

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Примена рачунара у развоју производа

Број индекса: 358/2013

Иван Д. Главоњић

**Конструисање манипулатора за
опслуживање машина за бризгање пластике
у CAD софтверу
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Ненад Марјановић, ред. проф. - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

Конструише манипулатор за опслуживање машина за бризгање пластике, поштујући правила конструисања. Манипулатор треба да испуни све услове и ограничења, која су унапред постављена, и да може да опслужује што већи број машина за бризгање пластике. Пожељно је да уради CAD модел манипулатора и на основу тог модела доставити одговарајућу техничку документацију, потребну за израду манипулатора. Манипулатор треба да буде конструисан тако, да може бити изводљив у пракси. Пожељно је да задовољи економске аспекте, и на тај начин своју изводљивост и докаже.

Препоручена литература:

[1] М. Вукобратовић, "Индустријска роботика", Машински факултет, Београд, 1998.

[2] Н. Марјановић, "Методe конструисања", Машински факултет, Крагујевац, 1999.

[3] Dai Jian S, Zoppi Matteo, Kong Xianwn, "Advanced in Reconfigurable Mechanisms and Robots I", 2012.

Крагујевац, 25.02.2015

Ментор: Др Ненад Марјановић, ред. проф.

Захваљујем се ментору проф. Др Ненаду Марјановићу на указаној помоћи током израде мастер рада и на добронамерним критикама којима је допринео квалитетнијем раду.

Захваљујем се колеги Милошу Матејићу на сугестијама у вези рада, као и мојој породици, фамилији, девојци и пријатељима који су били моја велика подршка током мог студирања.

Резиме

У овом раду биће детаљно описан процес конструисања универзалног манипулатора, поштујући правила конструисања, који би за функцију имао прихватање једног или више делова из бризгачке и прослеђивање на даљу финализацију тог производа. За конструсање манипулатора потребно је прво одабрати тип манипулатора, одредити број степени слободе а затим одабрати одговарајуће јединице и погоне који омогућују манипулатору кретање и померање делова. Такође, одабрати и одговарајуће аутоматизационе компоненте које уз одговарајући софтвер потпуно аутоматизују манипулатор. Овакав манипулатор у потпуности аутоматизује један део производње и у целости замењује радника.

Кључне речи: Конструисање, манипулатор, аутоматизација

Abstract

In this paper work it will be thoroughly described process of designing a manipulator that can move parts from injection molding machine to other steps of finalizing a product. When designing a manipulator, it is needed to define the type of manipulator, degrees of freedom and units that will drive the manipulator and move part, as well as automation components. This type of manipulator automates manufacturing and by that there's no need for hiring worker.

Keywords: Designing, manipulator, automation

Садржај

1. Увод	1
1.1 Задатак	1
1.2 Историјски развој	1
1.3 Област примене	2
1.4 Мотивација	2
2. Основно о манипулаторима.....	3
3. Постављање техничког задатка и формирање листе захтева	5
4. Конципирање конструкције манипулатора.....	7
4.1 Општа функција манипулатора.....	7
4.2 Концепције манипулатора	7
4.3 Линеарне јединице.....	10
5. Формирање конструкције манипулатора	14
5.1 Избор линеарних јединица	14
5.1.1 Линеарна јединица у Y осе.....	15
5.1.2 Линеарна јединица у X осе.....	17
5.1.3 Линеарна јединица у Z осе.....	19
5.2 Формирање подсклопова.....	21
5.2.1 Подсклоп Z осе.....	21
5.2.2 Подсклоп X осе.....	25
5.3.3 Подсклоп Y осе.....	27
5.3 Монтажа манипулатора	29
5.3.1 Монтажа подсклопова	29
5.3.2 Монтажа носача каблова	31
5.3.3 Монтажа сензора.....	32
5.3.4 Монтажа вакуум хватаљки	33

6. Детално конструисање манипулатора	34
6.1 Финални прорачуни.....	34
6.2 Техничка документација.....	36
6.3 Економски аспекти манипулатора	37
6.4 Радни век, одржавање и сервисирање.....	39
6.5 Карактеристике манипулатора.....	40
 7. Закључак.....	43
 Литература.....	45
 Додатак.....	46

1. Увод

1.1 Задатак

Задатак овог мастер рада, јесте да се конструише универзални манипулатор, поштујући правила конструисања, који би прихватао један или више делова из машине за бризгање пластике, и прослеђивао даље на финализацију тог производа. У склопу тога, обавила су се неопходна концептирања, разрада конструкције, моделирање делова, склопова и израда комплетне техничке документације манипулатора у софтверском пакету *Autodesk Inventor*. Механичка структура индустријског робота се састоји од сегмената спојених зглобова који могу бити ротациони или линеарни (транслаторни). Задатак механичке конструкције је да оствари потребно кретање хватаљке робота (манипулатора) током реализације радног задатка. То значи да је потребно да хватаљка у свакој тачки путање оствари планирану позицију и оријентацију, као и одговарајућу брзину и убрзање. Конструкциона реализација зглобова који се данас примењују код индустријских робота је таква да један зглоб омогућује само једно релативно кретање сегмената које повезује [1].

1.2 Историјски развој

Манипулатори спадају у роботе, стога историја манипулатора се везује за историју робота, тј. роботике. Реч робот настала је од чешке и словачке речи *роб*, *робота* што у буквалном смислу значи тежак рад. У роботизици, манипулатор представља уређај који манипулише одређени материјал без директног контакта човека са материјалом. Први робот настао је још у 4. веку п.н.е. а његов творац био је старогрчки математичар Архитас из Тарентума (*Archytas of Tarentum*). Он је направио прву механичку птицу, која је имала погон на пару. Птици је дао назив "Голуб". Данашњи индустријски роботи, у чију групу спадају и манипулатори, крећу са развојем, кад и почетак индустријске револуције. Из потребе, у почетку, за руковањем опасних материја а затим и за подизање и премештање тешких терета ради добијања веће ефикасности и очувања здравља радника [1]. Сада роботи представљају неизбежне уређаје на свакој производној траци или у производном погону, јер представљају, због своје брзине, тачности понављања операција знатно поузданијег радника од човека. Стога, роботе треба сматрати за уређаје који су допринели, у великој мери, стварању индустрије какву данас познајемо.

1.3 Област примене

Постоје разне поделе робота као нпр. на хуманоидне, индустријске итд. Манипулатор који је тема овог мастер рада спада у индустријске роботе, што значи да је њихова област примене везана искључиво за индустрију. Манипулатори као и роботи могу се поделити на основу броја степени слободе. Нпр. роботске руке за заваривање имају шест степени слободе. Што систем има већи број степени слободе, то је комплекснији и скупљи. За потребе манипулатора који преузима делове из машине за бризгање пластике (бризгаљке), што ће у даљем раду бити објашњено, потребна су три степена слободе, или три трансације. Овакав манипулатор може да се инсталира на велики број бризгаљки а постоји могућност и да се инсталира и на неке машине за дување пластике (дуваљке).

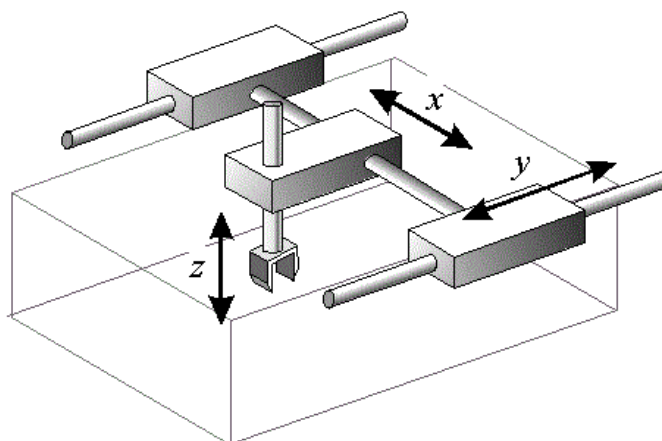
1.4 Мотивација

Вођени филозофијом да човек не може да испрати темпо које намећу машине у производњи, доводи до закључка да куповина помоћних машина које то могу да остваре, се у потпуности исплати. Као додатак томе, уколико се ради о средини која је опасна по човека, оваква одлука о куповини помоћне машине још више потврђује ово размишљање. Мотивација лежи баш у томе, да се конструише машина која може да мења радника у две смене а да притом ефикасност буде већа од ефикасности радника. У циљу конструисања овакве машине примењује се знање стечено током досадашњег школовања као и упознавање са аутоматизацијом, која представља једну од најзахтевнијих области у машинству.

2. Основно о манипулаторима

У роботизици, манипулатор представља уређај који "манипулише" одређени материјал без директног контакта човека са материјалом. Први пут су коришћени за рад са радиоактивним материјалима а после се њихова примена проширила и на остале материјале. У производној индустрији, манипулатори се користе за подизање, маневрисање и спуштање материјала који су претешки, претопли или превелики. Другим речима, сваки материјал који може изазвати повреду радника. Манипулатори представљају један од најчешћих машинских система у процесу аутоматизације, и због тога је развијено више концепција манипулатора.

Постоје разне концепције индустријских робота а самим тим и манипулатора. Индустријски роботи, према концепцији могу бити: СКАРА (SCARA) роботи, Делта роботи, линеарни или артикулисани роботи. Манипулатори спадају у линеарне роботе, због њихове могућности линеарног кретања и често се називају Гантри (Gantry) роботи. Дакле, у Гантри роботе спадају сви роботи који имају три степена слободе односно, три транслације. Сагледавајући већ постојећа решења, дошло се до закључка да манипулатори имају, у суштини, исту концепцију а да им дизајн тј. спољни изглед зависи од њихове намене и од произвођача. На слици 1 приказан је шематски приказ линеарног робота.



Слика 1 – Шематски приказ линеарног робота

У прилог теорији о експанзији индустријских робота говоре подаци представљени у табели 1 [2]. Док су на слици 1.1 приказани изгледи осталих типова манипулатора.



Слика 1.1 – Изглед концепција индустријских робота намењених за манипулисање материјала

Из табеле 1 може се видети да је у задње три године, број произведених индустријских робота у значајном порасту. Разлог овако вртоглавог раста лежи у чињеници да су се индустријски роботи развили до тог стадијума у ком могу обављати велики број операција и због тога чине одличну замену за раднике. Њихова цена је таква да могу бити исплативији послодавцу.

Табела 1 – Број произведених робота на годишњем нивоу

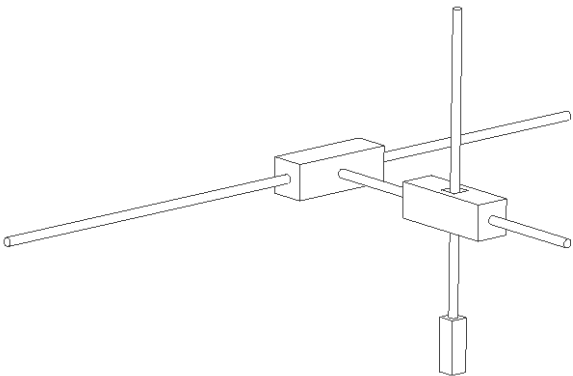
Година	Број произведених робота на годишњем нивоу
1998	69,000
1999	79,000
2000	99,000
2001	78,000
2002	69,000
2003	81,000
2004	97,000
2005	120,000
2006	112,000
2007	114,000
2008	113,000
2009	60,000
2010	118,000
2012	159,346
2013	178,132
2014	205,000

Ову чињеницу послодавци и велике компаније широм света користе и набављају најновије роботе који могу обављати жељене функције. Подаци објављени од сајта www.worldrobotics.org говоре да ће овај тренд раста производње индустријских робота расти и у скоријој будућности. Због тога, стално се ради на њиховом усавршавању, како механичких компоненти тако и софтвера којима се управљају.

3. Постављање техничког задатка и формирање листе захтева

Технички задатак представља улаз у процес конструисања и настаје услед техничких потреба и планирања производа са циљем да се постојеће техничко стање промени и обогати у корист човека [3]. У табели 2 приказан је технички задатак за манипулатор.

Табела 2. – Технички задатак

Технички задатак
-Функција: Транспорт делова из машине за бризгање пластике у две смене у затвореном објекту -Скица:  -Концепција: Постоји само једна концепција али мора да постоји универзални прикључак на који се може инсталира, по потреби, једна или више хватаљки. -Габаритне мере: просторија: 15 x 15 m манипулатор: 2,5 x 1,5 x 1,4 m -Радни век: пројектовани радни век је 5 година уз редовно одржавање и сервисирање -Цена: 6 000 ÷ 20 000 евра

Технички задатак се формира на основу захтева, услова, ограничења и жеља које се постављају пред будућу конструкцију. Често је технички задатак

дефинисан од стране купца, али је неопходно да конструктор разради задатак и да га усагласи са наручиоцем и извођачима. Резултат разраде техничког задатка треба да буде спецификација, односно детаљан опис захтева, који се обично изводи у облику листе захтева [3]. Стога је у табели 2.1 представљена листа захтева за манипулатор који се конструише.

