



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ- ГАБРОВО

Факултет „МАШИНОСТРОЕНЕ И УРЕДОСТРОЕНЕ”

маг.инж. Христиан Йосифов Митев

**ПРОБЛЕМИ ПРИ МАШИНОСТРОИТЕЛНОТО
ОБОРУДВАНЕ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Докторска програма: Металорежещи машини и системи

Габрово, 2020г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ- ГАБРОВО

Факултет „МАШИНОСТРОЕНЕ И УРЕДОСТРОЕНЕ”

маг.инж. Христиан Йосифов Митев

**ПРОБЛЕМИ ПРИ МАШИНОСТРОИТЕЛНОТО
ОБОРУДВАНЕ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Докторска програма: Металорежещи машини и системи

Научни ръководители: доц. д-р инж. Асен Петков Найденов
доц. д-р инж. Станимир Йорданов Йорданов

Рецензенти: проф. д-р инж. Ирина Стефанова Александрова
доц. д-р инж. Илия Георгиев Попов

Габрово, 2020г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „МАШИНОСТРОЕНЕ И УРЕДОСТРОЕНЕ“ на Технически университет – Габрово, проведен на 19.06.2020 г.

Дисертационният труд съдържа 146 страници. Научното съдържание е представено в увод, 5 глави и включва 140 фигури и 8 таблици. Цитирани са 134 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката и изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на Г.
от ч. в зала на Технически университет – Габрово.

.....

Автор: маг.инж. Христиан Йосифов Митев

Заглавие ПРОБЛЕМИ ПРИ МАШИНОСТРОИТЕЛНОТО ОБОРУДВАНЕ С
ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА

Тираж: бр.

Място на отпечатване:

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Преобладаващата част от съвременното машиностроително оборудване е изградена с последователна структура, чието предимство е, че кинематичните зависимости са прости. След 1990г. се наблюдава и засилен интерес на производителите и потребителите на машини към конструкции с паралелна кинематика. При машините с паралелна кинематика положението или траекторията на крайното звено (инструмента) се формира от едновременното преместване на всички звена. Аналогично се разпределят и предават натоварванията в конструкцията. Малката маса на движещите се елементи на машините с паралелна кинематика и добрата им стабилност позволяват високи скорости и ускорения, които напълно удовлетворяват изискванията на High Speed Machining. От друга страна, работното пространство на машините с паралелна кинематика е със сложна геометрична форма и функционалният му обем е малък в сравнение с пространството, заемано от машината. Тази особеност предполага изследване и оптимизиране на размерите и разположението на звената, съобразно изискванията на самия процес, осъществяван върху оборудването. Структурата и особеностите на оборудването с паралелна кинематика предлагат допълнителни възможности за реализиране на специфични стратегии и подходи при обработване. Това налага преразглеждане на традиционите подходи и формулиране на нови методи и инструменти, отчитащи спецификата на оборудването.

Цел и задачи на дисертационния труд

Основна цел на дисертационната работа е изследването на проблеми при оборудването с паралелна кинематика с оглед разкриване на възможности за вграждането му в структури на машиностроително оборудване.

Задачи:

- Анализирание на технологичните възможности на машиностроително оборудване с паралелна кинематика и избор на обект на изследване.
- Теоретично изследване и моделиране на работата на създаден за тази цел 3D модел на оборудване с паралелна кинематика и изграждане на реален експериментален модел на Линапод.
- Разработване на задвижване и управление на механизъм с паралелна кинематика, тип Линапод.
- Създаване на методики и изследване на формата на работната зона на механизми с паралелна кинематика в CAD среда и на разпределението на скоростите и натоварванията между задвижващите модули.
- Създаване на методика, окомплектоване на стенд и експериментално изследване на полето на разсейване при позициониране на изследвания механизъм с паралелна кинематика.

Методи на изследване

Изследванията са осъществени със съвременни и адекватни за решаване на поставените задачи методи и технически средства. Приложени са методи за моделиране и кинематично и динамично симулиране условията на работата на сложен обект, статистическа обработка и анализ на експерименталните резултати, планиране на експериментите и специализиран софтуер.

Научна новост

Разработена е методика за визуализиране на работната зона на механизми с паралелна кинематика в CAD среда. Изследвана е формата на работната зона на избраната конструкция механизъм с паралелна кинематика, дефинирани са характерните ѝ зони и е обосновано технологичното им значение. Установени са функционални

зависимости между размерите на работната зона и конструктивните параметри на избраната конструкция механизъм с паралелна кинематика.

Определени са аналитични условия, предотвратяващи недопустими конфигурации на звената на механизма.

Изследвани са нелинейните връзки между скоростите и натоварванията на крайното звено и задвижващите модули.

Приложимост

Конструиран и изработен е действащ модел на оборудване, включващо механизъм с паралелна кинематика, от тип линапод. Изследвана е формата на работната зона на избраната конструкция. Дефинирани са характерни зони в нея и е обосновано технологичното им значение.

Създадена е система за управление на механизъм с паралелна кинематика, базирана на PLC структура, осигуряваща условия за изследвания на кинематиката и динамиката на механизма, както и прилагането на нови алгоритми за управлението му.

Апробация на дисертационния труд

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширен катедрен съвет на катедра “Машиностроителна техника и технологии” при ТУ – Габрово.

Етапи от дисертационната работа са обсъждани и публикувани в:

- Международна научна конференция Унитех 2012 и 2014 година;
- Дни на механиката, Варна, 2017 година;
- 13th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, York, England, 2014;
- Scientific Forum on Innovative Trends in Engineering and Science, 2015, Kavala, Greece.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 5 глави, приети означения и съкращения, класификация на приносите, публикации по дисертацията, използвана литература и съдържание, общо в обем от 141 страници, в които са поместени текст, формули, 140 фигури и 8 таблици.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава I: ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ВГРАЖДАНЕ НА МЕХАНИЗМИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА В МАШИНОСТРОИТЕЛНО ОБОРУДВАНЕ

Направен е анализ на механизмите с паралелна кинематика, с оглед връзката между кинематичните им възможности и разнообразните им области на приложение. Систематизирани са функционалните характеристики на механизмите с паралелна кинематика и технологичните възможности на различните структури машини, изградени на тяхна база. Те са представени в табличен вид, даващ пряка връзка между структурата и технологичните им възможности.

табл. 1. Класификация на МПК

Вид структура		Изцяло паралелна структура					Хибридна структура ПКМ+последователни звена			
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Задвижвани звена (оси)		8	6	5	4	3	2	3+2 на вретеното	3+2 на детайла	2+1 на детайла
Степени на свобода (DOFs)		6	6	5	3	3	2	5	3+2	2+1
Детайлна координатна система		X;Y; Z; A;B; C	X;Y; Z; A;B; C	X;Y; Z; A;B	X;Y; Z; +(A)	X;Y; Z	X;Z	X;Y;Z +(A;B)	X;Y;Z +A;C	X;Y;Z
Вид обработки*	5D	X;Y; Z; A;B	X;Y; Z; A;B	X;Y; Z; A;B	--	--	--	X;Y;Z +(A;B)	X;Y;Z +A;C	--
	3D	++	++	++	X;Y; Z	X;Y; Z	--	++	++	X;Y;Z
	2D	++	++	++	++	++	X;Z	++	++	++

*- Видът на обработката включва: 5D – фрезови и други обработки, изискващи движения по 5 оси (инструменти и детайли за медицината); 3D – обикновени стругови и фрезови обработки; 2D – обработки в равнина (лазерно и друго рязане, надписване и др.)

Технологичните процеси в областта на машиностроенето предполагат използването на структури с по-малък брой звена и съответно с три степени на подвижност, като при необходимост от по-голям брой движения се използват хибридни структури.

Най-често се прилагат структури от тип трипод с различен тип звена - линейни и въртящи. За обработващи машини са подходящи структурите с линейни звена поради по-благоприятната форма на работната зона.

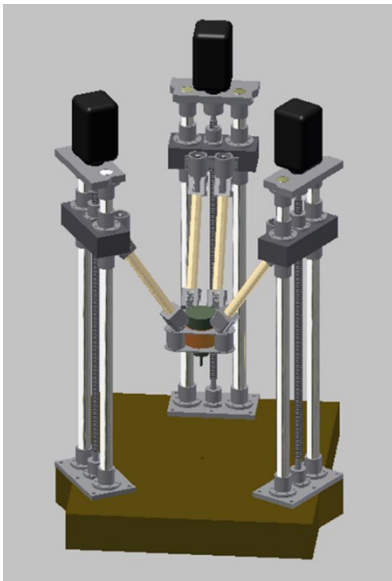
За разработвания модел е избрана структура трипод с линейни звена с вертикално разположението на модулите за линейно преместване или т.н. Линапод.

Въз основа на проведения анализ на технологичните възможности на машиностроително оборудване с паралелна кинематика, както и на основните проблеми, свързани с проектирането и използването на механизми с паралелна кинематика, в качеството на обект на изследване е избран механизъм с три паралелни звена, от тип Линапод.

Глава II: СЪЗДАВАНЕ НА ОБЕКТ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

Проведен е размерен анализ и са определени основните параметри на конструкцията при зададени изходни условия, включващи работна зона с форма на куб със страна 400 mm. Изведени са зависимости, приложими при определянето на основните конструктивни параметри и на други модели на МПК.

Създаденият виртуален модел на Линапод (Фиг. 2.13) е проектиран в графична САД среда от високо ниво "Autodesk Inventor". Използвани са методите за параметрично проектиране, позволяващи вариантност на конструкцията. Проектирани са всички модули и звена на Линапода. Разработени са оригинални стави, представляващи комбинация от две



фиг. 2.13 Виртуален модел на линапод



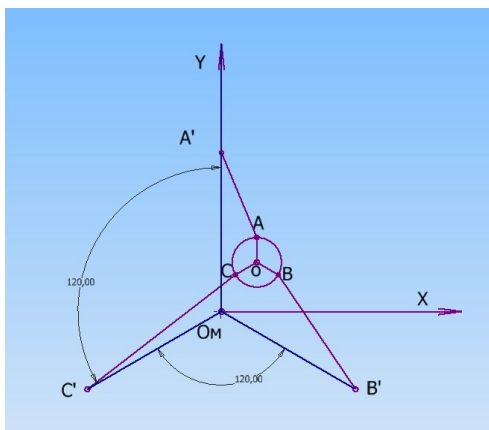
фиг. 2.14 Реален модел на линапод

цилиндрични стави, разположени под 90° . Отделните модули и звена са сглобени чрез налагане на необходимите ставни връзки и ограничения така, че могат да се движат както в реалните условия. Така създаденият модел позволява провеждането на кинематични и динамични симулации.

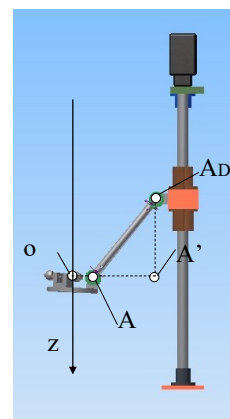
Изработен и сглобен е реално действащ модел на Линапод (Фиг. 2.14). Размерите и геометричните му особености напълно съвпадат с тези на проектирания модел. Така създадените виртуален и реален модел на Линапод позволяват провеждането на голям обхват разнообразни изследвания във всички направления, свързани с конструиране, функционални симулации и експерименти, технологични приложения и други проблеми, свързани с приложението на МПК.

Глава III: ОСОБЕНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИЕТО НА МАШИНИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА

Създаден е математически модел на линапод чрез анализ на геометрията на механизмите и възлите, от които е съставен. Намерена е зависимостта между координатите на т.О (център на подвижната платформа) в правоъгълна координатна система спрямо линейните транслации (z_A ; z_B ; z_C) на модулите за линейно преместване.



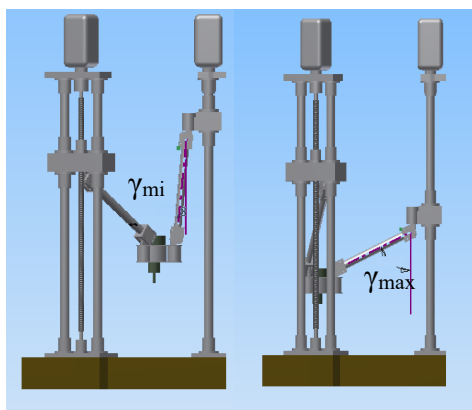
фиг. 3.1 Чертеж в равнината XOMU



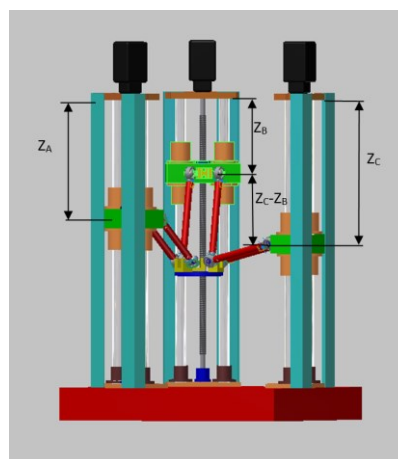
фиг. 3.6 Разположение на основните геометрични точки върху възлите на кинематичната схема

$$\left\{ \begin{array}{l} z_A = z_0 - \sqrt{R^2 - (x^2 + (P - (y + a))^2) + z} \\ z_B = z_0 - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \left(x - \frac{a}{2}\right)\right)^2 + \left(-\frac{P}{2} - \left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}a\right)\right)^2} + z} \\ z_C = z_0 - \sqrt{R^2 - \left(-\frac{\sqrt{3}P}{2} - \left(x - \frac{\sqrt{3}a}{2}\right)\right)^2 + \left(-\frac{P}{2} - \left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}a\right)\right)^2} + z \end{array} \right. \quad (3.14)$$

В работната зона на МПК съществуват точки или комбинации от точки, определящи забранени конфигурации на кинематичната система, преминаването през които биха увредили механиката на машината. Особено важен фактор при реализирането на управлението на конкретен МПК е осигуряването на защита от получаването на тези конфигурации. За да бъде избегнато достигане на забранени конфигурации на кинематичната система, е разработен алгоритъм, в основата на който стои ограничение на ъгъла между лоста и линейния модул, внасящ определени ограничения в математическия апарат на системата, като по този начин се гарантира стабилната работа на МПК.



