

Funkcionalna antropomorfna prijenosna proteza šake

Topolnjak, Jan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:805251>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#) / [Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jan Topolnjak

Zagreb, 2021. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Petar Ćurković

Student:

Jan Topolnjak

Zagreb, 2021. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Petru Ćurkoviću na strpljenju, idejama, savjetima i pomoći prije i tijekom izrade rada.

Na izdvojenom vremenu i trudu zahvaljujem se dr. sc. Frani Pamukoviću, bez čije pomoći ne bi bilo moguće saznati nepoznata svojstva materijala korištenog u ovome radu.

Izrada baterije ne bi bila moguća bez opreme i pomoći Tina Pavišića, te mu se na tome zahvaljujem.

Više od svega zahvaljujem se svojim roditeljima i bratu, bez čije bezuvjetne ljubavi i podrške pružene tijekom studija isti zasigurno ne bih završio.

Jan Topolnjak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JAN TOPOLNJAK**

Mat. br.: 0035194584

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Funkcionalna antropomorfna prijenosna proteza šake**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Functional anthropomorphic mobile hand prosthesis**

Opis zadatka:

Područje mekih robota omogućuje izradu lakih egzoskeleta koje se mogu koristiti u terapijske svrhe u područje medicine i fizikalne rehabilitacije. U dosadašnjim radovima težište je stavljano na terapiju pacijenata lakim egzoskeletima koji zamjenjuju fizioterapeuta pri masaži ruke i ponavljanju pokreta prstima.

U ovom radu potrebno je izraditi potpuno funkcionalnu antropomorfnu šaku temeljenu na principima meke robotike koji joj moraju omogućiti malu masu i visoku energetska učinkovitost.

U radu je potrebno:


1. Osmisliti oblik antropomorfne proteze šake
2. Uređajem za brzu izradu prototipova izraditi potrebne komponente šake, kombinirajući meke i čvrste materijale
3. Osmisliti prijenosni pneumatski izvor aktuacije: napose ispitati peristaltičku crpku i klipnu crpku
4. Osmisliti prijenosni energetska izvor pri tom minimizirajući masu i maksimizirajući autonomiju šake
5. Integrirati fleksibilni senzor za mogućnost regulacije stupnja deformacije prsta i implementirati odgovarajući regulator
6. Osmisliti način spajanja šake i način pozicioniranja crpke i energetska izvora

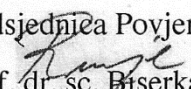
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:
8. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Petar Curković

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. MODEL PROTEZE ŠAKE	4
2.1. Dlan.....	5
2.2. Prsti	7
3. AKTUACIJA ŠAKE	10
3.1. Pneumatski sustav	10
3.1.1. Odabir kompresora.....	10
3.1.2. Tlačni spremnik	17
3.1.3. Ventili pneumatskog sustava	18
3.1.4. Shema pneumatskog sustava.....	20
3.2. Sustav upravljanja	21
3.2.1. Mikrokontroler	21
3.2.2. Ventili	26
3.2.3. Kompresor.....	27
3.2.4. Senzor tlaka.....	29
3.2.5. Senzor fleksije.....	31
3.2.6. Kontroler za ručno upravljanje protezom	32
3.2.7. Shema električnog sustava	33
3.3. Sustav napajanja.....	34
3.3.1. Potrošnja energije.....	34
3.3.2. Baterijske ćelije.....	35
3.3.3. Napajanje komponenti	40
4. IZRADA PROTOTIPA	44
4.1. Aditivna proizvodnja.....	44
4.2. Odabir materijala.....	48
4.3. Ispitivanje materijala.....	49
4.4. 3D print	52
4.4.1. Kućišta komponenti	52
4.4.2. Pneumatski priključci.....	57
4.4.3. Proteza.....	59
5. GOTOVA PROTEZA	65
5.1. Testiranje hvatanja proteze	66
5.2. Moguća poboljšanja proteze	67
6. ZAKLJUČAK.....	69