Табела 2.1 – Листа захтева

Листа захтева			
Манипулатор		Чврст захтев	Лабав захтев
1.	ФУНКЦИЈА - Манипулатор треба да има три степена слободе тј., три трансляције - Преузимање производа и њихово премештање - Могућност инсталирања на што већи број брызгалки - Манипулише са производима, не тежим, од 5кг - Могућност преузимања једног или више производа одједном	+ + +	+ +
2.	ПОДАЦИ БИТНИ ЗА ИЗВРШЕЊЕ ФУНКЦИЈА - Користити лакше материјале за израду манипулатора - Користити што више стандардних елемената - Манипулатор треба бити монтажно/демонтажан	+	
3.	РАДНА СВОЈСТВА - Радни век са задатом прецизношћу и одржавањем 3 до 6 година - Прецизност понављања операција и позиционирања ± 2 mm - Брз и прецизан рад - Конструкцијом се управља одговарајућим софтвером	+ + + +	
4.	ЕРГОНОМСКА СВОЈСТВА Потпуно безбедно руковање	+	
5.	ТЕХНОЛОШКА СВОЈСТВА За конструисану машину није потребна израда нових алата	+	
6.	ИСПОРУКА Рок за завршетак конструкције 15.07.2015	+	
7.	ЕКОНОМСКИ УСЛОВИ - Једноставна монтажа - Што мањи број делова као и што мања сложеност делова - Цена: До 20 000 евра	+	+ +

Из табеле 2.1 може се видети да су формиран чврсти и лабави захтеви. Чврсти захтеви су они захтеви који се морају испунити и сходно томе они су у овом раду испуњени. Док су лабави захтеви они захтеви који се не морају испуне, али они су у овом раду испуњени тек пошто су испуњени чврсти захтеви из горе приказане табеле 2.1.

4. Конципирање конструкције манипулатора

Конципирање идејног решења машинског система представља утврђивање глобалног размештаја делова и компонената ради остваривања задате функције. Ова фаза конструисања обухвата пут од идеје преко описа функције до идејног решења функције [3].

4.1 Општа функција манипулатора

Манипулатор спада у машински систем који има функцију транспорта материјала. Иако није уобичајан транспортер (пр. тракасти транспортер), манипулатор такође премешта тело из тачке А у тачку Б. Разлика је у томе што дужина транспорта може бити знатно мања него што је код уобичајних видова транспорта. У зависности од његове функције, бирају се елементи који ће улазити у склоп манипулатора.

4.2 Концепције манипулатора

У овој фази конструисања урађене су различите варијанте тј. концепције самог манипулатора. Јако је битно имати што више концепција како би се анализом тих концепција уочиле предности и мане сваке од разрађених концепција. За конкретан манипулатор развијене су три концепције које су детаљно сагледане и анализиране. Током избора концепције мора се водити рачуна о многим аспектима, од њихових габарита, економске исплативости, могућности за што стабилнијим и поузданијим радом као и о простору око машина за бризгање пластике.

Концепција 1:

Концепција 1, приказана је на слици 2.5. Овакав манипулатор пружа велику стабилност самом манипулатору и пригушује вибрације које се јављају током рада манипулатора, омогућава сигуран и поуздан рад, омогућава премештање великих и тешких пластичних делова, пружа доста простора за монтирање аутоматизационих компоненти. На самој конструкцији има доста простора за монтирање помоћних вођица, клизача и др.



Слика 2.5 – Изглед концепције 1

Ипак, оваква концепција има и мане. Највећа мена јесу њени габарити. Манипулатор би се инсталирао преко машине за бризгање пластике и заузимао би простор око машине и на тај начин довео до смањења простора за оператере који би имали потребу да надгледају рад бризгаљке. Потребно је анкерисање. Исто тако, постоји повећана могућност повреде оператера због монтирања ногара на под производне хале. Такође, цена оваког манипулатора би била већа због његових габарита односно већег броја елемената.

Концепција 2:

Изглед ове концепције приказан је на слици 2.6. Овакав манипулатор има мању стабилност од претходног, пре свега због дупло мањег броја ногара али има и могућност мањег пригушења вибрација, због смањеног броја ногара. Као и код претходне конструкције, јавља се потреба анкерисања за под.



Слика 2.6 – Изглед концепције 2

Предности ове концепције су у мањим габаритима и у томе што овакав манипулатор заузима само једну страну кад се намонтира поред машине за бризгање пластике. То значи да је друга страна безбедна за прилажење оператера. Ипак, уколико се деси отказ на бризгаљци, страна на којој је намонтиран манипулатор има мање простора за сервисере уколико се ради о отказу који тражи већи простор за сервис. Сигурно је да, цена оваког манипулатора треба да буде мања од цене претходног манипулатора због броја елемената који се уграђују у њега као и због мањих габарита.

Концепција 3:

Оваква концепција манипулатора представља најчешћи облик манипулатора код савремених произвођача за рад са деловима из бризгалке (Слика 2.7).



Слика 2.7 – Изглед манипулатора произвођача *Campetella* (лево) и *Sytrama* (десно)

Ови манипулатори имају најмање габаритне мере од свих до сад наведених и монтирају се на саму бризгалку, изнад калупа. Такође имају могућност монтирања са стране, као и претходна концепција. Имају најмање елемената што значи да представљају најповољнију концепцију до сад. Не заузимају простор око бризгалке што значи да уколико дође до отказа, сервисери могу да приђу са свих страна и не губи се простор у производној хали. Такође, нема потребе за анкерисањем односно бушењем пода. Ипак, од свих до сад концепција ова има најмању стабилност и могућност пригушења вибрација. Пригушење се може остварити помоћу додатних елемената. Потребно је наћи место на бризгаљци где ће се везати манипулатор. Ово није толики проблем имајући у виду чињеницу да се на већем броју бризгалки може наћи место за везу. Такође, јавља се потреба за коришћењем крана или неке друге дизалице, пошто се овакав манипулатор монтира на поду, а затим се краном или физичком снагом подиже на бризгалку где се касније везује за бризгалку.

После анализирања свих концепција и уочавања њихових предности и мана долази се до закључка да је најбоље узети концепцију 3. Главни разлог јесте његова цена, која је најнижа од све три концепције и због тога представља најреалније решење за реализацију. Цена са собом не доноси неке рестрикције у погледу саме конструкције, тако да ова концепција може да испуни све претходно одређене захтеве.

Овакав манипулатор чине: рам, три линеарне јединице као и елементи и делови за везу. Једна линеарна јединица треба да буде директно везана за рам док друге две се везују једна на другу. Пошто склоп треба да буде монтажно/демонтажан везивање се остварује преко завртањских веза. Услов је и да склоп буде што лакши пошто оваква концепција се везује за бризгаљку. Мора се водити рачуна да се бризгаљка не оптерети и да не дође до деформација неких делова бризгаљке. Стога, линеарне јединице се узимају што лакше а остали елементи се израђују, у што већој мери, од алуминијума или полимера. Габаритне мере манипулатора не смеју да буду веће од наведених у техничком задатку. Потребни ходови линеарних јединица треба да имају следеће вредности: Z-оса 2000 mm, X-оса 900 mm, Y-оса 500 mm. Ови ходови омогућавају манипулатору рад на што већем броју бризгаљки и тако га чине универзалнијим.

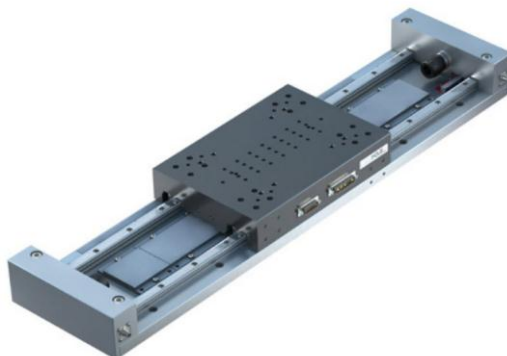
Самостална производња линеарних јединица за манипулатор је беспотребна и сувишна јер се јавља економска неисплативост. Потребно је присвојити технологије производње линеарних јединица као и по производњи их тестирати и анализирати. Фирме које већ производе линеарне јединице нуде широк дијапазон модела и имају развијену технологију и тестиране производе. Стога, линеарне јединице се купују од њих по сопственом избору. Облику и димензијама линеарних јединица се прилагођавају облици и димензије рама као и делови и елементи за везу.

4.3 Линеарне јединице

Избор линеарних јединица спада у једну од фаза формирања конструкције али се у фази конципирања конструкције раде истраживања о линеарним јединицама. Потребно је наћи линеарну јединицу која ће задовољити претходно постављене захтеве у погледу носивости, прецизности као и економске аспекте. У оваквим околностима користила су се два типа конвенционалних метода, који имају за циљ генерисање нових и побољшање постојећих решења као и за добијање великог броја техничких информација. Те методе су: проучавање литературе и анализа већ постојећих техничких решења [3]. После примењивања ова два типа конвенционалних метода дошло се до следећих сазнања:

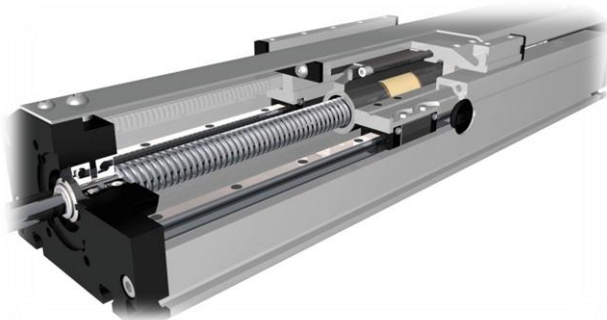
Постоје више типова линеарних јединица. Свака линеарна јединица има за функцију да оствари линеарно кретање док се механизам њиховог деловања разликује. Типови линеарних јединица су:

- *Линеарни мотори* раде на принципу шине (статора) и платформе за везу (ротора). Имају могућност хода до 4000 mm и прецизност позиционирања ± 4 mm. Изглед оваквих линеарних мотора приказан је на слици 2.



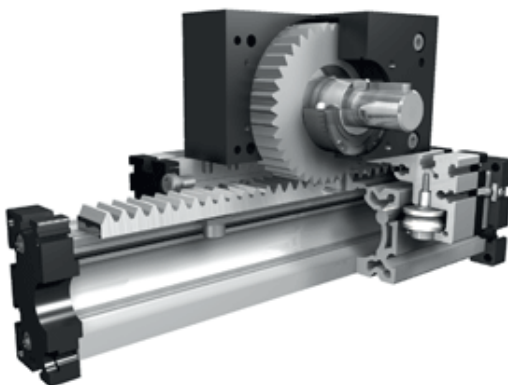
Слика 2 – Изглед линеарног мотора

- *Линеарне јединице на навојно вретено*, користе се када прецизност позиционирања треба да буде мања од 0,1 mm и када се захтева мања брзина кретања. Овај тип линеарних јединица може да пренесе велика оптерећења и њихов изглед је приказан на слици 2.1.



Слика 2.1 – Изглед линеарне јединице са навојним вretenом

- *Линеарне јединице са зупчастом летвом*, користе се када треба досећи велике дужине кретања. Њихов изглед и механизам су приказани на слици 2.2.



Слика 2.2 – Изглед и механизам линеарне јединице са зупчастом летвом

- *Линеарне јединице које раде преко ланца и ланчаника, се користе најчешће за дизање терета, у вертикалној равни, и када систем ради у тешким условима рада, при повишеној температури.*
- *Линеарне јединице које раде преко каиша и каишника, се користе када је потребан брз и бешуман рад. Максимални ход им је од 6 до 7 m [4]. Изглед овог типа линеарних јединица приказан је на слици 2.3.*



Слика 2.3 - Изглед линеарне јединице која ради преко каиша и каишника

- *Пнеуматски цилиндри без клипњаче, представљају често коришћен вид линеарног погона код манипулатора. Имају велику тачност позиционирања и ходове до 3 m [5]. Изглед пнеуматског цилиндра приказан је на слици 2.4.*



Слика 2.4 – Изглед пнеуматског цилиндра без клипњаче

После ових сазнања дошло се до закључка да за конкретни линеарни погон манипулатора, који ће радити са деловима добијеним из бризгаљки, треба одабрати или линеарне јединице са каишем или пнеуматске цилиндри без клипњаче.