фиг.3.11. Схема за определяне на минималната и максималната стойности на ъгъла на завъртане



фиг. 3.10. Схема за определяне условията за избягване на забранени конфигурации

$$\left\{ \begin{array}{l} |z_B - z_C| < z_{ep} \\ |z_A - z_C| < z_{ep} \\ |z_A - z_B| < z_{ep} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} z_{\min} < z_B < z_{\max} \\ z_{\min} < z_A < z_{\max} \\ z_{\min} < z_C < z_{\max} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Глава IV: ИЗБОР И ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА СИСТЕМАТА ЗА ЗАДВИЖВАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ

4.1 Избор на управляващо устройство за модела на Линапод

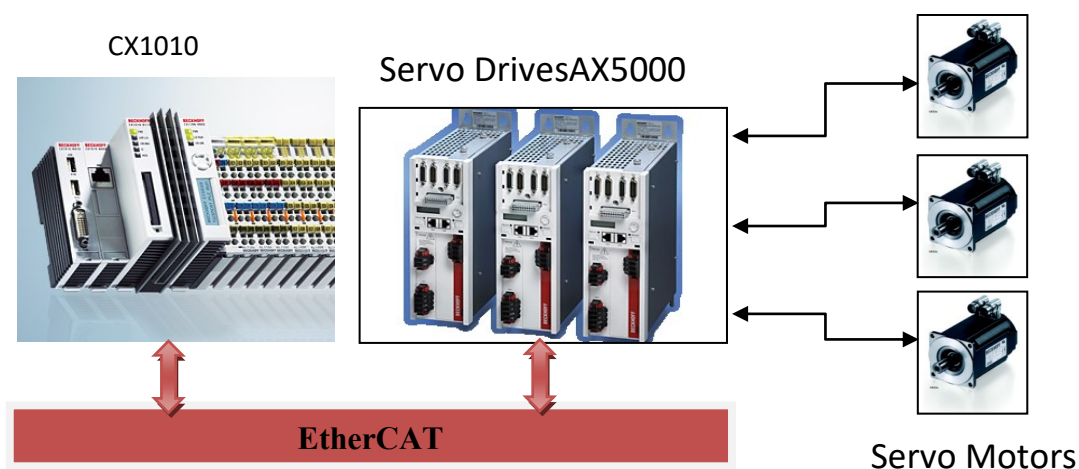
Основна задача при реализиране на управлението на машините с паралелна кинематика е създаването на софтуер от високо ниво, който да включи математически модел на МПК; програма, трансформираща командите, въведени във вид на G-код, в трансляции на изпълнителните механизми; управление на определен брой цифрови входове и изходи, осигуряващи работата на подсистемите на машината; програмна част, следяща за възможни колизии при некоректно въведени координати. Хардуерно

управляващото устройство може да бъде изградено на база на персонални компютри, CNC системи за управление на обработващи машини или PLC базирана система за управление.

Използването на персонални компютри е разпространено при процеси, които не изискват висока точност, бързодействие и следене на голям брой допълнителни параметри. Съществува голям брой програмни продукти, реализиращи подобно управление - Mach3, EMC², KAM, AXIS, TurboCNC, DeskCNC, CNCZeus, Master5, DesKAM, CNCPro, USBCNC, CNCdudez и др.. Софтуерът им е реализиран на високо ниво и предоставя голям набор от функционални възможности, необходими при осъществяването на работните процеси, но те не са подходящи за управление на ПКМ.

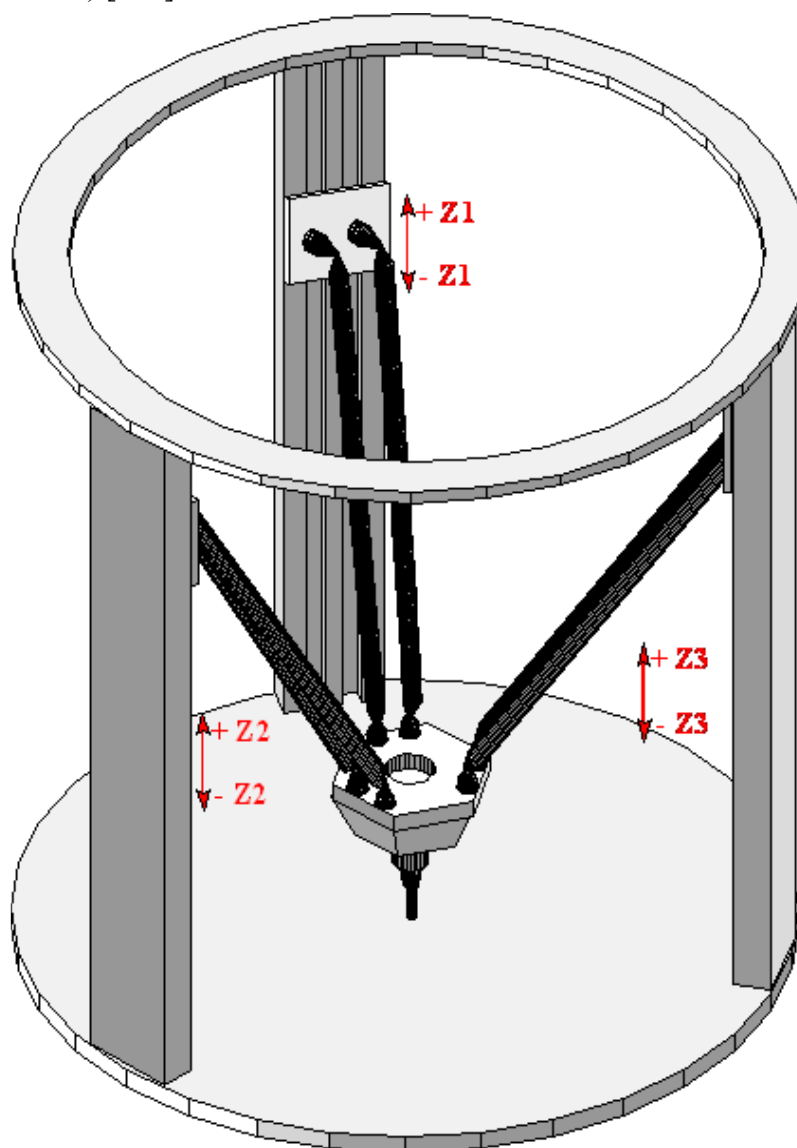
Съвременните CNC системи осигуряват управление на технологични процеси, покривайки съвременните изисквания за висока точност, голямо бързодействие, както и управлението на голям брой допълнителни процеси. Освен всички други предимства, някои от системите имат вграден софтуер и специални функции за управление на машини с паралелна кинематика. Те са подходящи за серийно произвеждани ПКМ поради високата си цена и трудно пренастройване.

Системата за управление на една съвременна машина осигурява освен управление на движенията, събиране на информация от работната среда, комуникация с други устройства и машини и диалог с човек – оператор. Поради сложността на решаваните задачи често се използват многопроцесорни системи, осигуряващи паралелно протичане на множество изчислителни процеси. Тези системи са скъпи и в етапа на първоначалното моделиране е избрано реализирането на системата за управление на модела да се осъществи чрез универсални средства и софтуер, осигуряващи висока адаптивност. Едно удачно решение, позволяващо прилагането на този подход в обучението и при решаване на реални задачи, се основава на PLC базирано управление (фиг. 4.32). Поради високата си изчислителна способност, голямата адаптивност и надеждност на работа е избран PLC контролер CX1010 на фирмата Beckhoff. Във фирмения софтуер (TwinCAT) са включени множество библиотеки, включително и такива за управление на машини с паралелна кинематика.



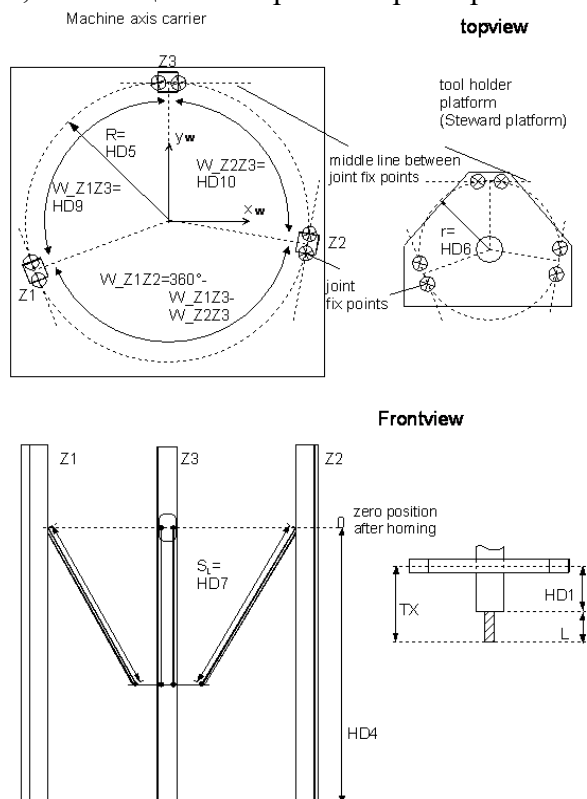
фиг. 4.32. PLC система за управление

Библиотеката „TwinCATKinematicTransformation” поддържа различни паралелни и последователни кинематични системи, които могат да се използват за реализиране на различни типове управления. Функциите, поддържащи интерполация по задвижващи оси и G-код, се намират в библиотеката „TwinCATCNC” и реализират управление в декартова координатна система. Съвместното използване на функции от двете библиотеки позволява реализиране на управление на механизми с паралелна кинематика. Изборът и конфигурацията на кинематичната структура се извършват в TwinCATSystemManager. Библиотеката реализира около 30 кинематични схеми. Типът на кинематичната схема определя и метода на управление, дължината на базата и корекцията на управлението. Масата на системата и инерционната маса се специфицират предварително. Библиотеката “TwinCATKinematicTransformation” е оптимизирана за работа с BeckhoffServoDrives от серията AX5000. Библиотеката поддържа и паралелна кинематика (фиг. 4.32) [135].



фиг. 4.32. Паралелна кинематична структура от библиотеката „TwinCATKinematicTransformation”

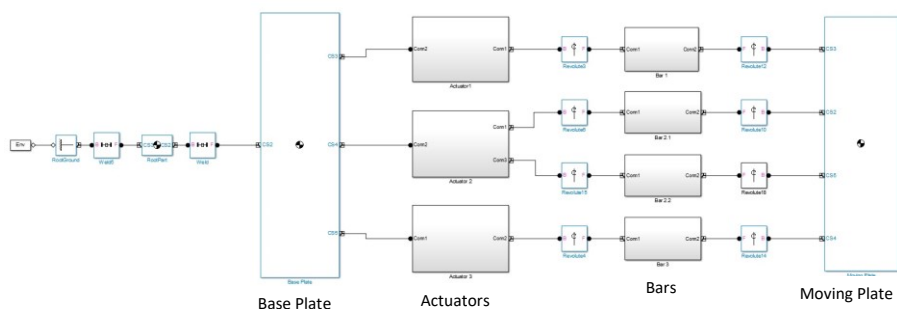
В реализираната система за управление се използват кинематична схема KIN_TYP_12 и конкретните параметри, описващи геометричните размери на обекта (фиг. 4.33).



фиг. 4.33. Параметри, описващи геометричните размери на обекта

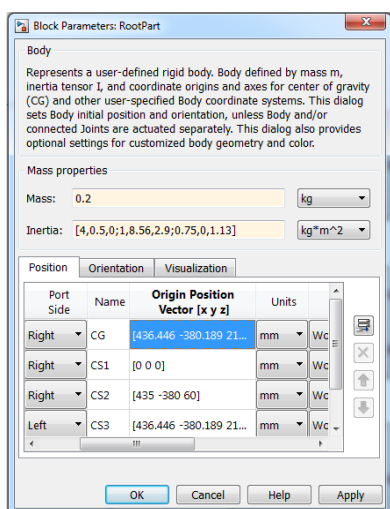
Процесът на проектиране на PLC базирана система за управление преминава през няколко етапа: създаване на 3D модел на МПК в среда на Autodesk Inventor; импортиране на 3D модела в MatlabSimMechanics и генериране на Simulink модел на машината с паралелна кинематика; проектиране на FuzzyPID регулатор за управление на осите на задвижването; настройка на FuzzyPID регулатор; генериране на ST код за PLC и имплементиране на генерирания ST код в PLC Beckhoff CX1010.

Кинематичните и динамичните изследвания са проведени в среда на Simulink, където е експортиран създаденият модел. Моделът е преобразуван в блокова схема (фиг.4.25), включваща основа – BasePlate, линейни модули – Actuators, свързващи лостове – Bars и подвижна платформа – MovingPlate [135].