LITERATURA.....	70
PRILOZI.....	73

POPIS SLIKA

Slika 1.	Meki roboti inspirirani živim organizmima: a) gusjenicom, b) ribom, c) hobotnicom, d) crvom [4].....	2
Slika 2.	Podjela šake.....	5
Slika 3.	Model dlana proteze.....	6
Slika 4.	Nastavak s pneumatskim priključcima.....	7
Slika 5.	Simulacija naprezanja u Abaqus-u.....	7
Slika 6.	Presjek prsta.....	8
Slika 7.	Gotov trodimenzionalni model šake.....	9
Slika 8.	Klipna pumpa [11].....	11
Slika 9.	Peristaltička pumpa [12].....	11
Slika 10.	Rastavljen Xiaomi prijenosni kompresor.....	12
Slika 11.	Dijelovi klipne pumpe.....	13
Slika 12.	Dijelovi peristaltičke pumpe.....	13
Slika 13.	Ispitivanje protoka.....	14
Slika 14.	Pneumatska cijev za spajanje na kompresor.....	17
Slika 15.	Proporcionalni ventil Festo MPPE-3-1/8-10-010-B [16].....	18
Slika 16.	Solenoidni ventil [17].....	20
Slika 17.	Shema pneumatskog sustava.....	20
Slika 18.	Sastavni dijelovi mikrokontrolera [19].....	21
Slika 19.	Atmega328 pin dijagram [21].....	22
Slika 20.	Arduino Pro Mini [22].....	23
Slika 21.	UART programator.....	24
Slika 22.	Dijagram toka programa.....	25
Slika 23.	Naponski modul LC-LM358 [24].....	26
Slika 24.	Shema H-mosta [27].....	28
Slika 25.	BTS7960 driver.....	28
Slika 26.	Wheatstone-ov most.....	30
Slika 27.	HX711 [30].....	30
Slika 28.	Senzor fleksije [31].....	31
Slika 29.	Shema spajanja senzora fleksije.....	32
Slika 30.	Shema spajanja električnog sustava.....	33
Slika 31.	Razvojna pločica s elektroničkim komponentama.....	33
Slika 32.	Baterije Samsung 30Q [32].....	35
Slika 33.	BMS modul [34].....	36
Slika 34.	Komponente za izradu baterije.....	38
Slika 35.	Točkasto zavarivanje baterija.....	38
Slika 36.	Gotova baterija.....	39
Slika 37.	Modul s HX6038-NG IC [37].....	40
Slika 38.	Boost pretvarač.....	42
Slika 39.	Naponski modul s XL60099 [42].....	43
Slika 40.	Usporedba tehnologija proizvodnje.....	44
Slika 41.	FDM printer [45].....	45
Slika 42.	Filament za 3D printanje [46].....	46
Slika 43.	Simplify3D slicer.....	47
Slika 44.	3D printer Qidi Tech I [48].....	48
Slika 45.	Usporedba fleksije NinjaFlex (lijevo) i Filaflex (desno).....	49
Slika 46.	Oblik epruvete.....	50
Slika 47.	Ispitivanje epruvete na kidalici.....	51

Slika 48.	Epruveta S3A prije i nakon ispitivanja.....	52
Slika 49.	Dijagram naprezanja dobiven statičkim vlačnim ispitivanjem	52
Slika 50.	3D model nosača	53
Slika 51.	Gotov baterijski modul	54
Slika 52.	3D model kućišta za komponente napajanja	55
Slika 53.	Tlocrt modula za napajanje (lijevo), gotov modul (desno)	55
Slika 54.	Kućište za kompresor	56
Slika 55.	Kontroler za ručno upravljanje protezom.....	56
Slika 56.	Kućište za mikrokontroler	57
Slika 57.	3D model čepa (lijevo), isprintani dijelovi (desno).....	58
Slika 58.	Gotov čep s pneumatskim priključkom.....	58
Slika 59.	Spojnice za pneumatske cijevi	59
Slika 60.	Isprintan dlan	60
Slika 61.	Nastavak s pneumatskim priključcima.....	60
Slika 62.	Iteracije modela prsta	61
Slika 63.	Poroznost na testnim uzorcima.....	61
Slika 64.	Ugradnja senzora fleksije u prst (lijevo); nakon zatvaranja volumena (desno)	62
Slika 65.	Prsti proteze	63
Slika 66.	Strukture ispod prstiju	64
Slika 67.	Sve komponente sustava proteze.....	65
Slika 68.	Konačan izgled sustava proteze	66
Slika 69.	Hvatanje kružnih profila.....	66
Slika 70.	Hvatanje nepravilnih oblika	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba krutih i mekih robota [1]	1
Tablica 2. Tehničke karakteristike peristaltičke pumpe	14
Tablica 3. Rezultati mjerenja.....	16
Tablica 4. Usporedba parametara klipne i peristaltičke pumpe	16
Tablica 5. Karakteristike proporcionalnog ventila	19
Tablica 6. Tehničke karakteristike ATmega328 mikrokontrolera [23].....	23
Tablica 7. Tehničke karakteristike tranzistora TIP122 [25].....	27
Tablica 8. Tehničke karakteristike BTS7968 [28]	29
Tablica 9. Izmjerena struja potrebna za napajanje komponenti	34
Tablica 10. Tehničke karakteristike baterija Samsung 30Q [33]	35
Tablica 11. Tehničke karakteristike BMS modula	37
Tablica 12. Tehničke karakteristike materijala NinjaFlex i Filaflex [49], [50]	49
Tablica 13. Normirane dimenzije uzorka [52]	50
Tablica 14. Parametri printanja Filaflex materijala.....	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
E_f	J/m^3	Ovisnost potrošnje energije o protoku
I_0	A	Struja u praznom hodu
I_{opt}	A	Struja u opterećenom stanju
m_v	kg	Masa vode
P	W	Snaga
P_0	W	Snaga u praznom hodu
P_{opt}	W	Snaga u opterećenom stanju
Q_{klip}	m^3s^{-1}	Protok zraka kroz klipnu pumpu
Q_{peris}	m^3s^{-1}	Protok zraka kroz peristaltičku pumpu
Q_{pumpe}	m^3s^{-1}	Protok zraka kroz pumpu
R_1	Ω	Otpor senzora fleksije
R_2	Ω	Otpornik poznate vrijednosti
t_{pk}	s	Vrijeme punjenja 1
t_{pp}	s	Vrijeme punjenja 2
U	V	Napon
U_{max}	V	Najveći mjereni napon
U_{min}	V	Najmanji mjereni napon
V_p	m^3	Volumen posude
ρ_v	kgm^{-3}	Gustoća vode