Следећи корак јесте истраживање произвођача ових типова линеарних јединица, како би се добиле неопходне информације за коначан избор линеарних јединица. Ово представља широку претрагу тржишта линеарних јединица и анализу цене и квалитета. Пошто се линеарне јединице производе углавном у иностранству, а на тржишту Србије су заступљени добављачи, потребно је налазити и усмене препоруке о линеарним јединицама. Истраживати које фирме, у непосредној средини, су већ имале искуства са оваквим системима и усменим путем доћи до корисних информација. На основу ових информација сужава се избор произвођача, као и типа линеарне јединице, и може се кренути са налажењем њихових каталога и интернет страница у којима се налазе типови линеарних јединица и њихове спецификације. Даље, се селектира, на основу нађених спецификација, линеарна јединица која највише одговара конкретном манипулатору. После добијених потребних информација, дошло се до закључка да је за конкретни манипулатор најбоље одабрати линеарне јединице са каишем. Разлог је што овај тип линеарних јединица испуњава све услове из листе захтева а са економске стране далеко је исплативији од пнеуматских цилиндара без клипњаче. На слици 2.3 приказан је изглед одабраног типа линеарне јединице.

5. Формирање конструкције манипулатора

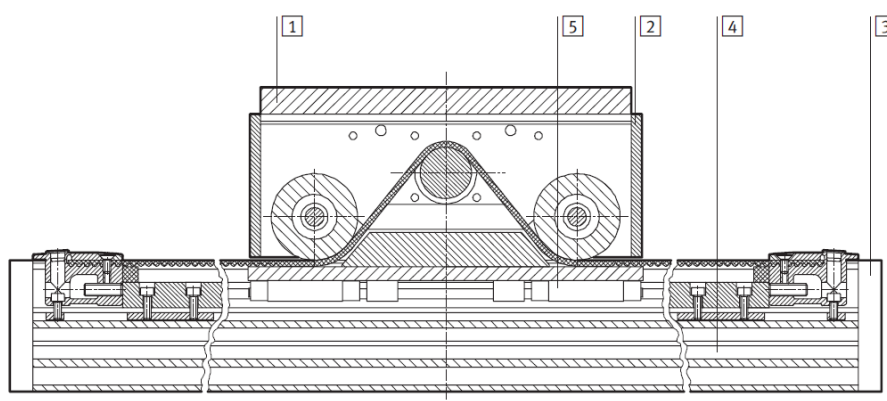
Фаза формирања конструкције обухвата избор распореда, облика и димензија делова и склопова на основу изабране концепције. Извршава се кроз два корака, формирањем прелиминарног и дефинитивног пројекта. Обично се ради више варијанти прелиминарног пројекта да би се добиле информације о предностима и недостацима појединих варијанти [3].

5.1 Избор линеарних јединица

На почетку овог процеса битно је одабрати произвођача линеарних јединица. Манипулатор мора да има три степена слободе тј. три транслације, због тога треба одабрати таквог произвођача који има велику понуду линеарних јединица. Произвођач треба да има што повољније производе као и да су ти производи реномирани, познати и признати у машинству. Произвођач треба да има мрежу дистрибутера у Србији јер то гарантује нижу цену производа. Дакле, пошто манипулатор треба да има три линеарне јединице, због три транслације које треба да поседује, битно је наћи таквог произвођача који може уз своје производе да понуди и одговарајуће каталоге и прорачуне како би се конструисао сигуран и поуздан манипулатор. После опсежних анализа дошло се до закључка да су производи компаније *Festo* најпогоднији за уградњу у манипулатор. У њиховој понуди поред линеарних јединица могу се наћи и електромотори који погоне линеарне јединице као и сви потребни сензори, пригушивачи, вакуум хватаљке и др. Линеарне јединице се прорачунавају свака посебно, пошто свака треба да пренесе различиту вредност оптерећења. Као што се са слике 2.7 може видети, главна линеарна јединица (линеарна јединица у Z оси) мора да носи остале две линеарне јединице као и терет, стога треба да пренесе највеће оптерећење. Следећа линеарна јединица је она која делује по X оси, и она треба да преноси оптерећење од линеарне јединице у Y оси као и оптерећење самог терета који се преноси. Ово доводи до закључка да прво треба почети са прорачуном и одабиром линеарне јединице у Y оси, па затим линеарне јединице у X оси, и на крају треба да се прорачуна и одабере линеарна јединица у Z оси.

5.1.1 Линеарна јединица у Y оси

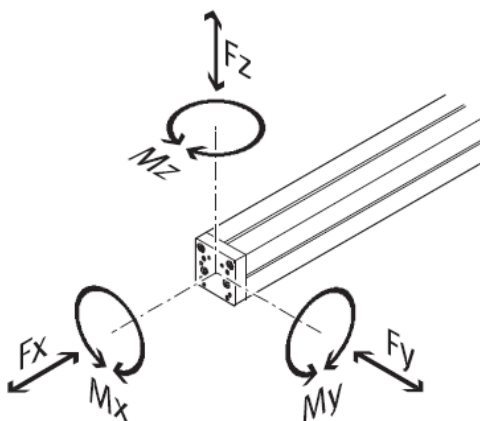
Полази се од прорачуна и одабира ове линеарне јединице. Линеарна јединица у Y оси треба да преноси оптерећење од терета тј. дела који излази из бризгаљке, мора да има ход од 500 mm и треба да ради у вертикалној равни. Проблем линеарних јединица са каишем јесте рад у вертикалној равни. Може да се јави прескакање каиша преко каишника. Стога, бира се линеарна јединица која је намењена за рад у вертикалној равни. Овај модел има ознаку DGEA и његов пресек представљен је на слици 3 [6].



Слика 3 – Пресек модела DGEA

На слици 3 бројевима су обележени следећи елементи: 1 – Интерфејс клизача, 2 – Клизач, 3 – Капица профила, 4 – Алуминијумски профил, 5 – Вођица.

Овај модел у себи има један шетајући каишник који је у директној вези са електромотором, и креће се заједно са електромотором по јединици. Силе које делују на линеарну јединицу приказане су на слици 3.1.



Слика 3.1 – Приказ деловања сила и момената на линеарну јединицу

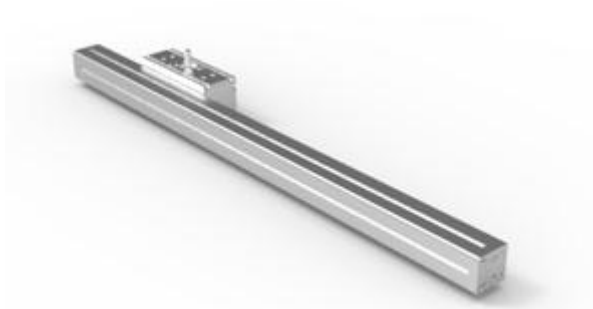
Прелиминарни прорачун:

На ову линеарну јединицу делује само тежина терета и механизам који носи терет. Терет не сме бити већи од 5 kg. Стога прорачун се ради на следећи начин:

$$\begin{aligned}F_t &= m_t \cdot g = 5 \cdot 9,81 = 49,05 \text{ N} \\F_{m.t.} &= m_{m.t.} \cdot g = 1,5 \cdot 9,81 = 14,715 \text{ N} \\F_x &= F_t + F_{m.t.} = 63,765 \text{ N} \\F_{xmax} &= 150 \text{ N} \\F_x &< F_{xman} \\63,765 \text{ N} &< 150 \text{ N}\end{aligned}$$

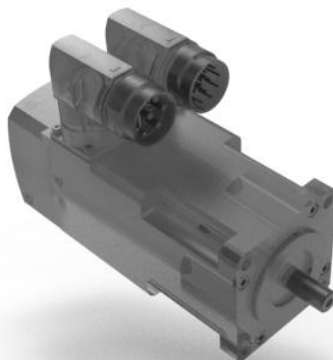
Где су: F_t – Сила услед масе терета; F_x – Сума сила које делују у оси; $F_{m.t.}$ – сила услед масе механизма терета; F_{xmax} – Максимална дозвољена сила у оси (дата од стране произвођача).

Усваја се линеарна јединица следеће ознаке: DGEA-25-500-ZR-WV-KV. Изглед CAD модела линеарне јединице, који је преузет са сајта Festo-a приказан је на слици 3.2.



Слика 3.2 - Изглед CAD модела линеарне јединице DGEA

Габаритне мере усвојене линеарне јединице су 987 x 83 x 128 mm. Максимална тежина коју ова линеарна јединица може да пренесе је 18 kg. Максимална брзина износи $3 \frac{m}{s}$. Пошто ова линеарна јединица ради у вертикалној равни, нема прорачуна на угиб. Електромотор се усваја према препоруци произвођача линеарних јединица. Усвојен је сервомотор ознаке EMMS-AS-55-S-HS-RRB. Изглед CAD модела је приказан на слици 3.3. Модел је такође преузет са сајта Festo-a.

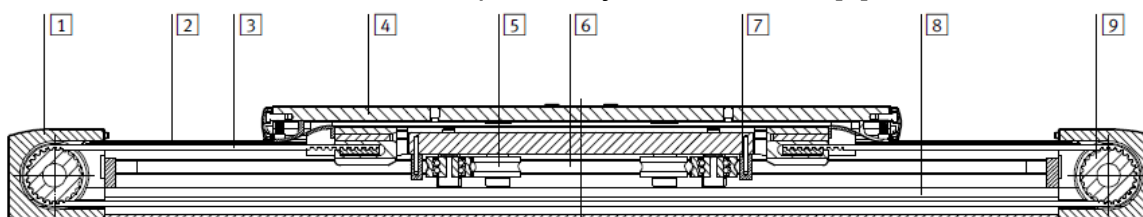


Слика 3.3 – Изглед електромотора

Сходно одабраном електромотору треба да се одабере и одговарајућа спојница. Према препоруци произвођача одабрана је спојница следеће ознаке EAMM-A-F32-60G. Његов CAD модел је такође преузет са сајта *Festo-a*.

5.1.2 Линеарна јединица у X оси

После одабира линеарне јединице у Y оси, прелази се на усвајање линеарне јединице у X оси. Ова линеарна јединица треба да пренесе тежину претходне линеарне јединице и тежину терета. Из широког дијапазона *Festo* линеарних јединица одабран је тип линеарне јединице ELGA. Попречни пресек са свим саставним елементима приказан је на слици 3.4 [6].



Слика 3.4 – Попречни пресек ELGA линеарне јединице

На слици 3.4 бројевима су обележени следећи елементи: 1 – Кућиште за каишник, 2 – Заштитна трака, 3 – Каиш, 4 – Клизач, 5 – Точкић, 6 – Вођица, 7 – Манжетна, 8 – Алуминијумски профил, 9 - Каишник

Овај тип линеарних јединица има прецизност од $\pm 0,8$ mm, достиже велике вредности брзине и убрзања. Ово је јако битан податак у избору линеарне јединице за ову осу будући да ова линеарна јединица треба да позиционира претходну линеарну јединицу у њен положај за рад, затим треба да направи мали ход како би померила исту ту линеарну јединицу у циљу хватања дела из бризгальке. Ово доводи до закључка да, уколико се жели брз

циклус манипулатора, ова линеарна јединица треба да има највећу брзину и тачност позиционирања.

Прелиминарни прорачун:

$$\begin{aligned}
 F_t &= 49,05 \text{ N} \\
 F_{l.j.y} &= m_{l.j.y} \cdot g = 7,25 \cdot 9,81 = 71,1225 \text{ N} \\
 F_{m.t.} &= m_{m.t.} \cdot g = 1,5 \cdot 9,81 = 14,715 \text{ N} \\
 F_z &= F_t + F_{l.j.y} + F_{m.t.} = 49,05 + 71,1225 + 14,715 = 134,89 \text{ N} \\
 F_z &< F_{zmax} \\
 134,89 \text{ N} &< 400 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Где су: $F_{l.j.y}$ – Сила услед масе линеарне јединице; F_z – Сума сила које делују у оси; F_{zmax} – Максимална дозвољена сила у оси (дата од стране произвођача).

Усваја се линеарна јединица следеће ознаке: ELGA-TB-RF-70-900-40H. Ова линеарна јединица представља најмањи тип модела из ове серије линеарних јединица. CAD модел усвојене линеарне јединице је преузет са сајта Festo-а и приказан је на слици 3.5.



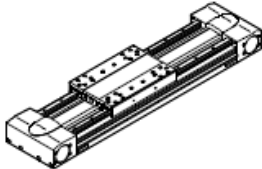
Слика 3.5 - CAD модел усвојене линеарне јединице

Усвојена линеарна јединица има ход од 900 mm. Међутим, њен радни ход биће 800 mm. Линеарна јединица има блокаду на 100 mm до краја, са стране где је електромотор, ово је иначе могућност која се може наручити од произвођача. Разлог одабира овакве особине линеарне јединице биће објашњен у даљем раду. За усвојену линеарну јединицу, према препоруци произвођача, усваја се електромотор следеће ознаке: EMMS-AS-70-S-SV-RMB. За одговарајући електромотор усваја се спојница, према препоруци произвођача, следеће ознаке: EAMM-A-N38-70A. Габаритне мере усвојене линеарне јединице су 1400 x 69 x 50 mm. Максимална брзина износи $5 \frac{m}{s}$. Да би

се достигла ова брзина кретања потребно је да електромотор има број обртаја од 3500 min^{-1} , што усвојен електромотор може да оствари

5.1.3 Линеарна јединица у Z оси

После усвајања линеарних јединица у Y и X оси, може се приступити усвајању линеарне јединице у Z оси. Као што се у претходном тексту споменуло, ова линеарна јединица може слободно да се назове и главна линеарна јединица јер је највише оптерећена, има највећи ход и представља везу рама и остатка манипулатора. Прво се из каталога произвођача бира модел линеарне јединице са каишем [6]. Поред сваког модела представљени су параметри битни за избор линеарне јединице (Слика 3.6).