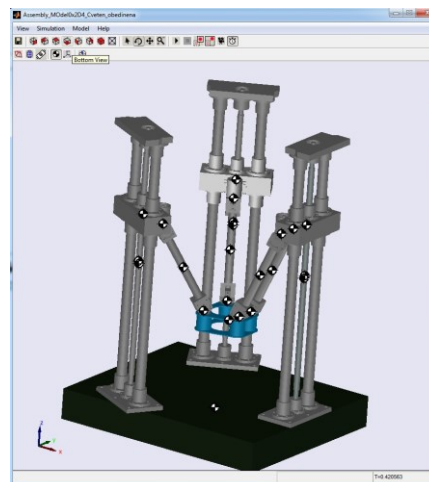


фиг. 4.25. Блокова система за управление

Всеки един блок описва отделна подсистема, изградена от съответни звена, характеристиките на които могат да се задават при всяка една симулация.



фиг. 4.26. Задаване на параметри на блок от системата



фиг. 4.27. Блок за наблюдение в Simulink

Блоквата схема е отворена и във всеки момент от изследването могат да се добавят нови звена и условия, както и да се следят параметрите на системата (фиг. 4.26).

Импортирането на 3D модела в MatlabSimMechanics и генерирането на Simulink модел на машината с паралелна кинематика имат за цел съставяне на максимално точно предавателно уравнение на проектираната система.

Всяко от изпълнителните звена е съставено от постояннотоков двигател, свързан със сачменовинтова двойка, осъществяваща преобразуване на въртеливото движение на оста на двигателя в транслационно движение на каретката. Към нея, посредством универсални звена, са свързани лостове, които описват транслационни и ротационни движения. Всеки елемент се представя с диференциални уравнения, включващи редица променливи, описващи максимално точно предавателното уравнение на проектираната система. Използвани са: J_m - сумарен инерционен момент на двигателя, приведен към вала; M_m - момент на вала на електродвигателя; M_f - момент на триене; L - еквивалентна индуктивност на котвената верига; R - еквивалентно съпротивление на котвената верига; I_2 - ток в котвената верига; E - Е.Д.Н на електродвигателя; K_E - коефициент на електродвижещите сили; ω_v - ъглова скорост на движение на вала на електродвигателя; K_f - коефициент на вискозно триене; K_M - коефициент на момента; T - момент на триене в резбата; Q - натоварване на оста на сачмено винтовата двойка; d_z - среден диаметър на резбата; α - ъгъл на подем на винтовата линия; β - приведен ъгъл на триене на предавката. Както и геометричните параметри на модела на лонапод.

В резултат е получен Simulink модел за изменение на моментите $M_1(t)$, $M_2(t)$, $M_3(t)$, които осигуряват зададения закон за изменение на фазовите променливи на системата $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$.

Възниква необходимост да се разработи система за автоматично управление на положението на всяка винтова двойка, така че да се осигури зададения закон за изменение на ъглите $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$. За целта е проектиран FuzzyPID регулатор за управление на осите на задвижването.

Най-често срещаният тип на системите за управление се основава на класическата теория на управлението с използване на PID регулатор в управлението на всяка ос [32]. Съществен проблем на този тип на управление е т. нар. „грешка при синхронизация“. Един от начините за решаването му е използването на FUZZY управление на осите на машината с паралелна кинематика.

Целта при проектиране на размити ПИД регулатори е да се постигне желаното управление чрез регулатор с възможно най-проста структура и най-малко на брой параметри за настройка. На фиг.4.30 е представена структурата на размит ПИД регулатор с една входна и една изходна променливи.

Входна променлива за размития регулатор е грешката $e(n) = r(n) - y(n)$ ($r(n)$ – е задаващото въздействие, $y(n)$ е изходната променлива на системата, а изходна променлива на регулатора е $u(n)$). Нормализираното управляващо въздействие се изразява със зависимостта:

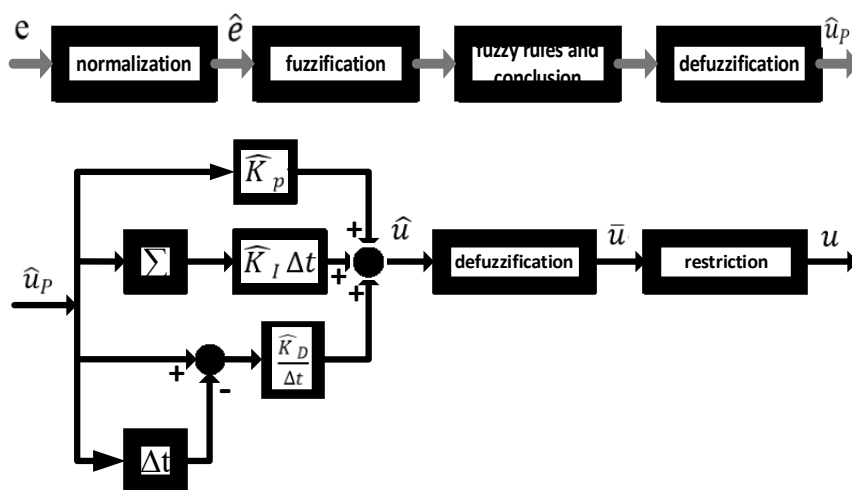
$$\hat{u}(n) = \widehat{K}_p \hat{u}_p(n) + \widehat{K}_I \sum_{i=0}^n \hat{u}_p(i) \Delta t + \widehat{K}_D \frac{\Delta \hat{u}_p(n)}{\Delta t}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

където $\widehat{K}_p, \widehat{K}_I$ и \widehat{K}_D са нормализираните коефициенти за пропорционалната, интегралната и диференциалната съставка.

Нормализираната грешка се определя като

$$\hat{e}(n) = \begin{cases} 1, & s_e e(n) > 1 \\ s_e e(n), & |s_e e(n)| \leq 1 \\ -1, & s_e e(n) < -1 \end{cases} \quad (4.6)$$

където $s_e = |r(0) - y(0)|$, $r(0)$ и $y(0)$ са началните стойности на задаващото въздействие и на управляемата величина.



фиг. 4.30. Структура на размит ПИД регулатор

Денормализацията на управляващото въздействие $\hat{u}(n)$ по зависимостта

$$\bar{u}(n) = s_u \hat{u}(n),$$

където s_u е коефициентът на денормализация.

За управляващото въздействие се записва:

$$u(n) = \begin{cases} u_{max}(n), & \bar{u}(n) > u_{max} \\ \hat{u}(n), & u_{min} \leq \bar{u}(n) \leq u_{max} \\ u_{min}(n) & \bar{u}(n) < u_{min} \end{cases} \quad (4.8)$$

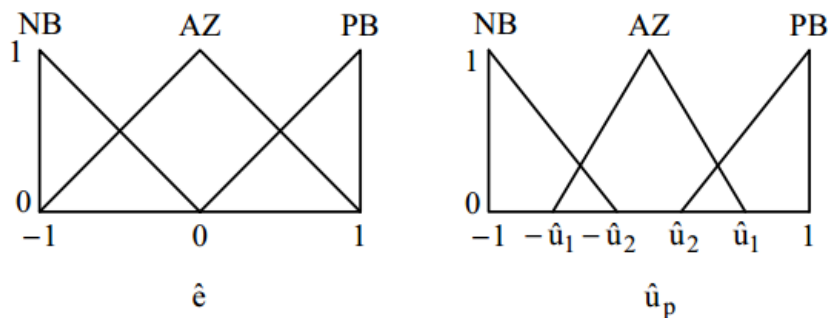
Където u_{min} и u_{max} са възможните минимална и максимална стойности на входната променлива на обекта за управление. Разглежданият размит регулатор притежава три правила:

$$\begin{aligned} P1: & \text{If } (\hat{e} \text{ is NB}) \text{ then } (\hat{u}_p \text{ is NB}) \\ P2: & \text{If } (\hat{e} \text{ is PB}) \text{ then } (\hat{u}_p \text{ is PB}) \\ P3: & \text{If } (\hat{e} \text{ is AZ}) \text{ then } (\hat{u}_p \text{ is AZ}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

като размитата променлива “NB” е за „отрицателно големи”, “PB” – за „положително големи” и “AZ” – за „приблизително равни на нула” стойности. Функциите на принадлежност за променливите \hat{e} и \hat{u}_p имат триъгълна форма, като за \hat{e} са фиксирани параметрите, а за \hat{u}_p се търсят оптималните стойности (фиг. 4.31). Следователно разглежданият размит регулатор има само три правила и шест параметъра за настройка като

$$\begin{cases} 0 < \hat{K}_p \leq 1, 0 < \hat{K}_I \leq 1, 0 < \hat{K}_D \leq 1, \\ 0 < s_u \leq \max(|u_{min}|, |u_{max}|), \\ 0 < \hat{u}_1 \leq 1, \quad 0 < \hat{u}_2 \leq 1. \end{cases}$$

За реализиране на размития регулатор може да се използва FIS редактора на FuzzyLogicToolbox. Там параметрите на функциите на принадлежност се въвеждат с конкретните си числени стойности. Размитият регулатор е моделиран в среда Matlab/Simulink. На входа се подава сигналът \hat{e} , а на изхода на регулатора - \hat{u}_p . Параметрите на триъгълните функции на принадлежност FSE1, FSE2 и FSE3 на входната променлива са $[-2, -1, 0]$, $[-1, 0, 1]$ и $[0, 1, 2]$ (лява, връх и дясна стойност на триъгълната функция на принадлежност), съответно за NB, AZ и PB. Параметрите на функциите на принадлежност на изходната променлива са $[-2u_2, -1, -u_2]$, $[-u_1, 0, u_1]$ и $[u_2, 1, 2u_2]$, съответно за NB, AZ и PB, като конкретните стойности на u_1 и u_2 се определят чрез оптимизационна процедура. Сумата от изходите на функциите на принадлежност се сумира и се извършва деразмиване по метода на центъра на тежестта [34].



фиг.4.31. Функции на принадлежност на променливите \hat{e} и \hat{u}_p

Синтезираният регулатор е вграден в генерирания от MatlabSimMechanics модел, като е необходима настройка на параметрите на FuzzyPID регулатора.

Параметризирането на размития ПИД регулатор се свежда до решаване на оптимизационна задача за удовлетворяване на зададен критерий J_T , посредством прилагане на тегловния метод. По този начин задачата се свежда до оптимизация по един критерий $J_T = \sum_{k=0}^n \omega_k J_k$. Използването на критерии, основани само на сигнала на грешката в системата трудно биха удовлетворили противоречивите изисквания между точността в установен режим и динамичните показатели на системата – времетраене и пререгулиране. Това налага използването на обобщен критерий от вида:

$$J_T = \omega_1 \frac{\int_0^T e^2(t) dt}{\max(e(n))} + \omega_2 \sigma + \omega_3 \frac{t_p}{T} \quad (4.10)$$

където t_p е времетраенето на преходния процес, s;

σ - пререгулирането, %;

T- времето за симулация, s.

При единично стъпаловидно входно въздействие се предполага, че $\max(e(n)) = 1$.

Оптимизационната задача за настройка на размития ПИД регулатор е решена в Matlab/Simulink, където е създаден модел на затворената система за автоматично регулиране. Въведени са променливите \hat{u}_1, \hat{u}_2 за функциите на принадлежност на изходната променлива на размития регулатор и променливите \hat{K}_p, \hat{K}_I и \hat{K}_D , определящи нормализираните пропорционална, интегрална и диференциална съставка.

Основната причина, поради която се изгражда Simulink модел на системата, е създаването на оптимално управление на осите на Линапода. Генерираният регулатор се експортира в хардуерно независим код на езика ST (Structured Text) с помощта на Simulink PLC Coder. Изходният код се записва във файл с формат PLCopenXML, който се поддържа от контролерите на Beckhoff. След генерирането му файлът се вгражда в програмата за управление, изградена на базата на библиотеката TwinCATKinematicTransformation .

След направения анализ на двигатели и задвижвания, произведени от водещи световни производители, е направен избор съобразно техните характеристики и възможността да се доставят и използват в настоящата работа.

Високомоментните двигатели с постоянни магнити са едни от широко използваните при реализиране на подавателни задвижвания в настоящия момент. За осъществяване на гладко и точно следене на заложената траектория на движение, двигателите за всяка една от осите се оборудват с позиционни преобразуватели (например резолвери (ФРП), сензори за положение и др.), които да дават информация на управляващото устройство за текущите – позиция на оста на въртене, посока, скорост, и ускорение. Избрани са високомоментни двигатели от серията 1MX-4 на Динамо - Сливен. Техническите характеристики на двигателите от това поколение напълно покриват технологичните изисквания за задвижването на линапода. Катедра МТТ при ТУ-Габрово разполага с такива двигатели, което е основната причина за техният избор.

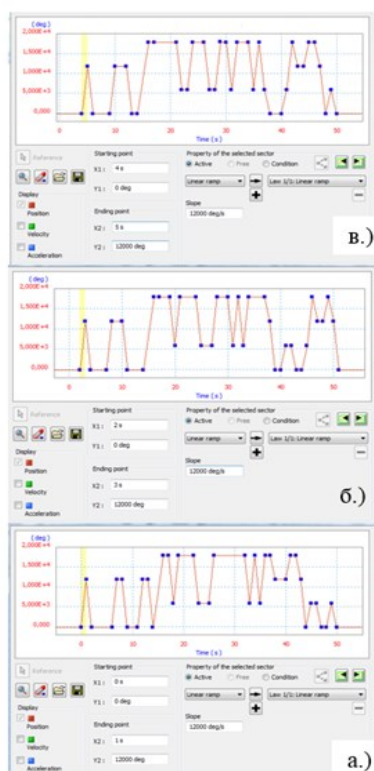
За управление на двигателите са избрани преобразуватели от серия 12XXX. Те са ново поколение интелигентни тиристорни преобразуватели, разработени на базата на съвременни технологии (DSP / CPLD), и осигуряват прецизно, четири квадрантно управление по скорост на двигателите. Настройката на всички режими на работа на преобразувателя се извършва с помощта на система параметри. Притежават вградени функции и интерфейс, специфични за управлението на подавателни оси в металорежещи машини с ЦПУ и промишлени работи.

