

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Bernarda Galić  
Matija Čmelješević  
Ante Ivanković  
Lovro Zoričić

**Napredne metode upravljanja mehatroničkim  
sustavima s pneumatskim pogonom**

Zagreb, 2024.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za strojarsku automatiku, Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava pod vodstvom prof. dr. sc. Željka Šituma i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

# SADRŽAJ RADA

1. UVOD.....	1
2. NAVOJNO VRETENO S PNEUMATSKIM POGONOM .....	2
2.1. Projektiranje sustava .....	2
2.2. Opis komponenti sustava.....	3
2.2.1. Pogonski dio sustava .....	3
2.2.2. Upravljački dio sustava .....	6
2.2.3. Mjerni dio sustava .....	7
2.3. Modeliranje i simulacija sustava.....	8
2.3.1. Dinamički model sustava.....	8
2.3.2. Simulacija sustava .....	10
2.4. Izrada eksperimentalnog postava i projektiranje regulatora.....	12
2.4.1. Izrada eksperimentalnog postava .....	12
2.4.2. Projektiranje regulatora .....	13
2.4.3. Eksperimentalni rezultati .....	15
3. FLEKSIBILNI PNEUMATSKI MANIPULATOR .....	16
3.1. Projektiranje manipulatora .....	16
3.2. Opis komponenti sustava.....	19
3.2.1. Upravljački elementi .....	19
3.2.2. Pogonski elementi .....	22
3.3. Izrada dijelova i konstrukcije.....	23
3.3.1. Pneumatski aktuatori na napuhavanje .....	24
3.3.2. Nosač .....	25
3.4. Sklapanje konstrukcije .....	27
4. PNEUMATSKI MANIPULATOR ZA IZBJEGAVANJE PREPREKA NA POKRETNOSTI TRACI .....	28

4.1.	Projektiranje i izrada eksperimentalnog modela.....	28
4.1.1.	Projektiranje transportnog sustava .....	29
4.1.2.	Projektiranje i izrada pneumatskog sustava.....	31
4.1.3.	Konačan izgled eksperimentalnog modela .....	34
4.2.	Upravljanje .....	36
4.2.1.	Upravljački uređaj Controllino MINI s napajanjem .....	36
4.2.2.	Upravljanje transportnim sustavom.....	37
4.2.3.	Upravljanje pneumatskim sustavom .....	38
4.3.	Opis rada.....	40
5.	PNEUMATSKI ROBOTSKI MANIPULATOR S HVATALJKOM PRILAGODLJIVOG OBLIKA .....	43
5.1.	Projektiranje sustava .....	43
5.1.1.	Projektiranje pneumatskog robotskog manipulatora.....	44
5.1.2.	Projektiranje fleksibilne hvataljke.....	44
5.2.	Komponente pneumatskog mehatroničkog sustava .....	46
5.2.1.	Rotacijski aktuator MSQB10A .....	46
5.2.2.	Cilindar CQ2Z32-0AS145-55.....	46
5.2.3.	Cilindar CXSM20-45 .....	47
5.2.4.	Ejektor ZH10B-06-06.....	47
5.2.5.	Cilindar ZCDUKC20-10D.....	48
5.2.6.	Razvodnik VQD1121 .....	48
5.2.7.	Prigušno nepovratni ventil .....	48
5.2.8.	Pretvarač struje KSE 06024N .....	49
5.2.9.	Zaštitni prekidač AMPARO 10kA B 2A.....	49
5.2.10.	Controllino MINI .....	50
5.3.	Konstruiranje sustava .....	51
5.3.1.	Konstruiranje pneumatskog robotskog manipulatora.....	51

5.3.2.	Konstruiranje fleksibilne hvataljke .....	52
5.3.3.	Pneumatska shema mehatroničkog sustava .....	54
5.4.	Upravljanje sustavom pneumatskog robotskog manipulatora s fleksibilnom hvataljkom.....	55
6.	ZAKLJUČAK.....	57
	ZAHVALE.....	58
	POPIS LITERATURE.....	59
	SAŽETAK .....	63
	SUMMARY .....	65
	ŽIVOTOPISI.....	67

## 1. UVOD

Mehatronika je interdisciplinarno područje koje povezuje elemente mehanike, elektronike i računalnih znanosti te razvija složene sustave i proizvode. Kombiniraju se mehaničke komponente, elektronički sustavi, aktuatori, senzori i upravljački uređaji za razvoj sustava poput: pametnih telefona, industrijskih robota, 3D printera, autonomnih vozila i mnogih drugih danas često korištenih proizvoda. Mehatronički sustavi često rezultiraju povećanom učinkovitosti te poboljšanjem funkcionalnosti i pouzdanosti. [1]

Pneumatika je mehanika kompresibilnih fluida, a bavi se uporabom stlačenog plina kao izvora energije. Osnovne pozitivne značajke pneumatike su: neosjetljivost na preopterećenje, sigurnost, ekološka prihvatljivost, neosjetljivost na temperaturne promjene, radijaciju, magnetska i električna polja, velike brzine aktuatora i povoljno održavanje, a negativne značajke su: buka pri ekspanziji, skupoća stlačenog zraka kao izvora energije, nemogućnost gibanja na malim brzinama i manja preciznost. [2]

Njihovim spajanjem nastaju mehatronički sustavi s pneumatskim pogonom ili pneumatski servosustavi. To su sustavi zatvorene petlje koji koriste regulator i uređaj za povratnu vezu za praćenje i ispravljanje pogrešaka brzine, položaja i zakretnog momenta. Imaju iste mogućnosti kod upravljanja snagom i brzinom, ali nude veću točnost pozicioniranja putem negativne povratne veze. Također, mogu regulirati tlak zraka u sustavu te dovesti i protok zraka što dovodi do preciznije regulacije sile i momenta. [3]

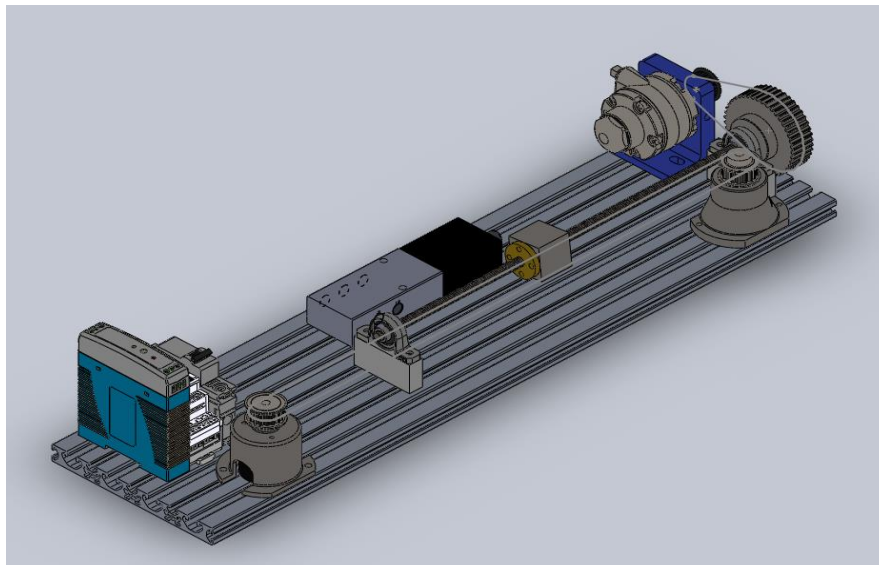
U ovom radu se opisuje četiri mehatronička sustava s pneumatskim pogonom: navojno vreteno s pneumatskim pogonom, fleksibilni pneumatski manipulator, pneumatski manipulator za izbjegavanje prepreka na pokretnoj traci i pneumatski robotski manipulator s hvataljkom prilagodljivog oblika. Opisuje se projektiranje eksperimentalnih postava i komponente tih sustava, izvodi se simulacija ponašanja sustava te se projektira regulator na izrađenom eksperimentalnom postavu.

## 2. NAVOJNO VRETENO S PNEUMATSKIM POGONOM

Navojno vreteno je strojni dio koji ima oblik izduženoga vijka te pretvara rotacijsko gibanje u pravocrtno gibanje. Navojna vretena koriste se u različitim industrijama za zadatke pozicioniranja, rukovanja materijalom, podizanja tereta, a posebno za zadatke gdje je potrebna velika preciznost i brzina, poput CNC stroja i 3D printera. [4] Za ostvarivanje rotacijskog gibanja navojnog vretena se najčešće koristi električni motor, ali pneumatski motor može biti dobar izbor zbog boljeg omjera snage i težine te snage i veličine, neosjetljivosti na opterećenja i zastoj pogona, velike specifične snage, sigurnosti rada u eksplozivnim sredinama te otpornosti na toplinu, vlagu i onečišćenja, jednostavnog održavanja, dizajna i konstrukcije. [5]

### 2.1. Projektiranje sustava

Želi se izraditi eksperimentalni postav pneumatskog servosustava za zadatke pozicioniranja. Na slici 2.1. prikazano je osmišljeno rješenje izvedbe sustava navojnog vretena s pneumatskim pogonom, a sve komponente izrađene su u programu *SolidWorks*.



Slika 2.1. Osmišljeno rješenje izvedbe sustava

Komponente sustava su postavljene i posložene na aluminijski profil. Proporcionalni ventil se pneumatskim cijevima spaja na pneumatski motor, a pneumatski motor se nalazi na nosaču. Za prijenos gibanja s pneumatskog motora na navojno vreteno koristit će se remenice i remen. Navojno vreteno s maticom je uležišteno pomoću dva ležaja. Za mjerenje položaja, osim

inkrementalnog enkodera, potrebne su dvije remenice i remen. Inkrementalni enkoder se nalazi na nosaču te je spojen s jednom remenicom, a druga remenica se također nalazi na nosaču. Još je potrebno napajanje, strujni prekidač i upravljački uređaj *Controllino*, koji prima informacije s inkrementalnog enkodera, a šalje informacije na proporcionalni ventil.

## 2.2. Opis komponenti sustava

### 2.2.1. Pogonski dio sustava

#### 2.2.1.1. Pneumatski motor

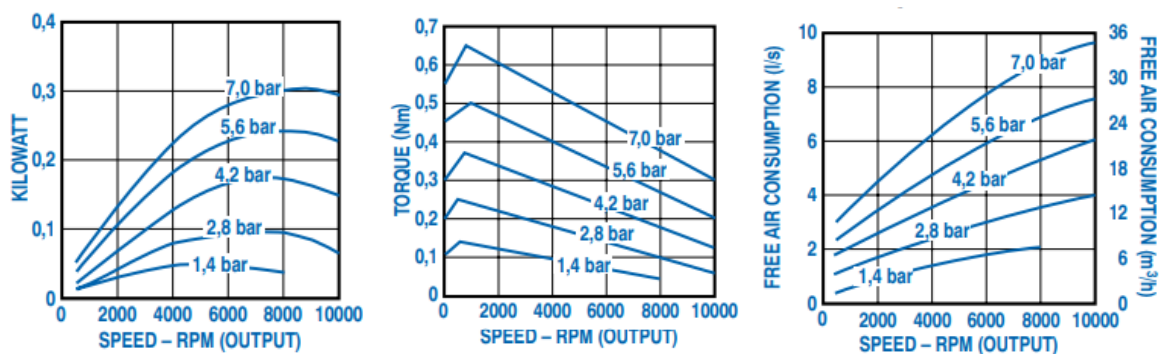
Pneumatski ili zračni motor je rotacijski izvršni element koji mehanički rad ostvaruje širenjem stlačenog zraka. Oni koji se najčešće koriste su lamelni motori, kod kojih se rotor u odnosu na stator postavlja ekscentrično. Na rotoru se nalaze krilca koja se mogu pomicati poprečno, a s donje strane krilca imaju opruge koje ih potiskuju prema kućištu motora. Zrak je zarobljen u radnom prostoru između dvaju krilaca, rotora i statora te se kod vrtnje rotora taj prostor povećava ili smanjuje. U ulaznom dijelu, na krilca djeluje tlak struje zraka pa se zbog toga javlja sila i okretni moment koji zakreće rotor. [5]

Za izradu eksperimentalnog postava odabran je pneumatski motor proizvođača *GAST*, modela *IAM-NRV-63A*. To je model s osam lopatica i reverzibilan je, a prikazan je na slici 2.2. Na slici 2.3. prikazani su grafovi odnosa brzine i ostalih parametara – izlazne snage, okretnog momenta i potrošnje zraka.



Slika 2.2. Izgled odabranog pneumatskog motora [6]





Slika 2.3. Grafovi odnosa brzine i ostalih parametara [6]

### 2.2.1.2. Razvodni ventili

U pneumatskom sustavu ventili ili razvodnici imaju važnu ulogu jer određuju koliko zraka prolazi i u kojem smjeru te djeluju kao posrednici između izvora i aktuatora. Većinom se sastoje od klipa unutar cilindra koji se pokreće ručno, mehanički, pneumatski, hidraulički ili elektromagnetski, a njegov položaj ograničava ili dopušta protok zraka. U eksperimentalnom postavu koriste se 5/3 razvodni ventili, a taj naziv označava da ventil ima pet priključaka za protok zraka i 3 položaja koje ventil postiže. [7] Ti ventili su proporcionalni ventil i on/off ventil.

Proporcionalni ventili kontroliraju smjer i brzinu jer se mogu prebaciti i u međupoložaje za upravljanje smjera aktuatora, brzine, akceleracije i deceleracije. Maseni protok kroz ventil proporcionalan je dovedenom upravljačkom signalu. [7]

Za izradu eksperimentalnog postava odabran je proporcionalni ventil proizvođača *FESTO*, modela *MPYE-5-1/8-HF-010-B*, koji je prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4. Izgled i simbol odabranog proporcionalnog ventila [8]

On/off tip ventila može biti ili uključen – propuštati zrak, ili isključen – blokirati protok zraka. Posredno je upravljani, što znači da ventil koristi stlačeni zrak da bi se pokrenuo, dok elektromagnet usmjerava protok zraka. [7]

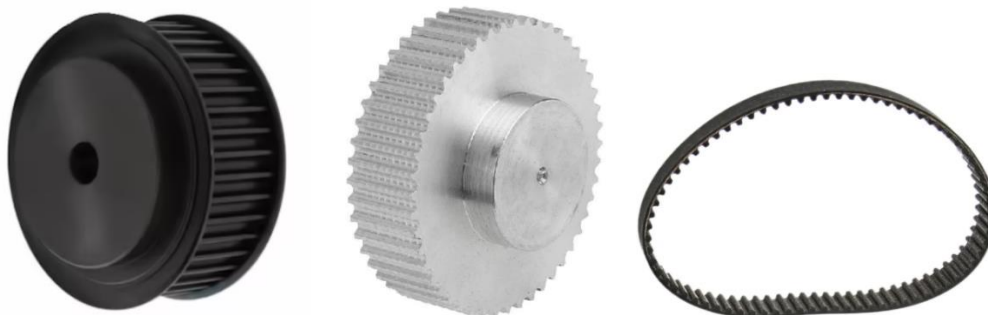
Za izradu eksperimentalnog postava odabran je ventil proizvođača *SMC*, modela *SY7420-5MOU-02F-Q*, koji je prikazan na slici 2.5.



Slika 2.5. Izgled i simbol odabranog ventila [9]

### 2.2.1.3. Remenski prijenos

Remenski prijenos omogućava prijenos i transformaciju gibanja i okretnog momenta između vratila na većem rastojanju. Sastoji se najmanje od jednog remena i dvije remenice, a prijenos je elastičan te prigušuje udarce i vibracije. Važan podatak prilikom odabira remena i remenica je prijenosni omjer, koji predstavlja omjer brzina vrtnje remenica. [10] Budući da se u ovom pogonu želi reducirati brzina vrtnje koja se prenosi s pneumatskog motora na navojno vreteno, prijenosni omjer mora biti veći od 1. To znači da pogonska remenica, koja se nalazi na osovini pneumatskog motora, treba imati manji promjer od gonjene remenice, koja se nalazi na navojnom vretenu.



Slika 2.6. Od lijevog prema desnom - pogonska remenica, gonjena remenica, remen

Za izradu eksperimentalnog postava odabrana je pogonska zupčasta remenica naziva *PH15-5M15*, gonjena zupčasta remenica naziva *PH44-5M15* te remen naziva *CHD375-5M15*. Remenice i remen su prikazani na slici 2.6.

#### 2.2.1.4. Navojno vreteno s maticom

Izvršni dio sustava je navojno vreteno, izduženi vijak koji vrtnju pretvara u pravocrtno gibanje matice. Razlikuju se trapezna, kuglična i zupčasta navojna vretena. [4] Odabrano je trapezno navojno vreteno navoja Tr8, duljine 400 mm s pripadajućom pravokutnom maticom, a prikazano je na slici 2.7.



Slika 2.7. Trapezno navojno vreteno s maticom, ležajevima i spojkom

### 2.2.2. Upravljački dio sustava

#### 2.2.2.1. Napajanje

Napajanje je električni uređaj koji osigurava napon i struju tj. pretvara električnu struju iz izvora u točan napon, struju i frekvenciju koji su potrebni za napajanje ostalih komponenata. Uz to, pretvara izmjeničnu struju na ulazu u istosmjernu struju na izlazu. [11]

Za izradu eksperimentalnog postava odabran je uređaj *MDR-20-24*, koji ima izlazni DC napon od 24 V.

#### 2.2.2.2. Controllino PLC

*Controllino* PLC je malo računalo temeljeno na mikrokontrolerima *ATmega328* i *ATmega2560*, s periferijama temeljenim na *Arduino* platformi. Kombinacija je fleksibilnosti otvorenog koda

*Arduino* platforme i sigurnosti industrijskih PLC-ova te se zbog toga koristi za različite zadatke automatizacije i upravljanja. [12]

Za izradu eksperimentalnog postava odabran je *Controllino MAXI Automation*, koji je prikazan na slici 2.8. Ta verzija ima priključke za analogni izlaz koji su potrebni zbog proporcionalnog ventila.

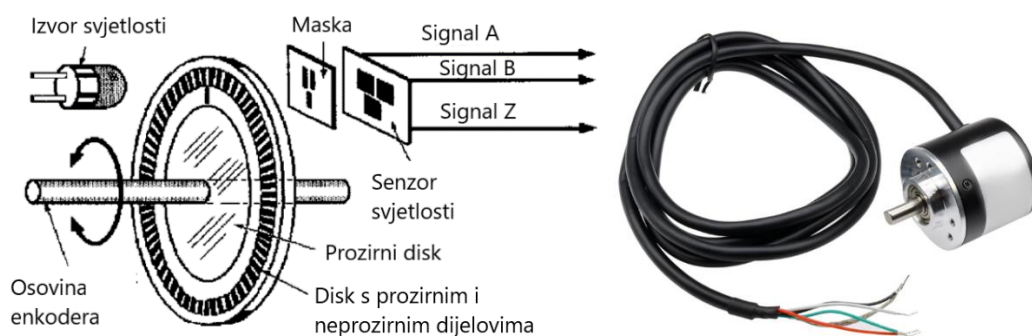


Slika 2.8. *Controllino MAXI Automation* [12]

### 2.2.3. Mjerni dio sustava

#### 2.2.3.1. Inkrementalni enkoder

Inkrementalni enkoder je rotacijski senzor koji je napravljen u obliku diska. Taj disk je podijeljen na manje dijelove koji su naizmjenice prozirni i neprozirni. Kada se disk okreće, senzor se pali i gasi kada izvor svjetlosti dotiče prozirni ili neprozirni dio na disku. Tako enkoder proizvodi signale kvadratnog valnog oblika, koji daje kutni položaj. Rezolucija enkodera se označava sa PPR i označava broj impulsa koje enkoder ostvari za vrijeme jednog okretaja. Inkrementalni enkoder ne daje apsolutni položaj nego samo prati promjene položaja i smjer kretanja. [13]



Slika 2.9. Način rada inkrementalnog enkodera i odabrani enkoder

Za izradu eksperimentalnog postava odabran je inkrementalni enkoder *MBI 3806 AB 600 24C 2M*. Način rada enkodera i odabrani enkoder su prikazani na slici 2.9.

### 2.2.3.2. Remenski prijenos

Budući da je potrebno odrediti linearan pomak matice, a inkrementalni enkoder mjeri okretaje, u eksperimentalnom postavu se koristi i remenski prijenos. Inkrementalni enkoder se spaja na remenicu s nosačem, a s druge strane se nalazi još jedna remenica s nosačem. Remenice su spojene remenom koji ide linearno uz navojno vreteno i spojen je s maticom. Kada se matica linearno pomiče, pomiče se i remen te okreće sa sobom ležaj i enkoder.

Za izradu eksperimentalnog postava odabrane su dvije zupčaste remenice naziva *PM21T5/16* te remen naziva *EU1115T5/10*, koji su prikazani na slici 2.10.