	F_x [N]	v [m/s]	M_x [Nm]	M_y [Nm]	M_z [Nm]
EGC-HD-TB					
	450	3	140	275	275
	1000	5	300	500	500
	1800	5	900	1450	1450

Слика 3.6 – Вредности модела линеарне јединице

Три реда вредности представљају три серије овог модела које произвођач има у понуди. То су серија 125, 160 и 220.

Прелиминарни прорачун:

$$\begin{aligned}
 F_t &= 49,05 \text{ N} \\
 F_{l.j.y} &= m_{l.j.y} \cdot g = 7,25 \cdot 9,81 = 71,1225 \text{ N} \\
 F_{l.j.x} &= m_{l.j.x} \cdot g = 6 \cdot 9,81 = 58,86 \text{ N} \\
 F_{m.t.} &= m_{m.t.} \cdot g = 1,5 \cdot 9,81 = 14,715 \text{ N} \\
 F_z &= F_t + F_{l.j.x} + F_{l.j.y} + F_{m.t.} = 49,05 + 71,1225 + 58,86 + 14,715 = 193,7475 \text{ N} \\
 F_z &< F_{zmax} \\
 193,7475 \text{ N} &< 560 \text{ N}
 \end{aligned}$$

На ову линеарну јединицу делује још и момент услед тежина претходне две линеарне јединице и терета.

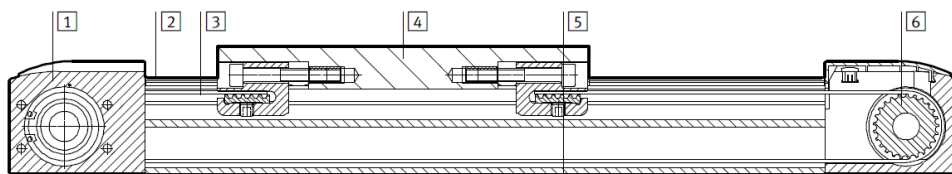
$$\begin{aligned}
 M_x &= F_{l.j.y} \cdot 0,9 + F_{l.j.x} \cdot 0,45 + F_t \cdot 0,45 = 71,1225 \cdot 0,9 + 58,86 \cdot 0,45 + 49,05 \cdot 0,45 \\
 M_x &= 64,01 + 26,49 + 22,07 \\
 M_x &= 112,6 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

$$M_x < M_{x\max}$$

$$112,6 \text{ Nm} < 300 \text{ Nm}$$

Где су: $F_{l.j.x}$, $F_{l.j.y}$ – Силе услед маса линеарних јединица; F_z – Сума сила које делују у оси; $F_{z\max}$ – Максимална дозвољена сила у оси (дата од стране произвођача); M_x – Момент који се јавља у оси; $M_{x\max}$ – Максимални дозвољени момент у оси (дат од стране произвођача).

После успешно обављеног прорачуна, дошло се до закључка да се за линеарну јединицу у Z оси треба усвојити линеарна јединица ознаке EGC-HD-TV серије 160. Тачна ознака усвојене линеарне јединице гласи: EGC-HD-160-2000-TV-0H-GK. Усвојена линеарна јединица има ход од 2000 mm. Пресек линеарне јединице са њеним компонентама приказан је на слици 3.7, док је CAD модел приказан на слици 3.8. Модел је преузет са сајта Festo-a.



Слика 3.7 – Попречни пресек EGC-HD-TV линеарне јединице

На слици 3.7 бројевима су приказани следећи елементи: 1 – Кућиште за каишник, 2 – Вођица, 3 – Каиш, 4 – Клизач, 5 – Алуминијумски профил, 6 – Каишник.



Слика 3.8 - CAD модел усвојене линеарне јединице

За усвојену линеарну јединицу, према препоруци произвођача, усваја се и одговарајући погон. Усваја се електромотор ознаке: EMMS-AS-70-S-HS-RMB, и спојница ознаке: EAMM-A-M48-80G. Усвојени електромотор спада у серво моторе. Серво мотор у себи има сензор положаја и у повратној спрези самог мотора јавља се логика управљања. Све до сад одабране јединице имају у избору произвођача и неколико типова елемената за везу. При избору сваке јединице одабрани су елементи за везу линеарних јединица, као и сензори положаја који су неопходни за рад манипулатора. Елементи за везу и сензори

положаја биће детаљније описани у даљем раду. Након усвајања линеарних јединица, може се приступити моделирању осталих елемената манипулатора као и презентовање начина њихове уградње у манипулатор.

5.2 Формирање подсклопова

После усвајања свих линеарних јединица може се почети са фазом формирања подсклопова манипулатора. Конкретан манипулатор је подељен на три подсклопа. Подсклопови манипулатора се најбоље формирају по осам. Сваки подсклоп има функцију обављања транслагације по одређеној оси, и због тога формирана су три подсклопа. У даљем раду биће објашњен сваки подсклоп појединачно.

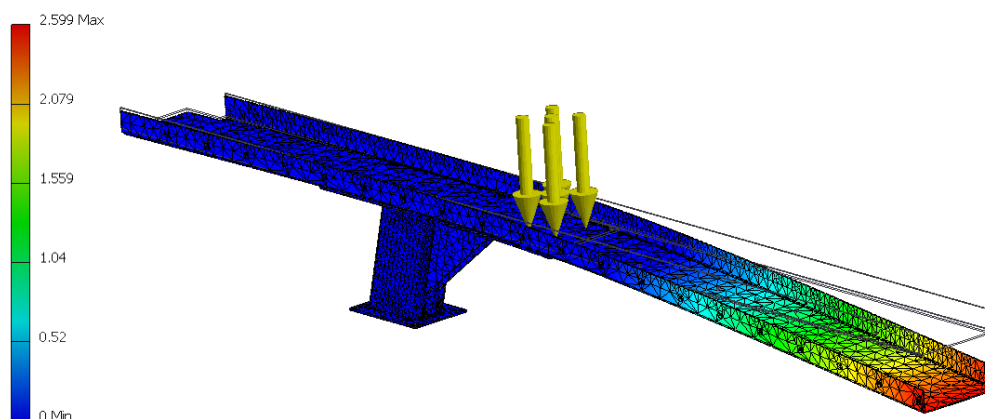
5.2.1 Подсклоп Z осе

Подсклоп Z осе представља ослонац целе конструкције. У овај подсклоп улазе линеарни погон и рам. Линеарни погон чине линеарна јединица и електромотор. Рам представља стуб конструкције. Треба се пројектовати тако да може да пренесе оптерећења остатка конструкције и оптерећење терета. Стога, урађене су потребне статичке анализе на раму како би се дошло до потврде његове стабилности. На слици 3.9 може се видети изглед рама.



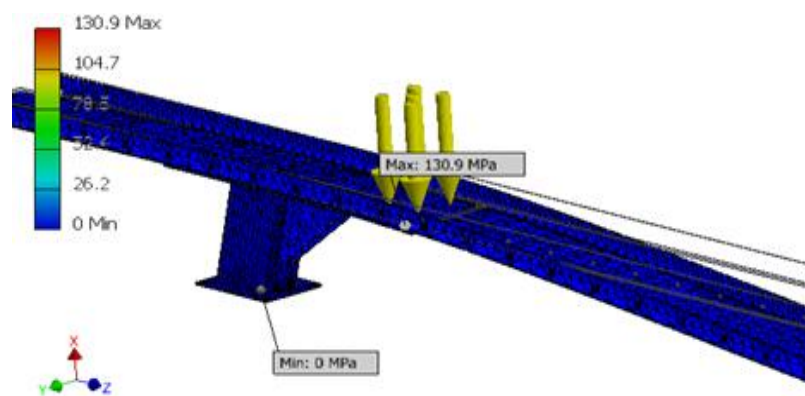
Слика 3.9 – Изглед рама

Рам се састоји од стандардних профила 100x50x50 mm, L=2432 mm. 180x40x4, L=300 mm. Такође, ту су ребра, стопица и плоча за везу. Стопица служи за везу са брызгалком а плоча спаја два стандардна профила. Због велике дужине првог стандардног профила може се јавити савијање условљено тежином линеарног погона за Z осу и тежином осталих подсклопова. Стога, урађена је анализа рама, тј. овог профила на савијање. Конструктивно је усвојено да деформација овог профила не треба да прелази 20 mm. На слици 3.10 приказане су максималне вредности деформација на раму.



Слика 3.10 – Вредности деформација на раму

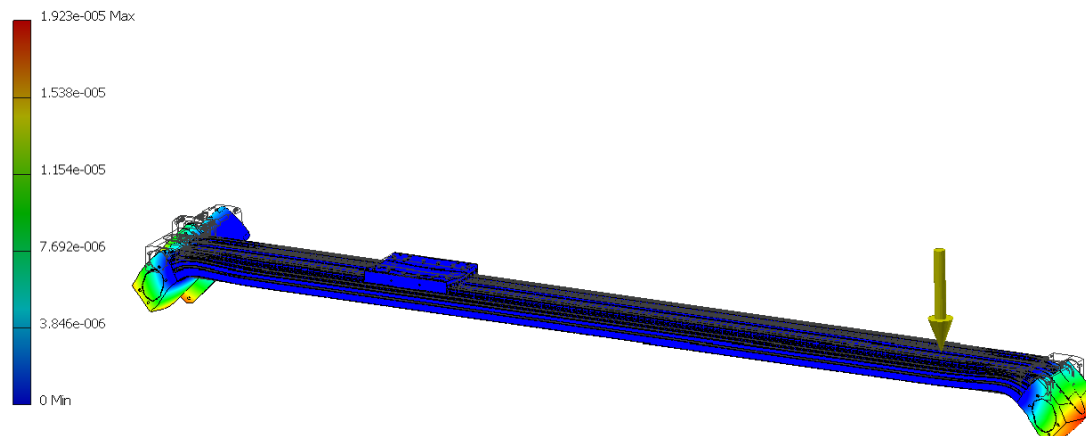
Анализа је рађена у оквиру модула статичке анализе при софтверском пакету *Autodesk Inventor*. Анализа се базира на методи најмањих квадрата. Прво се део, који је предмет анализе, подели на више сегмената и онда се утицај задатих оптерећења испитује на тим сегментима. Са слике 3.10 може се видети да се максимална вредност деформације на раму налази на предвиђеном месту, тј. на крају стандардног профила JIS 100x50x50 mm, и она износи 2,599 mm. Ова вредност је скоро осам пута мања од вредности која може да угрози рад манипулатора тако да се овом анализом потврђује стабилност и поузданост рама. На слици 3.11 приказане су вредности Вон Мизесових (*Von Mises*) напона које се јављају на раму. Вон Мизесови напони су показатељ исправности конструкције, и на основу њега може се закључити да ли ће се на конструкцији јавити лом материјала.



Слика 3.11 – Вредности Вон Мизесових напона

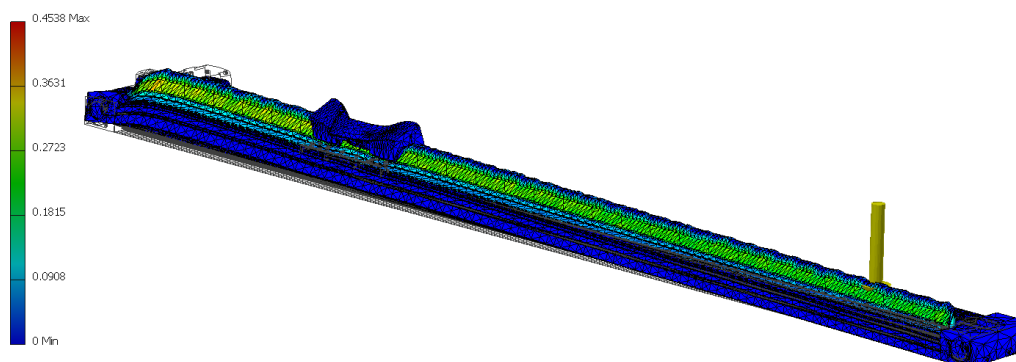
Затезна чврстоћа за конструкциони челик S235JRG2, који се користи у изради рама, је од 370-450 MPa [7]. Са слике 3.11 се може видети да је максимална вредност Вон Мизесових напона 130,9 MPa, што доводи до закључка да су вредности напона мање него дозвољене, те да на конструкцији рама неће доћи до лома материјала.