Глава V: ВИРТУАЛНИ СИМУЛАЦИИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

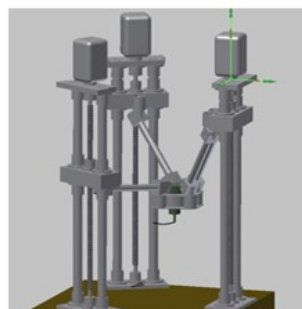
5.1. Визуализация на работното пространство

Съществуват различни подходи за определяне и визуализация на работното пространство на механизмите с паралелна структура. Повечето от тях се основават на приложения на MatLab за изчисляване и изчертаване на координатите на точка от крайното звено, при различни положения на задвижващите звена в целия диапазон от хода им. В резултат се получава облак от точки, запълващ обема на работното пространство, а в някои случаи и скриващ елементи от него.

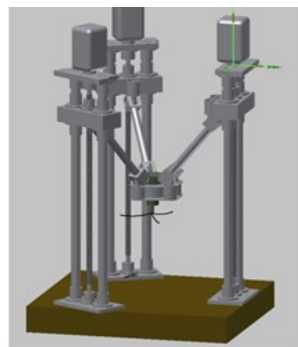
Съвременните CAD/CAE системи позволяват както създаването на прецизни модели на механизмите, така и кинематично и динамично симулиране на работата им. Тези възможности позволяват и функционално наблюдаване и построяване на обслужваното пространство чрез симулиране на движението на звената. За целта се използва функцията „Trace”, визуализираща траекторията на избрана точка при движението на звеното.



фиг. 5.1. Задания за движение – а.) на звено 1, б.) на звено 2 и в.) на звено 3



фиг. 5.2. Момент от изчертаване на раб. зона – движение на звено 1

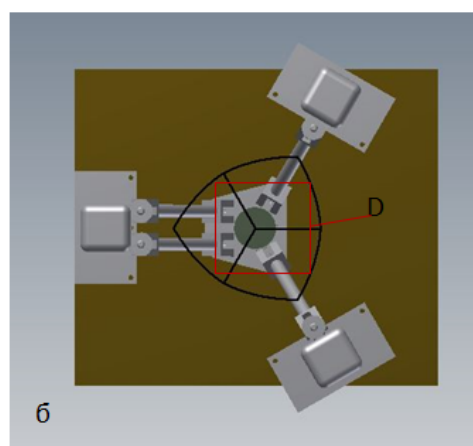
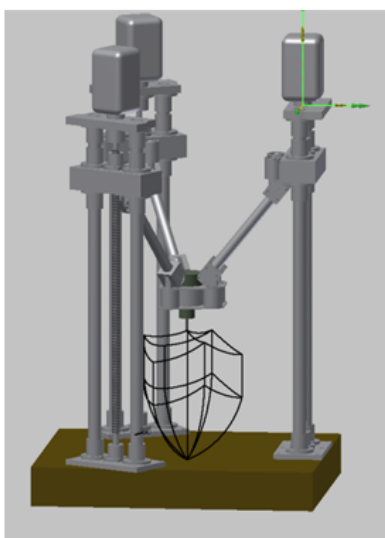


фиг. 5.3. Момент от изчертаване на раб. зона – движение на звена 1, 2 и 3

Методът предполага последователно симулиране на всички комбинации на движение на звената на механизма в целия диапазон на хода им.

В зависимост от елемента от границата на работната зона, които искаме да получим, се задава движение на определени звена, като останалите са неподвижни в крайно положение и се изчертава траекторията на точка от крайното звено. В резултат се получава 3D Edge модел на работното пространство.

На практика описването на цялото пространство изисква сравнително сложна последователност от движения. На фиг.5.1, фиг.5.2 и фиг.5.3 е показана последователността от движения за звената. В изходно положение трите звена са в горно положение в края на хода си. Тактът е 1s, като за това време звеното изминава пълния си ход съответстващ на 12000° завъртане на двигателя.

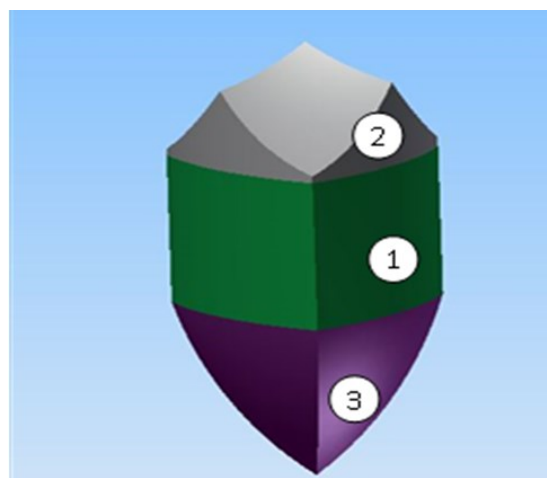


фиг. 5.5. Резултат от симулацията. Изглед отпред и отгоре

От симулацията ясно се разграничават трите зони в работното пространство, могат да се определят размерите им и координатите на всяка точка. В така построеното пространство се определят и максималните размери D на условен призматичен детайл (фиг.5.5) или конкретно се проверява разположението на друго оборудване или екипировка.

От друга страна параметричният характер на създадените модели позволява лесна оптимизация на конструктивни параметри чрез промяната им и съответната симулация.

Тази структура предполага работна зона с компактна форма (фиг. 5.7), най-близка до призма. В случая работната зона е осовсиметрична и може да се разгледа като съставена от три части – централна 1 с форма на призма с триъгълно сечение и две непълни - долна 3 с форма на триъгълна пирамида и горна 2 с неправилна форма.



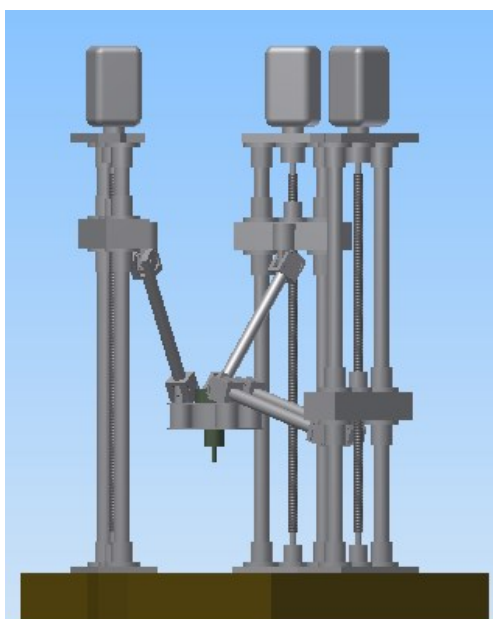
фиг.5.7. Модел на работната зона на линапода

Горната зона е практически непригодна за разполагане на обработваем детайл, но предлага много добри условия за разполагане на инструментални магазини, измервателни устройства и други. Долната зона с форма на обърната призма предлага условия за разполагане на детайла в средата и елементите на приспособлението в страничните неработни обеми. Основната зона 1 с форма на призма с триъгълно сечение е подходяща за разполагане на детайла и на траекториите на инструментите. Тази зона е основна и нейните размери определят размерите на МПК.

5.2. Сингулярни конфигурации

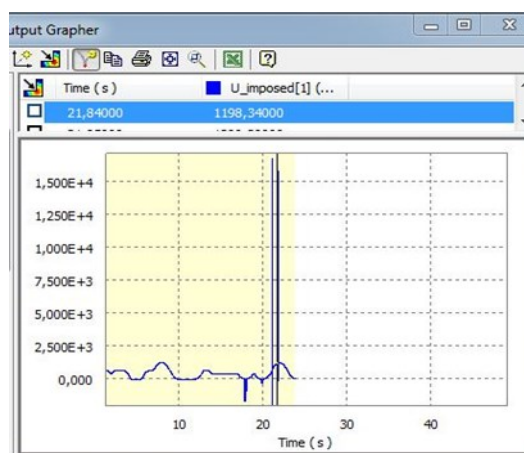
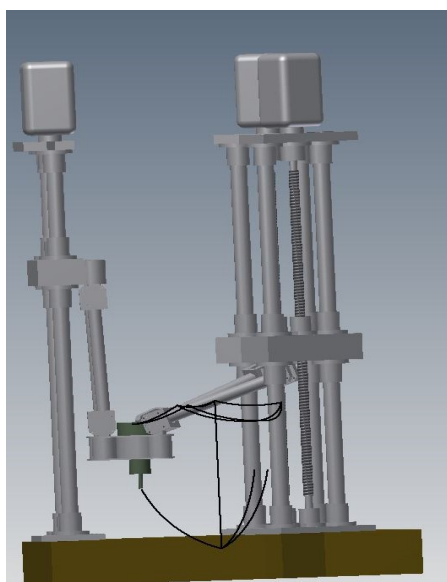
Особено важна задача при реализирането на управление на определен механизъм с паралелна кинематика е осигуряването на защита от достигане на така наречените сингулярни конфигурации на кинематичната система, при които съществува реална опасност от повреда в механиката на машината. Докато при механизмите с последователна кинематика точките, които не трябва да бъдат достигани, обикновено стоят в двата края на хода на управлявания механизъм, то при механизмите с паралелна кинематика, освен ограничаването на достигането до крайните точки, трябва да се състави алгоритъм и за избягване на комбинации от позиции, при които се преминава през сингулярност и съществува опасност МПК да бъде разрушен. Машините, изградени на принципа на паралелната кинематика, се характеризират и с нелинейно предаване на движения и сили от задвижващите звена към крайното изпълнително звено. Тези преносни характеристики са повлияни от кинематичната топология на механизма и геометричната му конфигурация и се отразяват пряко върху технологичните условия за използването му. В работата са разгледани алгоритми и условия за избягване на сингулярни конфигурации. Чрез симулации са определени предавателните характеристики на механизма.

Едно от най-често получаваните положения, показано на фиг.5.8, при което е достигната забранена комбинация от позиции на линейните модули, представлява състояние, при което подвижната част на модула за линейно преместване е позиционирана под нивото на подвижната платформа.



фиг. 5.8. Забранена комбинация от позиции на линейните модули

Такива типове конфигурации на звената са недопустими, тъй като, освен че се преминава през сингулярност, съществува и повече от едно решение на правата и обратната задачи на кинематиката и е необходимо да се реализира алгоритъм за тяхното избягване. При динамична симулация на движението на механизма, в момента на преминаване през вертикалното положение на лоста (фиг.5.9) натоварването в задвижващия модул нараства ударно до 15 KN, което е стотици пъти над допустимото и представлява реална опасност за механизма.



фиг.5.9. Симулация на преминаване през сингулярност на модела на МПК

Преобладаващата част от процесите изискват спазване на определена технологична скорост на движение на изпълнителния орган, монтиран върху подвижната платформа на МПК. При повечето от машините с последователна кинематика това

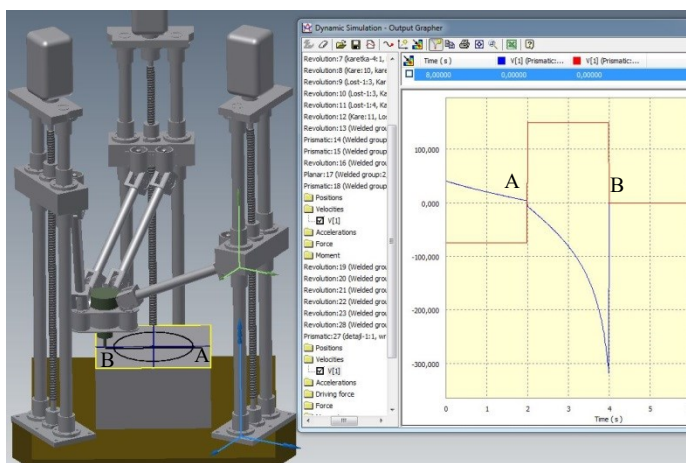
изискване не е проблем и реализирането на постоянна скорост на крайното звено изисква постоянна скорост на съответните звена. При МПК е налице нелинейна предавателна характеристика, зависеща от позицията в работното пространство.

Нелинейният характер на връзките между звената предопределя несъответствие между скоростите на задвижващите V_{dv} и крайното звено V_T . За разглежданата конструкция връзката се описва със зависимост от вида:

$$V_{dv}=V_T.tg(\gamma) \quad (5.1)$$

Следователно V_T е ограничена от максималната скорост на двигателя V_{dv} и положението на точката в работната зона.

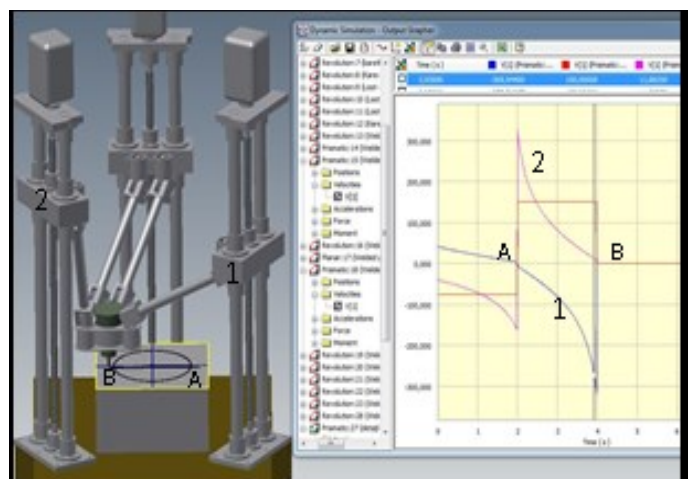
Характерът на тази зависимост ясно се очертава при динамична симулация (фиг.5.13) на движението на инструмента по праволинейна траектория, разположена в равнина ХУ, с определена постоянна технологична скорост V_T . За да се осъществи това елементарно движение, се налага скоростта на задвижващите звена да се изменя нелинейно, поради особеностите на механизма, като зависи от позицията на крайното звено. В периферията на работната зона скоростта е значително по-ниска от максималната скорост на двигателя V_{dv} .



