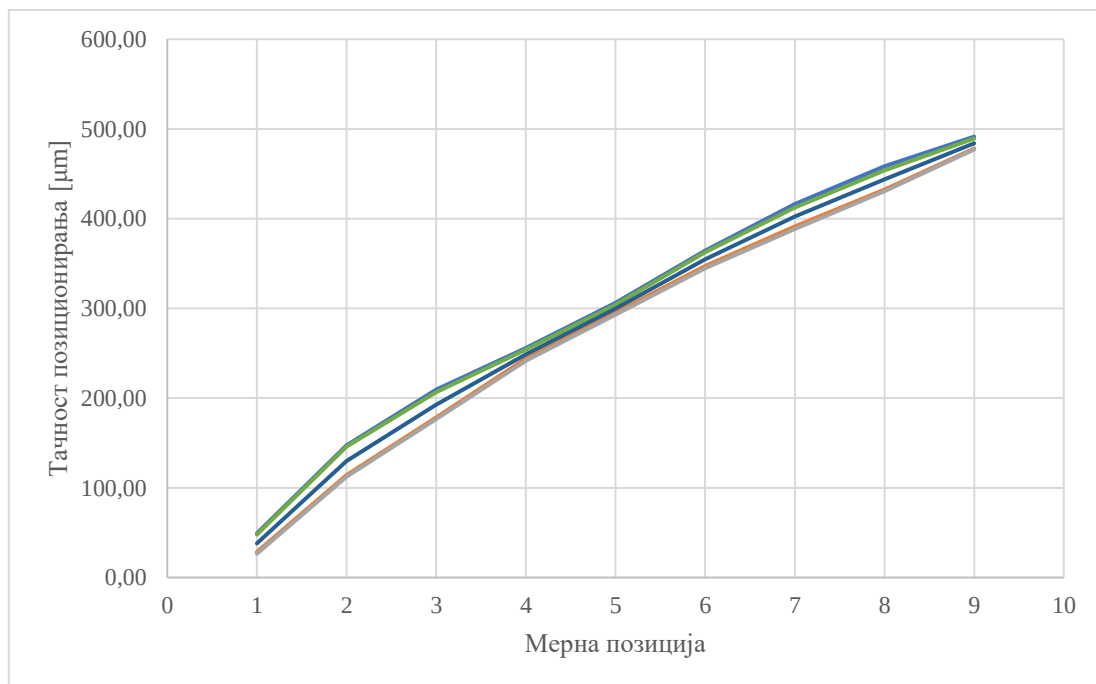
Табела 12-35. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.	
	Мерна позиција - P _i [mm]		5		143		190		236		280		330		375			
Смер позиционирања	j = 1	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
		28,32	48,35	114,04	147,03	178,04	207,86	243,09	255,66	294,99	306,00	346,79	363,45	389,88	415,65	431,17	456,44	477,52
		2	27,84	48,69	113,16	146,28	177,66	207,04	243,79	254,85	294,07	304,87	345,65	363,94	391,25	414,83	432,28	456,60
		3	27,48	48,45	112,83	146,24	176,86	207,88	242,82	254,86	294,56	305,16	346,46	362,84	390,38	415,32	432,13	457,64
		4	27,38	48,31	113,26	146,27	177,43	208,57	243,10	254,31	293,47	304,68	345,39	363,53	390,13	413,20	431,41	454,77
		5	27,18	49,19	112,90	147,16	177,36	207,34	242,20	254,78	294,27	304,47	345,69	363,75	389,49	413,60	431,17	456,44
Одступање од померања - x _{ij} [mm]	6	26,94	48,54	113,48	146,64	177,80	208,91	242,15	254,41	293,41	304,81	345,17	363,05	389,27	414,55	431,52	454,68	477,25
		Средње квадратно одступање од померања [mm]	27,52	48,59	113,28	146,60	177,52	207,93	242,86	254,81	294,13	305,00	345,86	363,43	390,06	414,52	431,62	456,10
		Централна вредност одступања [mm]	38,66	129,94	192,75	248,84	299,56	354,64	402,29	443,86	483,98							
		Релатив одступања средњих вредности - B _i [mm]	-21,06	-33,33	-30,41	-11,95	-10,87	-17,57	-24,46	-24,48	-12,77							
		Стандардна девијација - s _i [mm]	0,49	0,33	0,44	0,41	0,41	0,71	0,62	0,48	0,62	0,54	0,63	0,41	0,70	0,96	0,48	1,15
		Једнакостепен пиквалност - R _i [mm]	1,97	1,30	1,77	1,64	1,64	2,84	2,48	1,91	2,47	2,17	2,53	1,66	2,81	3,83	1,93	4,62
Доксметријски параметри	Доксметријски параметри - R _i [mm]	22,70	35,03	32,65	14,15													
		Промена [mm]	Једнакостепен ↑	Доксметријски ↓	Доксметријски													
		Максимални релативни одступања - B	-	-	-10,87													
		Средња вредност релативних одступања	-	-	-20,77													
		Пиковност по оси - R	2,81	4,62	35,03													
		Систематски тренд - E	450,08	441,78	462,84													
Доксметријски параметри	Максимално доксметријски тренд по осима - M	-	-	445,95														
		Греша позиционирања - A	451,55	443,46	464,86													

Табела 12-36. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	50	145	210	280	340	405	475	535	600
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,41	0,43	0,56	0,55	0,58	0,52	0,83	0,82	0,38
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	2,46	2,56	3,35	3,29	3,48	3,15	4,98	4,91	2,28
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	21,06	33,33	30,41	11,95	10,87	17,57	24,46	24,48	12,77
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	4,98								
Позициона девијација - P_a [μm]	445,93								
Несигурност позиционирања - P [μm]	465,21								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	20,77								

На слици 12-18. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала линеарном методом код $v_{j1} = \text{const.}$ кинематике.



Слика 12-18. Тачност позиционирања Z осе линеарном методом кретања $v_{j1}=\text{const.}$ кинематике (EZZ)

- Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника – 6. експериментална поставка

У табелама 12-37. и 12-38. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе методом кретања ходочасника.

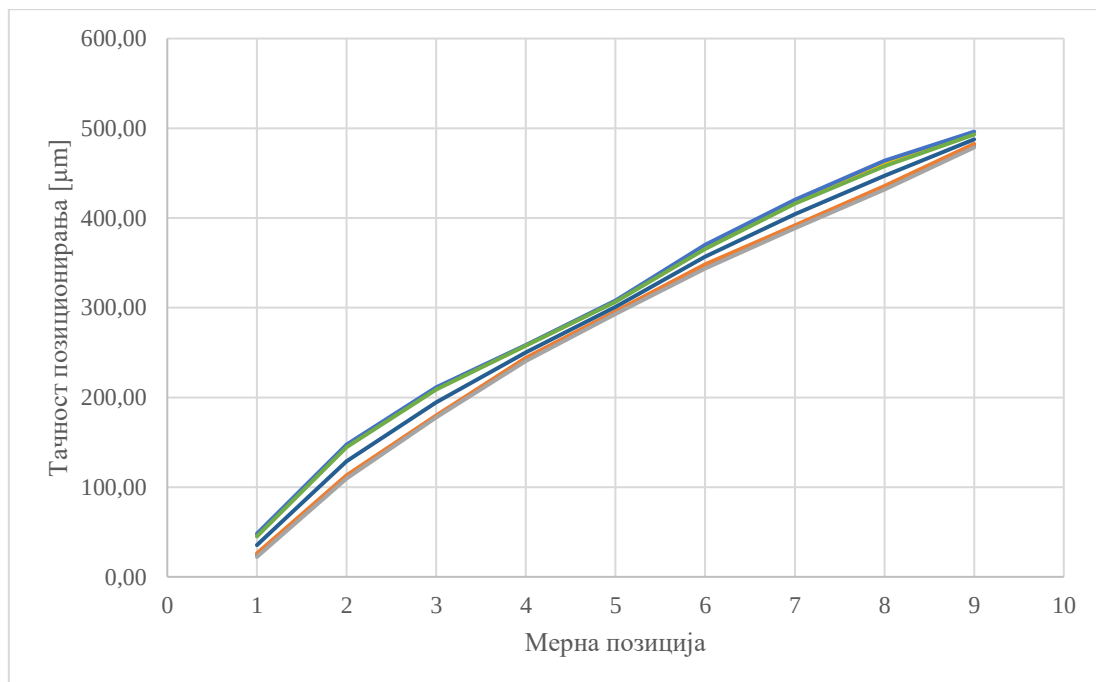
Табела 12-37. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 6. експерименталном поставком

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.	
	Мерна позиција - P, [μm]		50		99		143		190		236		280		330		375	
Смер позиционирања	j = 1	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
		23,62	46,21	110,23	145,42	178,80	209,81	242,81	257,97	294,20	306,81	346,26	366,51	389,03	416,47	433,40	458,76	479,16
		2	23,48	45,52	110,19	145,27	177,90	209,05	241,12	257,98	293,29	307,60	345,46	366,97	389,29	417,72	432,23	460,38
		3	23,73	46,64	112,04	145,80	178,87	210,36	242,65	258,05	294,86	306,91	346,13	367,29	390,72	418,14	433,07	460,04
		4	23,57	46,96	111,17	146,03	178,95	209,34	241,47	258,12	293,98	307,66	344,16	367,52	390,43	419,17	434,13	462,26
		5	25,81	46,43	112,05	147,03	179,25	210,35	243,31	258,25	295,25	307,34	347,45	369,74	391,33	418,22	434,20	462,88
Средње једносмерно одступање од позиције [μm]	6	25,03	47,82	112,01	146,66	178,85	210,52	241,73	258,44	294,17	307,41	346,84	367,76	390,29	419,66	435,12	460,36	481,12
	Средње једносмерно одступање од позиције [μm]	24,20	46,60	111,28	146,03	178,77	209,91	242,18	258,13	294,29	307,29	346,05	367,63	390,18	418,23	433,69	460,78	480,60
	Централна вредност одступања [μm]	35,40		128,66		194,34		250,16		300,79		356,84		404,20		447,24		487,61
	Раслик одступања средња вредности - B _i [μm]	-22,39		-34,75		-31,14		-15,95		-13,00		-21,58		-28,05		-27,09		-14,01
	Стандардна девијација - s _i [μm]	0,97	0,77	0,90	0,69	0,45	0,61	0,86	0,18	0,69	0,36	1,14	1,12	0,87	1,12	1,01	1,52	0,98
	Једносмерна повезаност - R _i [μm]	3,89	3,09	3,58	2,78	1,82	2,42	3,46	0,72	2,75	1,42	4,57	4,48	3,49	4,48	4,04	6,07	3,93
Параметар [μm]	Двосмерна повезаност - R _i [μm]	25,88		37,93		33,25		18,04		15,08		26,11		32,03		32,15		17,59
	Максимални раслик одступања - B	-	-	-	-13,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Средња вредност раслик одступања	-	-	-	-23,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Повезаност по оси - R	4,57	6,07		37,93													
	Систематска грешка - E	456,40	448,02		470,41													
	Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	-	452,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Грешка позиционирања - A	Грешка позиционирања - A	460,31	451,16		473,96													

Табела 12-38. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени б. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	50	145	210	280	340	405	475	535	600
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,87	0,80	0,53	0,52	0,52	1,13	1,00	1,26	0,89
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	5,23	4,77	3,18	3,13	3,13	6,79	5,97	7,59	5,36
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	22,39	34,75	31,14	15,95	13,00	21,58	28,05	27,09	14,01
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	7,59								
Позициона девијација - P_a [μm]	452,21								
Несигурност позиционирања - P [μm]	475,71								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	23,11								

На слици 12-19. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала методом ходочасника код $v_{j1} = \text{const.}$ кинематике.



Слика 12-19. Тачност позиционирања Z осе методом кретања ходочасника $v_{j1} = \text{const.}$ кинематике (EZZ)

- Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна – 9. експериментална поставка

У табелама 12-39. и 12-40. приказани су резултати мерења тачности позиционирања Z осе методом кретања клатна.

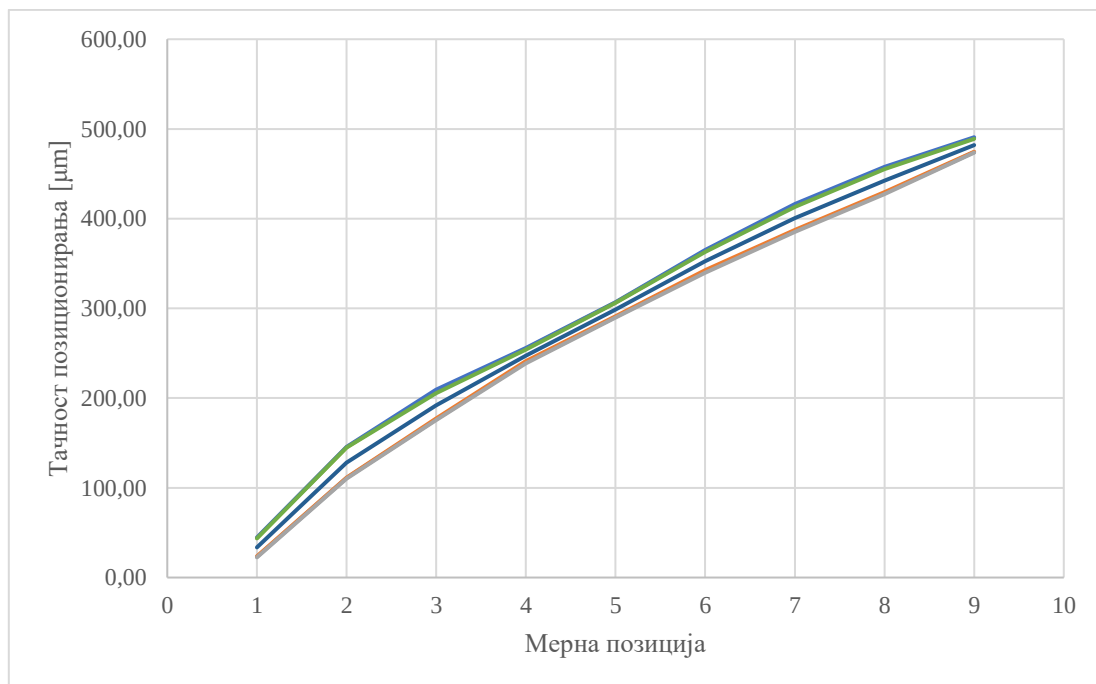
Табела 12-39. Параметри тачности позиционирања Z осе према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Одступање од позиције - x_i [mm]	$j = 1$	44,56	110,93	144,81	176,33	208,70	240,61	254,60	290,84
	2	23,17	44,11	110,37	145,11	175,95	206,84	240,22	255,55
	3	23,05	44,05	111,28	145,15	176,93	207,01	240,06	254,98
	4	22,92	43,79	110,99	145,34	175,65	208,72	238,98	254,11
	5	23,21	44,08	110,72	145,28	176,66	206,63	239,84	255,21
	6	22,61	44,17	110,63	145,34	176,50	206,46	239,34	254,97
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	23,07	44,13	110,82	145,17	176,34	207,39	239,84	254,90	290,41
Централни вредност одступања [mm]	33,60	128,00	191,86	247,37	298,45	352,56	400,52	442,53	481,94
Релатив одступања средњих вредности - B_i [mm]	-21,05	-34,35	-31,06	-15,06	-16,07	-22,83	-28,33	-28,15	-15,73
Стандардни девијација - s_i [mm]	0,29	0,25	0,32	0,20	0,44	0,24	0,47	0,76	0,54
Једносмерна повезаност - R_i [mm]	1,16	1,00	1,26	0,81	1,87	4,14	1,90	3,03	2,60
Двосмерна повезаност - R_{ij} [mm]	22,14	35,39	34,07	17,25	17,44	25,32	30,79	30,52	17,15
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални релатив одступања - B	-	-	-15,06						
Средња вредност релатив одступања	-	-	-23,63						
Повезаност по оси - R	2,98	4,14	35,39						
Систематска грешка - E	451,00	445,68	466,73						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	448,34						
Грешка позиционирања - A	452,09	447,08	468,22						

Табела 12-40. Параметри тачности позиционирања Z осе према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Реперни положај - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,27	0,26	0,75	0,55	0,34	0,62	0,62	0,59	0,35
Положај расподела на позицији - P_{Sj} [μm]	1,62	1,56	4,51	3,29	2,05	3,73	3,69	3,57	2,13
Распон одступања средњих вредности у тачки „j“ - U_j [μm]	21,05	34,35	31,06	15,06	16,07	22,83	28,33	28,15	15,73
Максимално растурање - P_{Smax} [μm]	4,51								
Позициона девијација - P_a [μm]	448,34								
Несигурност позиционирања - P [μm]	468,61								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	23,63								

На слици 12-20. приказана је тачност позиционирања Z осе која је измерена док се платформа кретала методом клатна код $v_{j1} = \text{const.}$ кинематике.



Слика 12-20. Тачност позиционирања Z осе методом кретања клатна $v_{j1}=\text{const.}$ кинематике (EZZ)

12.5 Тачност позиционирања клизача J_0 и J_1

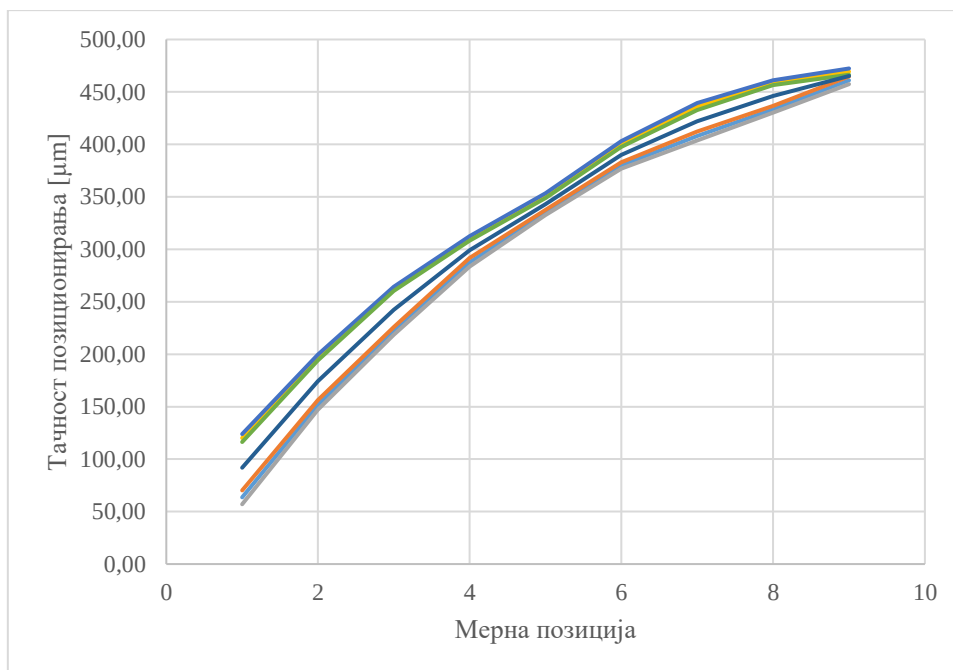
За одређивање тачности позиционирања клизача O-X glide механизма потребно је израчунати вредности одступања позиције платформе на клизаче према процедури из поглавља 7.2 докторске дисертације. На дијаграму 6-3. могу се видети промене вредности коефицијента трансформације у зависности од положаја платформе по Z осе. За израчунавање потребно је познавати те вредности за положаје платформе у предвиђеним мерним позицијама. У табели 12-41. приказане су вредности коефицијента трансформације K_1 за клизач J_0 и коефицијента трансформације K_2 за клизач J_1 у мерним позицијама. Коефицијенти су објашњени у поглављу 6.

Табела 12-41. Вредности коефицијента трансформације клизача по мерним позицијама провере тачности позиционирања Z осе

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Координата платформе по Z осе [mm]	-296,118	-286,618	-280,118	-273,118	-267,118	-260,618	-253,618	-247,618	-241,118
Коефицијент трансформације K_1	-2,432	-2,071	-1,890	-1,732	-1,618	-1,512	-1,412	-1,337	-1,264
Коефицијент трансформације K_2	-1,921	-1,617	-1,462	-1,327	-1,228	-1,135	-1,048	-0,981	-0,916

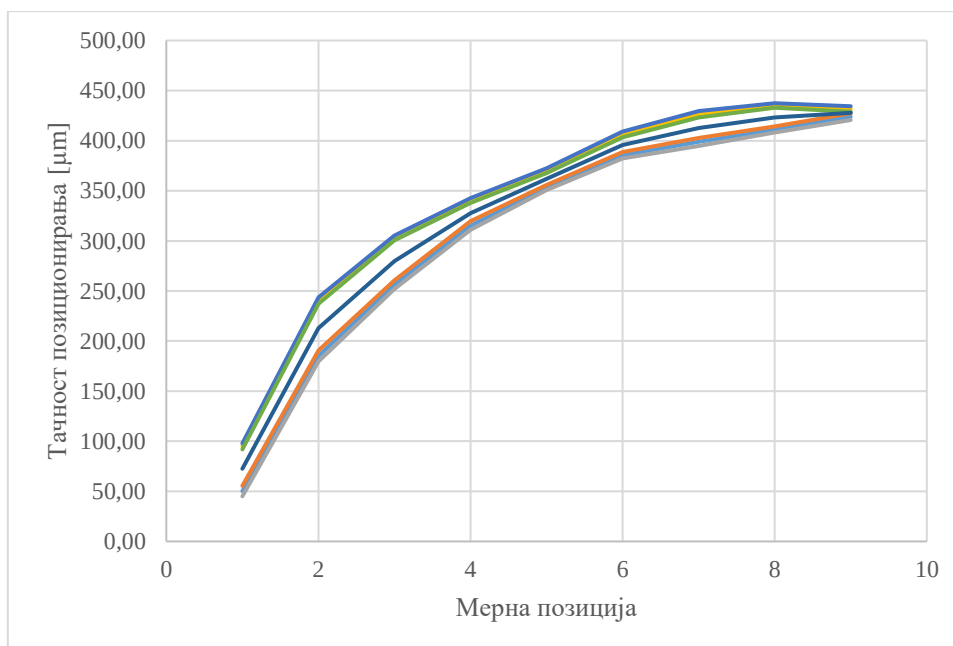
На основу ових вредности и једначина (140) и (141), израчуната су одступања од позиције. Нове вредности одступања од позиције су дале резултате који у великој мери одступају од иницијалних вредности параметара тачности позиционирања платформе. Конкретне вредности тих параметара по свим експерименталним поставкама и по стандарду ISO 230-2:2014 и препоруке VDI/DGQ 3441 су исказане у табелама на исти начин као што је за платформу. Будући да би то у великој мери повећало обим дисертације, све табеле су дате у Прилогу А.

Због нелинеарности O-X glide механизма, дошло је до погоршавања тачности позиционирања, тј. до повећавања вредности параметара тачности позиционирања клизача у односу на платформу. На сликама 12-21. и 12-22. приказане су вредности тачности позиционирања за 1. експерименталну поставку за клизаче J_0 и J_1 у облику дијаграма. За остале експерименталне поставке дијаграми се налазе у Прилогу А.



Слика 12-21. Тачност позиционирања клизача J_0 у I. експерименталној поставци

Максимална вредност двосмерне тачности позиционирања за клизач J_0 износи $455,22\mu\text{m}$ што се може видети на слици 12-21., а за клизач J_1 она износи $427,78\mu\text{m}$ са слике 12-22.



Слика 12-22. Тачност позиционирања клизача J_1 у I. експерименталној поставци

13. поглавље

Утицај методе кретања и нелинеарности на параметре тачности позиционирања

13.1 Утицај методе кретања на поновљивост

Провера Z осе анализираног механизма је указала на међусобне утицаје методе испитивања и везу између системских и случајних грешака. Стандардно одступање поновљивости измерених вредности је било веома мало, што је резултирало да несигурност, изазвана променама у околини, рачунато на основу стандардом прописане процедуре, буде много већа. На основу тога се може закључити да не постоји реално решење за корекцију параметара, које је описано у поглављу 5 докторске дисертације и врши се на основу једначина (88)-(95). То је указало на потребу дубље анализе узрока ове појаве.

13.1.1 Временски оквир посматрања утицаја промене околине

Из резултата се може уочити да се повратно кретање до једне мерне позиције код методе клатна врши веома брзо. Временски оквир у којем се може уочити поновљивост позиције је у овом случају много мањи у односу на дужину целокупног мерења. Због тога, корекција поновљивости, на основу мерне несигурности изазване променом околине која је одређена стандардном процедуром на основу целокупне дужине мерења, даје неодговарајуће резултате. Потребно је редукovati временски оквир за одређивање E_{VE} да би добили релевантне податке. Основно правило је да се узме у обзир укупно време поновљивости прилаза једној мерној позицији, која даје довољно велике промене у девијацији настале због промене у околини.

Код испитивања тачности позиционирања нумерички управљане осе, која обухвата кретања методом клатна, треба узети у обзир време потребно да се приђе одређеној мерној позицији n пута, то јесте бројем циклуса. Временски оквир за кретање по методи клатна, који се треба узети у обзир при одређивању утицаја промене у околини, у општем случају, може се одредити помоћу следеће једначине:

$$T_{E_{ve},klatno} = n \cdot \left(\frac{\Delta P_{i,max}}{v_f} + 2T_p \right), \Delta P_{i,max} = \max[P_i - P_{i-1}], i = 1, m \quad (191)$$

где је $\Delta P_{i,max}$ максимално растојање између узастопних мерних позиција.

Код линеарне методе, то је целокупна дужина мерења јер временски оквир за прилазак мерној позицији, која је одређена разликом између првог и последњег циклуса, приближно је исти као што је то и сама дужина мерења. Ово одговара стандардној процедури.

Код мерења тачности позиционирања кретањем методом ходочасника, постоји двострука цикличност. Прва се манифестује у виду прва два прилаза једној мерној позицији у релативно кратком временском року, после тога се прелази на следећу мерну позицију. Ово је микро-циклус приласка мерној позицији. Пошто је важно да се мерење у једној позицији изврши минимално пет пута, потребно је да се микро-циклус понови још макар 2 пута, тако стварајући макро-циклус приласка мерној позицији. Временски оквир макро циклуса је дефинисан између почетка првог микроциклуса прве мерне позиције, тј. првог прилаза првој мерној позицији, и краја првог микроциклуса задње мерне позиције, тј. када се напусти задња мерна позиција и започиње се следећи макро циклус. На слици 13-1. приказано је значење микро и макро циклуса при методи кретања ходочасника.



Слика 13-1. Приказ микро и макро циклуса кретања платформе при методи ходочасника (дорађено [16])

Временски оквир једног микроциклуса T_{micro} с. довољно је мали да је утицај промене околине занемарљив. Она се у општем случају може одредити помоћу једначине 192.

$$T_{micro, \text{ходочасник}} = 4 \cdot \left(\frac{\Delta P_{i, \max}}{v_f} + T_p \right) \quad (192)$$

Временски оквир макро циклуса се може одредити помоћу следеће формуле:

$$T_{macro, \text{ходочасник}} = m \cdot T_{micro, \text{ходочасник}} + \frac{L}{v_f} \quad (193)$$

Макро циклус одговара временском оквиру за одређивање утицаја околине $T_{E_{ve}, \text{ходочасник}} = T_{macro, \text{ходочасник}}$.

Метода ходочасника је симбиоза линеарне методе и методе клатна, што се може видети и у двострукој цикличној природи стратегије кретања. Микро циклус представља особину преузету из методе клатна, а макро циклус представља особину преузету из линеарне методе.

13.1.2 Одређивање одступања контролне позиције изазвана променом у околини

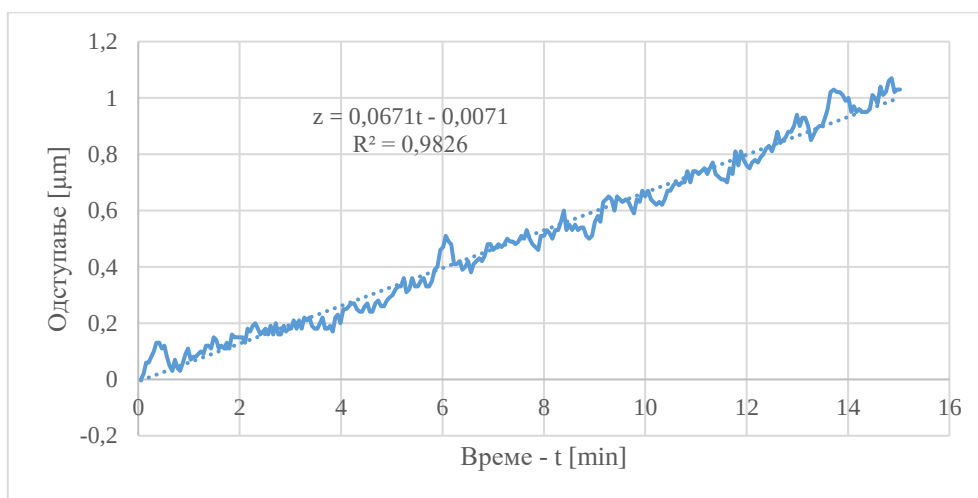
У табели 13-1. приказане су вредности временских оквира и одговарајућих вредности промена у одступању контролне позиције утицаја промене околине, који су рачунати помоћу једначина 191, 192 и 193 за све три посматране осе.

Табела 13-1. Вредности временског оквира за одређивање E_{VE} по осама X, Y и Z

Оса	X	Y	Z
$\Delta P_{i,max}$ [mm]	37	50	9,5
v_f [mm/min]	800	800	150
T_p [s]	3	16	2
m	7	9	9
n	6 и 5	6	6
L [mm]	183	375	60
$T_{micro,h}$ [min]	0,385	1,31667	0,38667
$T_{eve,h}$ [min]	2,92375	12,31875	3,88
$T_{eve,kl}$ [min]	0,73125	3,575	0,78
$T_{eve,lin}$ [min]	9	37	11

Из табеле се може уочити значајна разлика између вредности добијених за временски оквир посматрања промене утицаја околине по методама кретања.

На слици 13-2. приказана је линеарна регресија података добијених провером утицаја околине на Z осу. Добијена је линеарна регресиона функција, која са 98,26% тачношћу описује везу између времена и девијације. На основу ове функције се може одредити, за претходно установљени временски оквир, колика је промена у девијацији.



Слика 13-2. Линеарна регресија утицаја околине на Z осу

Једначина регресионе праве је:

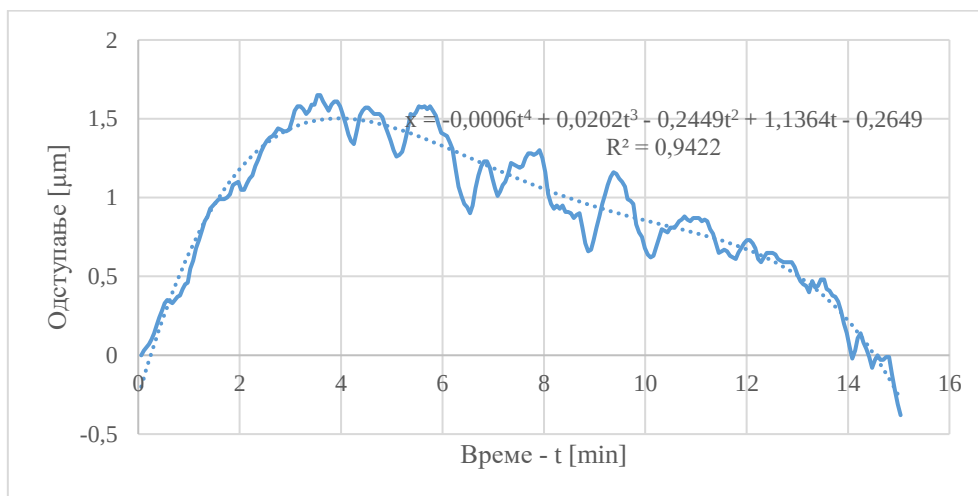
$$z = 0,0671t - 0,0071 \quad (194)$$

Пошто је реч о линеарној апроксимацији, промена одступања Δz по дискретним временским оквирима целом дужином трајања мерења је константна и једнака производу нагиба праве и задатог дискретног временског оквира, као што се може видети и у једначини (195).

$$\begin{aligned} \Delta z &= z_2 - z_1 = 0,0671t_2 - 0,0071 - (0,0671t_1 - 0,0071) \\ \Delta z &= 0,0671(t_2 - t_1) = 0,0671\Delta t \end{aligned} \quad (195)$$

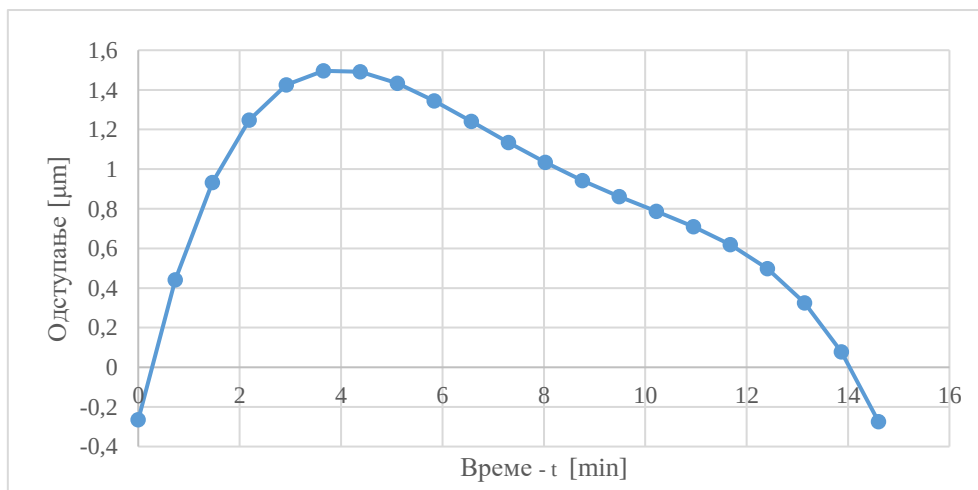
При чему $\Delta z = E_{VE}$ и $\Delta t = T_{eve}$.

На слици 13-3. приказана је полиномијална регресија података добијених провером утицаја околине на X осу. Добијена је регресиона функција, која са 94,22% тачности описује везу између времена и девијације. На основу ове функције се може одредити колика је промена у девијацији за претходно установљени временски оквир.

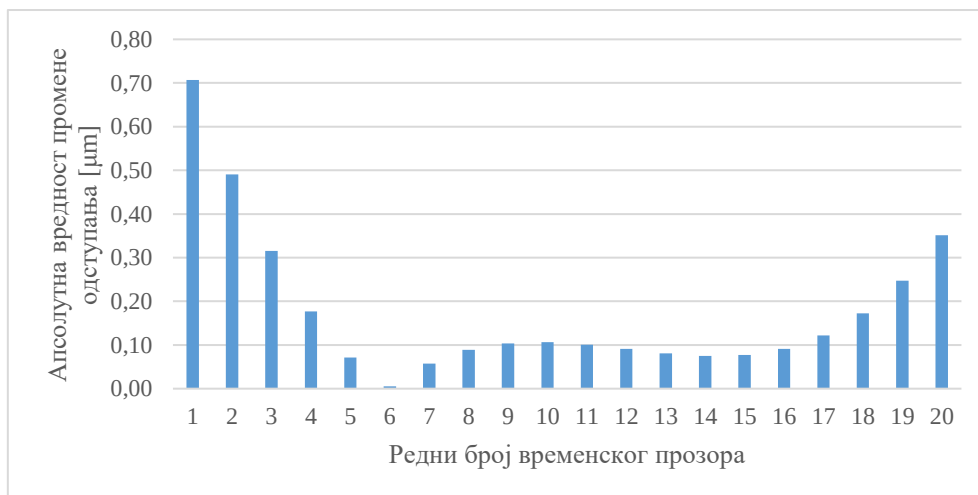


Слика 13-3. Полиномијална регресија утицаја околине на X осу

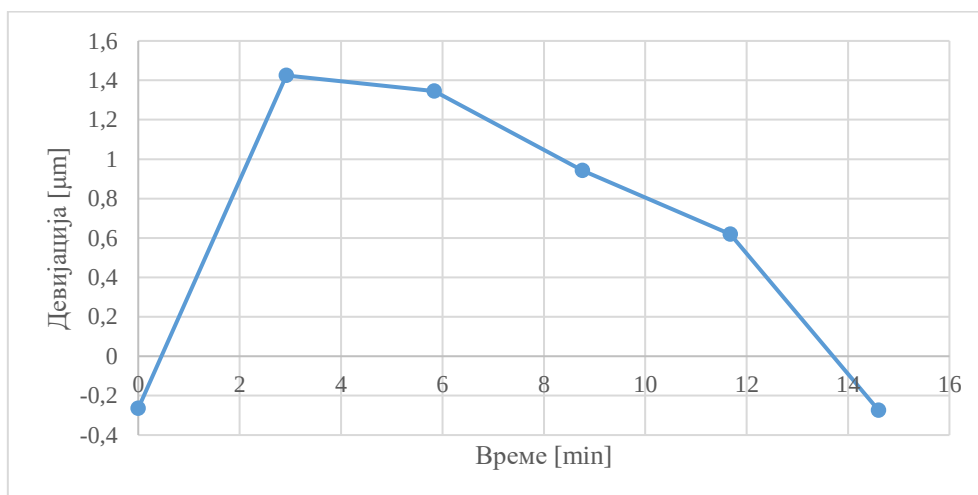
Пошто је реч о полиномијалној регресији, приступ који се користио код Z осе се не може у потпуности користити пошто постоји променљива природа која утиче на промену одступања. Да би се решио проблем променљивости ове величине, регресиона права се дели на једнаке дискретне делове по X оси. У крајњим позицијама одређених оквира погледа се колика је вредност одступања и израчунава се разлика између суседних одступања. За потребе одређивања E_{VE} узме се у обзир највећа разлика у одступањима. На сликама 13-4., 13-5., 13-6. и 13-7. може се видети подела на дискретне делове са израчунатим вредностима одступања и назначеним разликама.



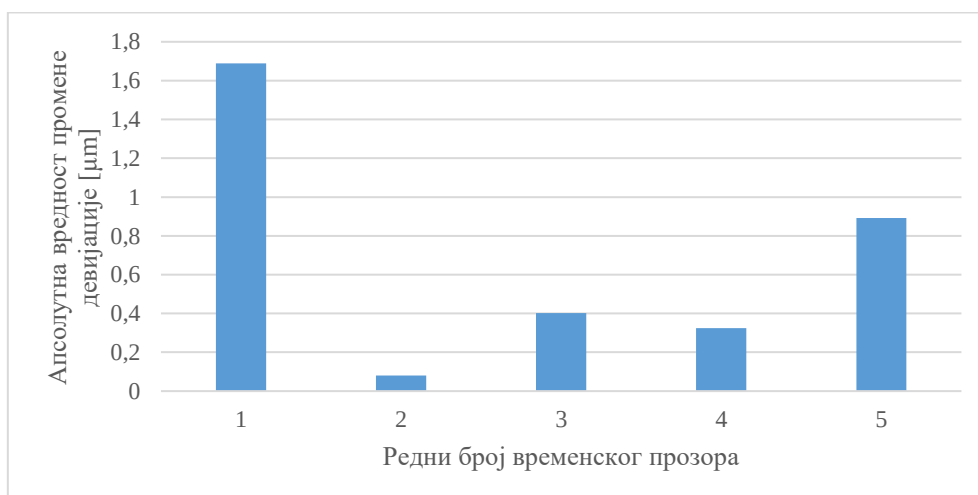
Слика 13-4. Утицај околине на X осу у дискретним временским оквирима за методу клатна



Слика 13-5. Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код X осе за методу клатна

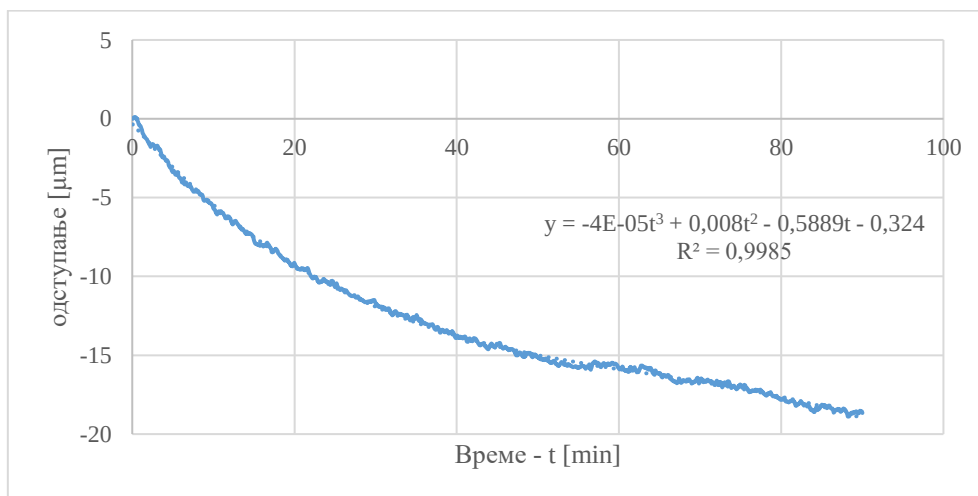


Слика 13-6. Утицај околине на X осу у дискретним временским оквирима за методу ходочасника



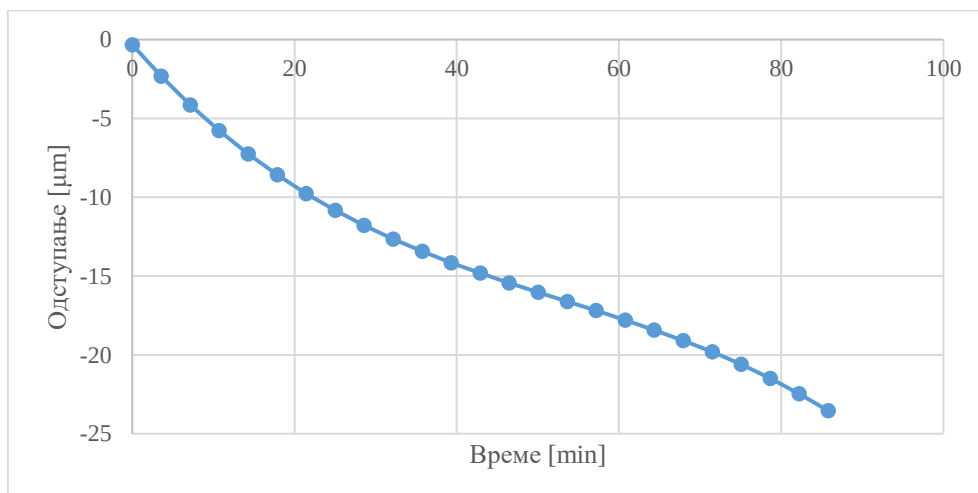
Слика 13-7. Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код X осе за методу ходочасника

На слици 13-8. приказана је полиномијална регресија података добијених провером утицаја околине на Y осу. Добијена је регресиона функција, која са 99,85% тачношћу описује везу између времена и одступања. На основу ове функције се може одредити, за претходно установљени временски оквир, колика је промена у одступању.

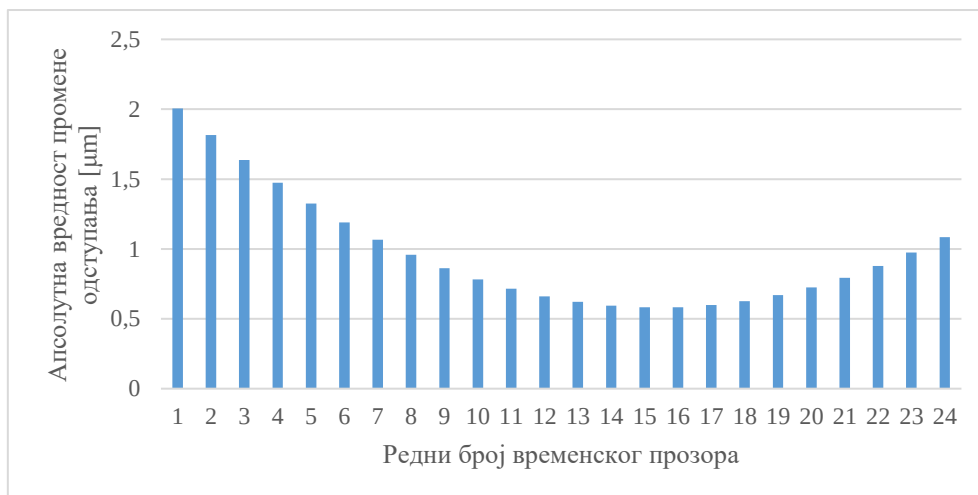


Слика 13-8. Полиномијална регресија утицаја околине на Y осу

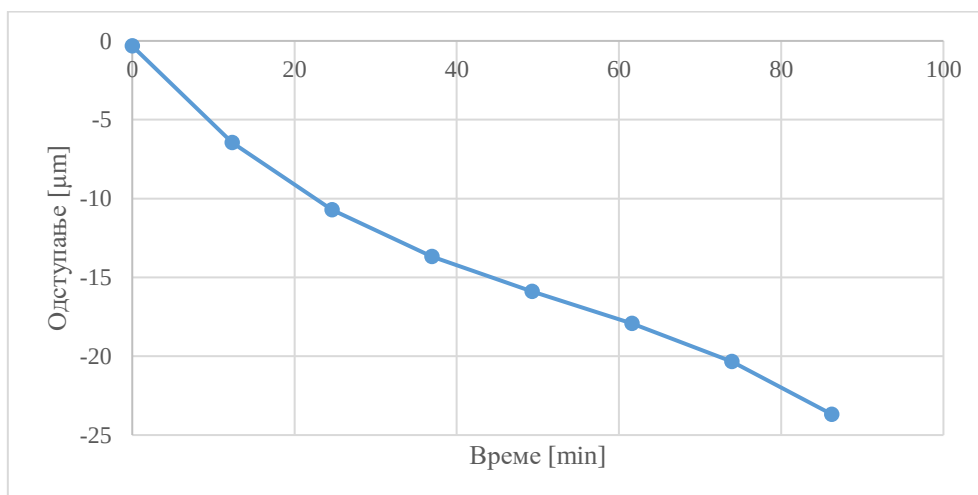
Пошто је реч о полиномијалној регресији, исти приступ ће се користити као и код X осе. На сликама 13-9., 13-10., 13-11. и 13-12. може се видети подела на дискретне делове са израчунатим вредностима одступања и назначеним разликама.



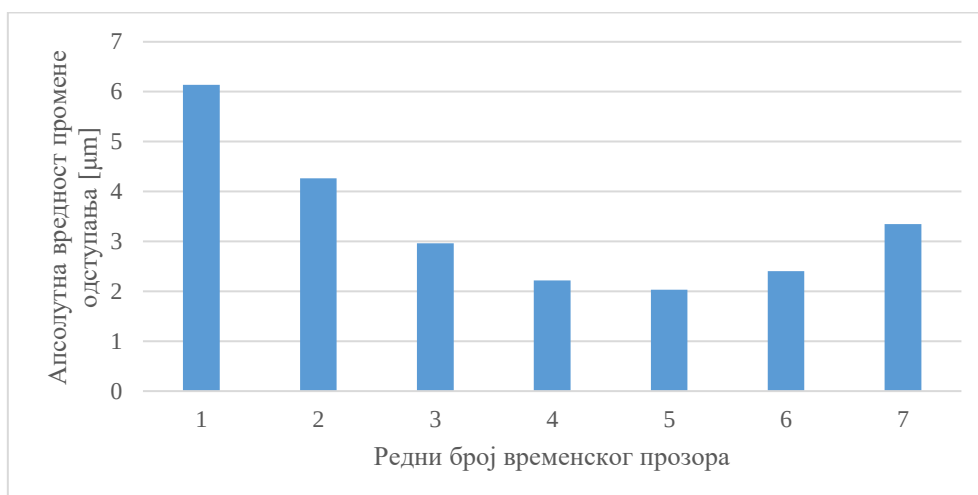
Слика 13-9. Утицај околине на Y осу у дискретним временским оквирима за методу клатна



Слика 13-10. Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код Y осе за методу клатна



Слика 13-11. Утицај околине на Y осу у дискретним временским оквирима за методу ходочасника



Слика 13-12. Апсолутна вредност промене одступања између дискретних временских оквира провере утицаја околине код Y осе за методу ходочасника

У табели 13-2. приказане су кориговане вредности утицаја промене околине E_{VE} у зависности од методе кретања по свакој мерној оси. У табели 13-3. приказане су

кориговане вредности мерне несигурности изазваној променама у околини. Ове вредности треба да се узму у обзир.