Slika 2.10. Odabrana remenica i remen

## 2.3. Modeliranje i simulacija sustava

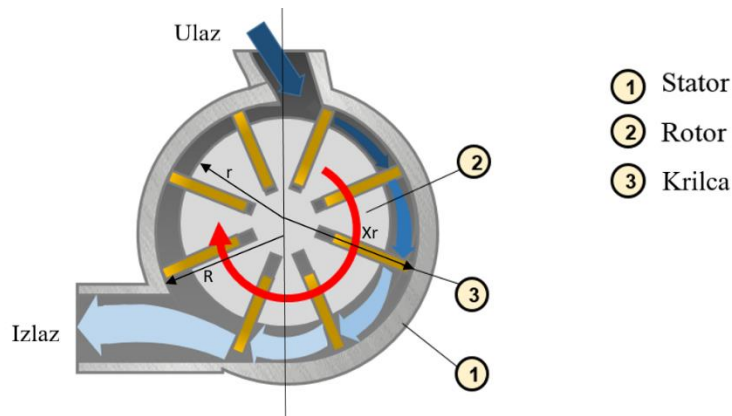
### 2.3.1. Dinamički model sustava

Prije same izrade eksperimentalnog postava poželjno je napraviti simulaciju sustava, a prije toga je potrebno izvesti dinamički model sustava. Na slici 2.11. prikazana je geometrija pneumatskog motora i način rada, tj. smjer i protok zraka. Veličine koje su potrebne za dinamički model motora označene su na slici, a to su:

$R$  – radijus statora ili tijela motora,

$r$  – radijus rotora motora,

$x_r$  – radni radijus lamele izmjeren od središta motora.



Slika 2.11. Geometrija pneumatskog motora

Izraz za  $x_r$  je važan pri izvođenju dinamičkog modela te glasi: [14]

$$x_r = e \cos \varphi + \sqrt{R^2 - e^2 \sin^2 \varphi}, \quad (2.1)$$

gdje su:

$e$  – ekscentricitet ( $e = R - r$ ),

$\varphi$  – kut zakreta motora.

Dinamika sustava može se opisati sljedećom jednačinom: [14]

$$J\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + K\varphi = T, \quad (2.2)$$

gdje su:

$J$  – moment inercije sustava,

$B$  – koeficijent trenja,

$K$  – konstanta elastičnosti,

$T$  – okretni moment sustava,

$\dot{\varphi}$  – kutna brzina,

$\ddot{\varphi}$  – kutno ubrzanje.

Okretni moment  $T$  se može napisati kao: [14]

$$T = (p_1 - p_2)(x_r - r)(x_r - r) \frac{L}{2}, \quad (2.3)$$

gdje su:

$p_1, p_2$  – tlakovi u komorama,

$L$  – duljina unutrašnjosti motora.

Kada se jednačbe (2.1) i (2.3) uvrste u jednačbu (2.2) dobije se:

$$J\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + K\varphi = (p_1 - p_2)(e^2 \cos 2\varphi + 2Re \cos \varphi + R^2 - r^2)\frac{L}{2}. \quad (2.4)$$

Ova jednačba se zapisuje u obliku jednačbi prostora stanja, tako da se dobiva:

$$x_1 = \varphi, x_2 = \dot{\varphi}, u = p_1 - p_2, \quad (2.5)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{\varphi} = x_2, \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = \ddot{\varphi} = \frac{1}{J} \left[ (p_1 - p_2)(e^2 \cos 2\varphi + 2Re \cos \varphi + R^2 - r^2)\frac{L}{2} - B\dot{\varphi} - K\varphi \right] = \\ \frac{1}{J} \left[ \frac{L}{2} u(e^2 \cos 2x_1 + 2Re \cos x_1 + R^2 - r^2) - Bx_2 - Kx_1 \right]. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Ovakav dinamički model prikazuje promjenu kuta zakreta motora, a da bi se dobila promjena pomaka matice navojnog vretena treba definirati vezu između kuta zakreta motora i pomaka matice, koji će se označiti sa  $x$ :

$$\varphi = 0,03768 x. \quad (2.8)$$

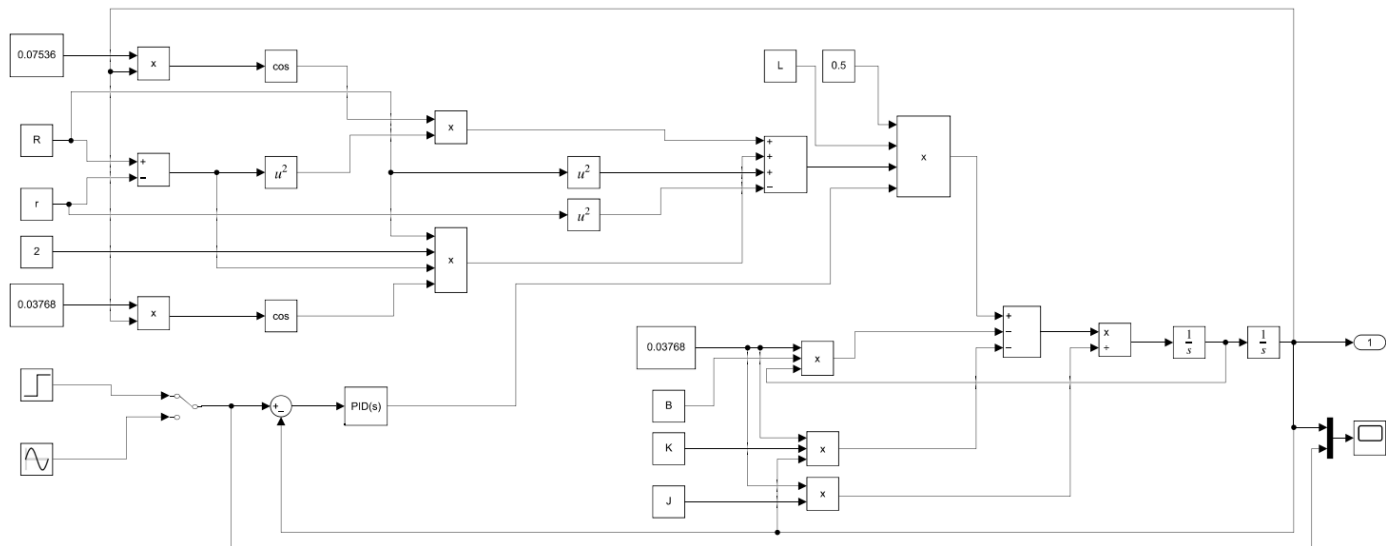
Konačna jednačba je onda:

$$\ddot{x} = \frac{1}{0,03768J} \left[ \frac{L}{2} u(e^2 \cos(0,07536 x) + 2Re \cos(0,03768 x) + R^2 - r^2) - 0,03768(B\dot{x} + Kx) \right]. \quad (2.9)$$

### 2.3.2. Simulacija sustava

Pomoću dobivenih jednačbi simulirat će se rad sustava u programskom paketu *Simulink*, koji je dio platforme *MATLAB*. Izrađuje se *Simulink* model, u sklopu kojeg se podešava PID regulator, a model je prikazan na slici 2.12. U *MATLAB*-u je potrebno podesiti parametre sustava, koje se nalaze u tablici 1.

Ulazne funkcije su step funkcija i sinusna funkcija. Rezultati simulacije su prikazani grafovima na slici 2.13., gdje su zadane funkcije prikazane crvenom bojom, a odzivi su prikazani plavom bojom.



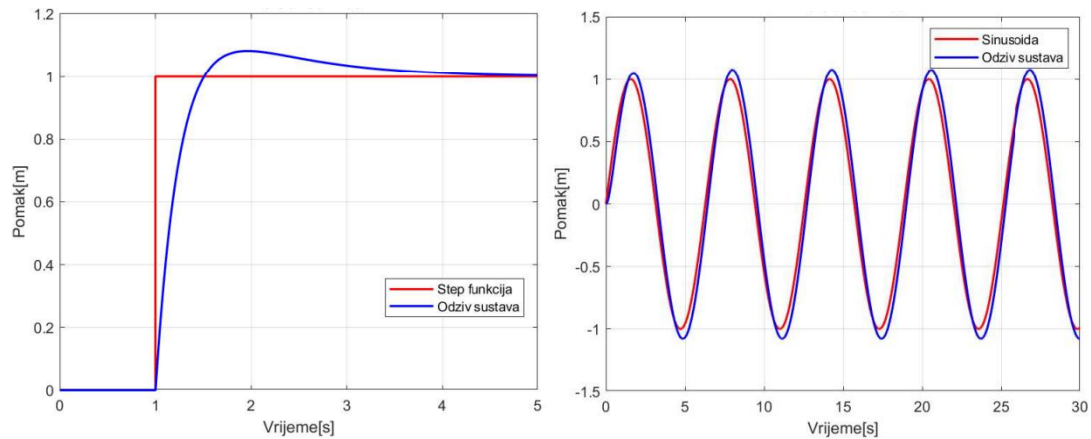
Slika 2.12. Simulink model

Tablica 1. Parametri sustava

Naziv	Oznaka	Iznos
Radijus statora motora	$R$	0,023 m
Radijus rotora motora	$r$	0,0175 m
Ekscentricitet	$e$	0,0055 m
Moment inercije motora	$J_1$	$4,59 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$
Moment inercije pogonske remenice	$J_2$	$1,696 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$
Moment inercije sustava	$J = J_1 + J_2$	$6,286 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$
Koeficijent trenja	$B$	0,05 Ns/m
Konstanta elastičnosti	$K$	0,01 N/m
Duljina unutrašnjosti motora	$L$	0,07 m

Na grafovima se vidi da odziv dobro prati zadane referentne funkcije. Međutim u slučaju step ulazne funkcije, događa se prebačaj i nakon toga je potrebno duže vrijeme da se stabilizira na zadanom položaju. Također u slučaju sinusne funkcije se događa mali prebačaj, jer odziv prelazi amplitudu te je prisutno dodatno kašnjenje.



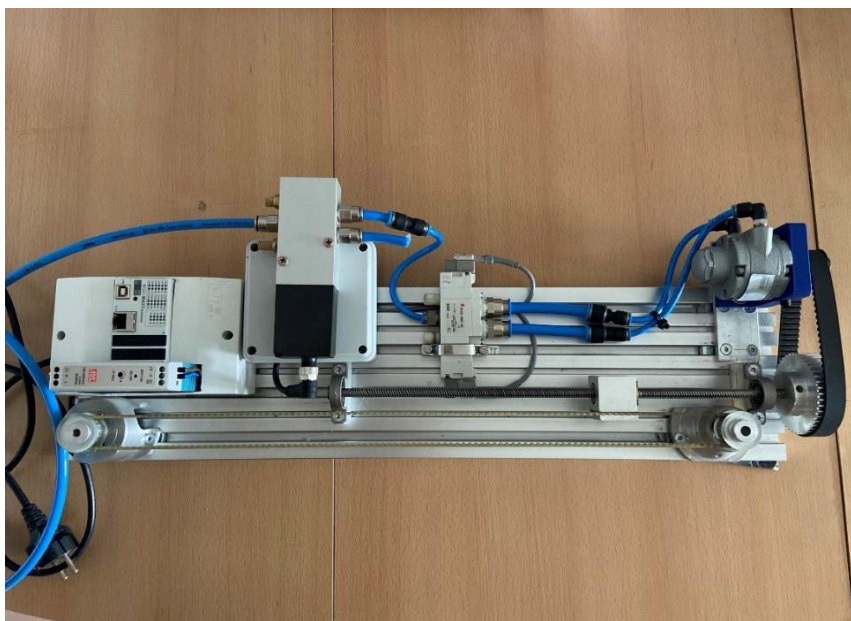


Slika 2.13. Rezultati simulacije

## 2.4. Izrada eksperimentalnog postava i projektiranje regulatora

### 2.4.1. Izrada eksperimentalnog postava

Za izradu eksperimentalnog postava najprije je bilo potrebno nabaviti sve dijelove. Nosač enkodera i nosač za remenicu su strojno izrađeni, a nosač motora je 3D printan. Nakon toga se dijelovi vijcima pričvršćuju na svoje nosače, a oni se vijcima pričvršćuju na aluminijski profil. Još se remenice postavljaju na pripadajuća vratila te se spajaju remenima. Onda se na aluminijski profil pričvršćuje kutija za elektroniku te se u nju postavljaju pripadajuće komponente i spajaju se žicama. Na kraju se proporcionalni ventil pneumatskim cijevima spaja na kompresor i on/off ventil, a taj ventil se pneumatskim cijevima spaja na motor. Gotov eksperimentalni postav prikazan je na slici 2.14.



Slika 2.14. Gotov eksperimentalni postav

### 2.4.2. Projektiranje regulatora

Programski kod je napisan u *Arduino* softveru, koji je kompatibilan sa *Controllino* PLC-om. Na slici 2.15. prikazan je početni dio programskog koda, gdje se postavljaju varijable potrebne za izvršavanje koda. Varijabla *Brojac* će prikazivati broj impulsa enkodera, varijabla *Setpoint* je postavljena željena pozicija, a varijabla *Output* je izlazni napon koji se šalje na proporcionalni ventil. Za postavljanje PID regulatora još je potrebno odrediti proporcionalnu, integralnu i derivacijsku komponentu.

```
#include <Controllino.h>
#include <PID_v1.h>

double Brojac = 0;
double x = 0;

double Setpoint;
double Output;
int Razlika;

double Kp = 1;
double Ki = 1;
double Kd = 0;

PID myPID(&Brojac, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, P_ON_M, DIRECT);
```

Slika 2.15. Početni dio programskog koda

Inicijalizacija ulaza i izlaza prikazana je na slici 2.16. Ulazi su signali sa enkodera, a izlazi su napon proporcionalnog ventila i releji za aktiviranje on/off ventila. Također se pokreće PID regulator i postavljaju se granice izlaznog napona. Na kraju setup-a se pokreće motor tako da se šalje određeni napon na proporcionalni ventil te se aktivira relej za aktiviranje on/off ventila i propuštanje zraka.

```
void setup() {

    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
    myPID.SetOutputLimits(155, 255);

    pinMode(CONTROLLINO_IN0, INPUT_PULLUP);
    pinMode(CONTROLLINO_IN1, INPUT_PULLUP);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(CONTROLLINO_IN0), enkoder0, RISING);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(CONTROLLINO_IN1), enkoder1, RISING);

    pinMode(CONTROLLINO_A00, OUTPUT);
    pinMode(CONTROLLINO_R0, OUTPUT);
    pinMode(CONTROLLINO_R1, OUTPUT);

    analogWrite(CONTROLLINO_A00, 127);
    digitalWrite(CONTROLLINO_R1, HIGH);

    Serial.begin(9600);

}
```

Slika 2.16. Inicijalizacija ulaza i izlaza

Na slici 2.17. prikazane su funkcije koje služe za brojanje impulsa enkodera te za prepoznavanje smjera gibanja, a glavna petlja je prikazana na slici 2.18.

```

void enkoder0() {
    if(digitalRead(CONTROLLINO_IN1) == LOW) {
        Brojac++;
        Razlika = Setpoint - Brojac;
    }
    else {
        Brojac--;
        Razlika = Setpoint - Brojac;
    }
}

void enkoder1() {
    if(digitalRead(CONTROLLINO_IN0) == LOW) {
        Brojac--;
        Razlika = Setpoint - Brojac;
    }
    else {
        Brojac++;
        Razlika = Setpoint - Brojac;
    }
}

```

**Slika 2.17. Funkcije za brojanje impulsa enkodera**

```

void loop() {
    if(Brojac != x){
        x = Brojac;
    }

    for(int i = 0; i < 10; i++) {
        Setpoint = random(0,3300);
        Razlika = Setpoint - Brojac;

        if(i == 9){
            Setpoint = 0;
        }

        while(Razlika >= 0){
            myPID.SetControllerDirection(DIRECT);
            myPID.Compute();
            analogWrite(CONTROLLINO_A00,Output);

            digitalWrite(CONTROLLINO_R1,HIGH);
            digitalWrite(CONTROLLINO_R0,LOW);

            Serial.print(Setpoint);
            Serial.print(",");
            Serial.println(Brojac);

            if(Razlika >= 0 && Razlika <= 5) {
                digitalWrite(CONTROLLINO_R0, LOW);
                digitalWrite(CONTROLLINO_R1, LOW);
                break;
            }
        }

        while(Razlika <= 0){
            myPID.SetControllerDirection(REVERSE);
            myPID.Compute();
            analogWrite(CONTROLLINO_A00,Output);

            digitalWrite(CONTROLLINO_R0,HIGH);
            digitalWrite(CONTROLLINO_R1,LOW);

            Serial.print(Setpoint);
            Serial.print(",");
            Serial.println(Brojac);

            if(Razlika >= -5 && Razlika <= 0) {
                digitalWrite(CONTROLLINO_R0, LOW);
                digitalWrite(CONTROLLINO_R1, LOW);
                break;
            }
        }

        delay(5000);
    }
    exit(0);
}

```

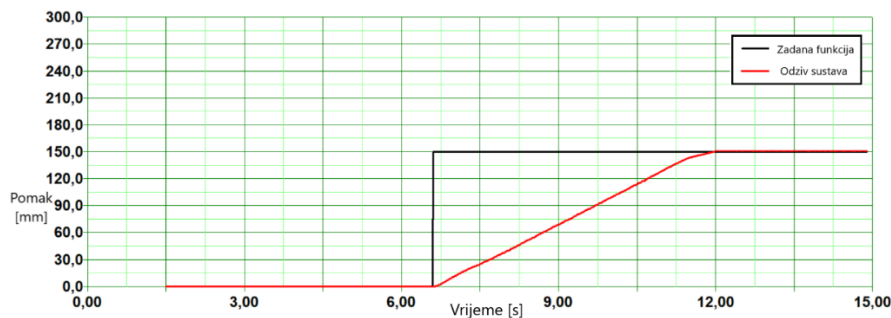
**Slika 2.18. Glavna petlja**

Izvodi se *for* petlja u kojoj se zadaju nasumične pozicije koje bi matica trebala postići, provjerava se razlika između trenutne i zadane pozicije te se u ovisnosti o njoj izvode *while* petlje. Prva *while* petlja se izvodi ako matica još nije dostigla zadanu poziciju, a druga *while* petlja ako je matica prešla zadanu poziciju. Pozivaju se PID funkcije u kojima se računa izlaz

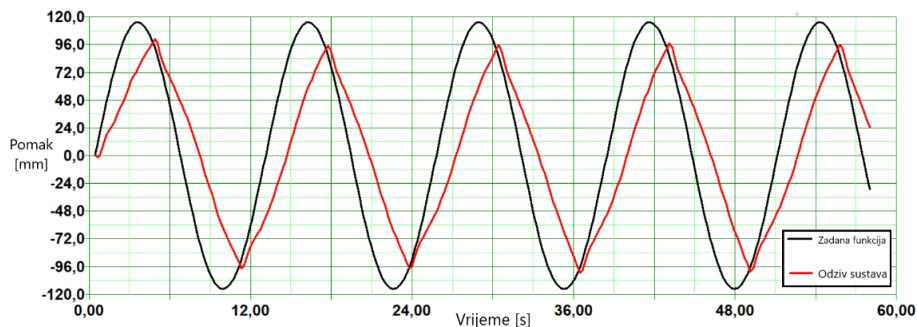
te se taj izlaz šalje na proporcionalni ventil. Da bi se odredio smjer kojim je potrebno ići, aktivira se određeni relej. Ako su zadana i trenutna pozicija jednake, releji se isključuju te se izlazi iz petlje.

### 2.4.3. Eksperimentalni rezultati

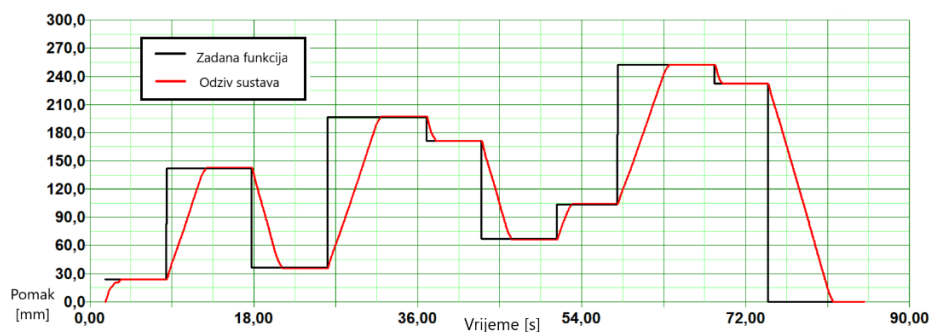
Programski kod se učita u *Controllino*, sustav počinje sa radom te se ispisuju grafovi. Na slikama 2.19., 2.20. i 2.21. prikazani su odzivi na zadane funkcije – step funkciju, sinusnu funkciju i funkciju nasumičnih točaka. Odziv na step funkciju i funkciju nasumičnih točaka je sporiji i potrebno je duže vrijeme da se dosegne željena vrijednost, ali nakon dostizanja vrijednosti nema titranja oko pozicije. Odziv sinusne funkcije je nešto manje točan jer ne uspijeva doseći amplitudu te ostvariti tako brzu promjenu pa dolazi do kašnjenja.