фиг.5.13. Симулация на движение по права линия с постоянна скорост

В записа на скоростите при движението от т.А до т.В (втора до четвърта секунда) скоростта на крайното звено е постоянна - 150 mm/s, докато скоростта на каретката на десния на фиг.5.13 линеен модул се променя в широки граници - от 10 до 320 mm/s. Такива високи стойности (повече от $2V_T$) налагат много висок диапазон за скоростта на двигателя V_{dv} , който може да се окаже недостатъчен в определени позиции. Това ще доведе до ограничение в технологичната скорост V_T в определени зони. Тази висока скорост се наблюдава в отдалечената от задвижващото звено зона – в близост до т.В, но, като се отчете паралелното свързване на звената, такова ограничение се получава в цялата периферия (фиг.5.14).

В тези зони скоростта на крайното звено е значително по-ниска от максималната скорост на двигателя V_{dv} . Това може да доведе до съществен проблем при високоскоростно фрезование, особено при прилагане на стратегии с трохоидални траектории. Решение може да се търси като се използват високоскоростни двигатели и сачмено-винтови двойки с голяма стъпка за задвижващите линейни модули или като се използват линейни двигатели. Поради високата цена на линейните двигатели, такова решение би било сравнително скъпо.



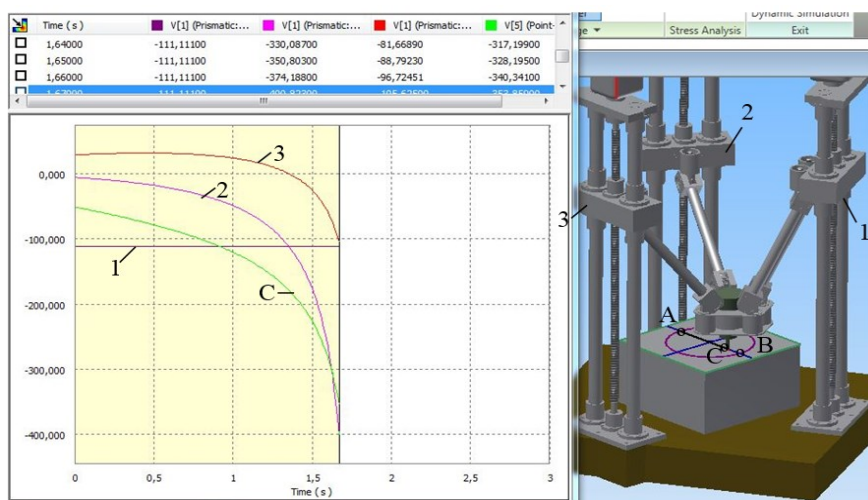
фиг.5.14. Изменение на скоростта на задвижващите звена 1 и 2 при движение по правата AB

Известно е, че при конвенционалните машини с последователна кинематика скоростта и силите в задвижващите звена не зависят от положението на работния орган в работното пространство и са постоянни величини. За механизмите с паралелна кинематика е точно противоположното, тези величини варират значително в зависимост от положението на работния орган. Това се дължи на факта, че преместването по работната повърхност не е линейно свързано с преместването на задвижващия механизъм. В някои области на работното пространство стойностите на максималните скорости и сили при движение на работната платформа могат да се различават значително от тези, които генерира задвижващия механизъм. В такива случаи те могат да достигнат екстремни стойности.

Освен сингулярните конфигурации, съществено значение има и условието за допустим ъгъл на предаване на силата между звената, определен от двете крайни положения на подвижната платформа. То се характеризира с показателя за качество на предаване на силата. Той не е еднакъв в работната зона, като се изменя нелинейно в широки граници.

Технологичните изисквания, в повечето случаи, са за постоянна скорост в цялата работна зона. Съвременните процеси изискват изключително високи работни скорости, превъзходящи скоростта на установъчните премествания на доскоро произвежданото оборудване. Вижда се, че осигуряването на такива скорости предполага използването на високоскоростни задвижвания със значителен резерв по скорост, включително и задвижвания с линейни двигатели. Само такъв подход би гарантирал постигането на задоволителна скорост в цялата работна зона.

Чрез динамични симулации може прецизно да се определят коефициентите на предаване на звената при различни конфигурации и зададени скорости. Така може да се определят необходимите параметри на задвижванията в етапа на проектиране

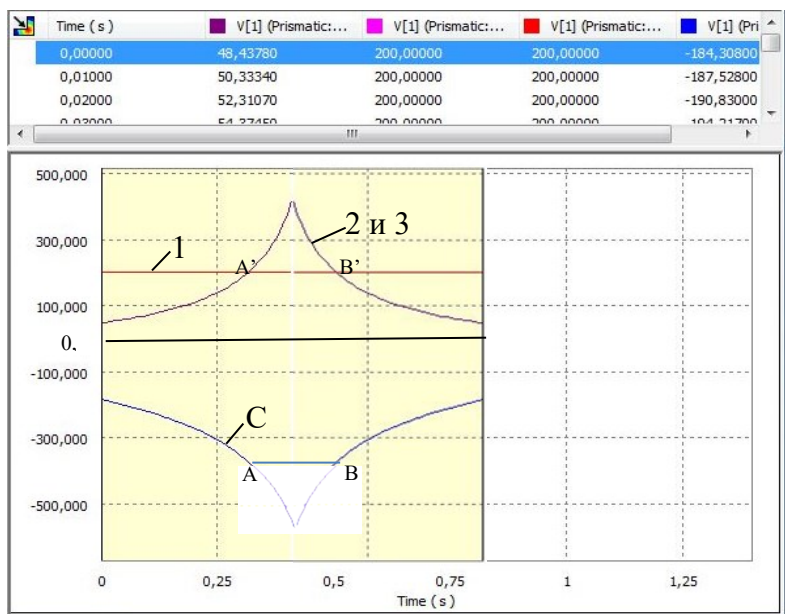


фиг.5.16. Разпределение на скоростите на звената

Симулацията на движение по права линия между две точки - т.А и т.В, разположени в хоризонтална равнина, диаметрално в противоположните краища на периферията на работната зона (фиг.5.16), показва, че при зададена постоянна скорост на движение на едно от задвижващите звена (звено 1) точка С от платформата се движи ускорително, като увеличава скоростта си нелинейно 7 пъти. Аналогично се изменя и скоростта на другите две задвижващи звена, като съществено влияние оказва и разположението на траекторията спрямо звеното.

Изменението на скоростта в границите на работната зона може да се представи графично чрез профили в различни равнини. Технологично най-голямо значение при разглежданата кинематична схема има изменението в хоризонтална равнина. Разпределението на скоростта може да се изчисли за центъра на работната зона, като за изходно условие се зададе определена гранична скорост на едно от задвижванията, а останалите две са пасивни. Чрез комбинация на две сечения, разположени през 120° на фиг.5.17 – е представено изменението на максималната скорост С на подвижната платформа в работната зона.

В зависимост от динамичните характеристики на задвижванията на звената, скоростта на движение на пасивните звена 2 и 3 може да надвиши скоростта на звено 1, като я пресече в точка А и съответно в т.В. Това на практика не е възможно, тъй като скоростта на звено 1 е граничната скорост за всяко едно от задвижванията.



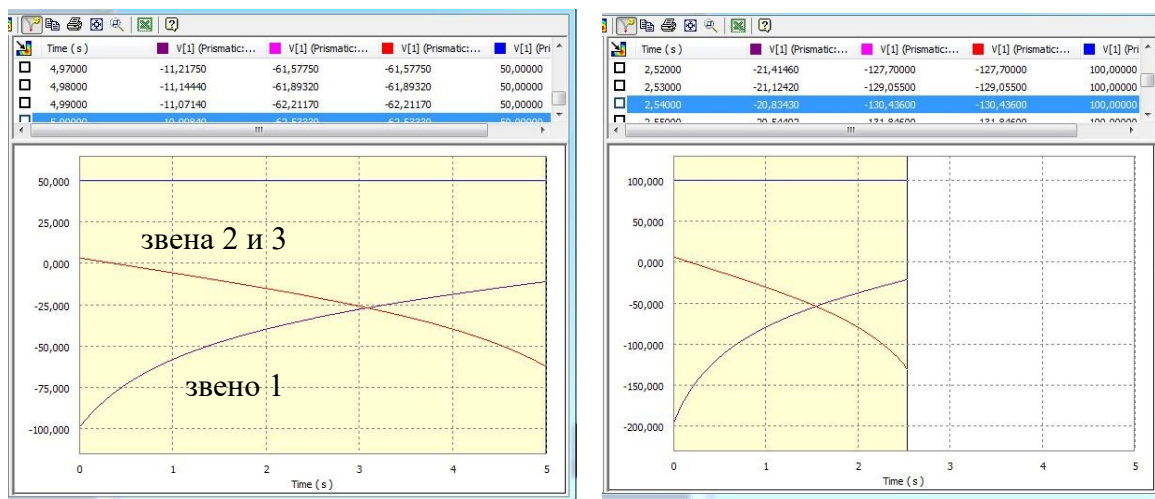
фиг.5.17. Профил на максималната скорост на звеното

Следователно след т. А нарастването на скоростта на подвижната платформа (линия С) ще бъде ограничено и в средата на работната зона тя е постоянна.

Големината на платото А'В' се определя от граничната скорост на задвижванията.

Профилът на максималната скорост С (фиг.5.17) представя изменението ѝ в работната зона в хоризонтална равнина. Вижда се нелинейният характер на зависимостта, като в периферията на работната зона скоростта е по-ниска. В средната зона се наблюдава връх, ограничен от максималната допустима скорост на задвижванията.

Чрез аналогична симулация може да се определи какъв резерв по скорост трябва да имат задвижванията, за да се осъществи движение на платформата с определена технологична скорост. За тази цел условно обръщаме движението, като задвижващ става работният орган. Задаваме движение с постоянна скорост на условния връх на инструмента по детайла по линията АВ и заснемаме движението на трите задвижващи звена. Симулирано е движение със скорост съответно 50 mm/s, 100 mm/s, 150 mm/s и 200 mm/s. Получените зависимости са представени на фиг.5.18. С хоризонтална линия е изобразена зададената скорост. Траекторията АВ (фиг.5.18) е ориентирана радиално, перпендикулярно на звено 1 и е разположена симетрично спрямо другите две задвижващи звена, поради което графиките на двете задвижвания съвпадат. В началото на движението звена 2 и 3 са почти неподвижни, а звено 1 се движи с два пъти по-висока скорост от зададената на подвижната платформа. В процеса на движение разпределението не е по линеен закон, като скоростта на звено 1 намалява, а на звена 2 и 3 - нараства. Съществува точка в работната зона, в която скоростите се изравняват, но са с противоположни знаци на изменение. В тази точка стойността на скоростта е 50% от зададената на подвижната платформа.



фиг.5.18. Разпределение на скоростите между звената при 50 mm/s и 100 mm/s на крайното звено

И в четирите случая максималната скорост на задвижващото звено е два пъти по-висока от тази на работния орган, а изменението ѝ е в много широки граници – 10 пъти.