Табела 13-2. Кориговане вредности утицаја промене околине у зависности методе кретања по свакој мерној оси

Оса	X	Y	Z
$E_{VE,hodočasnik} [\mu m]$	1,66	2,01	0,26
$E_{VE,klatno} [\mu m]$	0,71	6,14	0,05
$E_{VE,linearno} [\mu m]$	1,66	13,07	0,74

Табела 13-3. Кориговане вредности мерне несигурности изазвана променама у околини

Оса	X	Y	Z
$U_{EVE,hodočasnik} [\mu m]$	0,49	0,58	0,08
$U_{EVE,klatno} [\mu m]$	0,20	1,77	0,02
$U_{EVE,linearno} [\mu m]$	0,48	3,77	0,21

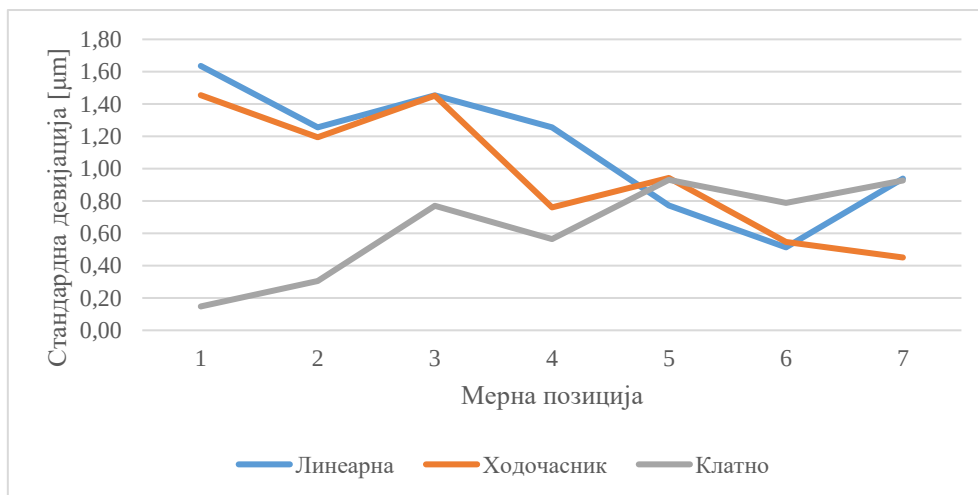
Појмови, који су назначени у табелама 13-2. и 13-3. опширно су објашњени у поглављу 5 докторске дисертације.

13.1.3 Стандардна девијација одступања од позиције по различитим методама кретања

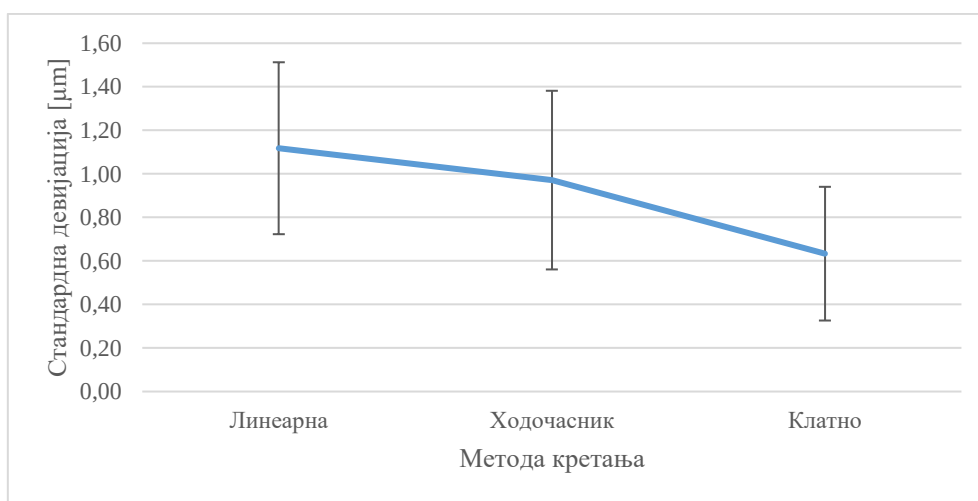
Стандардна девијација одступања од позиције се мења у зависности од позиције до позиције дуж једне осе машине алатке. Њена вредност у великој мери утиче на тачност позиционирања машине и на крајње резултате параметара који описују стање машине. Уобичајено је да се изврши низ експеримената и да се добијени резултати стандардне девијације анализирају у сврху бољег разумевања природе понашања промене вредности стандардне девијације и да се изучи да ли постоји нека веза са нелинеарношћу МАНК или са методама кретања. Посебно су посматрана кретања платформе у позитивном и негативном смеру, која одговарају описивању и теорији ISO 230-2:2014 стандарда, као и средња девијација, која одговара VDI/DGQ 3441.

- X оса

На слици 13-13. приказана је промена вредности стандардне девијације X осе за различите методе кретања за позитиван смер кретања платформе. Методом кретања клатна су добијене вредности које су номинално мање у односу на друге две методе. О томе сведочи и слика 13-14. по којем метода клатна смањује стандардну девијацију и одступање од просечне вредности, док линеарна метода има највећу вредност просека и највеће одступање.

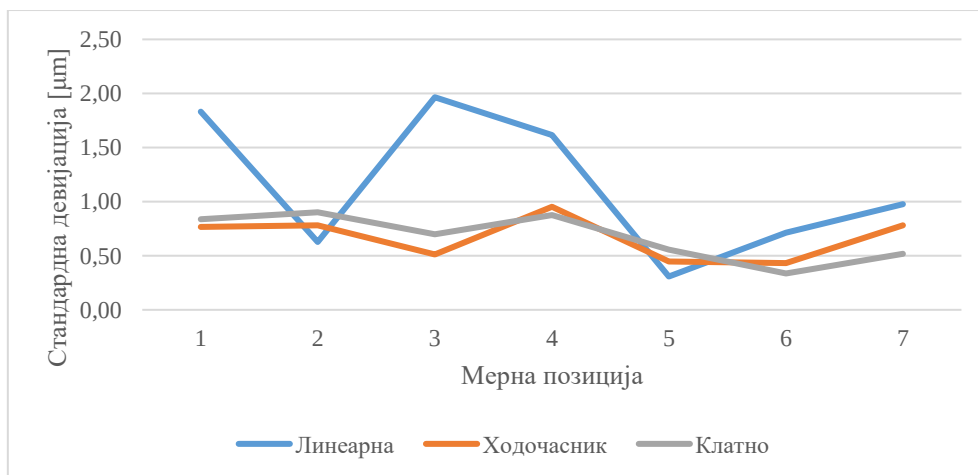


Слика 13-13. Промена стандардне девијације по мерним позицијама X осе у позитивном смеру

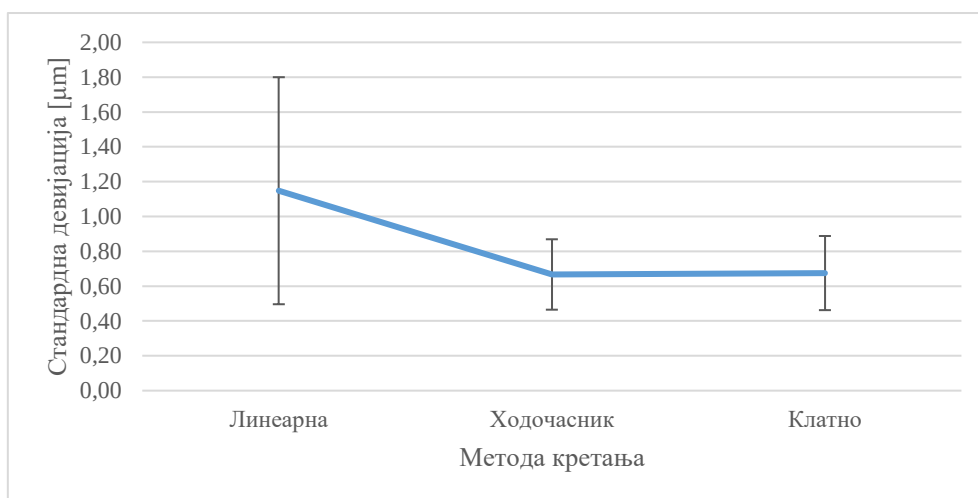


Слика 13-14. Централна вредност стандардне девијације дуж X осе у позитивном смеру померања по методама кретања

Слично позитивном смеру, и током кретања у негативном смеру добијају се резултати, који иду у прилог методи клатна. О томе сведоче слике 13-15. и 13-16. Код негативног смера кретања, метода ходочасника је дала исте резултате, као и метода клатна.

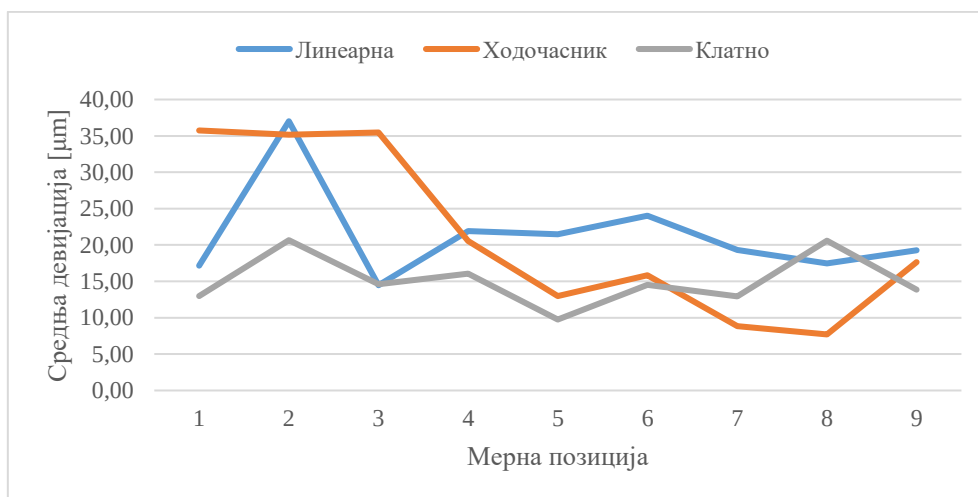


Слика 13-15. Промена стандардне девијације по мерним позицијама X осе у негативном смеру

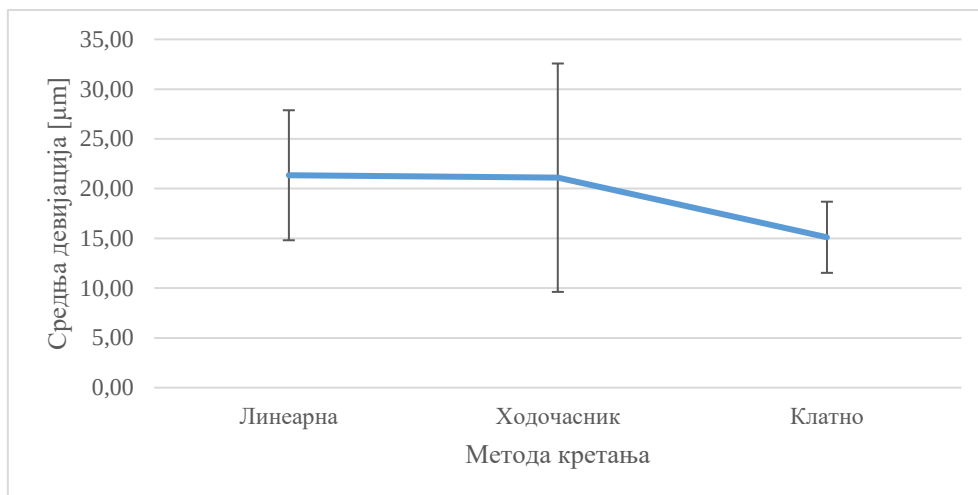


Слика 13-16. Централна вредност стандардне девијације дуж X осе у негативном смеру померања по методама кретања

Средња вредност стандардне девијације, која је карактеристични показатељ препоруке VDI/DGQ 3441, описује комбинацију двосмерне девијације. Резултати за X осу су приказани на слици 13-17. У овом случају метода клатна даје боље резултате у односу на методу ходочасника и линеарну методу код већине мерних позиција. Резултати су бољи у сегменту поновљивости јер, што је мања вредност стандардне девијације тачности позиционирања, то је већа вероватноћа да ће се платформа вратити у исту позицију. У даљим позицијама најбоље резултате је дала метода ходочасника а може се уочити да је у 8. мерној позицији линеарна метода дала бољи резултат од методе клатна. Када се посматрају уједначеност вредности дуж осе, као и просек средње девијације дуж осе, слика 13-18., метода клатна даје опет најбоље резултате. Критички осврт на резултате и њихове узроке ће бити сагледан у дискусији.



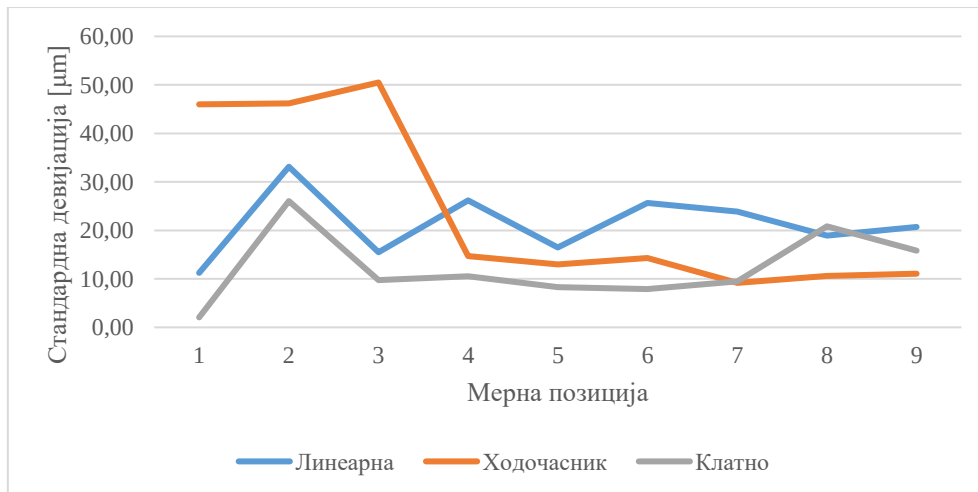
Слика 13-17. Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама X осе



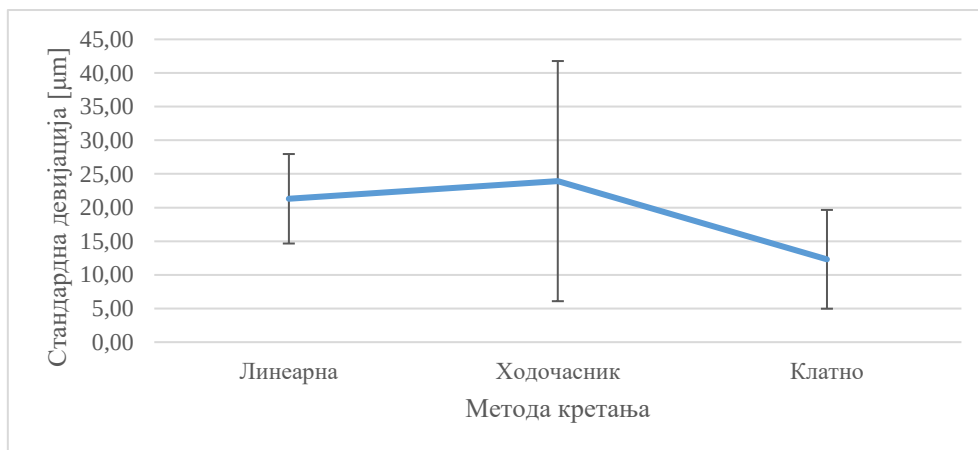
Слика 13-18. Централна вредност средње девијације дуж X осе бидирекционог позиционирања по методама кретања

- Y оса

На слици 13-19. приказана је промена вредности стандардне девијације Y осе за различите методе кретања за позитиван смер кретања платформе. Слично X оси, методом кретања клатна су добијене мање вредности у односу на друге две методе. Метода клатна даје добре резултате од 4. мерне позиције, пре тога је најгора, а линеарна метода даје резултате блиске методи клатна. Због лоших резултата за прве три мерне позиције, просечна вредност стандардне девијације дуж целе осе за методу ходочасника има повишене вредности, као и велика одступања од просека. О томе сведочи и слика 13-20..

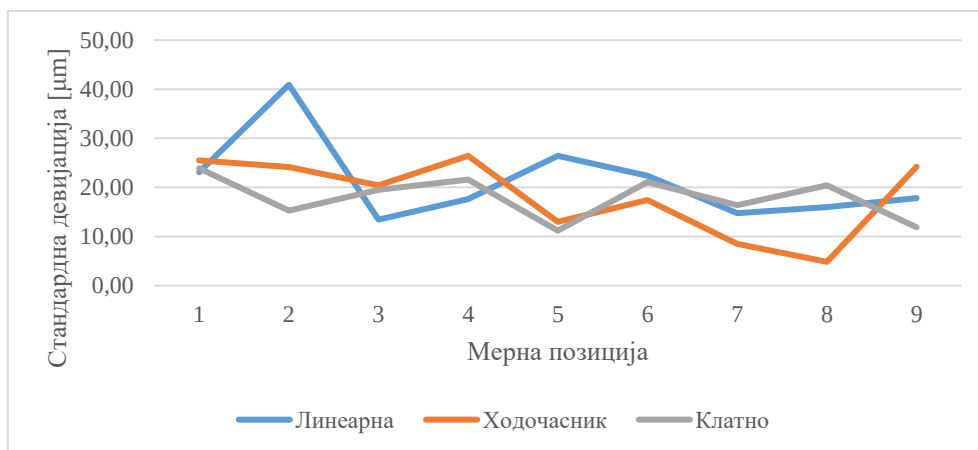


Слика 13-19. Промена стандардне девијације по мерним позицијама Y осе у позитивном смеру

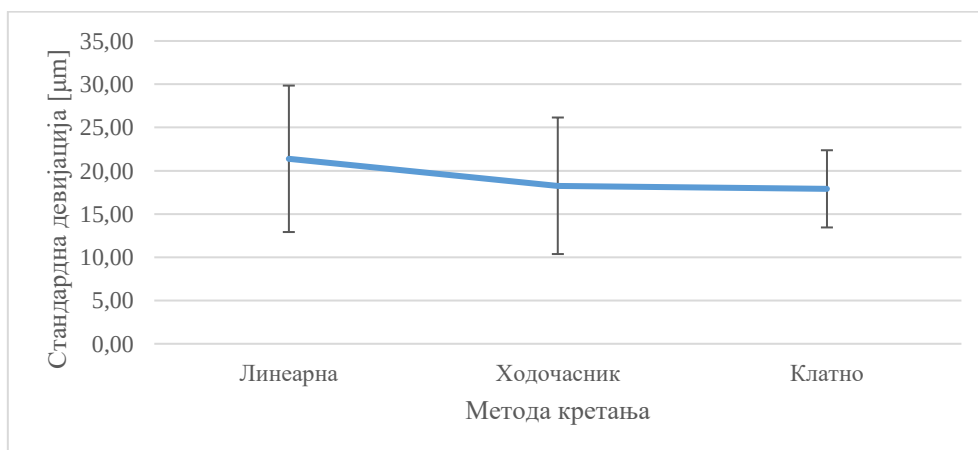


Слика 13-20. Централна вредност стандардне девијације дуж Y осе у позитивном смеру померања по методама кретања

Код негативног смера кретања Y осе се могу видети сличне тенденције, које су се појавиле код X осе. На слици 13-21. приказано је како се мења стандардна девијација по мерним позицијама за сваку методу кретања понаособ. Ту постоји велика разноликост по мерним позицијама, која метода даје боље резултате а која лошије, али како се то може видети у на слици 13-22. метода клатна даје глобално за целу осу најбоље резултате. И најмању средњу вредност, а и одступање од те средње вредности је најмање.

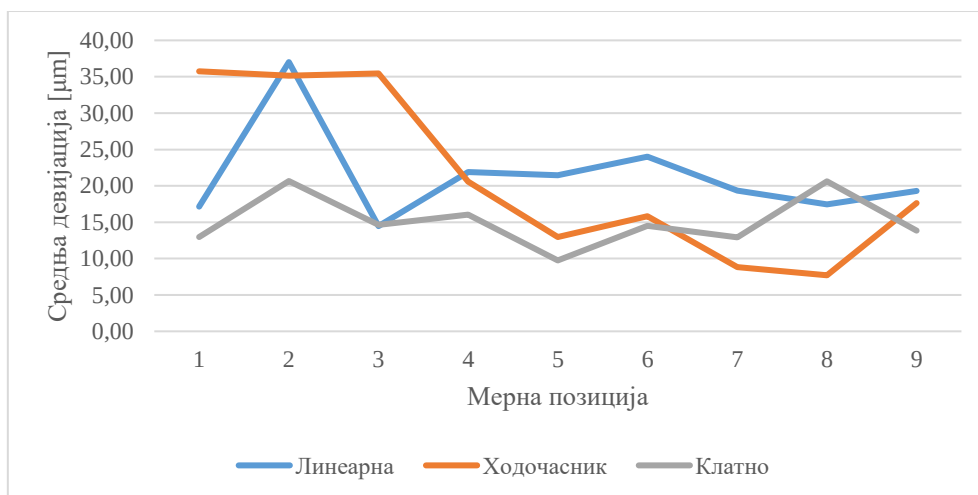


Слика 13-21. Промена стандардне девијације по мерним позицијама Y осе у негативном смеру

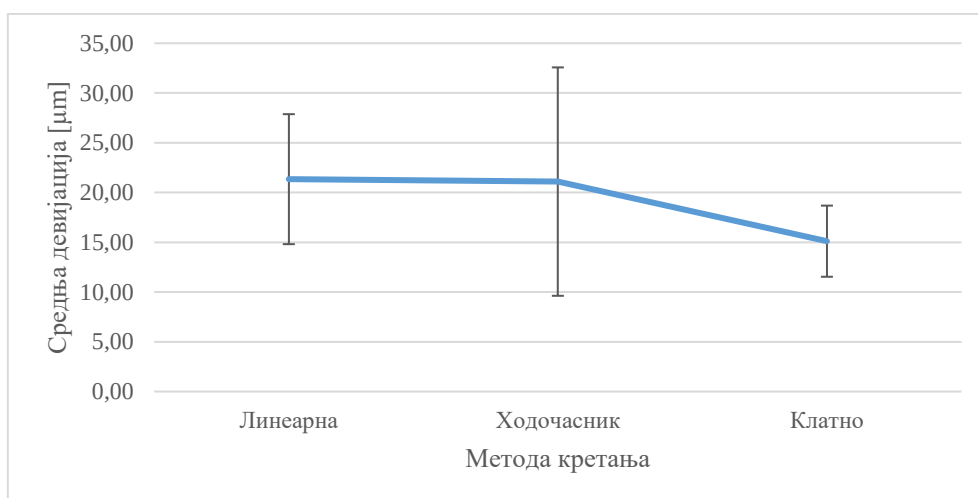


Слика 13-22. Централна вредност стандардне девијације дуж Y осе у негативном смеру померања по методама кретања

Што се тиче средње девијације Y осе, може се приметити иста тенденција, као и код позитивног смера кретања. У 8. мерној позицији метода ходочасника и линеарна метода дају боље резултате него метода клатна, али у свим осталим метода клатна је дала боље резултате од осталих. То се може видети на слици 13-23. Метода клатна је, глобално гледајући, за целу осу дала најбоље резултате, а ходочасник најгоре. На слици 13-24. могу се видети тачне вредности просечне средње девијације дуж целе осе по различитим методама кретања.



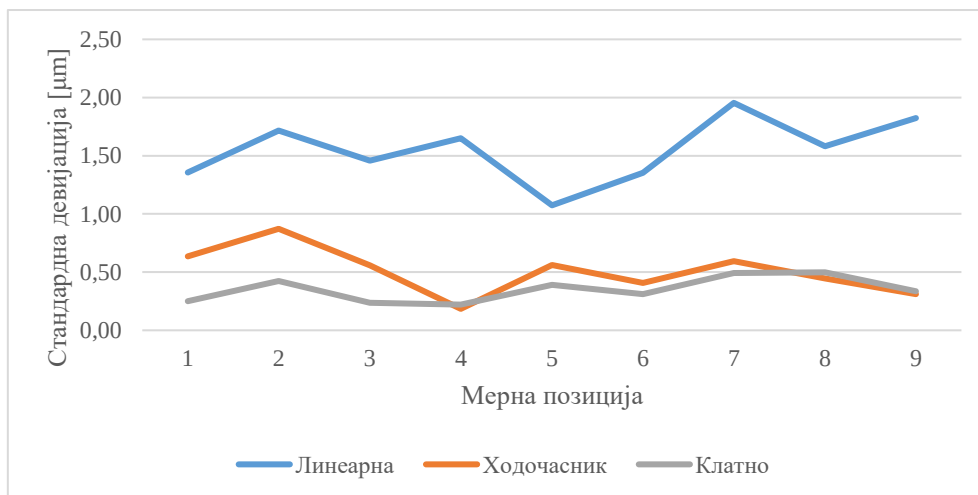
Слика 13-23. Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама Y осе



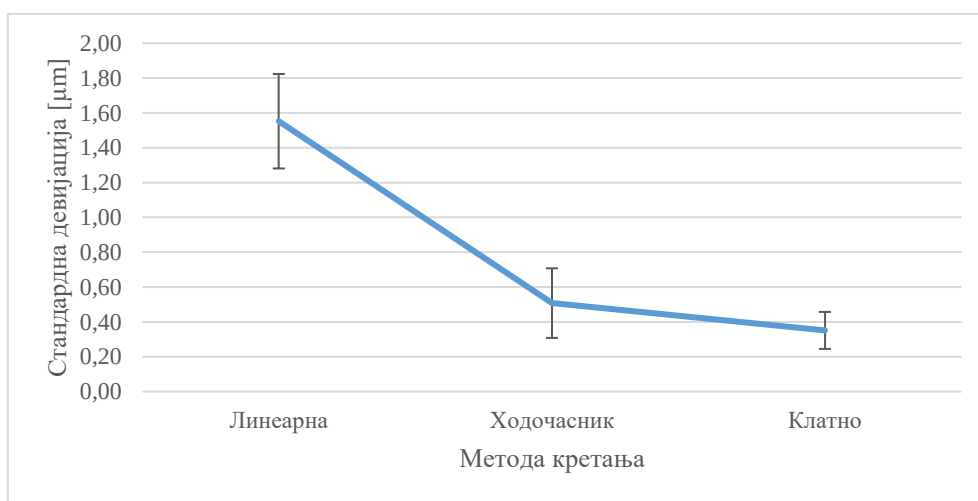
Слика 13-24. Централна вредност средње девијације дуж Y осе бидирекционог позиционирања по методама кретања

Z оса

На слици 13-25. приказана је промена вредности стандардне девијације Z осе за различите методе кретања у позитивном смеру кретања платформе. Слично X и Y осе, методом кретања клатна су добијене мање вредности у односу на друге две методе. Метода клатна и метода ходочасника дају веома сличне резултате стандардне девијације, док линеарна метода даје у неким позицијама и три пута веће резултате стандардне девијације. Глобално посматрајући целу осу, метода ходочасника и клатна су дали приближно исте резултате у позитивном смеру кретања. О томе сведочи и слика 13-26.

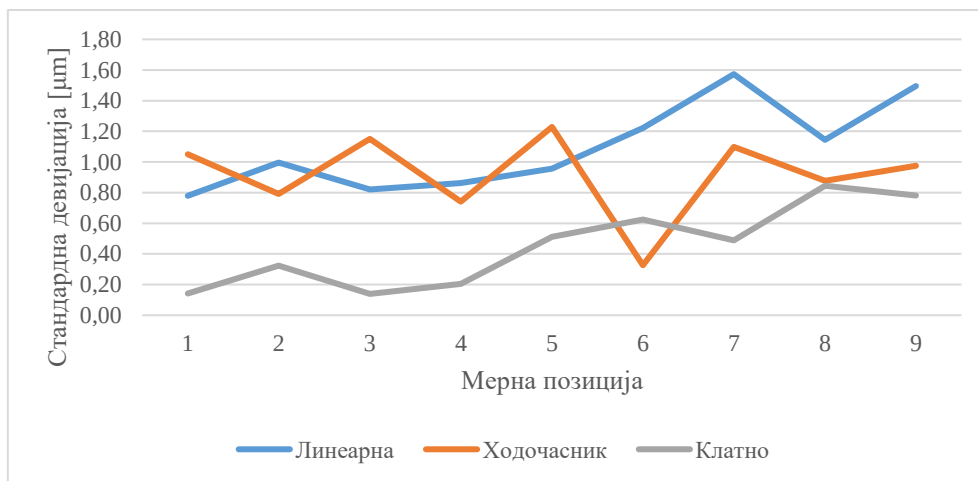


Слика 13-25. Промена стандардне девијације по мерним позицијама Z осе у позитивном смеру

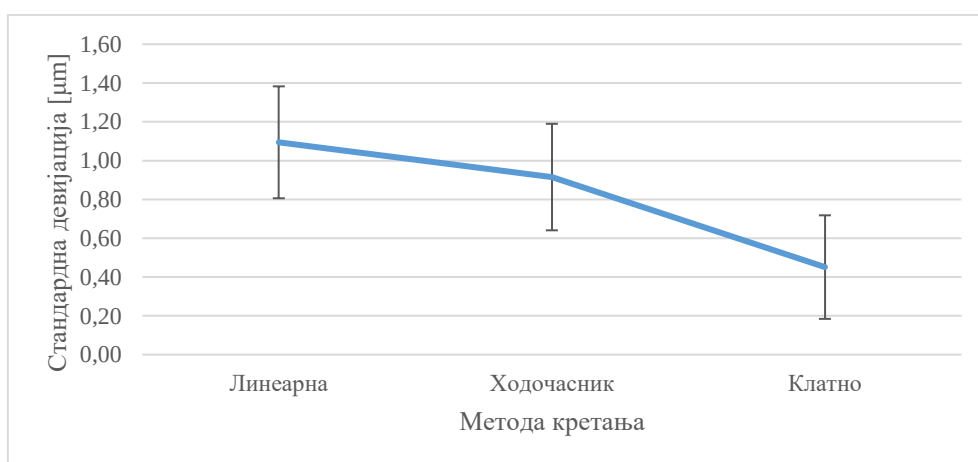


Слика 13-26. Централна вредност стандардне девијације дуж Z осе у позитивном смеру померања по методама кретања

Кретање у негативном смеру по Z оси је дало резултате сличне резултатима у позитивном смеру. Једино се код 6. мерне позиције метода ходочасника могу уочити мање вредности стандардне девијације у односу на остале две методе. То се може видети на слици 13-27. Посматрајући средње вредности целе осе метода клатна и овде даје ниже вредности у односу на друге две методе. О томе сведочи слика 13-28.

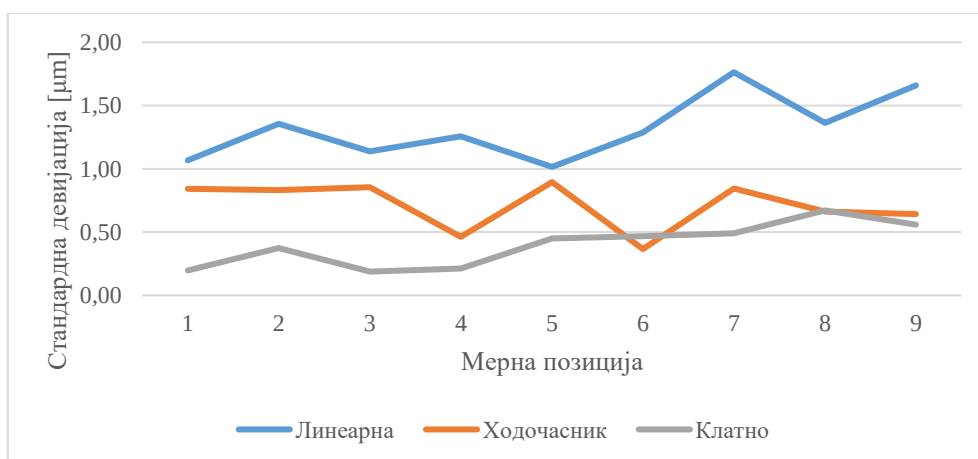


Слика 13-27. Промена стандардне девијације по мерним позицијама Z осе у негативном смеру

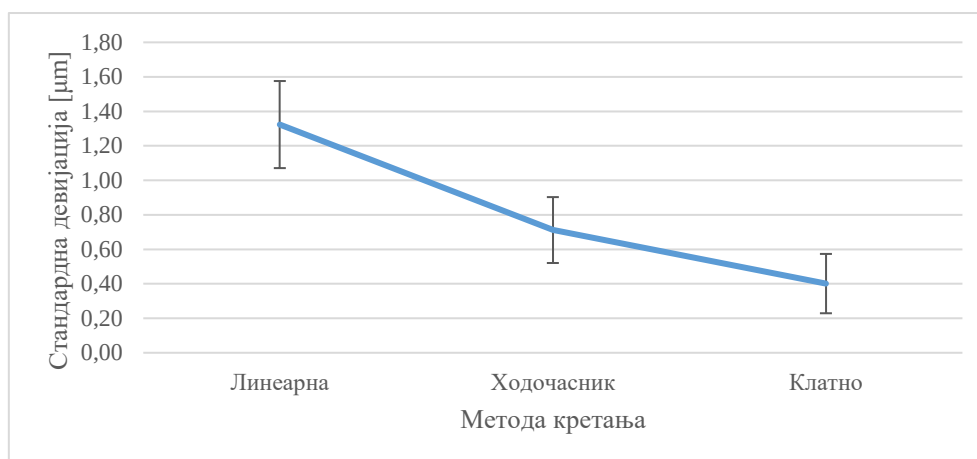


Слика 13-28. Централна вредност стандардне девијације дуж Z осе у негативном смеру померања по методама кретања

Ни код бидирекционе вредности средње девијације није другачија ситуација у односу на кретања у једном смеру. Метода клатна даје мање резултате и у појединачним мерним позицијама, изузев 6. и 8. мерна позиција, где је метода ходочасника боља, али са веома блиским вредностима, а даје и пресечно најбољи резултат дуж целе осе. Резултати се могу видети на сликама 13-29. и 13-30.



Слика 13-29. Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама Z осе



Слика 13-30. Централна вредност средње девијације дуж Z осе бидирекционог позиционирања по методама кретања

- J_0 и J_1 клизач

Што се тиче израчунатих вредности са платформе на клизаче и у том случају можемо извући сличне закључке као и код појединачних оса. Сама трансформација података није променила природу промене стандардне девијације. Одговарајући дијаграми се могу видети у прилогу А докторске дисертације на сликама под редним бројевима од 17.А до 28.А.

И код клизача J_0 и код клизача J_1 метода клатна у глобалу даје ниже вредности стандардне девијације при чему је расподела равномернија дуж целе осе. Постоји мала променљивост по мерним позицијама, али она је занемарљива.

13.2 Утицај нелинеарности и методе кретања на параметре тачности позиционирања

У прилогу Б се могу видети табеле са добијеним подацима одступања од позиције, стандардне девијације и свих осталих параметара, који су анализирани током експерименталног истраживања. У табелама за сваку експерименталну поставку посебно су назначене вредности параметара. Код одступања од позиције и стандардне девијације узета су у обзир оба смера кретања и посматрана је свака мерна позиција понаособ. Због тога су посматране све мерне позиције посебно. У случају да постоји систематична зависност између података, као што је то било са природом промене стандардне девијације по оси, овакво разматрање омогућава њихово препознавање и уочавање потенцијалне везе између нелинеарности МА са посматраним параметрима.

У наставку ће се посебно посматрати платформа, клизач J_0 и клизач J_1 . Као што је то већ рађено у претходним поглављима, подаци су прерачунати са платформе на клизаче помоћу коефицијента трансформације.

Статистичка обрада података добијених експерименталним путем се врши помоћу двофакторне анализе варијансе [152], тј. двофакторним ANOVA тестом. Она је врста провере хипотезе, у којој се упоређује једнакост средњих вредности две групе у зависности до статистичке значајности утицаја два фактора на посматране параметре. Користи F тест за поређење варијансе међу групама и грешку узима у разматрање дељењем по варијанси између елемената у групи.

У првом кораку израчунава се средња вредност за сваки узорак, а уједно се и одређује средња вредност целог узорака. У општем случају код двофакторне анализе узорак се означава са $X_{k,l}$, где је k ниво фактора А, а l је ниво фактора Б. Средња вредност целог узорака и средња вредност по факторима се одређује помоћу једначине (196)

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{1}{kl} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l X_{ij} \\ \bar{X}_{i*} &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^l X_{ij}, \bar{X}_{*j} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^k X_{ij}\end{aligned}\quad (196)$$

Полазне хипотезе које се тестирају су следеће:

- Ефекти нивоа фактора А на обележје X су без битних разлика.
- Ефекти нивоа фактора Б на обележје X су без битних разлика.
- Ефекти нивоа посматраних фактора А и Б су без битних разлика.

За спровођење ових тестова потребне су суме из једначина (197), (198), (199) и (200), што чини следећи корак у двофакторној ANOVA анализи:

$$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l (X_{ij} - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l (X_{ij})^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l X_{ij} \right)^2 \quad (197)$$

где је SS_T укупна сума квадрата одступања од средње вредности.

$$SS_A = l \sum_{i=1}^k (\bar{X}_{i*} - \bar{X})^2 = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^k (\bar{X}_{i*})^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l X_{ij} \right)^2 \quad (198)$$

где је SS_A сума квадрата за фактор А.

$$SS_B = k \sum_{j=1}^l (\bar{X}_{*j} - \bar{X})^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^l (\bar{X}_{*j})^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l X_{ij} \right)^2 \quad (199)$$

где је SS_B сума квадрата за фактор Б.

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B \quad (200)$$

где је SS_E сума квадрата грешке.

Поделом суме квадрата са степеном слободе добијемо варијацију MS. Варијација по факторима А, Б и грешке се одређују на следећи начин:

$$MS_A = \frac{SS_A}{k-1}, MS_B = \frac{SS_B}{l-1}, MS_E = \frac{SS_E}{(k-1)(l-1)} \quad (201)$$

Под условом да су полазне хипотезе тачне, статистике

$$F_{k-1,(k-1)(l-1)} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (202)$$

$$F_{l-1,(k-1)(l-1)} = \frac{MS_B}{MS_E}$$

имају Фишерову расподелу са степенима слободе $k - 1, (k - 1)(l - 1)$ и $l - 1, (k - 1)(l - 1)$.

Вредност F теста одређује који од посматраних фактора је значајан на посматране параметре и у којој мери. Гранична вредност F за случај нивоа поверења од 95% износи $F_{(0.05; 2, 4)} = 6,94$. Фактори чија је F вредност мања од наведене вредности нису значајни на посматрани параметар, док су они фактори чија је F вредност већа од ове вредности значајни.

Задњи корак анализе је одређивање процентуалног учешћа ρ појединачних фактора и грешке у сумама квадрата.

$$\rho_A = \frac{SS_A}{SS_T}, \rho_B = \frac{SS_B}{SS_T}, \rho_E = \frac{SS_E}{SS_T} \quad (203)$$

13.2.1 Платформа

У табелама 13-4. и 13-5. приказани су резултати ANOVA анализе статистике значајности фактора на посматрани параметар одступања од позиције кретања платформе по Z оси за сваку мерну позицију, посебно у оба смера кретања. Анализа је дала резултат да само код прве мерне позиције у негативном смеру метода кретања има значајан утицај на одступање од позиције. Код свих осталих мерних позиција, фактори нису имали значајан утицај. Грешка има највеће процентуално учешће у сумама квадрата. Изузетак чини нелинеарност код 1. мерне позиције у позитивном смеру, где оно нема значајан утицај али има највеће процентуално учешће у суми квадрата са 48%, као и код 2. мерне позиције у негативном смеру са 50%. Исто тако, изузетак је и метода кретања код 1. мерне позиције у негативном смеру где је процентуално учешће 73%. Не постоји систематска особеност појаве значајности, нити систематско процентуално учешће фактора. Због тога се може тврдити да гледајући осу у целини посматрани фактори немају значајан утицај на одступање од тачности позиционирања. Треба се напоменути да се то може случајно појавити код појединих насумичних мерних позиција са великим утицајем других, спољних, непредвиђених фактора.

Радни простор O-X *glide* механизма је такав да се при кретању по Z оси сингуларитети јављају на крајевима радног простора. Близу сингуларитета вредности коефицијента трансформације или теже ка нули или ка бесконачности. У оба случаја, управљање механизма није у могућности да изведе захтевано кретање. При извршеним експериментима 1. и 9. мерна позиција се налазе најближе сингуларитетима. То може бити разлог за појаву истакнутих вредности при мерењима.

Табела 13-4. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ платформе при кретању по Z оси од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

<i>i</i>		1.		2.		3.		4.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	14,72	17,38	27,89	3,10	51,43	28,39	84,04	61,37
	Нелинеарности	34,11	3,41	60,79	16,45	28,70	19,80	40,26	58,10
	Грешке	22,42	3,16	69,97	13,64	108,25	34,27	158,94	60,39
	Укупно	71,25	23,94	158,66	33,19	188,38	82,47	283,24	179,86
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	7,36	8,69	13,95	1,55	25,71	14,20	42,02	30,68
	Нелинеарности	17,05	1,70	30,40	8,22	14,35	9,90	20,13	29,05
	Грешке	5,61	0,79	17,49	3,41	27,06	8,57	39,73	15,10
F-тест	Методe кретања	1,31	11,01	0,80	0,46	0,95	1,66	1,06	2,03
	Нелинеарности	3,04	2,16	1,74	2,41	0,53	1,16	0,51	1,92
ρ	Методe кретања	21%	73%	18%	9%	27%	34%	30%	34%
	Нелинеарности	48%	14%	38%	50%	15%	24%	14%	32%
	Грешке	31%	13%	44%	41%	57%	42%	56%	34%

Табела 13-5. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ платформе при кретању по Z оси од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

<i>i</i>		5.		6.		7.		8.		9.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	96,70	103,28	104,26	153,92	155,40	189,81	220,85	263,84	298,86	358,34
	Нелинеарности	35,70	50,35	44,84	19,45	56,31	42,73	89,36	81,24	81,02	154,55
	Грешке	152,25	121,50	156,99	159,94	273,22	248,13	355,93	330,98	360,75	448,91
	Укупно	284,65	275,13	306,08	333,31	484,93	480,66	666,14	676,06	740,63	961,80
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	48,35	51,64	52,13	76,96	77,70	94,90	110,43	131,92	149,43	179,17
	Нелинеарности	17,85	25,17	22,42	9,72	28,15	21,36	44,68	40,62	40,51	77,27
	Грешке	38,06	30,38	39,25	39,98	68,31	62,03	88,98	82,74	90,19	112,23
F-тест	Методe кретања	1,27	1,70	1,33	1,92	1,14	1,53	1,24	1,59	1,66	1,60
	Нелинеарности	0,47	0,83	0,57	0,24	0,41	0,34	0,50	0,49	0,45	0,69
ρ	Методe кретања	34%	38%	34%	46%	32%	39%	33%	39%	40%	37%
	Нелинеарности	13%	18%	15%	6%	12%	9%	13%	12%	11%	16%
	Грешке	53%	44%	51%	48%	56%	52%	53%	49%	49%	47%

У табелама 13-6. и 13-7. приказани су резултати ANOVA анализе статистичке значајности фактора за посматрани параметар стандардне девијације при кретању платформе по Z оси за сваку мерну позицију, посебно у оба смера кретања. Анализа је дала резултат код мерних позиција 5. и 9. у негативном смеру кретања да нелинеарност има значајан утицај на стандардну девијацију. На први поглед, ово се може сматрати за насумичну појаву, као и код одступања од позиције, али се оне појављују само код негативног смера кретања платформе, што указује на могући „стварни“ утицај на целу

осу. Наспрам претходног излагања стоји чињеница да V мерна позиција припада делу радног простора, где је коефицијент трансформације ближе 1, тј. нелинеарност машине је мала. Код 5. и 9. мерне позиције у негативном смеру, аналогно значајности, процентуално учешће нелинеарности је код сваког веће од 50%. Код осталих мерних позиција процентуално учешће указује на постојање других спољних непредвиђених фактора, који повећавају грешку експеримента.

Табела 13-6. ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ платформе при кретању по Z оси од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		1.		2.		3.		4.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	0,47	0,11	0,39	0,16	0,18	0,06	0,30	0,03
	Нелинеарности	0,21	0,07	0,79	0,14	0,15	0,01	0,07	0,16
	Грешке	0,58	0,73	4,77	0,20	0,66	0,58	1,17	0,31
	Укупно	1,26	0,91	5,95	0,50	0,98	0,66	1,53	0,50
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	0,24	0,06	0,20	0,08	0,09	0,03	0,15	0,02
	Нелинеарности	0,10	0,03	0,40	0,07	0,07	0,01	0,03	0,08
	Грешке	0,14	0,18	1,19	0,05	0,17	0,15	0,29	0,08
F-тест	Методe кретања	1,64	0,31	0,16	1,62	0,53	0,22	0,51	0,20
	Нелинеарности	0,73	0,19	0,33	1,39	0,44	0,04	0,11	1,03
ρ	Методe кретања	38%	12%	7%	32%	18%	10%	20%	6%
	Нелинеарности	17%	7%	13%	28%	15%	2%	4%	32%
	Грешке	46%	80%	80%	40%	67%	89%	76%	62%

Табела 13-7. ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ платформе при кретању по Z оси од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		5.		6.		7.		8.		9.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	0,12	0,21	0,26	0,18	0,62	0,41	0,35	0,09	0,38	0,16
	Нелинеарности	0,03	0,53	0,28	0,36	0,46	0,74	0,33	0,32	0,24	0,73
	Грешке	0,16	0,12	0,61	0,68	0,81	0,28	0,79	0,44	1,51	0,20
	Укупно	0,32	0,86	1,15	1,22	1,89	1,44	1,47	0,86	2,13	1,09
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	0,06	0,11	0,13	0,09	0,31	0,21	0,18	0,05	0,19	0,08
	Нелинеарности	0,02	0,26	0,14	0,18	0,23	0,37	0,16	0,16	0,12	0,36
	Грешке	0,04	0,03	0,15	0,17	0,20	0,07	0,20	0,11	0,38	0,05
F-тест	Методe кретања	1,49	3,53	0,84	0,53	1,53	2,94	0,89	0,42	0,50	1,62
	Нелинеарности	0,39	8,67	0,90	1,07	1,13	5,26	0,83	1,46	0,32	7,31

<i>i</i>		5.		6.		7.		8.		9.	
ρ	Методe кретања	38%	25%	22%	15%	33%	29%	24%	11%	18%	15%
	Нелинеарности	10%	61%	24%	30%	24%	52%	22%	38%	11%	67%
	Грешке	52%	14%	54%	56%	43%	20%	54%	52%	71%	18%

Према позицијама у табели 13-8. приказана вредност угла нагиба спојки у равни мерења због кинематских карактеристика механизма има потенцијалних узрока на тачност механизма. Спојка која повезује платформу и клизач J_0 има угао нагиба α_{j0} , а спојка која повезује платформу и клизач J_1 има нагиб α_{j1} .

Табела 13-8. Угао нагиба спојки по мерним позицијама

Мерна позиција	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
z_p [mm]	-296,12	-286,62	-280,12	-273,12	-267,12	-260,62	-253,62	-247,62	-241,12
α_{j1} [°]	62,5	58,3	55,6	53,0	50,8	48,6	46,3	44,5	42,5
α_{j0} [°]	112,4	115,8	117,9	120	121,7	123,5	125,3	126,8	128,4

ANOVA анализом свих осталих посматраних параметара констатовано је да не постоји значајан утицај на резултате. Код средње вредности распона, одступања ($\bar{B}$) вредност F теста је била веома близу дефинисане граничне вредности. Метода кретања је имала највеће процентуално учешће на поменути параметар. Код систематских грешака позиционирања ($E\uparrow$, $E\downarrow$, E , M , $A\uparrow$, $A\downarrow$ и A) процентуално учешће методе кретања је много већи у односу на процентуално учешће нелинеарности, а код неких веће је и од грешке. Ово указује на то да је претежни утицај имала метода кретања на добијене резултате, али оне нису биле значајне.

Табела 13-9. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230:2-2014 при кретању платформе по Z оси, исказан кроз утицај фактора на резултате

		<i>B</i>	$\bar{B}$	$R\uparrow$	$R\downarrow$	<i>R</i>	$E\uparrow$	$E\downarrow$	<i>E</i>	<i>M</i>	$A\uparrow$	$A\downarrow$	<i>A</i>
SS	Методe кретања	5,73	13,16	5,63	1,55	6,11	223,68	401,50	298,49	302,43	250,92	421,57	315,21
	Нелинеарности	18,94	3,05	7,44	4,40	4,12	62,25	187,32	137,05	111,54	40,96	136,46	92,15
	Грешке	22,65	4,13	69,01	5,33	53,06	218,76	401,25	288,37	301,40	158,47	413,98	243,93
	Укупно	47,32	20,34	82,09	11,27	63,29	504,68	990,06	723,92	715,37	450,35	972,01	651,29
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	2,86	6,58	2,82	0,77	3,06	111,84	200,75	149,25	151,22	125,46	210,78	157,61
	Нелинеарности	9,47	1,52	3,72	2,20	2,06	31,12	93,66	68,53	55,77	20,48	68,23	46,07
	Грешке	5,66	1,03	17,25	1,33	13,26	54,69	100,31	72,09	75,35	39,62	103,49	60,98
F-тест	Методe кретања	0,51	6,38	0,16	0,58	0,23	2,04	2,00	2,07	2,01	3,17	2,04	2,58
	Нелинеарности	1,67	1,48	0,22	1,65	0,16	0,57	0,93	0,95	0,74	0,52	0,66	0,76
ρ	Методe кретања	12%	65%	7%	14%	10%	44%	41%	41%	42%	56%	43%	48%
	Нелинеарности	40%	15%	9%	39%	7%	12%	19%	19%	16%	9%	14%	14%
	Грешке	48%	20%	84%	47%	84%	43%	41%	40%	42%	35%	43%	37%

ANOVA анализа је доказала да управљани фактори нису имали значајан утицај на параметре који су повезани са препоруком VDI/DGQ 3441, са коментаром да је вредност F теста код параметра $\bar{U}$ била блиска дефинисаној граничној вредности. Највеће

процентуално учешће има метода кретања, која је 65%, што значи да највећим делом метода кретања је имала највећи утицај на експеримент. Најмањи утицај је имала нелинеарност кинематике. Вредности F теста се налазе у табели 13-10. Код распона одступања позиционирања (P), највеће процентуално учешће је имала метода кретања.