Пошто на рам належе линеарна јединица која је крута, она такође преноси оптерећење од остатка манипулатора и зато се сада треба уради анализа линеарне јединице, како би се добиле тачне вредности деформација подскопа у Z осе. Вредности су приказане на слици 3.12.



Слика 3.12 – Вредности деформација на линеарној јединици

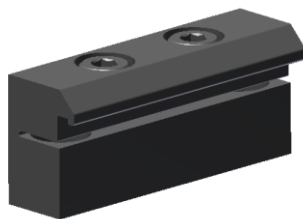
Вредности деформација су у односу на вредности деформација на раму знатно мање, тако да се може доћи до закључка да вредности деформација у подскопу Z осе неће прећи 1 mm. До закључка се дошло на основу сагледаних вредности деформација на раму и на линеарној јединици. На слици 3.13 презентоване су вредности Вон Мизесових напона.



Слика 3.13 – Вредности Вон Мизесових напона

Са слике 3.13 могу се видети вредности Вон Мизесових напона које су знатно мање од затезне чврстоће која је код алуминијума, од кога је израђена линеарна јединица, између 90-180 МПа. Што доводи до закључка да се на линеарној јединици неће јавити лом материјала. Пошто је анализа дала задовољавајуће информације о поузданости рама, на рам се могу монтирати линеарни погон и још један профил (са стране) који служи за позиционирање носача каблова. Везе између ових делова су остварене завртањским везама, како би склоп био монтажано/демонтажан. За фиксирање линеарног погона на

рам користи се елемент за везу, произвођача *Festo*, ознаке: MUE-70-80. Елемент је приказан на слици 3.14.



Слика 3.14 – Елемент за везу

Елемент за везу се монтира тако што се прво постави у одговарајући жљеб на линеарној јединици а затим завртањским везама веже, са доње стране, за рам. Исти елемент се налази са друге стране и на тај начин је линеарна јединица фиксирана за рам. Оваквих елемената за везу има четири, два са једне стране и два са друге стране јединице. Изглед подсклопа Z осе приказан је на слици 3.15.



Слика 3.15 – Подсклоп Z осе

Са слике 3.15 се може видети и профил који је намењен за носач каблова. На овом профилу лежи највећи носач каблова на целом манипулатору јер кроз њега пролазе сви каблови неопходни за рад целог манипулатора, осим каблова за погон Z осе. Носач каблова је широк 94 mm и представља велики економски издатак али је потребан за поуздан рад манипулатора. Носаче каблова имају и остали подсклопови али ће о њима бити више речи у даљем раду. Подсклоп још има монтиране додатне вођице са друге стране стандардног профила 100x50x50 mm и има намену да додатно стабилизује конструкцију. Вођица је везана са подсклопом X осе одговарајућим нестандартним делом. На линеарну јединицу могуће је додати елементе за абсорпцију. Ови елементи помажу пригушењу вибрација које могу настати на крају хода. Према препоруци произвођача усвојен је елемент ознаке: YSRW-12-20.

За даље монтирање на овај подсклоп, користи се клизач који се налази на линеарној јединици. Клизач у себи има отворе који су се искористили за везу са следећим подсклопом. Тако се подсклопови крећу заједно са клизачем.

5.2.2 Подсклоп X осе

Следеће транслаторно кретање које треба да оствари манипулатор јесте кретање по X осе. Да би се остварило кретање по X осе потребно је формирати подсклоп ове осе. Овај подсклоп треба да пренесе наредни подсклоп и терет. Подсклоп X осе је једноставнији у односу на подсклоп Z осе јер га чине: плоча за везу, линеарна јединица, електромотор, кућиште и помоћни клизач. Плоча за везу има димензије 400x280x10 mm и има на себи отворе, како би се завртањским везама монтирала на клизач Z осе. Плоча такође има отворе за монтирање линеарне јединице, помоћног клизача и кућишта. Важно је напоменути да се кућиште монтира у крајњој фази склапања манипулатора. На слици 3.16 приказан је изглед подсклопа X осе.

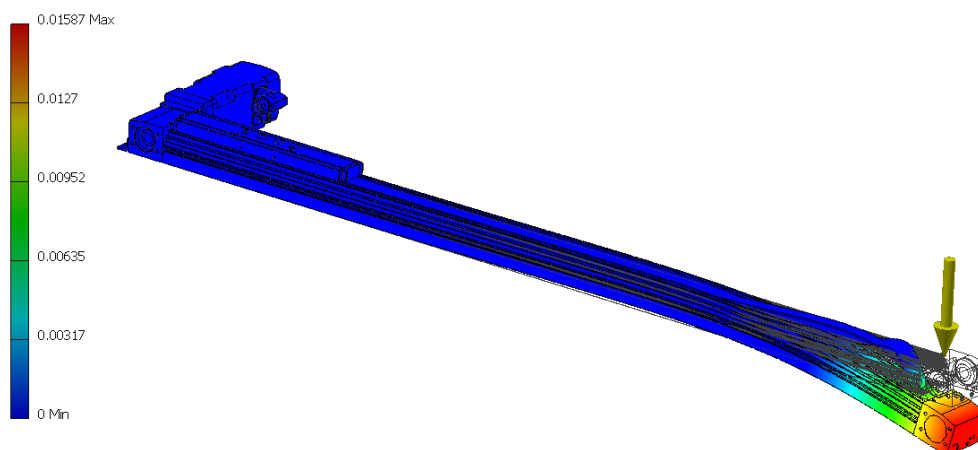


Слика 3.16 – Подсклоп X осе

Линеарна јединица се везује за плочу са истим елементима за везу као и код претходне линеарне јединице (слика 3.14) и уз помоћ угаоне везе ознаке HPE-70 која је препоручена од стране произвођача. Помоћни клизач се монтира помоћу два L профила који се завртњевима везују за профил клизача и плочу. Приликом конструисања овог подсклопа водило се рачуна о поједностављењу конструкције. Подсклоп X осе има сложеније кретање од свих осталих подсклопова у конструкцији. Полази се од тога да претходни подсклоп треба да позиционира подсклоп X осе у жељени положај, тад може да се почне са радом овог подсклопа који има следећу функцију. Полази се са позиционирањем подсклопа Y осе у жељени положај, ово се остварује помоћу сензора положаја о којима ће бити више речи у даљем раду. Затим, када подсклоп Y осе крене у обављање своје функције, подсклоп X осе треба да оствари кратак ход који ће хватаљке подсклопа Y осе приближити делу и помоћу вакуума га преузети. Да би се овај кратак ход од пар милиметара

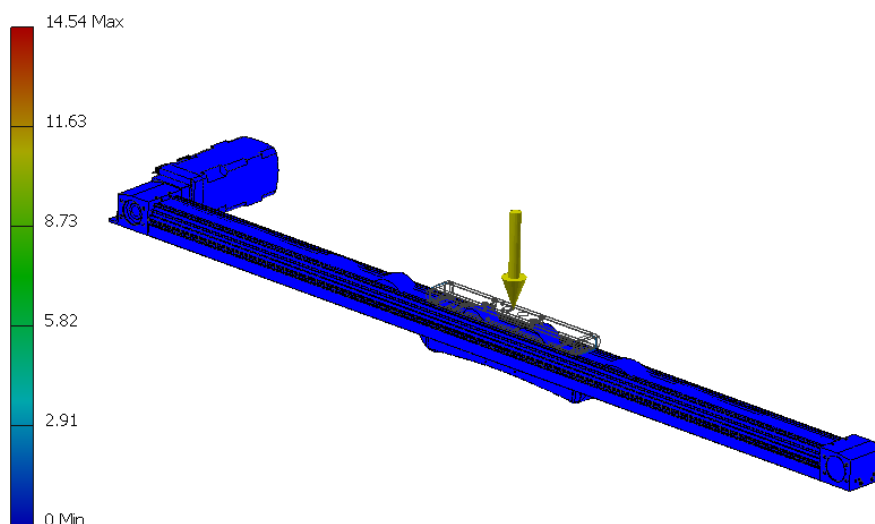
остварио, нису потребни сензори положаја већ се ово кретање решава софтверски.

Потребно је анализирати линеарну јединицу, како би се утврдиле вредности деформација услед терета који преноси. Пошто је намонтиран помоћни клизач, линеарна јединица преноси половину од укупног оптерећења. На слици 3.17 приказане су вредности деформација на линеарној јединици.



Слика 3.17 – Вредности деформација на линеарној јединици

Са слике 3.17 могу се видети вредности деформација и може се закључити да се ради о малим вредностима деформација, које не могу да доведу до сметњи у раду манипулатора. На слици 3.18 приказане су вредности Вон Мизесових напона.



Слика 3.17 – Вредности Вон Мизесових напона

5.3.3 Подсклоп Y осе

Овај подсклоп представља последњи подсклоп код манипулатора. Има за улогу да прихвати део или делове из калупа бризгаљке и транспортује у даљи ток производње. Такође, уколико деловима није потребна даља обрада, може да пакује делове један на други. Погон подскопа чини електромотор и линеарна јединица Y осе, о којој је било речи у овом раду. Ова линеарна јединица се разликује од претходне две по томе, што електромотор прати клизач, у претходна два случаја електромотор има фиксни положај. Изглед подскопа Y осе приказан је на слици 3.19.



Слика 3.19 – Подсклоп Y осе

Подсклоп чине: линеарна јединица, електромотор, стандардни профил JIS 50x25x10 mm (L=500 mm) и ротациони механизам. Профил се завртањским везама монтира на клизач линеарне јединице а на његовом другом крају налази се ротациони механизам. Профил има отворе кроз које пролазе завртањске везе и улазе у рупе линеарне јединице. Битно је обезбедити паралелност између профила и линеарне јединице, јер свако одступање од паралелности може довести до проблема приликом хватања делова из машине за бризгање пластике. Ротациони механизам је приказан на слици 3.20.

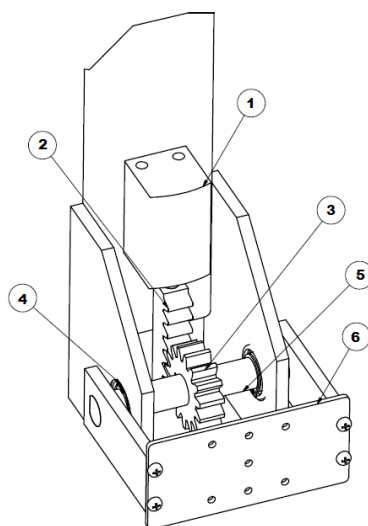
Ротациони механизам треба да обавља ротацију од 90°. Састоји се од пнеуматског цилиндра, зупчасте летве, зупчаника, улежиштења и плоче. Пнеуматски цилиндар има врло мали ход од 25 mm, и директно је везан са зупчастом летвом која је у спрези са зупчаником. Када цилиндар одради кретање то проузрукује обртање зупчаника за 90°. Зупчаник се налази на

вратилу које се обрће заједно са зупчаником и то вратило ротира плочу. Плоча на себи има избушене отворе како би се на њу касније монтирале хваталке.



Слика 3.20 – Ротациони механизам

Ротациони механизам има ману у типу погона, јер је у питању пнеуматика која до сад није нигде коришћена у конструкцији. Првобитно решење је било да се постави актуатор, уместо пнеуматског цилиндра. Ипак, актуатори које нуди произвођач *Festo* имају велике габарите и масу, стога није пожељна њихова примена имајући у виду да овај механизам долази између калупа бризгалки. Пнеуматски цилиндар је узет из каталога произвођача *Festo*-а и има ознаку: ADVC-16-25-A-P. CAD модел је преузет са сајта *Festo*-а. Сви делови механизма су приказани на слици 3.21.



Слика 3.21 – Ротациони механизам са елементима

На слици 3.17 бројевима су приказани следећи елементи: 1 – Пнеуматски цилиндар, 2 – Зупчаста летва, 3 – Зупчаник, 4 – Лежај, 5 – Вратило, 6 – Универзална глава.