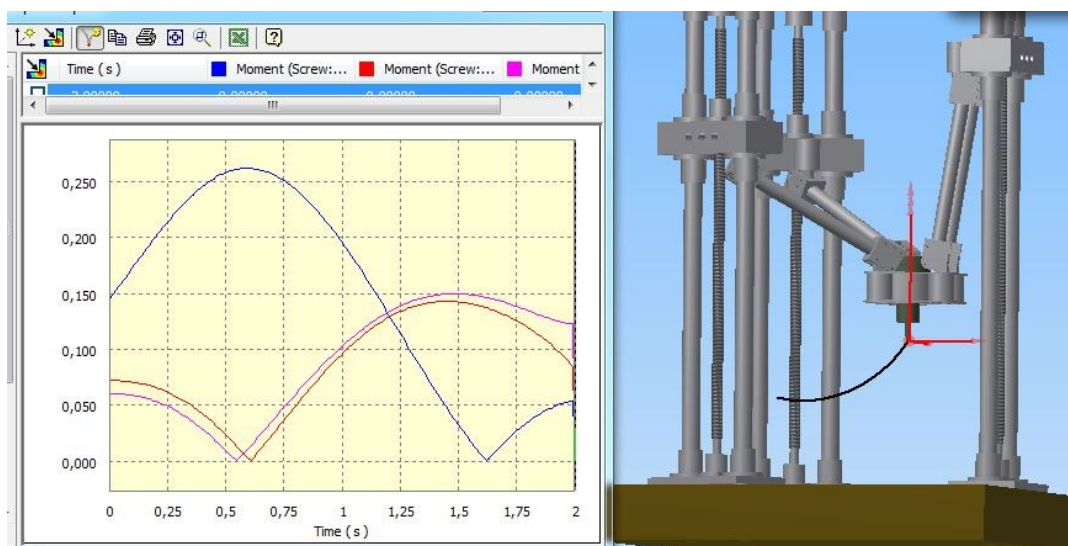
5.3. Динамични особености на задвижването на МПК

5.3.1. Симулиране работата на задвижването

Съвременните CAD/CAE системи позволяват прецизно кинематично и динамично моделиране на работата на механизмите. Използван е модулът за динамични

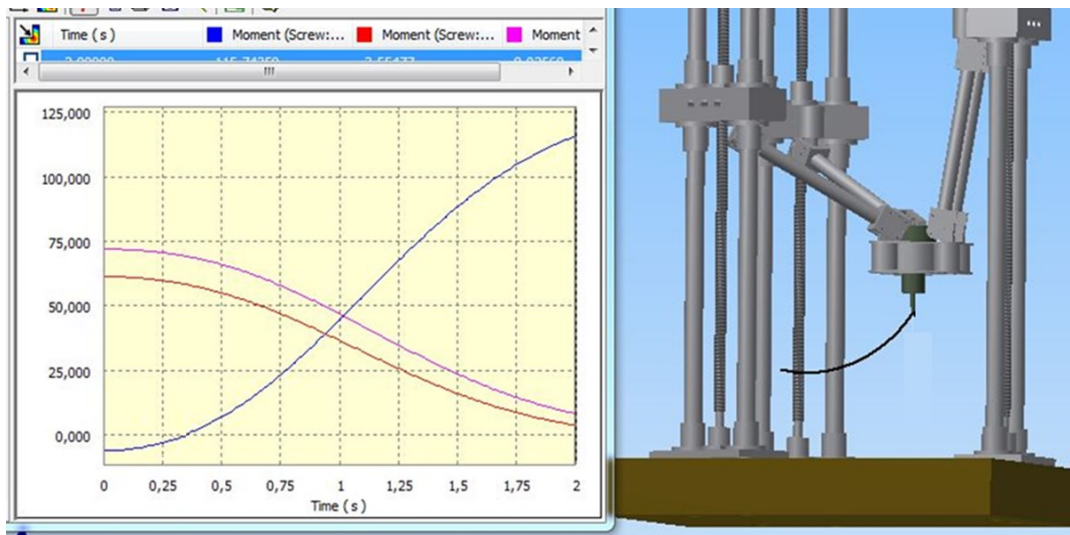
симулации на Autodesk Inventor. За тази цел, разработеният в САД среда 3D модел е преобразуван, като са въведени съответстващите кинематични връзки между звената, триене и външни натоварвания от гравитация и външни сили. Движението на звената е осъществено чрез задаване на съответните параметри на движението – преместване, скорост или ускорение, и определяне на необходимите за това задвижващи моменти, приложени върху винтовете от двигателите. Чрез модула Output Grapher са достъпни за наблюдение всички резултатни сили и моменти, както и параметрите на движението на всяко звено. Симулацията и извеждането на резултатите са в реално време и са достъпни за запис и трансфер в други модули, например за якостен анализ.

На фиг.5.21 е показана симулация при натоварване с външни сили от 10N вертикално и 10N хоризонтално в условия връх на инструмента, перпендикулярно на първи задвижващ модул. В графичния прозорец са показани приложените въртящи моменти от трите модула, необходими за реализирането на зададеното движение. Логично основното натоварване (0.27 Nm) се поема от модула, извършващ зададеното движение. Другите два модула също са натоварени, като поемат около 50% от натоварването, оставяйки неподвижни.



фиг. 5.21. Натоварване в задвижващите механизми

Проведени са 6 симулации при нарастващо натоварване от 0 до 200 N във вертикална посока. При високи стойности на натоварването, над 80 N, в началото на траекторията натоварването се поема от двете неподвижни звена. При преминаване през характерна точка от траекторията, при нулева стойност на въртящия момент, натоварването променя знака си (динамична сингулярност), водещо до зона с по-висока неточност. При продължаване на преместването по траекторията натоварването се променя по познатия начин, като в края ѝ товара се поема само от движещото се звено.

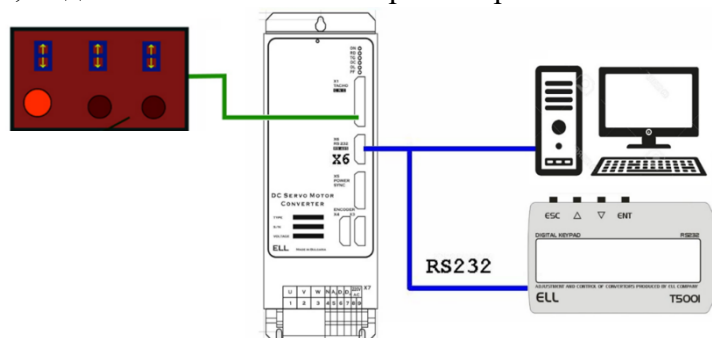


фиг. 5.24. Симулация с натоварване от 100 N

5.3.2. Експериментална проверка на работата на задвижването.

Целта на експеримента е да се проверят в реални условия получените зависимости за изменение на натоварването на задвижването в рамките на работната зона.

Опитната уредба включва създадения модел на линапод и допълнителен модул към задвижването за измерване и запис на тока през задвижващия електродвигател. Експериментите се провеждат само с един модул за задвижване, останалите два трябва да са неподвижни, за да не оказват влияние при измерването.



фиг. 5.30. Свързване на T5001 към преобразувател от серията 12XXX

Изследването се провежда в режим, в който работи само едно от задвижванията – на изследвания модул. Движението се осъществява в ръчен режим на управление. Чрез бутоните за съответната ос и посока се осъществява движение на работния орган по зададената траектория. Чрез селектора за скорост се задава необходимата скорост на движение – съответно 10%; 20%; 30%; 40%; 50% и 60% от максималната.

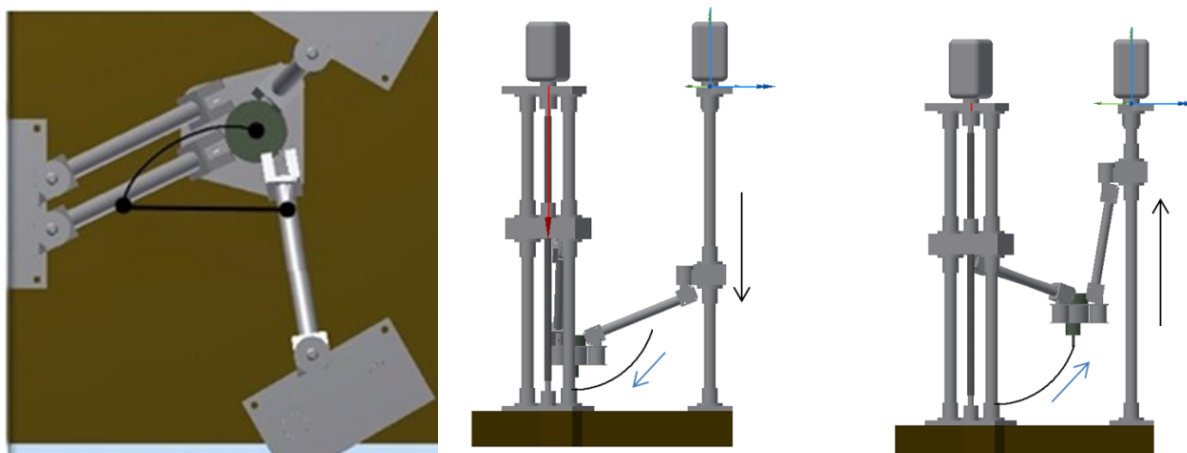
Тъй като терминалът T5001 не предоставя възможност за запамяване на данни от работата в реално време на тиристорните преобразуватели, е необходимо да се създаде алтернативен начин за тяхното съхранение и обработка. Използван е персонален компютър, разполагащ със сериен порт RS232. Той е свързан паралелно към линията за обмен на данни между терминала T5001 и тиристорния преобразувател. По този начин получените в реално време данни за работата на тиристорния преобразувател могат да бъдат както наблюдаеми (визуализирани на течнокристалния дисплей на терминала T5001), така и запаметени в паметта на персоналния компютър.

Записите се осъществяват, като се използва вътрешен параметър в задвижването (P01.04), съответстващ на тока, протичащ през двигателя. Записът представлява последователни стойности на тока в двигателя, измерен през еднакви интервали от време. По тази причина дължината му е зависима от скоростта на движение. Поради използването на тиристори за управляващи елементи, изменението на тока не е равномерно, а е с трионообразна форма (фиг.5.36). Информацията се попълва автоматично в колона на електронна таблица и чрез автоматичните инструменти на MS Office Excel се построяват съответните графични зависимости. За улесняване на анализа резултатите са апроксимирани с полином от втора степен.



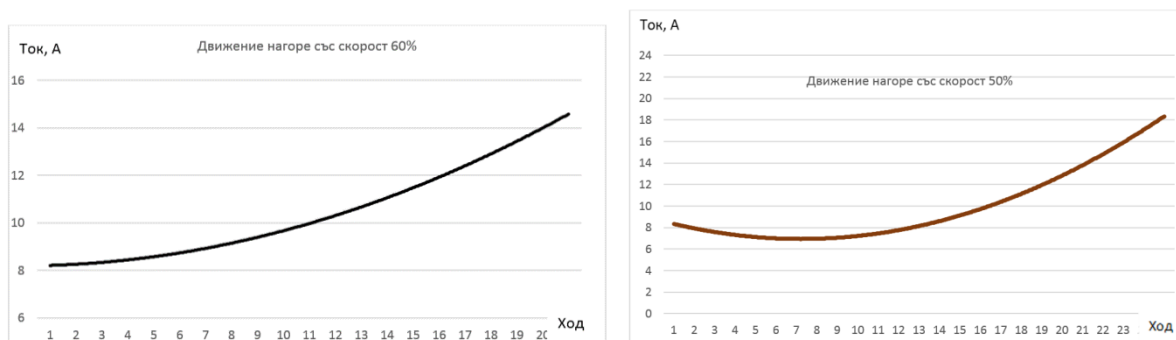
фиг. 5.36. Графичен вид на запис на ток през двигателя

Проведени са два опита с траектории на движение съответно в средата и в лявата периферия на работната зона (фиг.5.37) с по две серии записи - при движение нагоре и надолу. Записите са при скорости на движение – съответно 10%; 20%; 30%; 40%; 50% и 60% от максималната и товар от 80 kg, окачен върху подвижната платформа. В реални условия силите, възникващи при реализиране на технологичния процес, са насочени преобладаващо нагоре. При проведените симулации е установено, че разликата в двата случая е в знака (посоката) на приложения момент. Което позволява получените резултати да се прилагат и в двата случая.



а). б). в).
фиг. 5.37. Конфигурация и траектория при движение - а) в средата и в периферията б) надолу и в) нагоре

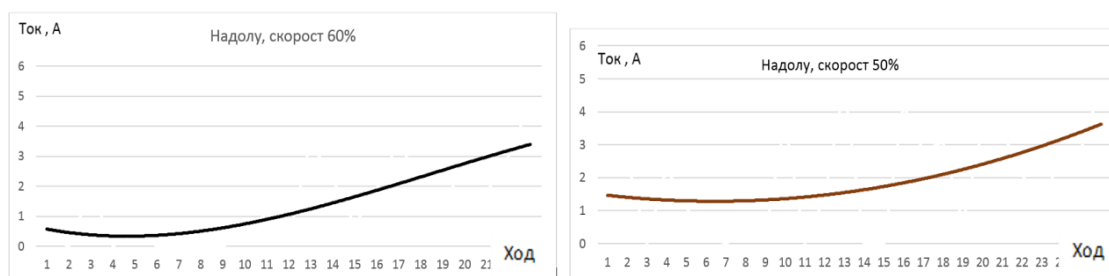
Два от записите от проведените 6 наблюдения са представени по-долу, като на фигурите са показани само апроксимиращите линии.



фиг. 5.38. Записи при 60% и 50% от тах скорост

Характерът на зависимостите е еднакъв и е най-близък до полином от втора степен фиг.5.38, като съответства на резултатите, получени от математическите симулации (виж фиг.5.23 и фиг.5.24). В началото на траекторията натоварването върху двигателя е минимално и съответства на 6А. При преминаване през средната зона натоварването върху двигателя се повишава плавно и достига в края 16÷18А. Сравняването на записите при различни скорости показва слаба зависимост на натоварването от скоростта. Записите показват минимални различия във формата и измерените стойности. Тези разлики могат да се причислят към влиянието на случайни фактори. Слабото или незначително влияние на скоростта върху момента може да се обясни с наличието на резерв на мощност на двигателите.

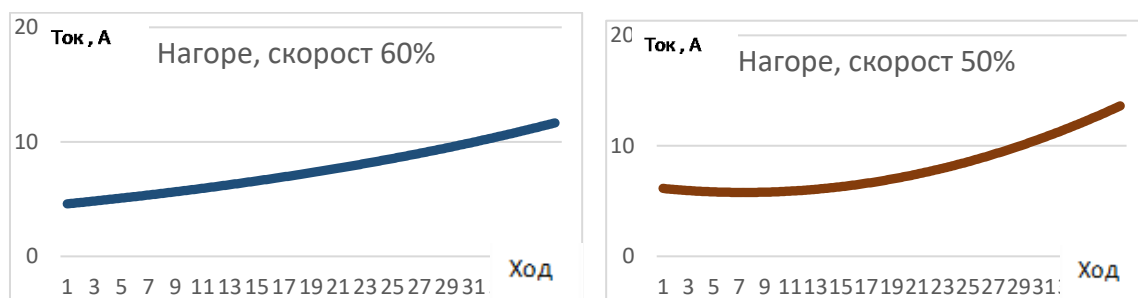
Записите от експериментите с движение на платформата надолу са обработени аналогично на предните и са представени на фиг. 5.40. Сравняването на записите и в този случай установи слаба или отсъствие на зависимост на натоварването от скоростта. Записите показват минимални различия във формата. Почти всички графики, с изключение на тези при скорост 50% и 60%, са близки до права линия с минимални отклонения в средата от 1А. Ниските измерени стойности и малките разлики могат да се обяснят с работата на двигателя в спиращен режим. В този случай приложеният товар и посоката на движение съвпадат, като двигателят се стреми да забави движението. При скорост 50% и 60% нарастването на тока е по-голямо с 3 до 4 А. Логично то се получава в края на хода, където траекторията преминава в хоризонтална.