Табела 13-10. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 при кретању платформе по Z осе, исказан кроз утицај фактора на резултате

		P _{Smax}	P	$\bar{U}$
SS	Метода кретања	1,56	323,53	13,16
	Нелинеарности	1,42	82,21	3,05
	Грешке	53,43	245,58	4,13
	Укупно	56,40	651,33	20,34
Укупан степен слободе		8	8	8
Степен слободе	Метода кретања	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2
	Грешке	4	4	4
Варијација	Метода кретања	0,78	161,77	6,58
	Нелинеарности	0,71	41,11	1,52
	Грешке	13,36	61,39	1,03
F-тест	Метода кретања	0,06	2,63	6,38
	Нелинеарности	0,05	0,67	1,48
ρ	Метода кретања	3%	50%	65%
	Нелинеарности	3%	13%	15%
	Грешке	95%	38%	20%

13.2.2 Клизач J₀

У табелама 13-11., 13-12. и 13-13. приказани су резултати ANOVA анализе статистичке значајности фактора на посматрани параметар одступања од позиције за клизач J₀ за сваку мерну позицију, посебно у оба смера кретања. На основу резултата анализе, може се закључити да само код 1. мерне позиције у негативном смеру метода кретања има значајан утицај на одступање. У истој мерној позицији процентуално учешће методе кретања је највеће у сумама квадрата. На свим осталим мерним позицијама утицај испитиваних фактора није био статистички значајан. Код осталих мерних позиција за оба смера расподела процентуалног учешћа сума квадрата је равномерна, оба фактора и грешка се приближно у истој мери јавља.

Табела 13-11. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_0 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		1.		2.		3.		4.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	87,04	102,75	3945,70	7653,36	6625,45	10017,97	8313,34	10657,26
	Нелинеарности	201,71	20,16	3552,74	6960,91	7997,77	11106,66	10777,97	10221,79
	Грешке	132,59	18,67	5211,17	8256,59	8730,19	11521,39	11033,79	12695,56
	Укупно	421,33	141,58	12709,60	22870,87	23353,41	32646,02	30125,10	33574,61
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	43,52	51,38	1972,85	3826,68	3312,73	5008,99	4156,67	5328,63
	Нелинеарности	100,85	10,08	1776,37	3480,46	3998,88	5553,33	5388,99	5110,90
	Грешке	33,15	4,67	1302,79	2064,15	2182,55	2880,35	2758,45	3173,89
F-тест	Методe кретања	1,31	11,01	1,51	1,85	1,52	1,74	1,51	1,68
	Нелинеарности	3,04	2,16	1,36	1,69	1,83	1,93	1,95	1,61
ρ	Методe кретања	21%	73%	31%	33%	28%	31%	28%	32%
	Нелинеарности	48%	14%	28%	30%	34%	34%	36%	30%
	Грешке	31%	13%	41%	36%	37%	35%	37%	38%

Табела 13-12. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_0 од 5. до 7. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		5.		6.		7.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	9210,10	11545,18	9589,75	11685,94	8768,13	10652,60
	Нелинеарности	12178,20	12056,71	12550,35	13214,09	12419,32	13692,67
	Грешке	12387,93	13405,90	13008,95	14681,63	12435,80	13961,06
	Укупно	33776,23	37007,80	35149,04	39581,66	33623,24	38306,33
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	4605,05	5772,59	4794,87	5842,97	4384,06	5326,30
	Нелинеарности	6089,10	6028,36	6275,18	6607,04	6209,66	6846,34
	Грешке	3096,98	3351,48	3252,24	3670,41	3108,95	3490,26
F-тест	Методe кретања	1,49	1,72	1,47	1,59	1,41	1,53
	Нелинеарности	1,97	1,80	1,93	1,80	2,00	1,96
ρ	Методe кретања	27%	31%	27%	30%	26%	28%
	Нелинеарности	36%	33%	36%	33%	37%	36%
	Грешке	37%	36%	37%	37%	37%	36%

Табела 13-13. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_0 од 8. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		8.		9.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	8234,56	9843,88	7650,21	8417,19
	Нелинеарности	12728,60	14210,34	12339,19	13918,25
	Грешке	12191,98	13515,98	11655,34	12371,70
	Укупно	33155,14	37570,20	31644,73	34707,14
Укупан степен слободе		8	8	8	8
Степен слободе	Методe кретања	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	4117,28	4921,94	3825,10	4208,59
	Нелинеарности	6364,30	7105,17	6169,59	6959,13
	Грешке	3047,99	3379,00	2913,84	3092,93
F-тест	Методe кретања	1,35	1,46	1,31	1,36
	Нелинеарности	2,09	2,10	2,12	2,25
ρ	Методe кретања	25%	26%	24%	24%
	Нелинеарности	38%	38%	39%	40%
	Грешке	37%	36%	37%	36%

У табелама 13-14. и 13-15. приказани су резултати ANOVA анализе статистичке значајности фактора посматраног параметра стандардне девијације за клизач J_0 у свакој мерној позицији, посебно у оба смера кретања. Анализа је дала резултат код мерних позиција 5. и 7. у негативном смеру кретања да нелинеарност има значајан утицај на стандардну девијацију. Код истих ових позиција, процентуално учешће нелинеарности је највеће. Код 9. мерне позиције, резултат F теста је близу граничне вредности, а код свих осталих мерних позиција не постоји значајан утицај фактора, грешка има највеће процентуално учешће. Ова појава је слична појавама код претходно посматраног кретања платформе по Z оси.

Табела 13-14. ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_0 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		1.		2.		3.		4.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	2,79	0,67	3,14	0,20	0,33	0,05	0,39	0,08
	Нелинеарности	1,24	0,40	3,22	0,06	0,10	0,49	0,29	0,16
	Грешке	3,41	4,29	17,52	0,65	1,10	1,31	1,77	0,50
	Укупно	7,44	5,36	23,89	0,91	1,53	1,85	2,45	0,74
Укупан степен слободе		8	8	8	8	8	8	8	8

<i>i</i>		1.		2.		3.		4.	
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	1,40	0,33	1,57	0,10	0,17	0,02	0,20	0,04
	Нелинеарности	0,62	0,20	1,61	0,03	0,05	0,25	0,14	0,08
	Грешке	0,85	1,07	4,38	0,16	0,27	0,33	0,44	0,13
F-тест	Методe кретања	1,64	0,31	0,36	0,61	0,60	0,07	0,44	0,31
	Нелинеарности	0,73	0,19	0,37	0,17	0,19	0,75	0,32	0,63
ρ	Методe кретања	38%	12%	13%	22%	22%	2%	16%	11%
	Нелинеарности	17%	7%	13%	6%	7%	27%	12%	21%
	Грешке	46%	80%	73%	72%	72%	71%	72%	68%

Табела 13-15. ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_0 од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

<i>i</i>		5.		6.		7.		8.		9.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	0,16	0,24	0,31	0,20	0,73	0,43	0,35	0,07	0,34	0,11
	Нелинеарности	0,04	0,57	0,72	0,67	0,44	1,18	0,44	0,64	0,16	0,68
	Грешке	0,23	0,15	0,95	1,34	0,87	0,23	0,92	0,92	1,65	0,20
	Укупно	0,43	0,95	1,98	2,21	2,04	1,84	1,71	1,64	2,15	0,99
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	0,08	0,12	0,15	0,10	0,37	0,22	0,18	0,03	0,17	0,06
	Нелинеарности	0,02	0,29	0,36	0,33	0,22	0,59	0,22	0,32	0,08	0,34
	Грешке	0,06	0,04	0,24	0,34	0,22	0,06	0,23	0,23	0,41	0,05
F-тест	Методe кретања	1,35	3,24	0,64	0,30	1,68	3,73	0,76	0,15	0,41	1,08
	Нелинеарности	0,33	7,77	1,52	0,99	1,01	10,19	0,94	1,39	0,20	6,66
ρ	Методe кретања	37%	25%	15%	9%	36%	23%	21%	4%	16%	11%
	Нелинеарности	9%	60%	37%	30%	21%	64%	25%	39%	8%	68%
	Грешке	54%	15%	48%	61%	43%	13%	54%	56%	77%	21%

ANOVA анализа преосталих посматраних параметара показала је да посматрани фактори немају значајан утицај. Међутим, метода кретања је показала значајан утицај на раније поменути параметар. Код систематских грешака позиционирања ($E\uparrow$, $E\downarrow$, E , M , $A\uparrow$, $A\downarrow$ и A), процентуално учешће методе кретања је много веће у односу на

процентуално учешће нелинеарности, а код неких ово учешће је веће и од грешке. Ово указује на то да је претежни утицај имала метода кретања на добијене резултате, али оне нису биле значајне.

Фактори нелинеарности кинематике и метода кретања код клизача J_0 немају значајан утицај на остале посматране параметре. Из табела 13-16. и 13-17. може се закључити да су све вредности F теста испод границе статистичке значајности, а и процентуално учешће грешке код случајних параметара ($B, \bar{B}, R \uparrow, R \downarrow$ и R) је највеће, док код систематских показатеља нелинеарност има највеће процентуално учешће.

Табела 13-16. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_0 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 1. део

		B	$\bar{B}$	$R \uparrow$	$R \downarrow$	R	$E \uparrow$	$E \downarrow$	E
SS	Метод кретања	468,85	144,50	21,50	0,68	456,10	9311,43	9638,00	10173,82
	Нелинеарности	440,17	59,73	50,32	1,35	261,57	13737,03	14988,22	15360,42
	Грешке	298,20	80,41	279,08	35,92	432,93	11574,85	11980,10	12249,95
	Укупно	1207,22	284,64	350,90	37,94	1150,60	34623,31	36606,32	37784,18
Укупан степен слободe		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободe	Метод кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Метод кретања	234,42	72,25	10,75	0,34	228,05	4655,72	4819,00	5086,91
	Нелинеарности	220,08	29,86	25,16	0,67	130,78	6868,52	7494,11	7680,21
	Грешке	74,55	20,10	69,77	8,98	108,23	2893,71	2995,02	3062,49
F-тест	Метод кретања	3,14	3,59	0,15	0,04	2,11	1,61	1,61	1,66
	Нелинеарности	2,95	1,49	0,36	0,07	1,21	2,37	2,50	2,51
ρ	Метод кретања	39%	51%	6%	2%	40%	27%	26%	27%
	Нелинеарности	36%	21%	14%	4%	23%	40%	41%	41%
	Грешке	25%	28%	80%	95%	38%	33%	33%	32%

Табела 13-17. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_0 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 2. део

		M	$A \uparrow$	$A \downarrow$	A
SS	Метод кретања	9449,69	8543,22	9268,81	9437,69
	Нелинеарности	14306,69	13408,42	14428,58	14902,62
	Грешке	11747,20	11074,90	12067,20	11840,48
	Укупно	35503,58	33026,55	35764,59	36180,79
Укупан степен слободe		8	8	8	8
Степен слободe	Метод кретања	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4

		M	A↑	A↓	A
Варијација	Методe кретања	4724,85	4271,61	4634,40	4718,85
	Нелинеарности	7153,34	6704,21	7214,29	7451,31
	Грешке	2936,80	2768,73	3016,80	2960,12
F-тест	Методe кретања	1,61	1,54	1,54	1,59
	Нелинеарности	2,44	2,42	2,39	2,52
ρ	Методe кретања	27%	26%	26%	26%
	Нелинеарности	40%	41%	40%	41%
	Грешке	33%	34%	34%	33%

На параметре, из препоруке VDI/DGQ 3441, нису имали значајан утицај управљани фактори. О томе сведоче вредности F теста у табели 13-18. За $\bar{U}$ метода кретања има највеће процентуално учешће, за параметар P процентуално учешће нелинеарности је највеће, а за P_{Smax} грешка има највеће учешће у експерименту, што значи да при овим експерименталним поставкама постоје други непознати спољни фактори, који имају већи утицај него од оних који су разматрани.

Табела 13-18. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 за клизач J_0 , исказан кроз утицај фактора на резултате

		P_{Smax}	P	$\bar{U}$
SS	Методe кретања	5,39	9278,13	144,50
	Нелинеарности	13,62	14689,43	59,73
	Грешке	198,09	11922,69	80,41
	Укупно	217,10	35890,25	284,64
Укупан степен слободe		8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2
	Грешке	4	4	4
Варијација	Методe кретања	2,70	4639,06	72,25
	Нелинеарности	6,81	7344,72	29,86
	Грешке	49,52	2980,67	20,10
F-тест	Методe кретања	0,05	1,56	3,59
	Нелинеарности	0,14	2,46	1,49
ρ	Методe кретања	2%	26%	51%
	Нелинеарности	6%	41%	21%
	Грешке	91%	33%	28%

13.2.3 Клизач J_1

У табелама 13-19, 13-20, 13-21. приказани су резултати ANOVA анализе статистичке значајности фактора на посматрани параметар одступање од позиције за клизач J_1 за сваку мерну позицију, посебно у оба смера кретања. На основу резултата анализе, може се закључити да ниједан од управљаних фактора нема значајан утицај на посматране параметре. Ово значи да на резултате извршеног експеримента спољни фактори, који нису узети у обзир, имају много већег утицаја на одступање од позиције него што су то метода кретања или нелинеарност кинематике.

Табела 13-19. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_1 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		1.		2.		3.		4.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Метод кретања	1750,55	4938,25	9489,97	14783,17	11838,94	15841,36	12356,29	12640,32
	Нелинеарности	2402,79	4027,58	10719,75	14440,36	14210,09	18438,76	14758,63	15510,64
	Грешке	2956,90	7907,18	19927,39	29476,21	26437,55	33955,34	26948,08	29114,57
	Укупно	7110,24	16873,01	40137,10	58699,74	52486,57	68235,46	54063,00	57265,53
Укупан степен слободе		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободе	Метод кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Метод кретања	875,28	2469,13	4744,98	7391,59	5919,47	7920,68	6178,14	6320,16
	Нелинеарности	1201,40	2013,79	5359,87	7220,18	7105,04	9219,38	7379,32	7755,32
	Грешке	739,22	1976,80	4981,85	7369,05	6609,39	8488,84	6737,02	7278,64
F-тест	Метод кретања	1,18	1,25	0,95	1,00	0,90	0,93	0,92	0,87
	Нелинеарности	1,63	1,02	1,08	0,98	1,07	1,09	1,10	1,07
ρ	Метод кретања	25%	29%	24%	25%	23%	23%	23%	22%
	Нелинеарности	34%	24%	27%	25%	27%	27%	27%	27%
	Грешке	42%	47%	50%	50%	50%	50%	50%	51%

Табела 13-20. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_1 од 5. до 7. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		5.		6.		7.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Метод кретања	10898,22	10295,42	9006,79	8205,39	6117,98	6024,52
	Нелинеарности	12983,90	14051,69	10732,02	10949,83	7789,26	8509,66
	Грешке	23969,72	25724,72	19537,54	21467,04	14376,99	15815,09
	Укупно	47851,84	50071,83	39276,35	40622,26	28284,23	30349,28
Укупан степен слободе		8	8	8	8	8	8
Степен слободе	Метод кретања	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4

<i>i</i>		5.		6.		7.	
Варијација	Методe кретања	5449,11	5147,71	4503,40	4102,69	3058,99	3012,26
	Нелинеарности	6491,95	7025,85	5366,01	5474,92	3894,63	4254,83
	Грешке	5992,43	6431,18	4884,39	5366,76	3594,25	3953,77
F-тест	Методe кретања	0,91	0,80	0,92	0,76	0,85	0,76
	Нелинеарности	1,08	1,09	1,10	1,02	1,08	1,08
ρ	Методe кретања	23%	21%	23%	20%	22%	20%
	Нелинеарности	27%	28%	27%	27%	28%	28%
	Грешке	50%	51%	50%	53%	51%	52%

Табела 13-21. ANOVA анализа параметра „одступање од позиције“ клизача J_1 од 8. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

<i>i</i>		8.		9.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓
SS	Методe кретања	4056,50	3959,17	2439,59	2216,78
	Нелинеарности	5856,85	6356,04	3813,34	4224,10
	Грешке	10506,85	11567,80	6894,01	7441,08
	Укупно	20420,19	21883,01	13146,95	13881,95
Укупан степен слободе		8	8	8	8
Степен слободе	Методe кретања	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	2028,25	1979,58	1219,79	1108,39
	Нелинеарности	2928,42	3178,02	1906,67	2112,05
	Грешке	2626,71	2891,95	1723,50	1860,27
F-тест	Методe кретања	0,77	0,68	0,71	0,60
	Нелинеарности	1,11	1,10	1,11	1,14
ρ	Методe кретања	20%	18%	19%	16%
	Нелинеарности	29%	29%	29%	30%
	Грешке	51%	53%	52%	54%

Стандардна девијација вредности тачности позиционирања када се трансформише са Z осе на J_1 клизач, по представљеним експерименталним поставкама, понаша се на сличан начин као и код клизача J_0 . Код свих мерних позиција управљани фактори уопште немају значајан утицај на добијене резултате. Ипак, на резултате експеримента у мерним позицијама 5., 7. и 9. у негативном смеру кретања резултати F теста за нелинеарност су били веома близу граничне вредности. Процентуално учешће метода кретања је много веће у односу на грешку и нелинеарност кинематике код мерне позиције бр. 1. у позитивно смеру, 2. у негативном смеру, 5. у позитивном смеру и 7. у позитивном смеру.

У свим осталим мерним позицијама и смеровима кретања управљани фактори нису имали значајан утицај на стандардну девијацију.

Табела 13-22. ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_1 од 1. до 4. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		1.		2.		3.		4.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Метод кретања	2,06	0,50	1,02	0,76	0,92	0,56	0,81	0,10
	Нелинеарности	0,43	0,69	3,13	0,29	0,50	0,35	0,03	0,22
	Грешке	1,65	2,86	10,81	0,55	1,06	1,95	1,74	0,48
	Укупно	4,13	4,06	14,96	1,59	2,48	2,86	2,58	0,80
Укупан степен слободе		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободе	Метод кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Метод кретања	1,03	0,25	0,51	0,38	0,46	0,28	0,41	0,05
	Нелинеарности	0,21	0,35	1,57	0,14	0,25	0,18	0,01	0,11
	Грешке	0,41	0,72	2,70	0,14	0,26	0,49	0,44	0,12
F-тест	Метод кретања	2,49	0,35	0,19	2,79	1,74	0,57	0,94	0,41
	Нелинеарности	0,52	0,48	0,58	1,05	0,94	0,36	0,03	0,95
ρ	Метод кретања	50%	12%	7%	48%	37%	19%	32%	12%
	Нелинеарности	10%	17%	21%	18%	20%	12%	1%	28%
	Грешке	40%	71%	72%	34%	43%	68%	67%	60%

Табела 13-23. ANOVA анализа параметра „стандардна девијација“ клизача J_1 од 5. до 9. мерне позиције, исказан кроз утицај фактора на резултате

i		5.		6.		7.		8.		9.	
Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
SS	Метод кретања	0,37	0,46	0,54	0,39	0,89	0,53	0,41	0,16	0,36	0,17
	Нелинеарности	0,02	0,67	0,20	0,28	0,38	0,67	0,25	0,20	0,18	0,55
	Грешке	0,18	0,24	0,84	1,02	0,79	0,26	0,74	0,44	1,22	0,16
	Укупно	0,57	1,37	1,57	1,69	2,06	1,46	1,39	0,80	1,76	0,88
Укупан степен слободе		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободе	Метод кретања	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Метод кретања	0,19	0,23	0,27	0,20	0,44	0,27	0,20	0,08	0,18	0,08
	Нелинеарности	0,01	0,34	0,10	0,14	0,19	0,33	0,12	0,10	0,09	0,28
	Грешке	0,05	0,06	0,21	0,25	0,20	0,07	0,18	0,11	0,31	0,04

<i>i</i>		5.		6.		7.		8.		9.	
F-тест	Методe кретања	4,09	3,73	1,29	0,77	2,24	4,06	1,11	0,70	0,59	2,11
	Нелинеарности	0,22	5,51	0,47	0,55	0,96	5,09	0,67	0,91	0,29	6,92
ρ	Методe кретања	65%	33%	34%	23%	43%	36%	29%	19%	21%	19%
	Нелинеарности	4%	49%	12%	16%	19%	46%	18%	25%	10%	63%
	Грешке	32%	18%	53%	60%	38%	18%	53%	55%	69%	18%

Слично клизачу J_0 и кретању платформе по Z осе, утицај управљаних фактора на посматране параметре повезане са клизачем J_1 није био значајан. Процентуално учешће по факторима је занемарљиво у односу на грешку. Ово значи да код сваке експерименталне поставке постоје неконтролисани спољни фактори, који имају много већег утицаја него што су то изабрани управљани фактори. О томе сведоче подаци који се могу видети у табелама 13-22. и 13-23.

Табела 13-24. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_1 , исказан кроз утицај фактора на резултате – 1. део

		<i>B</i>	$\bar{B}$	$R\uparrow$	$R\downarrow$	<i>R</i>	$E\uparrow$	$E\downarrow$	<i>E</i>
SS	Методe кретања	634,70	55,55	6,94	2,25	731,66	819,34	89,38	1104,60
	Нелинеарности	311,49	55,27	46,92	3,95	412,77	1279,77	845,60	1898,84
	Грешке	1025,02	193,53	150,61	25,46	980,09	3463,14	1368,62	4849,66
	Укупно	1971,21	304,35	204,47	31,66	2124,52	5562,25	2303,59	7853,11
Укупан степен слободе		8	8	8	8	8	8	8	8
Степен слободе	Методe кретања	2	2	2	2	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	317,35	27,77	3,47	1,12	365,83	409,67	44,69	552,30
	Нелинеарности	155,74	27,64	23,46	1,98	206,39	639,88	422,80	949,42
	Грешке	256,26	48,38	37,65	6,37	245,02	865,78	342,15	1212,42
F-тест	Методe кретања	1,24	0,57	0,09	0,18	1,49	0,47	0,13	0,46
	Нелинеарности	0,61	0,57	0,62	0,31	0,84	0,74	1,24	0,78
ρ	Методe кретања	32%	18%	3%	7%	34%	15%	4%	14%
	Нелинеарности	16%	18%	23%	12%	19%	23%	37%	24%
	Грешке	52%	64%	74%	80%	46%	62%	59%	62%

Табела 13-25. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J₁, исказан кроз утицај фактора на резултате – 2. део

		M	A↑	A↓	A
SS	Методe кретања	301,49	1050,37	126,46	1266,20
	Нелинеарности	1115,13	1191,37	884,80	1767,19
	Грешке	2308,78	3358,80	1525,16	4787,28
	Укупно	3725,39	5600,54	2536,42	7820,67
Укупан степен слободe		8	8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2	2
	Грешке	4	4	4	4
Варијација	Методe кретања	150,74	525,18	63,23	633,10
	Нелинеарности	557,56	595,69	442,40	883,60
	Грешке	577,19	839,70	381,29	1196,82
F-тест	Методe кретања	0,26	0,63	0,17	0,53
	Нелинеарности	0,97	0,71	1,16	0,74
ρ	Методe кретања	8%	19%	5%	16%
	Нелинеарности	30%	21%	35%	23%
	Грешке	62%	60%	60%	61%

Слично параметрима повезаних са ISO 230-2:2014, параметри, које смо посматрали повезано са VDI/DGQ 3441 препоруком, показују инертну природу према управљаним факторима. Ови фактори немају значајан утицај ни на један параметар, а и процентуално учешће појединачних параметара је много мање него је код грешке. Из тога се може закључити да неконтролисани параметри у облику грешке имају значајан утицај на резултате експеримента.

Табела 13-26. ANOVA анализа осталих параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 за клизач J₁, исказан кроз утицај фактора на резултате

		P _{Smax}	P	U
SS	Методe кретања	3,30	1357,18	55,55
	Нелинеарности	26,69	1843,75	55,27
	Грешке	107,34	4999,60	193,53
	Укупно	137,34	8200,54	304,35
Укупан степен слободe		8	8	8
Степен слободe	Методe кретања	2	2	2
	Нелинеарности	2	2	2
	Грешке	4	4	4
Варијација	Методe кретања	1,65	678,59	27,77
	Нелинеарности	13,35	921,88	27,64
	Грешке	26,84	1249,90	48,38

		P_{Smax}	P	$\bar{U}$
F-тест	Методе кретања	0,06	0,54	0,57
	Нелинеарности	0,50	0,74	0,57
ρ	Методе кретања	2%	17%	18%
	Нелинеарности	19%	22%	18%
	Грешке	78%	61%	64%

13.3 Линеарна оса хибридног механизма

Према кинематским једначинама (120), (140) и (141), грешка која се јавља током кретања по X оси се подудара се са грешком која се јавља код клизача појединачно, слично као код МАЛК са серијским механизмима. Због овог се може X оса звати линеарном. Пошто два клизача раде синхроно на истим брзинама да би се остварило одговарајуће праволинијско кретање по X оси, постоје индикације да однос вредности параметара појединачних клизача на основу трансформисаних мерења за кретање по Z оси и параметара добијених из кретања по X оси су у директној вези са грешком синхроног рада два мотора.

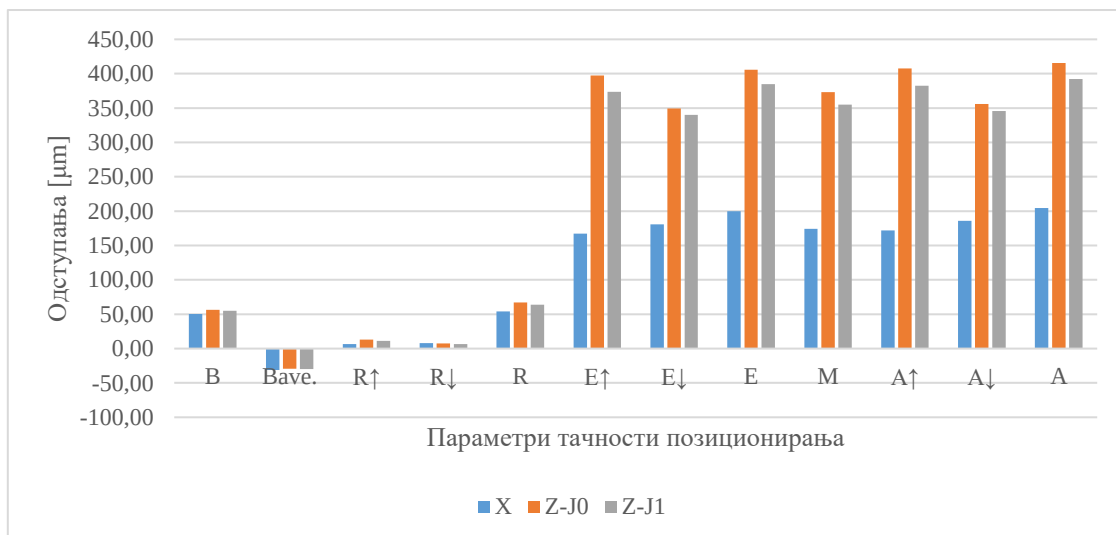
Поред линеарне особине, X оса личи и на МА са редундантном осом. Редундантност значи да при одређивању тачних координата платформе постоји вишак информација на основу којих се врши израчунавање. Према кинематским једначинама, O-X *glide* механизам није редундантан. Код једне, у литератури, описане комплексне редундантне МА [153], намењене за процес обраде сечења жицом са 6 степена слободе, стварни потребан број степена слободе је 4, па су два вишка степена слободе редундантна.

Према [154], редундантноста побољшава параметре тачности позиционирања МА са хибридним механизмом. Посматрали су случај где су на једну Стјуартову платформу (*eng.* Stewart platform) X осу додали један мотор која помаже кретање X осе и тако створили један хибридни механизам са редундантном осом. Резултати су показали да тачност позиционирања по X оси када су укључили редундантну осу се у великој мери побољшало.

Редундантна оса отежава калибрисање МА због појава механичких напона у структури [155]. Позитивна особина редундантних оса је та да код МАНК може да смањи или у неким случајевима да отклони сингуларитете [156].

Резултати тачности позиционирања X осе O-X *glide* механизма указују на сличност са претходним тврдњама о побољшању параметара тачности позиционирања увођењем редундантне осе [154].

На слици 13-31. приказани су упоредо параметри тачности позиционирања према стандарду ISO 230-2:2014. Упоређују се подаци по X оси, по клизачу J_1 и клизачу J_0 . Параметри повезани са клизачима имају много веће вредности у односу на померај по X оси, што је логично и нормално за ову врсту механизма због коефицијента трансформације K_1 и K_2 .



Слика 13-31. Упоредба параметара тачности позиционирања између X осе и клизаче J_0 и J_1

14. поглавље

Мерна несигурност тачности позиционирања O-X *glide* механизма

У поглављу 5 докторске дисертације је расправљано о теорији несигурности извршених мерења. У овом делу се приказују резултати на основу релевантних улазних података за мерну несигурност. Посебно су исказане вредности мерне несигурности по осам, по клизачима, по методама кретања и по експерименталним поставкама.

Постоје системски фактори утицаја на мерну несигурност, који су заједнички за све осе и експерименталне поставке. Њихов узрок су параметри елемената мерне опреме, поставка експеримента и распоред елемената мерне опреме, коефицијента топлотног ширења, материјал машине, итд. У табели 14-1. снаведене су вредности фактора који су потребни за одређивање несигурности, а да су исти за сваку осу.

Табела 14-1. Непроменљиви фактори за одређивање различитих несигурности мерења

Фактор	Вредност
$a_{accuracy}^+ - a_{accuracy}^-$ [ppm]	3,2
$a_{wavelength}^+ - a_{wavelength}^-$ [ppm]	0,04
r [μm]	0,01
$\Delta_{misalignment}$ [mm]	1
α [$\mu\text{m}/\text{mm}^\circ\text{C}$]	0,012
$a_{\theta}^+ - a_{\theta}^-$ [$^\circ\text{C}$]	0,7
$u(\alpha)$ [$\mu\text{m}/\text{mm}^\circ\text{C}$]	0,0006
O_{ABBE} [mm]	50
D_{angle} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	50

Вредност горње и доње границе скале тачности инструмента, горње и доње границе скале стабилности таласне дужине и резолуција инструмента је узета из документације ласера добијене од произвођача.

Паралелност постављања инструментације ($\Delta_{misalignment}$) је одабрана према инструкцијама произвођача опреме за прецизну монтажу ласерске главе.

Коефицијент топлотног ширења је узет за челик према [93], пошто су вођице O-X *glide* механизма од тог материјала.

Мерни опсег сензора температуре је узет из званичног документа произвођача опреме.

Вредност померања услед Абеове грешке и одступања таласања и/или скретања су узети на основу препорука ISO 230-2:2014 у случају да не постоје мерења, која су то

посебно одредила, што је и случај код извршених експеримената који се приказују у овој докторској дисертацији.

Број циклуса мерења код X осе по методама кретања линеарна и клатно је 5, а код свих осталих мерења и сваке осе број циклуса је 6.

14.1 Мерна несигурност тачности позиционирања X осе

На мерну несигурност утиче дужина мерења, као што је то објашњено у поглављу 5 докторске дисертације. Код X осе она износи 183 mm.

Осим тога и температура машине такође утиче на мерну несигурност. Конкретне вредности по мерним позицијама су представљене у табели 12-4.

На основу свих фактора израчунате су вредности мерне несигурности и представљене су у табели 14-2. за X осу по методама кретања.

Табела 14-2. Вредности мерне несигурности у једној позицији по врстама несигурности за X осу

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u_d [\mu\text{m}]$	0,18	0,18	0,18
$u_m [\mu\text{m}]$	0,79	0,79	0,79
$u_{M,MT} [\mu\text{m}]$	0,44	0,44	0,44
$u_{M,D} [\mu\text{m}]$	0,00	0,00	0,00
$u_{E,MT} [\mu\text{m}]$	1,92	2,11	2,04
$u_{E,D} [\mu\text{m}]$	0,00	0,00	0,00
$u_T [\mu\text{m}]$	1,97	2,15	2,09
$u_{EVE} [\mu\text{m}]$	0,48	0,48	0,20
$u_S [\mu\text{m}]$	1,02	1,02	1,02
$u_P [\mu\text{m}]$	2,41	2,56	2,47

У табели 14-3. су приказане вредности мерне несигурности појединих параметара тачности позиционирања.

Табела 14-3. Вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања по врстама несигурности за X осу

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u(R\uparrow, \downarrow) [\mu\text{m}]$	0,96	0,86	0,41
$U(R\uparrow, \downarrow) [\mu\text{m}]$	1,92	1,71	0,82
$u(B) [\mu\text{m}]$	2,09	2,08	2,05
$U(B) [\mu\text{m}]$	4,17	4,16	4,10
$u(R) [\mu\text{m}]$	2,30	2,25	2,09
$U(R) [\mu\text{m}]$	4,59	4,50	4,18
$u(M, E, E\uparrow, E\downarrow) [\mu\text{m}]$	2,37	2,53	2,46
$U(M, E, E\uparrow, E\downarrow) [\mu\text{m}]$	4,75	5,05	4,93
$u(A, A\uparrow, A\downarrow) [\mu\text{m}]$	2,56	2,67	2,50
$U(A, A\uparrow, A\downarrow) [\mu\text{m}]$	5,12	5,33	5,00

Према поглављу 5 докторске дисертације потребно је извршити корекције вредности стандардне девијације и поновљивости мерења. Кориговане вредности за линеарну методу кретања се налазе у табели 14-4., а за остале методе табеле се могу пронаћи у прилогу В докторске дисертације.

Табела 14-4. Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости код X осе за линеарну методу кретања

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i,corr., \uparrow \downarrow} [\mu m]$	1,56	1,77	1,16	0,40	1,37	1,91	1,16	1,54	0,61	0,31	0,18	0,53	0,81	0,85
$R_{i,corr., \uparrow \downarrow} [\mu m]$	6,26	7,07	4,64	1,62	5,49	7,62	4,64	6,18	2,42	1,23	0,74	2,11	3,23	3,40
$R_{i,corr.} [\mu m]$	25,63		11,80		48,22		50,27		24,46		33,92		53,75	
$R_{corr., \uparrow} [\mu m]$	6,26													
$R_{corr., \downarrow} [\mu m]$	7,62													
$R_{corr.} [\mu m]$	7,62													

Корекције нису биле могуће у свим мерним позицијама пошто је несигурност изазвана променама у околини била већа од стандардне девијације. У том случају, вредност испод корена према једначинама (88) и (89) постаје негативна и вредност стандардне девијације постане комплексан број. Због тога на свим местима, где се појавио исти проблем, узете су оригиналне вредности $s_{i, \uparrow \downarrow}$. Ова појава се јавила нпр. код 5. мерне позиције у негативном смеру кретања за линеарну методу кретања.

14.2 Мерна несигурност тачности позиционирања Y осе

Дужина мерења је 375 mm.

Температура машине је узета из табеле 12-12.

На основу свих претходно предвиђених фактора, израчунате су мерне несигурности повезаних са провером тачности позиционирања Y осе. Резултати су представљени у табелама 14-5. и 14-6. за сваку методу кретања посебно.

Табела 14-5. Вредности мерне несигурности у једној позицији по врстама несигурности за Y осу

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u_d [\mu\text{m}]$	0,37	0,37	0,37
$u_m [\mu\text{m}]$	0,38	0,38	0,38
$u_{M, MT} [\mu\text{m}]$	0,91	0,91	0,91
$u_{M, D} [\mu\text{m}]$	0,00	0,00	0,00
$u_{E, MT} [\mu\text{m}]$	4,88	4,01	4,93
$u_{E, D} [\mu\text{m}]$	0,00	0,00	0,00
$u_T [\mu\text{m}]$	4,97	4,11	5,01
$u_{EVE} [\mu\text{m}]$	3,77	3,77	3,77
$u_S [\mu\text{m}]$	1,02	1,02	1,02
$u_P [\mu\text{m}]$	6,34	5,69	6,38

Табела 14-6. Вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања по врстама несигурности за Y осу

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	6,75	6,75	6,75
$U(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	13,50	13,50	13,50
$u(B) [\mu m]$	3,70	3,70	3,70
$U(B) [\mu m]$	7,39	7,39	7,39
$u(R) [\mu m]$	7,69	7,69	7,69
$U(R) [\mu m]$	15,39	15,39	15,39
$u(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	5,33	4,54	5,37
$U(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	10,65	9,07	10,73
$u(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	8,60	8,13	8,62
$U(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	17,20	16,26	17,25

Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости тачности позиционирања се налазе у табели 14-7. за методу кретања клатна по Y оси. За остале методе кретања табеле се могу наћи у прилогу В.

Табела 14-7. Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости код Y осе за методу кретања клатна

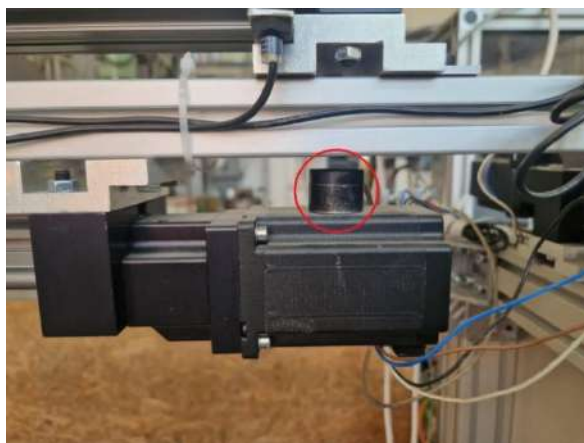
i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i,corr.} \uparrow \downarrow [\mu m]$	2,06	23,59	25,76	14,82	9,00	19,12	9,84	21,24	7,41	10,53	6,97	20,76	8,71	15,94
$R_{i,corr.} \uparrow \downarrow [\mu m]$	8,24	94,36	103,04	59,27	36,01	76,48	39,35	84,98	29,65	42,11	27,89	83,05	34,85	63,77
$R_{i,corr.} [\mu m]$	188,34		500,80		577,28		227,28		155,31		207,06		208,03	
$R_{corr., \uparrow} [\mu m]$	103,04													
$R_{corr., \downarrow} [\mu m]$	94,36													
$R_{corr.} [\mu m]$	103,04													

Једино код прве мерне позиције методом кретања клатна се није могла извршити корекција.

14.3 Мерна несигурност тачности позиционирања Z осе

За одређивање мерне несигурности тачности позиционирања клизача МАНК важно је узети у обзир појаву нелинаерности. При кретању платформе O-X glide механизма по Z оси клизачи прелазе пут различите дужине у односу на платформу. Конкретно док платформа пређе 60 mm, клизач J_0 пређе приближно пут од 84mm, а клизач J_1 пређе приближно пут од 72mm. Мерење компензације температуре машине је вршено на једном клизачу, како се то види на слици 14-1. Сензор има магнетну главу, што омогућава лаку монтажу на металне делове машине и тако се могу мерити тачно те позиције, које су од интереса.

Вредност температуре машине за одређивање разлике у односу на референтну температуру од 20°C се налази у табели 12-20.



Слика 14-1. Сензор температуре монтиран на мотор клизача J_0

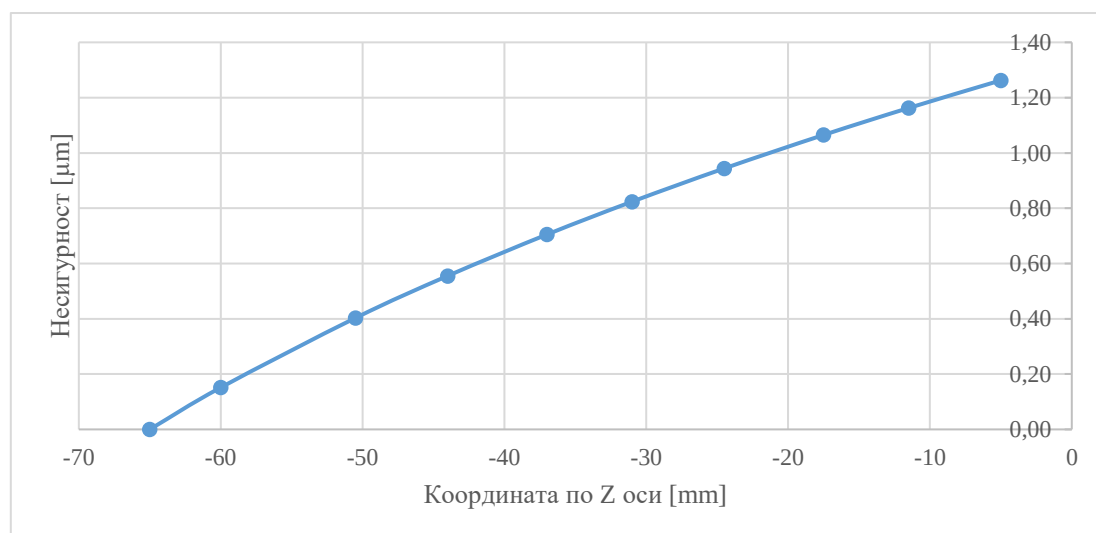
У табели 14-8. кориговане су вредности несигурности температуре са померајем мереног клизача. Може се приметити нелинеарна особина промене несигурности због нелинеарне природе механизма, која узрокује различите дужине путања клизача, слика 14-2.

Приликом испитивања су се прво одредиле тачне позиције клизача помоћу математичких израза којима је описана инверзна кинематика механизма (120). На основу тих позиција је израчунат пут који је прошао клизач од нулте позиције до одређених мерних позиција и то се користило као вредност дужине мерења за компензацију термичког ширења клизача. Мерење температуре је вршено на једном мотору клизача, а због симетричног оптерећења мотора и истим спољним условима, узима се да је температура другог мотора била иста као што је температура мереног мотора клизача.

Табела 14-8. Корекција несигурности $u_{E,MT}$, $u_{M,MT}$ због нелинеарности O-X glide механизма за Z осу линеарном методом кретања за оба клизача

Z координата [mm]	-60	-50,5	-44	-37	-31	-24,5	-17,5	-11,5	-5
Zp координата [mm]	-296,12	-286,62	-280,12	-273,12	-267,12	-260,62	-253,62	-247,62	-241,12
s_1 [μm]	100,11	78,83	65,98	53,32	43,27	33,11	22,88	14,64	6,19
Δs_1 [μm]	12,79	34,07	46,92	59,58	69,63	79,79	90,02	98,26	106,71
$u_{E,MT,s1}$ [μm]	0,15	0,39	0,54	0,69	0,81	0,92	1,04	1,14	1,24
$u_{M,MT,s1}$ [μm]	0,03	0,08	0,11	0,14	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
$u_{T,kor.}(s_1)$ [μm]	0,15	0,40	0,56	0,70	0,82	0,94	1,07	1,16	1,26
s_2 [μm]	128,75	112,04	102,05	92,30	84,65	76,97	69,34	63,25	57,09
Δs_2 [μm]	10,14	26,84	36,83	46,58	54,24	61,91	69,55	75,63	81,80
$u_{E,MT,s2}$ [μm]	0,12	0,31	0,43	0,54	0,63	0,72	0,81	0,88	0,95
$u_{M,MT,s2}$ [μm]	0,02	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,18	0,20
$u_{T,kor.}(s_2)$ [μm]	0,12	0,32	0,44	0,55	0,64	0,73	0,82	0,89	0,97

У прилогу В се налазе табеле са коригованим вредностима несигурности $u_{E,MT}$, $u_{M,MT}$ по мерним позицијама за методу кретања клатна и методу кретања ходочасника, пошто су различити температурни услови.



Слика 14-2. Промена кориговане несигурности утицаја температуре

Некоригована вредност u_T у најудаљенијој мерној позицији износи износи $0,71 \mu\text{m}$. Ово значи да је однос кориговане и некориговане вредности u_T у најудаљенијој позицији $1,26/0,71=1,78$, што значи да је коригована вредност за 78% већа у односу на некориговану, што се сматра значајном вредношћу.

У табелама 14-9. и 14-10. су приказани резултати прорачуна мерне несигурности у једној репрезентативној позицији (последња мерна позиција) и вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања. Све су вредности исказане директно за платформу.

Табела 14-9. Вредности мерне несигурности у репрезентативној позицији по врстама несигурности за кретање платформе по Z оси

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u_d [\mu\text{m}]$	0,06	0,06	0,06
$u_m [\mu\text{m}]$	2,41	2,41	2,41
$u_{T, \text{kor.}} [\mu\text{m}]$	1,26	1,08	1,26
$u_{EVE} [\mu\text{m}]$	0,21	0,08	0,01
$u_s [\mu\text{m}]$	1,02	1,02	1,02
$u_p [\mu\text{m}]$	2,91	2,83	2,90

Табела 14-10. Вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања по врстама несигурности за платформу Z осе по методама кретања

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u(R \uparrow, \downarrow) [\mu\text{m}]$	0,38	0,13	0,03
$U(R \uparrow, \downarrow) [\mu\text{m}]$	0,76	0,27	0,05
$u(B) [\mu\text{m}]$	2,05	2,04	2,04
$U(B) [\mu\text{m}]$	4,10	4,08	4,08
$u(R) [\mu\text{m}]$	2,08	2,05	2,04
$U(R) [\mu\text{m}]$	4,17	4,09	4,08

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u(M, E, E\uparrow, E\downarrow) [\mu m]$	2,90	2,83	2,90
$U(M, E, E\uparrow, E\downarrow) [\mu m]$	5,81	5,65	5,81
$u(A, A\uparrow, A\downarrow) [\mu m]$	2,93	2,83	2,90
$U(A, A\uparrow, A\downarrow) [\mu m]$	5,86	5,66	5,81

Вредности несигурности поновљивости по оси су најмање за кретања према методи клатна, а највеће за линеарну методу. Разлика између њих је за ред величине. Док код осталих параметара не постоји значајна разлика. Ово исто указује на повезаност природе поновљивости са методом кретања.

У табели 14-11. су представљени кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости тачности позиционирања за платформу која се креће по Z оси линеарном методом кретања. За остале методе табеле се налазе у прилогу В дисертације.

Табела 14-11. Кориговане вредности стандардне девијације и поновљивости за платформу при кретању по Z оси за линеарну методу кретања

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i, \text{corr.}} \uparrow \downarrow [\mu\text{m}]$	1,34	0,75	1,70	0,97	1,44	0,79	1,64	0,84	1,05	0,93	1,34	1,20	1,94	1,56
$R_{i, \text{corr.}} \uparrow \downarrow [\mu\text{m}]$	5,36	3,00	6,82	3,89	5,76	3,17	6,55	3,34	4,21	3,73	5,35	4,81	7,77	6,23
$R_{i, \text{corr.}} [\mu\text{m}]$	27,42		39,51		36,25		23,81		17,65		23,31		33,32	
$R_{\text{corr.}} \uparrow [\mu\text{m}]$	7,77													
$R_{\text{corr.}} \downarrow [\mu\text{m}]$	6,23													
$R_{\text{corr.}} [\mu\text{m}]$	7,77													

На основу поменутог се могла извршити корекција вредности стандардне девијације и поновљивости тачности позиционирања. Када је $u_{EVE} < s_i$, једначине (88) и (89) дају реалне резултате (испод корена у поменутих једначинама се појављује позитиван број). У супротном, када је $u_{EVE} > s_i$ испод корена се јавља негативан број и због тога несигурност прелази у комплексну равн. При обради мерења код сваке мерне позиције услов $u_{EVE} < s_i$ се задовољила. То значи да је приступ при одабиру временског интервала код одређивања грешке утицаја околине био 100% успешан код Z осе.

14.4 Мерна несигурност тачности позиционирања клизача

При поновном израчунавању вредности тачности позиционирања потребно је узети у обзир о ком је клизачу реч, као и то да треба посебно по клизачима кориговати утицаји несигурности топлотних појава и утицај трансформације. Мерна несигурност топлотних појава је већ представљена у табели 14-8. за линеарну методу кретања, а за остале методе табеле се налазе у прилогу В. Несигурност трансформације позиције се одређује према процедури из поглавља 7.2 докторске дисертације.