Плочице у којима се налаже лежајеви су заварене за профил који је везан на линеарну јединицу. Заваривање мора бити обављено прецизно, како би угао између плочица и профила био 90°. Пнеуматски цилиндар је осигуран

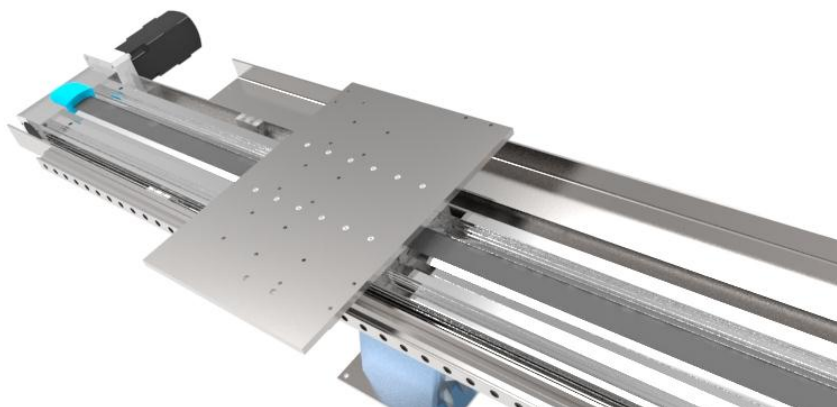
са завртањским везама које пролазе кроз профил и улазе у рупе које се налазе са задње стране пнеуматског цилиндра. Вратило је на крајевима засечено како би се могла извршити монтажа универзалне главе. Универзална глава се састоји од две бочне и једне чеоне плочице. Прво се, код монтаже, постављају бочне плочице на вратила а затим се завртањским везама монтира чеона плоча која има на себи отворе за монтажу хватаљки. Вратило, зупчаник и зупчаста летва су димензионисани помоћу *Design Accelerator-a* у *Autodesk Inventor-y* [8].

5.3 Монтажа манипулатора

Пошто су формирани сви подсклопови, може да се крене са монтажом манипулатора. У овом делу рада биће објашњен процес монтаже манипулатора. У претходном тексту је дефинисано да манипулатор мора да буде монтажно/демонтажан, овај услов дефинисао је да конструкција треба да буде са што мање заварених спојева а са што више завртањских веза. Овако пројектована конструкција омогућава лакши и економичнији транспорт, као и само монтирање које се обавља у производној хали наручиоца [9].

5.3.1 Монтажа подсклопова

Полази се од подсклопа Z осе, тј. монтирања подсклопа X осе на подсклоп Z осе. Већ је поменуто да подсклоп Z осе представља ослонац целе конструкције и зато се полази од њега. На клизач линеарне јединице у Z оси, завртањским везама се монтира плоча за везу подсклопа X осе, као на слици 3.22.



Слика 3.22 – Монтирање плоче X осе

Завртањску везу чине завртњеви ISO 7045H M5, комада 12. Који улазе у упуштене отворе како би преко неких могли да се монтирају остали елементи

из подсклопа X осе. Редослед даљег монтирања не мора бити дефинисан, може се даље монтирати или линеарни погон или помоћни клизач. Монтирање ових елемената подсклопа, и елемената за везу, су објашњени у претходним поглављима стога поступак монтирања неће бити понављан. На крају се монтира плоча за вођицу (која се налази на раму), помоћу одговарајућег елемента и на тај начин манипулатор добија стабилније кретање са мање вибрација. На слици 3.23 може се видети изглед монтираног манипулатора са подсклоповима у X и Z осе. До сада формирани склоп може да обавља две translације.



Слика 3.23 - Манипулатор са подсклоповима у X и Z осе

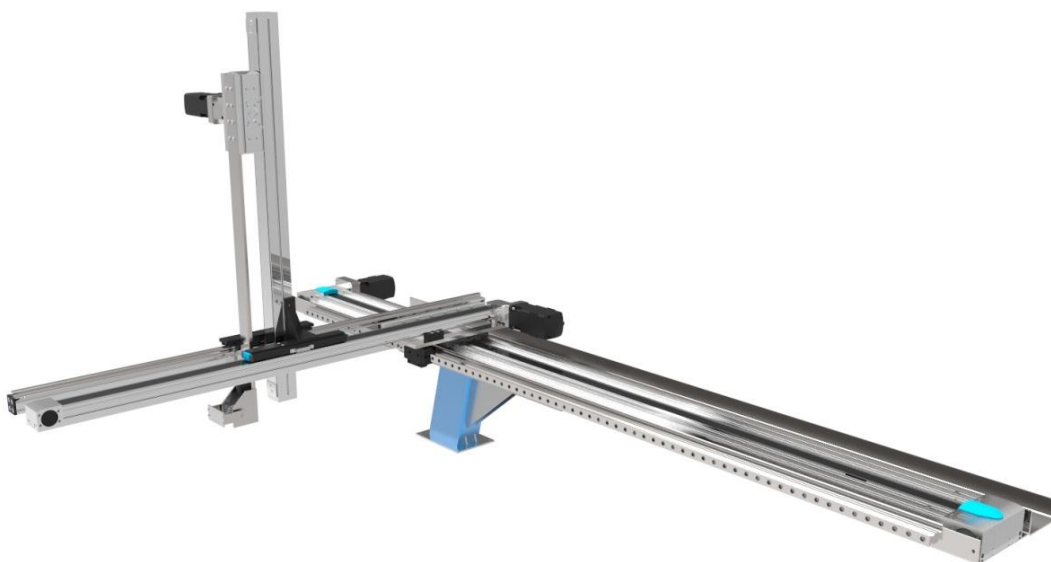
Након овога, приступа се монтирању подсклопа Y осе на подсклоп X осе. Ово се остварује помоћу елемента за везу приказаног на слици 3.24. Елемент се завртањским везама монтира на клизач линеарне јединице и на помоћни клизач. Овај елемент остварује равномерно кретање ова два клизача. Елемент је нестандартан и израђен је од композитних материјала, у циљу смањења масе конструкције и зато што на њега не делују велика оптерећења.



Слика 3.24 – Елемент за везу

Даље остаје да се на линеарној јединици Y осе избуше рупе. У те рупе улазе завртњеве који пролазе кроз елемент за везу и на тај начин се учвршћује подсклоп Y осе за манипулатор. Потпуно је безбедно бушити рупе на предвиђена места у профилу линеарне јединице будући да се тако не

доприноси ометању рада линеарне јединице. Изглед манипулатора са подсклоповима је приказан на слици 3.25. Елемент за везу се израђује стереолитографијом, јер на основу готовог тродимензионалног модела машина израђује производ. На овај начин постиже се велика тачност свих димензија, што у многоне утиче на тачност позиционирања манипулатора. Ово је скуп начин израде и има сврху само ако се израђује један комад, као што је случај у овом раду. Уколико се израђују више комада, потребно је урадити алат из којег ће се израђивати овај елемент.



Слика 3.25 – Манипулатор са подсклоповима

По монтирању свих подсклопова манипулатор полако добија задати облик (скица у техничком задатку), остаје још монтажа пратећих елемената манипулатора као што су носачи каблова, сензори, вакуум хватаљка као и инсталирање црева за вакуум и компримовани ваздух.

5.3.2 Монтажа носача каблова

Носачи каблова представљају велики економски издатак али су неопходни за нормалан рад манипулатора. Њихова примена је неизбежна и због тога пројектовала су се места за носаче каблова на манипулатору. За конкретан манипулатор неопходна су два носача каблова, при чему један мора да има веће димензије од другог. Кроз први носач каблова пролазе сви каблови на манипулатору, осим кабла за електромотор линеарне јединице у Z осе. Кроз други носач каблова пролазе каблови за електромотор линеарне јединице Y осе, за пнеуматски цилиндар, вакуум хватаљке и за аутоматизацију (каблови за сензоре). Зато се за мањи носач каблова узима други. Носачи каблова су стандардни елементи и усвојени су носачи каблова ширине 94 mm (L=2000

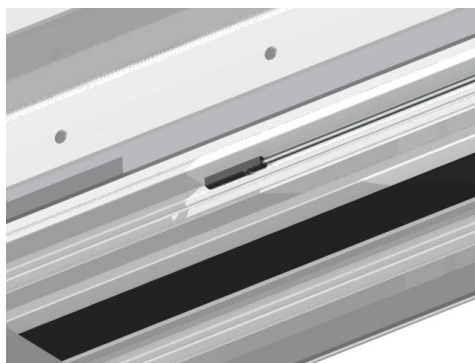
mm) и ширине 40 mm ($L=2100$ mm). Већи носач каблова се поставља у профил, поред линеарне јединице Z осе, а мањи носач каблова иде поред помоћног клизача и поред линеарне јединице у Y оси. Носачима каблова су пројектована места за везу, а веза се остварује помоћу завртњева. Изглед манипулатора са носачима каблова може се видети на слици 3.26.



Слика 3.26 – Манипулатор са носачима каблова

5.3.3 Монтажа сензора

Линеарне јединице чине екструдовани алуминијумски профили који са бочних страна имају жљебове. Иначе, у већ поменуте жљебове који се налазе са стране линеарне јединице инсталирају се сензори положаја на места која представљају почетни и крајњи положај кретања. У Z оси манипулатора сензори положаја су такође узети од *Festo*-a и имају ознаку: SIES-8M-PO-24V-K-10-M8D. Поред сензора потребна је још метална плочица, која се детектује од стране сензора положаја, и она се монтира на страну клизача завртањским везама. Монтиран сензор положаја је приказан на слици 3.27.



Слика 3.27 – Сензор положаја

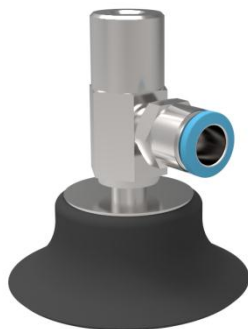
Код линеарне јединице у Х оси сензори положаја су исти као и код подсклопа у Z оси. Постављају се на исти начин као и код претходног подсклопа. Један сензор се поставља у почетну тачку хода а други се поставља не место где се ход завршава. Место постављања је жљеб који се налази са стране, тј. на бочној страни профила линеарне јединице. Поступак је исти као и код претходног подсклопа (слика 3.27).

Постављање сензора код подсклопа у Y оси је мало другачије. У претходним случајевима сензори положаја су мировали а овде се сензори крећу заједно са клизачем а мирују металне плочице које се детектују од стране сензора. Плочице се постављају у жљебове на профили линеарне јединице док се за постављање сензора користи елемент ознаке: DGEA-25-G-SIE-M8, препоручен од стране произвођача.

После постављања сензора, може се инсталирати кућиште које ће прекрити вишак каблова и дати елегантнији изглед самом манипулатору. Након тога може се приступити последњим фазама монтаже.

5.3.4 Монтажа вакуум хватаљки

Принцип рада вакуум хватаљки је јак прост. Потребно их је прислонити уз део из калупа и пустити вакуум. Гума на хватаљци омогућава дихтовање, а самим тим то омогућује да део током транспорта остане на хватаљци. Приликом пуштања дела вакуум се затвара. Вакуум хватаљке се могу такође наручити од Festo-а и улазе у стандардне производе. У зависности од тога колики је број делова у калупу, бира се број хватаљки. Хватаљке морају да имају костур који ће их држати у таквим димензијама да те димензије одговарају димензијама делова из калупа. Костур треба да се качи на ротациони механизам, како би се делови ротирали по потреби. Из каталога произвођача усвојене су хватаљке серије ESG. На слици 3.28 приказана је хватаљка ознаке: ESG-40-SF-QB-HS.



Слика 3.28 – Хватаљка ESG-40-SF-QB-HS

6. Детаљно конструисање манипулатора

Детаљно конструисање представља део процеса конструсања у којем се комплетира конструкција техничког система са коначним дефинисањем распореда, облика, димензија и карактеристика површина свих компонената, врши дефинитиван избор материјала, технологије израде и прорачун трошкова [3]. Током досадашњег процеса конструисања одабрани су одговарајући материјали, постављене су задовољавајуће димензије и распоред у склопу. Стога, у овом делу рада биће поновљени прорачуни, због непредвиђених измена и убацивања нових делова, презентована техничка документација, дато упуство одржавања и сервисирања, презентована табела трошкова израде и дате карактеристике манипулатора.

6.1 Финални прорачуни

Пошто се поседују готови CAD модели, могу се одрадити поузданији прорачуни него они који су одрађени претходно, јер се тад нису знали сви елементи манипулатора, као ни материјали од којих су израђени. Дакле, поновиће се прорачуни за подсклопове у Z и X оси. Прорачун за подсклоп у Y оси остаје исти.

Подсклоп X осе:

$$\begin{aligned}
 F_t &= 49,05 \text{ N} \\
 F_{p.y} &= m_{p.y} \cdot g = 10,57 \cdot 9,81 = 103,7 \text{ N} \\
 F_z &= F_t + F_{p.y} = 49,05 + 103,7 = 152,74 \text{ N} \\
 F_z &< F_{zmax} \\
 152,74 \text{ N} &< 400 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Где су: $F_{p.y}$ – Сила услед масе подсклопа у Y оси; F_z – Сума сила које делују у оси; F_{zmax} – Максимална дозвољена сила у оси (дата од стране произвођача).

Сада се рачунала сила услед масе целог подсклопа, у претходном прорачуну се цео подсклоп није могао предвиди и зато се јавља разлика од 20 N у прорачунима. Маса подсклопа је израчуната у Autodesk Inventor-у, пошто су задати сви материјали. Услед масе подсклопа у Y оси јавља се момент савијања на подсклопу у X оси. Рачуна се вредност момента савијања када се подсклоп у Y оси налази у крајњем положаја, кад је уједно и вредност момента савијања највећа.

$$\begin{aligned}
 M_y &= F_{p.y} \cdot 0,8 + F_t \cdot 0,81 = 152,74 \cdot 0,8 + 49,05 \cdot 0,81 \\
 M_y &= 122,2 + 39,73 \\
 M_y &= 161,93 \text{ Nm} \\
 M_y &< M_{y\max} \\
 161,93 \text{ Nm} &< 228 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Где су: M_y – Момент који се јавља у оси; $M_{y\max}$ – Максимални дозвољени момент у оси (дат од стране произвођача).