Slika 2.19. Odziv na step funkciju



Slika 2.20. Odziv na sinusnu funkciju



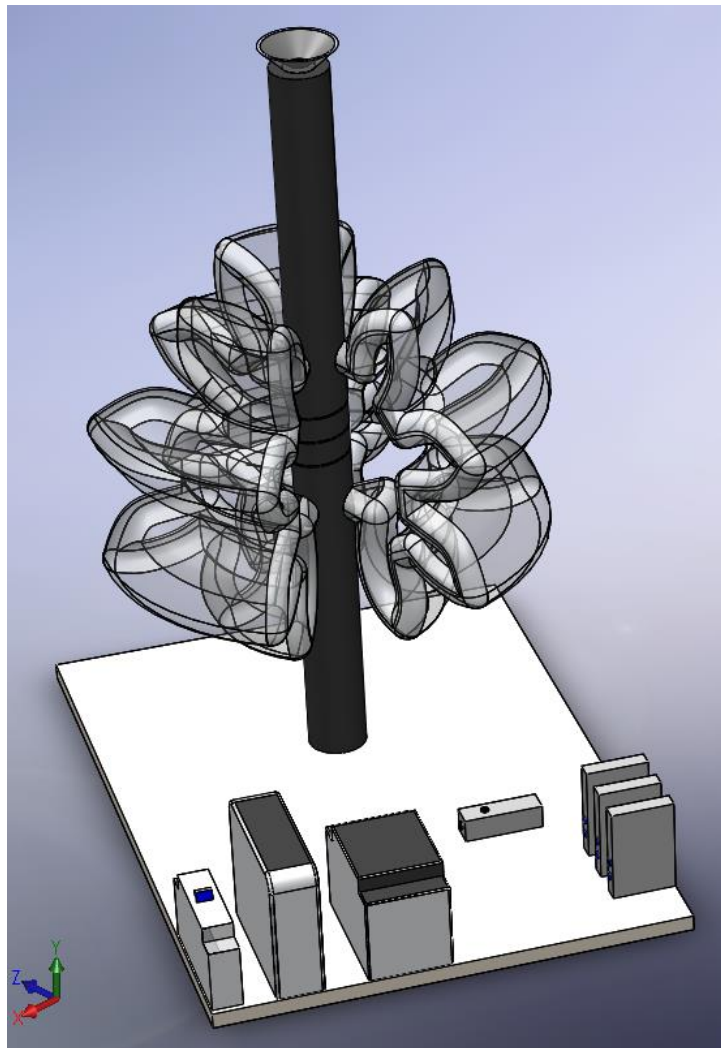
Slika 2.21. Odziv na funkciju nasumičnih točaka

### 3. FLEKSIBILNI PNEUMATSKI MANIPULATOR

#### 3.1. Projektiranje manipulatora

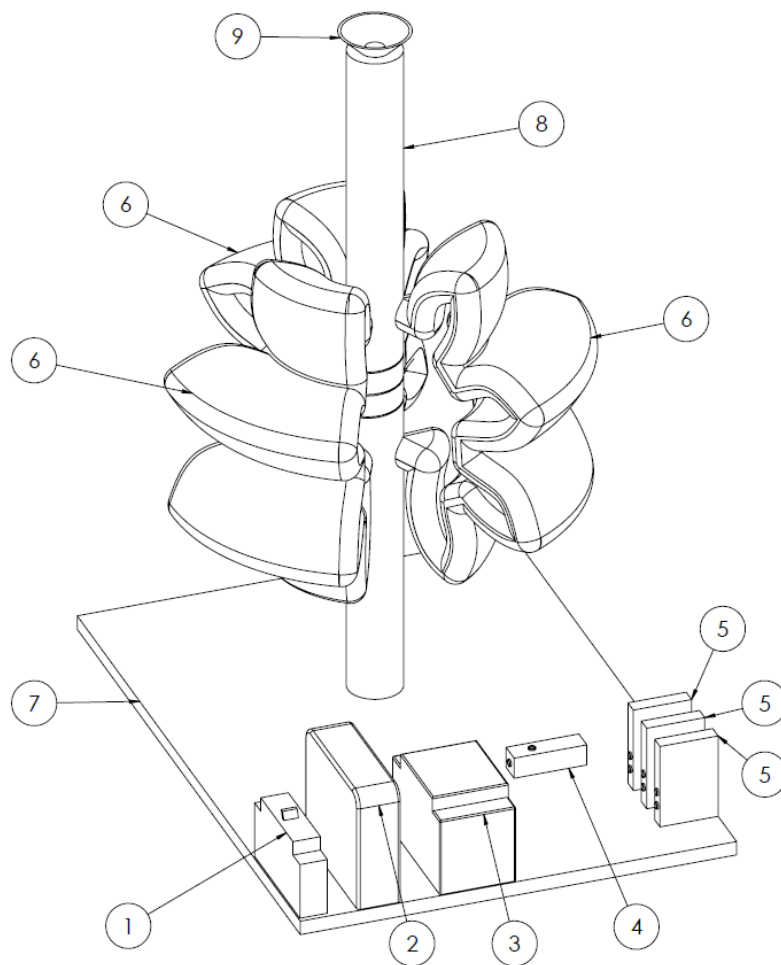
Manipulator se sastoji od dvaju povezanih podsustava - upravljačkog i pogonskog. Upravljački sustav služi kao jedinica za upravljanje dovodom stlačenog zraka pogonskim članovima. Sastoji se od 4 uređaja: sigurnosne sklopke, AC/DC pretvarača, programabilnog logičkog kontrolera (PLC) te od ventila, koji se još nazivaju i razvodnici.

Na slikama 3.1. i 3.2. prikazani su pojednostavljeni CAD prikazi fleksibilnog pneumatskog manipulatora, a radi preglednosti su izostavljena ožičenja i cjevovodi.



Slika 3.1. Idejni projekt fleksibilnog pneumatskog manipulatora

Djelovanje upravljačkog sustava je sljedeće: na sigurnosnu sklopku se dovodi izmjenična struja čija je krajnja namjena aktiviranje elektromagnetnih ventila kojima će se regulirati protok stlačenog zraka. Ako je sklopka u aktivnom stanju, struja teče prema AC/DC pretvaraču, koji ju pretvara u istosmjernu struju. Nadalje, istosmjerna struja teče prema PLC-u, koji prima signal iz osobnog računala. Ukoliko je izlaz iz PLC-a u visokom stanju, istosmjerna struja se propušta prema ventilu. Sustav je idejno zamišljen da ventili propuštaju zrak prema aktuatorima kada nisu aktivirani, a kada se aktiviraju dolazi do zatvaranja protoka prema aktuatorima te se stlačeni zrak preusmjerava prema ejektoru i sustav je spreman za prihvata objekta. Ovaj način isključenja aktuatora aktiviranjem ventila je pogodniji iz razloga što će u radu manipulatora češće raditi 2 aktuatora, dok će treći biti isključen, a zrak s trećeg aktuatora će biti korišten za podizanje i držanje objekata. Stoga će doći do manjeg povlačenja struje iz mreže te je posljedično manje vjerojatno da će doći do preopterećenja kapaciteta upravljačkog sustava (prvenstveno AC/DC pretvarača).



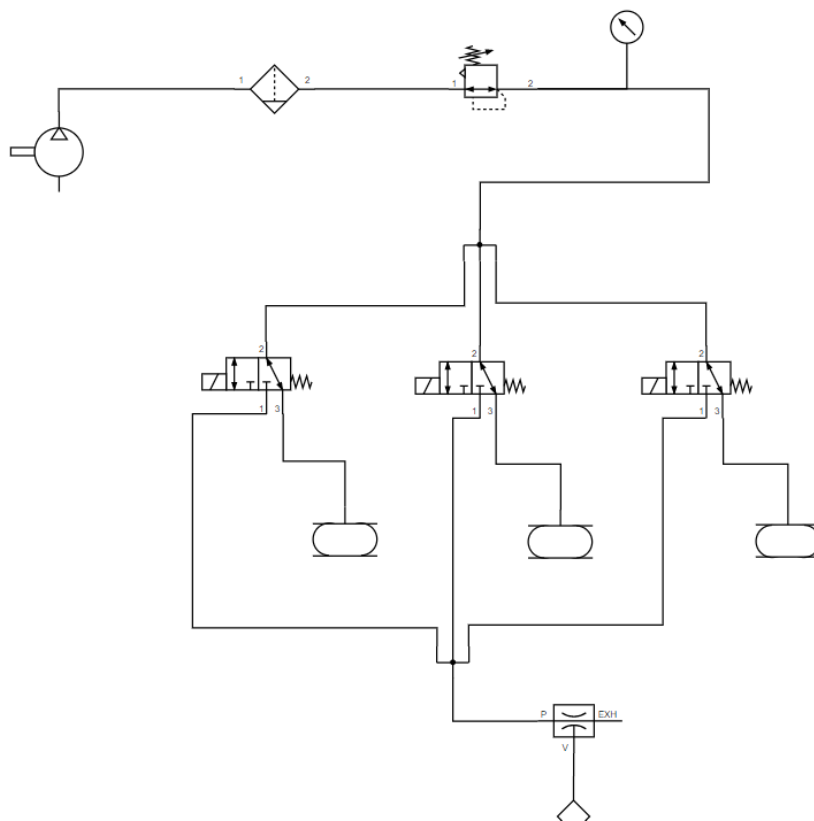
**Slika 3.2. Shema elemenata fleksibilnog pneumatskog manipulatora**

Na slici 3.2. označeni su:

1. Sigurnosna sklopka
2. AC/DC pretvarač
3. Programabilni logički kontroler
4. Ejektor
5. Ventil (x3)
6. Pneumatski aktuatori na napuhavanje (x3)
7. Osnovna nosiva ploča
8. Nosač
9. Vakuumska hvataljka

Pogonski sustav sastoji se od dotoka stlačenog zraka koji dotječe iz kompresora do ventila. Ukoliko je ventil isključen (kako je objašnjeno u prethodnom odlomku), zrak će se propuštati do aktuatora, koji će napuhavanjem opteretiti nosač momentom te će ga saviti u smjeru aktuatora koji nije napuhan. Tada manipulator teoretski dolazi u poziciju kada preuzima teret. Preko aktiviranog ventila stlačeni zrak dolazi do ejektora, koji služi kao generator vakuuma. Slijedi prijanjanje vakuumske prihvatnice objektu te se usred nastanka vakuuma objekt zadržava na vrhu manipulatora. Nakon toga slijedi manipulacija aktuatorima točno određenim slijedom kako bi se ostvarilo gibanje između krajnjih pozicija. Prilikom manipulacije je bitno da uvijek jedan ventil bude pobuđen, kako ne bi došlo do prekida vakuuma u vakuumskoj hvataljki. O ovome detaljnije slijedi u dijelu o programiranju manipulatora.

Na slici 3.3. shematski je prikazan pogonski podsustav manipulatora. Osim elemenata navedenih u prethodnom odlomku, ovdje vidimo još neke elemente koji nisu nužni za obavljanje osnovne funkcije manipulatora, ali služe za poboljšanje temeljnog sustava. To su elementi prikazani nakon kompresora: filter za zrak, sigurnosni ventil i mjerac tlaka. Ovi elementi nisu nužni ako pouzdano znamo da je stlačeni zrak koji ulazi u sustav čist, bez slobodnih čestica te tlaka manjeg od dopuštenog konstrukcijskim uvjetima sustava. Ukoliko čistoća stlačenog zraka nije garantirana i ulazni tlak varira na iznose veće od dopuštenog, mudro bi bilo koristiti i te dodatne elemente unutar sustava. Budući da je čvrstoća polimernog aktuatora manja od one kod konvencionalnih cilindara, tlak veći od dopuštenog, kao i nastrojavanje krutih čestica velikom brzinom, mogli bi dovesti do pucanja aktuatora te samim time i do njegova isključivanja iz rada.



Slika 3.3. Pneumatska shema manipulatora

### 3.2. Opis komponenti sustava

#### 3.2.1. Upravljački elementi

##### 3.2.1.1. 1-polni prekidač AMPARO 10Ka, B 2A

To je prekidač proizvođača tvrtke *Schrack* koji služi kao sigurnosna sklopka, a nalazi se na slici 3.4. U slučaju da dođe do kratkog spoja ili preopterećenja strujnog kruga upravljačkog sustava, zaštitna sklopka prekida dotok struje i tako osigurava da ne dođe do oštećivanja ostalih elemenata.

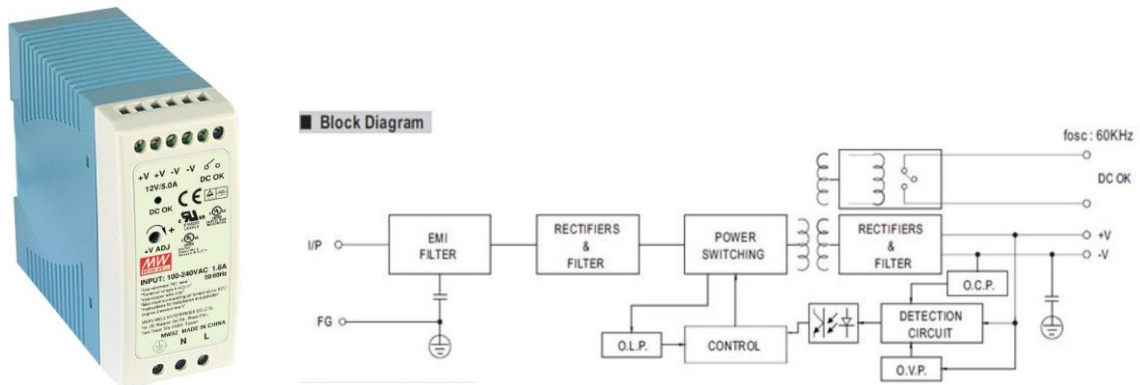


Slika 3.4. Prekidač AMPARO



### 3.2.1.2. MDR-60-24, DC 24 V 2,5A

Pretvarač proizvođača *Mean Well*, koji izmjeničnu struju pretvara u istosmjernu, nalazi se na slici 3.5. Kako je struja koja se preuzima iz mreže izmjenična, a komponente koje se koriste u upravljačkom sustavu rade na istosmjernu, nužno je provesti postupak ispravljanja signala. Ulaz u pretvarač je izmjenična struja iz mreže napona 110-240 V, dok je izlaz istosmjerna struja od maksimalno 2,5A, napona 24 V.



Slika 3.5. MDR-60-24 i pripadajuća električna shema [15]

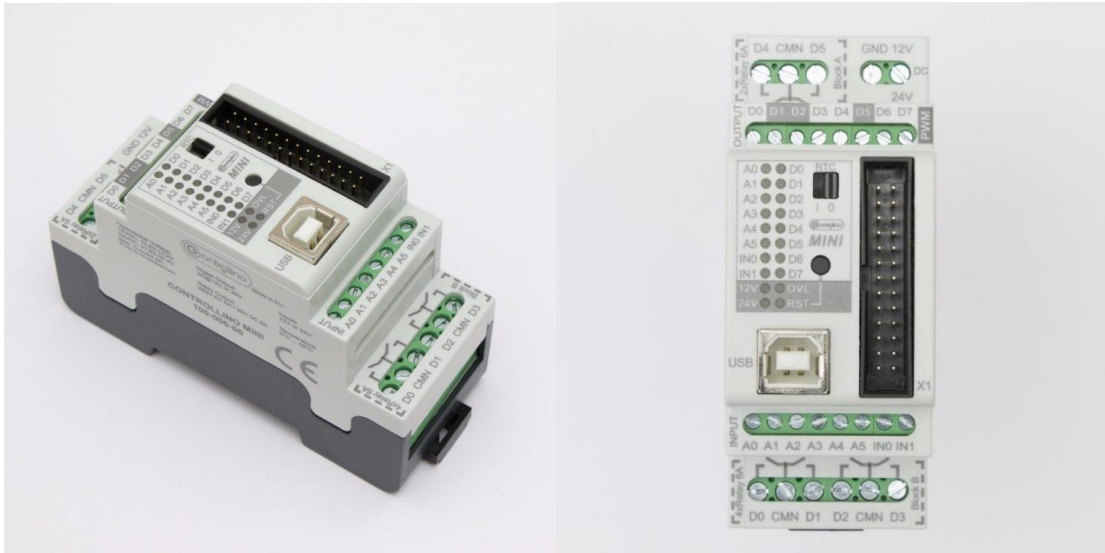
### 3.2.1.3. Controllino MINI

*Controllino* je programabilni logički kontroler nastao na ideji PLC-a *Arduina*. Kompatibilan je s *Arduinovim* programskim jezikom koji je zapravo pojednostavljena i prilagođena verzija programskih jezika, poput C i C++. *Controllino MINI* je upotrebljiv u različitim projektima, od onih jednostavnijih, za početnike koji tek ulaze u područje automatizacije, do složenijih primjena u industrijskom okruženju.

*Controllino MINI* dolazi sa sljedećim priključcima: [16]

1. Digitalni izlazi
2. Analogni/digitalni ulazi
3. Analogni ulazi
4. Real-time clock (RTC)
5. Relejni izlazi
6. Napajanje 12/24V
7. Ground (uzemljenje)
8. USB-port

Također ima tri digitalna izlaza koji su kompatibilni prilikom upotrebe pulsno-širinske modulacije (PWM). Spaja se na osobno računalo (PC) putem USB-B tipa priključka, a na njega se mogu spojiti i drugi elementi za upravljanje preko IDC porta. Na slici 3.6. prikazan je *Controllino MINI* i njegovi priključci.



Slika 3.6. Controllino *MINI* i njegovi priključci [16]

#### 3.2.1.4. Elektromagnetni ventil MHE2-MS1H-3/2G-QS-4-K

To je monostabilni 3/2 razvodnik proizvođača *Festo*, a nalazi se na slici 3.7. Kada elektromagnet nije aktiviran, ventil se nalazi u stabilnom položaju i protok između ulaza 1 i 2 je zatvoren, a kada se aktivira, uspostavlja se protok 1-2. Normalni nazivni protok mu iznosi 100 l/min, a raspon radnog tlaka je između -0.9 bar i 8 bar. Vrijeme uključivanja iznosi 1,7 ms, dok isključivanje traje 2 ms. [17]

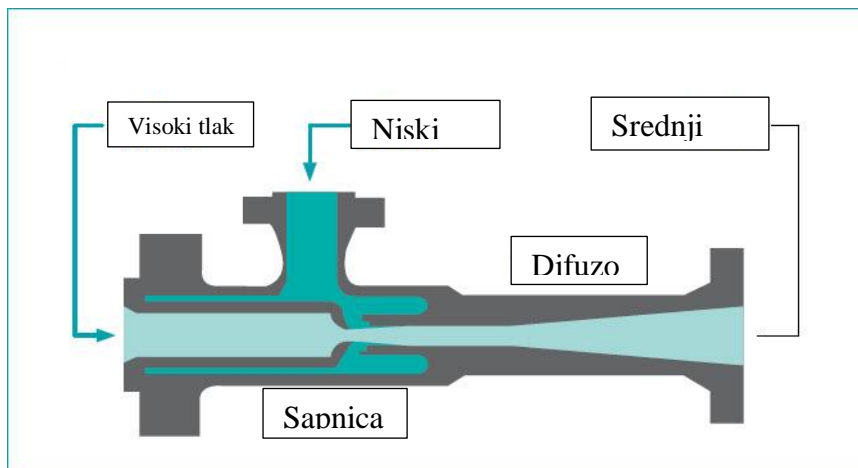


Slika 3.7. Ventil Festo *MHE2-MS1H-3/2G-QS-4-K* i njegova pneumatska shema [17]

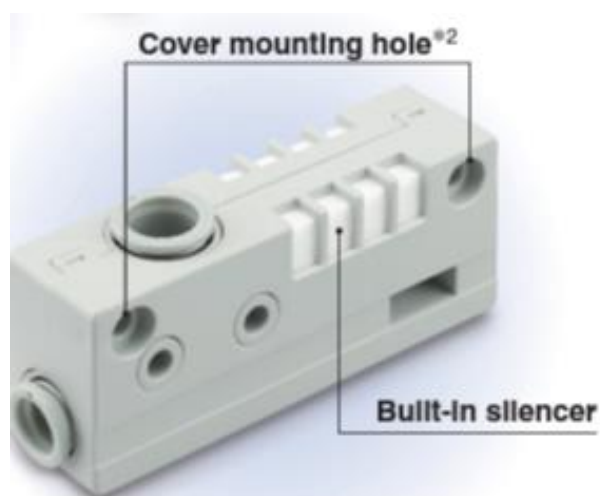
### 3.2.2. Pogonski elementi

#### 3.2.2.1. Ejektor ZH10B-06-06

Ejektor ima funkciju generatora vakuma između vakuumske čašice i objekta na koji se ona prihvaća. Djeluje na principu Venturijevog efekta. Kada mlaz fluida nailazi na suženje poprečnog presjeka tijekom strujanja, po zakonu kontinuiteta protoka, povećava se brzina fluida kroz suženje. Tada se statički tlak transformira u tlak brzine fluida. Kako se statički tlak prije suženja smanjuje, tako nastaje polje niskog tlaka u zoni prije suženja. Pravilnom konstrukcijom i izvedbom ejektora, ta zona niskog tlaka se može pretvoriti u zonu vakuuma gdje se postižu vrlo niski tlakovi sposobni za pridržavanje objekata. Na slici 3.8. je prikazan princip generiranja vakuuma, a na slici 3.9. izabrani ejektor.