На основу једначина (145), (146), (147) одређују се вредности парцијалних извода по мерним позицијама, које су представљене у табелама 14-12. и 14-13. за оба клизача. Оне су исте за сваку методу кретања јер зависе само од геометрије механизма МА:

Табела 14-12. Вредности парцијалних извода коефицијента трансформације клизача J_0

K_1	-2,43176	-2,0715	-1,89031	-1,73209	-1,61827	-1,51188	-1,41246	-1,33711	-1,26376
z_p	-296,118	-286,618	-280,118	-273,118	-267,118	-260,618	-253,618	-247,618	-241,118
$\partial K_1/\partial z_p$	0,046491	0,031127	0,025013	0,020461	0,017606	0,015233	0,013256	0,011905	0,010704
$\partial K_1/\partial d$	-0,04649	-0,03113	-0,02501	-0,02046	-0,01761	-0,01523	-0,01326	-0,01191	-0,0107
$\partial K_1/\partial l_1$	0,042997	0,028032	0,02211	0,01772	0,014978	0,012705	0,010819	0,009534	0,008394

Табела 14-13. Вредности парцијалних извода коефицијента трансформације клизача J_1

K_2	-1,92079	-1,61668	-1,46235	-1,32656	-1,22814	-1,13546	-1,04815	-0,98144	-0,91599
z_p	-296,118	-286,618	-280,118	-273,118	-267,118	-260,618	-253,618	-247,618	-241,118
$\partial K_1/\partial z_p$	0,046491	0,031127	0,025013	0,020461	0,017606	0,015233	0,013256	0,011905	0,010704
$\partial K_1/\partial d$	-0,04649	-0,03113	-0,02501	-0,02046	-0,01761	-0,01523	-0,01326	-0,01191	-0,0107
$\partial K_1/\partial l_1$	0,042997	0,028032	0,02211	0,01772	0,014978	0,012705	0,010819	0,009534	0,008394

Пре него што су урађена мерења, проверене су дужине спојки и размак d . Провера спојки је извршена применом помоћног (импровизованог) прибора, чија тачност је $\pm 0,05\text{mm}$. На основу тога вредност дужине је $l_1=391\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$, $l_2=260\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$ и $d=65,5\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$.

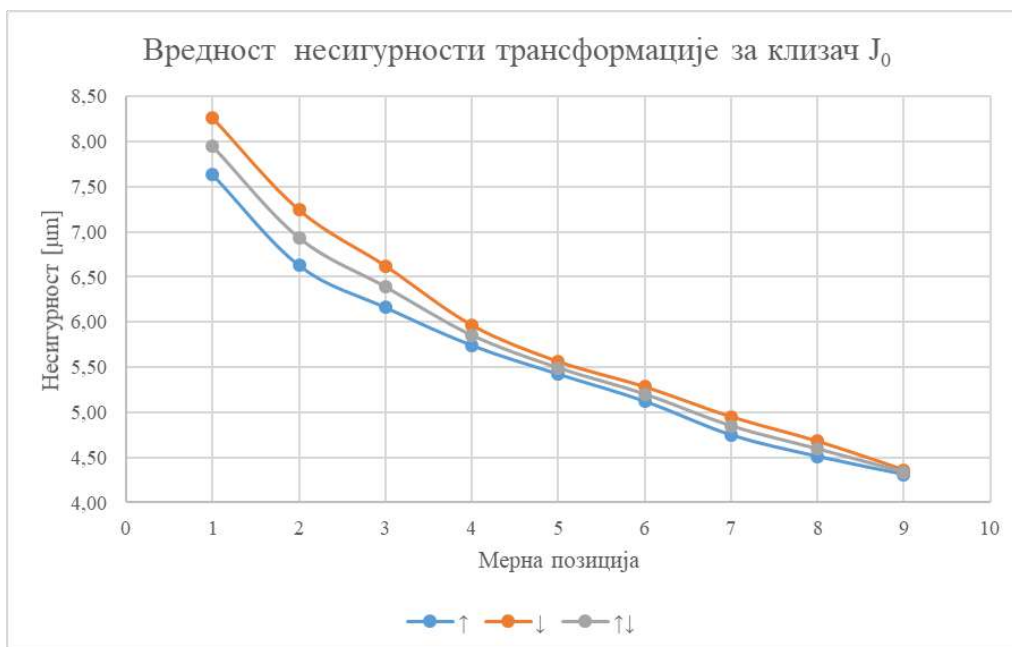
Пошто су мерења по методама кретања третирана као посебне мерне поставке, топлотне прилике су различите, што значи да постоји утицај променљивости одступања од температуре и због тога за сваку методу кретања потребно је одредити посебно грешке појединих фактора утицајних на коефицијент трансформације. Вредности температуре околине T_A за дату методу кретања се могу пронаћи у табели 12-20. Температура околине током мерења тачности позиционирања линеарном методом кретања и методом кретања клатна је износила у оба случаја $34,5^\circ\text{C}$, а код мерења методом кретања ходочасника температура је била $34,3^\circ\text{C}$. Ова разлика у температури не ствара значајну разлику у несигурности и због тога се може узети да је код све три експерименталне поставке температура била иста, и то $34,5^\circ\text{C}$.

Помоћу једначина (149), (150), (151) и (152) одређују се вредности фактора који служе за одређивање несигурности трансформације и добијени резултати су приказани у табели 14-14.

Табела 14-14. Фактори за одређивање несигурности трансформације

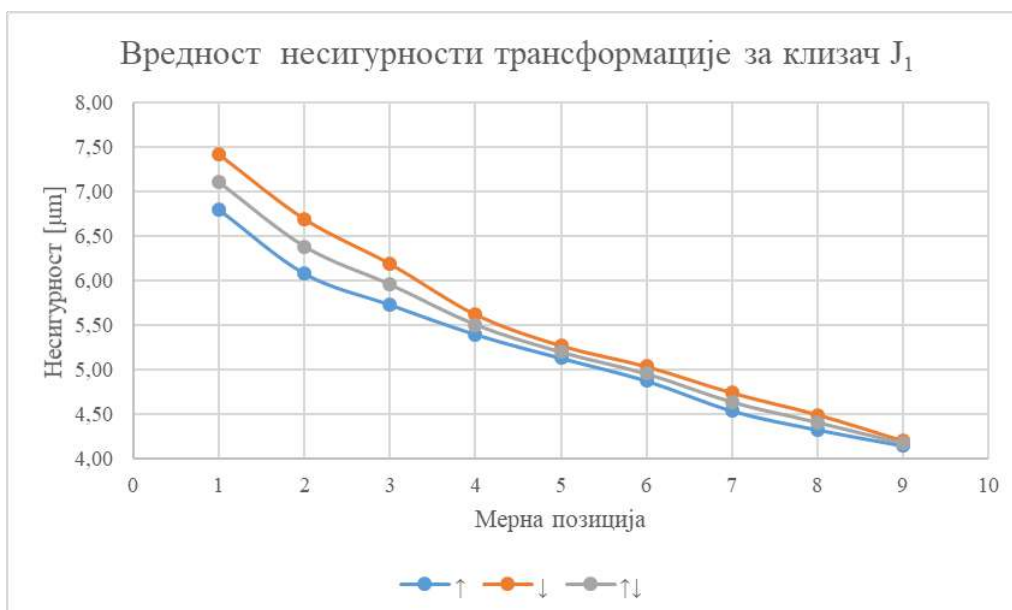
Фактор	Вредност
$\Delta l_{1,m} [\mu\text{m}]$	100
$\Delta l_{1,T} [\mu\text{m}]$	135,5
$\Delta l_1 [\mu\text{m}]$	168,41
$\Delta l_{2,m} [\mu\text{m}]$	100
$\Delta l_{2,T} [\mu\text{m}]$	90,1
$\Delta l_2 [\mu\text{m}]$	134,61
$\Delta d_m [\mu\text{m}]$	100
$\Delta d_T [\mu\text{m}]$	22,7
$\Delta d [\mu\text{m}]$	102,54

Тачност позиционирања у позитивном смеру кретања има различите вредности у односу на кретање у негативном смеру током мерења. Због тога су вредности несигурности трансформације различите по смеровима кретања. У дијаграмима на сликама 14-3. и 14-4. приказани су добијени резултати за u_T . Коришћена је једначина (153) за одређивање појединих вредности из претходно назначених дијаграма.



Слика 14-3. Несигурност трансформације клизача J_0 по различитим мерним позицијама

Са слике се може уочити нелинеарна природа несигурности трансформације код оба клизача. Вредности су различите, што је нормално због различитих дужина спојки, које спајају клизаче са платформом. Клизач J_0 има већу несигурност трансформације него што има клизач J_1 .

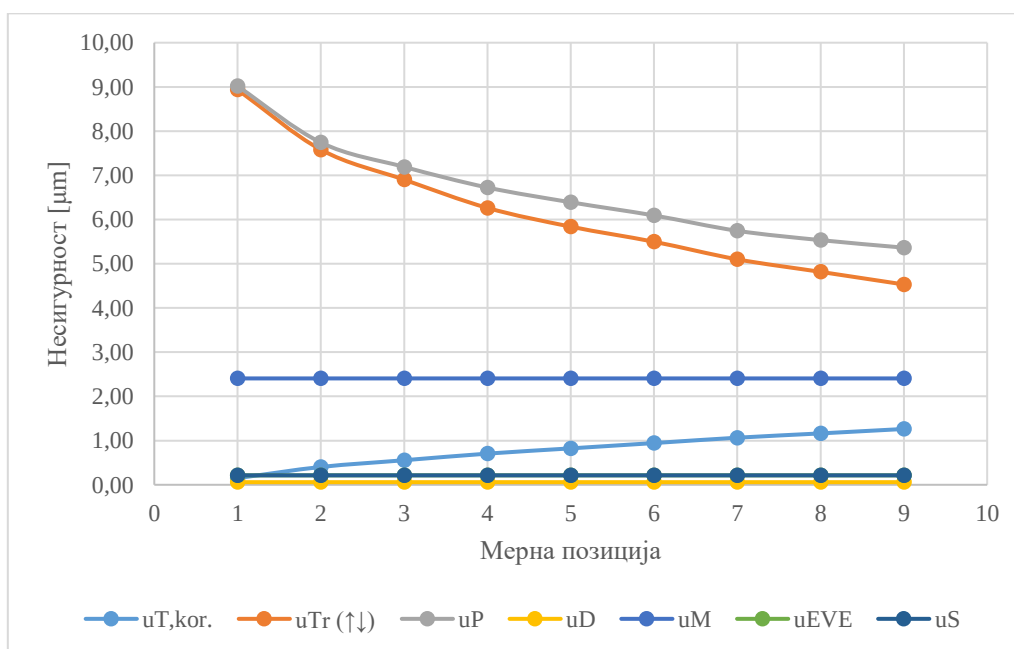


Слика 14-4. Несигурност трансформације клизача J_1 по различитим мерним позицијама

Процентуално одступање позитивног и негативног смера у односу на бидирекционе вредности несигурности трансформације заузима максималну вредност у првој мерној позицији и она износи $\pm 4\%$. Ово указује на то да је утицај на целокупну несигурност у позицији и несигурност параметара приближно исти за једносмерно и за бидирекционо кретање. Мора се назначити да ово важи само за O-X glide механизам и за ову поставку са постојећим геометријским мерама машине алатке. За друге врсте паралелних механизма ово не мора бити случај, шта више очекује се да постоје и веће разлике са повећањем или смањењем вредности неких од геометријских параметара.

Тако ћемо у даљем делу бидирекциону несигурност трансформације узети у обзир при одређивању несигурности у датој позицији и несигурности параметара тачности позиционирања. Коришћене су једначине (155), (156) и (157) због коригованих вредности несигурности топлотних појава и несигурности трансформације.

Код клизача J_0 мерна несигурност по мерним позицијама се мењала како је представљено на слици бр. 14-5. при чему $u_D=0,06\mu\text{m}$, $u_M=2,41\mu\text{m}$, $u_{EVE}=0,21\mu\text{m}$ и $u_S=1,02\mu\text{m}$.



Слика 14-5. Вредности различитих типова несигурности по мерним позицијама провере тачности позиционирања Z осе и трансформације вредности на клизачу J_0

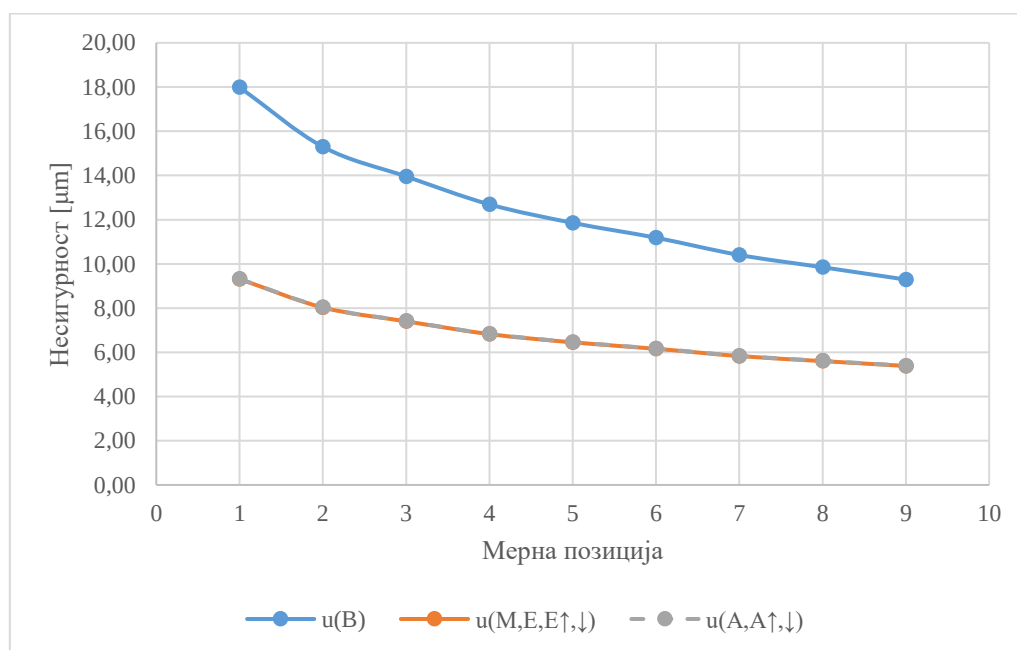
Највећи утицајни параметар на вредности мерне несигурности у датој позицији има несигурност трансформације. Разлог је у томе што су током мерења сви остали фактори који утичу на несигурност минимализовани. Поред тога, током извођења експеримента поштовани су прописи из стандарда што је више могуће. Може се уочити да је и утицај температуре занемарљив у односу на утицај коефицијента трансформације.

При одабиру репрезентативне позиције, увек је посматрана позиција где је највећи утицај топлотних појава. Из дијаграма са слике 14-5. може се утврдити да то није случај код МАНК. Ту је првенствено имала утицај несигурност трансформације. Узрок томе су геометријске особине механизма МА. Зато ће се у даљој анализи представљати подаци за прву мерну позицију.

Иста појава око одабира репрезентативне позиције се може приметити и код несигурности параметара тачности позиционирања, што је представљено у дијаграму 14-6. У табели 14-15. су приказане вредности несигурности, које се не мењају у зависности од мерне позиције.

Табела 14-15. Несигурност параметара тачности позиционирања R клизача J_0 за линеарну методу кретања

$u(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,38
$U(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,76
$u(R) [\mu m]$	18,00
$U(R) [\mu m]$	35,99



Слика 14-6. Несигурност параметара тачности позиционирања B, M, E и A клизача J_0 за линеарну методу кретања

За репрезентативну мерну позицију по свим методама кретања вредности мерне несигурности параметара тачности позиционирања клизача J_0 се могу наћи у прилогу В докторске дисертације.

Тако за клизач J_1 вредности несигурности за репрезентативну позицију и несигурности параметара тачности позиционирања по методама кретања се могу видети у табели 14-16.

Претходно описана упрошћавања су довела до тога, да се мењају само вредности случајне природе.

Табела 14-16. Вредности несигурности параметара тачности позиционирања клизача J_1

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,38	0,13	0,03
$U(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,76	0,27	0,05
$u(B) [\mu m]$	14,36	14,47	14,21

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
U(B) [μm]	28,72	28,95	28,42
u(R) [μm]	14,37	14,47	14,21
U(R) [μm]	28,74	28,95	28,42
u(M, E, E $\uparrow$, E $\downarrow$) [μm]	7,57	7,63	7,50
U(M, E, E $\uparrow$, E $\downarrow$) [μm]	15,15	15,25	15,01
u(A, A $\uparrow$, A $\downarrow$) [μm]	7,58	7,63	7,50
U(A, A $\uparrow$, A $\downarrow$) [μm]	15,17	15,26	15,01

Резултати одређивања несигурности тачности позиционирања клизача и платформе су били представљени за експерименталне поставке под редним бројем 1. (оригинална кинематика, линеарна метода кретања), 4. (оригинална кинематика, метода кретања ходочасника) и 7. (оригинална кинематика, метода кретања клатна). Код других експерименталних поставки, на основу претходних разматрања и закључака о променљивости тих вредности, не очекује се велико одступање у односу на оригиналну поставку. Највећи утицајни фактор, коефицијент трансформације, мења се минимално у односу на претходне експерименталне поставке јер се једино мења температура околине. Она се у конкретном случају смањује се за 1 °C на 33,5°C према табелама 12-20., 12-21. и 12-22.

Табеле са вредностима мерне несигурности параметара тачности за остале експерименталне поставке за платформу и оба клизача налазе се у прилогу В докторске дисертације.

15. поглавље

Анализа добијених резултата

У циљу правилног вредновања елемената теме, коришћених метода, поставке испитивања и добијених резултата неопходан је критички осврт на одређене целине које су обрађене у дисертацији. Дискусија ће бити започета анализом утицаја времена заустављања мерења приликом испитивања тачности позиционирања. Овај параметар је важан за оптимизацију дужине временског периода мерења и тачност добијених резултата, чиме утиче на цело истраживање које је обрађено у дисертацији. Испитивање правости МА и његове зависности са тачношћу позиционирања су допринели за боље разумевање квалитета МАНК са O-X *glide* механизмом.

Основна проблематика која се обрађује у дисертацији обухвата резултате анализе тачности позиционирања. Све осе (спољашње и унутрашње) на мапшини која је коришћена као основа за експеримент су анализиране посебно. Приликом истраживања се нарочито истакла поновљивост позиционирања, што је такође обрађено дискусијом о резултатима који су добијени њеном анализом. Након тога су интерпретирани резултати тачности позиционирања и правости Х осе због своје линеарне природе. Посебан осврт је направљен на резултате и на статистичку анализу експеримента, као и на мерну несигурност.

15.1 Време заустављања при мерењу

Приликом испитивања тачности позиционирања машина алатки се може уочити да време заустављања у одређеној позицији, чији је циљ добијање што реалнијих података о тренутној позицији покретне платформе машине има утицај на добијене резултате. Одређивање времена заустављања приликом мерења има значајан утицај на прецизност мерења тачности позиционирања. Тренутно ниједан важећи стандард који обухвата ову област, а који је анализиран приликом истраживања се није бавио овим параметром и нису дата тумачења о утицајима на резултате тачности позиционирања. Због тога је неопходно да се посвети посебна пажња на анализу овог параметра. Процедура, која је описана у дисертацији, на једноставан начин даје могућност да се дефинише време заустављања и услови при одређивању времена заустављања, који се могу користити у алгоритмима обраде резултата.

Анализа узрока променљивости фреквенције узорковања података приликом мерења није вршена јер би обухватила велики број утицајних параметара у које спадају механичка структура машине алатке, квалитет израде компонената машине, карактеристике мерне инструментације, карактеристике управљачког система и методе постављања оптичких компонената у положај за испитивање. Поменуто није било предмет истраживања будући да није било обухваћено планом експеримената.

На дужину времена заустављања велику улогу игра структура машине алатки. Из описане структуре испитиваног механизма може се закључити да Y оса механизма због

својих особина има продужено време заустављања и она износи скоро 16 секунди, док остале две осе довољно је да мирују око 2 секунде. Ово ствара велику разлику у укупном времену мерења.

На репрезентативном примеру у поглављу 9 на страни 90 приказана су времена мерења по методама кретања за једну фиктивну ситуацију са истим параметрима и добијено је да се најбрже мерење остварује када се користи метода клатна. Исти резултат за укупну дужину мерења се добио када су се изводили експерименти. Што се тиче разлике у временима мерења између оса, време потребно да се изврши само једно мерење за Y осу је било више од 30 мин у односу на 8 минута за Z осу. И поред тога што је Z оса значајно мање дужине од Y осе, време заустављања је имало много већег утицаја на дужину мерења него дужина мерне осе.

При анализи времена заустављања може се закључити да она зависи од брзине помоћног кретања. Што је већа брзина, то је већа количина кретања, а самим тим и инерцијалне силе које се јављају при заустављању елемената машине, што резултује већим померањем оптичких компонената мерне опреме. У једном делу, стандард ISO 230-2:2014 прописује потребу смањења турбулентног кретања ваздуха око ласерског зрака јер то има негативан утицај на мерну несигурност и смањује прецизност ласерског система. Када се оптичке компоненте крећу великом брзином стварају турбуленцију ваздуха што може да има утицаја на измерену вредност позиције. На основу овога постоји оправдање за даље истраживање, које би подразумевало анализу ефекта турбуленције на измерене вредности, и одређивање граничне вредности брзине кретања оптике током провере тачности позиционирања ласерским интерферометром. Ово је важно за смањење времена провере машина приликом испитивања што се повећањем брзине кретања може драстично унапредити.

Поред тога, будући да тачност позиционирања у експлоатационим условима зависи од брзине кретања, пожељно је мерења ускладити са максималним експлоатационим брзинама кретања конкретне машине. Ове брзине код савремених машина могу бити веома високе (у појединим случајевима прелазе 30-40 хиљада mm/min). При томе треба да се узме у обзир и то да мерна опрема има своје горње границе за брзину кретања оптичких компонената.

15.2 Правост. Зависност између правости и тачности позиционирања

Анализом правости MA са O-X *glide* механизмом добили смо опширнију слику о стању машине. Резултати су показали да се најлошији резултати јављају приликом кретања платформе по Z оси у ортогоналном правцу Y осе. Постоји више потенцијалних узрока за такво понашање платформе. Један од потенцијалних узрока може бити појава унутрашњих напона у раванско паралелном механизму током кретања по Z оси, који представља узрок ротације око X и Y осе. Ови напони се јављају због несинхронизованог кретања клизача, који настаје због нетачности кинематске једначине коју користи управљачки систем. Наиме, константе којима се описује геометрија механизма, као што су дужина спојки и удаљеност клизача од X осе, поседују одређену грешку насталу услед израде и монтаже што може имати утицаја на правост машине. Пошто је реч о паралелном механизму, ови параметри имају утицаја на тачност позиционирања као и на правост. За одређивање утицаја механичких напона на правост механизма, потребно је реализовати симулацију понашања механизма приликом кретања у циљу одређивања утицаја еластичних деформација на правост. Реализоване анализе су указале да је

неопходно даље истраживање утицаја нелинеарности кретања на правости механизма, и то може бити један од добрих праваца развоја оваквих типова МА.

Испитивања су показала да се најмање грешке јављају приликом кретања по Х оси. Одступање од правости је и до 10 пута мања у односу на кретање по Z оси у ортогоналном Y правцу.

Облик криве одступања од правости по Z оси за обе ортогоналне осе је специфичан и може се закључити да је последица структуре паралелног механизма. Код правости Z осе у ортогоналној Y оси одступање од правости се остварује у два циклуса која садрже повећање па смањење вредности одступања. Као последица тога настаје специфичан (двогрби) облик криве за који се минимум криве налази у координати $Z = -40\text{mm}$. Испитивање правости Z осе у правцу ортогоналне X осе даје функцију чији облик је другачији, али промена понашања правости се може уочити у координати $Z = -35\text{mm}$, што је веома близу претходној наведеној координати. Обе појаве се налазе у истој зони утицаја.

15.3 Тачност позиционирања

Провера тачности позиционирања за све три осе дале су различите резултате. На основу резултата презентованих у поглављу 12 се виде разлике између три модела кинематских законитости које одређују кретања клизача на осама унутар једне машине (линеарна оса, линеарна оса паралелног механизма и паралелна оса). Уочавање разлика утицаја на тачност ових зависности су и биле један од циљева рада због чега је испитивање спроведено на хибридној машини са особинама и линеарног и паралелног механизма.

У току истраживања је вршена провера све три осе по различитим методама кретања, а Z оса и по линеарности. Укупно је било 15 експерименталних поставки, 3 по X оси, 3 по Y оси и 9 по Z оси.

Резултати испитивања тачности позиционирања имају највеће вредности код Y осе. Ова оса је најдужа и кретање раванског паралелног механизма је регулисано конструкционим решењем које садржи линеарну осу која се налази на једној страни механизма док се кретање са друге стране преноси крутом везом. Укупна дужина портала раванског паралелног механизма је око 600 mm и то је у великој мери утицало на систематску грешку мерења али и на појаву случајних грешака у појединим зонама. Разлог за то је што се крај постоља, на ком се налази актуатор, прецизно померан, а други крај постоља се слободно креће по вођици. Због велике дужине, утицај инерције при убрзању и заустављању, постаје значајан, и то се могло видети и при одређивању времена заустављања. Параметри препоруке VDI/DGQ 3441 који су различити од ISO стандарда имају вредности $P_{smax} = 222\mu\text{m}$, $P = 2125,17\mu\text{m}$ и $\bar{U} = 116,15\mu\text{m}$ за линеарну методу кретања.

Анализа тачности позиционирања по осама кретања паралелног механизма указује на знатно боље резултате у односу на серијску осу. Док је код Y осе двосмерна грешка позиционирања 2067,5 μm , дотле двосмерна грешка позиционирања за X осу је 205 μm што је 10 пута мање, а за Z осу је 450 μm , што је 5 пута мање у односу на Y осу. Овакву тенденцију прате и систематске грешке позиционирања (E), вредности случајних грешака тачности позиционирања (R), као и параметри, које прописује препорука VDI-

DGQ. Конкретно, код X осе су остварени следећи резултати: $P_{smax} = 10,4\mu\text{m}$, $P = 207\mu\text{m}$ и $\bar{U} = 31,4\mu\text{m}$, а код Z осе $P_{smax} = 10,6\mu\text{m}$, $P = 453,2\mu\text{m}$ и $\bar{U} = 22,1\mu\text{m}$. То такође указује на велику разлику у односу на Y осу. Подаци за поређење су узети за линеарну методу кретања.

Са удаљавањем од прве мерне позиције вредности грешке позиционирања се константно повећавају. Ово се у пракси може кориговати калибрацијом машине која подразумева уношење корективних вредности за одређене позиције и успостављањем линеарне интерполације између две корективне вредности. На основу тога, смер даљих истраживања могу представљати провере тачности позиционирања калибрисане машине са резултатима провере грешке позиционирања. Циљ таквих истраживања би било формирање закључака о вези тако добијених резултата и нелинеарности кинематике паралелног механизма.

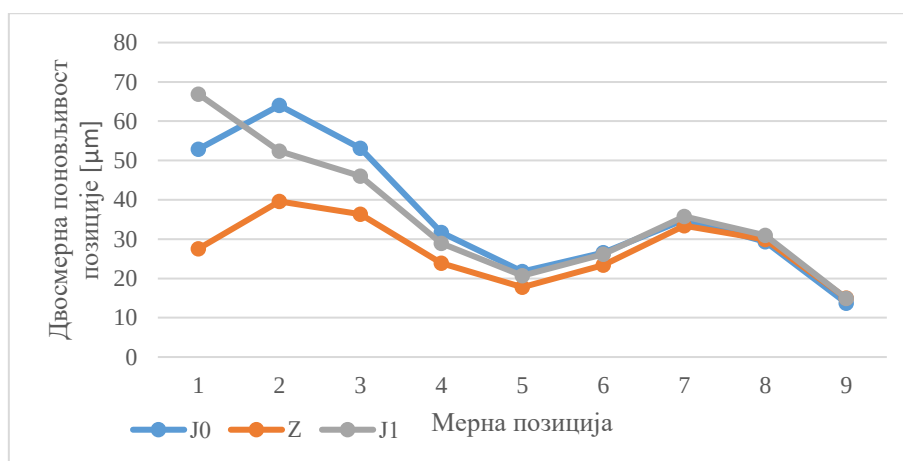
Досадашња истраживања на ту тему су обухватила тачност позиционирања покретне платформе механизма који чини машину алатку. Ово је из угла производних процеса важно, али је потребно анализирати и другу страну проблема, а то је стање машине. Стање машине се може описати мерењима провере тачности позиционирања клизача. Из изведених експеримената можемо повући паралелу између конструкционих грешака машине и добијених вредности тачности позиционирања. Код МАЛК ово не захтева посебне математичке операције јер постоји директна, линеарна веза између позиције платформе и механизма за покретање платформе. Код МАНК, као што је то и O-X glide механизам, ова веза је нелинеарна и потребно је прерачунати добијене грешке.

Због геометријских карактеристика механизма клизач J_1 ће увек имати мање грешке, од клизача J_0 . Двосмерна грешка позиционирања клизача J_0 је $A_{J_0} = 415,4\mu\text{m}$, а клизача J_1 је $A_{J_1} = 392,3\mu\text{m}$ и они су се смањили у односу на платформу $A_Z = 450,7\mu\text{m}$. Систематске грешке су се, такође, смањиле и оне су $E_{J_0} = 405,8\mu\text{m}$ $E_{J_1} = 384,9\mu\text{m}$, а двосмерна поновљивост осе са $R_Z = 39,6\mu\text{m}$ се повећала и добијене су вредности $R_{J_0} = 66,9\mu\text{m}$, $R_{J_1} = 64\mu\text{m}$. Максимална двосмерна грешка са $M_Z = 429,3\mu\text{m}$ се смањила код клизача на $M_{J_0} = 373,4\mu\text{m}$ и $M_{J_1} = 355,2\mu\text{m}$.

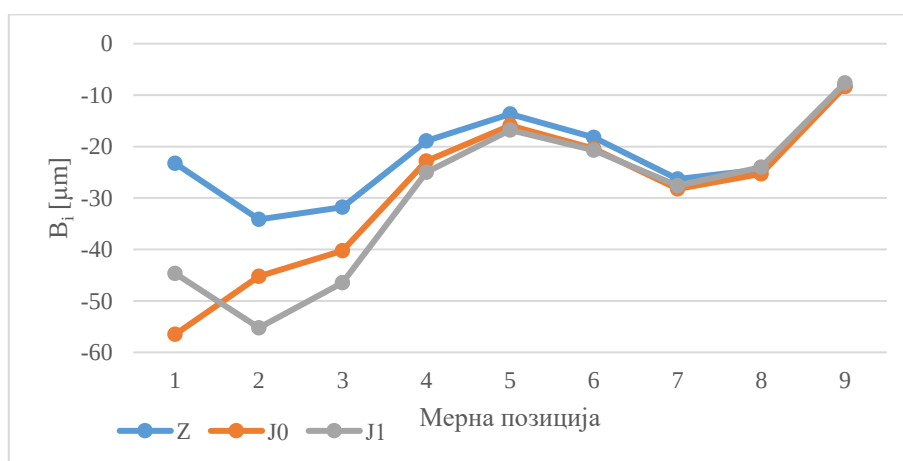
Што се тиче параметара препоруке VDI, очекивала се појава сличне, ако не и исте, тенденције промене вредности параметара за описивање посматране осе. Код параметара, који се разликују од ISO стандарда, важи претходно описана тенденција погоршања вредности. Централна вредност распона одступања средњих вредности за Z осу износи $\bar{U}_Z = 22,1\mu\text{m}$, а за клизаче $\bar{U}_{J_0} = 29,2\mu\text{m}$ $\bar{U}_{J_1} = 29,8\mu\text{m}$. Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања за Z осу износи $P_{smax,Z} = 10,6\mu\text{m}$, а за клизаче $P_{smax,J_0} = 15,6\mu\text{m}$, $P_{smax,J_1} = 13,2\mu\text{m}$. Када је реч о распону одступања позиционирања она се побољшала прерачунавањем на клизаче. Са $P_Z = 453,2\mu\text{m}$ за Z осу вредност се смањила на $P_{J_0} = 418,5\mu\text{m}$ за клизач J_0 и на $P_{J_1} = 395\mu\text{m}$ за клизач J_1 .

На основу наведених резултата се поставља логично питање, шта је узрок смањења вредности неких параметара а повећања других. Прво, при израчунавању одступања од позиције, због нелинеарности механизма, у појединим мерним позицијама користи се различита величина коефицијента трансформације. Вредност коефицијента трансформације је параметар који одређује у којој мери ће се у датој позицији променити тачност позиционирања клизача у односу на платформу. Када се посматрају појединачне мерне позиције дуж осе, већина њих се налази у зони радног простора, у којој је апсолутна вредност коефицијента трансформације већа од један, што значи да ће се вредности одступања повећати. Апсолутна вредност коефицијента трансформације је

мање од један у 9. мерној позицији за клизач J_0 и у 9. и 8. мерној позицији за клизач J_1 . Ове мерне позиције се налазе у горњем делу радног простора. Ово се може уочити и из вредности одступања од позиције које су прерачунате. Зато се по мерним позицијама повећавају вредности одступања од позиције, што доводи до повећавања распона одступања у појединим мерним позицијама. Слично томе и стандардна девијација постаје већа у доњим деловима радног простора, где је коефицијент трансформације већи. Ове две вредности утичу на промене других, које се одређују из њих, као што је поновљивост позиције по мерним позицијама R_i (једносмерна и двосмерна исто). Као што се може видети на слици бр. 15-1. максималну вредност заузимају на почетку мерне осе, што је у складу са претходним објашњењем. Клизачи прате тенденцију платформе, код које се у средњој зони може видети један локални минимум. Позиција минимума је у петој мерној позицији, коме припада координата $Z=-31\text{mm}$ и она је у блиској зони где се налази локални максимум који се јавља код правости Z осе у правцу ортогоналне Y осе, а још је ближе и позицији промене понашања правости Z осе у правцу ортогоналне X осе.



Слика 15-1. Промена двосмерне поновљивости позиције R_i дуж мерне осе посебно за платформу и клизаче



Слика 15-2. Промена распона одступања дуж Z осе за платформу и за клизаче

Као и код поновљивости и распон одступања средњих вредности V_i показује идентичан тренд, што се може видети са слике бр. 15-2. Све вредности за поређење су узете за линеарну методу кретања јер је уочено да метода кретања није утицала на трендове понашања различитих параметара по оси. Са слика се може уочити да у оквиру средње зоне радног простора долази до промене понашања машине. Да би се утврдио

тачан узрок овакве промене одступања и понашања машине, неопходно је спровести додатна истраживања на ову тему.

За разлику од претходне анализе, до смањења одређених параметара тачности позиционирања долази при прерачунавању координата са платформе на клизаче (прелазак са унутрашњих на спољашње координате), иако се вредности одступања од позиције у осам од девет мерних тачака повећавају. Ово смањење се може приметити код параметара, који описују неку од особина целе осе, а не појединачних мерних позиција. Параметри једносмерне и двосмерне грешке позиционирања (A , $A\uparrow$, $A\downarrow$), максимална вредност двосмерне грешке позиционирања M , двосмерна и једносмерна систематска грешка позиционирања (E , $E\uparrow$, $E\downarrow$), као и распон одступања позиционирања према VDI препоруци (P) имају глобални карактер. Зато је важно посматрати машину као целину, јер израчунавање одступања од позиције на клизаче, због нелинеарности код првих мерних позиција утиче на повећање, а код задњих чак и смањење грешака. Ово има последицу да се код првих мерних позиција вредности приближавају вредностима последњих мерних позиција. Одступање од позиције, глобално гледано, најмање је у првој мерној позицији, а највеће је у последњој. Због повећања најмање вредности и смањења највеће вредности при трансформацији, разлика између максимума и минимума се смањује.

Ово понашање је специфично за кинематску структуру која чини O-X *glide* механизам пошто је за њега промена коефицијента трансформације таква да има описани утицај на тачност. Слична појава се може очекивати код других раванских паралелних механизма јер је понашање платформе у њиховим радним зонама слично O-X *glide* механизму, али изрази који описују геометријске карактеристике нису исти. Да би се могао извући закључак о општем утицају нелинеарности кретања МАНК, не само код O-X *glide* механизма, потребно је извршити још низ експеримената на другим врстама паралелних механизма, као што је делта робот или Стјуартова платформа и упоредити њихово понашање са раванским паралелним механизмима. Осим тога, да би се могло тврдити да сви или одређена група раванских паралелних механизма даје сличне резултате као што је то случај код O-X *glide* механизма, потребно је извршити теоријска и експериментална истраживања и на машинама са таквом кинематском структуром.

Други правац даљих истраживања може бити и анализа утицаја геометријских параметара машине, као што је дужина спојки, размак између клизача и мере платформе, на коефицијент трансформације и даље на параметре тачности позиционирања.

15.4 Поновљивост

У свакој експерименталној поставци вредност поновљивости је била мања када се провера тачности позиционирања вршила методом кретања клатна. Ова разлика у апсолутној вредности није велика, износи свега максимално до $1\mu\text{m}$, али релативно то је смањење и до 70%. Када се ово смањење упореди са бидирекционом грешком позиционирања Z осе МА са O-X *glide* механизмом, која износи $468,22\mu\text{m}$ оно није значајно. Али пошто препорука VDI/DGQ 3441 машине алатке сврстава у високопрецизне ако им је грешка позиционирања испод $8\mu\text{m}$, разлика поновљивости од $1\mu\text{m}$ већ може имати довољан утицај да машина не буде проглашена високопрецизном. Због тога податак о методи кретања се мора обавезно назначити на релевантним техничким елаборатима о тачности позиционирања машине, нарочито што и стандард ISO 230-2:2014 даје препоруку за два начина метода кретања. У супротном помоћу

методе кретања може се манипулисати вредностима добијеним о тачности позиционирања и са сврставањем у групе тачности.

15.5 Линеарна оса паралелног механизма – X оса

Паралелни део хибридног O-X *glide* механизма може да се модификује ротирањем клизача по Y оси, као што је примењено код МОМА механизма [138]. Реконфигурабилна МА, коју је изучавао Василић [138], структурно је сличан O-X *glide* механизму. Исти принцип раванских паралелних механизма је коришћен при конструкцији, само са различитим међусобним угловима нагиба клизача. Предмет даљих истраживања би могао имати тему која обухвата до које мере би се задржала линеарност X осе ако се конфигурација O-X *glide* промени на начин као што је то случај код МОМА механизма. Који је то међусобни угао до ког се може реконфигурисати машина, а да се он понаша и даље тако да једна оса остане линеарна, а друга само паралелна?

Линеарна природа кретања платформе по X оси резултирала је претпоставком да су параметри описивања тачности позиционирања платформе исти за клизаче и за платформу. Такво поређење тачности позиционирања клизача J_0 и J_1 приликом кретања платформе по X и по Z оси дало је резултате који су значајно бољи (мање вредности параметара грешака) при кретању по X оси у односу на Z осу. То је последица нелинеарне природе кретања платформе по Z оси као и трансформације вредности параметара тачности позиционирања, што је довело до повећања тих вредности у односу на вредности добијене при кретању платформе по X оси. Због тога постоји могућност прецизирања постављеног модела са увођењем трансформације одступања од позиције платформе на оба клизача посебно при кретању по X оси. Резултати тачности позиционирања клизача добијених из таквог модела могу бити основа за поређење са нелинеарном осом.

15.6 ANOVA анализа

Утврђивање утицаја нелинеарности кретања на параметре тачности позиционирања које прописује стандард ISO 230-2:2014 директно имплицира могућност коришћења истих параметара у сврху описа стања МАНК. План експерименталног испитивања је конципиран тако да се клизачи доведу у кинематске услове, који су слични или исти као што је то случај код МА са серијском кинематиком.

При анализама експеримента посебно се вршило мерење платформе и клизача.

ANOVA анализа статистичке значајности утицаја променљивих фактора нелинеарности кинематике и методе кретања доказали су, да при анализи тачности позиционирања платформе када се посматрају мерне позиције понаособ, на одступање од позиције метода кретања постоји значајан утицај у првој мерној позицији у негативном смеру кретања. Процентуално учешће методе кретања је 73%. У осталим мерним позицијама фактори немају значајан утицај. Код стандардне девијације одступања у мерним позицијама 5. и 9. у негативном смеру кретања нелинеарност је имала значајан утицај. Ово значи да, глобално гледано, на целу осу нема значајан утицај ни метода кретања, нити нелинеарност кинематике. Претпоставља се да на тим мерним позицијама велики утицај на резултате мерења имају неуправљаних фактори. Да би се

ово потврдило, потребно би било извршити исти експеримент са већим бројем понављања да би се утврдио тренд резултата. Занимљиво је да су се само у негативном смеру кретања јавили значајни утицаји фактора. То се ипак десило само код две не узастопне мерне позиције од укупно девет. Што се тиче параметара, који описују целу посматрану осу, из стандарда ISO 230-2:2014 ни један од посматраних фактора у представљеном експерименту није имао утицаја. На параметре из VDI препоруке такође управљани фактори нису имали утицаја на посматране параметре. Мора се напоменути да Фишеров број параметра $\bar{B}$ и $\bar{U}$ је био веома близак граничној вредности. Треба напоменути да су параметри $\bar{B}$ и $\bar{U}$ према методи израчунавања и карактеру веома слични, али указују на различите утицаје на грешку. У нашем случају, сличност се може приметити и у вредностима. Наиме $\bar{U} = |\bar{B}|$. Када се посматрају вредности ових параметара код других оса, ово није случај. Због ове сличности се види и идентичан утицај управљаних фактора.

За бољи увид у карактеристике механизма машине алатке, неопходно је утврдити утицај параметара тачности по клизачима на параметре тачности позиционирања. Резултати испитивања клизача J_0 указују на понашање веома слично покретној платформи. На одступање од тачности позиције значајан утицај има метода кретања и то само у првој мерној позицији у негативном смеру. На стандардну девијацију, слично као код платформе, постоји значајан утицај нелинеарности у позицијама 5. и 7. у негативном смеру. Управљани фактори на остале параметре према стандарду ISO 230-2:2014 и према препоруци VDI/DGQ 3441 нису имали значајан утицај, тј. грешке су биле значајне за посматрани низ експеримената. Што је још занимљивије, клизач J_1 је био у потпуности неутралан. Ни у једној мерној позицији фактори нису имали никакав утицај. Ово сугерише на могућност рангирања клизача по утицају грешака које на њему настају на целокупан систем. Клизач J_0 би у том случају био посматран као примарни клизач, чије особине се у већој мери одражавају у кретању платформе, а клизач J_1 као секундарни чије понашање служи за ублажавање утицаја примарног клизача. Ово представља хипотезу на основу које се могу формирати циљеви будућих истраживања.

На основу претходних размишљања може се тврдити, да не постоји ниједан од управљаних фактора који би показивао особине систематског утицаја на тачност целе осе. Ипак, постоје позиције, које су карактеристичне за платформу и за клизач, које је потребно детаљније истражити.

15.7 Мерна несигурност

Одређивање мерне несигурности тачности позиционирања обухвата испитивања која су комплексна колико и испитивање тачности позиционирања. Да би било реализовано, потребно је предвидети велики број утицајних фактора. Ти фактори произилазе из карактеристика мерне инструментације, из физичких својстава материјала и низа других утицаја у које спада и постављање мерне опреме.

Минимизирање мерне несигурности доводи до повећања поузданости измерених вредности. Ово је један од основних циљева припреме мерења. Минималне вредности се не могу остварити код сваког фактора. На пример, при извођењу експеримената, који су описани у дисертацији, водило се рачуна, приликом поставке експеримената у лабораторији, да већина фактора буду минимални. Размак између ретрорефлектора и интерферометра, у нултој позицији мерења, био је испод 10 милиметара код сваког мерења, чиме се могло занемарити грешка одређивања нулте позиције мерења.

Несигурност мерних инструмената је дефинисана карактеристикама опреме и одредио ју је произвођач. Несигурност изазвана поновљивошћу постављања мерне инструментације је један од параметара који су комплексни за одређивање. У том случају су преузете препоручене вредности, које предвиђа стандард ISO 230-9:2005, пошто са опремом, која је била на располагању током мерења, није било могуће одредити исте.

Мерну несигурност изазвану променама у радној средини је било потребно посебно анализирати. Када су израчунате вредности према стандардом препорученој процедури и извршене су корекције стандардне девијације, могло се приметити, да су код мерења, у којима је коришћена метода кретања ходочасника или клатна, вредности u_{EVE} биле често за ред величине веће од стандардне девијације. То је узроковало да стандардна девијација добије вредности комплексних бројева тј. имагинарну компоненту. После дубље анализе, утврдило се да су временски оквири, који су узети за одређивање вредности несигурности околине, били превелики за дату методу кретања. Тако су дефинисани кораци и принципи за одређивање вредности u_{EVE} и могла се извршити корекција стандардне девијације. У одређеним мерним позицијама се током мерења дешавало да, и поред усвојене процедуре, резултат буде негативан број испод корена према једначинама (88) и (89), што узрокује прелазак вредности несигурности у комплексну раван. Да би се избегли проблеми уобичајеног начина исказивања измерених вредности са грешком у облику $x \pm \Delta x$ због појаве имагинарне компоненте код Δx , вредности добијене са негативним предзнаком испод корена су одбачене као неисправне и коришћене су некориговане вредности стандардне девијације и поновљивости оса.

Код Х осе мерна несигурност у репрезентативној мерној позицији је био 2,41-2,56 μm . Средње одступање од позиције у истој позицији износило је 111,8 μm . Мерна несигурност у овом случају чини 2,3% измерене вредности, што је прихватљиво. У табели 15-1. приказане су вредности параметара тачности позиционирања са одговарајућим вредностима несигурности. На ове параметре, метода кретања није имала утицаја. Пошто се једносмерна и двосмерна поновљивост позиције разликује у зависности од методе кретања, у табели 15-2. приказане су те вредности. У заградама је назначено процентуално учешће грешке у измереним вредностима.

Табела 15-1. Параметри тачности позиционирања Х осе са мерним несигурностима

Параметар	Вредност	Процентуално учешће грешке
В	50,4 $\mu\text{m} \pm 2,1 \mu\text{m}$	4,2%
E↑	166,2 $\mu\text{m} \pm 4,8 \mu\text{m}$	2,9%
E↓	179,8 $\mu\text{m} \pm 4,8 \mu\text{m}$	2,7%
E	200,9 $\mu\text{m} \pm 4,8 \mu\text{m}$	2,4%
М	173 $\mu\text{m} \pm 4,8 \mu\text{m}$	2,8%
A↑	168,1 $\mu\text{m} \pm 5,1 \mu\text{m}$	3%
A↓	182,1 $\mu\text{m} \pm 5,1 \mu\text{m}$	2,8%
A	201,9 $\mu\text{m} \pm 5,1 \mu\text{m}$	2,5%

Табела 15-2. Параметри поновљивости позиције Х осе са мерним несигурностима по методама кретања

Метода кретања	R↑	R↓	R
Линеарна	6,5 $\mu\text{m} \pm 1,9 \mu\text{m}$ (29%)	7,9 $\mu\text{m} \pm 1,9 \mu\text{m}$ (24%)	54,3 $\mu\text{m} \pm 4,6 \mu\text{m}$ (8,5%)
Ходочасник	5,8 $\mu\text{m} \pm 1,7 \mu\text{m}$ (29%)	3,8 $\mu\text{m} \pm 1,7 \mu\text{m}$ (45%)	61,9 $\mu\text{m} \pm 4,5 \mu\text{m}$ (7,3%)
Клатно	3,7 $\mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ (22%)	3,6 $\mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ (22%)	54,7 $\mu\text{m} \pm 4,2 \mu\text{m}$ (7,7%)

Измерена вредност мерне несигурности Y осе у репрезентативној мерној позицији, током мерења, износила је $6,3 \mu\text{m}$. При томе средње одступање, од позиције у истој позицији, износило је $533,5 \mu\text{m}$. На основу тога, уочава се да несигурност Y осе чини 1% измерене вредности, што је прихватљиво. У табели 15-3. приказане су вредности параметара тачности позиционирања са одговарајућим вредностима мерне несигурности. На ове параметре метода кретања није имала утицаја. Пошто се једносмерна и двосмерна поновљивост позиције разликује у зависности од методе кретања, у табели 15-4. приказане су те вредности. У заградама је назначено процентуално учешће грешке у измереним вредностима.