фиг. 5.40. Записи при движение надолу

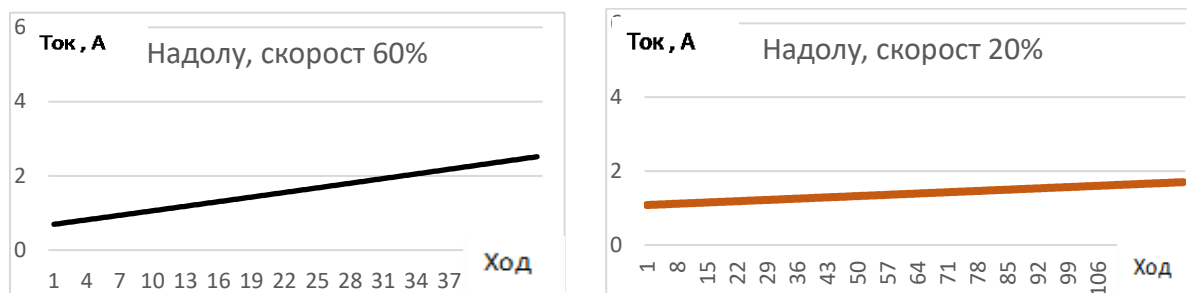
При движение в периферията на работната зона конфигурацията на звената е по неблагоприятна, което предполага по-различно преразпределение на натоварването.

Поради това са направени още две серии записи при траектория, разположена в периферията на работната зона, съответно при движение надолу и нагоре.



фиг. 5.41. Записи при движение нагоре в периферията на работната зона

И тук, както при движението в центъра, зависимостите са най-близки до полином от втора степен, а характерът на изменението е почти същото. В началото на траекторията натоварването върху двигателя (фиг.5.41) е минимално и е около 6А. При преминаване през средната зона натоварването върху двигателя се повишава плавно и достига в края 16÷18А. Налице е слабо или отсъствие на зависимост на натоварването от скоростта. Анализът на записите (фиг.5.41) показва минимални различия във формата и стойностите. Тези разлики могат също да се обяснят с влиянието на случайни фактори.



фиг. 5.42. Записи при движение надолу в периферията на работната зона

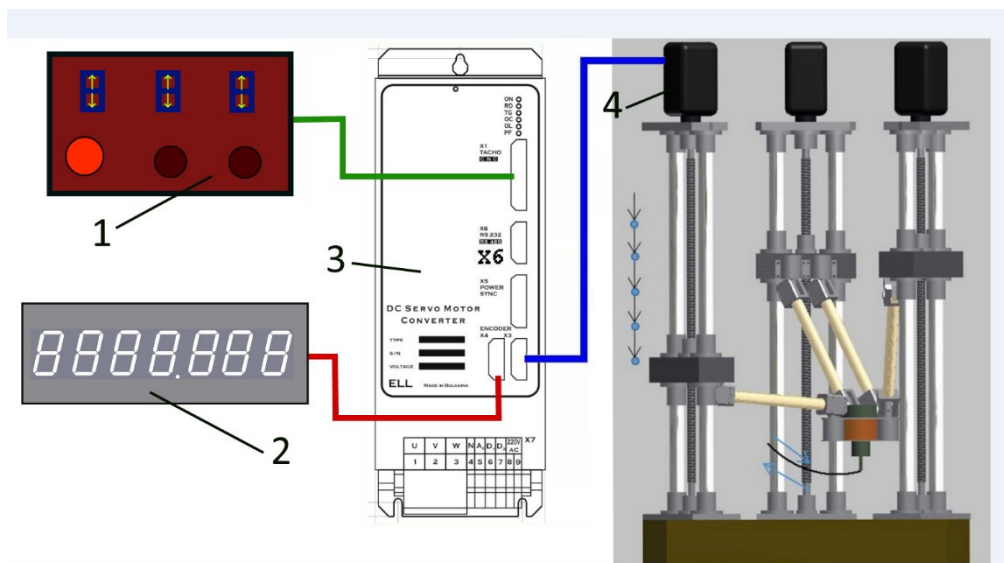
Записите са осъществени при движение по траектория съгласно фиг.5.37, обработени са аналогично на предните и са представени на фиг. 5.42. И в този случай сравняването на записите, установи слаба или отсъствие на зависимост на натоварването от скоростта. Почти всички графики, са близки до права линия с минимални отклонения до 1А. Ниските измерени стойности и малките разлики и тук могат да се обяснят с работата на двигателя в спиращ режим. В началото на записа (траекторията) приложението товар и посоката на движение съвпадат, като двигателя се стреми да забави движението. В края на хода, където траекторията преминава почти в хоризонтална натоварването на двигателя се повишава.

5.4. Точност на позициониране

Задача на изследването е да се създаде модел на точността на позициониране в работната зона. Специфичната форма на работната зона и променящата се конфигурация на звената предполагат различна степен на влияние на факторите в различните зони. Изясняването му е предпоставка за повишаване на точността на работа.

Опитната уредба (фиг.5.43) включва създадения модел на линапод 4, допълнителен модул 2 към задвижването 4 за индикация на позицията и система от индикаторни часовници за измерване на отклонението при позициониране. Тъй като експериментите се провеждат само с един модул за задвижване, останалите два трябва да са фиксирани, за да не оказват влияние при измерването. Това е направено, като двата

неактивни модула на задвижването са изключени, а подвижната им част механично е фиксирана със скоба към направляващите. Точките, в които се извършва измерването, са разположени условно върху пространствена крива, еквилистантна на траекторията на крайното звено.

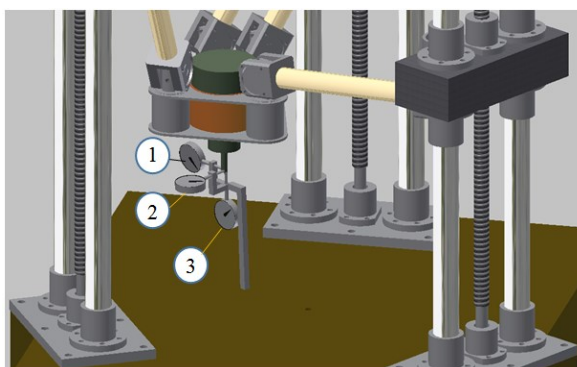


фиг.5.43. Схема на опитната уредба

Изследването се провежда в статичен режим, като работи само едно от задвижванията – на изследвания модул. Движението се осъществява в ръчен режим на управление. Чрез бутоните на пулта за ръчно управление 1 (фиг.5.43) за съответната ос и посока се осъществява движение на работния орган до зоната за измерване, след което с бутона за единични импулси се осъществяват микро премествания до достигане на зададената индикация от обратната връзка на задвижването. При всяко наблюдение се извършва подход към точката на измерване от едно и също разстояние и една и съща страна. След позициониране се отчита относителното отклонение в локална координатна система, по осите на която са разположени три индикаторни часовника фиг.5.44. Ориентацията на локалната координатна система съответства на машинната, като ос Z е вертикална, ос X е насочена към изследвания модул, а ос Y е перпендикулярна на нея. Отчитат се компонентите на относително отклонение по оси X, Y и Z - съответно Δx от индикаторен часовник 1 (фиг.5.44), Δy от индикаторен часовник 2 и Δz от индикаторен часовник 3, спрямо първоначалната настроена позиция. Големината на действителното отклонение се определя като геометрична сума на измерените отклонения по трите оси.

След измерването работният орган се извежда от зоната за измерване с бутона за бърз ход на поне 1/3 от хода на звеното и процедурата по измерването се повтаря.

Методиката за изследване включва провеждането на две серии експерименти при различно натоварване. В първата серия експерименти работният орган е без натоварване, а във втората с натоварване от



фиг.5.44. Схема на измерване

20kg във вертикална посока чрез окачена допълнителна маса към подвижната платформа.

При всеки експеримент са проведени по пет опита, като точките, в които се провежда измерването, се определят от позиции на линейния модул, равномерно разпределени през 80 mm по дължината на хода на изследваното звено - 400mm (фиг.5.43). Траекторията на крайното звено върху която са разположени точките също е показана на фиг.5.43. Останалите звена са неподвижни, установени в края на хода си.

При всеки опит са проведени по 5 наблюдения, включващи по едно позициониране и отчитане на отклонението. Резултатите се записват в табл. 5.1. С цел анализ на отклонението резултатите от всеки опит се обработват статистически като малка извадка. Определя се полето на разсейване на компонентите на отклонението $\Delta x_{(j)}$, $\Delta y_{(j)}$ и $\Delta z_{(j)}$ за всяка точка по зависимостта $\Delta = \pm 3\sigma_{n-1}$.

Построени са графичните зависимости на компонентите на полето на отклонението по координатните оси от позицията в работната зона $\Delta x = \Delta x_{(b)}$; $\Delta y = \Delta y_{(b)}$ и $\Delta z = \Delta z_{(b)}$, където b е отстоянието на точката от линейния модул.

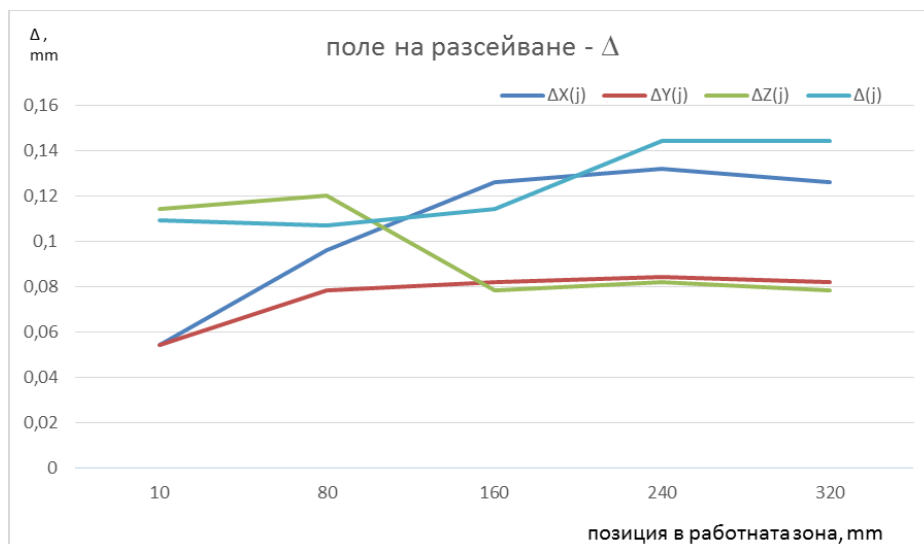
За оценка и анализ на общото, пространствено отклонение Δ се използва геометричната сума на компонентите на отклонението, като е построена графичната зависимост на полето на отклонение от позицията в работната зона $\Delta = \Delta_{(b)}$.

Съгласно методиката са проведени два експеримента без и с натоварване. В първият, в определените пет точки са проведени по пет наблюдения общо 25 позиционирания. Резултатите за измерените отклонения са записани в таблица 5.2. Обработени са съгласно методиката и резултатите за получените полета на разсейване са представени в таблицата и в графичен вид на фиг.5.45.

Полето на разсейване в хоризонтална равнина, по направление на траекторията на движение, $\Delta x_{(j)}$ има тенденция за нарастване в изследваната зона. То се увеличава от 0,054 mm в близост до задвижващия модул до 0,132 mm в края на хода. Увеличението е съществено, близо 2,5 пъти. Това е в резултат на промяната на наклона на траекторията, като от почти вертикална в началото, до задвижващия модул, тя преминава в близка до хоризонтална в края в най-отдалечената точка.

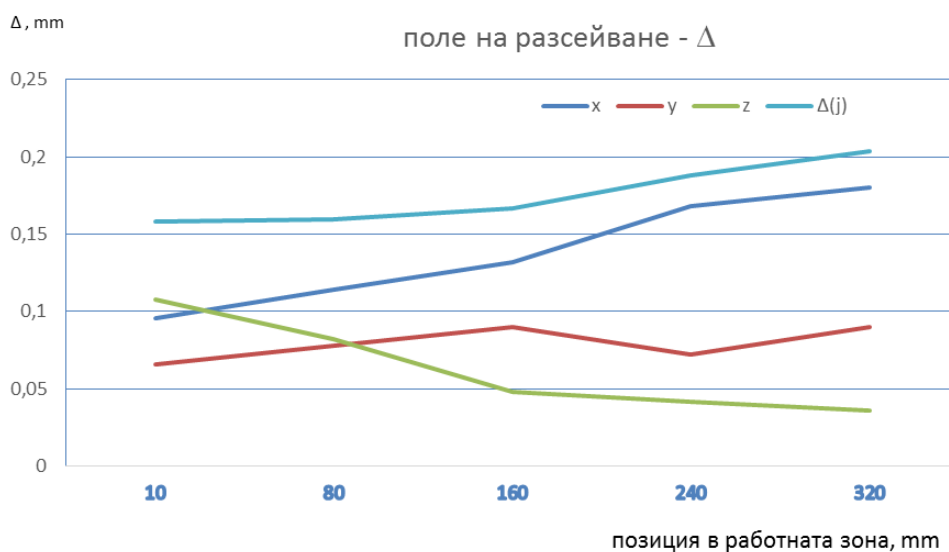
Полето на разсейване в хоризонтална равнина, перпендикулярно на траекторията на движение, $\Delta y_{(j)}$ остава почти еднакво, около 0,08 mm в изследваната зона. В тази посока влияят само случайни фактори, предизвикващи грешки в резултат на хлабини.