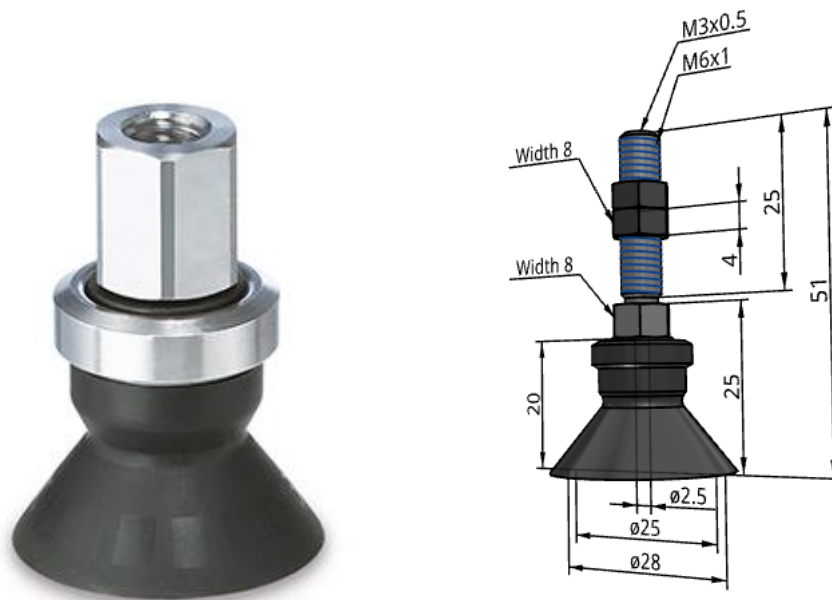
Slika 3.8. Princip generiranja vakuuma [18]



Slika 3.9. Ejektor ZH10B-06-06 [19]

### 3.2.2.2. Vakuumska hvataljka ZPT25DN-A6

Ova vakuumska hvataljka služi za prihvaćanje i držanje objekta manipulacije. Nalazi se na vrhu manipulatora pričvršćena na nosač. Pneumatskom cijevi je spojena na vakuumski izlaz ejektora. Nakon pokretanja ejektora stvara se polje nižeg tlaka unutar vakuumske hvataljke koja se onda priljubljuje uz objekt te ga pomoću vakuuma drži na poziciji. Čašica hvataljke je duboka, što odgovara ovakvom tipu manipulatora, gdje se očekuju objekti manjih dimenzija koji su zaobljeni i neravnih oblika. Također, čašica je načinjena od meke gume NBR koja je široko rasprostranjena u upotrebi u raznim industrijama zbog svoje otpornosti na otapala i korozivna sredstva. Proizvodi od ovog materijala su dosta čvrsti za upotrebu, a tankom stijenkom čašice se postiže kompromis između čvrstoće i potrebne fleksibilnosti hvataljke. Izabrana vakuumska hvataljka i njezine dimenzije nalaze se na slici 3.10. [20]



Slika 3.10. Vakuumska hvataljka ZPT25DN-A6 i njezine dimenzije [20]

### 3.3. Izrada dijelova i konstrukcije

Sa stanovišta meke robotike, u ovom radu značajni su pneumatski aktuatori na napuhavanje i nosivi članci od polimernog materijala. Oni su izrađeni korištenjem komercijalno dostupnih materijala i proizvodnim postupcima neindustrijske razine.

### ***3.3.1. Pneumatski aktuatori na napuhavanje***

Pneumatski aktuatori na napuhavanje su izrađeni od polimernog materijala koji je mješavina polietilena i poliamida. Ovim miješanjem je postignuto da nastali materijal ima dobra svojstva i jednog i drugog konstituenta.

Polietilen je poznat kao materijal slabe tvrdoće i čvrstoće, te sam nije prikladan za proizvodnju elemenata koji djeluju pod povišenim tlakom. No njegova dobra svojstva su fleksibilnost i duktilnost. Jedan je od najčešće korištenih materijala na svijetu te je samim time vrlo lako dostupan. Koristi se u razne svrhe, od svakodnevnih primjena, poput plastičnih vrećica, pa do vrlo složenih industrijskih potreba, poput spremnika za gorivo u vozilima. Razlog njegove rasprostranjenosti je, uz laku dostupnost, i činjenica da je kemijski vrlo postojan. Ova kemijska postojanost je posljedica nepolarne strukture molekule polietilena, a vrlo jaku otpornost ovaj materijal pokazuje, između ostaloga, i na kiseline, lužine, soli te mineralna ulja. [21] [22]

Poliamid je poznat pod trgovačkim imenom najlon. Na glasu je kao vrlo čvrst i tvrd materijal među polimerima te ima znatnu otpornost na povišen tlak. Za razliku od polietilena ima vrlo dobru toplinsku postojanost, no slabije je kemijski postojan. Poliamid ima širok raspon upotreba u industriji. Koristi se u prehrambenoj industriji kao pakiranje za hranu zbog svoje dobre nepropusnosti za zrak i toplinske postojanosti, što je svojstvo koje je potrebno i kod aktuatora na napuhavanje. Nadalje, koristi se za dijelove motora u vozilima, a u elektronici kao baza za tiskane ploče i kao izolacija ožičenja. [23]

Mješavina ovih dvaju materijala stoga rezultira svojstvima koje povoljno utječu na rad pneumatskog aktuatora na napuhavanje. Dobiven materijal je čvrst, otporan na povišeni tlak, nepropustan za zrak, ali u isto vrijeme i dovoljno elastičan da ne dođe do pucanja prilikom neizbježne elastične deformacije.

Ovaj materijal je komercijalno dostupan u obliku vakuumskih vrećica za čuvanje hrane, širine 120mm i duljine 6m. Dolazi u obliku dvoslojne folije čiji su bočni krajevi toplinski zavareni, a po mjeri se može zavarivati isto tako koncentriranim pritiskom pri povećanoj temperaturi.

Za izradu jednog fleksibilnog pneumatskog aktuatora potreban je jedan metar ove folije. Na krajevima su izrađeni otvori za ulaz i izlaz stlačenog zraka istih dimenzija, sa svake strane po jedan. Nakon toga su krajnji rubovi također toplinski zavareni uređajem za vakuumiranje koji ima i pripadajuću funkciju. Slijedi slaganje folije u formu 'harmonike' te su na kraju slojevi međusobno zalijepljeni dvostranom ljepljivom trakom, kako bi držali složenu formu potrebnu

za prijenos rezultantne sile iz tlaka stlačenog zraka. Ukupna masa jednog aktuatora s priključnim cijevima iznosi 25 grama. Na slici 3.11. prikazan je napuhani fleksibilni pneumatski aktuator.



**Slika 3.11. Napuhani fleksibilni pneumatski aktuator**

### **3.3.2. Nosač**

Središnji nosivi element se sastoji od dva spojena članka izrađena iz jednog komada. Osnova korištena za izradu članaka je cijev izrađena od ekspaniranog polietilena. Komercijalno je dostupna kao toplinska izolacija za grijane cijevi, unutarnjeg promjera  $\text{Ø}24$ , a vanjskog  $\text{Ø}36$ . Po sredini je cijev oslabljena zarezima kako bi se dozvolilo lakše savijanje na mjestu sfernog zgloba. Unutar cijevi je steznim spojem umetnuto ojačanje od čvršćeg materijala - PVC cijevi

Ø25, osim u području zgloba gdje je potrebno savijanje. Ojačanje doprinosi tome da se nosač savija samo u središnjem dijelu dok će ostatak ostati uspravan tijekom gibanja manipulatora. Masa izrađenog nosača iznosi 35 grama, a prikazan je na slici 3.12.



**Slika 3.12. (A) Nosač -neopterećen, (B) Nosač -opterećen uzdužnom vlačnom silom**

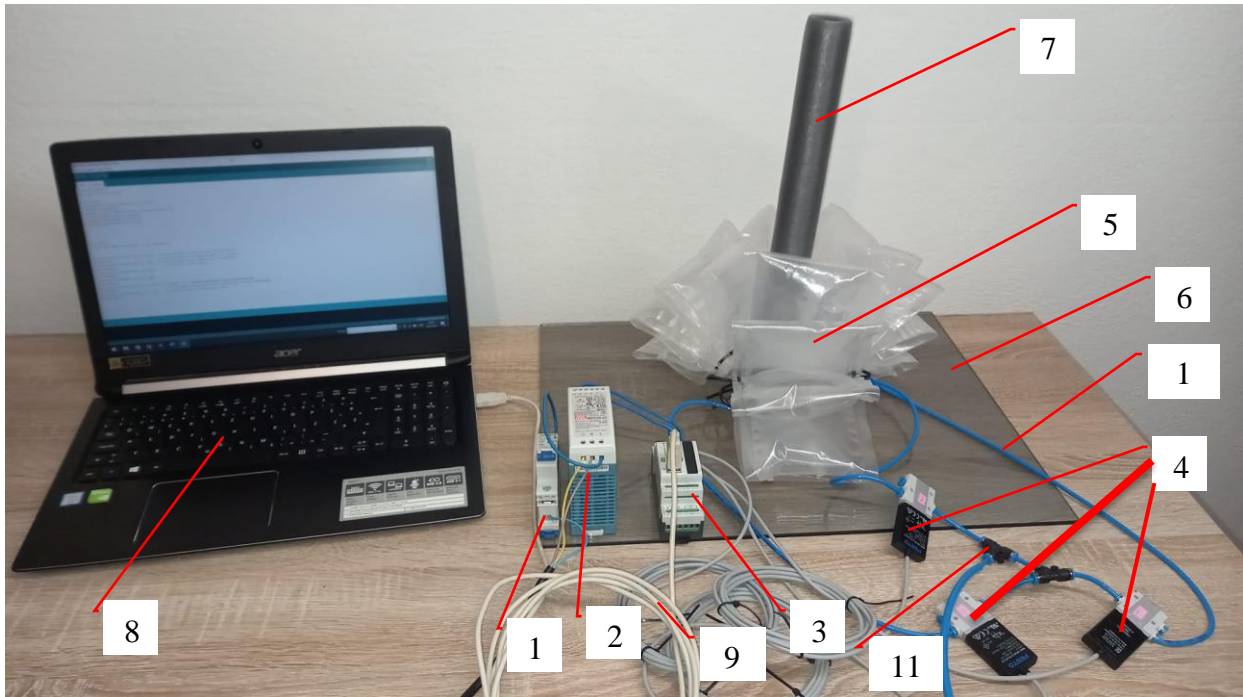
Oslabljenje središnjeg dijela također omogućava savijanje nosača dok se u isto vrijeme osigurava veza između dva članka koja omogućava stabilnost tijekom manipulacije objektima. Na slici 3.13. prikazano je savijanje nosača.



**Slika 3.13. Savijanje nosača**

### 3.4. Sklapanje konstrukcije

Na slici 3.14. prikazan je cjelovit sastavljen sklop fleksibilnog pneumatskog manipulatora spreman za upuštanje u rad.



Slika 3.14. Sklop fleksibilnog pneumatskog manipulatora

Na slici se nalaze:

1. Sigurnosna sklopka
2. AC/DC pretvarač
3. *Controllino MINI*
4. Ventil *Festo* (x3)
5. Pneumatski aktuatori na napuhavanje (x3)
6. Osnovna nosiva ploča
7. Nosač
8. Osobno računalo
9. USB kabel
10. Pneumatske cijevi
11. T-spoj



## **4. PNEUMATSKI MANIPULATOR ZA IZBJEGAVANJE PREPREKA NA POKRETNOJ TRACI**

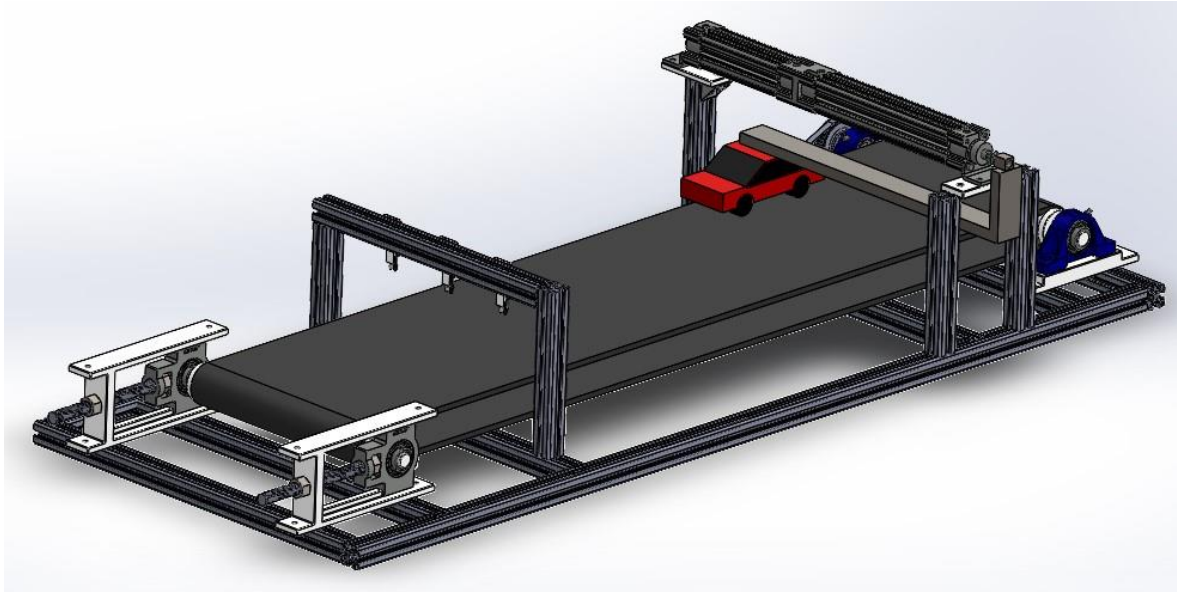
U ovom poglavlju će biti prikazano projektiranje, implementacija i funkcionalnost eksperimentalnog modela, koji na jednostavan način predstavlja mehatronički sustav i njegove značajke, preko problematike detektiranja predmeta i interakcije s njima. Zadatak modela je da se predmeti s pokretne trake, koje postavlja korisnik, očitaju senzorom te da se na osnovu toga, pneumatski manipulator pomakne u odgovarajuću poziciju. Time se objedinjuje korisna svrha i zabavna interakcija s korisnikom, a model će poslužiti kao prototip za rješavanje problema sortiranja u industriji.

Eksperimentalni model je podijeljen na dva sustava: pneumatski i transportni sustav. Pneumatski sustav se sastoji od višepoložajnog cilindra i ventila. Transportni sustav predstavlja svladavanje problema promjene prostora ili mjesta proizvoda pomoću transportnih sredstava, a jedno od tih je i pokretna traka. U ovom eksperimentalnom modelu je pokretna traka korištena kako bi predmete, koje na nju postavlja korisnik, prenijela do pneumatskog manipulatora i time se omogućila interakcija između predmeta i manipulatora.

Izrađeni eksperimentalni model može se nadograditi tako što se koristi obrnuta situacija od one u ovom radu, odnosno da se uz dodavanje hvataljke i/ili složenije kinematičke strukture hvataju određeni predmeti sa pokretne trake. Industrijsku primjenu ovakav model može pronaći u procesu sortiranja predmeta sa pokretne trake, čime bi se zamijenio monotoni i iscrpljujući ljudski rad.

### **4.1. Projektiranje i izrada eksperimentalnog modela**

Za početak je projektiran 3D model koji sadrži komponente pneumatskog i transportnog sustava, prikazan na slici 4.1. Postolje modela čine alu-profil, a transportni sustav se sastoji od ležajeva s izrađenom potporom, osovine te vratila, koje je spojeno na pogonski sustav. Pneumatski cilindar je oslonjen na pločice, koje su dalje spojene na alu-profile, dok je autić spojen preko projektirane konstrukcije na cilindar. Još jedan set alu-profila je poslužio za smještaj 3 senzora za detektiranje predmeta.



**Slika 4.1. Projektirani 3D model**

#### ***4.1.1. Projektiranje transportnog sustava***

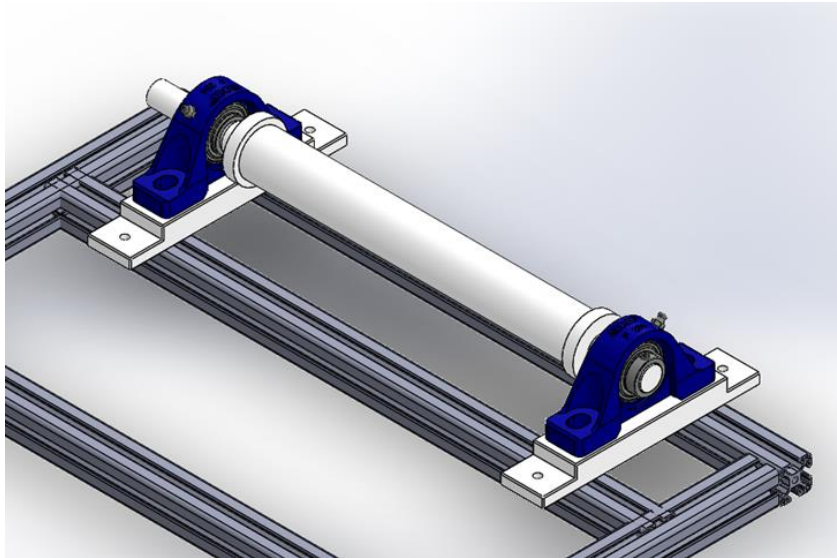
Transportni sustav se sastoji od gumene pokretne trake, koja je napravljena od PVC-a, materijala prirodnog za opće namjene, te je podijeljena na tri jednaka paralelna dijela. Nadalje, gumena traka se prostire preko dva bubnja, od kojih je jedno pogonjeno, odnosno vratilo, dok je drugo slobodno, odnosno osovina. U transportni sustav se ubrajaju i popratni elementi, poput kućišta sa upetim ležajevima, koji služe za uležištenje vratila, odnosno osovine. Osim toga, rađeni su i nosači kojima su kućišta, a time i cjelokupni transportni sustav, spojeni na postolje. Također je projektiran mehanizam zatezanja trake kojim se osigurava čvrstoća gumene trake i neometan transport objekata. Za pogonski sustav transportne trake je odabran elektromotor, koji preko zupčastog remena pokreće vratilo.

##### ***4.1.1.1. Vratilo i osovina***

Vratilo i osovina predstavljaju dva krajnja bubnja pokretne trake, a vratilo se po konstrukciji razlikuje od osovine time što je s jedne strane produljeno, zbog smještaja remenice kojim se vratilo preko pera pogoni. Sa strane se vratilo i osovina oslanjaju na ležajeve, koja su spojena na projektirane nosače ležajeva, te dalje na postolje.