Табела 15-3. Параметри тачности позиционирања Y осе са мерним несигурностима

Параметар	Вредност	Процентуално учешће грешке
B	$291,1 \mu\text{m} \pm 7,4 \mu\text{m}$	2,5%
E $\uparrow$	$1531 \mu\text{m} \pm 10,7 \mu\text{m}$	0,7%
E $\downarrow$	$1956,2 \mu\text{m} \pm 10,7 \mu\text{m}$	0,6%
E	$1956,2 \mu\text{m} \pm 10,7 \mu\text{m}$	0,6%
M	$1743,6 \mu\text{m} \pm 10,7 \mu\text{m}$	0,6%
A $\uparrow$	$1645 \mu\text{m} \pm 17,2 \mu\text{m}$	1%
A $\downarrow$	$2067,5 \mu\text{m} \pm 17,2 \mu\text{m}$	0,8%
A	$2067,5 \mu\text{m} \pm 17,2 \mu\text{m}$	0,8%

Табела 15-4. Параметри поновљивости позиције Y осе са мерним несигурностима по методама кретања

Метода кретања	R $\uparrow$	R $\downarrow$	R
Линеарна	$132,5 \mu\text{m} \pm 13,5 \mu\text{m}$ (10%)	$163,6 \mu\text{m} \pm 13,5 \mu\text{m}$ (8%)	$439,1 \mu\text{m} \pm 15,4 \mu\text{m}$ (3,5%)
Ходочасник	$202 \mu\text{m} \pm 13,5 \mu\text{m}$ (7%)	$105,7 \mu\text{m} \pm 13,5 \mu\text{m}$ (13%)	$476,6 \mu\text{m} \pm 15,4 \mu\text{m}$ (3,2%)
Клатно	$104,1 \mu\text{m} \pm 13,5 \mu\text{m}$ (13%)	$95,6 \mu\text{m} \pm 13,5 \mu\text{m}$ (14%)	$579,5 \mu\text{m} \pm 15,4 \mu\text{m}$ (2,7%)

Испитивање указује да се, за разлику од X осе, код Y осе побољшала једносмерна поновљивост позиције осе приликом коришћења метода кретања по клатну, док су се вредности двосмерне поновљивости позиције осе погоршале.

За описивање мерне несигурности Z осе биле су потребне различите корекције параметара у зависности да ли се посматра платформа, или се посматрају клизачи. Код оба случаја фактор мерне несигурности узрокован термичким утицајима је коригован са термичким ширењем клизача пошто се они не крећу истим путем као платформа што је при компензацији температуре машине меродавно. За корекцију је коришћен најједноставнији модел (линеарни) топлотних утицаја. Радови на ту тему [157,158] имплицирају да би се, са комплекснијим моделима топлотних утицаја, могли постићи тачнији резултати, али би то подразумевало додатна истраживања која нису обухваћена темом дисертације. Могући даљи смер истраживања може бити дефинисање топлотног модела $O-X$ glide механизма, који даје боље резултате у односу на коришћени.

Добијени резултати се могу сматрати задовољавајућим. При кретању платформе по Z оси, мерна несигурност у репрезентативној мерној позицији је била $2,9 \mu\text{m}$. Средње одступање од позиције у истој позицији је износило $467 \mu\text{m}$. Мерна несигурност у овом случају чини $<1\%$ измерене вредности. У табели 15-5. приказане су вредности

параметара тачности позиционирања са одговарајућим вредностима мерне несигурности. На ове параметре метода кретања није имала утицаја. Пошто се једносмерна и двосмерна поновљивост позиције разликују у зависности од методе кретања, у табели 15-6. приказане су те вредности. У заградама је назначено процентуално учешће грешке у измереним вредностима.

Табела 15-5. Параметри тачности позиционирања платформе по Z осе са мерним несигурностима

Параметар	Вредност	Процентуално учешће грешке
B	34,2 $\mu\text{m} \pm 4,1 \mu\text{m}$	12%
E $\uparrow$	436,7 $\mu\text{m} \pm 5,8 \mu\text{m}$	1,3%
E $\downarrow$	421,8 $\mu\text{m} \pm 5,8 \mu\text{m}$	1,4%
E	445 $\mu\text{m} \pm 5,8 \mu\text{m}$	1,3%
M	429,3 $\mu\text{m} \pm 5,8 \mu\text{m}$	1,4%
A $\uparrow$	443,1 $\mu\text{m} \pm 5,9 \mu\text{m}$	1,3%
A $\downarrow$	426,4 $\mu\text{m} \pm 5,9 \mu\text{m}$	1,4%
A	450,7 $\mu\text{m} \pm 5,9 \mu\text{m}$	1,3%

Табела 15-6. Параметри поновљивости позиције платформе при кретању по Z осе са мерним несигурностима по методама кретања

Метода кретања	R $\uparrow$	R $\downarrow$	R
Линеарна	7,8 $\mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ (10%)	6,3 $\mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ (13%)	39,6 $\mu\text{m} \pm 4,2 \mu\text{m}$ (11%)
Ходочасник	3,5 $\mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ (8,6%)	4,9 $\mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ (6,1%)	31,7 $\mu\text{m} \pm 4,1 \mu\text{m}$ (13%)
Клатно	2 $\mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ (2,5%)	3,4 $\mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ (1,5%)	35,9 $\mu\text{m} \pm 4,1 \mu\text{m}$ (11,4%)

Процентуално учешће мерне несигурности, код поновљивости позиције осе (двосмерна и једносмерна такође), много је веће у односу на преостале параметре који описују посматрану осу код све три посматране осе. Поред тога, код методе кретања клатна најмања је вредност мерне несигурности код све три осе (изузетак чини двосмерна поновљивост Y осе). Ово директно потврђује претходну тврдњу да је избор методе кретања при оцењивању тачности позиције МА важан и да метода клатна даје боље резултате у односу на друге две осе.

Када се користе параметри тачности позиционирања за опис карактеристика појединих клизача, неопходно је, у складу са кинематиком механизма, извршити трансформацију измерених вредности са платформе на клизаче. При тој трансформацији, због зависности величине коефицијента трансформације од низа фактора, долази до „погрешне“ вредности трансформације, или до трансформације са одређеном грешком. У случају O-X *glide* механизма, утицајни фактори су дужина спојки, размак између клизача и позиција по Z осе. Грешка, која настаје због трансформације података са платформе на клизаче, јавља се у укупној мерној несигурности. Због геометријских карактеристика механизма, ова грешка се манифестовала различитим вредностима међу клизачима. Тамо где коефицијент трансформације има највећу вредност, тамо је и његова грешка највећа. То је довело до тога да је мерна несигурност код прве мерне позиције била много већа него код задње мерне позиције, што је супротно са досадашњом праксом код МАЛК са серијским механизмом. У првој мерној позицији, утицај несигурности топлотних појава је био занемарљив, док је због претходно објашњене нелинеарне

кинематике несигурност трансформације била највећа. Ово је случај код O-X *glide* механизма и код неких других раванских паралелних механизма. Тамо где се унутар радног простора другачије манифестује промена резолуције, тј. скоро код свих других паралелних механизма, ово не мора бити случај.

Као што се из претходног може уочити веома је важно дефинисати репрезентативну мерну позицију за изражавање мерне несигурности. За O-X *glide* механизам узета је прва мерна позиција и све вредности су дефинисане у односу на њу. Код клизача J_0 несигурност у репрезентативној мерној позицији је био $9 \mu\text{m}$. Средње одступање од позиције у истој позицији износио је $91,9 \mu\text{m}$. Несигурност у овом случају чини 9,8% измерене вредности, што се може сматрати прихватљивим. Код клизача J_1 несигурност у репрезентативној мерној позицији је била $7,3 \mu\text{m}$. Средње одступање од позиције у истој позицији износио је $72,6 \mu\text{m}$. Несигурност у овом случају чини 10,1% измерене вредности. Пратећи трендове код свих оса, за клизаче J_0 и J_1 у табелама 15-7., 15-8., 15-9. и 15-10. представљене су вредности параметара тачности позиционирања са одговарајућим несигурностима.

Табела 15-7. Параметри тачности позиционирања клизача J_0 са мерним несигурностима

Параметар	Вредност	Процентуално учешће грешке
B	$56,5 \mu\text{m} \pm 36 \mu\text{m}$	64%
E↑	$397,5 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	4,7%
E↓	$349,3 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	5,3%
E	$405,8 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	4,6%
M	$373,4 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	5%
A↑	$407,7 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	4,6%
A↓	$356 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	5,2%
A	$415 \mu\text{m} \pm 18,6 \mu\text{m}$	4,5%

Табела 15-8. Параметри тачности позиционирања клизача J_1 са мерним несигурностима

Параметар	Вредност	Процентуално учешће грешке
B	$55,2 \mu\text{m} \pm 28,7 \mu\text{m}$	52%
E↑	$373,7 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	4,1%
E↓	$340,2 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	4,5%
E	$384,9 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	4%
M	$355,2 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	4,3%
A↑	$382,3 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	4%
A↓	$345,5 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	4,4%
A	$392,3 \mu\text{m} \pm 15,2 \mu\text{m}$	3,9%

Табела 15-9. Параметри поновљивости позиције клизача J_0 са мерним несигурностима по методама кретања

Метода кретања	R↑	R↓	R
Линеарна	$13,2 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ (6,1%)	$7,6 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ (10,5%)	$66,9 \mu\text{m} \pm 36 \mu\text{m}$ (54%)
Ходочасник	$6,2 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ (4,8%)	$10,2 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ (2,9%)	$50,8 \mu\text{m} \pm 32,3 \mu\text{m}$ (64%)
Клатно	$3,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ (1,4%)	$4,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ (1,1%)	$74,4 \mu\text{m} \pm 31,8 \mu\text{m}$ (43%)

Табела 15-10. Параметри поновљивости позиције клизача J_1 са мерним несигурностима по методама кретања

Метода кретања	$R_{\uparrow}$	$R_{\downarrow}$	R
Линеарна	$11,1 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m} (7,2\%)$	$6,6 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m} (12\%)$	$64 \mu\text{m} \pm 28,7 \mu\text{m} (45\%)$
Ходочасник	$5,6 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m} (5,4\%)$	$8,1 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m} (3,7\%)$	$49 \mu\text{m} \pm 29 \mu\text{m} (59\%)$
Клатно	$2,7 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m} (1,9\%)$	$3,3 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m} (1,5\%)$	$58 \mu\text{m} \pm 28,4 \mu\text{m} (49\%)$

Мерна несигурност параметара, максимални распон одступања средњих вредности В, и максимална двосмерна поновљивост осе R клизача J_0 и J_1 достигла је значајну вредност, због чега добијени резултати нису довољно поуздани са овако извршеним мерењима. Да би се могла смањити грешка и повећати поузданост измерених података, потребно је извршити геометријску калибрацију O-X *glide* механизма и повећати тачност одређивања коефицијента трансформације.

16. поглавље

Закључци

Научно истраживачки рад, реализован у складу са циљевима дисертације, усмерен је ка проучавању могућности вредновања стања МАНК применом методологије коју прописује стандард ISO 230-2:2014, са освртом на делове стандарда ISO 230-9:2005, ISO 230-3:2007 и препоруке VDI/DGQ 3441. При анализи могућности коришћења поменутих стандарда за опис МА, узета су у обзир три утицајна фактора: време заустављања, метода кретања и нелинеарност кретања.

Током истраживања, експерименти су се вршили на МАНК са тзв. *O-X glide* механизмом, која се састоји од једног раванског паралелног механизма са транслаторним осама и додатне серијске транслаторне осе. Овом конфигурацијом је добијен механизам са хибридном серијско - паралелном кинематском структуром.

Истраживањем је, у циљу добијања меродавних резултата, дефинисана процедура за одређивање времена заустављања приликом испитивања. Препорука је да се, при свакој провери тачности позиционирања МА помоћу ласерског интерферометра, изврши пробно мерење коришћењем дефинисане процедуре за утврђивање времена заустављања. Тако се може минимизирати време потребно за извођење мерења и смањити нежељени ефекти погрешних вредности које произлазе из осцилаторних појава при заустављању.

У току експерименталног истраживања обухваћеног дисертацијом, постављени низ експеримента који је обухватио утицај методе кретања и нелинеарност кретања, доказао је да посматрани управљани фактори у глобалу нису имали значајан утицај на параметре тачности позиционирања. Овако постављен експеримент је имао циљ да докаже да се провери значај параметара тачност позиционирања МАНК у кинематском стању које је слично МАЛК,. Када је реч о кинематски сличном стању, говори се о кретању клизача константним брзинама. Ово имплицира да се процедура за оцењивање тачности позиционирања МА помоћу ласерског интерферометра према стандарду ISO 230-2:2014 може користити без било каквих корекција на кинематици код МАНК.

Дубље проучавање добијених података доказало је да је код серијске, линеарне и код паралелне осе МА са *O-X glide* механизмом, испитивање тачности позиционирања методом клатна дала увек мање резултате стандардне девијације и једносмерне поновљивости осе. Додуше, та разлика у апсолутној вредности није велика, али релативно, један у односу на другог, разлика постаје значајна. Због овог се препоручује да се при испитивањима обавезно назначи метода кретања, као што је то већ претходно и наглашено у докторској дисертацији, ово може бити узрок разлика резултата испитивања код високопрецизних МА.

Истраживања спроведена у докторској дисертацији су обухватила и правост оса машине. Резултати указују на чињеницу да појаве које се јављају због нелинеарне кинематике машине и због линеарности Х осе при провери тачности позиционирања се такође јављају и код провере правости и имају сличну природу.

Дубља анализа је доказала да нелинеарност кинематике на индиректан начин утиче на посматране параметре. Да би се могли оценити клизачи механизма, прво је потребно трансформисати добијене податке одступања од позиције са платформе на клизаче. То је узроковало да параметри, који описују тачност позиционирања код клизача, буду другачији у односу на платформу и да њихово израчунавање зависи од позиције платформе по Z осе. Систематске грешке су се смањиле, док су се вредности поновљивости повећале. Нелинеарност МА има утицаја на параметре унутар осе машине. Утицај је различит на параметре које описују одређене мерне позиције и различит је за параметре које глобално описују целу осу.

Анализом мерне несигурности утврдило се да су добијене вредности грешке мерења код већине параметара у оквиру прихватљивог. Нелинеарност има утицај на грешку изазвану компензацијом температуре машине. Због нелинеарне кинематске везе, између клизача и платформе код МАНК, потребно је узети у обзир помераје који се јављају код клизача и да се коригују вредности u_T у складу са новим дужинама мерења. Поред овога, и трансформација података, са платформе на клизаче, има своју грешку. Направљена је теоријска основа за одређивање грешке трансформације u_{Tr} и у експерименту коригована је укупна грешка са добијеним вредностима. Ово је имало директни утицај на одабир репрезентативне мерне позиције за исказивање података тачности позиционирања осе, што је један од прописа стандарда ISO 230-2:2014.

На основу опширне анализе добијених података, у 15. поглављу дефинисали су се могући главни правци будућих истраживања. Акценат се може ставити на утицај турбулентног кретања ваздуха изазваним померањем мерне инструментације у току мерења тачности позиционирања. У раду није изучаван утицај нелинеарности на правост механизма и оно такође представља један од могућих будућих истраживачких праваца. Поред тога, добијени подаци о тачности позиционирања могу се искористити за калибрацију МА и као верификација могу се извршити експерименти на калибрисаној машини. Пошто је у дисертацији анализиран само један тип МА са паралелним механизмом који има нелинеарну кинематику, сврсисходно је извршити експеримент на машинама који имају сличан паралелни механизам, а такође нелинеарну кинематику. На такав начин бисмо могли извући закључке о комплетној групи МА формираној према кинематској структури. Анализа утицаја геометријских параметара машине на коефицијент трансформације и даље на параметре тачности позиционирања такође могу дати значајне резултате. Даљи правац истраживања представља и изучавање могућности прецизирања постављеног модела са увођењем трансформације одступања од позиције платформе на оба клизача посебно при кретању по X осе. Провера хипотезе рангирања клизача по утицајности на параметре тачности позиционирања такође може бити од значаја за боље разумевање оваквих механизма. На основу детаљне анализе података несигурности, природно је да се убудуће изврши геометријска калибрација структурних елемената O-X *glide* механизма, која би значајно утицала на резултате провере тачности позиционирања.

Све што је претходно речено важи у случају да су научне претпоставке биле тачне. Увек, на крају сваког научно-истраживачког рада, потребно је упитати се да ли су сопствене претпоставке валидне, да ли постоји још нешто што смо заборавили или смо занемарили, а на крају би могло да се испостави да има утицаја на посматрани систем. Овако долазимо до мотоа докторске дисертације:

*Veritas semper maior!*³

³ Латинска изрека, значи *Истина је увек већа!* (мађ. *Az igazság mindig több!*).

17. поглавље

Литература

- [1] Guergov, S.: *A review and analysis of the historical development of machine tools into complex intelligent mechatronic systems*, Journal of Machine Engineering, vol. 18, no. 1, p. 107–119, 2018., ISSN: 1895-7595
- [2] Carlsson, B.: *The development and use of machine tools in historical perspective*, Journal of Economic Behavior & Organization, vol. 5, no. 1, p. 91–114, 1984., ISSN: 0167-2681
- [3] Spencer, F.C.: *The Development of Machine Tools from a User's Viewpoint*, Journal of Fluids Engineering, vol. 49, no. 8, 1928., ISSN: 0098-2202
- [4] Shan, H.S., Pandey, P.C.: *Wear of cutting tools: thermo-electric effects*, Wear, vol. 32, no. 2, p. 167–179, 1975., ISSN: 0043-1648
- [5] Pandilov, Z., Dukovski, V.: *Parallel kinematics machine tools: Overview-from history to the future*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, vol. 10, no. 2, p. 111, 2012., ISSN: 1584-2665
- [6] Bates, D.M., Watts, D.G.: *Relative curvature measures of nonlinearity*, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), vol. 42, no. 1, p. 1–16, 1980., ISSN: 0035-9246
- [7] Yao, K.-C., Chen, D.-C., et al.: *The development trends of computer numerical control (CNC) machine tool technology*, Mathematics, vol. 12, no. 13, p. 1923, 2024., ISSN: 2227-7390
- [8] Wasiukiewicz, I.: *The improvement in accuracy of high precision machine tools by means of adaptive control*, In: Proceedings of the Fifteenth International Machine Tool Design and Research Conference, Springer, p. 79–87, 1975., ISBN: 1349019887
- [9] Mekid, S., Ogedengbe, T.: *A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines*, International Journal of Precision Technology, vol. 1, no. 3–4, p. 251–286, 2010., ISSN: 1755-2060
- [10] Shore, P., Morantz, P.: *Ultra-precision: enabling our future*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 370, no. 1973, p. 3993–4014, 2012., ISSN: 1364-503X
- [11] Srinivasan, V.: *Reflections on the role of science in the evolution of dimensioning and tolerancing standards*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 227, no. 1, p. 3–11, 2013., ISSN: 0954-4054
- [12] Belić, B., Cincović, M.: *Metode naučnog rada*, Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, 2020.
- [13] de Lacalle, N.L., Mentxaka, A.L.: *Machine tools for high performance machining*, Springer Science & Business Media, 2008., ISBN: 1848003803

- [14] JCGM, B.: *JCGM 200: 2012 International Vocabulary of Metrology: Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, The Joint Committee for Guides in Metrology and The Bureau International des Poids et Mesures: Paris, France, 2012.
- [15] Fuentes-Arderiu, X.: *An inconsistency between definitions of “measurement accuracy” and “measurement error” in the VIM*, Accreditation and Quality Assurance, vol. 19, no. 3, p. 241, 2014., ISSN: 0949-1775
- [16] Brecher, C., Weck, M.: *Machine tools production systems 2: design, calculation and metrological assessment*, Springer Nature, 2021., ISBN: 3662608634
- [17] Shi, Y., Zhou, Q., et al.: *Design and testing of a linear encoder capable of measuring absolute distance*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 308, p. 111935, 2020., ISSN: 0924-4247
- [18] Park, J.W., Nguyen, H.X., et al.: *A linear compensation method for improving the accuracy of an absolute multipolar magnetic encoder*, IEEE Access, vol. 9, p. 19127–19138, 2021., ISSN: 2169-3536
- [19] Zhang, W., Wang, Y., et al.: *High-precision displacement measurement model for the grating interferometer system*, Optical Engineering, vol. 59, no. 4, p. 45101, 2020., ISSN: 0091-3286
- [20] Xu, L., Zheng, D.: *Data Acquisition and Performance Analysis of Image-Based Photonic Encoder Using Field-Programmable Gate Array (FPGA)*, Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, vol. 18, no. 12, p. 1475–1483, 2023., ISSN: 1555-130X
- [21] Schwenke, H., Knapp, W., et al.: *Geometric error measurement and compensation of machines—an update*, CIRP annals, vol. 57, no. 2, p. 660–675, 2008., ISSN: 0007-8506
- [22] Mekid, S.: *Introduction to precision machine design and error assessment*, CRC Press, 2008., ISBN: 0849378877
- [23] Ramesh, R., Mannan, M.A., et al.: *Error compensation in machine tools—a review: part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, no. 9, p. 1235–1256, 2000., ISSN: 0890-6955
- [24] Sun, T., Wang, W., et al.: *Positioning errors measurement of CNC machine tools based on J-DBB method*, Applied Sciences, vol. 11, no. 24, p. 11770, 2021., ISSN: 2076-3417
- [25] ISO: *ISO 230-2:2014 Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes*, Berlin: Beuth, 2014.
- [26] ElMelegy, A., Zahwi, S., et al.: *On straightness measurements of large CNC machine tools*, Scientific Reports, vol. 14, 2024.
- [27] Su, M., Wang, Y., et al.: *The effects of position errors compensation on the other geometric errors in the CNC machine tools*, In: 2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), IEEE, p. 939–947, 2019., ISBN: 1728157129
- [28] Khan, A.W., Chen, W.: *Correlation between linear and angular kinematic errors in prismatic joint of machine tools*, In: 2009 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, SPIE, p. 87–95, 2009.

- [29] Majda, P.: *Relation between kinematic straightness errors and angular errors of machine tool*, Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 36, 2012., DOI: 10.2478/v10264-012-0004-5
- [30] Nagel, M.: Development of an Abbe Error Minimization Concept for Coordinate Measurement Machines, Master thesis, *Stellenbosch University, Faculty of Engineering*, 2024.
- [31] He, Y.-X., Li, R.-J., et al.: *Novel compensation method of volumetric errors for micro-coordinate measuring machines using Abbe and Bryan principles*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, p. 1–10, 2022., ISSN: 0018-9456
- [32] Chen, G., Zhang, L., et al.: *Modeling Method of CNC Machine Tools' Volume Error Considering Abbe Error*, 2021., DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-631290/v1>
- [33] Hsieh, T.-H., Chou, Y.-H., et al.: *Five-axis Machine Tool Backlash Error Detection System Using Photoelectric Sensor.*, Sensors & Materials, vol. 36, 2024., ISSN: 0914-4935
- [34] Farouki, R.T., Swett, J.R.: *Real-time compensation of backlash positional errors in CNC machines by localized feedrate modulation*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 1–14, 2022., ISSN: 0268-3768
- [35] Giovannitti, E., Nabavi, S., et al.: *A virtual sensor for backlash in robotic manipulators*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 33, no. 7, p. 1921–1937, 2022., ISSN: 0956-5515
- [36] Gan, L., Wang, L., et al.: *Adaptive backlash compensation for cnc machining applications*, Machines, vol. 11, no. 2, p. 193, 2023., ISSN: 2075-1702
- [37] Kunzmann, H., Pfeifer, T., et al.: *Scales vs. laser interferometers performance and comparison of two measuring systems*, CIRP annals, vol. 42, no. 2, p. 753–767, 1993., ISSN: 0007-8506
- [38] Jaeger, G.: *Limitations of precision length measurements based on interferometers*, Measurement, vol. 43, no. 5, p. 652–658, 2010., ISSN: 0263-2241
- [39] Badami, V., de Groot, P.: *Displacement measuring interferometry*, Handbook of optical dimensional metrology, vol. 4, 2013.
- [40] Smythe, R., Moore, R.: *Instantaneous phase measuring interferometry*, Optical Engineering, vol. 23, no. 4, p. 361–364, 1984., ISSN: 0091-3286
- [41] Sommargren, G.E.: *A new laser measurement system for precision metrology*, Precision Engineering, vol. 9, no. 4, p. 179–184, 1987., ISSN: 0141-6359
- [42] Renishaw: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>, last accessed: 1 January 2024
- [43] Stone, J.A., Decker, J.E., et al.: *Advice from the CCL on the use of unstabilized lasers as standards of wavelength: the helium–neon laser at 633 nm*, Metrologia, vol. 46, no. 1, p. 11, 2008., ISSN: 0026-1394
- [44] Houllevigue, L.: *P. Zeeman - On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance (Influence du magnétisme sur les radiations émises par les corps). Communications from the laboratory of physics of the university of Leyden. N° 33; oct. nov. 1896*, J. Phys. Theor. Appl., vol. 6, no. 1, p. 143–145, 1897.

- [45] Tobias, I., Skolnick, M.L., et al.: *Derivation of a frequency-sensitive signal from a gas laser in AN axial magnetic field*, Applied Physics Letters, vol. 6, no. 10, p. 198–200, 1965., ISSN: 0003-6951
- [46] De Lang, H., Ferguson, E.T., et al.: *Accurate digital measurement of displacements by optical means*, Philips Tech Rev, vol. 30, p. 149, 1969.
- [47] Ciddor, P.E.: *Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared*, Applied optics, vol. 35, no. 9, p. 1566–1573, 1996., ISSN: 2155-3165
- [48] Edlén, B.: *The refractive index of air*, Metrologia, vol. 2, no. 2, p. 71, 1966., ISSN: 0026-1394
- [49] Birch, K.P., Downs, M.J.: *An updated Edlén equation for the refractive index of air*, Metrologia, vol. 30, no. 3, p. 155, 1993., ISSN: 0026-1394
- [50] Birch, K.P., Downs, M.J.: *Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air*, Metrologia, vol. 31, no. 4, p. 315, 1994., ISSN: 0026-1394
- [51] Estler, W.T.: *High-accuracy displacement interferometry refin air*, Applied optics, vol. 24, no. 6, p. 808–815, 1985., ISSN: 2155-3165
- [52] Neftel, A., Moor, E., et al.: *Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries*, Nature, vol. 315, no. 6014, p. 45–47, 1985., ISSN: 1476-4687, DOI: 10.1038/315045a0
- [53] Chapman, M.A. V: *Environmental compensation of linear laser interferometer readings*, Renishaw Technical white paper, TE329, 2013.
- [54] Stone, J.A., Zimmerman, J.H.: <https://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp#AppendixA>, last accessed: 24 January 2024
- [55] Burri, F.: *Messunsicherheit optischer Messmittel*, Semester work, *Engineering college, Grenchen, Switzerland*, 2001.
- [56] Japanese Standards Association (JSA): *Test code for performance and accuracy of numerically controlled machine tools*. Standard JIS B 6330, 1980.
- [57] Produktionstechnik, V.D.I.G.: *VDI/DGQ 3441 ff. Statistische Prüfung der Arbeits-und Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen*. Beuth Berlin, 1977.
- [58] Institute, A.N.S.: *B5.54. - Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers*, American Society of Mechanical Engineers, 2005., (R2020), ISBN: 0791828565
- [59] Knapp, W.: *Trends and future possibilities of ISO standards for machine tools*, Laser Metrol. Mach. Perform. X, p. 321–331, 2013.
- [60] Bryan, J.B.: *A simple method for testing measuring machines and machine tools. Part 2: Construction details*, Precision engineering, vol. 4, no. 3, p. 125–138, 1982., ISSN: 0141-6359
- [61] ISO: *ISO 230-4: 2022 Test code for machine tools — Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools*. 2022.

- [62] Chen, Y.-T., Liu, C.-S., et al.: *Geometric Error Measurement of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools: A Review*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, p. 1–22, 2024., ISSN: 2005-4602
- [63] Geng, Z., Tong, Z., et al.: *Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools*, Light: Advanced Manufacturing, vol. 2, no. 2, p. 211–227, 2021., ISSN: 2689-9620
- [64] Karmakar, S., Patel, A., et al.: *Calibration of Parallel Kinematic Machine Based on Stewart Platform—A Literature Review*, In: International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, p. V002T02A015, 2021., ISBN: 0791885372
- [65] Brosed, F.J., Aguilar, J.J., et al.: *Calibration and uncertainty budget analysis of a high precision telescopic instrument for simultaneous laser multilateration*, Measurement, vol. 190, p. 110735, 2022., ISSN: 0263-2241
- [66] Wang, W., Sun, T., et al.: *Telescopic ball bar with an indexing joint for measuring machine tool error*, Measurement Science and Technology, vol. 33, no. 10, p. 105904, 2022., ISSN: 0957-0233
- [67] Renishaw: *QC20 ballbar*, 2024.
- [68] Schwenke, I.H.: *Compensation and verification of machine tools with Hexagon technology*, 2023., DOI: 10.13140/RG.2.2.30418.32960
- [69] Muralikrishnan, B., Phillips, S., et al.: *Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review*, Precision Engineering, vol. 44, p. 13–28, 2016., ISSN: 0141-6359
- [70] Wang, J., Guo, J., et al.: *The technical method of geometric error measurement for multi-axis NC machine tool by laser tracker*, Measurement science and technology, vol. 23, no. 4, p. 45003, 2012., ISSN: 0957-0233
- [71] Iñigo, B., Ibabe, A., et al.: *Analysis of laser tracker-based volumetric error mapping strategies for large machine tools*, Metals, vol. 9, no. 7, p. 757, 2019., ISSN: 2075-4701
- [72] Wendt, K., Schwenke, H., et al.: *Error mapping of large CMMs by sequential multilateration using a laser tracker*, Proc EUSPEN, vol. 2001, 2001.
- [73] Aguado, S., Santolaria, J., et al.: *Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification*, Precision Engineering, vol. 37, no. 4, p. 929–943, 2013., ISSN: 0141-6359
- [74] Wang, Z., Zhang, R., et al.: *Real-time laser tracker compensation of robotic drilling and machining*, Journal of Manufacturing and Materials Processing, vol. 4, no. 3, p. 79, 2020., ISSN: 2504-4494
- [75] Castro, H.F.F., Burdekin, M.: *Evaluation of the measurement uncertainty of a positional error calibrator based on a laser interferometer*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, no. 3, p. 285–291, 2005., ISSN: 0890-6955
- [76] Mullany, B.: *Evaluation and comparison of the different standards used to define the positional accuracy and repeatability of numerically controlled machining center axes*, University of North Carolina, Charlotte, 2007.

- [77] Bojanic, M., Jovicic, G., et al.: *Determination of accuracy of positioning cnc machine tools*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, vol. 13, no. 3, p. 45, 2015., ISSN: 1584-2665
- [78] Lipus, L.C., Budzyn, G., et al.: *Analysis of laser interferometer measurement uncertainty by simulating error sources*, Int. J. Simul. Model, vol. 20, p. 339–350, 2021.
- [79] Weck, M., Brecher, C.: *Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*, Springer Vieweg, 2013., ISBN: 3642387489
- [80] Budimir, A., Tabakovic, S., et al.: *The Influence of the Movement Method on the Results of Machine Tool Positioning Accuracy Analysis*, Measurement Science Review, vol. 23, no. 3, p. 136–145, 2023., ISSN: 1335-8871
- [81] Schapery, R.A.: *Thermal expansion coefficients of composite materials based on energy principles*, Journal of Composite materials, vol. 2, no. 3, p. 380–404, 1968., ISSN: 0021-9983
- [82] Lin, M.C., Velinsky, S.A., et al.: *Design of the ball screw mechanism for optimal efficiency*, 1994., ISSN: 1050-0472
- [83] Kim, S.K., Cho, D.W.: *Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 37, no. 4, p. 451–464, 1997., ISSN: 0890-6955
- [84] ISO: *ISO 230–1: 2012 Test Code for Machine Tools—Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-Load or Quasi-Static Conditions*. ISO Office Geneva, 2012.
- [85] Ibaraki, S., Hiruya, M.: *A novel scheme to measure 2D error motions of linear axes by regulating the direction of a laser interferometer*, Precision Engineering, vol. 67, p. 152–159, 2021., ISSN: 0141-6359
- [86] Chapman, M.A. V, Fergusson-Kelly, R., et al.: *Interferometric straightness measurement and application to moving table machines. Technical white paper: TE325.(2023)*. 2023.
- [87] Grégis, F.: *On the meaning of measurement uncertainty*, Measurement, vol. 133, p. 41–46, 2019., ISSN: 0263-2241
- [88] BIPM, I., IFCC, I., et al.: *Evaluation of measurement data -guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100: 2008 GUM 1995 with minor corrections*, Joint Committee for Guides in Metrology, vol. 98, 2008.
- [89] Csizmadia, B.: *Kísérletek tervezése*, 2016.
- [90] ISO: *ISO/TR 230-9:2005 Test code for machine tools — Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series ISO 230, basic equations*. 2005.
- [91] Steinmetz, C.R.: *Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry*, Precision engineering, vol. 12, no. 1, p. 12–24, 1990., ISSN: 0141-6359
- [92] ISO: *ISO 230-3:2007 Test code for machine tools — Part 3: Determination of thermal effects*. 2007., p. 50.

- [93] Knapp, W.: *Measurement uncertainty and machine tool testing*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 1, no. 51, p. 459–462, 2002., ISSN: 0007-8506
- [94] Sun, G., He, G., et al.: *Effects of geometrical errors of guideways on the repeatability of positioning of linear axes of machine tools*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 98, p. 2319–2333, 2018., ISSN: 0268-3768
- [95] Tabaković, S., Živanović, S., et al.: *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, no. 4, p. 16–21, 2021.
- [96] Zivanovic, S., Tabakovic, S., et al.: *Modelling and analysis of machine tool with parallel–serial kinematics based on OX glide mechanism*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 43, p. 1–15, 2021., ISSN: 1678-5878
- [97] Živanović, S., Tabaković, S., et al.: *Configuring a machine tool based on hybrid OX glide mechanism*, machine design, vol. 8, no. 4, p. 141–148, 2016., ISSN: 1821-1259
- [98] Tabaković, S., Živanović, S., et al.: *The application of virtual prototype in design of a hybrid mechanism based machine tools*, Journal of Production Engineering, vol. 18, no. 2, p. 77–80, 2015., ISSN: 1821-4932
- [99] Budimir, A.B., Tabaković, S., et al.: *Kinematic analysis of machine tool with non-linear kinematics for calibration purposes*, In: The 6th International Conference ‘Mechanical Engineering in XXI Century’, 2023.
- [100] Živanović, S., Tabaković, S., et al.: *Machining simulation and verification of tool path for CNC machine tools with serial and hybrid kinematics*, In: Proceedings of the IX International Conference Heavy Machinery-HM 2017 (International Triennial Conference Heavy Machinery), Zlatibor, June 28–July 1 2017, Faculty of Mechanical and Civil Engineering, Kraljevo, p. B-63, 2017., ISBN: 868263189X
- [101] Tsai, L.-W.: *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley & Sons, 1999., ISBN: 0471325937
- [102] Merlet, J.-P.: *A formal-numerical approach for robust in-workspace singularity detection*, IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, no. 3, p. 393–402, 2007., ISSN: 1552-3098
- [103] Neugebauer, R.: *Parallelkinematische Maschinen: Entwurf, Konstruktion, Anwendung*, Springer, 2006.
- [104] Zhang, Z., Xie, G., et al.: *Kinematic calibration of cable-driven parallel robots considering the pulley kinematics*, Mechanism and Machine Theory, vol. 169, p. 104648, 2022., ISSN: 0094-114X
- [105] Tlustý, J., Ziegert, J.C., et al.: *A comparison of stiffness characteristics of serial and parallel machine tools*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 2, no. 1, p. 67–76, 2000., ISSN: 1526-6125
- [106] Majou, F., Wenger, P., et al.: *The design of parallel kinematic machine tools using kinetostatic performance criteria*, arXiv preprint arXiv:0705.1038, 2007.
- [107] McCloy, D.: *Some comparisons of serial-driven and parallel-driven manipulators*, Robotica, vol. 8, no. 4, p. 355–362, 1990., ISSN: 1469-8668

- [108] Shneor, Y., Portman, V.T.: *Stiffness of 5-axis machines with serial, parallel, and hybrid kinematics: Evaluation and comparison*, CIRP annals, vol. 59, no. 1, p. 409–412, 2010., ISSN: 0007-8506
- [109] Russo, M., Zhang, D., et al.: *A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, p. 104118, 2024., ISSN: 0890-6955
- [110] Zou, Q., Zhang, D., et al.: *Kinematic and dynamic analysis of a 3-DOF parallel mechanism*, International Journal of Mechanics and Materials in Design, vol. 17, no. 3, p. 587–599, 2021., ISSN: 1569-1713
- [111] Dong, C., Liu, H., et al.: *Dynamic modeling and design of a 5-DOF hybrid robot for machining*, Mechanism and Machine Theory, vol. 165, p. 104438, 2021., ISSN: 0094-114X
- [112] Nešovanović, L., Živanović, S.: *Workspace and kinematic structure analysis of a 6-DOF Lambda parallel kinematic machine*, International Journal of Electrical Engineering and Computing, vol. 6, no. 1, p. 1–8, 2022., ISSN: 2566-3682
- [113] Zhang, H., Fang, H., et al.: *Workspace analysis of a hybrid kinematic machine tool with high rotational applications*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2018, 2018., ISSN: 1024-123X
- [114] Shen, H., Zhao, Y., et al.: *Kinematic design of a translational parallel mechanism based on sub-kinematic chain determined workspace superposition*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 235, no. 24, p. 7534–7549, 2021., ISSN: 0954-4062
- [115] Aboulissane, B., El Bakkali, L., et al.: *Workspace analysis and optimization of the parallel robots based on computer-aided design approach*, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, vol. 18, no. 1, p. 79–89, 2020., ISSN: 2335-0164
- [116] Rasheed, S.M.M.H., Shujah, A., et al.: *A Novel Approach for Multi-Criteria Workspace Optimization of Parallel Kinematic Machines*, In: 2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI), IEEE, p. 1–5, 2023., ISBN: 1665464720
- [117] Khoshbin, E., Youssef, K., et al.: *Reconfigurable fully constrained cable-driven parallel mechanism for avoiding collision between cables with human*, Robotica, vol. 40, no. 12, p. 4405–4430, 2022., ISSN: 0263-5747
- [118] Farzaneh Kaloorazi, M.H., Masouleh, M.T., et al.: *Collision-free workspace of parallel mechanisms based on an interval analysis approach*, Robotica, vol. 35, no. 8, p. 1747–1760, 2017., ISSN: 0263-5747
- [119] Harib, K.H., Moustafa, K.A.F., et al.: *Parallel, serial and hybrid machine tools and robotics structures: comparative study on optimum kinematic designs*, Serial and Parallel Robot Manipulators-Kinematics, Dynamics, Control and Optimization, Dr. Serdar Kucuk (Ed.), 2012.
- [120] Tabaković, S.: *Razvoj programskog sistema za automatizovano projektovanje mašina alatki na bazi paralelnih mehanizama i optimalni izbor njihovih komponenti* doktorska disertacija, Doctoral dissertation, University in Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 2008.

- [121] Milutinović, M., Slavković, N., et al.: *Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool*, Fme Transactions, vol. 41, no. 1, p. 1–10, 2013., ISSN: 1451-2092
- [122] Wang, J., Wang, Z., et al.: *Nonlinearity for a parallel kinematic machine tool and its application to interpolation accuracy analysis*, Science in China Series E: Technological Sciences, vol. 45, p. 97–105, 2002., ISSN: 1006-9321
- [123] Bates, D.M., Watts, D.G.: *Relative curvature measures of nonlinearity*, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), vol. 42, no. 1, p. 1–16, 1980., ISSN: 0035-9246
- [124] Karimi, D., Nategh, M.J.: *Contour maps for developing optimal toolpath and workpiece setup in hexapod machine tools by considering the kinematics nonlinearity*, Proceedings of the institution of mechanical engineers, part b: journal of engineering manufacture, vol. 230, no. 9, p. 1572–1583, 2016., ISSN: 0954-4054
- [125] Akhbari, S., Ghadimzadeh Alamdari, A., et al.: *Circular motion analysis for a novel 4-DOF parallel kinematic machine*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 41, p. 1–17, 2019., ISSN: 1678-5878
- [126] Akhbari, S., Mahboubkhah, M., et al.: *Linear motion analysis for a novel 4-DOF parallel kinematic machine*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 41, 2019., DOI: 10.1007/s40430-019-1927-0
- [127] Wang, Y., Huang, T., et al.: *Interpolation error prediction of a three-degree parallel kinematic machine*, J. Mech. Des., vol. 126, no. 5, p. 932–937, 2004., ISSN: 1050-0472
- [128] Tang, T., Zhang, J.: *Conceptual design and kinetostatic analysis of a modular parallel kinematic machine-based hybrid machine tool for large aeronautic components*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 57, p. 1–16, 2019., ISSN: 0736-5845
- [129] Yen, P.-L., Wang, C.-H., et al.: *Optimization design for a compact redundant hybrid parallel kinematic machine*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 58, p. 172–180, 2019., ISSN: 0736-5845
- [130] Li, T., Ye, P.: *The measurement of kinematic accuracy for various configurations of parallel manipulators*, In: SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483), IEEE, p. 1122–1129, 2003., ISBN: 0780379527
- [131] Weck, M., Staimer, D.: *Accuracy issues of parallel kinematic machine tools*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, vol. 216, no. 1, p. 51–57, 2002., ISSN: 1464-4193
- [132] Huang, T., Whitehouse, D.J., et al.: *The local dexterity, optimal architecture and design criteria of parallel machine tools*, CIRP Annals, vol. 47, no. 1, p. 346–350, 1998., ISSN: 0007-8506
- [133] Luo, X., Xie, F., et al.: *Error modeling and sensitivity analysis of a novel 5-degree-of-freedom parallel kinematic machine tool*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 233, no. 6, p. 1637–1652, 2019., ISSN: 0954-4054

- [134] Rezaei, A., Akbarzadeh, A.: *Study on Jacobian, singularity and kinematics sensitivity of the FUM 3-PSP parallel manipulator*, Mechanism and machine theory, vol. 86, p. 211–234, 2015., ISSN: 0094-114X
- [135] Akhbari, S., Mahboubkhah, M., et al.: *Experimental and analytical evaluation of tool path error using computer integrated nonlinear kinematical modeling for a 4DOF parallel milling machine*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 35, no. 4–5, p. 527–555, 2022., ISSN: 0951-192X
- [136] Liu, Q., Jin, X.J., et al.: *A real-time high-precision interpolation algorithm for general-typed parametric curves in CNC machine tools*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 23, no. 2, p. 168–176, 2010., ISSN: 0951-192X
- [137] Fan, W., Lee, C., et al.: *Real-time Bezier interpolation satisfying chord error constraint for CNC tool path*, Science China Technological Sciences, vol. 59, p. 203–213, 2016., ISSN: 1674-7321
- [138] Vasilić, G. V: *Koncepcijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki*, Doctoral dissertation, *University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering*, 2023.
- [139] Huang, C., Xie, F., et al.: *Error modeling and sensitivity analysis of a parallel robot with R-(SS) 2 branches*, International Journal of Intelligent Robotics and Applications, vol. 4, no. 4, p. 416–428, 2020., ISSN: 2366-5971
- [140] Karimi, D., Nategh, M.J.: *Kinematic nonlinearity analysis in hexapod machine tools: Symmetry and regional accuracy of workspace*, Mechanism and Machine Theory, vol. 71, p. 115–125, 2014., DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.09.007
- [141] Yáñez-Valdez, R., Ruiz-Torres, M., et al.: *Resolution of a 3 RRR planar parallel mechanism*, Applied Mechanics and Materials, vol. 15, p. 61–66, 2009., ISSN: 1662-7482
- [142] Valdez, R.Y., Sánchez, E.M., et al.: *Methodology for calculating the resolution of a planar parallel mechanism*, In: 2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'08), IEEE, p. 467–471, 2008., ISBN: 0769533205
- [143] Luo, Y., Gao, J., et al.: *Accurate error compensation method for multi-axis parallel machine via singularized jacobi geometric parameter correction and coupling error evaluation*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 89, p. 102771, 2024., ISSN: 0736-5845
- [144] Hack, F., Fülöp, F., et al.: *Négyjegyű függvénytáblázatok, összefüggések és adatok*, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 2004.
- [145] Yang, L., Zhang, X., et al.: *Dynamic error of multiaxis machine tools considering position dependent structural dynamics and axis coupling inertial forces*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 236, no. 3, p. 281–295, 2022., ISSN: 0954-4054
- [146] Geng, C., Wu, Y., et al.: *Analysis of nonlinear error caused by motions of rotation axes for five-axis machine tools with orthogonal configuration*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2018, 2018., ISSN: 1024-123X
- [147] Widiyarto, M.H.N., Ford, D.G., et al.: *Evaluating the structural dynamics of a vertical milling machine*, WIT Transactions on Engineering Sciences, vol. 44, 2003., ISSN: 1853129909

- [148] Zhang, T., Zhang, D., et al.: *Investigation on the load-inertia ratio of machine tools working in high speed and high acceleration processes*, Mechanism and Machine Theory, vol. 155, p. 104093, 2021., ISSN: 0094-114X
- [149] Andolfatto, L., Lavernhe, S., et al.: *Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 51, no. 10–11, p. 787–796, 2011., ISSN: 0890-6955
- [150] Nishio, K., Sato, R., et al.: *Influence of motion errors of feed drive systems on machined surface*, Journal of advanced mechanical design, systems, and manufacturing, vol. 6, no. 6, p. 781–791, 2012., ISSN: 1881-3054
- [151] Csernák, G., Stepán, G.: *Rezgéstan*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem, 2019.
- [152] Todić, V.: *Primena faktorijskih ogleda*, Master thesis, University in Novi Sad, Faculty of Sciences, 2014.
- [153] Vasilić, G., Živanović, S., et al.: *Koncept kompleksne redundantne mašine alatke namenjene za proces obrade sečenja žicom*, In: 44. JUPITER konferencija, 40. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, 16-17. oktobar 2024., Univerzitet u Beogradu, Mašinski Fakultet, p. 3–83, 2024., ISBN: 8660602048
- [154] Cheng, L., Zhao, Y., et al.: *Dynamic measurement of the positioning accuracy of redundantly actuated parallel machine tool*, In: 2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, IEEE, p. 634–639, 2011., ISBN: 1457708167
- [155] Ecorchard, G., Neugebauer, R., et al.: *Elasto-geometrical modeling and calibration of redundantly actuated PKMs*, Mechanism and machine theory, vol. 45, no. 5, p. 795–810, 2010., ISSN: 0094-114X
- [156] Jiang, Y., Li, T., et al.: *Dynamic modeling and redundant force optimization of a 2-DOF parallel kinematic machine with kinematic redundancy*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 32, p. 1–10, 2015., ISSN: 0736-5845
- [157] Li, Y., Yu, M., et al.: *A review of thermal error modeling methods for machine tools*, Applied Sciences, vol. 11, no. 11, p. 5216, 2021., ISSN: 2076-3417
- [158] Freeman, J.M., Ford, D.G.: *The analysis of geometrical and thermal errors of non-Cartesian structures*, WIT Transactions on Engineering Sciences, vol. 16, 2024., ISSN: 1853125369

Прилог А

Табеле и дијаграми са параметрима тачности позиционирања клизача J_0 и J_1

Овај прилог садржи све табеле и дијаграме са вредностима одступања од позиције и параметрима који описују тачност позиције појединачних клизача прерачунатих са платформе. Додатно ту се налазе и дијаграми са стандардним девијацијама и средњим девијацијама тачности позиционирања.