На основу поновљеног прорачуна може се закључити да одабрана линеарна јединица у потпуности задовољава прорачуна и да може пренети предвиђена оптерећења.

Подсклоп Z осе:

$$\begin{aligned}
 F_t &= 49,05 \text{ N} \\
 F_{p.y} &= m_{p.y} \cdot g = 10,57 \cdot 9,81 = 103,7 \text{ N} \\
 F_{p.x} &= m_{p.x} \cdot g = 18,8 \cdot 9,81 = 184,43 \text{ N} \\
 F_z &= F_t + F_{p.y} + F_{p.x} = 49,05 + 103,7 + 184,43 = 337,2 \text{ N} \\
 F_z &< F_{z\max} \\
 337,2 \text{ N} &< 560 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Где су: $F_{p.y}$, $F_{p.x}$ – Силе услед масе подсклопова у Y и X осе; F_z – Сума сила које делују у осе; $F_{z\max}$ – Максимална дозвољена сила у осе (дата од стране произвођача).

Добијена разлика у сили која делује на подсклоп износи 144 N, али и даље линеарна јединица и цео подсклоп задовољавају прорачун. На овај подсклоп делује увијање. Максимална вредност увијања настаје када подсклоп Y дође до свог крајњег положаја. Стога се прелази се на прорачун момента увијања.

$$\begin{aligned}
 M_x &= F_{p.y} \cdot 0,8 + F_{p.x} \cdot 0,45 + F_t \cdot 0,81 = 152,74 \cdot 0,8 + 184,43 \cdot 0,45 + 49,05 \cdot 0,81 \\
 M_y &= 122,2 + 82,9 + 39,73 \\
 M_y &= 244,93 \text{ Nm} \\
 M_y &< M_{y\max} \\
 244,93 \text{ Nm} &< 300 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Где су: M_y – Момент који се јавља у осе; $M_{y\max}$ – Максимални дозвољени момент увијања у осе (дат од стране произвођача).

Напомена: Током израде прорачуна, јављају се одређене несугласице у виду ознака момената и сила. Пример, сила F_z у прорачуну за подсклоп у Y осе. Силе и моменти су се означавали према координатном систему који је поставио произвођач (Слика 3.1), у зависности од каталога јављали су се различито постављени координатни системи. За конструисање манипулатора субјективно је усвојен други координатни систем и зато се могу јавити одређене несугласице око ознака сила и момената у прорачунима.

Финални прорачуни су задовољили и показали су исправности приликом усвајања линеарних јединица и формирања подсклопова, због тога може се закључити да нису потребне никакве измене на формираној конструкцији. Ниједна линеарна јединица, у овом раду, није предимензионисана. Иако су постојале линеарне јединице које су имале дозвољене вредности ближе стварним вредностима оптерећења, нису постојале са одговарајућим ходовима и стога су се бирале усвојене линеарне јединице.

6.2 Техничка документација

За успешно одвијање процеса пројектовања, конструисања, израде и контроле производа неопходно је усклађено деловање свих учесника у том процесу. То се може постићи само одговарајућом разменом информација. Један од најбољих начина размене информација у техници је графичка комуникација применом техничких цртежа. Технички цртеж представља универзални језик комуникације техничких лица у области машинства. Техничко цртање је техничка дисциплина која омогућава да се тродимензионални објект приказе у равни цртежа. Основни циљ машинског техничког цртања је да се кроз цртеж или скуп цртежа у потпуности једнозначно дефинишу облик, функција, димензије, врста обраде, материјал, квалитет и друге карактеристике машинских делова и склопова. У техничком цртању предмети се приказују тако да се једноставно могу одредити све димензије предмета. За разумевање техничког цртања у машинству потребно је да технички цртеж буде јасан, прегледан и прецизан. Техничко цртање се базира на принципима нацртне геометрије, у комбинацији са правилима техничког цртања, која су прописана ради постизања једнообразности.

Техничка документација је урађена за све нестандартне делове манипулатора и приложена је на крају овог рада. Цео манипулатор је подељен на три главна подсклопа. За све нестандартне елементе подсклопова урађена је техничка документација. Обележавање цртежа се врши на следећи начин:

M – 01 – XX – XX/X

М – Манипулатор

01 – Ознака склопног цртежа манипулатора

XX – Ознака за цртеже подсклопа

XX/X – Прва два броја су за ознаку делова подсклопова, а број после је за елементе тих делова

Техничка документација није урађена за кућиште и елемент за везу подсклопова X и Y осе, јер се они израђују методом стереолитографије зашта није потребна техничка документација већ готов CAD модел који је урађен у овом раду.

6.3 Економски аспекти манипулатора

Представља једну од најбитнијих информација везаних за манипулатор. Како би манипулатор уопше могао да се израђује потребно је да задовољи економске аспекте, тј. да буде исплатив купцу. Економски аспекти манипулатора се сагледавају за домаће тржиште. Трошкови се рачунају по подсклоповима ради лакшег сагледавања. У табели 3, 3.1 и 3.2 приказани су економски подаци подсклопова.

Табела 3. Економски аспекти подсклопа у Z осе

Подсклоп Z осе		
1. Линеарни погон	Линеарна јединица	300.000,00
	Електромотор	10.700,00
2. Рам	Лим	1.200,00
	Линеарна вођица	8.560,00
	Плоча	650,00
	Стопица	360,00
	Ребра	1.150,00
	Цев 140x80x4, L=300 mm	860,00
УКУПНО		323.480,00

Напомена: Цене су у динарима (рсд)

Табела 3.1. Економски аспекти подсклопа у X осе

Подсклоп X осе		
1. Линеарни погон	Електромотор	9.760,00
	Линеарна јединица	180.000,00
2. Остало	L профил	700,00
	Плоча за везу	1.900,00
	Линеарни клизач	6.700,00
УКУПНО		199.060,00

Напомена: Цене су у динарима (рсд)

Табела 3.2. Економски аспекти подскопа у Y осе

Подсклоп Y осе		
1. Линеарни погон		
	Електромотор	8.940,00
	Линеарна јединица	120.000,00
2. Остало		
	Профил 50x20x10	1.100,00
	6xПлоча 100x50	6.200,00
	Пнеуматски цилиндар, ход 25 mm	6.420,00
	Зупчаник	535,00
	Вратило	220,00
	Зупчаста летва	510,00
	УКУПНО	143.920,00
	Носачи каблова	24.075,00
	Веза за X и Y осе	12.000,00
	Кућиште	7.800,00

Напомена: Цене су у динарима (рсд)

У табелу 3.2 додате су још три ставке које не припадају ни једном од подскопова. За поједине делове, у цену је урачуната и додатна обрада. Укупна сума израде манипулатора представљена је у табели 3.4.

Табела 3.4. Укупна сума израде манипулатора

Подсклоп Z осе	323.480,00
Подсклоп X осе	199.060,00
Подсклоп Y осе	143.920,00
Остало	43.875,00
Непланирани трошкови, 20%	142.067,00
УКУПНО	852.402,00

Напомена: Цене су у динарима (рсд)

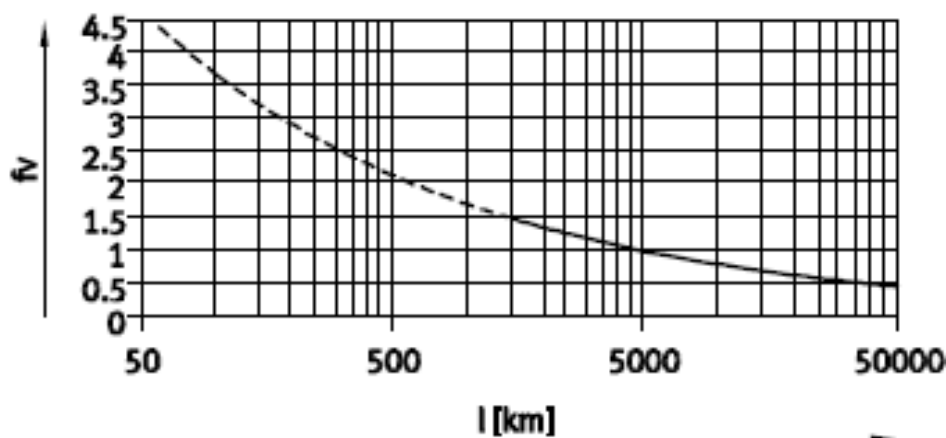
У непланиране трошкове се убрајају каблови, црева, завртњеве, као и сви остали елементи, услужне радње, обраде које нису предвиђене до сад у раду. Када се све сагледа, у табели 3.4 може се видети цена израде манипулатора.

Како би се утврдила исплативост израде манипулатора потребно је израчунати колико би постојало расхода уколико би уместо манипулатора радила два радника у две смене на годишњем нивоу. Просечна бруто плата у Србији, за први квартал у 2015. години, износи: 57.453,00 рсд-а. Укупни расход за плаћање два радника на годишњем нивоу износи 1.378.872,00 рсд-а. Што значи да се израда манипулатора, са економског аспекта, исплати већ у првој години набавке. До цене готовог манипулатора није се могло приступити, тако

да се не може анализирати испативост овог манипулатора у односу на већ склопљен манипулатор. Из табела се може видети да су највећи издаци линеарне јединице. Важно је напоменути да њихове цене нису прецизне, јер оне варирају у зависности од купца. Такође, већина цена је одређена на основу цена понуђених на интернету, тако да постоји могућност налажења повољнијих цена.

6.4 Радни век, одржавање и сервисирање

Са аспекта одржавања, манипулатор спада у лако одрживе сиситеме. Најбитнији део манипулатора јесу линеарне јединице, које имају гаранцију од стране произвођача и стога је произвођач линеарних јединица тај који је задужен за њихово сервисирање. Препоручени радни век ових линеарних јединица се рачуна у пређеној путањи и износи, уколико је $f_v < 1$, 5000 km. f_v представља фактор оптерећења који се рачуна тако што се стварно оптерећење, које делује на линеарну јединицу, подели са максималним дозвољеним оптерећењем. Код све три линеарне јединице стварно оптерећење не прелази дозвољено, тако да овај фактор има вредност испод јединице, у сва три случаја. Зато се може гарантовати рад линеарних јединица до 5000 пређених километара. На слици 4 може се видети како пада вредност максималне километраже са порастом вредности фактора оптерећења.

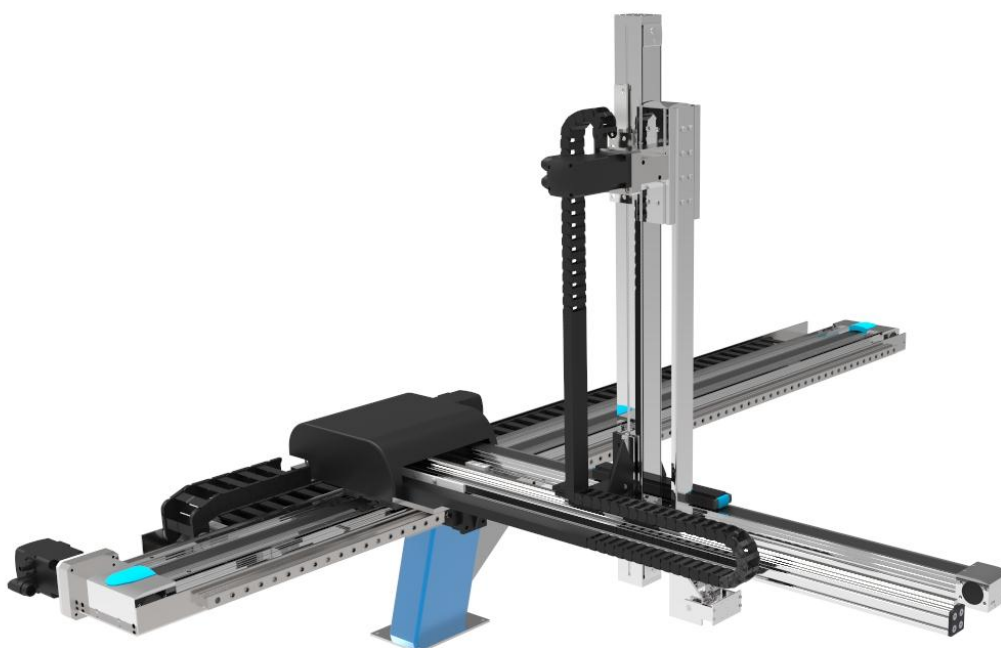


Слика 4 – Утицај фактора оптерећења на максимално пређену километражу

После ове пређене километраже линеарне јединице губе своју функционалност, највероватније због каиша који је направљен од гуме, а гума временом губи своју еластичност и остала својства. Ипак, са слике 4 се може видети да линеарне јединице које преносе мања оптерећења могу прелазити и до 50000 km. Поред линеарних јединица, остали елементи манипулатора не подлежу сервисирању и одржавању, што доводи до закључка да радни век манипулатора диктира радни век линеарних јединица. Линеарне јединице могу

да раде на температурама од -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$, што доводи до закључка да није потребно водити рачуна о температури хале, пошто у овом окружењу температуре ретко прелазе вредности у овом распону. Уколико пређу, потребно је загрејати или расхладити радно окружење манипулатора на прописану температуру. Треба још додати, да због великог броја стандардних елемената, сервисирање је лакше јер у случају отказа елемената могу се наручити резервни делови у најкраћем року. На слици 4.1 приказан је изглед финалног манипулатора.