Svi projektirani dijelovi, a time i vratilo, osovina te nosači ležajeva, su izrađeni aditivnom tehnologijom iz polimernog materijala, čime je osigurana čvrstoća i ekonomičnost dijelova. Za

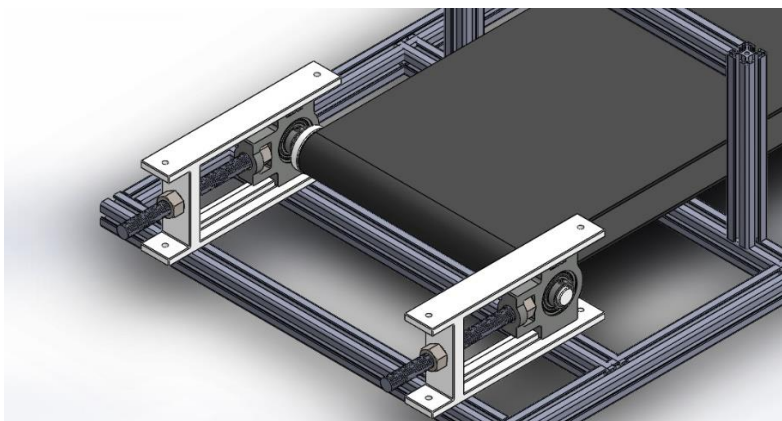
uležištenje vratila i osovine korištena su kućišta sa upetim ležajem. Za vratilo je korišten model *UCP 204*, proizvođača *SKF*, a na slici 4.2. je prikazan izgled spojenog vratila, ležajeva i nosača.



**Slika 4.2. Spoj vratila, ležajeva i nosača na postolje**

Za uležištenje osovine je korišten model *UCT 204*, također proizvođača *SKF*, koji je namijenjen za horizontalne pomake, što je bitno za mehanizam zatezanja trake.

Mehanizam za zatezanje gumene trake sastoji se od kućišta ležaja u kojem je uležištena osovina, odnosno bubanj gumene pokretne trake, navojnog vretena te od projektiranog naslona ležaja. Pomoću zatezanja matice metričko navojno vreteno, i bubanj zajedno s njim, se horizontalno pomiču i time zatežu pokretnu traku. Komponente mehanizma, spojene na postolje, prikazane su na slici 4.3.

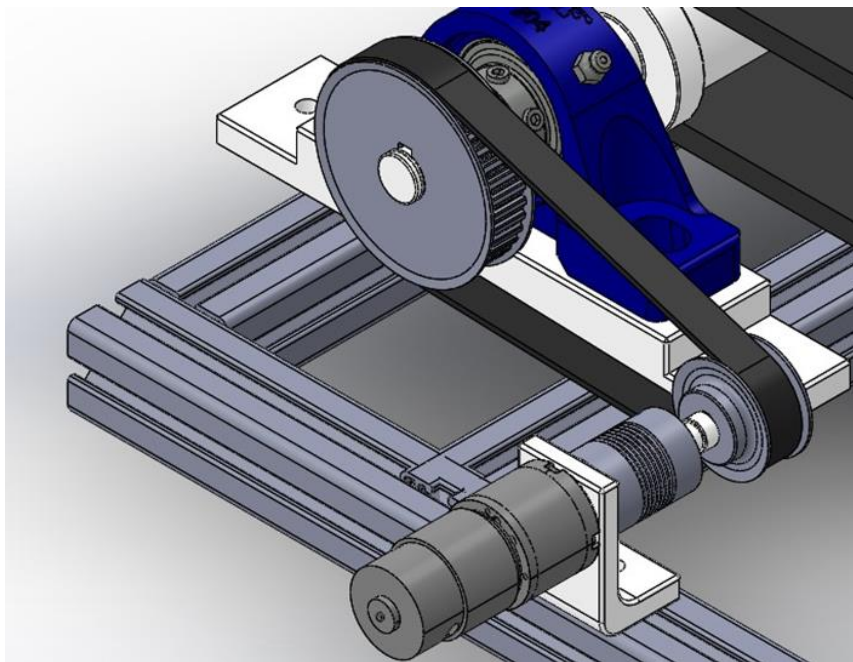


**Slika 4.3. Spoj mehanizma zatezanja trake na postolje**

#### 4.1.1.2. Pogonski sustav pokretne trake

Detaljan proračun za pogonski sustav transportne trake nije rađen u ovom radu te su komponente odabrane metodom pokušaja i pogreške. Za pogon transportne trake izabran je istosmjerni elektromotor, oznake *DSMP320-12-0014-BF*, proizvođača *MSW*. Oznakom elektromotora naznačen je nazivni napon od 12V i prijenosni omjer (14:1). Odabrani elektromotor sadrži ugrađeni reduktor s planetarnim prijenosom, kojim se smanjuje brzina vrtnje i povećava moment.

Elektromotor se spaja preko fleksibilne spojke i zupčastog remena na vratilo pokretne trake, a na postolje je spojen preko projektiranog držača. Odabrana je fleksibilna spojka *BKL 3/6/6* proizvođača *R+W* koja osigurava precizan prijenos okretnog momenta uz istovremeno kompenziranje aksijalnih, lateralnih i kutnih nepravilnosti. Također je projektirano malo vratilo koje se spaja na spojku te se s druge strane na nj spaja remenica. Projektirani pogonski sustav je prikazan na slici 4.4.



Slika 4.4. Prikaz pogonskog sustava spojenog na postolje

#### 4.1.2. Projektiranje i izrada pneumatskog sustava

U ovom potpoglavlju će biti prikazane sve komponente koje su povezane s radom pneumatskog sustava. Stoga će se govoriti o odabiru pneumatskog cilindra, o projektiranju potporne

konstrukcije te spajanju glavnog predmeta na cilindar. Također, bit će govora i o projektiranju konstrukcije za smještaj senzora, jer su oni neizravno povezani s radom pneumatskog cilindra.

#### *4.1.2.1. Odabir pneumatskog cilindra*

Odabran je višepoložajni pneumatski cilindar kako bi se izbjeglo korištenje proporcionalnih ventila i senzora položaja, čime je pojednostavljeno upravljanje. Višepoložajni cilindar je sastavljen od najmanje dva dvoradna cilindra. Postoje različite varijante s obzirom na različite hodove cilindra i broj položaja, koje postizemo aktiviranjem pojedinih ili svih cilindara. Korištenjem višepoložajnog cilindra omogućeno je korištenje jednostavnih i jeftinih dvopoložajnih (on/off) ventila.

Izabran je pneumatski cilindar s dvostrukim hodom tvrtke *SMC* s hodovima 100 mm + 100 mm, što znači da ima tri konačne pozicije, a to su 0 mm, 100 mm i 200 mm. Cilindar je prikazan na slici 4.5.



**Slika 4.5. Odabrani pneumatski cilindar**

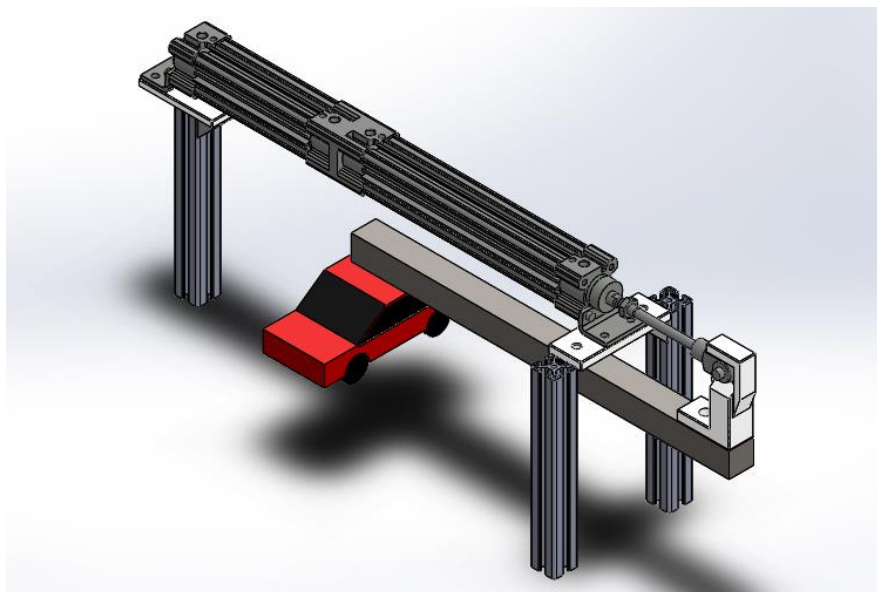
Oznaka pneumatskog cilindra je *CP96SDL32-100+100C-XC11*:

- CP96S – vrsta serijske proizvodnje
- D – sa automatskim prekidačem
- L – kutni profil za montiranje
- 32 – promjer klipnjače

- 100 – hod cilindra od početne do druge pozicije (mm)
- 100 – hod cilindra od druge do treće pozicije (mm)
- C – zračni jastuk na obje strane cilindra
- XC11 – cilindar s dvostrukim hodom, jedna klipnjača

#### 4.1.2.2. Projektiranje nosača pneumatskog cilindra i nosača predmeta

Potrebno je projektirati konstrukciju na kojoj će biti smješten pneumatski cilindar. Odabrani pneumatski cilindar sadrži kutne L-profile za montiranje sa provrtima za M6 vijak. Stoga je konstruirana pločica s provrtima na koje će se spojiti cilindar, a pločica je dalje spojena na vertikalni alu-profil, odnosno na postolje. S obzirom da se glavni predmet (pomični autić), zbog uštede na prostoru i komponentama cjelokupnog modela, nalazi ispod cilindra, potrebno je osloniti prednji dio cilindra na dva vertikalna alu-profila. Nadalje je potrebno konstruirati spoj autića na pneumatski cilindar. To je odrađeno pomoću dva kvadratna čelična profila i adaptivne pločice. Cjelokupna konstrukcija se nalazi na slici 4.6.



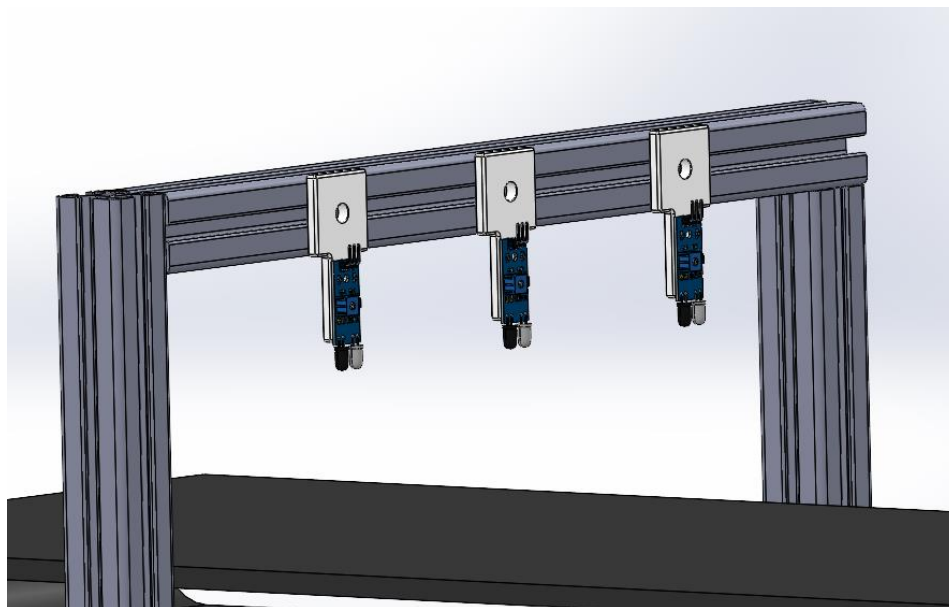
**Slika 4.6. Prikaz nosača pneumatskog cilindra i nosača glavnog predmeta**

#### 4.1.2.3. Odabir infracrvenog senzora i izrada nosača

Za zadatak detektiranja objekata s pokretne trake odabran je infracrveni senzor zbog svoje jednostavnosti, brzine prijenosa signala i ekonomičnosti. Koristit će se senzorski modul *HW*

201, koji se sastoji od fotodiode, fototranzistora, komparatora signala *LM393* i potenciometra za podešavanje udaljenosti očitavanja. Takav modul omogućuje direktno spajanje na mikrokontroler, a sadrži i LED svjetlo koje signalizira da je modul spojen na napajanje, te drugo LED svjetlo koje ukazuje da je predmet detektiran.

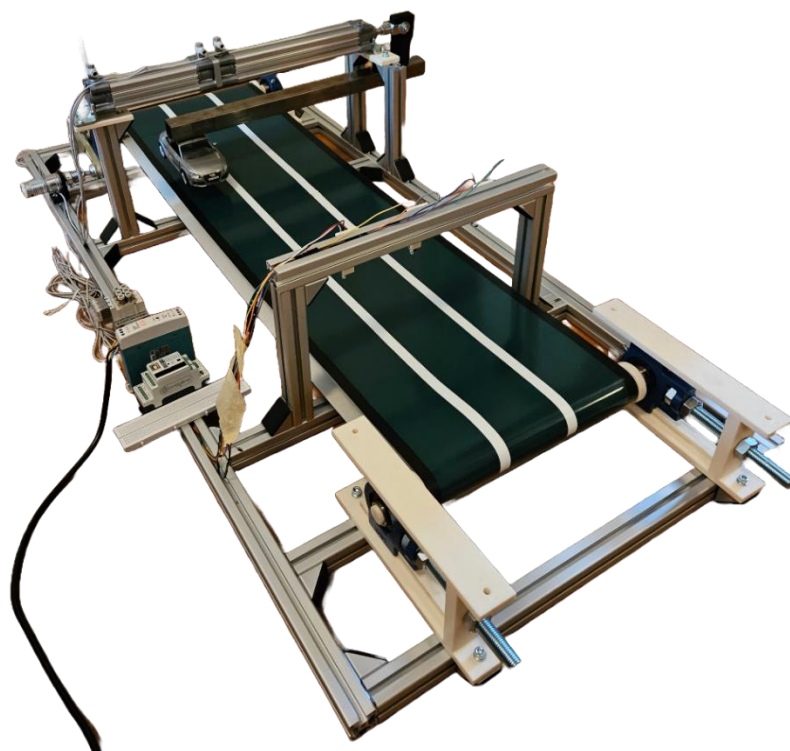
Da bi se senzori mogli smjestiti na set alu-profila, bilo je potrebno konstruirati adaptivnu pločicu koja će služiti kao nosač. Takva pločica ima provrt za M6 vijak s kojim se spaja na alu-profil i provrt za M3 vijak kojim se senzor spaja na pločicu. Također, pločica je konstruirana na način da je senzor uvijek orijentiran prema pokretnoj traci. Odabrani senzori, zajedno s projektiranom konstrukcijom, prikazani su na slici 4.7.



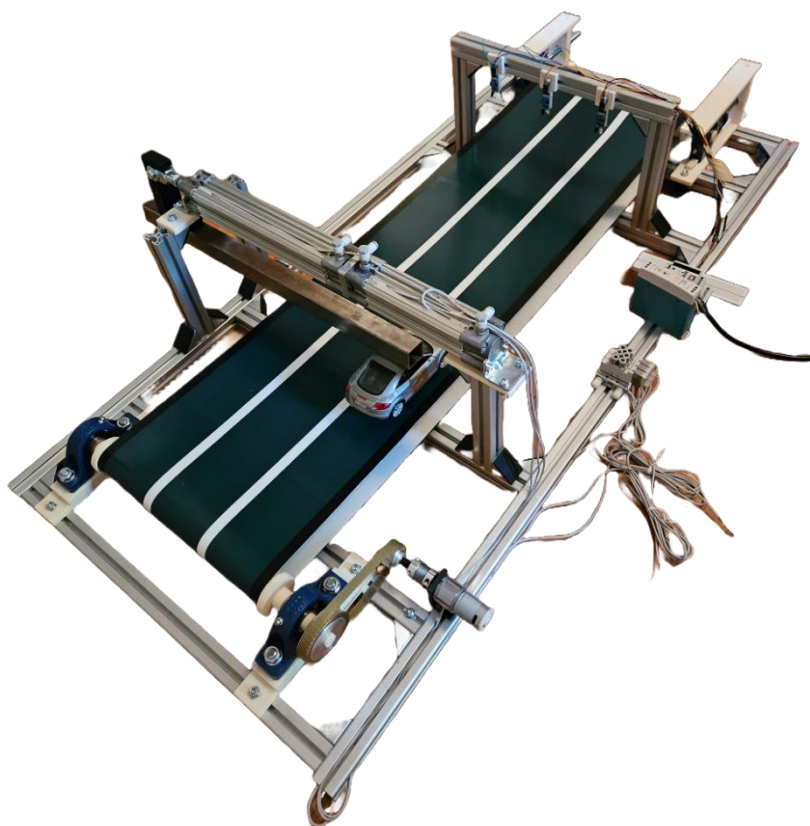
Slika 4.7. Prikaz infracrvenih senzora spojenih na postolje preko nosača

#### ***4.1.3. Konačan izgled eksperimentalnog modela***

Na slikama 4.8 i 4.9 je prikazan konačni izrađeni model eksperimentalnog modela sa svim sitnim doradama.



**Slika 4.8. Konačni izgled eksperimentalnog modela (pogled sprijeda)**



**Slika 4.9. Konačni izgled eksperimentalnog modela (pogled straga)**



## 4.2. Upravljanje

Upravljanje eksperimentalnim modelom podijeljeno je na upravljanje transportnim sustavom i upravljanje pneumatskim manipulatorom. Za transportni sustav je potrebno postići konstantnu brzinu kretanja pokretne trake preko regulacije elektromotora u otvorenom krugu. Pokretna traka prenosi prepreku, koju postavlja korisnik, ispod infracrvenog senzora. Senzor treba detektirati u kojem od tri paralelna dijela trake se nalazi prepreka i taj signal poslati mikroracunalu. Nadalje, mikroracunalo obrađuje signal sa senzora te na osnovu toga određuje u koju poziciju će smjestiti pneumatski cilindar, odnosno autić, što predstavlja upravljanje pneumatskim sustavom. Poveznica oba upravljačka sustava je mikroracunalo *Controllino MINI*.

### 4.2.1. Upravljački uređaj *Controllino MINI* s napajanjem

*Controllino MINI*, prikazan na slici 4.10, je elektronički uređaj temeljen na PLC-u i mikroracunalu *ATMega328* koji kombinira fleksibilnost i pogodnosti otvorenog kodiranja Arduina sa sigurnošću i povjerenjem koje nudi PLC po industrijskim standardima. *Controllino MINI* će biti spojen na izvor napajanja od 24 V, čime će biti omogućeno upravljanje ventilima. Napajanje je električni uređaj koji pretvara električnu struju iz izvora u traženi napon, struju i frekvenciju i opskrbljuje instalaciju. Odabrano je napajanje *Mean Well MDR-20-24*, prikazano na slici 4.11., koje opskrbljuje *Controllino* naponom od 24 V i strujom od 1 A. Moguće je podešavati izlazni napon u rasponu od 21,6 do 26,4 V.



Slika 4.10. *Controllino MINI*



Slika 4.11. Napajanje *Mean Well MDR-20-24*

S obzirom da su za upravljanje elektromagnetskim ventilima potrebni releji, unaprijed ugrađeni releji u *Controllinu* uvelike smanjuju kompliciranost upravljačkog sklopovlja. Također, uređaj dolazi s unutarnjim napajanjem i ulazima od 5 V, na koja će biti spojeni infracrveni senzori. Korištenjem ovog uređaja uvelike se smanjuju kompliciranost, vrijeme i troškovi izrade eksperimentalnog modela.

#### 4.2.2. Upravljanje transportnim sustavom

Upravljanje transportnim sustavom se svodi na upravljanje elektromotorom kako bi se ostvarila željena brzina pokretne trake. S obzirom da su postavljene prepreke beznačajne mase, neće dolaziti do smanjenja brzine pokretne trake. Shodno tome, nema potrebe za upravljanjem u zatvorenom regulacijskom krugu te se neće ugrađivati senzor brzine elektromotora. Odabrano je napajanje *HY3005* jer omogućuje precizno upravljanje naponom u rasponu od 0-30V i postavljanje limita struje od 0-5A te se spaja direktno na elektromotor, a prikazano je na slici 4.12.