Табела 1.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 1. експерименталном поставком

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мерна познаница - P [mm]	5	50	99	145	190	236	280	330	375
Мер познаница	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j=1$	5195	11895	14766	19585	21868	26295	28477	33889	33317
									549,71
2	6150	11755	15032	19542	22138	26089	28610	33692	33421
									550,12
3	6458	12047	15261	19597	22348	26143	28795	33065	33539
									550,56
4	6499	12000	15274	19722	22270	26215	28749	33081	33546
									551,11
5	6561	12050	15265	19812	22262	26317	28968	33135	33570
									552,04
6	6655	12227	15590	19861	22362	26352	28984	33172	33678
									552,58
Средње јединице одступања од плоче [mm]	6559	12011	15164	19687	22208	26235	28762	33046	33509
									551,02
Централна вредност одступања [mm]	9185	13425	24221	29904	34505	39006	42205	45616	48577
Величина одступања средњих вредности - B [mm]	-5651	-4527	-4027	-2285	-1594	-2039	-2822	-2529	-831
Стандардна девијација - s [mm]	338	190	227	132	185	194	200	104	125
									111
Јединице повлачења - R [mm]	1319	758	910	528	738	416	799	417	501
									446
Доксери повлачења - R [mm]	6650	5241	4604	2691	2067	2616	3578	3095	1492
Доксери повлачења [mm]	Доксери	Доксери	Доксери	Доксери	Доксери	Доксери	Доксери	Доксери	Доксери
Доксери повлачења - s	.	.	-831						
Доксери повлачења - B	.	.	-2922						
Доксери повлачења - R	1319	758	6690						
Доксери повлачења - E	39747	34027	40578						
Доксери повлачења - M	.	.	55337						
Доксери повлачења - A	40720	55605	41536						

Табела 2.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Омер позиционирања	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
$j = 1$	72,70	120,47	346,28	400,28	482,87	502,97	558,01	583,68	614,54
2	72,25	118,70	345,13	400,71	482,18	501,74	557,23	583,24	616,64
Одступање од позиције - x_{ij}	72,86	118,34	345,46	398,97	481,22	501,53	559,02	582,20	615,98
[mm]	72,01	118,00	347,50	396,52	480,69	501,09	558,04	583,06	614,26
5	73,09	118,68	344,29	399,95	482,82	500,67	557,10	583,94	614,36
6	73,30	117,26	345,76	397,75	482,10	501,11	558,99	582,81	615,71
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	72,70	118,58	344,75	399,03	481,98	501,52	558,06	583,15	615,25
Централна вредност одступања [mm]	95,64	276,07	371,89	439,22	491,75	541,94	574,96	599,20	614,51
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-45,87	-60,39	-54,27	-22,15	-19,54	-24,49	-33,80	-32,09	-16,00
Стандардна девијација - s_i [mm]	0,49	1,07	1,07	0,67	0,87	0,94	0,82	0,62	1,00
Једносмерна повекљивост - R_i [mm]	1,97	4,27	4,27	2,68	3,49	3,75	3,30	2,49	3,99
Двосмерна повекљивост - R_i [mm]	49,00	64,23	59,65	24,11	22,89	28,10	36,64	35,33	18,24
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-16,00						
Средња вредност распона одступања	-	-	-34,29						
Повекљивост по оси - R	4,27	6,48	64,23						
Систематска грешка - E	533,81	503,93	549,81						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	518,87						
Грешка позиционирања - A	535,80	507,30	552,03						

Табела 3.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	68,86	117,59	236,23	304,56	336,54	392,92	421,05	442,83	477,38
2	67,70	118,41	234,41	303,01	335,84	391,37	422,27	441,43	475,89
Одступање од позиције - x_{ij}	66,83	117,81	233,72	302,94	334,32	392,96	420,59	441,44	476,68
3	66,59	117,47	234,61	303,00	335,40	394,27	421,07	440,49	474,91
4	66,10	119,62	233,87	304,85	335,27	391,94	419,52	441,31	476,21
5	65,50	118,03	235,08	303,77	336,10	394,90	419,42	440,66	474,81
6	66,93	118,15	234,65	303,69	335,57	393,06	420,65	441,36	475,98
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	92,54	269,17	364,32	431,01	484,78	536,18	568,22	593,48	611,63
Централна вредност одступања [mm]	-51,22	-69,03	-57,48	-20,71	-17,60	-26,56	-34,55	-32,73	-16,13
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	1,20	0,79	0,92	0,85	0,77	1,34	1,07	0,83	1,00
Стандардна девијација - s_i [mm]	4,79	3,17	3,68	3,40	3,09	5,36	4,29	3,30	4,00
Једносмерна понављаност - R_i [mm]	55,20	72,57	61,71	24,50	21,35	29,75	39,24	37,11	18,05
Двосмерна понављаност - R_d [mm]									
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-16,13						
Средња вредност распона одступања	-	-	-36,22						
Понављаност по оси - R	4,79	6,17	72,57						
Систематска грешка - E	536,64	501,55	552,77						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	519,09						
Грешка позиционирања - A	539,65	504,44	556,47						

Табела 4.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 4. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Одступање од позиције - x_j [mm]	$j = 1$	74,27	115,36	166,87	201,09	240,56	272,27	308,88	326,10
	2	75,49	116,97	164,75	200,14	240,79	271,94	308,55	325,47
	3	74,50	117,56	164,42	200,19	238,99	274,08	308,26	326,04
	4	74,40	116,88	164,59	201,47	239,62	271,64	308,43	326,67
	5	77,39	120,59	166,67	202,62	239,58	273,86	308,39	327,39
	6	77,67	122,09	166,48	202,34	239,34	275,33	308,30	327,85
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	75,62	118,24	165,63	201,31	239,81	273,19	308,47	326,59	373,85
Централна вредност одступања [mm]	96,93	183,47	256,50	317,53	364,81	412,79	448,71	476,67	498,86
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-42,62	-35,68	-33,37	-18,12	-18,08	-26,50	-30,31	-27,58	-13,43
Стандардна девијација - s_i [mm]	1,54	2,55	1,15	1,05	0,71	1,46	0,22	0,90	0,66
Једносмерна понављивост - R_i [mm]	6,18	10,22	4,62	4,19	2,83	5,83	0,89	3,59	2,62
Двосмерна понављивост - R_i [mm]	50,82	40,08	37,70	20,36	22,25	28,13	33,94	30,32	15,99
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-	-13,43					
Средња вредност разлика одступања	-	-	-	-27,30					
Понављивост по оси - R	6,18	10,22	50,82						
Систематска грешка - E	416,53	387,34	429,96						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	401,93						
Грешка позиционирања - A	420,24	394,39	434,99						

Табела 5.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j = 1$	74,71	154,51	229,60	298,49	363,77	389,70	420,84	449,04	477,49
2	74,30	154,71	229,45	297,75	344,65	389,25	420,65	449,15	478,20
3	73,45	152,78	228,45	297,34	346,24	390,20	420,82	450,18	477,78
4	72,61	152,42	228,71	297,06	345,36	389,44	420,65	450,20	478,48
5	71,33	153,66	228,91	297,69	346,08	389,45	421,71	450,84	477,78
6	70,24	151,97	227,62	296,64	345,15	389,89	421,33	450,99	478,47
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	72,77	152,81	228,79	297,49	345,49	389,66	421,00	449,89	478,03
Централна вредност одступања [mm]	92,79	175,76	248,60	306,98	354,85	401,23	455,96	463,96	486,51
Распон одступања у средњих вредности - B_i [mm]	-40,04	-39,20	-39,62	-18,98	-18,72	-23,14	-29,92	-28,14	-13,87
Стандардна девијација - s_i [mm]	1,73	0,83	0,72	0,91	0,59	0,35	0,43	0,62	0,41
Једносмерна повезаност - R_i [mm]	6,94	3,33	2,17	2,56	2,38	1,39	1,71	2,25	1,65
Двосмерна повезаност - R_i [mm]	45,17	41,33	42,87	20,84	20,88	24,29	31,90	30,21	15,97
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-13,87						
Средња вредност распона одступања	-	-	-27,96						
Повезаност по оси - R	6,94	3,63	45,17						
Систематска грешка - E	406,80	380,64	420,67						
Максимални двосмерни грешка позиционирања - M	-	-	393,72						
Грешка позиционирања - A	411,48	383,18	425,02						

Табела 6.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени б. експерименталном поставком

f	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	57,43	112,38	228,34	301,24	337,99	396,61	420,56	446,83	476,10
2	57,09	110,70	228,27	300,92	336,29	395,17	417,64	446,84	474,62
Одступање од позиције - x_{ij} [mm]	57,71	113,42	232,09	302,02	338,12	397,64	420,29	446,97	477,16
4	57,32	114,21	230,29	302,49	338,27	395,71	418,24	447,09	475,74
5	62,75	112,91	232,12	304,57	338,83	397,63	421,43	447,31	477,79
6	60,85	116,30	232,03	303,81	338,08	397,94	418,70	447,63	476,04
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	58,86	113,32	230,52	302,51	337,93	396,79	419,48	447,11	476,24
Централна вредност одступања [mm]	86,09	266,52	367,36	433,29	486,76	539,50	570,92	598,00	616,22
Раслик одступања средњих вредности - B_i [mm]	-54,46	-71,99	-58,86	-27,63	-21,03	-32,63	-39,62	-36,22	-17,71
Стандардна девијација - s_i [mm]	2,37	1,88	1,86	1,44	0,86	1,15	1,50	0,31	1,11
Једносмерна повлађивост - R_i [mm]	9,46	7,50	7,42	5,75	3,43	4,58	5,99	1,25	4,46
Двосмерна повлађивост - R_i [mm]	62,94	78,57	62,86	31,25	24,41	39,48	45,24	42,98	22,22
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-17,71						
Средња вредност распона одступања	-	-	-40,02						
Повлађивост по оси - R	9,46	8,12	78,57						
Систематска грешка - E	548,50	511,75	566,21						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	530,13						
Грешка позиционирања - A	555,72	517,54	572,97						

Табела 7.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P [mm]	5	50	99	143	190	256	280	330	375
Смер померања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j = 1$	59,51	111,67	231,78	304,86	327,57	388,79	406,35	445,52	463,18
2	58,03	110,87	232,28	303,54	327,41	389,26	406,26	445,66	461,83
3	58,16	111,81	233,44	303,87	326,82	389,11	406,55	446,21	461,36
4	58,22	111,37	233,36	304,71	327,83	388,51	406,82	446,24	462,29
5	58,97	111,57	233,94	304,02	326,74	388,86	407,25	445,65	461,93
6	58,07	111,21	233,83	305,29	326,92	389,00	406,31	446,29	461,70
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	58,49	111,42	233,10	304,38	327,22	388,92	406,59	445,93	462,05
Централна вредност одступања [mm]	84,95	268,74	358,07	426,26	478,04	528,59	555,32	577,48	593,37
Распон одступања средњих вредности - B , [mm]	-52,93	-71,28	-61,71	-39,34	-31,98	-38,87	-41,69	-37,78	-15,40
Стандардна девијација - s , [mm]	0,61	0,34	0,88	0,67	0,45	0,26	0,38	0,35	0,63
Једносмерна покривљивост - R , [mm]	2,43	1,38	3,50	2,68	1,79	1,05	1,53	1,42	2,52
Двосмерна покривљивост - R , [mm]	54,83	74,37	63,13	40,81	34,89	41,70	44,46	41,37	18,23
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-15,40						
Средња вредност распона одступања	-	-	-43,44						
Покривљивост по оси - R	3,50	4,52	74,37						
Систематска грешка - E	527,18	489,66	542,58						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	508,42						
Грешка позиционирања - A	529,25	492,32	545,78						

Табела 8.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [µm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j = 1$	71,63	110,21	234,67	306,58	347,92	404,35	428,24	456,43	507,61
2	71,09	110,36	232,66	307,63	345,50	402,32	427,74	455,36	507,65
3	71,42	114,13	244,37	306,07	344,88	401,46	426,95	454,89	507,07
4	71,67	115,39	245,79	304,85	345,85	400,93	425,98	454,60	507,05
5	70,72	114,00	246,06	307,19	344,06	401,87	425,78	454,51	507,36
6	70,44	115,62	244,86	305,73	343,72	403,92	425,84	454,57	508,15
Средње једносмерно одступање од позиције [µm]	71,16	113,28	241,40	306,34	345,32	402,48	426,76	455,06	507,48
Централна вредност одступања [µm]	92,22	273,87	373,90	440,91	494,02	543,60	575,20	601,31	617,46
Распон одступања средњих вредности - B_i [µm]	-42,12	-64,94	-57,15	-28,30	-26,92	-32,53	-40,77	-36,29	-19,17
Стандардна девијација - s_i [µm]	0,50	2,41	6,06	1,01	1,51	1,37	1,06	0,74	0,42
Једносмерна поновљивост - R_i [µm]	2,02	9,65	24,24	4,05	6,05	5,49	4,23	2,96	1,67
Двосмерна поновљивост - R_i [µm]	47,96	79,08	62,92	31,90	29,52	33,65	42,64	38,66	20,90
Параметар [µm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-19,17						
Средња вредност распона одступања	-	-	-38,69						
Поновљивост по оси - R	24,24	9,65	79,08						
Систематска грешка - E	536,71	513,76	555,88						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	525,23						
Грешка позиционирања - A	538,67	519,36	557,67						

Табела 9.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [µm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	57,08	108,36	299,97	394,51	470,66	516,82	545,62	572,38	598,72
2	56,33	107,26	300,59	390,98	470,12	516,91	546,66	574,00	599,22
3	56,05	107,12	300,69	391,31	469,23	516,60	546,06	572,07	599,24
4	55,75	106,48	301,08	394,54	470,28	515,06	545,01	573,28	599,60
5	56,44	107,20	300,95	390,60	468,94	514,52	546,00	573,19	599,10
6	54,99	107,42	301,07	393,63	470,53	514,68	544,92	572,46	598,79
Средње једносмерно одступање од позиције [µm]	56,11	107,31	300,72	392,04	469,96	515,77	545,71	572,90	599,11
Средња вредност одступања [µm]	81,71	265,14	362,68	428,47	482,97	533,02	565,72	591,71	609,05
Распон одступања средњих вредности - B_i [µm]	-51,20	-71,16	-58,71	-26,09	-26,01	-34,52	-40,01	-37,63	-19,88
Стандардна девијација - s_i [µm]	0,71	0,65	0,42	0,86	0,71	1,13	0,67	0,72	0,87
Једносмерна повољивост - R_i [µm]	2,82	2,44	1,68	3,45	2,84	4,51	2,68	2,88	3,48
Двосмерна повољивост - R_i [µm]	53,83	73,31	64,39	29,88	28,23	38,27	43,49	40,81	21,68
Параметар [µm]	Једносмерна ↑	Двосмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-19,88						
Средња вредност распона одступања	-	-	-40,58						
Повољивост по оси - R	4,51	7,83	73,31						
Систематска грешка - E	545,01	511,69	562,89						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	527,35						
Грешка позиционирања - A	545,07	514,05	565,44						

Табела 10.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 1. експерименталном поставком

f	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [μm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
$j = 1$	45,77	93,94	180,30	239,15	252,41	303,50	312,15	338,58	351,26
2	48,58	92,84	183,55	238,62	255,52	301,12	313,52	339,71	352,35
Одступање од позиције - x_{ij}	51,01	95,15	186,35	239,30	257,94	301,75	315,61	339,85	353,38
3	51,34	94,78	186,51	240,82	257,04	302,57	315,13	340,69	353,67
4	51,82	95,18	186,37	241,92	256,95	303,75	317,53	341,28	353,92
5	52,87	97,33	187,92	242,52	258,10	304,15	317,70	341,69	355,06
6	50,23	94,87	185,17	240,39	256,33	302,81	315,27	340,30	353,28
Средње једносмерно одступање од позиције [μm]	72,55	212,78	279,57	327,79	361,68	395,85	412,53	423,11	427,78
Централна вредност одступања [μm]	-44,64	-55,22	-46,48	-25,03	-16,80	-20,69	-27,58	-23,99	-7,64
Распон одступања средњих вредности - B_i [μm]	2,61	1,50	2,78	1,61	2,13	1,20	2,19	1,14	1,32
Стандардна девијација - s_i [μm]	10,42	5,99	11,11	6,44	8,52	4,80	8,76	4,58	5,28
Једносмерна поновљивост - R_i [μm]	52,84	64,00	53,14	31,69	21,79	26,54	34,97	29,34	13,72
Двосмерна поновљивост - R_i [μm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-7,64						
Средња вредност распона одступања	-	-	-29,79						
Поновљивост по оси - R	11,11	6,59	64,00						
Систематска грешка - E	373,73	340,23	384,87						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	355,23						
Грешка позиционирања - A	382,29	345,47	392,33						

Табела 11.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j = 1$	139,63	231,39	400,68	496,36	583,34	597,22	593,04	617,72	601,50
2	138,78	228,01	396,86	494,63	585,97	567,55	598,01	616,21	600,09
3	139,95	227,31	397,05	493,07	583,44	567,29	596,97	615,95	601,67
4	138,32	226,66	397,74	491,14	582,86	579,85	597,58	615,41	602,68
5	140,39	227,95	396,36	495,25	584,86	581,65	597,38	614,89	600,32
6	140,80	225,24	396,30	494,32	585,23	581,65	596,91	615,44	602,44
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	139,65	227,76	397,50	495,13	583,52	567,96	597,34	615,94	601,45
Централна вредност одступања [mm]	183,70	446,31	543,84	582,65	603,94	615,35	602,65	588,08	562,89
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-88,12	-97,63	-79,37	-29,39	-24,00	-27,80	-35,43	-31,50	-14,66
Стандардна девијација - s_i [mm]	0,95	2,05	1,65	1,46	1,56	2,37	0,89	0,41	1,07
Једносмерна покривљивост - R_i [mm]	3,79	8,21	6,58	5,85	6,24	9,48	3,56	1,64	4,28
Двосмерна покривљивост - R_i [mm]	94,11	103,85	87,23	31,99	28,11	31,91	38,40	34,68	16,71
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-14,66						
Средња вредност распина одступања	-	-	-47,54						
Покривљивост по оси - R	6,58	9,48	103,85						
Систематска грешка - E	461,80	401,49	489,61						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	431,65						
Грешка позиционирања - A	465,83	407,58	493,48						

Табела 12.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	54,39	92,88	184,37	237,69	260,35	303,96	322,47	339,15	362,29
2	53,48	93,53	182,94	236,48	259,80	302,76	323,40	338,08	361,16
Одступање од позиције - x_{ij} [mm]	52,78	93,06	182,40	236,42	258,63	304,00	322,12	338,09	361,76
4	52,60	92,79	183,10	236,47	259,46	305,01	322,49	337,36	360,42
5	52,21	94,49	182,52	237,91	259,36	303,21	321,30	337,99	361,40
6	51,74	93,23	183,47	237,07	260,00	305,49	321,23	337,49	360,34
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	52,87	93,33	183,13	237,01	259,60	304,07	322,17	338,03	361,23
Централна вредност одступања [mm]	73,10	210,07	281,84	330,10	367,91	402,68	421,66	435,62	443,32
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-40,46	-53,88	-44,47	-15,86	-13,35	-19,95	-25,64	-24,03	-11,69
Стандардни девијација - s_i [mm]	0,95	0,63	0,72	0,66	0,60	1,04	0,82	0,63	0,76
Једносмерна повезљивост - R_i [mm]	3,78	2,50	2,87	2,65	2,39	4,15	3,29	2,53	3,04
Двосмерна повезљивост - R_i [mm]	43,60	56,64	47,74	18,77	16,21	22,33	29,12	27,24	13,08
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-11,69						
Средња вредност расипа одступања	-	-	-27,70						
Повезљивост по оси - R	3,78	4,53	56,64						
Систематска грешка - E	384,61	355,84	396,30						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	370,23						
Грешка позиционирања - A	386,95	358,04	399,14						

Табела 13.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 4. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	256	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	58,66	91,12	203,76	245,55	277,65	314,26	338,57	357,45	375,95
2	59,63	92,39	201,17	244,38	277,92	313,88	338,21	356,76	375,74
Одступање од позиције - x_y	58,85	92,86	200,77	244,45	275,84	316,34	337,90	357,39	375,28
3	58,76	92,32	200,97	246,01	276,57	313,53	338,08	358,08	374,20
4	61,13	95,25	203,52	247,42	276,53	316,09	338,03	358,86	374,79
5	61,35	96,44	203,28	247,07	276,25	317,79	337,94	359,37	374,54
6	59,73	93,40	202,25	245,81	276,79	315,32	338,12	357,98	375,08
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	76,56	224,03	296,05	348,05	384,61	418,92	438,59	452,11	458,72
Централна вредност одступања [mm]	-33,67	-43,57	-38,52	-19,86	-19,06	-26,89	-29,62	-26,16	-12,35
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	1,22	2,02	1,41	1,28	0,82	1,68	0,82	0,24	0,98
Стандардна девијација - s_i [mm]	4,88	8,07	5,64	5,11	3,26	6,73	2,49	1,75	3,44
Једносмерна површина - R_i [mm]	40,14	48,95	43,52	22,32	23,46	28,55	33,17	28,76	14,70
Двосмерна површина - R_i [mm]	395,82	377,55	409,63	377,55	409,63	377,55	409,63	377,55	409,63
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални расток одступања - B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Средња вредност расток одступања	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Површина по оси - R	5,64	8,07	48,95	48,95	48,95	48,95	48,95	48,95	48,95
Систематска грешка - E	392,82	371,80	405,46	405,46	405,46	405,46	405,46	405,46	405,46
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Грешка позиционирања - A	395,82	377,55	409,63	377,55	409,63	377,55	409,63	377,55	409,63

Табела 14.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Одступање од позиције - x_{ij} [mm]	$j = 1$	59,01	90,02	188,67	236,71	265,00	310,11	327,19	347,42
	2	58,69	88,52	188,91	236,69	264,84	309,93	326,37	347,03
	3	58,01	89,08	188,69	236,44	263,68	308,95	325,92	346,81
	4	57,35	88,80	187,37	235,78	263,98	308,23	325,62	346,77
	5	56,34	89,77	187,58	236,03	264,22	311,14	326,30	346,45
	6	55,48	88,44	188,24	234,98	262,72	310,43	325,16	346,89
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	57,48	89,11	188,24	236,10	264,07	309,80	326,09	346,90	364,24
Централна вредност одступања [mm]	73,29	212,17	286,94	336,49	374,11	407,19	426,12	440,06	447,36
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-31,62	-47,86	-45,73	-20,80	-19,73	-23,48	-29,24	-26,69	-12,76
Стандардна девијација - s_i [mm]	1,37	0,66	0,64	0,66	0,83	1,05	0,70	0,32	0,51
Једносмерна поновљивост - R_i [mm]	5,48	2,63	2,55	2,65	3,32	4,19	2,80	1,28	2,51
Двосмерна поновљивост - R_i [mm]	35,68	50,46	49,49	22,84	22,01	24,66	31,18	28,66	14,68
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-12,76						
Средња вредност распона одступања	-	-	-28,66						
Поновљивост по оси - R	5,48	4,19	50,46						
Систематска грешка - E	387,50	364,63	396,26						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	374,07						
Грешка позиционирања - A	387,36	366,76	399,81						

Табела 15.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 методом кретања ходочасника добијени б. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j = 1$	45,36	88,77	178,20	235,10	261,47	306,82	322,10	342,21	361,32
2	45,10	87,44	178,15	234,85	260,16	305,71	319,86	342,22	360,20
3	45,58	89,59	181,14	235,70	261,57	307,62	321,89	342,32	362,13
4	45,28	90,21	179,73	236,08	261,69	306,13	320,32	342,41	361,05
5	49,57	89,18	181,16	237,70	262,12	307,60	322,76	342,58	362,61
6	48,07	91,86	181,09	237,11	261,54	307,85	320,67	342,83	361,28
Средње једносмерно одступање од пошпе [mm]	46,49	89,51	179,91	236,09	261,42	306,95	321,27	342,43	361,43
Централна вредност одступања [mm]	68,00	208,00	284,19	331,85	369,41	405,18	423,67	438,94	446,64
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-43,02	-56,18	-45,53	-21,16	-15,96	-24,51	-29,40	-26,59	-12,84
Стандардна девијација - s_i [mm]	1,87	1,48	1,12	1,15	0,85	1,30	0,91	0,99	0,74
Једносмерна поновљивост - R_i [mm]	7,47	5,93	4,49	4,58	3,38	5,19	3,65	3,97	2,94
Двосмерна поновљивост - R_i [mm]	49,71	61,32	48,63	23,94	18,53	29,65	33,57	31,55	16,11
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-12,84						
Средња вредност распона одступања	-	-	-30,58						
Поновљивост по осн - R	7,47	5,96	61,32						
Систематска грешка - E	393,73	363,55	406,57						
Максимална двосмерна грешка пошпикирања - M	-	-	378,64						
Грешка позиционирања - A	399,27	368,66	412,45						

Табела 16.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком

f	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [μm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	47,01	88,21	180,89	257,93	351,41	382,94	397,47	409,68	424,07
2	45,83	87,57	181,28	256,90	350,49	382,60	396,66	409,59	424,21
Одступање од позиције - x_y [μm]	45,94	88,32	182,19	257,15	350,14	381,92	396,73	410,02	424,52
4	45,98	87,97	182,13	257,81	350,84	382,22	396,21	409,77	424,66
5	46,58	88,13	182,57	257,27	350,57	382,30	396,71	410,04	424,90
6	45,87	87,84	182,49	258,26	350,39	382,43	395,97	410,93	424,64
Средње једносмерно одступање од позиције [μm]	46,20	88,01	181,92	257,55	350,66	382,39	396,62	410,00	424,50
Централна вредност одступања [μm]	67,10	209,74	277,00	326,46	362,79	396,98	412,09	423,87	430,08
Распон одступања средњих вредности - B_i [μm]	-41,81	-55,63	-47,74	-30,13	-24,27	-29,19	-30,93	-27,73	-11,16
Стандардна девијација - s_i [μm]	0,48	0,27	0,68	0,52	0,35	0,35	0,52	0,49	0,31
Једносмерна понављаност - R_i [μm]	1,92	1,09	2,73	2,10	1,39	1,41	2,06	1,96	1,23
Двосмерна понављаност - R_i [μm]	43,31	58,04	48,84	31,26	26,48	31,31	32,99	30,37	13,21
Параметар [μm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-11,16						
Средња вредност распона одступања	-	-	-33,18						
Поновљивост по оси - R	2,73	3,32	58,04						
Систематска грешка - E	378,30	349,73	391,54						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	362,98						
Грешка позиционирања - A	379,88	351,93	394,16						

Табела 17.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
$j = 1$	56,58	87,06	183,15	239,27	269,16	312,81	327,98	349,56	365,77
2	56,16	87,17	181,58	240,09	267,28	311,24	327,59	348,75	365,22
Одступање од позиције - x_{ij}	56,42	90,15	190,72	238,87	266,80	310,57	326,99	348,39	364,68
[mm]	56,61	91,14	191,82	237,91	267,55	310,16	326,25	348,16	364,32
5	55,86	90,05	192,04	239,75	266,17	310,89	326,09	348,10	364,18
6	55,63	91,32	191,10	238,61	265,90	312,47	326,14	348,14	364,06
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	56,21	89,48	188,40	239,08	267,14	311,36	326,84	348,52	364,71
Централна вредност одступања [mm]	72,85	213,74	289,25	337,68	374,92	408,26	426,84	441,36	447,54
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-33,27	-50,68	-44,21	-21,68	-20,43	-24,43	-30,26	-26,64	-13,89
Стандардна девијација - s_i [mm]	0,40	1,91	4,73	0,79	1,17	1,06	0,81	0,57	0,32
Једносмерна повезаност - R_i [mm]	1,59	7,62	18,91	3,16	4,68	4,24	3,24	2,27	1,27
Двосмерна повезаност - R_i [mm]	37,88	61,72	48,68	24,43	22,40	25,27	31,64	28,37	15,15
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-13,89						
Средња вредност распина одступања	-	-	-29,50						
Повезаност по оси - R	18,91	7,62	61,72						
Систематска грешка - E	384,39	365,20	398,47						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	374,70						
Грешка позиционирања - A	385,87	370,61	400,87						

Табела 18.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према ISO 230-2:2014 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	50	99	143	190	236	280	330	375
Смер позиционирања	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$j = 1$	45,09	85,59	179,34	234,11	257,86	305,20	319,19	337,75	376,15
2	44,50	84,72	178,44	234,59	257,30	302,47	318,66	339,01	376,56
Одступање од позиције - x_y	44,27	84,61	179,90	234,67	258,73	302,72	318,46	338,24	376,45
[mm]	44,03	84,11	179,43	234,97	256,87	305,22	317,02	337,10	376,91
5	44,58	84,67	179,00	234,87	258,33	302,17	318,16	338,55	376,25
6	43,44	84,85	178,85	234,97	258,10	301,92	317,50	338,23	376,90
Средње једносмерно одступање од позиције [mm]	44,32	84,76	179,16	234,70	257,86	303,28	318,16	338,15	376,40
Централна вредност одступања [mm]	64,54	206,93	280,57	328,16	366,53	400,31	419,81	434,32	441,45
Распон одступања средњих вредности - B_i [mm]	-40,44	-55,54	-45,42	-19,98	-19,74	-25,92	-29,69	-27,62	-14,41
Стандардна девијација - s_i [mm]	0,56	0,48	0,51	0,33	0,68	1,51	0,79	0,66	0,54
Једносмерна поновљивост - R_i [mm]	2,23	1,92	2,04	1,31	2,73	6,06	3,17	2,64	2,16
Двосмерна поновљивост - R_i [mm]	42,52	57,21	49,82	22,89	21,42	28,74	32,27	29,96	15,71
Параметар [mm]	Једносмерна ↑	Једносмерна ↓	Двосмерна						
Максимални распон одступања - B	-	-	-14,41						
Средња вредност распона одступања	-	-	-30,97						
Поновљивост по оси - R	3,39	6,06	57,21						
Систематска грешка - E	389,93	363,90	404,34						
Максимална двосмерна грешка позиционирања - M	-	-	376,91						
Грешка позиционирања - A	391,51	365,69	406,28						

Табела 19.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 1. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	2,60	1,80	1,44	1,52	1,18	1,44	1,89	1,41	1,65
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	15,58	10,78	8,65	9,12	7,10	8,65	11,35	8,46	9,92
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	56,51	45,22	40,27	22,83	15,94	20,39	28,22	25,29	8,31
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	15,58								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	373,37								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	418,53								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	29,22								

Табела 20.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,78	0,96	1,34	0,49	0,84	0,90	0,71	0,81	0,56
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	4,68	5,77	8,06	2,94	5,02	5,43	4,26	4,86	3,36
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	45,87	60,39	54,27	22,15	19,54	24,49	33,80	32,09	16,00
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	8,06								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	518,87								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	553,83								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	34,29								

Табела 21.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,00	0,88	1,06	0,95	0,94	0,79	1,17	1,09	0,48
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	5,97	5,31	6,34	5,69	5,63	4,76	7,03	6,56	2,88
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	51,22	69,03	57,48	20,71	17,60	26,56	34,55	32,73	16,13
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	7,03								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	519,09								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	557,20								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	36,22								

Табела 22.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 4. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	2,05	1,10	1,08	0,56	1,04	0,41	0,91	0,69	0,64
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	12,30	6,60	6,50	3,36	6,26	2,46	5,44	4,11	3,84
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	42,62	35,68	33,37	18,12	18,08	26,50	30,31	27,58	13,43
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	12,30								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	401,93								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	438,03								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	27,30								

Табела 23.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,28	0,53	0,81	0,47	0,54	0,29	0,49	0,52	0,52
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	7,70	3,19	4,88	2,79	3,24	1,73	2,97	3,10	3,14
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	40,04	39,20	39,62	18,98	18,72	23,14	29,92	28,14	13,87
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	7,70								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	393,72								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	426,09								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	27,96								

Табела 24.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 6. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	2,12	1,65	1,00	0,90	0,84	1,71	1,41	1,69	1,13
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	12,72	9,88	6,01	5,43	5,07	10,27	8,44	10,14	6,77
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	54,46	71,99	58,86	27,63	21,03	32,63	39,62	36,22	17,71
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	12,72								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	530,13								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	575,96								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	40,02								

25. А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,48	0,77	0,36	0,37	0,73	0,71	0,69	0,90	0,71
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	2,86	4,64	2,13	2,21	4,38	4,24	4,16	5,39	4,24
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	52,93	71,28	61,71	39,34	31,98	38,87	41,69	37,78	15,40
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	5,39								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	508,42								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	546,13								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	43,44								

Табела 26.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,46	3,54	1,44	0,90	0,65	0,28	0,47	0,59	0,43
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	8,75	21,21	8,65	5,40	3,90	1,68	2,80	3,55	2,60
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	42,12	64,94	57,15	28,30	26,92	32,53	40,77	36,29	19,17
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	21,21								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	525,23								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	561,55								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	38,69								

Табела 27.А Параметри тачности позиционирања клизача J_0 према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,66	0,54	1,42	0,95	0,55	0,94	0,87	0,79	0,45
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{sj} [μm]	3,94	3,22	8,53	5,69	3,32	5,64	5,22	4,77	2,69
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	51,20	71,16	58,71	26,09	26,01	34,52	40,01	37,63	19,88
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	8,53								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	527,35								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	566,21								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	40,58								

Табела 28.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 1. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	2,05	2,19	1,66	1,67	1,25	1,46	1,85	1,34	1,52
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{sj} [μm]	12,31	13,16	9,99	10,00	7,48	8,78	11,09	8,03	9,12
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	44,64	55,22	46,48	25,03	16,80	20,69	27,58	23,99	7,64
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	13,16								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	355,23								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	395,04								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	29,79								

Табела 29.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 2. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,50	1,55	1,97	0,65	1,03	1,03	0,74	0,80	0,51
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	9,00	9,32	11,79	3,90	6,17	6,16	4,46	4,77	3,08
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	88,12	97,63	79,37	29,39	24,00	27,80	35,43	31,50	14,66
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	11,79								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	431,65								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	497,19								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	47,54								

Табела 30.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 линеарном методом кретања добијени 3. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,79	0,69	0,82	0,73	0,71	0,60	0,87	0,80	0,35
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	4,72	4,14	4,90	4,36	4,28	3,57	5,22	4,82	2,09
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	40,46	53,88	44,47	15,86	13,35	19,95	25,64	24,03	11,69
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	5,22								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	370,23								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	399,70								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	27,70								

Табела 31.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 4. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,62	1,34	1,25	0,61	1,10	0,42	0,89	0,65	0,59
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	9,71	8,06	7,50	3,69	6,60	2,50	5,32	3,90	3,53
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	33,67	43,57	38,52	19,86	19,06	26,89	29,62	26,16	12,35
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	9,71								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	382,16								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	412,27								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	27,74								

Табела 32.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 5. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,01	0,65	0,94	0,51	0,57	0,29	0,48	0,49	0,48
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	6,08	3,90	5,64	3,06	3,42	1,76	2,90	2,94	2,89
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	31,62	47,86	45,73	20,80	19,73	23,48	29,24	26,69	12,76
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	6,08								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	374,07								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	400,74								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	28,66								

Табела 33.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 методом кретања ходочасника добијени 6. експерименталном поставком

i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,67	1,29	0,77	0,69	0,64	1,29	1,04	1,24	0,82
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	10,05	7,71	4,65	4,16	3,84	7,71	6,26	7,45	4,91
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	43,02	56,18	45,53	21,16	15,96	24,51	29,40	26,59	12,84
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	10,05								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	378,64								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	414,48								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	30,58								

Табела 34.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 7. експерименталном поставком

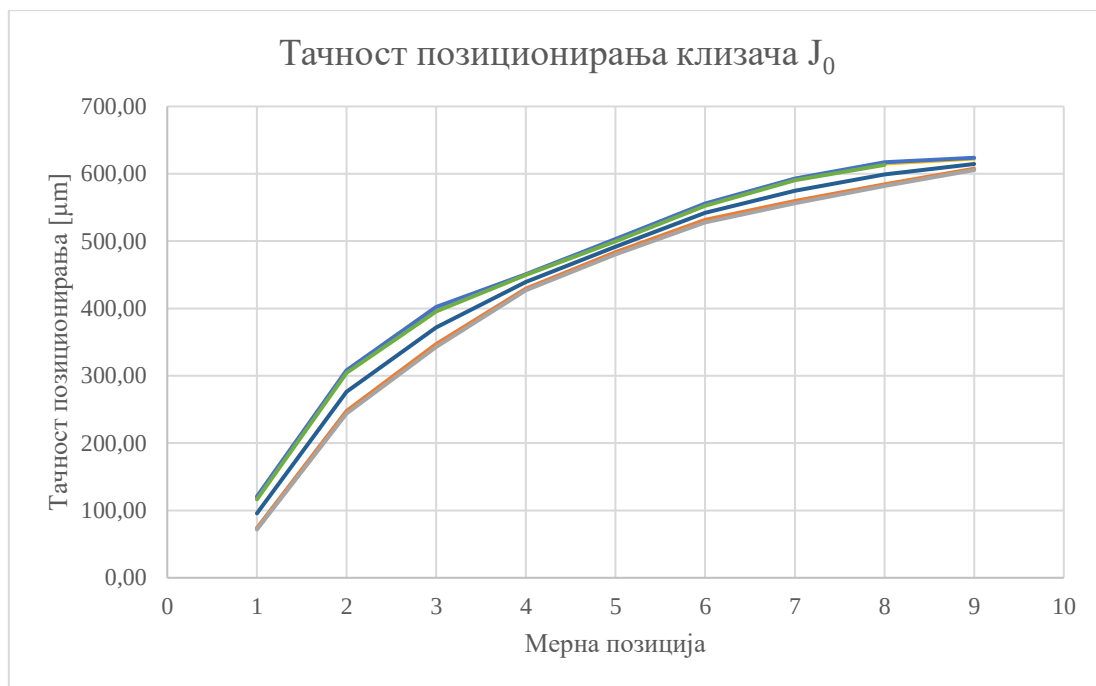
i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,38	0,60	0,28	0,28	0,55	0,53	0,51	0,66	0,51
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Sj} [μm]	2,26	3,62	1,65	1,69	3,32	3,18	3,09	3,95	3,07
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	41,81	55,63	47,74	30,13	24,27	29,19	30,93	27,73	11,16
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	3,95								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	362,98								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	394,64								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	33,18								

Табела 35.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 8. експерименталном поставком

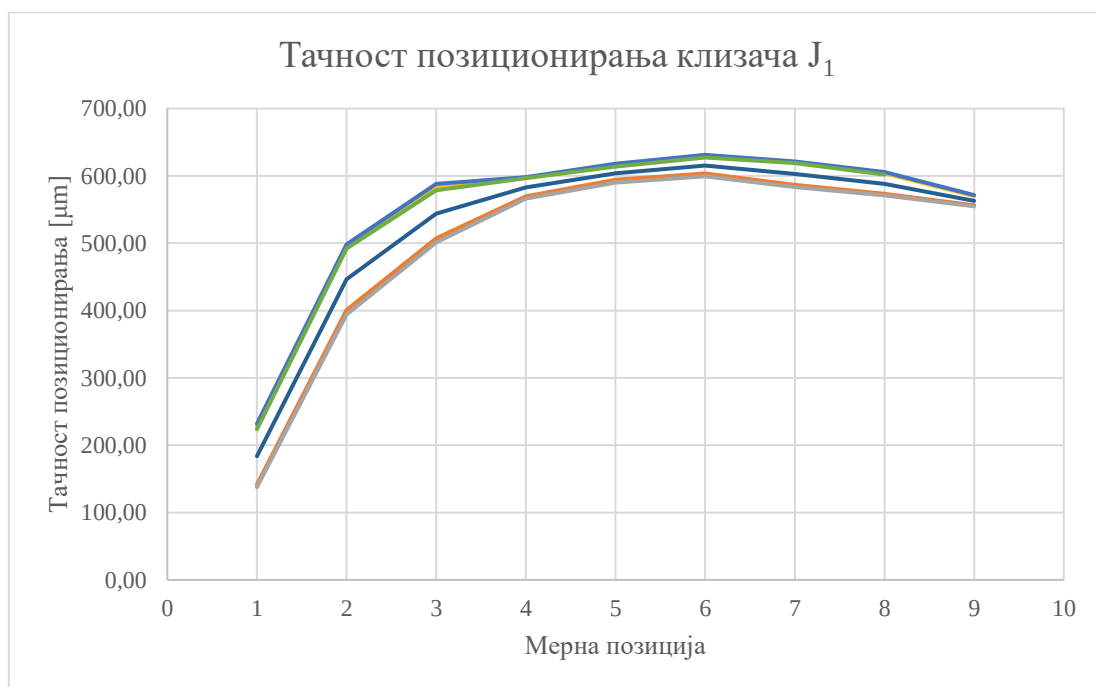
i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	1,15	2,76	1,12	0,69	0,49	0,21	0,35	0,43	0,31
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{sj} [μm]	6,91	16,55	6,70	4,13	2,96	1,26	2,08	2,61	1,88
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	33,27	50,68	44,21	21,68	20,43	24,43	30,26	26,64	13,89
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	16,55								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	374,70								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	403,23								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	29,50								

Табела 36.А Параметри тачности позиционирања клизача J_1 према VDI/DGQ 3441 методом кретања клатна добијени 9. експерименталном поставком

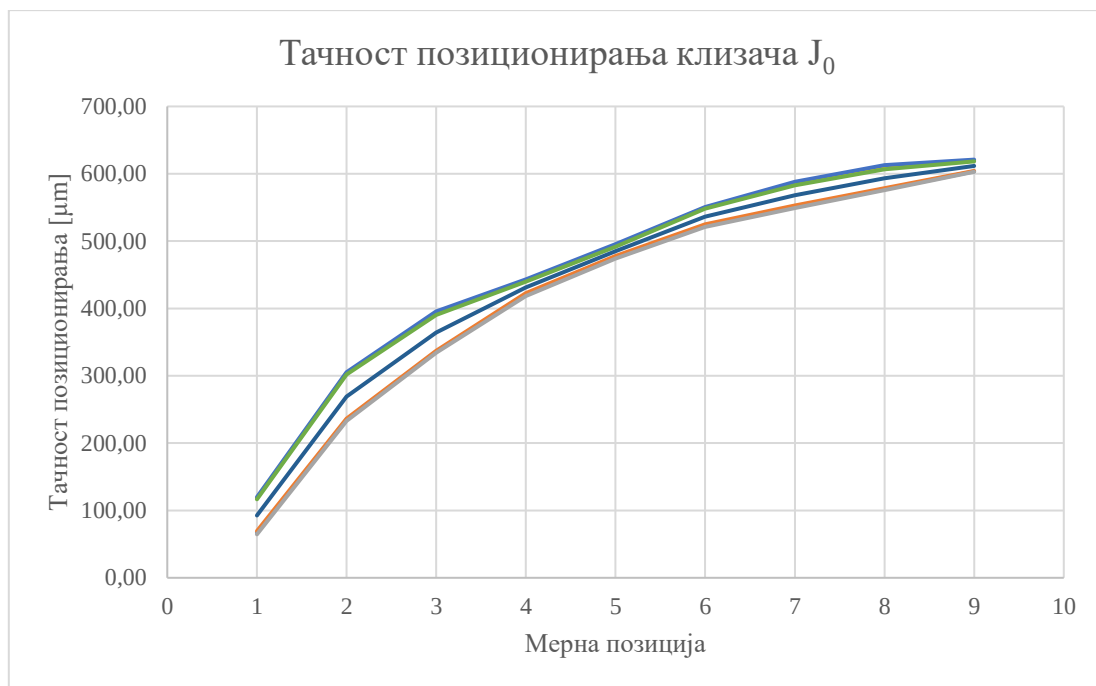
i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Мерна позиција - P_i [mm]	5	14,5	21	28	34	40,5	47,5	53,5	60
Средња вредност стандардне девијације - $\bar{s}_i$ [μm]	0,52	0,42	1,10	0,73	0,42	0,71	0,65	0,58	0,32
Распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{sj} [μm]	3,12	2,51	6,60	4,36	2,52	4,23	3,87	3,50	1,95
Распон одступања средњих вредности у позицији „j“ - U_j [μm]	40,44	55,54	45,42	19,98	19,74	25,92	29,69	27,62	14,41
Максимални распон одступања појединачних вредности позиционирања - P_{Smax} [μm]	6,60								
Распон одступања централних вредности позиционирања - P_a [μm]	376,91								
Распон одступања позиционирања - P [μm]	407,12								
Централна вредност распона одступања средњих вредности - $\bar{U}$ [μm]	30,97								



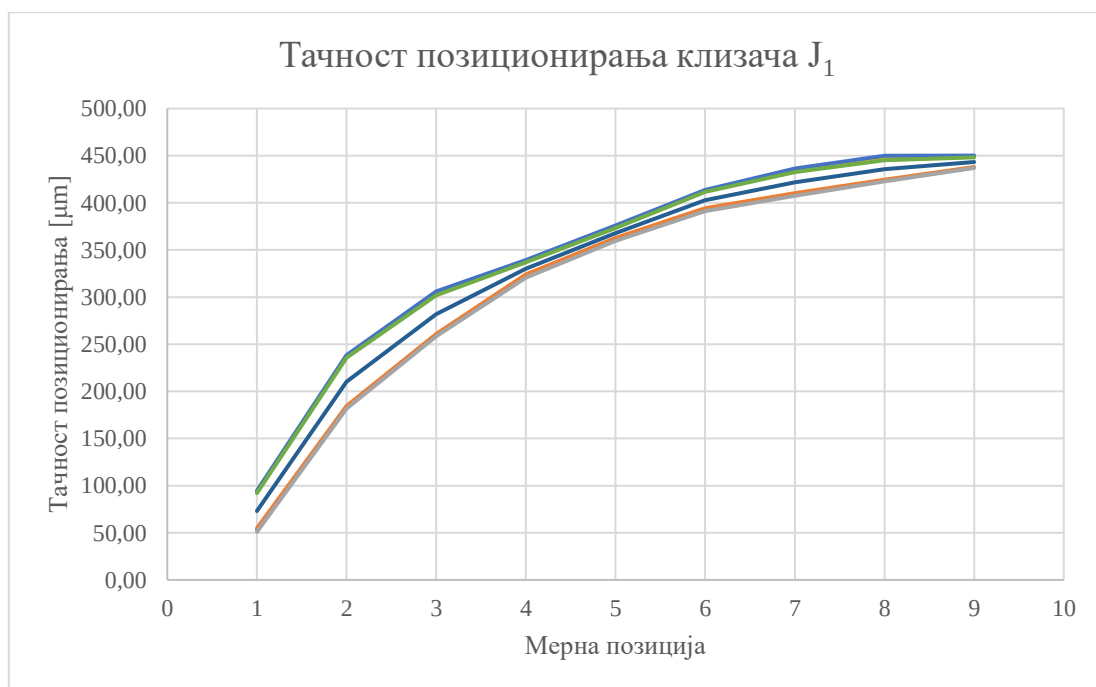
Слика 1.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 2. експерименталној поставци



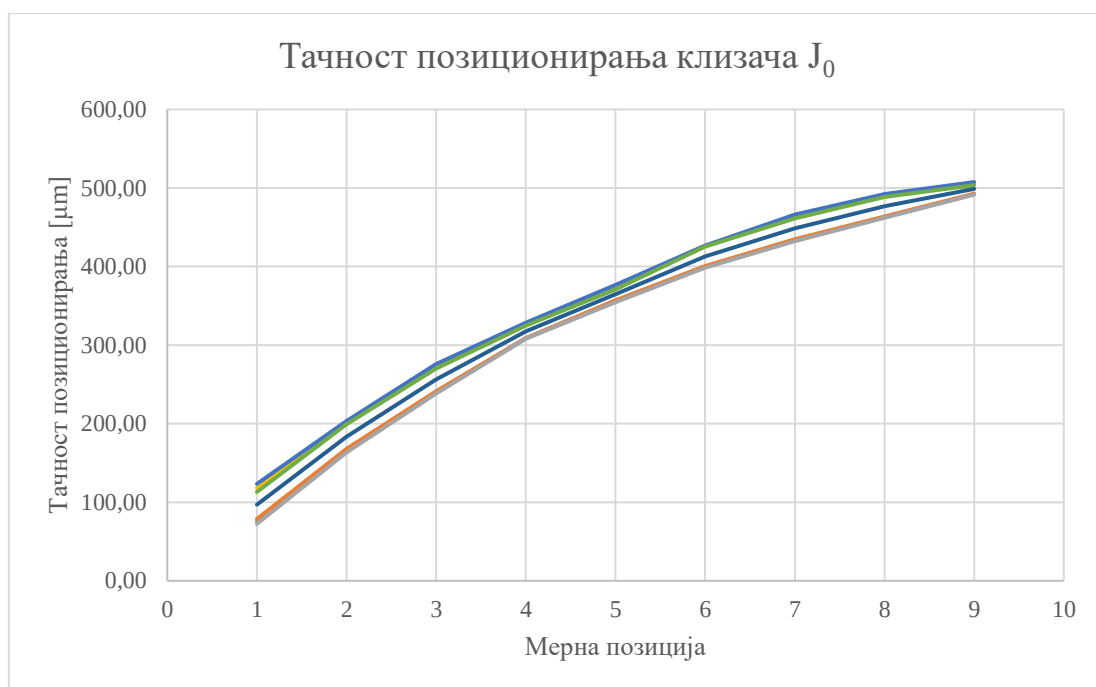
Слика 2.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 2. експерименталној поставци



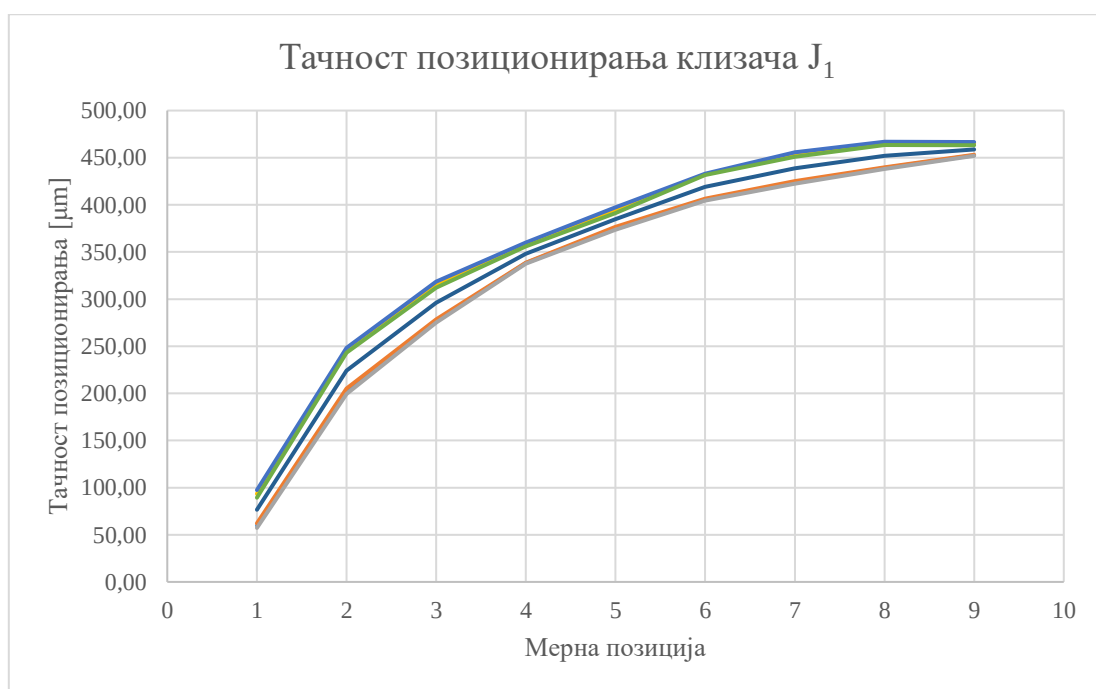
Слика 3.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 3. експерименталној поставци