Потребно је повремено подмазивати котрљајне лежајеве на ротационом механизму. Лежаје се подмазују мастима. Замена мазива се ради после 1000h рада или искуствено.

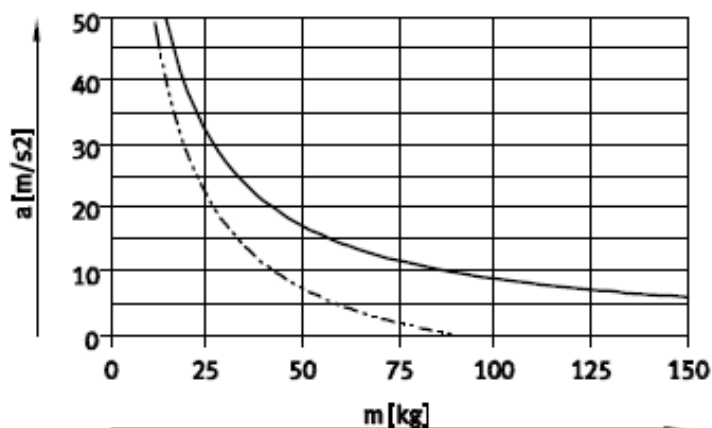


Слика 4.1 – Изглед финалног манипулатора

6.5 Карактеристике манипулатора

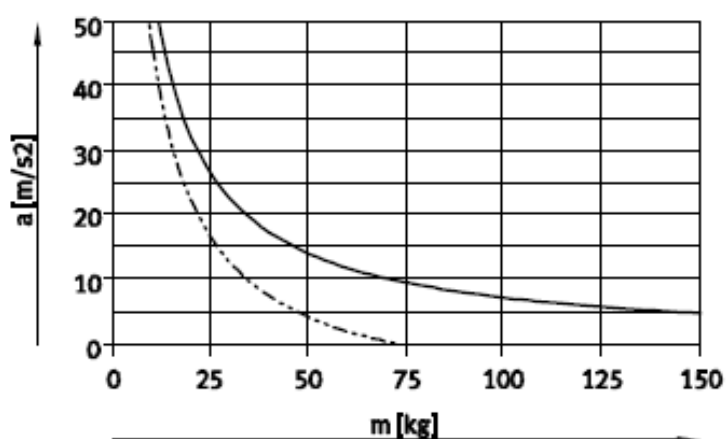
Конструисани манипулатор, као на слици 4.1 има габарите: 2646x1504x1240 mm и масу од 98 kg. Манипулатор се може монтирати на машину за бризгање пластике помоћу радне снаге, нема велике потребе за краном. Убрзања линеарних јединица зависе од вредности оптерећења. На слици 4.2 приказан је дијаграм зависности вредности масе на максималну вредност убрзања линеарне јединице у Z оси. Пуном линијом је означена зависност кад линеарна јединица ради у хоризонталној равни а испрекиданом линијом кад јединица ради у вертикалној равни. Пошто ова линеарна јединица

ради у хоризонталној равни, гледа се пуна линија. Линеарна јединица преноси 34,37 kg.



Слика 4.2 - Дијаграм зависности вредности масе на максималну вредност убрзања линеарне јединице у Z осни

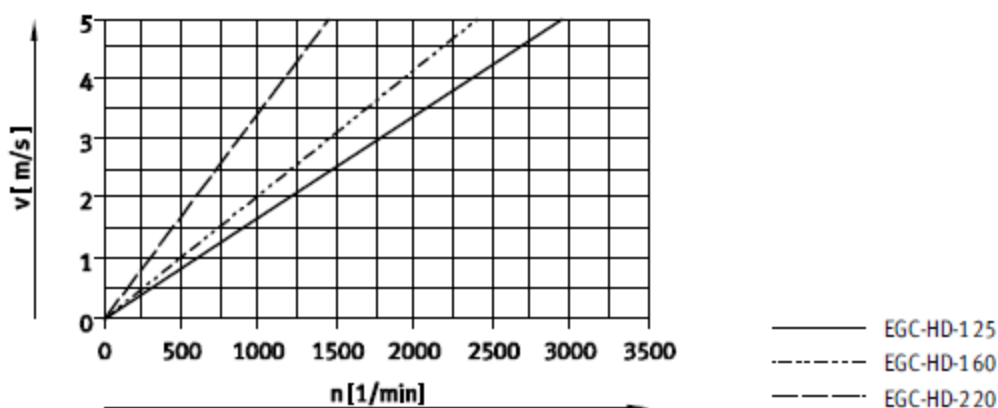
Са слике 4.2 може се видети да је максимална вредност убрзања линеарне јединице и до $25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. На слици 4.3 приказан је дијаграм зависности вредности масе на максималну вредност убрзања линеарне јединице у X осни. Линеарна јединица преноси масу од 15,57 kg. И на овом дијаграму прати се зависност пуне линије, пошто и ова линеарна јединица ради у хоризонталној равни.



Слика 4.3 - Дијаграм зависности вредности масе на максималну вредност убрзања линеарне јединице у X осни

Са слике 4.3 може се видети да је максимална вредност убрзања линеарне јединице и до $50 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. За линеарну јединицу у Y осни није дат, од стране произвођача, одговарајући дијаграм зависности. Вредности брзине кретања линеарних јединица зависи од броја обртаја електромотора. На слици 4.4

приказан је дијаграм зависност вредности брзине линеарне јединице у Z осе од вредности броја обртаја електромотора. Дате су зависности за све три серије овог модела, усвојени модел је серије 160.



Слика 4.4 – Дијаграм зависност вредности брзине линеарне јединице у Z осе од вредности броја обртаја електромотора

Претходно у раду се дефинисало да манипулатор треба да има вредности ходова од Z-оса 2000 mm, X-оса 900 mm, Y-оса 500 mm. Сад се могу дефинисати стварне вредности ходова, на основу готовог CAD модела. Стварни ходови манипулатора имају следеће вредности: Z-оса 2000 mm, X-оса 905 mm, Y-оса 519 mm. Може се приметити да линеарне јединице имају мало веће стварне ходове али то повећање не угрожава оптималан рад манипулатора, тако да нема потребе за модификовањем конструкције.

Тачност позиционирања и понављања циклуса зависи од тачности позиционирања линеарних јединица. У раду је већ поменуто да тачност позиционирања утиче на исправан рад манипулатора. Произвођач је дао податак да је тачност позиционирања линеарних јединица $\pm 0,08$ mm. Што теоријски задовољава потребу за исправним радом манипулатора.

7. Закључак

Конструисање манипулатора, као и сваког другог машинског система, представља један дуг, свеобухватан и тежак процес који се може лакше савладати са већим искуством из области конструисања. До израђене конструкције дошло се истраживањем, детаљним анализирањем, конципирањем, формирањем и детаљним конструисањем манипулатора. Највише времена је потрошено на истраживање и детаљно анализирање већ постојећих решења. Детаљно анализирање је омогућило креирање идејног решења конструкције и смањило област истраживања, пре свега линеарних јединица. На основу ових сазнања лакше се приступило конципирању и формирању конструкције, док је детаљно конструисање дошло као потврда добро одрађених претходних ставки. Што се може потврдити чињеницом да у фази детаљног конструисања ништа није промењено на самој конструкцији.

Када се погледа конструкција манипулатора, може се закључити да су сва ограничења и услови у виду габарита, функције и радних својства, датих на почетку рада, испуњени. Манипулатор може да опслужује велики број брызгалки, због чињенице да се може лако намонтирати на велики број брызгалки. Конструкција је у потпуности монтажно/демонтажна, што доводи до чињенице да је транспорт, у многеме, олакшан и да се може монтажа вршити по обављеном транспорту. Са економског аспекта конструкција испуњава све услове да буде применљива у пракси, јер се њеном применом смањују финансијски губици. Радни век манипулатора ја такав да по његовом отказу, поновном куповином истог, финансијски губици се не јављају. Наравно, тај радни век у многеме зависи од темпа производње. Одржавање манипулатора је непотребно, јер нема потребе за подмазивањем (осим повремено подмазивање лежачега на ротационом механизму), поновним намештањем итд. Од тренутка када се намонтира на брызгалку не захтева одржавање. Сервисирање се такође обавља врло једноставно, због велике употребе стандардних делова током конструисања. Све ово претходно наведено, враћа на почетак и на чињеницу да је манипулатор конструисан тако да испуњава све операције и услове дате са почетка рада.

Потражња манипулатора и сличних машинских система у будућности је неизбежна, што доводи до закључка да ће се овакви машински системи и у будуће усавршавати и тако допринети ефикаснијој производњи. Треба разматрати, при конструсању манипулатора, и друге врсте линеарних јединица. Наиме, у пракси се, за манипулатор који опслужује машину за бризгање пластике, најчешће користе пнеуматски цилиндри без клипњаче. До овог

сазнања се дошло анализирањем већ постојећих решења. Због економског аспекта пнеуматски цилиндри без клипњаче су одбачени и усвојене су линеарне јединице са каишем. Линеарне јединице са навојним вретеном треба усвајати кад манипулатор преноси велико оптерећење и не захтева велике брзине кретања. Не треба спајати више врста линеарних јединица у један склоп манипулатора већ одабрати једну врсту линеарне јединице и применити је на цео склоп.

Циљ рада је испуњен, конструкција задовољава све услове који су раније постављени у раду и, пре свега, конструкција је применљива у пракси. Што је био и примарни циљ. Конструисање оваквих и сличних склопова омогућава уштеде у пракси и може да повећа темпо производње уколико су сви остали елементи у производњи способни да испрате пораст производње. Све ово доводи до закључка да постоји тржиште за овакве производе и да је тренд пораста производње индустријских робота, самим тим и манипулатора, у порасту. Ипак, мора се констатовати да постоје тржишта на којима манипулатори и даље нису исплативи због јефтине радне снаге.

Литература

- [1] М. Вукобратовић, "Индустријска роботика", Машински факултет, Београд, 1998.
- [2] <http://www.worldrobotics.org/> - Приступљено, Март 2015.
- [3] Н. Марјановић, "Методe конструисања", Машински факултет, Крагујевац, 1999.
- [4] <http://www.ctsitaly.com/> - Приступљено, Март 2015.
- [5] <http://www.smcusa.com/top-navigation/cad-models/20740> - Приступљено, Март 2015.
- [6] http://www.festo.com/cat/sr_rs/products_011101 - Приступљено, Март 2015.
- [7] Светислав Јовичић, Ненад Марјановић, "Основи конструисања", Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011.
- [8] Dai Jian S, Zoppi Matteo, Kong Xianwn, "Advanced in Reconfigurable Mechanisms and Robots I", 2012.
- [9] Том Тремебли, "Аутодеск Инвентор 2013 и Аутодеск Инвентор ЛТ 2013", 2013.

Додатак

Као додатак овом мастер раду приложена је комплетна техничка документација манипулатора, од двадесет једног цртежа, са следећим ознакама цртежа:

1. Склопни цртеж манипулатора: М-01
2. Подсклоп Z осе: М-01-01
3. Подсклоп X осе: М-01-02
4. Подсклоп Y осе: М-01-03
5. Веза Y и X осе: М-01-04
6. Веза вођице и X осе: М-01-05
7. Кућиште: М-01-06
8. Рам: М-01-01-01
9. JIS G 3350A-1245: М-01-01-02
10. Плоча за везу Z и X осе: М-01-02-01
11. L профил за везу, десни: М-01-02-02
12. L профил за везу, леви: М-01-02-03
13. JIS G 3350A-1753: М-01-03-01
14. Ротациони механизам: М-01-03-02
15. JIS G 3350A-1753: М-01-01-01/1
16. Постоље рама: М-01-01-01/2
17. Плоча за рам: М-01-01-01/3
18. Стопица: М-01-01-01/4
19. Ребро: М-01-01-01/5
20. Плоча за везу код ротационог механизма: М-01-03-02/1
21. Бочна плоча: М-01-03-02/2