Slika 4.12. Napajanje *HY3005*

### 4.2.3. Upravljanje pneumatskim sustavom

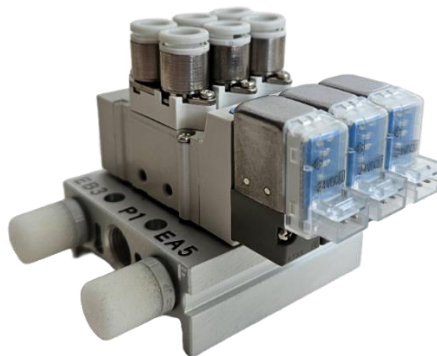
Upravljanje pneumatskim cilindrom spada u zatvoreni regulacijski krug, odnosno regulacija ima povratnu vezu preko senzora koji detektira položaj cilindra. Detektiranje prepreka s pokretne trake obavlja infracrveni senzor, koji šalje signal *Controllinu*. Na osnovu tog signala, *Controllino* određuje poziciju višepoložajnog cilindra i aktivira odgovarajuće ventile. Sve komponente pneumatskog sustava su od proizvođača *SMC Industrijska automatika d.o.o.*

#### 4.2.3.1. Ventili

Ventili su uređaji za upravljanje ili regulaciju pokretanja, zaustavljanja, usmjeravanja te tlaka i protoka fluida, a u ovom eksperimentalnom modelu koristit će se elektromagnetski razvodnici te prigušno-nepovratni ventili. [24]

Elektromagnetski ventil se koristi za upravljanje protokom fluida pomoću dovedenog napona. U trenutku kada se dovede napon na elektromagnetski razvodnik, pomicanjem magnetske kotve se omogućuje protok fluida. Kada nestane napona, kotva se vraća u početni položaj pomoću opruge i zatvara se protok fluida. Za upravljanje pneumatskim cilindrom u eksperimentalnom modelu koristit će se 5/2 elektromagnetski razvodnik, odnosno razvodnik sa pet priključaka i dva razvodna položaja. S obzirom da se koristi cilindar s dvostrukim hodom, bit će potrebna 2 takva ventila. Odabran je ventil *SY3120-5LOU-C6-Q*, zbog svoje kompaktnosti i uštede energije, a oznaka ventila predstavlja nazivni napon od 24VDC, vrste priključka i vrstu aktivacije (dvije pozicije, jedan aktuator).

Kako bi se ostvarila kompaktnija organizacija elektromagnetskih ventila korišten je razdjelnik *SS5Y3-20-03-00F-Q*, koji je namijenjen za elektromagnetske ventile serije *SY300*. Elektromagnetski razvodnici, zajedno s razdjelnikom, prikazani su na slici 4.13.



Slika 4.13. Prikaz elektromagnetskih razvodnika spojenih na razdjelnik

Prigušno-nepovratni ventil omogućuje da se prigušenje fluida odvija samo u jednom smjeru gibanja fluida, dok u suprotnom smjeru nepovratni ventil predstavlja mali otpor strujanju te se fluid giba neprigušeno. Odabran je prigušno-nepovratni ventil *AS2201F-01-06SA*, prikazan na slici 4.14., zbog jednostavne montaže te kotačića sa zaključavanjem (push-lock) kojim se podešava protok zraka. Korištenje ovog prigušno-nepovratnog ventila omogućuje podešavanje brzine gibanja cilindra uz minimalan pad tlaka.



**Slika 4.14. Odabrani prigušno-nepovratni ventil**

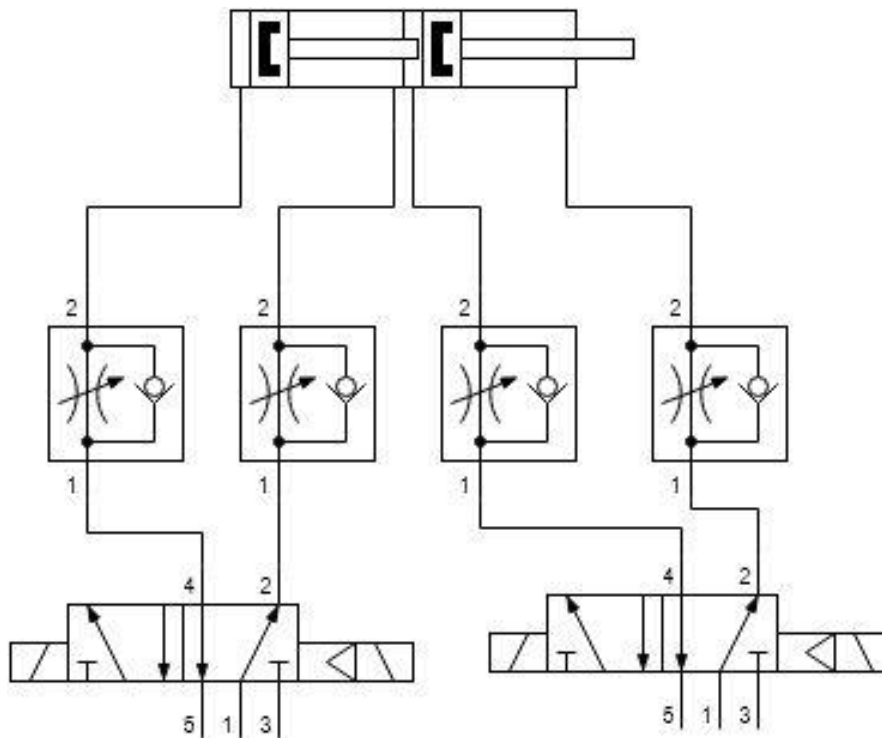
Elektronički davač signala je sklopni uređaj koji očitava prisutnost magneta koji se nalazi na cilindru i tako registrira položaj cilindra. Zatim uređaj šalje naponski/strujni signal mikrokontroleru. U ovom eksperimentalnom modelu koristit će se elektronički davač signala *D-M9BL*, prikazan na slici 4.15., zbog svoje ponovljivosti, jednostavnosti i fleksibilnosti.



**Slika 4.15. Odabrani elektronički davač signala**

#### 4.2.3.2. Shema pneumatskog sustava

Pneumatskom sustavu se dobavlja zrak iz kompresora u iznosu do 10 bara. U ovom radu se neće obrađivati komponente za dobavu i pripremu zraka pa zbog toga taj dio nije prikazan u pneumatskoj shemi. Zrak vodovima dolazi do elektromagnetskih ventila, koji su upravljani pomoću *Controllino* mikrokontrolera. *Controllino* sadrži upravljački kod te na osnovu potrebe zadatka, šalje električni signal do ventila, koji zatim pomiče kotvu i propušta zrak. Kada su elektromagnetski ventili isključeni cilindar se nalazi u početnoj poziciji 0. Aktiviranjem jednog ventila pneumatski cilindar dolazi u poziciju 1, a aktiviranjem drugog ventila zajedno uz prvi ventil ostvaruje se pozicija 2. Nadalje, zrak prolazi kroz prigušni ventil, kojim možemo zadati željenu vrijednost brzine gibanja cilindra. Pneumatska shema sustava prikazana je na slici 4.16.



Slika 4.16. Shema pneumatskog sustava

### 4.3. Opis rada

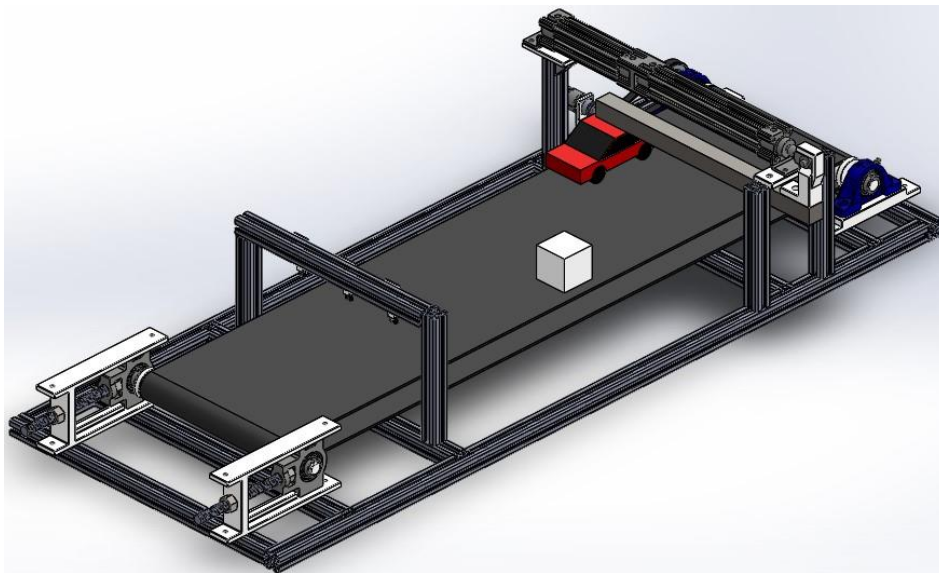
Izrađeni eksperimentalni model ima zadatak izbjegavati prepreke s pokretne trake koje postavlja korisnik.

Za početak je potrebno pokrenuti pokretnu traku pomoću električnog motora. Pomoću napajanja postupno se povećava napon do 12V s limitom struje od 1A. Za postignutu brzinu

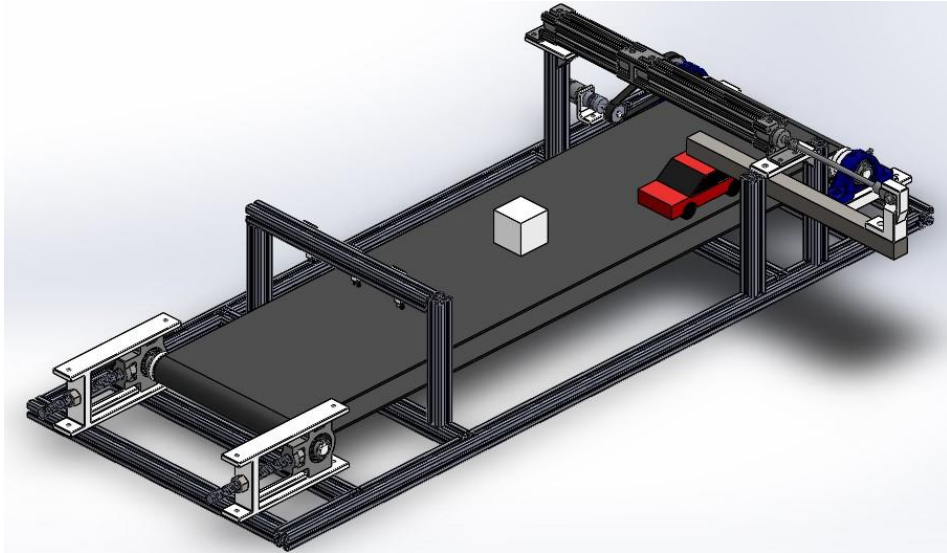
pokretne trake je bitna brzina pozicioniranja pneumatskog cilindra, kako bi ostalo dovoljno vremena za izbjegavanje prepreke.

Nakon što je korisnik postavio prepreku na pokretnu traku, prvi zadatak detektiranja obavlja infracrveni senzor, koji šalje električni signal mikrokontroleru. S obzirom da je signal senzora do 5 V, senzor je spojen na analogni ulaz *Controllina*, te se pomoću *if* petlje unutar upravljačkog koda određuje nisko i visoko stanje. Nakon što je određeno u kojem dijelu trake se nalazi predmet, određuje se koje trake su slobodne, ovisno o prijašnjim postavljenim objektima. Shodno tome, *Controllino* šalje signal elektromagnetskim ventilima te se pneumatski cilindar postavlja u željenu poziciju. Pomoću elektroničkog davača signala se provjerava izvršavanje radnje pozicioniranja cilindra. Time je opisan jedan ciklus radnji ovog eksperimentalnog modela, a radnje se ponavljaju svakim novim objektom koji je postavljen. Na slikama 4.17, 4.18 i 4.19 su pokazane postavljane prepreke i različite pozicije pneumatskog cilindra.

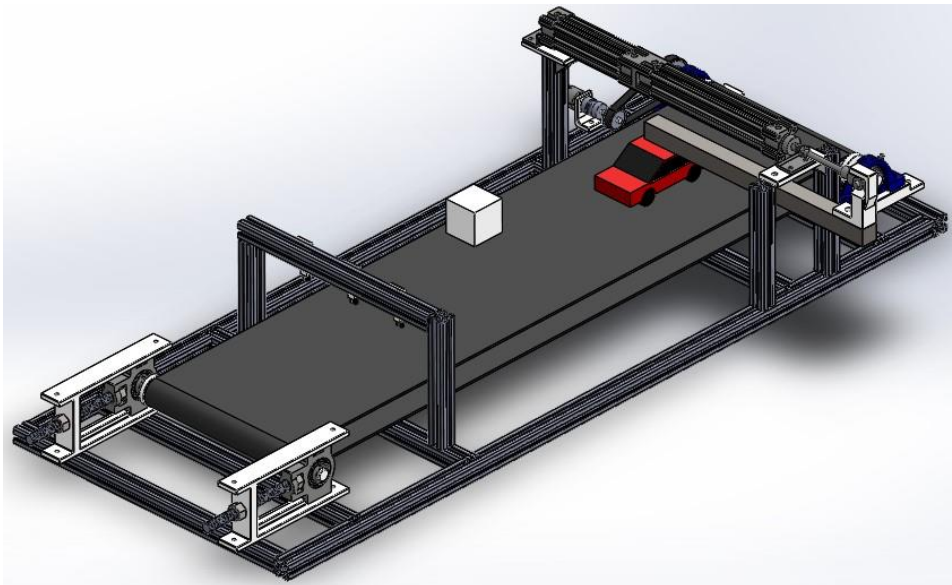
Izradom ovog eksperimentalnog modela na intuitivan način su objedinjeni pneumatski i transportni sustav te postav kroz interakciju s korisnikom daje zanimljiv uvid u rad mehatroničkog sustava.



**Slika 4.17. Model s autićem u poziciji 1 i preprekom u traci 3**



**Slika 4.18. Model s autićem u poziciji 3 i preprekom u traci 2**



**Slika 4.19. Model s autićem u poziciji 2 i preprekom u traci 1**

## **5. PNEUMATSKI ROBOTSKI MANIPULATOR S HVATALJKOM PRILAGODLJIVOG OBLIKA**

U ovome poglavlju prikazat će se projektiranje, izrada i upravljanje pneumatskog robotskog manipulatora s trima stupnjevima slobode gibanja s hvataljkom prilagodljivog oblika. Ovakav tip manipulatora koristi se za obavljanje jednoličnih poslova premještanja predmeta nepravilnog geometrijskog oblika.

Roboti su mehanički uređaji koji se sastoje od konstrukcije s pripadajućim pogonskim i upravljačkim uređajem, mjernim uređajima te su sposobni izvršavati različite zadatke. Najčešće se pod pojmom „robot“ podrazumijeva industrijski robot, koji se još naziva robotski manipulator ili robotska ruka, a čija je glavna zadaća manipulacija i obavljanje određenih operacija nad objektima. Svrha im je zamijeniti rad čovjeka pri obavljanju opasnih ili jednoličnih poslova. [25]

Hvataljka je dio robota koji je u izravnom kontaktu s radnim predmetom ili okolinom te obavlja određeni zadatak, kao što je hvatanje, podizanje ili manipulacija predmetima. Postoji mnogo vrsta hvataljki za različite vrste primjena. Tako razlikujemo mehaničke, pneumatske, magnetne, univerzalne i mnoge druge hvataljke. [26]

Meka robotika je grana robotike u kojoj se za dizajn i izradu robota koriste elementi od mekih materijala poput polimera ili tkanine, čime se ostvaruje puno veća prilagodljivost elemenata robota u odnosu na klasične krute elemente.

Pneumatika, tehnička disciplina koja se temelji na upotrebi komprimiranog (stlačenog) zraka za prijenos energije, odigrala je nezamjenjivu ulogu u suvremenom svijetu automatizacije i industrijskog napretka. Pneumatski se sustav sastoji od kompresora, kao izvora stlačenoga zraka, cijevnoga razvoda stlačenoga zraka te upravljačkih i izvršnih elemenata koji ostvaruju translacijska ili rotacijska gibanja. [24]

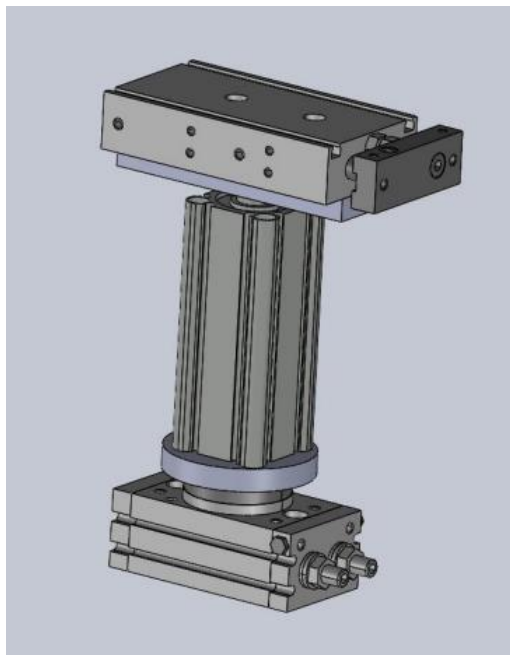
### **5.1. Projektiranje sustava**

Projektiranje pneumatskog manipulatora s fleksibilnom hvataljkom započinjemo odabirom odgovarajućih upravljačkih i izvršnih elemenata.



### 5.1.1. Projektiranje pneumatskog robotskog manipulatora

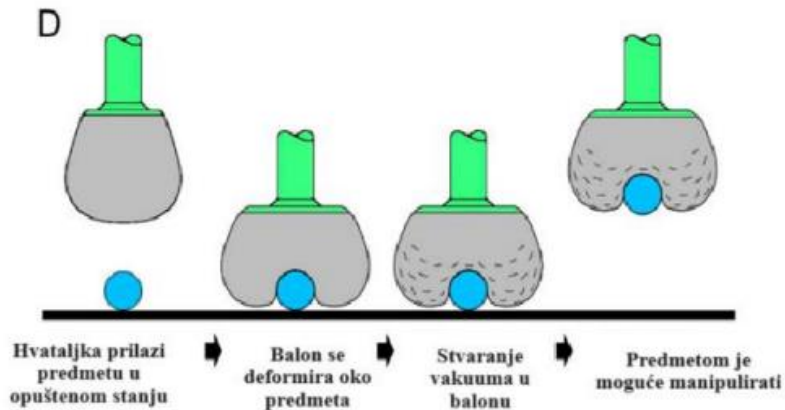
Kinematička struktura robotskog manipulatora je RTT, tj. gibanje mu se sastoji od rotacije i dviju translacija. Kako bi se ostvarili željeni stupnjevi slobode gibanja odabrani su aktuatori – pneumatski cilindri i rotacijski stol. Zatim se može izraditi CAD model robotskog manipulatora u programskom paketu *SolidWorks*. Prvo je potrebno dizajnirati odstojne spojne pločice pomoću kojih povezujemo pneumatske aktuatore u mehanički sustav koji je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1. Pneumatski robotski manipulator

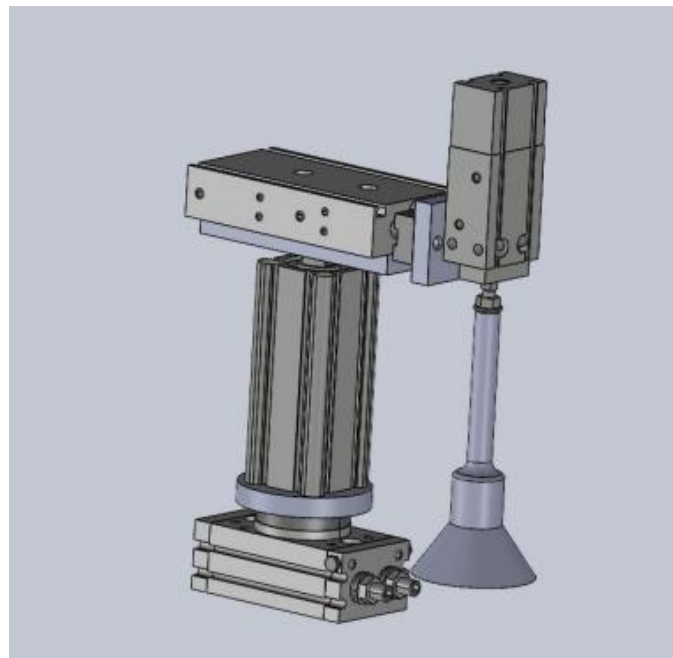
### 5.1.2. Projektiranje fleksibilne hvataljke

Princip rada hvataljke temelji se na efektu zagušenja granularnog materijala (eng. *jamming effect*). Ovaj fenomen nastaje kada se granularni materijali gusto stisnu uslijed promjena vanjskih uvjeta, što može uzrokovati neočekivano ponašanje materijala, poput blokiranja protoka. [27] Ideja je napuniti latex balon mljevenom kavom. Kada se balon postavi preko nekog predmeta i primijeni se određena sila, opuštena mljevena kava će se rasporediti oko predmeta. Kada se stvori vakuum unutar balona, mljevena kava će se zagušiti, postajući čvrsta i prilagođavajući se obliku predmeta koji želimo manipulirati. Princip rada prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Princip rada fleksibilne hvataljke [28]

Projektiranje fleksibilne hvataljke započinjemo modeliranjem nosača balona koji se sastoji od dva dijela: lijevka i prirubnice. Kako bismo iz balona izvukli zrak, potrebne su nam sljedeće komponente: ejektor i pneumatski cilindar s mogućnošću ostvarivanja vakuuma. Također, potrebno je modelirati i spojnu pločicu koja povezuje fleksibilnu hvataljku s robotskim manipulatorom. Time dobivamo konačni dizajn manipulatora koji je prikazan na slici 5.3.