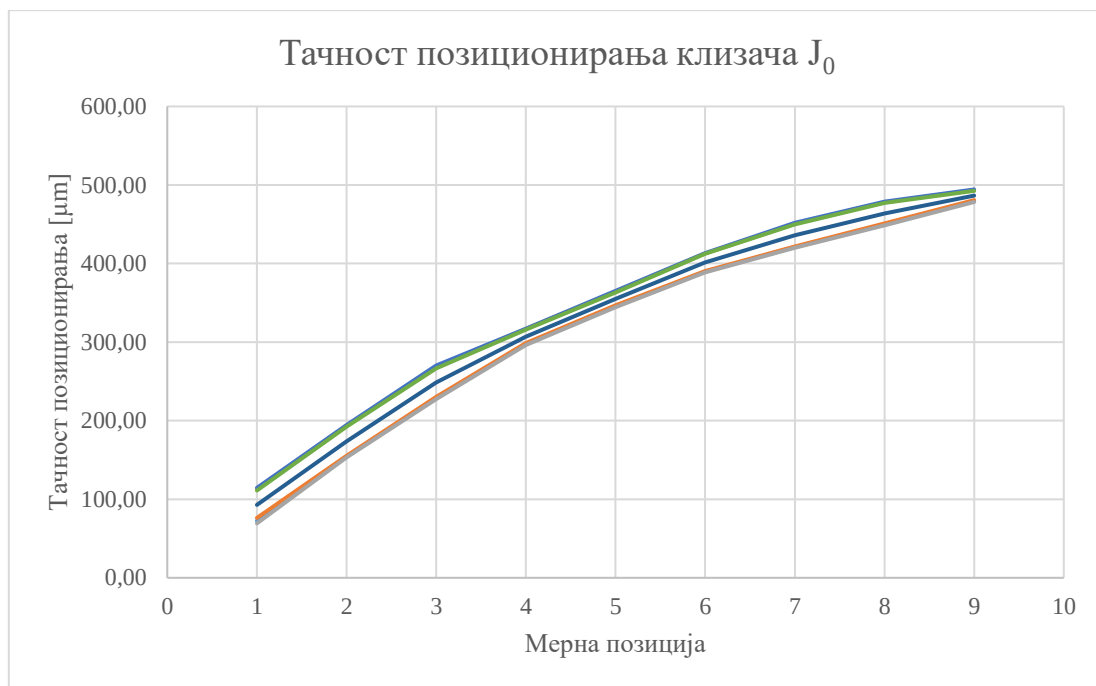
Слика 4. А Тачност позиционирања клизача J_1 у 3. експерименталној поставци



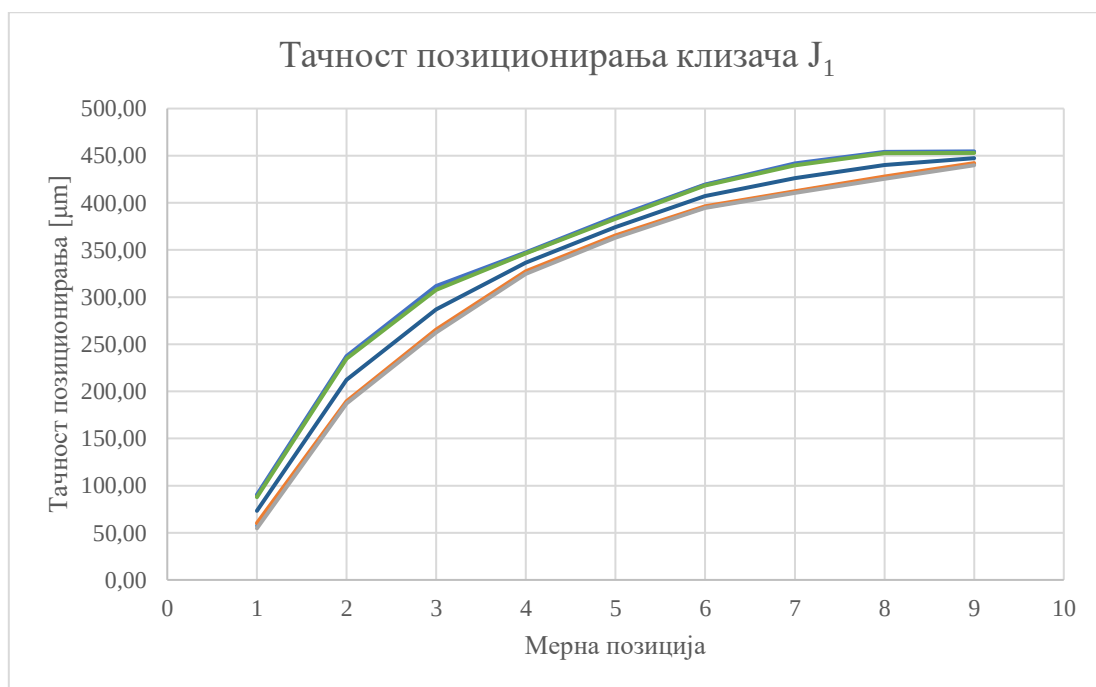
Слика 5.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 4. експерименталној поставци



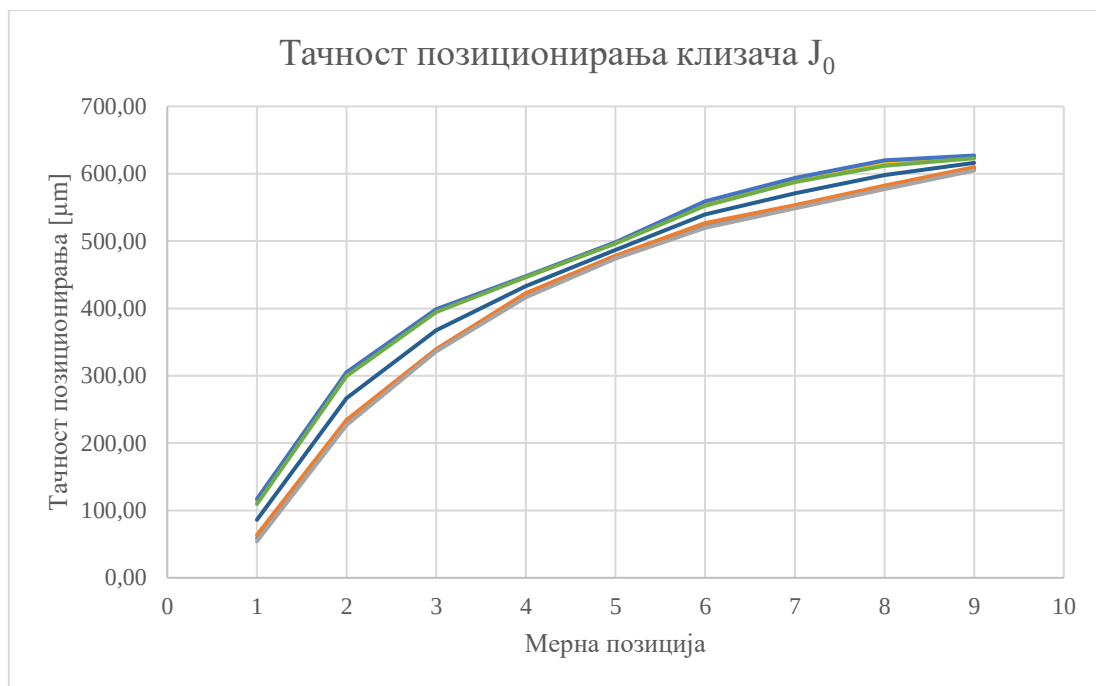
Слика 6.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 4. експерименталној поставци



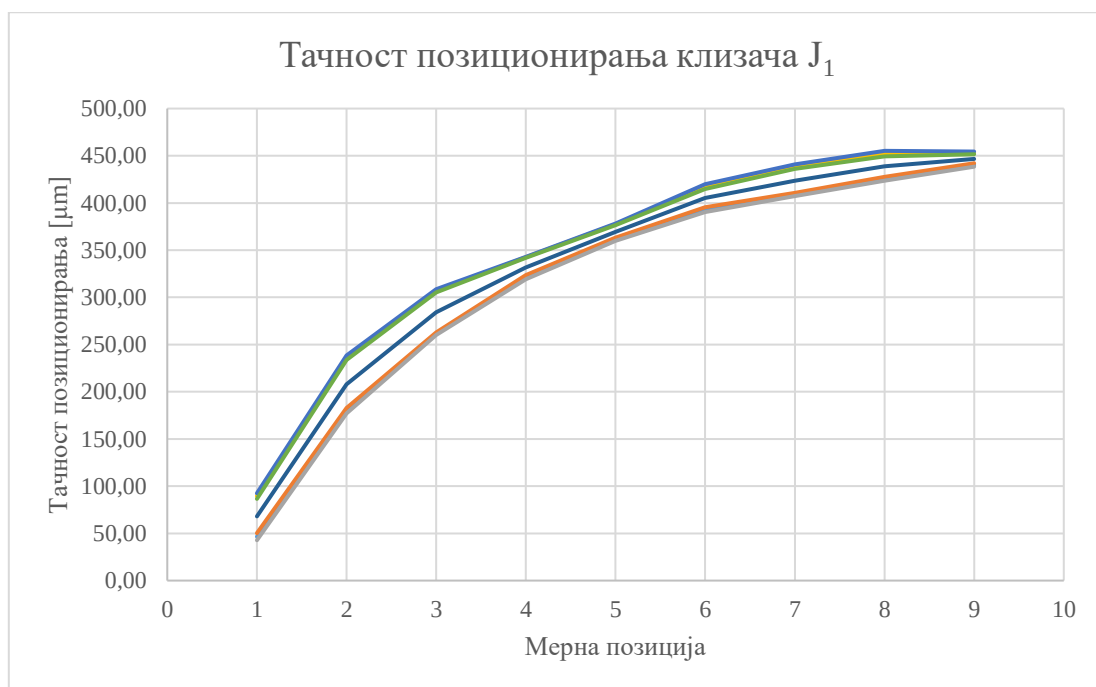
Слика 7.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 5. експерименталној поставци



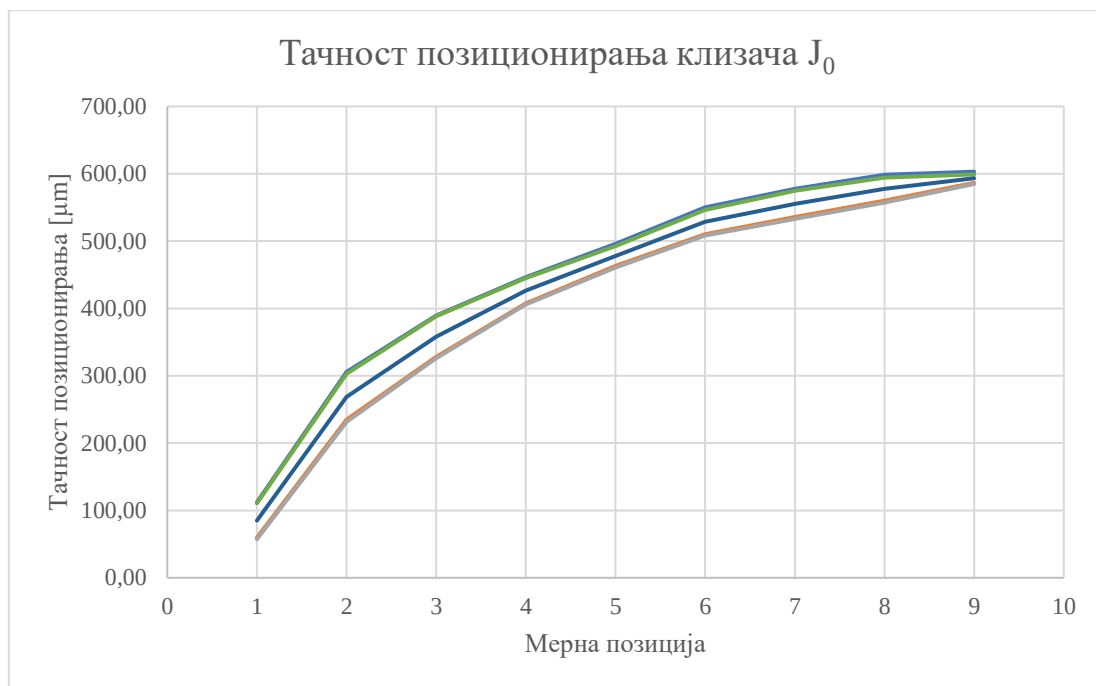
Слика 8.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 5. експерименталној поставци



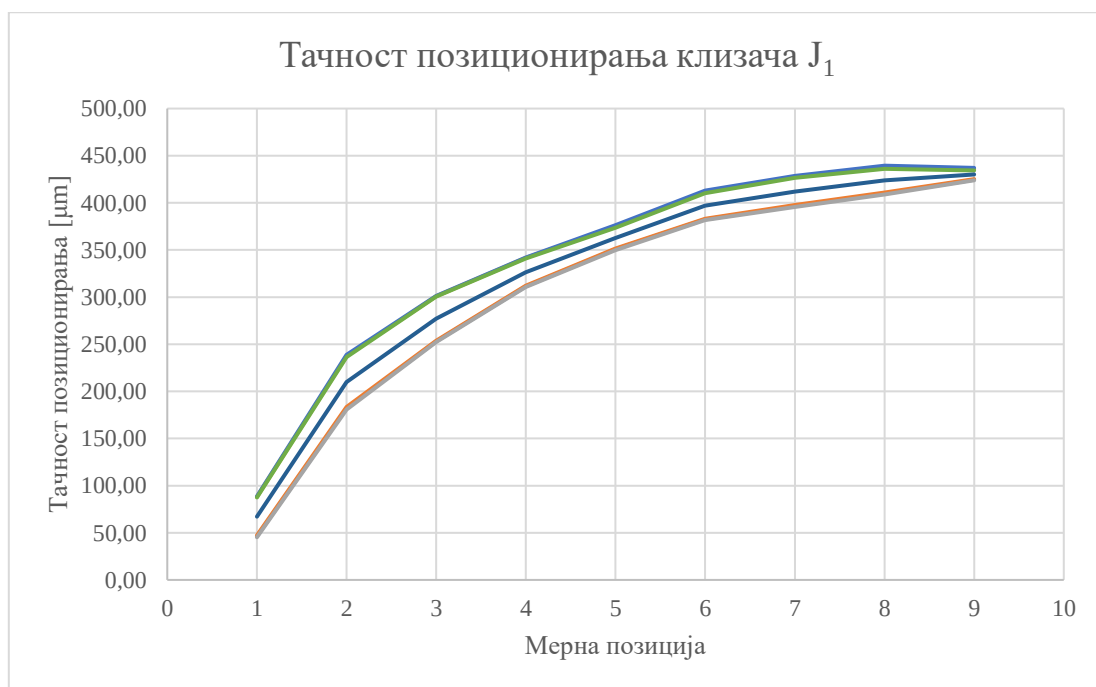
Слика 9.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 6. експерименталној поставци



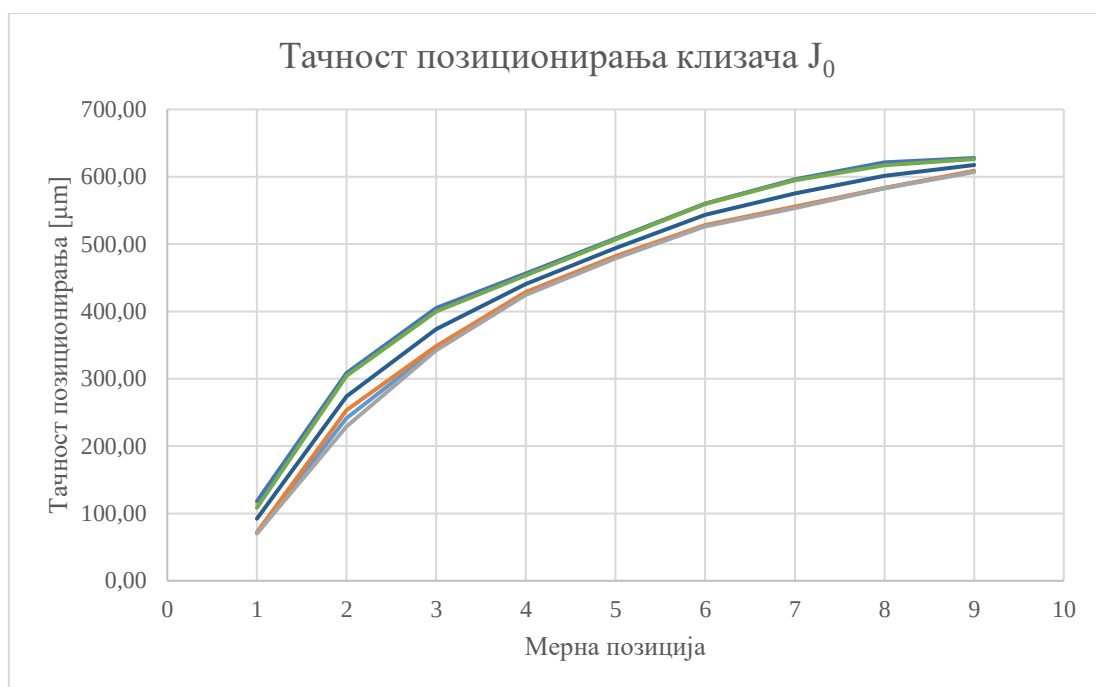
Слика 10.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 6. експерименталној поставци



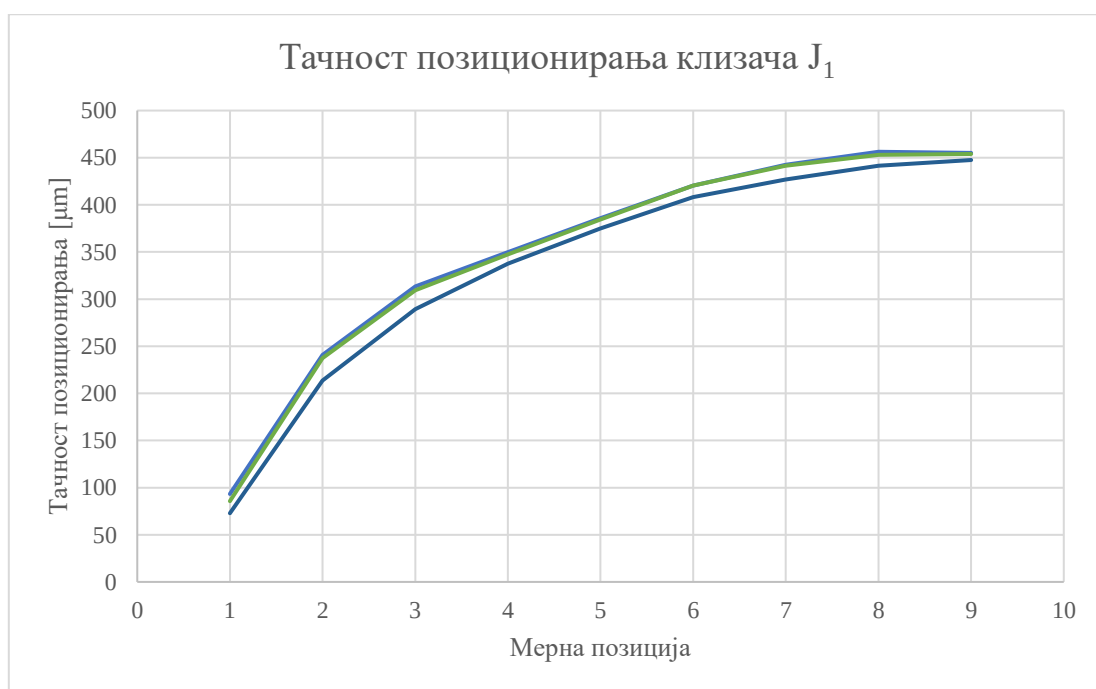
Слика 11.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 7. експерименталној поставци



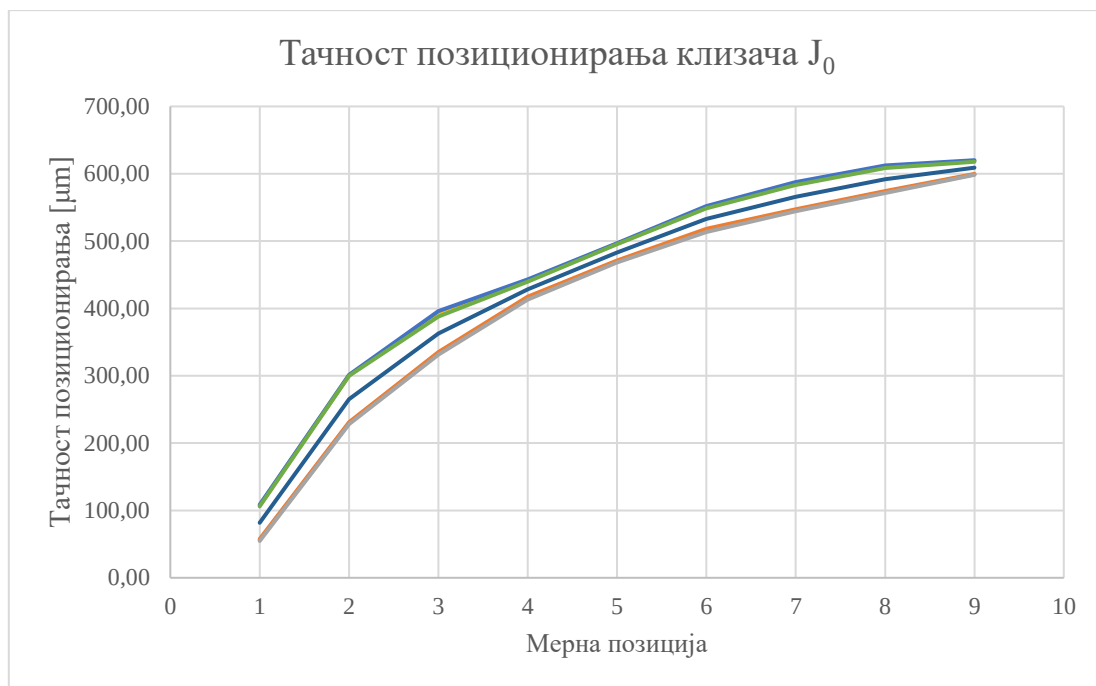
Слика 12.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 7. експерименталној поставци



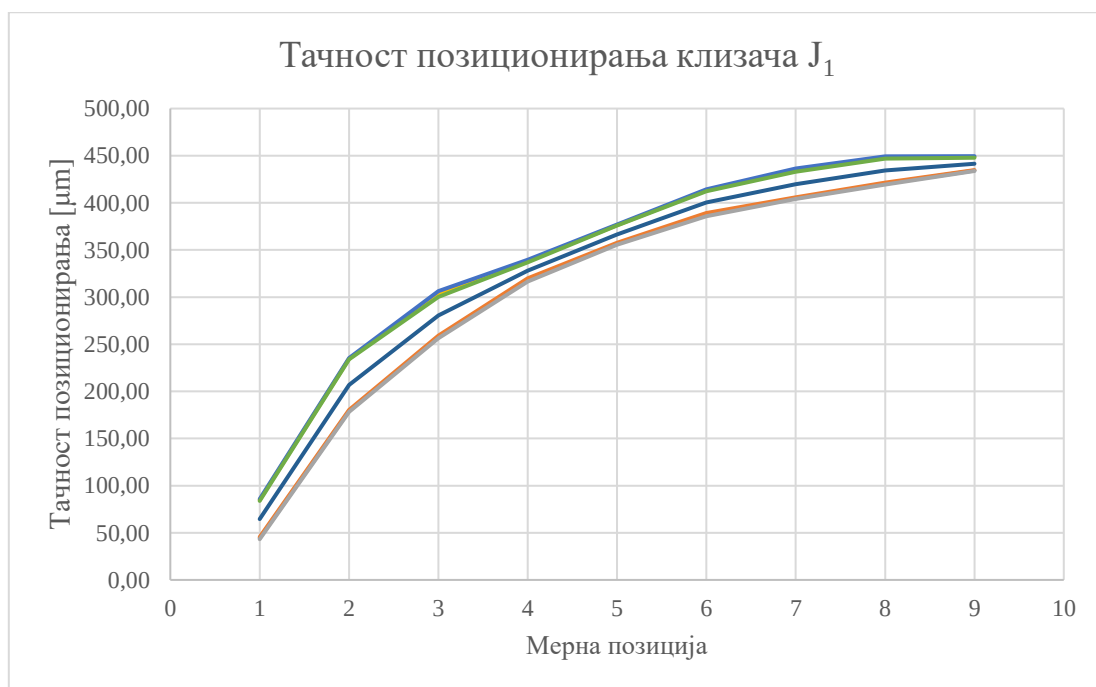
Слика 13.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 8. експерименталној поставци



Слика 14.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 8. експерименталној поставци



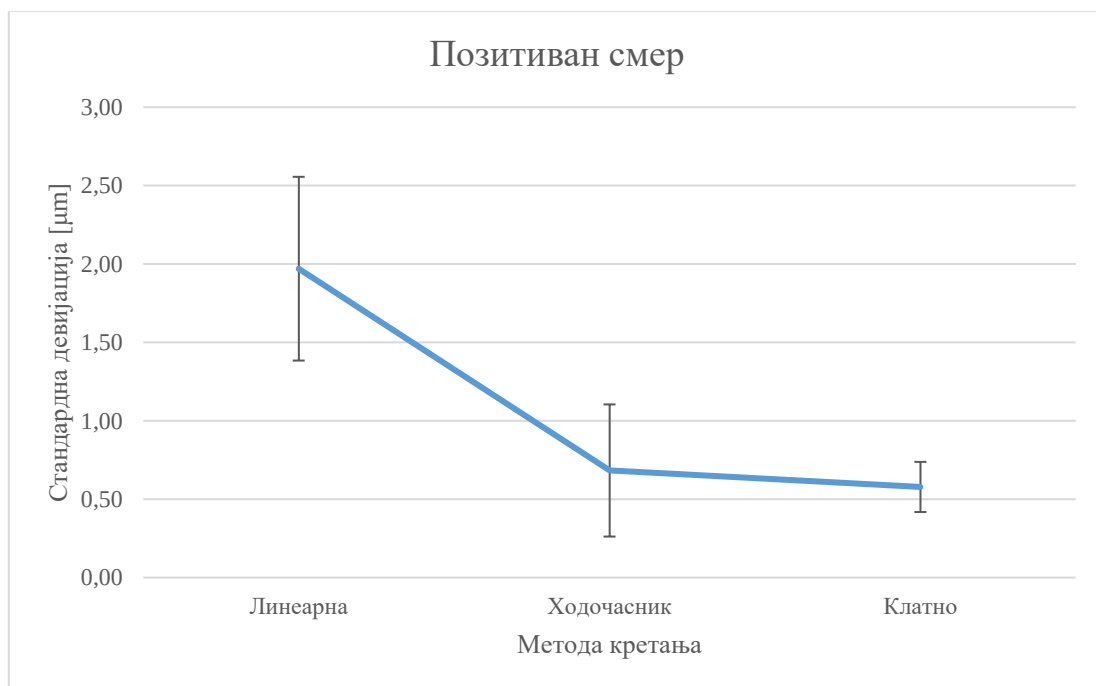
Слика 15.А Тачност позиционирања клизача J_0 у 9. експерименталној поставци



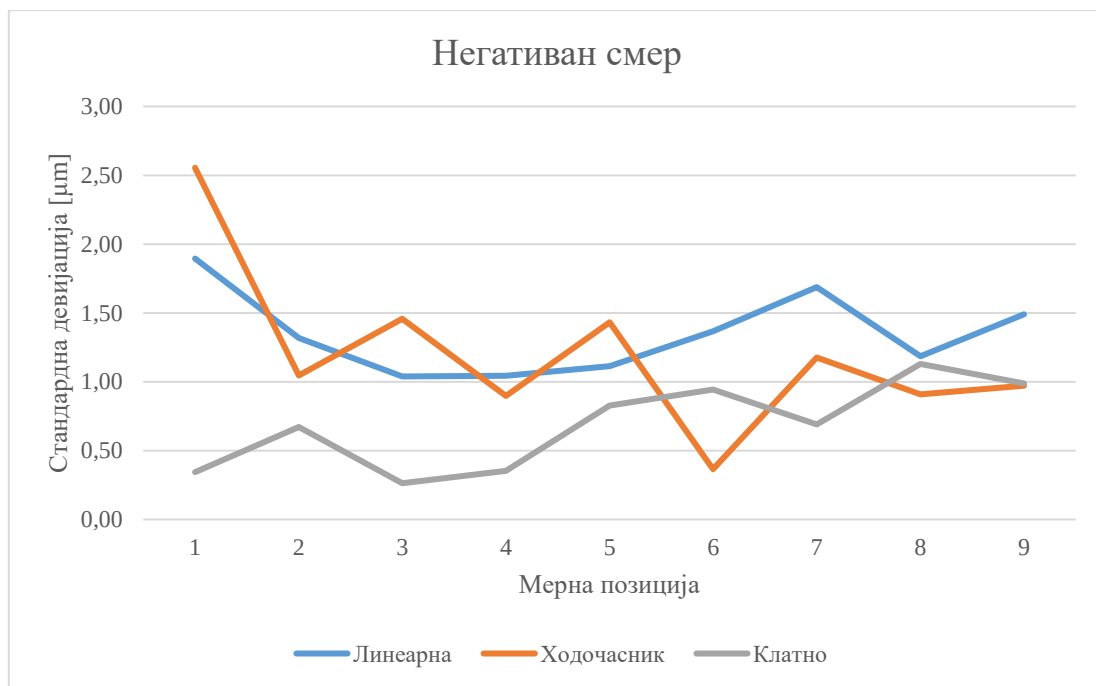
Слика 16.А Тачност позиционирања клизача J_1 у 9. експерименталној поставци



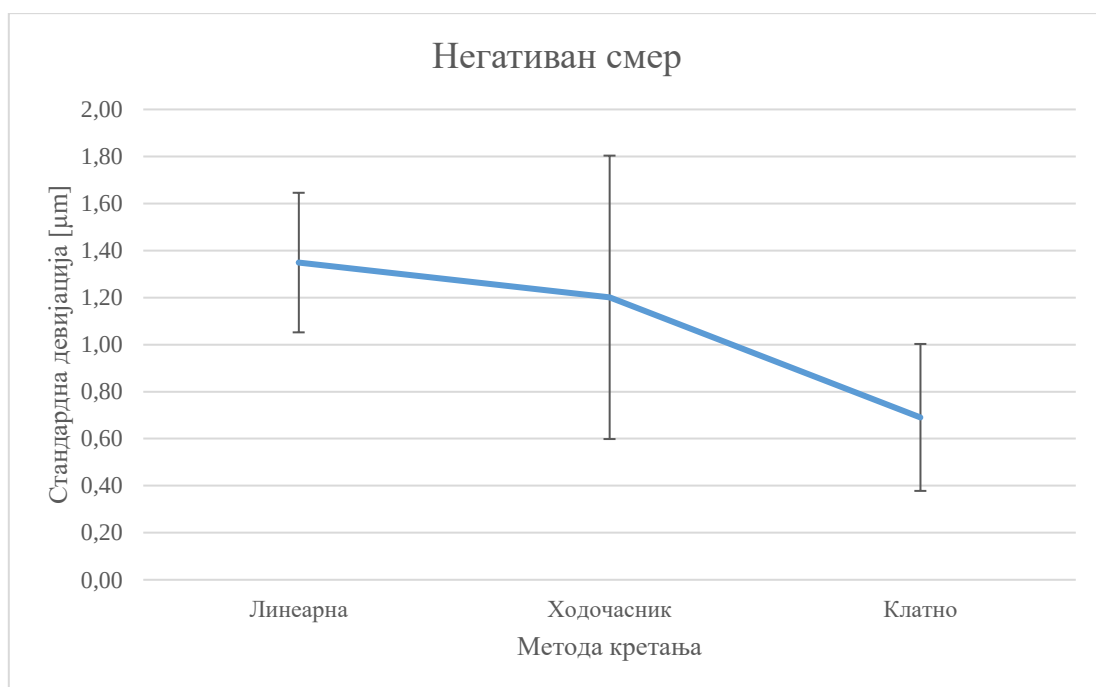
Слика 17 А Промена стандардне девијације по мерним позицијама J_0 клизача у позитивном смеру кретања платформе



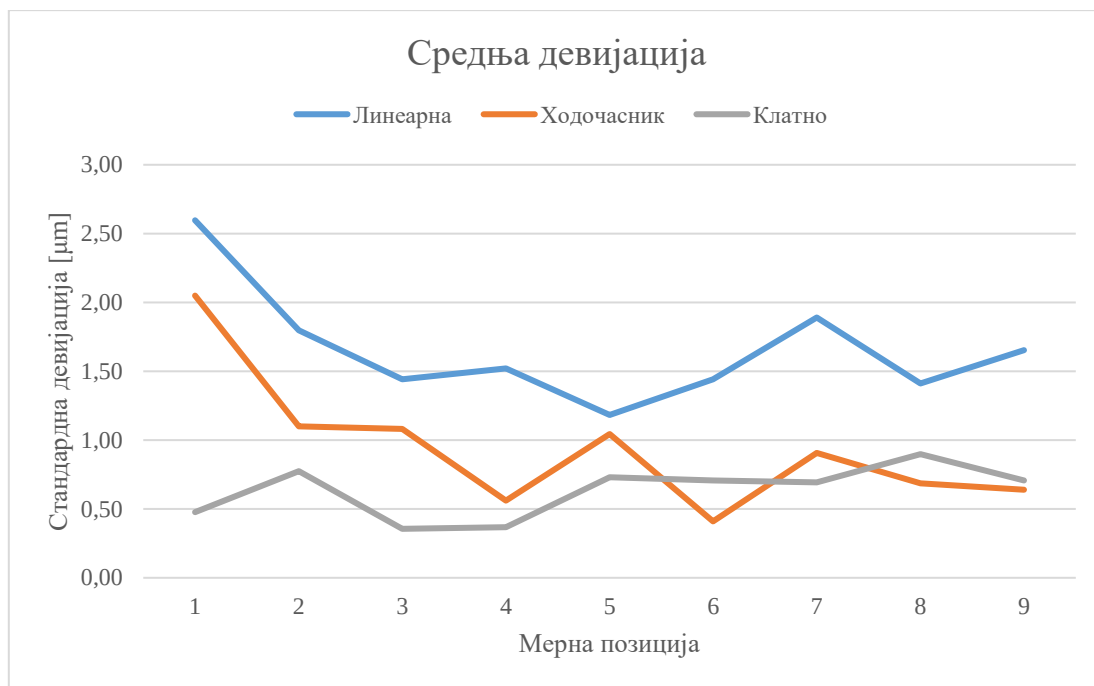
Слика 18.А Централна вредност стандардне девијације J_0 клизача у позитивном смеру померања платформе по методама кретања



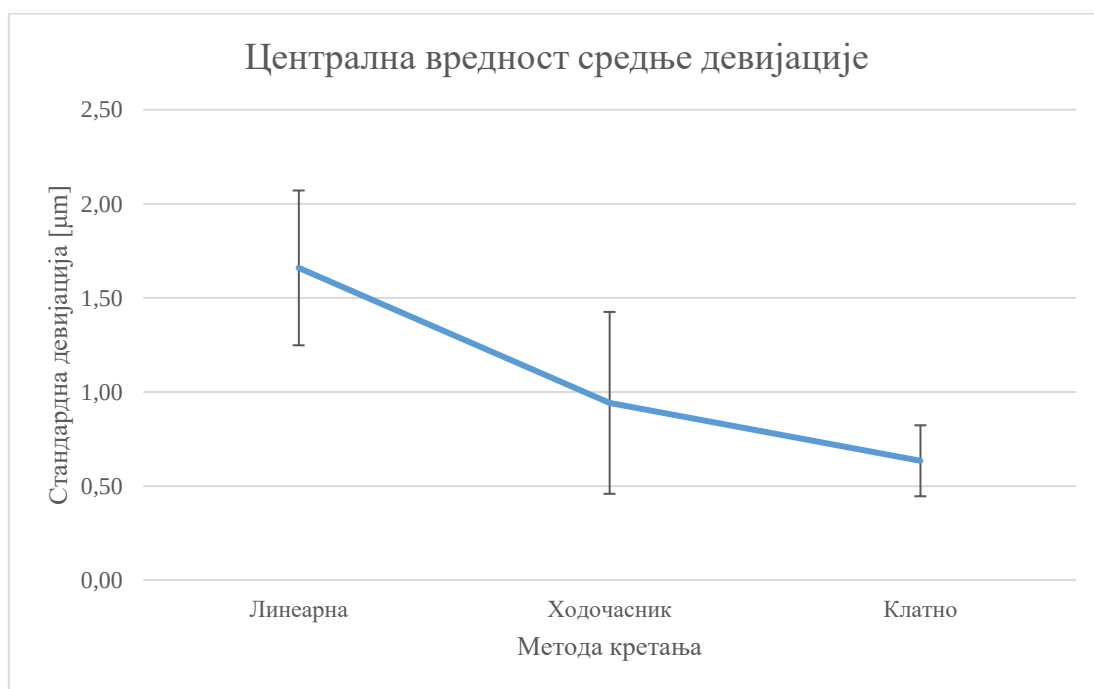
Слика 19.А Промена стандардне девијације по мерним позицијама J_0 клизача у негативном смеру кретања платформе



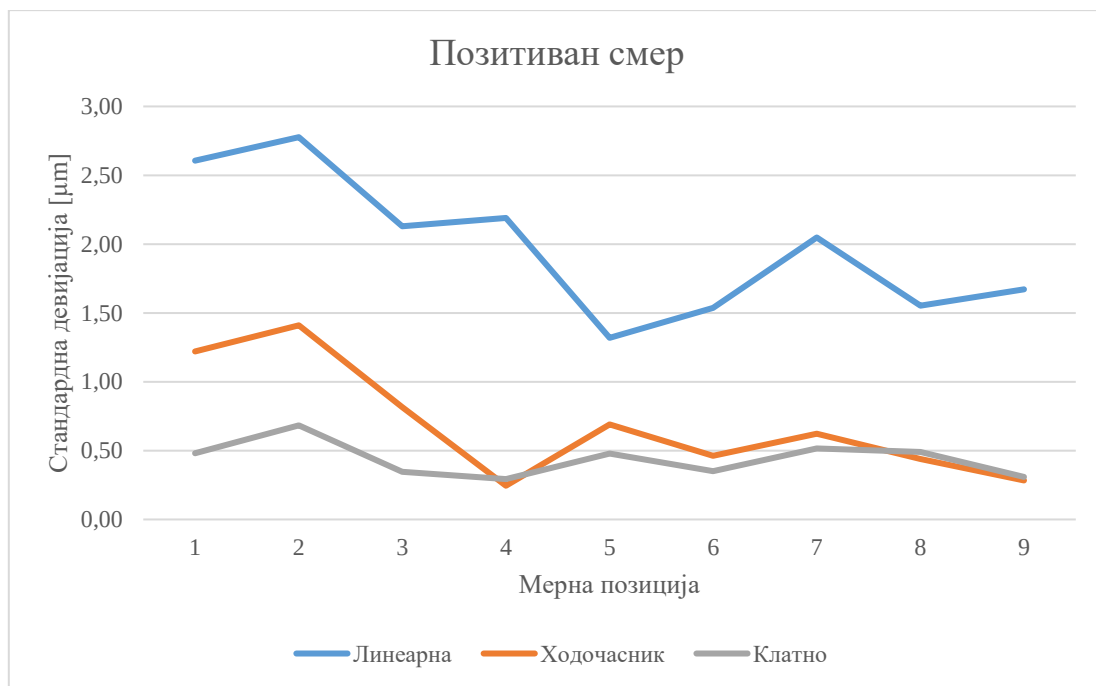
Слика 20.А Централна вредност стандардне девијације J_0 клизача у негативном смеру померања платформе по методама кретања



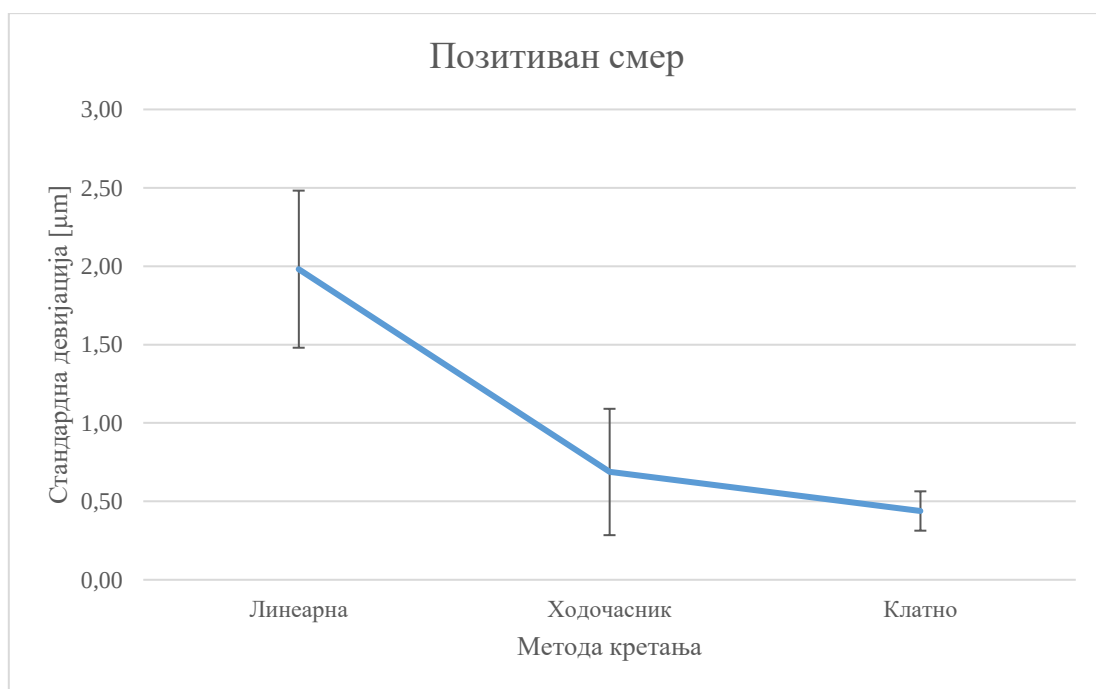
Слика 21.А Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама J_0 клизача



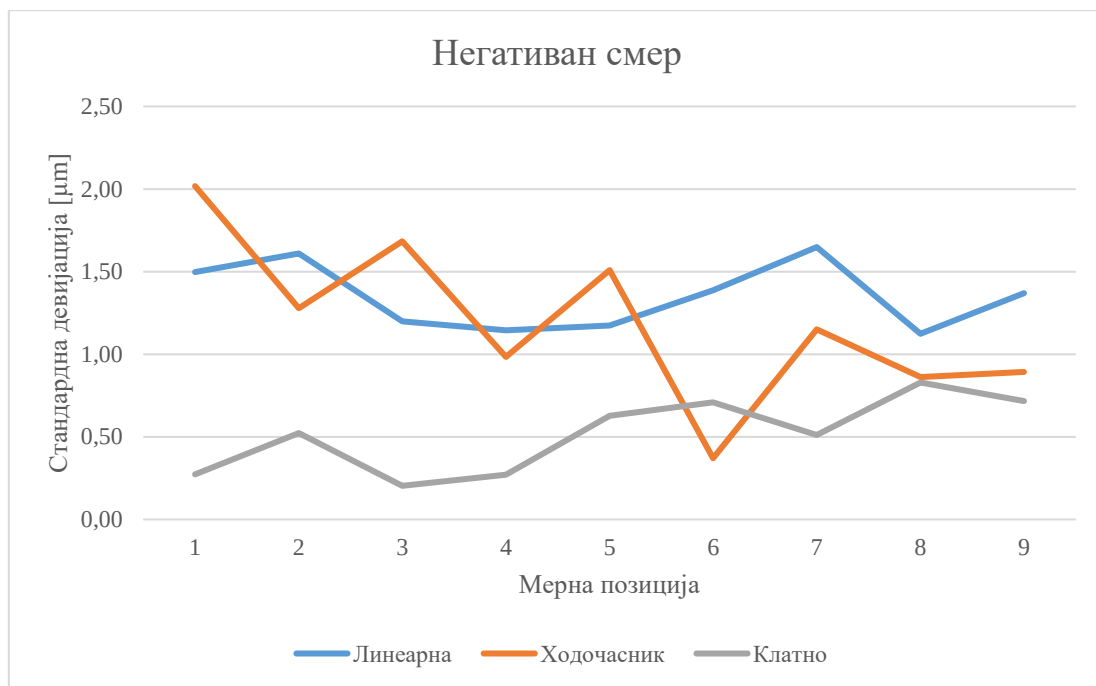
Слика 22.А Централна вредност средње девијације J_0 клизача бидирекционог позиционирања платформе по методама кретања



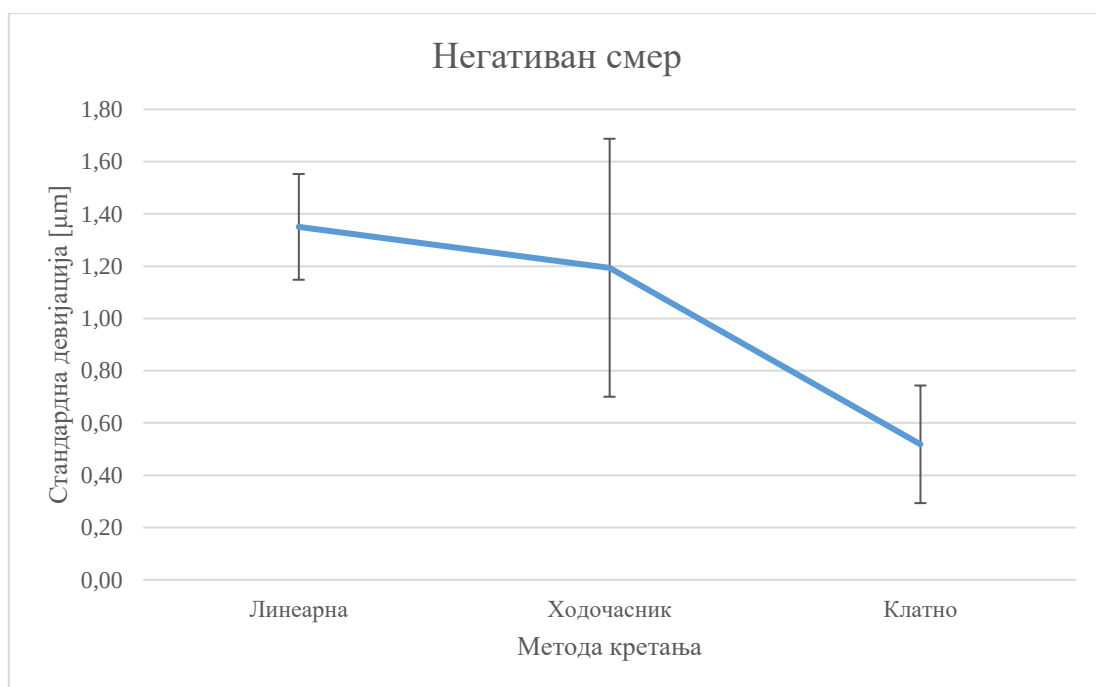
Слика 23.А Промена стандардне девијације по мерним позицијама J_1 клизача у позитивном смеру кретања платформе



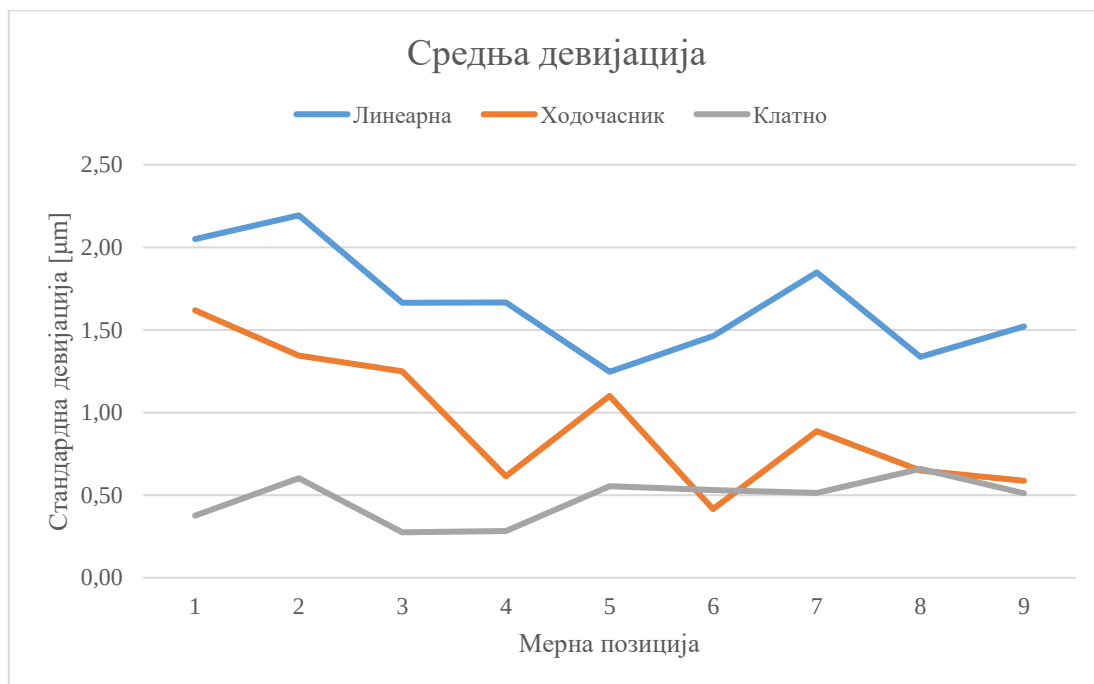
Слика 24.А Централна вредност стандардне девијације J_1 клизача у позитивном смеру померања платформе по методама кретања



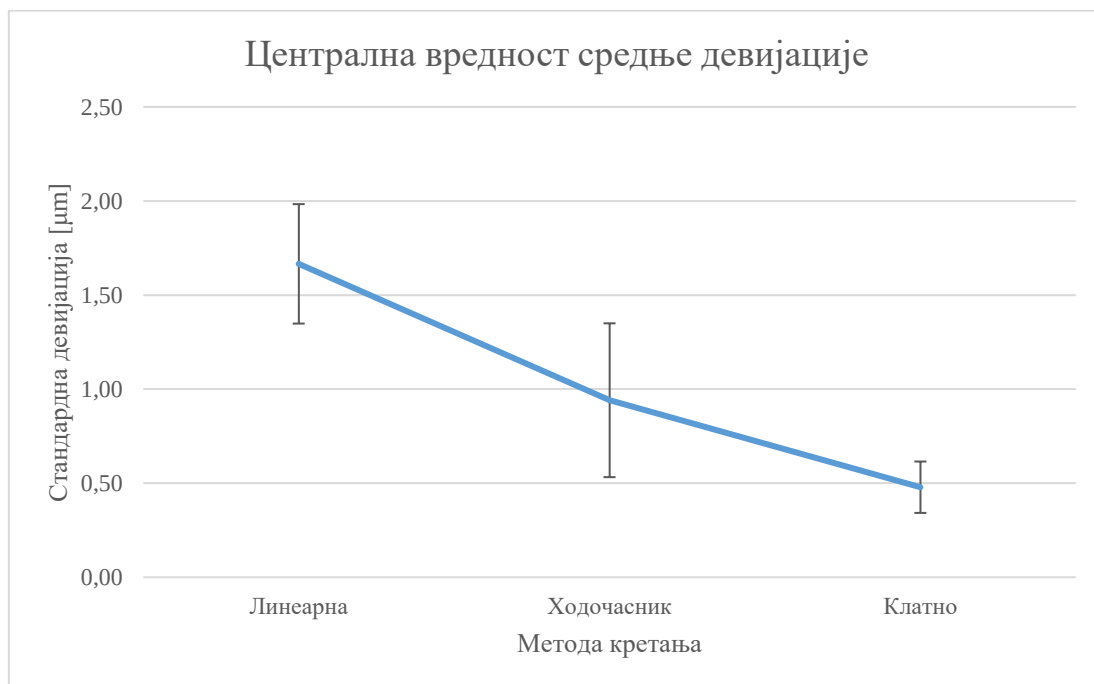
Слика 25.А Промена стандардне девијације по мерним позицијама J_1 клизача у негативном смеру кретања платформе



Слика 26.А Централна вредност стандардне девијације J_1 клизача у негативном смеру померања платформе по методама кретања



Слика 27.А Промена бидирекционе средње девијације по мерним позицијама J_1 клизача



Слика 28.А Централна вредност средње девијације J_1 клизача бидирекционог позиционирања платформе по методама кретања

Прилог Б

Табеле резултата параметара експерименталних поставки

Овај прилог садржи све збирне табеле са вредностима параметара по експерименталним поставцима за Z осу и прерачунате вредности на J₀ и J₁ клизаче.