Във вертикална равнина полето на разсейване $\Delta z_{(j)}$ намалява с отдалечаване от задвижващия модул. То намалява от 0,134 mm в близост до задвижващия модул до 0,078 mm в края на хода. Както в хоризонтална равнина, по направлението на траекторията на движение, изменението на полето на разсейване във вертикална равнина е в резултат на промяната на наклона на траекторията. Общото пространствено отклонение Δ показва незначително изменение в работната зона, тъй като двете компоненти се компенсират.



фиг.5.45. Поле на разсейване при позициониране без натоварване

Във вторият експеримент, в определените пет точки също са проведени по пет наблюдения общо 25 позиционирания с натоварване от 20 kg във вертикална посока, чрез окачена допълнителна маса към подвижната платформа. Резултатите за измерените отклонения са записани в таблица 5.3. Обработени са съгласно методиката и резултатите за получените полета на разсейване са представени в таблицата и в графичен вид на фиг. 5.46.



фиг.5.46. Поле на разсейване при позициониране с натоварване

При натоварване от 20kg характерът на изменението на компонентите на полето на разсейване се запазва. В хоризонталната равнина, по направление на траекторията на движение, $\Delta x(j)$ нараства в изследваната зона. То се увеличава от 0,096 mm в близост до задвижващия модул до 0,18 mm в края на хода - 2 пъти.

Полето на разсейване в хоризонтална равнина, перпендикулярно на траекторията на движение, $\Delta y(j)$ също остава почти еднакво, около 0,08 mm в изследваната зона. Във вертикална равнина полето на разсейване $\Delta z(j)$ е по-малко по стойност, като също намалява с отдалечаване от задвижващия модул - от 0,108 mm в близост до задвижващия

модул до 0,036 mm в края на хода. Общото пространствено отклонение Δ е по-високо с 30% при незначително изменение в работната зона.

Задача на изследването е да се определят по експериментален път влиянието и взаимодействието на основните фактори, определящи точността на позициониране, с цел създаване на математически модел, даващ възможност за прогнозирането ѝ на етапа проектиране.

Проведеният анализ показва, че факторите върху които трябва да се изгради модела, са два - натоварване във вертикална посока и позиция в работното пространство. Търсеният модел може да се създаде чрез пълен факторен експеримент от вида 2^n , където n е броят на входните фактори.

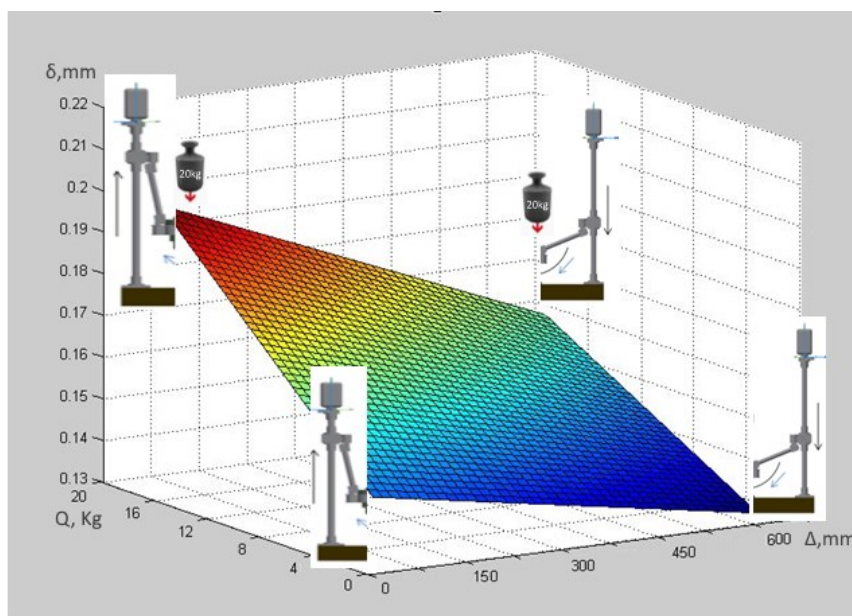
Броят на опитите се определя от входните фактори по зависимостта $N=2^n$. При два фактора опитите са 4. Броят на наблюденията във всеки опит се препоръчва да бъде 3 до 5.

Нивата и интервалите на вариране на факторите са определени на базата на предварителните експерименти. Основното ниво на натоварването е избрано $Q = 10$ kg при интервал на изменение 10 kg. Вторият фактор - позицията в работното пространство, е избрана в средата на хода при интервал на изменение $\frac{1}{2}$ ход. След обработка, оценка на дисперсиите и проверка на адекватност при ниво на значимост $\alpha=0,05$ по известните методики, е получена следната регресионна зависимост в натурален вид.

$$\delta = 0,1455 - 0,884 \cdot 10^{-5} \Delta + 0,003Q - 3,16 \cdot 10^{-6} \Delta \cdot Q$$

Чрез математическия апарат на „Matlab” е построена равнината $\delta=\delta(\Delta,Q)$ (фиг.5.47), описваща големината на полето на разсейване при позициониране.

В резултат на проведения активен експеримент е определен адекватен модел на точността на работа на изследвания МПК, описващ полето на разсейване при позициониране в резултат на влиянието на определящите два фактора - натоварване във вертикална посока и позиция в работното пространство. Полученият модел може да се използва при технологични изчисления, свързани с разположението на екипировка и обработван детайл в работната зона на МПК.



фиг.5.47. Модел на полето на разсейване при позициониране

ОБЩИ ИЗВОДИ

С настоящият дисертационен труд са постигнати следните по-важни резултати:

Разкрита е необходимостта от решаването на технологични задачи, свързани с приложението на ПКМ, особено при пет осните обработки, където са необходими нови стратегии за обработка, адаптирани към конкретната кинематика.

Изведени са ограничения, свързани с ъгъла на предаване на силата между звената, както и динамичните претоварвания, породени от жироскопичния момент, които е необходимо да се отчитат при технологичното проектиране.

Анализирани са функционалните характеристики на механизмите с паралелна кинематика и са класифицирани според технологичните им възможности.

Анализирани са различните структури машини, изградени на база МПК, и е показана ефективността на хибридните структури.

Изведени са зависимости, определящи основните параметри на МПК при зададени изходни условия – размери на работната зона.

Създаден е виртуален модел на Линапод, проектиран в графична САД среда от високо ниво "Autodesk Inventor®". Използвани са методите за параметрично проектиране, позволяващи вариантност на конструкцията.

Разработени са оригинални стави, представляващи комбинация от две цилиндрични стави, разположени под 90° . Ставите са изпълнени като еднакви двойки радиално-аксиални сачмени лагери с осова стегнатост.

Изработен и сглобен е реалнодействащ модел на Линапод. Размерите и геометричните му особености напълно съвпадат с тези на проектирания модел.

Създадените виртуален и реален модел на Линапод позволяват провеждането на голям обхват разнообразни изследвания във всички направления, свързани с конструиране, функционални симулации и експерименти, технологични приложения и др. проблеми, свързани с приложението на МПК.

Създаден е математически модел на Линапод чрез анализ на геометрията на механизмите и възлите, от които е съставен. Намерена е зависимостта между координатите на центъра на подвижната платформа и положението на задвижващите модули.

Разработен е алгоритъм, избягващ забранените конфигурации на кинематичната система, в основата на които стои ограничение на ъгъла между лоста и линейния модул, като по този начин се гарантира стабилната работа на МПК.

Обосновано е използването на PLC базирана система за управление, имаща редица предимства, като по-ниска цена и висока гъвкавост, даваща възможности за провеждане на изследвания върху кинематиката и динамиката на МПК, както и експерименти с нови алгоритми за управление.

Създадена е методика за определяне на работната зона на изследвания МПК чрез виртуални симулации. Получената зона е осово-симетрична и е съставена от три части –

централна с форма на призма с триъгълно сечение и две непълни части - долна с форма на триъгълна пирамида и горна с неправилна форма.

Обосновани са технологичните възможности за използване на работната зона - горната част е подходяща за разполагане на инструментални магазини, измервателни устройства и други обслужващи устройства, долната зона е мястото за елементите на приспособлението, а основната зона е за разполагане на детайла и траекториите на инструментите.

Чрез динамични симулации на работата на модела е изяснен характерът на изменението на силовите и скоростните характеристики в работното пространство. Дефинирани са технологични особености в различните зони на работното пространство и специфични особености на използването му.

В някои зони на работното пространство стойностите на максималните скорости и сили при движение на работната платформа могат да достигнат екстремни стойности. Освен забранените (сингулярни) конфигурации, съществено значение в случая има и показателят за качество на предаване на силата, той се изменя нелинейно в широки граници в работната зона.

Разработен е подход за определяне на коефициентите на предаване на звената чрез динамични симулации при различни конфигурации и скорости и съответстващите им параметри на задвижванията в етапа на проектиране. Такъв подход гарантира постигането на необходимата скорост в цялата работна зона.

Установено е наличие на зона, в която се сменя знакът на задвижващия въртящ момент, което е предпоставка за неточност, а моментното разпределение на товара между задвижващите звена се определя от позицията на крайното звено в работната зона.

Разработена е методика и е създадена опитна уредба за експерименталното записване на моментното натоварване на задвижването. Резултатите показват, че характерът на изменението е най-близък до полином от втора степен, като съответства на резултатите, получени от математическите симулации.

Разработена е методика и е създадена опитна уредба за измерване на отклонението при позициониране. Анализът на експериментално определените компоненти на отклонението при позициониране показва, че изменението им се различава в работната зона.

Във вертикална равнина полето на разсейване намалява с отдалечаване от задвижващия модул два пъти, в хоризонтална равнина по посока на траекторията, с отдалечаване от задвижващия модул, нараства близо 2,5 пъти, а перпендикулярно на траекторията на движение остава почти еднакво в изследваната зона.

Общото пространствено отклонение показва незначително изменение в работната зона, тъй като двете компоненти се компенсират. При натоварване от 20kg характерът на изменението на компонентите на отклонението при позициониране се запазва, като се увеличава с около 30%.

Определен е адекватен модел, описващ полето на разсейване при позициониране на изследвания МПК, в зависимост от натоварването във вертикална посока и позицията в работното пространство.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- Създаден е математически модел на линапод, отразяващ зависимостта между координатите на центъра на подвижната платформа и положението на задвижващите модули, чрез използване на който са определени аналитични условия, предотвратяващи недопустими конфигурации на звената на механизма, водещи до разрушаването им.
- Създадени са виртуален модел в графична CAD среда от високо ниво Autodesk Inventor, като са използвани методите на параметричното проектиране, както и реален модел на механизъм с паралелна кинематика (тип линапод), които позволяват провеждането на изследвания, свързани с проектиране, компютърни симулации на кинематични и динамични характеристики, технологични приложения и други проблеми при този вид оборудване.
- Разработена е методика за визуализиране на работната зона на механизми с паралелна кинематика в CAD среда. Изследвана е формата на работната зона на избраната конструкция механизъм с паралелна кинематика, дефинирани са характерните ѝ зони и е обосновано технологичното им значение. Установени са функционални зависимости между размерите на работната зона и конструктивните параметри на избраната конструкция механизъм с паралелна кинематика.
- Изследвани са зависимостите между скоростите и натоварванията на крайното звено и задвижващите модули и е установен нелинейният им характер.
- Предложена е методика за изследване на полето на разсейване при позициониране на изследвания механизъм с паралелна кинематика в работната зона, чрез прилагане на която е построен адекватен теоретико-експериментален модел, описващ точността при работа на изследвания линапод в зависимост от натоварването във вертикална посока и позицията в работното пространство.
- Разработено е задвижване на механизъм с паралелна кинематика, включващо високомоментни двигатели и тиристорни преобразуватели.
- Създадена е система за управление на механизъм с паралелна кинематика, базирана на PLC структура и осигуряваща условия за изследвания на кинематиката и динамиката на механизма, както и прилагането на нови алгоритми за управлението му.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Иванов С., Ст. Йорданов, Х. Митев, Разработване на контролер за любителска CNC машина, Международна научна конференция “УНИТЕХ’12” – Габрово, Сборник доклади, Том I, стр. I-597- I-599.
2. Митев Й., Х. Митев, Координатно пространство при машините с паралелна кинематика тип "LINAPOD", УНИТЕХ 2014 Габрово, pp III 179-183, ISSN 1313-230X.
3. Митев Х., И. Кандов, Изследване характеристиките на задвижващ модул на МПК, Дни на механиката, Варна, 2017, pp. I 44-48, ISSN 1312- 8612
4. Mitev H., PLC Based Control System of Parallel Kinematics Mechanism, Proceedings of 13th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, York, England, 2014, Date Added to IEEE Xplore: 16 July 2015, Electronic ISBN: 978-1-4673-6730-1.
5. Yordanov S., H. Mitev, Synthesis of a Fuzzy PID Controller, Designed to Control a LINAPOD, Proceedings of Scientific Forum on Innovative Trends in Engineering and Science 2015, 2015, Kavala, Greece.