Slika 5.3. Konačni prototip manipulatora s fleksibilnom hvataljkom

## 5.2. Komponente pneumatskog mehatroničkog sustava

U ovom poglavlju dati će se opis korištenih komponenti potrebnih za izradu ovoga sustava. Sve komponente, čiji naziv proizvođača nije naveden, su proizvođača *SMC*.

### 5.2.1. Rotacijski aktuator *MSQB10A*

Rotacijski aktuator idealan je za premještanje predmeta, što ga čini savršenim za postizanje rotacije manipulatora. Pomoću *rack and pinion* mehanizma, koji koristi zupčanike i zupčastu letvu, linearno gibanje pneumatskih cilindara pretvara se u rotacijsko gibanje. Aktuator ima kut zakreta od 0 do 190 stupnjeva, omogućujući prvi stupanj slobode gibanja robotskog manipulatora. Na slici 5.4. prikazan je izgled rotacijskog aktuatora.



Slika 5.4. Aktuator *MSQB10A* u presjeku [29]

### 5.2.2. Cilindar *CQ2Z32-0AS145-55*

To je dvosmjerni cilindar s ojačanom klipnjačom i hodom klipa od 55 mm. U ovom radu, koristi se kao aktuator za postizanje drugog stupnja slobode gibanja. Slika 5.5. prikazuje pneumatski cilindar s ojačanom klipnjačom.



Slika 5.5. Cilindar *CQ2Z32-0AS145-55* [30]

### 5.2.3. Cilindar CXSM20-45

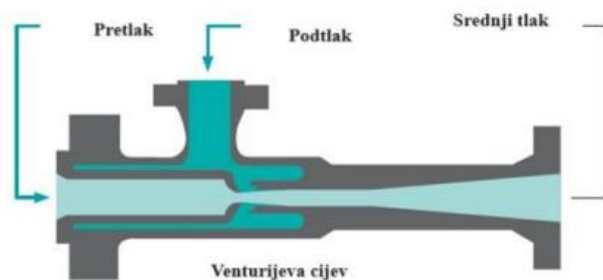
Ovaj je cilindar standardni kompaktni cilindar s vođenjem i hodom klipa od 45 mm. Može horizontalno nositi do 300 g i omogućuje treći stupanj slobode gibanja robotskog manipulatora. Njegova nosivost je dovoljna za držanje fleksibilne hvataljke. Izgled cilindra prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6. Cilindar CXSM20-45 [31]

### 5.2.4. Ejektor ZH10B-06-06

Ejektor je komponenta koja omogućuje stvaranje vakuuma unutar balona. Sastoji se od cijevi s konusnim ili suženim prolazom, poznate kao Venturijeva cijev. Unutar ejektora tlak zraka smanjuje se dok prolazi kroz ovu suženu cijev. Tlak komprimiranog zraka (pogonskog fluida) povećava se dok prolazi kroz širi dio ejektora prije ulaska u uski dio, tj. Venturijevu cijev. Kako zrak ulazi u suženi dio ejektora, brzina protoka zraka se povećava, a tlak se smanjuje prema Bernoullijevom principu. To smanjenje tlaka unutar Venturijeve cijevi u usporedbi s vanjskim atmosferskim tlakom izaziva usisavanje sekundarnog fluida. Ejektori se često koriste u uređajima za bojanje, gdje se boja uvlači u struju zraka. Ovaj model ejektora ima ugrađen prigušivač buke i prikazan je na slici 5.7., zajedno s njegovim principom rada. [18]



Slika 5.7. Ejektor ZH10B-06-06 i princip rada ejektora [32] [18]

### 5.2.5. Cilindar ZCDUKC20-10D

To je nerotirajući cilindar slobodnog montažnog tipa, namijenjen za vakuumske aplikacije. Klipnjača ovog cilindra ima ugrađen vakuumski prolaz i hod od 10 mm, dok je masa cilindra 204 g, a prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8. Cilindar ZCDUKC20-10D [33]

### 5.2.6. Razvodnik VQD1121

Ovaj tip razvodnika je elektromagnetski razvodnik 4/2 izvedbe koji omogućuje visok protok uz nizak utrošak energije. U ovom radu su potrebna četiri komada, pri čemu je na jednom razvodniku jedan izlaz zatvoren čepom jer se koristi za upravljanje ejektorom. Ovaj model razvodnika ima ugrađenu oprugu koja ga, kad dođe do prestanka djelovanja elektromagnetskog polja, vraća u neaktivirano stanje. Slika 5.9. prikazuje odabrani elektromagnetski razvodnik.



Slika 5.9. Elektromagnetski razvodnik VQD1121 [34]

### 5.2.7. Prigušno nepovratni ventil

Ovaj ventil se sastoji od dva dijela. Prigušni dio prigušivanjem utječe na protok zraka u sustavu, a nepovratni dio dozvoljava protok fluida samo u jednom smjeru uz minimalno mogući pad

tlaka u sustavu. Korištenjem ovog prigušno nepovratnog ventila, s blokirajućim zakretnim gumbom, omogućuje se za podešavanje brzine gibanja cilindra uz minimalan pad tlaka. Korišteni prigušno nepovratni ventil prikazan je na slici 5.10.



Slika 5.10. Prigušno nepovratni ventil [35]

#### 5.2.8. Pretvarač struje KSE 06024N

Pretvarač struje osigurava stabilizirani izlaz istosmjerne struje od 24V, koji je potreban za napajanje razvodnika. Opremljen je LED diodom koja signalizira aktivaciju i preopterećenje, te se hladi prirodnim protokom zraka. Također ima ugrađene zaštite od preopterećenja i kratkog spoja. Pretvarači su poznati i kao izvori napajanja, s ulaznim priključkom i jednim ili više izlaza. Ovaj model ima dva izlazna priključka i prikazan je na slici 5.11.



Slika 5.11. AC/DC konverter [36]

#### 5.2.9. Zaštitni prekidač AMPARO 10kA B 2A

To je jednopolni zaštitni uređaj proizveden od strane tvrtke *Schrack*. Namijenjen je zaštiti električnih krugova od preopterećenja. Njegova glavna funkcija je prekinuti protok struje kako bi se zaštitila oprema i spriječili požari. Na slici 5.12. prikazan je odabrani prekidač.



Slika 5.12. Osigurač AMPARO [37]

### 5.2.10. Controllino MINI

*Controllino* je kompaktni industrijski PLC namijenjen automatizaciji, nadzoru i kontroli različitih procesa u industrijskim okruženjima. Sadrži CPU jedinicu s *ATMEGA328P* mikrokontrolerom, čiji je softver kompatibilan s Arduinoom. Ovaj PLC ima 8 digitalnih izlaza, 8 digitalnih ulaza, 6 analognih ulaza, ugrađeni RTC modul te 6 releja. Za slanje podataka koristi SPI sučelje, a za serijsku komunikaciju podržava UART i TTL metode, kao i I<sup>2</sup>C sinkronu višekontrolersku serijsku komunikaciju. Upravljački uređaj prikazan je na slici 5.13.



Slika 5.13. Controllino MINI [16]

Ostale korištene komponente su razdjelnici, prigušnici buke te pneumatska crijeva.

### 5.3. Konstruiranje sustava

U ovome poglavlju prikazat će se korišteni proizvodni postupci pomoću kojih su pneumatski robotski manipulator i fleksibilna hvataljka konstruirani.

#### 5.3.1. Konstruiranje pneumatskog robotskog manipulatora

Kako bi se konstruirao mehanički sustav robotskog manipulatora bilo je potrebno izraditi odstojne spojne pločice, 1 okruglu i dvije četvrtaste. Za izrađivanje okrugle pločice, prvo se na tokarilici obradi vanjski promjer na 65 mm i debljina na 10 mm te se izradi sjedište promjera 19.9 mm i debljine 3 mm. Nakon toga se na glodalici izbuše četiri rupe promjera 5.5 mm za vijke koji učvršćuju cilindar s ojačanom klipnjačom. Zatim se izbuši osam provrta promjera 5 mm s upuštanjem za vijke kojima se pričvršćuje pločica za rotacijski aktuator. Ova spojna pločica se potom montira u sjedište rotacijskog aktuatora i pričvrsti vijcima. Pločice kvadratnog poprečnog presjeka 40 x 10 mm dobiju se rezanjem na dužine od 115 mm i 62 mm. Na pločici dužine 115 mm buše se dva provrta promjera 4,2 mm za navoj M5 te prolazna rupu promjera 8 mm u sredini, s upuštanjem za M8 imbus vijak. Ova pločica služi za spajanje cilindra s ojačanom klipnjačom i cilindra s vođenjem. Na pločici dužine 62 mm, koja spaja prihvatnicu s manipulatorom, buše se dva provrta promjera 4,2 mm za navoj M5 te dvije prolazne rupe promjera 5 mm s upuštanjem za M5 imbus vijke. Slika 5.14. prikazuje korištene alatne strojeve.



Slika 5.14. Tokarilica TNP 160 i glodalica PGU 400



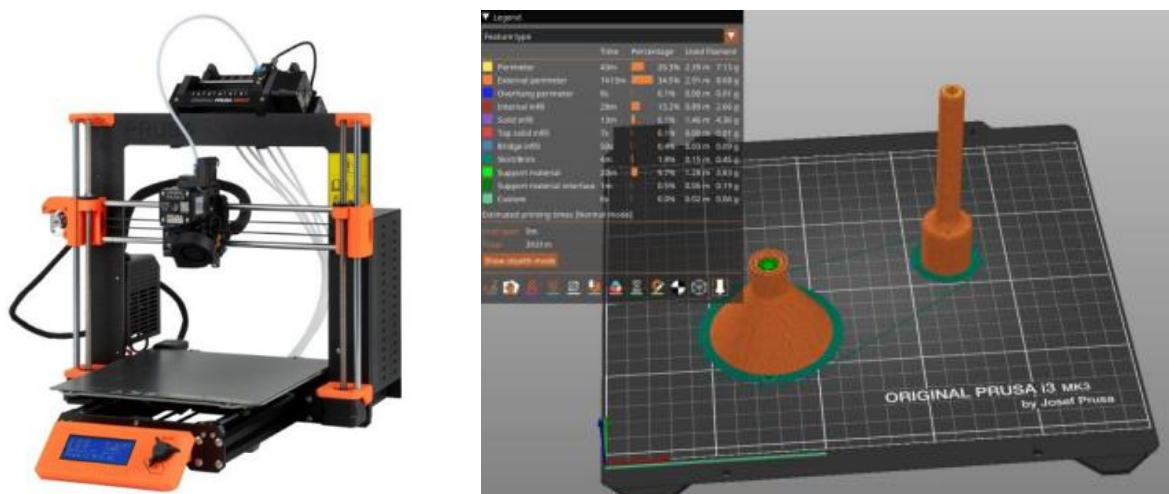
Nakon što su s pomoću odstoynih pločica spojeni aktuatori, dobiva se konstrukcija prikazanu na slici 5.15.



Slika 5.15. Robotski manipulator

### 5.3.2. Konstruiranje fleksibilne hvataljke

Projektirane nosače hvataljke (lijevak i prirubnicu) bilo je potrebno izraditi pomoću aditivne tehnologije izrade (3D printanje), kako bi se minimizirala cjelokupna masa hvataljke. Korišteni 3D printer je *Prusa i3 MK3*. Zatim je balon bilo potrebno napuniti mljevenom kavom. Za potrebe ovoga rada u balon srednje veličine stavljeno je oko 60g kave. Slika 5.16. prikazuje nosač u software-u *PrusaSlicer* i korišteni 3D printer.



Slika 5.16. *Prusa i3 MK3* i software *PrusSlicer* [38]

Vrijeme ispisa je 3 sata i 31 minuta, dok masa isprintanih dijelova iznosi 19g. Materijal tih dijelova je PLA. Kad je ispis završio, bilo je potrebno spojiti isprintane dijelove s balonom i filterom za kavu. Filter za kavu služi kako čestice mljevene kave ne bi unišle u pneumatski sustav. Na slici 5.17. prikazan je proces montaže fleksibilne hvataljke.



**Slika 5.17. Montaža fleksibilne hvataljke**

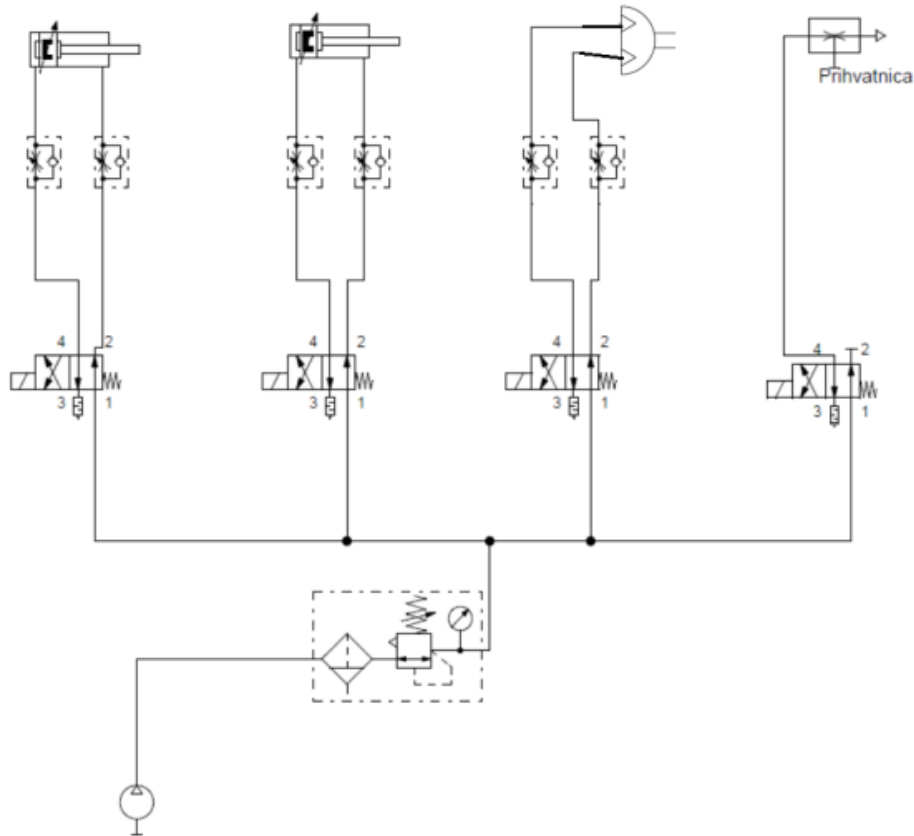
Ukupna masa fleksibilne hvataljke iznosi 283g te ju cilindar s vodicom može nositi, a finalna izvedba fleksibilne hvataljke prikazana je na slici 5.18.



**Slika 5.18. Fleksibilna hvataljka**

### 5.3.3. Pneumatska shema mehatroničkog sustava

Pneumatska je shema izrađena u programskom paketu *FluidSim*, a prikazana je na slici 5.19. Na vrhu se nalaze izvršni elementi, ispod njih su upravljački elementi, a na dnu se nalaze elementi za pripremu i proizvodnju stlačenog zraka.



Slika 5.19. Pneumatska shema sustava

Pneumatski se sustav puni zrakom iz kompresora do tlaka 5 bara. Vodovima dolazi do pripreme grupe, a nakon toga preko razdjelnika dolazi do razvodnika s pomoću kojih se upravlja cilindrima i rotacijskim stolom te ejetorom, dok se prigušno nepovratnim ventilima regulirala brzina cilindara.

#### 5.4. Upravljanje sustavom pneumatskog robotskog manipulatora s fleksibilnom hvataljkom

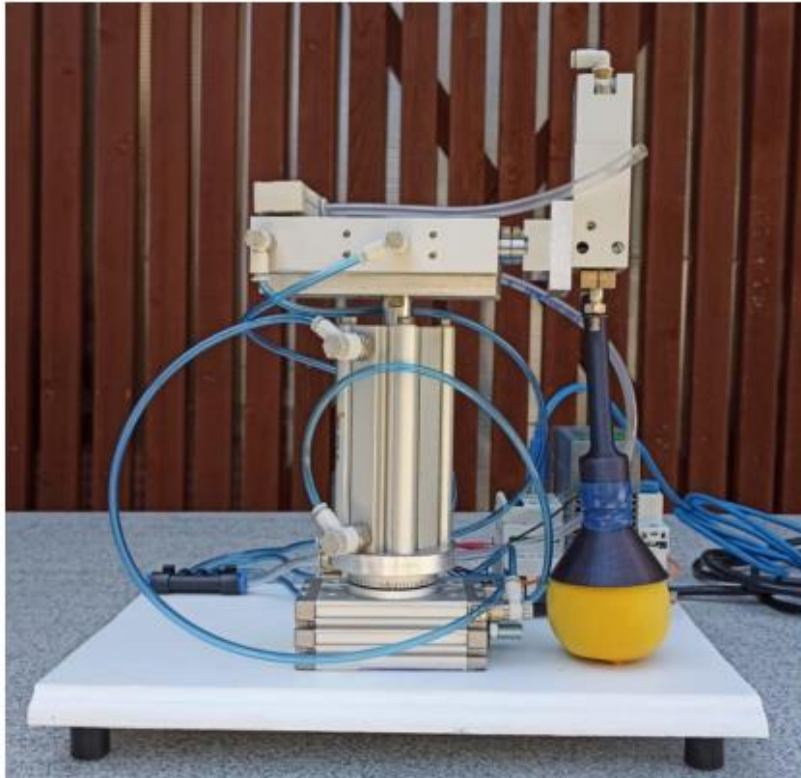
Upravljanje pneumatskog sustava, koji je jedan od tema ovoga rada, provodi se putem osobnog računala i PLC-a *Controllino MINI*. Prvo je potrebno spojiti digitalne izlaze *Controllina* s elektromagnetskim razvodnicima. Napajanje na *Controllino* dovodi se preko izmjenjivača struje koji je priključen na 220V, a cijeli elektronski podsustav osiguran je s *Amparo* osiguračem. Na slici 5.20. prikazane su elektroničke komponente sustava.



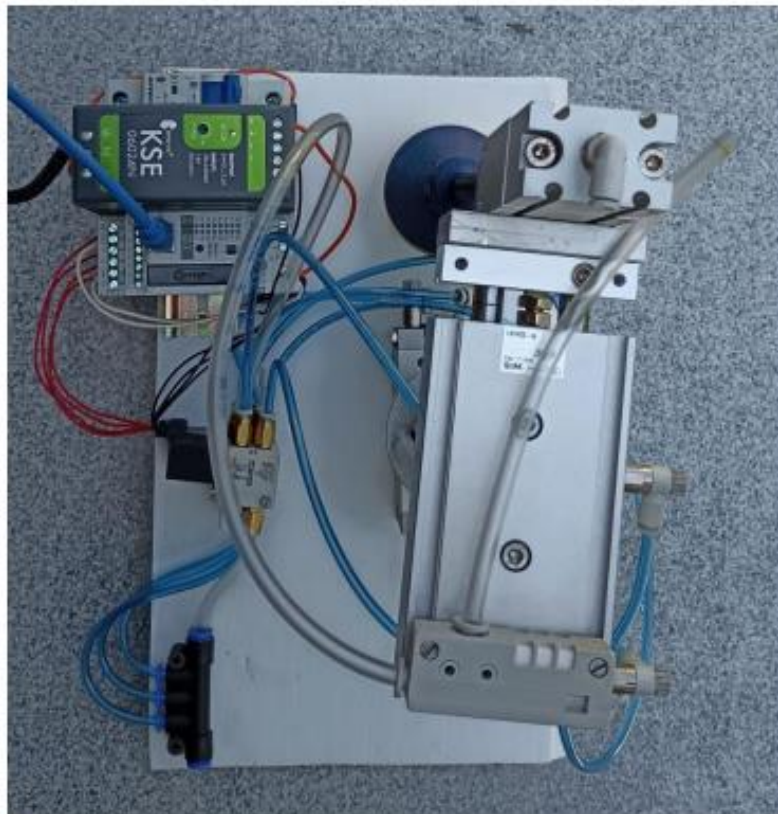
Slika 5.20. Elektroničke komponente

Programski kod napisan je u *Arduino IDE* sučelju te se na memoriju PLC-a šalje s pomoću kabla USB-B. *Controllino* na početku inicijalizira sve potrebne varijable, zatim se potrebnim pinovima dodjeljuje svojstvo ulaznih ili izlaznih pinova. Kada se pokrene program, upravljački kod se sprema na *Controllino* i tada ulazi u beskonačnu petlju u kojoj pregledava vrijednosti varijabli i izvršava radnje. Slanjem električnog signala nakon izvršavanja programa, upravlja se s položajima elektromagnetskog ventila te gibanja aktuatora.