Табела 1.Б Вредности одступања од позиције за сваку експерименталну поставку по свакој мерној позицији и за оба смера кретања за Z осу кретања платформе у [μm]

	i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.										
Експериментална поставка	Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑										
	Метода кретања																			
1.	Нелинеарност																			
	Оригинална кинематика	26,15	49,39	114,53	148,69	175,28	207,07	237,66	256,53	287,65	301,33	339,51	357,74	380,42	406,73	418,89	443,33	462,85	471,19	
	$v_0=\text{const.}$	29,90	48,76	118,69	147,85	182,38	211,09	247,18	259,97	297,84	309,91	350,36	366,55	395,10	419,03	436,13	460,13	479,93	492,59	
2.	Линеарна																			
3.		$v_1=\text{const.}$	27,52	48,59	113,28	146,60	177,52	207,93	242,86	254,81	294,13	305,00	345,86	363,43	390,06	414,52	431,62	456,10	477,60	490,36
4.	Оригинална кинематика	31,10	48,62	125,10	152,05	189,28	215,62	254,89	269,86	305,41	320,93	357,10	380,78	404,31	432,57	447,33	473,99	494,05	507,53	
	$v_0=\text{const.}$	29,93	46,39	116,44	146,04	180,58	211,85	245,82	261,50	296,58	312,65	348,27	368,95	392,60	420,50	434,78	461,98	481,43	495,35	
		$v_1=\text{const.}$	24,20	46,60	111,28	146,03	178,77	209,91	242,18	258,13	294,29	307,29	346,05	367,63	390,18	418,23	433,69	460,78	480,60	494,61
5.	Оригинална кинематика	24,05	45,82	112,53	146,94	173,10	205,75	234,74	257,45	285,52	305,28	336,77	362,48	378,40	407,92	417,76	446,01	463,44	475,62	
	$v_0=\text{const.}$	29,26	46,59	116,54	147,88	182,68	212,91	246,38	262,72	296,96	313,59	348,79	370,31	392,80	421,67	436,14	463,28	481,00	496,17	
	Клатно																			
6.		$v_1=\text{const.}$	23,07	44,13	110,82	145,17	176,34	207,39	239,84	254,90	290,41	306,48	341,14	363,97	386,36	414,69	428,46	456,61	474,07	489,81

		0	9	2	7	4	0	8	1	5
--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---

	i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.		
		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	
Експериментална поставка	Смер позиционирања																			
	Метода кретања	Нелинеарност																		
	Линеарна	Оригинална кинематика	1,36	0,78	1,72	1,00	1,46	0,82	1,65	0,86	1,07	0,96	1,35	1,22	1,95	1,57	1,58	1,15	1,82	1,50
		$v_{j0}=\text{const.}$	0,20	0,44	0,49	0,44	0,56	0,86	0,39	0,18	0,54	0,50	0,62	0,58	0,58	0,42	0,47	0,75	0,40	0,49
		$v_{j1}=\text{const.}$	0,49	0,33	0,44	0,41	0,41	0,71	0,62	0,48	0,62	0,54	0,63	0,41	0,70	0,96	0,48	1,15	0,24	0,52
	Ходочасник	Оригинална кинематика	0,64	1,05	0,87	0,79	0,56	1,15	0,18	0,74	0,56	1,23	0,41	0,33	0,59	1,10	0,45	0,88	0,31	0,97
		$v_{j0}=\text{const.}$	0,71	0,34	0,39	0,41	0,57	0,72	0,53	0,24	0,51	0,42	0,31	0,20	0,40	0,52	0,60	0,40	0,61	0,44
		$v_{j1}=\text{const.}$	0,97	0,77	0,90	0,69	0,45	0,61	0,86	0,18	0,69	0,36	1,14	1,12	0,87	1,12	1,01	1,52	0,98	0,80
	Клатно	Оригинална кинематика	0,25	0,14	0,42	0,32	0,24	0,14	0,22	0,20	0,39	0,51	0,31	0,62	0,49	0,49	0,50	0,84	0,34	0,78
$v_{j0}=\text{const.}$		0,21	0,99	2,92	0,49	0,80	0,73	0,61	0,43	0,55	0,26	0,32	0,05	0,41	0,25	0,07	0,82	0,38	0,31	
$v_{j1}=\text{const.}$		0,29	0,25	0,32	0,20	0,47	1,04	0,60	0,50	0,44	0,24	0,75	0,50	0,47	0,76	0,54	0,65	0,26	0,45	

Табела 3.Б Вредности параметара повезаних са ISO 230-2:2014 експеримента по свакој експерименталној поставци за Z осу кретања платформе у [μm]

Експериментална поставка	Метода кретања	Нелинеарност	B	$\bar{B}$	R↑	R↓	R	E↑	E↓	E	M	A↑	A↓	A
1.	Линеарна	Оригинална клинемапика	34,16	-22,12	7,82	6,29	39,59	436,70	421,80	445,04	429,25	443,06	426,35	450,74
2.		$v_{10}=\text{const.}$	29,15	-19,82	2,48	3,43	31,56	450,03	443,83	462,69	446,93	451,23	445,68	464,07
3.		$v_{11}=\text{const.}$	33,33	-20,77	2,81	4,62	35,03	450,08	441,78	462,84	445,93	451,55	443,46	464,86
4.	Ходочасник	Оригинална клинемапика	28,26	-21,49	3,49	4,91	31,65	462,95	458,91	476,44	460,93	464,84	462,96	479,66
5.		$v_{10}=\text{const.}$	31,27	-22,09	2,85	2,87	33,84	451,50	448,96	465,43	450,23	454,15	450,53	467,74
6.		$v_{11}=\text{const.}$	34,75	-23,11	4,57	6,07	37,93	456,40	448,02	470,41	452,21	460,31	451,16	473,96
7.	Клатно	Оригинална клинемапика	34,41	-25,22	1,99	3,38	35,90	439,38	429,81	451,57	434,59	440,56	431,65	453,63
8.		$v_{10}=\text{const.}$	31,35	-22,73	11,70	3,97	38,18	451,74	449,59	466,91	450,66	452,91	452,19	467,94
9.		$v_{11}=\text{const.}$	34,35	-23,63	2,98	4,14	35,39	451,00	445,68	466,73	448,34	452,09	447,08	468,22

Табела 4.Б Вредности одступања од позиције за сваку експерименталну поставку по свакој мерној позицији и за оба смера кретања за клизач $J_0\gamma$ [μm]

i		1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.	
		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Експериментална поставка	Смер позиционирања																		
1.	Нелинеарност																		
	Оригинална кинематика	63,59	120,11	151,64	196,87	222,08	262,35	287,62	310,46	335,09	351,02	379,86	400,25	407,94	436,16	433,45	458,74	461,07	469,37
	$v_{70}=\text{const.}$	72,70	118,58	245,87	306,26	344,75	399,03	428,14	450,30	481,98	501,52	529,70	554,18	558,06	591,86	583,15	615,25	606,51	622,51
2.	Линеарна																		
3.	$v_{71}=\text{const.}$	66,93	118,15	234,65	303,69	335,57	393,06	420,65	441,36	475,98	493,57	522,90	549,46	550,95	585,50	577,12	609,85	603,57	619,70
4.	Оригинална кинематика	75,62	118,24	165,63	201,31	239,81	273,19	308,47	326,59	355,77	373,85	399,54	426,04	433,56	463,87	462,88	490,47	492,15	505,58
5.	Ходочасник																		
6.	$v_{70}=\text{const.}$	72,77	112,81	154,16	193,36	228,79	268,41	297,49	316,47	345,49	364,20	389,66	412,80	421,00	450,92	449,89	478,03	479,57	493,45
	$v_{71}=\text{const.}$	58,86	113,32	230,52	302,51	337,93	396,79	419,48	447,11	476,24	497,28	523,18	555,81	551,11	590,73	579,89	616,11	607,36	625,07
7.	Оригинална кинематика	58,49	111,42	233,10	304,38	327,22	388,92	406,59	445,93	462,05	494,02	509,15	548,02	534,48	576,17	558,59	596,37	585,67	601,07
8.	$v_{70}=\text{const.}$	71,16	113,28	241,40	306,34	345,32	402,48	426,76	455,06	480,56	507,48	527,33	559,86	554,81	595,59	583,16	619,45	607,87	627,04
9.	$v_{71}=\text{const.}$	56,11	107,31	229,56	300,72	333,33	392,04	415,43	441,52	469,96	495,97	515,77	550,28	545,71	585,73	572,90	610,53	599,11	619,00

Табела 5.Б Вредности стандардне девијације за сваку експерименталну поставку по свакој мерној позицији и за оба смера кретања за клизач J_0 [μm]

	i		Смер позиционирања																			
			1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.			
Експериментална поставка	Метода кретања	Нелинеарност	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓		
			3,30	1,90	2,27	1,32	1,85	1,04	2,00	1,04	2,00	1,04	1,25	1,11	1,52	1,37	2,10	1,69	1,64	1,18	1,82	1,49
			0,49	1,07	1,02	0,90	1,07	1,62	0,67	0,31	0,87	0,80	0,94	0,87	0,82	0,59	0,62	1,00	0,50	0,62	0,62	
			1,20	0,79	0,92	0,85	0,77	1,34	1,07	0,83	1,00	0,88	0,96	0,63	0,99	1,35	0,64	1,54	0,31	0,65	0,65	
1.	Линеарна	Оригинална кинематика																				
		3,30	1,90	2,27	1,32	1,85	1,04	2,00	1,04	2,00	1,04	1,25	1,11	1,52	1,37	2,10	1,69	1,64	1,18	1,82	1,49	
$v_{j0}=\text{const.}$		0,49	1,07	1,02	0,90	1,07	1,62	0,67	0,31	0,87	0,80	0,94	0,87	0,82	0,59	0,62	1,00	0,50	0,62	0,62		
2.	Линеарна	$v_{j1}=\text{const.}$	1,20	0,79	0,92	0,85	0,77	1,34	1,07	0,83	1,00	0,88	0,96	0,63	0,99	1,35	0,64	1,54	0,31	0,65	0,65	
3.		Оригинална кинематика																				
4.		$v_{j1}=\text{const.}$	1,54	2,55	1,15	1,05	0,71	1,46	0,22	0,90	0,66	1,43	0,45	0,37	0,64	1,18	0,46	0,91	0,31	0,97	0,97	
5.	Ходочасник	$v_{j0}=\text{const.}$	1,73	0,83	0,52	0,54	0,72	0,91	0,64	0,29	0,59	0,49	0,35	0,23	0,43	0,56	0,62	0,41	0,61	0,44	0,44	
6.		$v_{j1}=\text{const.}$	2,37	1,88	1,86	1,44	0,86	1,15	1,50	0,31	1,11	0,57	1,73	1,69	1,23	1,58	1,35	2,03	1,24	1,02	1,02	
7.		Оригинална кинематика	0,61	0,34	0,88	0,67	0,45	0,26	0,38	0,35	0,63	0,83	0,47	0,94	0,70	0,69	0,67	1,13	0,43	0,99	0,99	
8.	Клатно	$v_{j0}=\text{const.}$	0,50	2,41	6,06	1,01	1,51	1,37	1,06	0,74	0,88	0,42	0,48	0,08	0,58	0,35	0,09	1,09	0,48	0,39	0,39	
9.		$v_{j1}=\text{const.}$	0,71	0,61	0,65	0,42	0,88	1,96	1,04	0,86	0,71	0,40	1,13	0,75	0,67	1,07	0,72	0,87	0,32	0,57	0,57	

Табела 6.Б Вредности параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_{0u} [μm]

Експериментална поставка	Метода кретања	Нелинеарност	B	$\bar{B}$	$R^{\uparrow}$	$R^{\downarrow}$	R	$E^{\uparrow}$	$E^{\downarrow}$	E	M	$A^{\uparrow}$	$A^{\downarrow}$	A
1.	Линеарна	Оригинална кинематика	56,51	-29,22	13,19	7,58	66,90	397,47	349,27	405,78	373,37	407,70	356,03	415,36
2.		$v_{J0}=\text{const.}$	60,39	-34,29	4,27	6,48	64,23	533,81	503,93	549,81	518,87	535,80	507,30	552,03
3.		$v_{J1}=\text{const.}$	69,03	-36,22	4,79	6,17	72,57	536,64	501,55	552,77	519,09	539,65	504,44	556,47
4.	Ходочасник	Оригинална кинематика	42,62	-27,30	6,18	10,22	50,82	416,53	387,34	429,96	401,93	420,24	394,39	434,99
5.		$v_{J0}=\text{const.}$	40,04	-27,96	6,94	3,63	45,17	406,80	380,64	420,67	393,72	411,48	383,18	425,02
6.		$v_{J1}=\text{const.}$	71,99	-40,02	9,46	8,12	78,57	548,50	511,75	566,21	530,13	555,72	517,54	572,97
7.	Клатно	Оригинална кинематика	71,28	-43,44	3,50	4,52	74,37	527,18	489,66	542,58	508,42	529,25	492,32	545,78
8.		$v_{J0}=\text{const.}$	64,94	-38,69	24,24	9,65	79,08	536,71	513,76	555,88	525,23	538,67	519,36	557,67
9.		$v_{J1}=\text{const.}$	71,16	-40,58	4,51	7,83	73,31	543,01	511,69	562,89	527,35	545,07	514,05	565,44

Табела 7.Б Вредности одступања од позиције за сваку експерименталну поставку по свакој мерној позицији и за оба смера кретања за клизач J_1 у $[\mu\text{m}]$

Експериментална поставка	i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.	
		Смер позиционирања		Метода кретања		Нелинеарност													
1.		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
2.		50,23	94,87	185,17	240,39	256,33	302,81	315,27	340,30	353,28	370,08	385,50	406,20	398,74	426,32	411,12	435,10	423,97	431,60
3.		139,65	227,76	397,50	495,13	504,15	583,52	567,96	597,34	591,94	615,94	601,45	629,26	584,94	620,36	572,33	603,83	555,56	570,21
4.		52,87	93,33	183,13	237,01	259,60	304,07	322,17	338,03	361,23	374,58	392,71	412,66	408,84	434,48	423,61	447,63	437,48	449,17
5.		59,73	93,40	202,25	245,81	276,79	315,32	338,12	357,98	375,08	394,14	405,48	432,36	423,78	453,40	439,03	465,19	452,55	464,90
6.		57,48	89,11	188,24	236,10	264,07	309,80	326,09	346,90	364,24	383,98	395,44	418,93	411,50	440,74	426,71	453,40	440,98	453,74
7.		46,49	89,51	179,91	236,09	261,42	306,95	321,27	342,43	361,43	377,39	392,92	417,43	408,97	438,37	425,64	452,23	440,23	453,06
8.		46,20	88,01	181,92	237,55	253,14	300,87	311,40	341,53	350,66	374,92	382,39	411,58	396,62	427,56	410,00	437,74	424,50	435,67
9.		56,21	89,48	188,40	239,08	267,14	311,36	326,84	348,52	364,71	385,14	396,04	420,47	411,71	441,97	428,05	454,68	440,60	454,49
		44,32	84,76	179,16	234,70	257,86	303,28	318,16	338,15	356,66	376,40	387,35	413,28	404,96	434,65	420,51	448,13	434,25	448,66

		7	6	7	9	0	4	2	8	1
--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Експериментална поставка	i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.		8.		9.		
		Смер позиционирања		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	
1.	Метода кретања	Нелинеарност																		
	Линеарна	Оригинална кинематика	2,61	1,50	2,78	1,61	2,13	1,20	2,19	1,14	1,32	1,17	1,54	1,39	2,05	1,65	1,55	1,12	1,67	1,37
		$v_{j0}=\text{const.}$	0,95	2,05	1,65	1,46	1,56	2,37	0,89	0,41	1,07	0,99	1,06	0,99	0,86	0,62	0,61	0,98	0,46	0,56
		$v_{j1}=\text{const.}$	0,95	0,63	0,72	0,66	0,60	1,04	0,82	0,63	0,76	0,67	0,72	0,47	0,74	1,00	0,47	1,13	0,22	0,47
2.	Ходочасник	Оригинална кинематика	1,22	2,02	1,41	1,28	0,82	1,68	0,24	0,98	0,69	1,51	0,46	0,37	0,62	1,15	0,44	0,86	0,28	0,89
		$v_{j0}=\text{const.}$	1,37	0,66	0,64	0,66	0,83	1,05	0,70	0,32	0,63	0,51	0,35	0,23	0,42	0,55	0,59	0,39	0,56	0,40
		$v_{j1}=\text{const.}$	1,87	1,48	1,45	1,12	0,66	0,89	1,15	0,24	0,85	0,44	1,30	1,27	0,91	1,17	0,99	1,49	0,90	0,74
	Клатно	Оригинална кинематика	0,48	0,27	0,68	0,52	0,35	0,20	0,29	0,27	0,48	0,63	0,35	0,71	0,52	0,51	0,49	0,83	0,31	0,72
$v_{j0}=\text{const.}$		0,40	1,91	4,73	0,79	1,17	1,06	0,81	0,57	0,67	0,32	0,36	0,06	0,43	0,26	0,07	0,80	0,35	0,28	
$v_{j1}=\text{const.}$		0,56	0,48	0,51	0,33	0,68	1,51	0,79	0,66	0,54	0,30	0,85	0,56	0,50	0,79	0,53	0,64	0,24	0,41	

Табела 9.Б Вредности параметара експеримента повезаних са ISO 230-2:2014 за клизач J_1 у $[\mu\text{m}]$

Метода кретања	Нелинеарност	B	$\bar{B}$	$R_{\uparrow}$	$R_{\downarrow}$	R	$E_{\uparrow}$	$E_{\downarrow}$	E	M	$A_{\uparrow}$	$A_{\downarrow}$	A
Линеарна	Оригинална кинематика	55,22	-29,79	11,11	6,59	64,00	373,73	340,23	384,87	355,23	382,29	345,47	392,33
	$v_{j0}=\text{const.}$	97,63	-47,54	6,58	9,48	103,85	461,80	401,49	489,61	431,65	465,83	407,58	493,48
	$v_{j1}=\text{const.}$	53,88	-27,70	3,78	4,53	56,64	384,61	355,84	396,30	370,23	386,95	358,04	399,14
Ходочасник	Оригинална кинематика	43,57	-27,74	5,64	8,07	48,95	392,82	371,80	405,46	382,16	395,82	377,55	409,63
	$v_{j0}=\text{const.}$	47,86	-28,66	5,48	4,19	50,46	383,50	364,63	396,26	374,07	387,36	366,76	399,81
	$v_{j1}=\text{const.}$	56,18	-30,58	7,47	5,96	61,32	393,73	363,55	406,57	378,64	399,27	368,66	412,45
Клатно	Оригинална кинематика	55,63	-33,18	2,73	3,32	58,04	378,30	349,73	391,54	362,98	379,88	351,93	394,16
	$v_{j0}=\text{const.}$	50,68	-29,50	18,91	7,62	61,72	384,39	365,20	398,47	374,70	385,87	370,61	400,87
	$v_{j1}=\text{const.}$	55,54	-30,97	3,39	6,06	57,21	389,93	363,90	404,34	376,91	391,51	365,69	406,28

Табела 10.Б Вредности параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 препоруком по свакој експерименталној поставци за Z осу кретања платформе у $[\mu\text{m}]$

Експериментална поставка	Метода кретања	Нелинеарност	$P_{S\text{max}}$	P	$\bar{U}$
1.	Линеарна	Оригинална кинематика	10,58	453,22	22,12
2.		$v_{j0}=\text{const.}$	4,27	464,98	19,82
3.		$v_{j1}=\text{const.}$	4,98	465,21	20,77
4.	Ходочасник	Оригинална кинематика	5,37	480,89	21,49
5.		$v_{j0}=\text{const.}$	3,86	468,59	22,09
6.		$v_{j1}=\text{const.}$	7,59	475,71	23,11
7.	Клатно	Оригинална кинематика	4,03	453,84	25,22
8.		$v_{j0}=\text{const.}$	10,24	469,74	22,73
9.		$v_{j1}=\text{const.}$	4,51	468,61	23,63

Табела 11.Б Вредности параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 препоруком по свакој експерименталној поставци за клизач J_0 у $[\mu\text{m}]$

Експериментална поставка	Метода кретања	Нелинеарност	$P_{S\text{max}}$	P	$\bar{U}$
1.	Линеарна	Оригинална кинематика	15,58	418,53	29,22
2.		$v_{j0}=\text{const.}$	8,06	553,83	34,29
3.		$v_{j1}=\text{const.}$	7,24	557,20	36,22
4.	Ходочасник	Оригинална кинематика	15,58	438,03	27,30
5.		$v_{j0}=\text{const.}$	7,70	426,09	27,96
6.		$v_{j1}=\text{const.}$	12,72	575,96	40,02
7.	Клатно	Оригинална кинематика	5,39	546,13	43,44
8.		$v_{j0}=\text{const.}$	21,21	561,55	38,69
9.		$v_{j1}=\text{const.}$	8,98	566,21	40,58

Табела 12.Б Вредности параметара експеримента повезаних са VDI/DGQ 3441 препоруком по свакој експерименталној поставци за клизач J_1 у $[\mu\text{m}]$

Експериментална поставка	Метода кретања	Нелинеарност	$P_{S\max}$	P	$\bar{U}$
1.	Линеарна	Оригинална кинематика	13,16	395,04	29,79
2.		$v_{j0}=\text{const.}$	11,79	497,19	47,54
3.		$v_{j1}=\text{const.}$	5,22	399,70	27,70
4.	Ходочасник	Оригинална кинематика	9,71	412,27	27,74
5.		$v_{j0}=\text{const.}$	6,08	400,74	28,66
6.		$v_{j1}=\text{const.}$	10,05	414,48	30,58
7.	Клатно	Оригинална кинематика	3,95	394,64	33,18
8.		$v_{j0}=\text{const.}$	16,55	403,23	29,50
9.		$v_{j1}=\text{const.}$	6,60	407,12	30,97

Прилог В

Табеле мерне несигурности тачности позиционирања

Овај прилог садржи све табеле, које садрже вредности несигурности за сваку осу, за сваку експерименталну поставку и посебно за клизаче.

Табела 1.В Кориговани вредности стандардне девијације и поновљивости код X осе за методу кретања ходочасника

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i, \text{corr.}}, \updownarrow [\mu\text{m}]$	1,37	0,60	1,09	0,62	1,37	0,18	0,59	0,82	0,81	0,45	0,26	0,43	0,45	0,62
$R_{i, \text{corr.}}, \updownarrow [\mu\text{m}]$	5,49	2,39	4,37	2,46	5,48	0,72	2,36	3,29	3,25	1,79	1,04	1,72	1,79	2,47
$R_{i, \text{corr.}} [\mu\text{m}]$	24,09		12,87		56,57		61,26		38,56		52,38		51,53	
$R_{\text{corr.}}, \up [\mu\text{m}]$	5,49													
$R_{\text{corr.}}, \downarrow [\mu\text{m}]$	3,29													
$R_{\text{corr.}} [\mu\text{m}]$	5,49													

Табела 2.В Кориговани вредности стандардне девијације и поновљивости код X осе за методу кретања клатна

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i, \text{corr.}} \updownarrow [\mu\text{m}]$	0,15	0,81	0,23	0,88	0,74	0,67	0,53	0,85	0,91	0,52	0,76	0,27	0,90	0,48
$R_{i, \text{corr.}} \updownarrow [\mu\text{m}]$	0,60	3,24	0,90	3,51	2,97	2,68	2,10	3,41	3,63	2,07	3,05	1,07	3,61	1,90
$R_{i, \text{corr.}} [\mu\text{m}]$	23,07		15,52		52,37		53,52		30,65		36,72		54,54	
$R_{\text{corr.}, \uparrow} [\mu\text{m}]$	3,63													
$R_{\text{corr.}, \downarrow} [\mu\text{m}]$	3,51													
$R_{\text{corr.}} [\mu\text{m}]$	3,63													

Табела 3.В Кориговани вредности стандардне девијације и поновљивости код Y осе за линеарну методу кретања

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i, \text{corr.}} \updownarrow [\mu\text{m}]$	10,58	22,78	32,91	40,73	15,02	12,90	25,92	17,22	16,06	26,14	25,38	22,06	23,60	14,27
$R_{i, \text{corr.}} \updownarrow [\mu\text{m}]$	42,33	91,12	131,63	162,91	60,08	51,60	103,69	68,89	64,25	104,58	101,53	88,25	94,39	57,08
$R_{i, \text{corr.}} [\mu\text{m}]$	228,52		438,36		64,87		146,08		90,86		188,82		209,83	
$R_{\text{corr.}} \up [\mu\text{m}]$	131,63													
$R_{\text{corr.}} \downarrow [\mu\text{m}]$	162,91													
$R_{\text{corr.}} [\mu\text{m}]$	162,91													

Табела 4.В Кориговани вредности стандардне девијације и поновљивости код Y осе за методу кретања ходочасника

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i, \text{кор.}} \uparrow \downarrow [\mu\text{m}]$	45,85	25,20	46,00	23,83	50,35	20,06	14,20	26,15	12,41	12,41	13,78	16,98	8,36	7,59
$R_{i, \text{кор.}} \uparrow \downarrow [\mu\text{m}]$	183,40	100,82	184,01	95,32	201,39	80,25	56,80	104,62	49,63	49,63	55,11	67,93	33,45	30,34
$R_{i, \text{кор.}} [\mu\text{m}]$	352,55		475,69		308,52		239,82		180,86		243,19		180,60	
$R_{\text{кор.}, \uparrow} [\mu\text{m}]$	201,39													
$R_{\text{кор.}, \downarrow} [\mu\text{m}]$	104,62													
$R_{\text{кор.}} [\mu\text{m}]$	201,39													

Табела 5.В Корекција несигурности $u_{E, \text{MT}}$, $u_{M, \text{MT}}$ због нелинеарности O-X glide механизма за Z осу методом кретања ходочасника за оба клизача

Z координата [mm]	-60	-50,5	-44	-37	-31	-24,5	-17,5	-11,5	-5
Zp координата [mm]	-296,12	-286,62	-280,12	-273,12	-267,12	-260,62	-253,62	-247,62	-241,12
$s_1 [\mu\text{m}]$	100,11	78,83	65,98	53,32	43,27	33,11	22,88	14,64	6,19
$\Delta s_1 [\mu\text{m}]$	12,79	34,07	46,92	59,58	69,63	79,79	90,02	98,26	106,71
$u_{E, \text{MT}, s_1} [\mu\text{m}]$	0,13	0,33	0,46	0,58	0,68	0,78	0,88	0,96	1,04
$u_{M, \text{MT}, s_1} [\mu\text{m}]$	0,03	0,08	0,11	0,14	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
$u_{T, \text{kor.}} (s_1) [\mu\text{m}]$	0,13	0,34	0,47	0,60	0,70	0,80	0,91	0,99	1,08
$s_2 [\mu\text{m}]$	128,75	112,04	102,05	92,30	84,65	76,97	69,34	63,25	57,09
$\Delta s_2 [\mu\text{m}]$	10,14	26,84	36,83	46,58	54,24	61,91	69,55	75,63	81,80
$u_{E, \text{MT}, s_2} [\mu\text{m}]$	0,10	0,26	0,36	0,46	0,53	0,61	0,68	0,74	0,80
$u_{M, \text{MT}, s_2} [\mu\text{m}]$	0,02	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,18	0,20
$u_{T, \text{kor.}} (s_2) [\mu\text{m}]$	0,10	0,27	0,37	0,47	0,55	0,62	0,70	0,76	0,82

Табела 6. В Корекција несигурности $u_{E, \text{MT}}$, $u_{M, \text{MT}}$ због нелинеарности O-X glide механизма за Z осу методом кретања клатна за оба клизача

Z координата [mm]	-60	-50,5	-44	-37	-31	-24,5	-17,5	-11,5	-5
Zp координата [mm]	-296,12	-286,62	-280,12	-273,12	-267,12	-260,62	-253,62	-247,62	-241,12
$s_1 [\mu\text{m}]$	100,11	78,83	65,98	53,32	43,27	33,11	22,88	14,64	6,19
$\Delta s_1 [\mu\text{m}]$	12,79	34,07	46,92	59,58	69,63	79,79	90,02	98,26	106,71
$u_{E, \text{MT}, s_1} [\mu\text{m}]$	0,15	0,39	0,54	0,69	0,81	0,92	1,04	1,14	1,24
$u_{M, \text{MT}, s_1} [\mu\text{m}]$	0,03	0,08	0,11	0,14	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
$u_{T, \text{kor.}} (s_1) [\mu\text{m}]$	0,15	0,40	0,56	0,70	0,82	0,94	1,07	1,16	1,26
$s_2 [\mu\text{m}]$	128,75	112,04	102,05	92,30	84,65	76,97	69,34	63,25	57,09
$\Delta s_2 [\mu\text{m}]$	10,14	26,84	36,83	46,58	54,24	61,91	69,55	75,63	81,80
$u_{E, \text{MT}, s_2} [\mu\text{m}]$	0,12	0,31	0,43	0,54	0,63	0,72	0,81	0,88	0,95
$u_{M, \text{MT}, s_2} [\mu\text{m}]$	0,02	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,18	0,20
$u_{T, \text{kor.}} (s_2) [\mu\text{m}]$	0,12	0,32	0,44	0,55	0,64	0,73	0,82	0,89	0,97

Табела 7.В Кориговани вредности стандардне девијације и поновљивости код кретања платформе по Z оси за методу кретања ходочасника

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i,corr.} \updownarrow [\mu m]$	0,63	1,05	0,87	0,79	0,55	1,15	0,17	0,74	0,56	1,23	0,40	0,32	0,59	1,10
$R_{i,corr.} \updownarrow [\mu m]$	2,52	4,19	3,48	3,15	2,21	4,59	0,67	2,95	2,23	4,91	1,60	1,27	2,36	4,38
$R_{i,corr.} [\mu m]$	20,89		30,26		29,74		16,79		19,08		25,11		31,63	
$R_{corr., \uparrow} [\mu m]$	3,48													
$R_{corr., \downarrow} [\mu m]$	4,91													
$R_{corr.} [\mu m]$	4,91													

Табела 8.В Кориговани вредности стандардне девијације и поновљивости код кретања платформе по Z оси за методу кретања клатна

i	1.		2.		3.		4.		5.		6.		7.	
Смер позиционирања	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
$S_{i,corr.} \updownarrow [\mu m]$	0,25	0,14	0,42	0,32	0,24	0,14	0,22	0,20	0,39	0,51	0,31	0,62	0,49	0,49
$R_{i,corr.} \updownarrow [\mu m]$	1,00	0,56	1,69	1,29	0,95	0,55	0,88	0,82	1,56	2,05	1,24	2,50	1,97	1,95
$R_{i,corr.} [\mu m]$	22,55		35,90		33,39		23,56		21,56		27,58		31,47	
$R_{corr.} \up [\mu m]$	1,99													
$R_{corr.} \downarrow [\mu m]$	3,38													
$R_{corr.} [\mu m]$	3,38													

Табела 9.В Неасигурности параметара тачности позиционирања клизача J_0 по методама кретања за оригиналну кинематику

Несигурност	Метода кретања		
	Линеарна	Ходочасник	Клатно
$u(R\updownarrow) [\mu\text{m}]$	0,38	0,13	0,03
$U(R\updownarrow) [\mu\text{m}]$	0,76	0,27	0,05
$u(B) [\mu\text{m}]$	17,99	16,14	15,87
$U(B) [\mu\text{m}]$	35,98	32,27	31,75
$u(R) [\mu\text{m}]$	18,00	16,14	15,87
$U(R) [\mu\text{m}]$	35,99	32,27	31,75
$u(M, E, E\updownarrow) [\mu\text{m}]$	9,31	8,42	8,29
$U(M, E, E\updownarrow) [\mu\text{m}]$	18,63	16,84	16,59
$u(A, A\updownarrow) [\mu\text{m}]$	9,32	8,42	8,29
$U(A, A\updownarrow) [\mu\text{m}]$	18,64	16,84	16,59

Табела 10.В Несигурности параметара тачности позиционирања по различитим експерименталним поставкама за платформу

Несигурност	Експериментална поставка					
	2.	3.	5.	6.	8.	9.
$u(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,38	0,38	0,13	0,13	0,03	0,13
$U(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,76	0,76	0,27	0,27	0,05	0,27
$u(B) [\mu m]$	2,05	2,05	2,04	2,04	2,04	2,04
$U(B) [\mu m]$	4,10	4,10	4,08	4,08	4,08	4,08
$u(R) [\mu m]$	2,08	2,08	2,05	2,05	2,04	2,05
$U(R) [\mu m]$	4,17	4,17	4,09	4,09	4,08	4,09
$u(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	2,84	2,89	2,88	2,91	2,86	2,90
$U(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	5,67	5,79	5,77	5,82	5,73	5,80
$u(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	2,86	2,92	2,89	2,91	2,86	2,90
$U(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	5,73	5,84	5,77	5,83	5,73	5,81

Табела 11.В Несигурности параметара тачности позиционирања по различитим експерименталним поставкама за клизач J_0

Несигурност	Експериментална поставка					
	2.	3.	5.	6.	8.	9.
$u(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,38	0,38	0,13	0,13	0,03	0,13
$U(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,76	0,76	0,27	0,27	0,05	0,27
$u(B) [\mu m]$	15,72	15,66	15,66	15,52	15,65	15,42
$U(B) [\mu m]$	31,45	31,31	31,32	31,03	31,30	30,84
$u(R) [\mu m]$	15,73	15,66	15,66	15,52	15,65	15,42
$U(R) [\mu m]$	31,46	31,32	31,32	31,03	31,30	30,84
$u(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	8,22	8,19	8,19	8,12	8,19	8,08
$U(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	16,45	16,38	16,39	16,25	16,37	16,16
$u(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	8,23	8,20	8,19	8,12	8,19	8,08
$U(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	16,46	16,40	16,39	16,25	16,38	16,16

Табела 12.В Несигурности параметара тачности позиционирања по различитим експерименталним поставкама за клизач J_1

Несигурност	Експериментална поставка					
	2.	3.	5.	6.	8.	9.
$u(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,38	0,38	0,13	0,13	0,03	0,13
$U(R_{\uparrow,\downarrow}) [\mu m]$	0,76	0,76	0,27	0,27	0,05	0,27
$u(B) [\mu m]$	14,23	14,16	14,16	14,02	14,15	13,92
$U(B) [\mu m]$	28,45	28,32	28,33	28,04	28,30	27,84
$u(R) [\mu m]$	14,23	14,16	14,16	14,02	14,15	13,92
$U(R) [\mu m]$	28,46	28,33	28,33	28,04	28,30	27,84
$u(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	7,51	7,48	7,48	7,41	7,47	7,37
$U(M, E, E_{\uparrow}, E_{\downarrow}) [\mu m]$	15,02	14,96	14,96	14,82	14,95	14,73
$u(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	7,52	7,49	7,48	7,41	7,47	7,37
$U(A, A_{\uparrow}, A_{\downarrow}) [\mu m]$	15,04	14,98	14,96	14,83	14,95	14,73

Биографија

Будимир Александер Буда је рођен 7. јануара 1994. године у Будимпешти. Основну школу је похађао у Српској Основној Школи и Гимназији (СОШИГ) „Никола Тесла“ у Будимпешти, па се у осмом разреду, са породицом, преселио у Бања Луку, БиХ, где је завршио Основну школу „Алекса Шантић“. Средњу школу је започео у чувеној Бањалучкој гимназији, где је завршио три разреда, након чега се са породицом вратио у Будимпешту. Бањалучка гимназија је имала велики утицај на његов интелектуални развој, као и на опредељење у вези са струком у којој ће наставити школовање. У Будимпешти је завршио 4. разред гимназије у СОШИГ-у „Никола Тесла“. Основне студије је завршио на Сент Иштван универзитету у месту Годоло, Мађарска, (Szent István Egyetem, Gödöllő) на Машинском факултету са просечном оценом 4,77 (од 5), на усмерењу енергетика у инжењерству. Мастер студије је завршио на Сент Иштван универзитету у месту Годоло, Мађарска (Szent István Egyetem, Gödöllő), на Машинском факултету са просечном оценом 4,65 (од 5), на усмерењу развојног машинства. Током студија је више пута учествовао на разним студентским такмичењима. Године 2013. заузео је прво место на такмичењу из статике. Укупно четири пута је излагао своје радове на студентским конференцијама. За школску 2013/2014. и 2014/2015. годину је добио републичку стипендију о изврстности.

Професионалну каријеру је започео 2016. године као пројект менаџер у фирми U Light Kft. у Будимпешти. Фирма се бавила пројектима енергетске ефикасности у јавном осветљењу на територији Мађарске. После завршетка мастер студија, постао је директор огранка фирме U Light Kft. Нови Сад, која је била продужна рука истоимене матичне фирме у Србији. У Новом Саду је допринео развоју пројеката јавно-приватног партнерства (ЈПП), инвестиционог одржавања јавног осветљења, замена старих неефикасних светиљки новијим, ефикаснијим LED светиљкама. Године 2020. променио је радно место и прешао је у фирму ESCO ELIOS доо Нови Сад, на место техничког директора, где је остао до 1. јануара 2024. године. Од 2016. до 2024. године је допринео развоју и имплементацији више од 40 пројеката ЈПП са више од 100.000 уграђених LED светиљки, успоставио систем одржавања, сарађивао у развоју софтвера за управљање имплементације и одржавања, а такође и водио развој електронике за управљање јавним осветљењем. Од јануара 2024. године је директор фирме STC Kft из Будимпеште, која се бави одржавањем, калибрацијом, превозом и пуштањем у рад CNC машина.

Поред професионалног живота, и у спорту је имао велике успехе. Био је кадетски и јуниорски шампион Босне и Херцеговине у својој категорији, затим двоструки шампион Мађарске у сениорима, вицешампион студентских игара из Каратеа (борбе екипно) у Загребу 2016. године и шампион студентских игара из Каратеа (борбе екипно) у Португалији 2017. године. Има звање карате мајстора црни појас 3. ДАН.

Библиографија

М22 – РАД У ИСТАКНУТОМ МЕЂУНАРОДНОМ ЧАСОПИСУ

1. Tabakovic, S., Zeljkovic, M., Zivanovic, S., **Budimir, A.**, Dimic, Z., Kosarac, A.: (2024). Calibration of a Hybrid Machine Tool from the Point of View of Positioning Accuracy, Applied Sciences, Vol.14, no.12, p. 5275. <https://doi.org/10.3390/app14125275>

М23 – РАД У МЕЂУНАРОДНОМ ЧАСОПИСУ

1. **Budimir, A.**, Tabaković, S., Zeljković, M. (2023). The Influence of the Movement Method on the Results of Machine Tool Positioning Accuracy Analysis, Measurement Science Review, Vol.23, no.3, 2023, pp.136-145. <https://doi.org/10.2478/msr-2023-0018>.

М33 – САОПШТЕЊЕ СА МЕЂУНАРОДНОГ СКУПА ШТАМПАНО У ЦЕЛИНИ

1. **Budimir, A.**, et al. (2022) Ispitivanje tačnosti pozicioniranja mašina alatki sa hibridnom kinematikom prema standardu ISO 230-2. In: Proceedings of 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA, Jahorina, 16–18. March 2022. Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, 2022. p. 128-133. https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_machinery_4661
2. Budimir, A., Tabaković, S., Zeljković, M., Živanović, S., Dimić, Z.. (2024) Straightness Analysis of machine tool with non-linear kinematics, In: Proceedings of the 15th International Scientific Conference „MMA 2024 Flexible Technologies”, Novi Sad, Serbia, September 24-26, 2024 <https://doi.org/10.24867/MMA-2024-02-009>

М52 – ИСТАКНУТИ НАЦИОНАЛНИ ЧАСОПИС

1. Tabaković, S., **Budimir, A.**, Živanović, S., & Dimić, Z.. (2022). Analysis of Positioning Accuracy of Prototype Machine Tools with Hybrid Kinematics. in Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology JMAIT, University of Novi Sad., 7(1), pp.: 13-18., https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_machinery_4648

М63 – САОПШТЕЊЕ СА СКУПА НАЦИОНАЛНОГ ЗНАЧАЈА ШТАМПАНО У ЦЕЛИНИ

1. **Budimir, A.**, Tabaković, S., Živanović, S., Zeljković, M., Dimić, Z.. (2023) Kinematic analysis of machine tool with non-linear kinematics for calibration purposes. In: Proceedings of the 6th International Conference „Mechanical Engineering in XXI Century“, 14-15. December 2023. University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, 2023.

-
2. Tabaković, S, **Budimir, A.**, et al. (2023) Examination of the positioning accuracy of the machine tool with hybrid kinematics. In: Proceedings of the 16th International Conference on „Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2023”, 47-53,. University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 2023.

Изјава бр. 1.

Изјава о ауторству

Потписани Будимир Александер Буда (Budimir Alexander Buda)

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**Утицај нелинеарности машине алатке са паралелном кинематиком на
параметре тачности позиционирања**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.



Потпис кандидата

У Новом Саду, дана 17.04.2025. године

Изјава бр. 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада
и дозвола за објављивање личних података**

Име и презиме аутора Александер Буда Будимир (Budimir Alexander Buda)

Студијски програм Машинство

Наслов рада Утицај нелинеарности машине алатке са паралелном кинематиком на параметре тачности позиционирања

Ментор проф. др. Слободан Табаковић

Потписани

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за постављање на увид јавности на порталу Дигитална библиотека дисертација Универзитета у Новом Саду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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 дисертација Универзитета у Новом Саду, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Новом Саду, као и у репозиторијуму НаРДyC.



Потпис кандидата

У Новом Саду, дана 17.04.2025. године

Изјава бр. 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Библиотеку Факултета техничких наука и Централну библиотеку Универзитета у Новом Саду да у Дигиталну библиотеку дисертација Универзитета у Новом Саду унесу моју докторску дисертацију под насловом: **Утицај нелинеарности машине алатке са паралелном кинематиком на параметре тачности позиционирања**, која ће потом бити преснимљена у репозиторијум НаРДуС.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталну библиотеку дисертација Универзитета у Новом Саду и у репозиторијум НаРДуС могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима



Потпис кандидата

У Новом Саду, дана 17.04.2025. године

1. **Ауторство** – Дозвољавање 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. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прераде.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију 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. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију 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 не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију 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 дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију 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. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Утицај нелинеарности машине алатке са паралелном кинематиком на параметре тачности позиционирања
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Факултет Техничких Наука Универзитета у Новом Саду, Департман за производно машинство
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
-
1. Опис података
1.1 Врста студије Докторска дисертација 1.2 Врсте података а) <u>квантитативни</u> б) квалитативни 1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту: Литературни извори ж) мапа, навести врсту _____ з) остало: Лабораторијска експериментална истраживања.

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека: **.xlsx**
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека: **.pdf**
- d) Текст фајл, датотека: **.docx, .doc**
- e) JPG фајл, датотека: **.jpg, .png**
- f) Остало, датотека: **Matlab верзије R2024a update 5 (24.1.0.2653294), DAT file**

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли: 4
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.): **21 (тачност позиционирања, умиривање и вибрације) + 1 (умиривање система на FM38) + 9 (правост) + 3 (drift test) = 34 (укупно)**

1.3.3. Поновљена мерења

a) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је _____
- б) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

a) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип: **Експериментално испитивање утицаја нелинеарности машине алатке са паралелном кинематиком на параметре тачности позиционирања**

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип: **Анализа доступне литературе из области истраживања**

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Ласерски интерферометар HP 5526A, који садржи: Ласерска глава HP 5500C, фабрички број: 1920A02247, Ласерски показивач HP 5505A, фабрички број: 2240A02798, Аутоматски компензатор HP5510A, фабрички број: 2044 A 02748

Ardiuno UNO контролерска картица са сензором температуре и влаге

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

У овом раду представљени подаци потичу из различитих експерименталних испитивања. Њихов квалитет је осигуран избором адекватног броја узорака, што омогућава примену статистичких метофа приликом обраде резултата. Поступак испитивања је утврђен важећим стандардима, техничким прописима или релевантном стручном литературом.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података је подразумевала физичку проверу, што је био задатак докторанда. Анализа уноса података је такође била задатак докторанда, али је праћена и усмеравана од стране ментора рада.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса: <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) Да

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2. Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена? Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Будимир Александер Буда (Budimir Alexander Buda), buda.karate@gmail.com

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Будимир Александер Буда (Budimir Alexander Buda), buda.karate@gmail.com

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Будимир Александер Буда (Budimir Alexander Buda), buda.karate@gmail.com