Slike 5.21. i 5.22. prikazuju pneumatski robotski manipulator s fleksibilnom hvataljkom.



**Slika 5.21. Pneumatski robotski manipulator fleksibilnom hvataljkom**



**Slika 5.22. Pneumatski robotski manipulator s fleksibilnom hvataljkom**

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su postupci izrade četiri pneumatska servosustava, svaki sa drugačijom primjenom. Tijekom izrade koristila su se mnoga područja strojarstva, a posebno pneumatike, elektrotehnike i elektronike. Koristila su se znanja iz projektiranja, 3D modeliranja, 3D printanja, strojne obrade, izrade tehničkih crteža, montaže, simuliranja procesa, sensorike, programiranja, upravljanja i regulacije. Pokazale su se mnoge mogućnosti spajanja pneumatike i elektrotehnike te mogućnosti njihove široke primjene.

Izrađeni eksperimentalni postavi u budućnosti mogu služiti kao edukacijski postavi studentima strojarstva, posebno studentima mehatronike i robotike. Ti sustavi su jednostavniji i jeftiniji od sličnih industrijskih rješenja, ali omogućuju objašnjenje rada i način upravljanja stvarnih rješenja iz prakse. Tako se omogućuje stalno osuvremenjivanje nastavnih sadržaja te integriranje teorijske i praktične nastave. Uz ulaganja, svaki sustav naravno ima i prostora za dodatnu nadogradnju i razvoj.

## ZAHVALE

Zahvaljujemo se prof. dr. sc. Željku Šitumu, na iskazanom povjerenju, ohrabrenju za prihvaćanje rada, na potpori i savjetima tijekom izrada radova te pomoći kod nabave potrebnih komponenata sustava.

Zahvaljujemo se tvrtkama *Festo* i *SMC* zbog pomoći pri odabiru odgovarajućih komponenti te za donirane pneumatske komponente.

Zahvaljujemo gosp. Krešimiru Balašku na pomoći prilikom izrade komponenti izrađenih na tokarilici i glodalici te Elektrotehničkoj i ekonomskoj školi u Novoj Gradiški koja je ustupila laboratorij za pneumatiku na korištenje.

## POPIS LITERATURE

- [1] *DIR.HR*, Što je mehatronika?, dostupno na: <https://dir.hr/sto-je-mehatronika-7-posla-mehatronicara/> , pristupljeno 25.07.2024.
- [2] *Wikipedia*, Pneumatics, dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatics> , pristupljeno 25.07.2024.
- [3] R. King, What is Servo Pneumatics?, 2020., dostupno na: <https://www.rowse-pneumatics.co.uk/blog/post/what-is-servo-pneumatics> , pristupljeno 08.08.2023.
- [4] *Wikipedia*, Navojno vreteno, dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Navojno\\_vreteno](https://hr.wikipedia.org/wiki/Navojno_vreteno) , pristupljeno 08.08.2023.
- [5] S. R. Pandian, F. Takemura, Y. Hayakawa i S. Kawamura, Control Performance of an Air Motor - Can Air Motors Replace Electric Motors ?, u International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, 1999.
- [6] *GAST*, Air Motors/Gear Motors katalog: [https://gastmfg.com/sites/default/files/2019-07/airmotor\\_d-10\\_catalog\\_final\\_feb09-2012\\_lo-res.pdf](https://gastmfg.com/sites/default/files/2019-07/airmotor_d-10_catalog_final_feb09-2012_lo-res.pdf)
- [7] *POWER&MOTION*, Basics of Directional-Control Valves, 2019., dostupno na: <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/hydraulic-valves/article/21887940/basics-of-directional-control-valves> , pristupljeno 11.08.2023.
- [8] *FESTO*, Proportional directional control valves MPYE katalog: <https://www.festo.com/media/pim/683/D15000100122683.PDF>
- [9] *SMC*, Series SY katalog: [https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/SY\\_EU.pdf](https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/SY_EU.pdf)
- [10] K. Vučković, Elementi konstrukcije 2 - podloge s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [11] *Wikipedia*, Napajanje, dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Napajanje> , pristupljeno 13.08.2023.
- [12] *Contollino*, dostupno na: <https://www.controllino.com/> , pristupljeno 21.08.2023.



- [13] *Wikipedia*, Incremental encoder, dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental\\_encoder](https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental_encoder) , pristupljeno 21.08.2023.
- [14] Chia-Hua Lu i Yean-Ren Hwang, Modeling of an air motor servo system and robust sliding mode controller design, Taiwan, 2012.
- [15] *YCICT*, MDR-60-24, dostupno na: <https://www.ycict.com/mdr-60-24.html> , pristupljeno 20.02.2023.
- [16] *Controllino MINI*, dostupno na: <https://www.controllino.com/product/controllino-mini/> , pristupljeno 20.02.2023.
- [17] *FESTO*, Elektromagnetni ventil, dostupno na: <https://www.festo.com/hr/hr/a/196137/?q=mhe2-ms1h-3%2F2g-qs-4-k~:festoSortOrderScored> , pristupljeno 20.02.2023.
- [18] *ipieca*, Ejectors (2022), dostupno na: <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/efficient-use-of-power/ejectors-2022/> , pristupljeno 20.02.2023.
- [19] *SMC*, Vacuum ejector, Box Style/Body Ported Style - ZH\*A , dostupno na: <https://www.smc.eu/en-eu/products/zh-a~138195~nav?productId=138197> , pristupljeno 20.02.2023.
- [20] *SMC*, Vacuum Pad with Lock Ring - ZPT, dostupno na: <https://www.smc.eu/en-eu/products/with-lock-ring-zpt-d~138583~cfg> , pristupljeno 20.02.2023.
- [21] *Professional Plastics*, HDPE and LDPE Resistance Chart by Chemical: <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/HDPE-LDPEChemicalResistanceChart.pdf>
- [22] *Hardie Polymers*, Is Solvent Resistance Predictable?, dostupno na: <https://www.hardiepolymers.com/knowledge/is-solvent-resistance-predictable/> , pristupljeno 21.02.2023.
- [23] A. S. Pouzada, Design and Manufacturing of Plastics Products: Integrating Traditional Methods With Additive Manufacturing, 2021.
- [24] J. Petrić, Hidraulika i pneumatika, 1. dio: Hidraulika, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

- [25] *Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, Portal hrvatske tehničke baštine, dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/robotika/> , pristupljeno 20.09.2023.
- [26] *Wikipedia*, Robot end effector, dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Robot\\_end\\_effector](https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_end_effector) , pristupljeno 20.09.2023.
- [27] *Wikipedia*, Jamming (physics), dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Jamming\\_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Jamming_(physics)) , pristupljeno 20.09.2023.
- [28] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson i H. M. Jaeger, Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *PNAS*, 2010.
- [29] *Youtube*, SMC Air Actuator - Rotary Table [MSQ series], dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=eGV5acL1Y4w&t=39s> , pristupljeno 20.09.2023.
- [30] *SMC*, Compact cylinder CQ2-Z, dostupno na: <https://www.smc.eu/hr-hr/proizvodi/cq2-z~50760~nav?productId=158338&partNumber=CQ2A32-55DZ> , pristupljeno 20.09.2023.
- [31] *BPS*, CXSM20-45, dostupno na: <https://www.bps-uk.co.uk/product/cxsm20-45/> , pristupljeno 20.09.2023.
- [32] *SMC*, ZH\*A, dostupno na: <https://www.smc.eu/hr-hr/proizvodi/zh-a~138195~nav?productId=138197&partNumber=ZH10B-06-06> , pristupljeno 20.09.2023.
- [33] *SMC*, ZC(D)UK, Free Mount Cylinder w/Vacuum Pad, dostupno na: <https://www.smc.eu/hr-hr/proizvodi/zc-d-uk-free-mount-cylinder-w-vacuum-pad~135170~cfg?partNumber=ZCDUKC20-10D> , pristupljeno 20.09.2023.
- [34] *SMC*, SMC VQD1121-5LO-M5-Q valve, sol, VQD1151 VALVE, SOL 4/5-PORT\*\*\*, dostupno na: <https://www.smc-pneumatics.com/VQD1121-5LO-M5-Q.html> , pristupljeno 20.09.2023.
- [35] *SMC*, Speed Controllers, General Purpose, One-touch Fitting, With Push-lock, Elbow - AS\*2\*1F-A, dostupno na: <https://www.smc.eu/en-eu/products/elbow-as-2-1f-a~128718~cfg?partNumber=AS2201F-01-04SA> , pristupljeno 20.09.2023.

- [36] *TME*, Izvor istosmjernog napona, dostupno na: <https://www.tme.com/in/en/details/kse-06024n/din-rail-mounting-power-supplies/breve-tufvassons/18924-9990/> , pristupljeno 20.09.2023.
- [37] *Schrack*, Zaštitni prekidač AMPARO 10kA, D 1A, 1-polni, dostupno na: <https://www.schrack.hr/trgovina/zastitni-prekidac-amparo-10ka-d-1a-1-polni-am019101.html> , pristupljeno 20.09.2023.
- [38] *PRUSA*, Original Prusa MMU3 upgrade kit, dostupno na: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mm3-upgrade-kit-for-mk3s-2/> , pristupljeno 20.09.2023.

## SAŽETAK

**Navojno vreteno s pneumatskim pogonom** je rad koji je izradila Bernarda Galić. U tom radu ispitana je mogućnost pokretanja navojnog vretena pneumatskim motorom. Navojno vreteno je česta komponenta alatnih strojeva i većinom ga pokreće električni motor, ali pneumatski motor bi ga mogao zamijeniti u nekim specifičnim primjenama zbog svojih prednosti. Prvo je opisano projektiranje pneumatskog servosustava kojeg se želi izraditi. Zatim je napravljen CAD model sustava i detaljno su opisane sve komponente sustava. Prije same izrade, sustav je modeliran, tj. napravljen je dinamički model sustava, uz pomoć kojeg je napravljena simulacija sustava. Na kraju je izrađen eksperimentalni postav, a dobiveni rezultati uspoređeni su sa simuliranima te je donesen zaključak o mogućnostima primjene pneumatskog motora za pogon navojnog vretena.

Ključne riječi: navojno vreteno, pneumatski motor, pneumatski servosustav, regulacija položaja

**Fleksibilni pneumatski manipulator** je rad koji je izradio Matija Čmelješević. Svrha tog rada je prikaz pristupa projektiranju i izradi fleksibilnog pneumatskog manipulatora. Cilj rada je pokazati prednosti meke u odnosu na konvencionalnu robotiku u određenim segmentima njezina djelovanja, a posebno u području kolaborativnih robota. Fleksibilni pneumatski manipulator je jednostavna robotska ruka sastavljena od dva članka međusobno povezana aktuatorima na napuhavanje koji čine jedan sferni zglob. Na vrhu ovog manipulatora se nalazi vakuumska hvataljka koja omogućava prihvrat i prijenos objekata od početne do krajnjih pozicija te njihovo ispuštanje. Najprije se objašnjava izbor strukture manipulatora i karakteristike po kojima on pripada polju meke robotike, kao i njene karakteristike. Zatim se pristupa idejnom projektiranju sklopa koji se sastoji od pogonskih i upravljačkih članova. Sljedeći korak je izbor komercijalno dostupnih komponenti za izradu sklopa te sama izrada prototipa kojoj slijedi programiranje gibanja u *Arduinu*. Konačno se iznose rezultati i mogućnosti gibanja koje su ostvarene ovim eksperimentalnim radom.

Ključne riječi: pneumatika, fleksibilni pneumatski manipulator, meka robotika, vakuumska hvataljka, aktuatori na napuhavanje

**Pneumatski manipulator za izbjegavanje prepreka na pokretnoj traci** je rad koji je izradio Ante Ivanković. Ovaj rad opisuje projektiranje, implementaciju i funkcionalnost eksperimentalnog modela koji se sastoji od pneumatskog manipulatora i pokretne trake. Zadatak modela je da se predmeti s pokretne trake, koje postavlja korisnik, očitaju senzorom te da se na osnovu toga pneumatski manipulator pomakne u odgovarajuću poziciju. Eksperimentalni model je kod projektiranja podijeljen na komponente vezane uz transportni i pneumatski sustav. Za funkcionalnost transportnog sustava izrađena je konstrukcija i odabrani potrebni elementi. Što se tiče pneumatskog sustava, izrađena je potporna konstrukcija odabranog pneumatskog cilindra i njegov spoj na glavni predmet. Za detektiranje predmeta zaduženi su infracrveni senzori. Poveznica između transportnog i pneumatskog sustava je upravljački uređaj *Controllino*, koji upravlja gibanjem pneumatskog cilindra i pokretne trake. Regulacija višepoložajnog pneumatskog cilindra obavlja se uz korištenje elektromagnetskog razvodnika, a položaj cilindra se provjerava pomoću elektroničkog davača signala, što predstavlja povratnu vezu regulacijskog kruga.

Ključne riječi: pneumatski cilindar, pokretna traka, mehatronički sustav, izbjegavanje prepreka

**Pneumatski robotski manipulator s hvataljkom prilagodljivog oblika** je rad koji je izradio Lovro Zoričić. Ovaj se rad bavi projektiranjem i izradom pneumatskog robotskog manipulatora s trima stupnjevima slobode gibanja s hvataljkom prilagodljivog oblika. Ovakav bi se tip manipulatora koristio za obavljanje jednoličnih poslova premještanja predmeta nepravilnog geometrijskog oblika. Prednost hvataljke prilagodljivog oblika nad konvencionalnim hvataljkama bila bi u tome što nema potrebe za zaustavljanjem pogona u tvornici i zamjene radnog alata ako se na pokretnoj traci nađu razni predmeti. Na početku je opisano projektiranje manipulatora i fleksibilne hvataljke u programskom paketu *Solidworks*. Daje se opis svih korištenih komponenti, strojeva, alata i proizvodnih tehnologija koje su potrebne za izradu robotskog manipulatora, a na kraju je opisan način rada.

Ključne riječi: pneumatika, 3D print tehnologija, robotski manipulator, vakuumska tehnologija, univerzalna hvataljka

## SUMMARY

**Screw spindle with pneumatic drive** is a project made by Bernarda Galić. In this thesis, the potential of a screw spindle driven by an air motor was tested. A screw spindle is a common component of machine tools and is usually driven by an electric motor, but an air motor could replace it in some specific applications due to its advantages. Firstly, the design of the pneumatic servo system that is to be made is discussed. A CAD model of the system was created and all the system components are described in detail. Before the production, the system was modeled, i. e. a dynamic model was derived, with the help of which the system simulation was made. Finally, an experimental setup was made and the obtained results were compared with the simulated ones so the conclusion was reached about the possibilities of a screw spindle driven by an air motor.

Key words: screw spindle, air motor, pneumatic servo system, position control

**Flexible pneumatic manipulator** is a project made by Matija Čmelješević. The purpose of this paper is to present an approach to the design and manufacture of a flexible pneumatic manipulator. The goal of the paper is to show the advantages of soft compared to conventional robotics in certain segments of its activity, especially in the field of collaborative robots. A flexible pneumatic manipulator a simple robotic arm composed of two joints interconnected by inflatable actuators that form one spherical joint. At the top of this manipulator there is a vacuum gripper that enables the acceptance and transfer of objects from the initial to the final positions and their release. First of all, the choice of manipulator structure and the characteristics that make it belong to the field of soft robotics, as well as its characteristics in general, are explained. Next, the conceptual design of the assembly is approached, which consists of drive and control components. The next step is the selection of commercially available components for making the circuit and the prototyping itself, followed by motion programming in *Arduino*. Finally, the results and possibilities of motion realized by this experimental work are presented.

Keywords: pneumatics, flexible pneumatic manipulator, soft robotics, vacuum gripper, inflatable actuators

**Pneumatic manipulator for obstacle avoidance on conveyor belt** is a project made by Ante Ivanković. This thesis describes design, implementation and functionality of the experimental model that consists of pneumatic manipulator and conveyor belt. Task of the model is to detect user-placed objects on the conveyor belt and correspondingly set the pneumatic manipulator in the adequate position. Experimental model is divided to components related to transportation and pneumatic system. Essential design is made and required elements are selected for the functionality of transportation system. Regarding pneumatic system, supporting structure of the multiposition pneumatic cylinder and its connection to the main object is constructed. Obstacle detection is executed by infrared sensors. Connection between transportation and pneumatic system is the control device *Controllino* which is responsible for motion control of the pneumatic cylinder and conveyor belt. Multiposition pneumatic cylinder is controlled using solenoid valves and the position of the cylinder is checked using actuator position sensor, which represents feedback of the closed-loop control.

Key words: pneumatic cylinder, conveyor belt, mechatronic system, obstacle avoidance

**Pneumatic robotic manipulator with flexible gripper** is a project made by Lovro Zoričić. This paper deals with the design and construction of a pneumatic robotic manipulator with three degrees of freedom and an adaptable gripper. Such a type of manipulator would be used for performing repetitive tasks of moving objects with irregular geometric shapes. The advantage of the adaptable gripper over conventional ones would be that there is no need to stop the production line and replace the working tool if different objects are found on the conveyor belt. Firstly, the design of the manipulator and the flexible gripper is demonstrated using the *Solidworks* software package. A description of all the used components is provided, along with an explanation of the machines, tools, and manufacturing technologies used to construct the robot. And finally, the manipulator operation is described.

Key words: pneumatics, 3D printing technology, robotic manipulator, vacuum technology, universal gripper

## ŽIVOTOPISI

**Bernarda Galić** rođena je 16. travnja 1999. u Vinkovcima. Završava Osnovnu školu 'August Cesarec' u Ivankovu, a nakon toga upisuje Gimnaziju Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima. 2019. godine upisuje studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te se na drugoj godini opredjeljuje za smjer Mehatronika i robotika. Završavanjem preddiplomskog studija 2023. godine stječe diplomu sveučilišne prvostupnice inženjerke strojarstva te upisuje diplomski studij strojarstva. Za svoj završni rad 'Navojno vreteno s pneumatskim pogonom' osvaja medalje na izložbi inovacija INOVA-MLADI 2023. i DIS EXPO 2023. u Dubaiju.

**Matija Čmelješević** rođen je 18. srpnja 1999. u Novoj Gradiški. Po završetku Osnovne škole 'Matija Antun Relković' u Davoru upisuje Gimnaziju u Novoj Gradiški. 2018. godine upisuje se na Fakultet strojarstva i brodogradnje, gdje se opredjeljuje za smjer Mehatronika i robotika. Preddiplomski studij završava 2023. godine te stječe diplomu sveučilišnog prvostupnika inženjera strojarstva. Na izložbi inovacija INNOVERSE u Atlanti, SAD osvaja srebrno odličje za rad 'Fleksibilni pneumatski manipulator'. Član je Studentskog zbora Sveučilišta u Zagrebu, Studentskog zbora FSB-a, Fakultetskog vijeća FSB-a, Etičkog povjerenstva FSB-a i Stegovnog suda za studente na FSB-u. Trenutno obnaša dužnost Predsjednika Studentskog zbora Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U akademskoj godini 2023./2024. izabran je za stipendista tvrtke Rimac Technology d.o.o.

**Ante Ivanković** rođen je 15. listopada 2000. u Mostaru. Završio je Drugu osnovnu školu u Širokom brijegu, nakon koje upisuje Gimnaziju fra Dominika Mandić. Kroz cijelo odrastanje ga prati zanimanje za tehniku i 'unutarnji izgled' strojeva, posebno automobila. Shodno tome, završetkom srednje škole upisuje preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a na drugoj godini upisuje smjer Mehatronika i robotika. Prima diplomu sveučilišnog prvostupnika inženjera 2023. godine, a iste godine upisuje diplomski studij Mehatronika i robotika. Za svoj završni rad 'Pneumatski manipulator za izbjegavanje prepreka na pokretnoj traci' primio je brojne nagrade – zlatnu medalju na međunarodnom sajmu inovacija INOVA Hrvatska 2023., specijalnu nagradu WIIPA, srebrnu medalju na izložbi



inovacija IPITEX 2024. u Bangkoku te zlatnu medalju na međunarodnoj izložbi inovacija u Rumunjskoj.

**Lovro Zoričić** rođen je 26. listopada 1998. u Novoj Gradiški. Osnovnu školu i gimnaziju pohađao je u Novoj Gradiški. Nakon toga upisuje preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. 2023. godine postaje sveučilišni prvostupnik inženjer te iste godine upisuje diplomski studij na smjeru Mehatronika i robotika. Za završni rad 'Pneumatski robotski manipulator s fleksibilnom hvataljkom' primio je brojne nagrade na međunarodnim i domaćim izložbama, poput izložbe inovacija IPITEX u Bangkoku te izložbe inovacija INOVA Hrvatska u sklopu WIIPA organizacije.