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
A/D	<i>Analog/Digital</i> – analogno/digitalni
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i> – akrilonitril-butadien-stiren
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
CC/CV	<i>Constant current/Constant Voltage</i> – režim punjenja baterije
CPU	<i>Central processing unit</i> – središnja jedinica za obradu/procesor
DC	<i>Direct current</i> – istosmjerna struja
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> – kratica njemačkog standarda
FDM	<i>Fused filament fabrication</i> – taložno očvršćivanje
FET	<i>Field-effect transistor</i> - tranzistor
I/O	<i>Input/output</i> – ulazno/izlazni
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> – integrirano razvojno okruženje
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
LED	<i>Light Emitting Diode</i> – Svjetleća dioda
MEMS	<i>Micro-electromechanical system</i> – vrlo mali uređaji s pokretnim dijelovima
MOSFET	<i>Metal–oxide–semiconductor Field-effect transistor</i> - vrsta tranzistora
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i> – poli(etilen-tereftalat)
PLA	<i>Polylactic acid</i> – polilaktid
PVA	<i>Poly(vinyl alcohol)</i> – polivinil-amid
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – pulsno širinska modulacija
RAM	<i>Random Access Memory</i> – memorija s nasumičnim pristupom
ROM	<i>Read Only Memory</i> – memorija iz koje se podaci mogu samo čitati
TPE	<i>Thermoplastic elastomer</i> – elastoplastomer
TPU	<i>Thermoplastic polyurethane</i> – elastoplastomerni poliuretan
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> – serijski komunikacijski protokol
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – univerzalna serijska sabirnica

SAŽETAK

Ljudska šaka je vrlo kompleksna mehanička struktura koja omogućava hvatanje i preciznu manipulaciju objektima različitih veličina i oblika. Ukoliko nesretnim okolnostima dođe do gubitka funkcije šake, ova važna funkcija može se djelomično nadomjestiti protezom šake. Današnje mehaničke proteze šake vrlo su skupi i kompleksni mehanizmi. Ubrzanim razvojem meke robotike i sve raširenije tehnologije trodimenzionalnog ispisa otvara se mogućnost izrade jeftinijih, sigurnijih i jednostavnijih modela proteza bez potrebe za pretjeranom kompleksnošću mehaničkih proteza. U ovom radu razrađen je proces izrade prijenosne proteze šake. Izrađen je trodimenzionalni model šake koji je zatim materijaliziran tehnologijom trodimenzionalnog printa. Prije samog trodimenzionalnog printa bilo je potrebno odabrati odgovarajući materijal i ispitati njegova svojstva. Zatim je bilo potrebno odabrati dijelove te izraditi pneumatski sustav upravljanja koji će omogućiti aktuaciju šake. Upravljanje pneumatskim sustavom realizirano je povezivanjem pneumatskog sustava sa mikrokontrolerom koji će na temelju očitavanja sa senzora upravljati elektromehaničkim komponentama sustava. Da bi cijeli sustav bio prijenosan, bilo je potrebno osmisliti i napraviti prijenosni izvor energije koji će osigurati dovoljnu autonomiju sustava. Nakon odabira svih komponenti sustava iste je bilo potrebno povezati u funkcionalnu cjelinu.

Ključne riječi: proteza šake, 3D print, mikrokontroler, pneumatski sustav, meka robotika

SUMMARY

Human hand is very complex mechanical structure which enables humans to grab and manipulate with objects of different sizes and shapes. If loss of hand function happens, this very important function can be partially replaced by hand prostheses. Hand prosthesis available today are very complex and pricey mechanisms. Rapid development of soft robotics and the increasingly widespread technology of three-dimensional printing opens the possibility of making cheaper, safer and simpler models of prostheses without the need for excessive complexity of mechanical prostheses. In this paper, the process of making a portable hand prosthesis is elaborated. A three-dimensional model of the hand was made, which was then materialized with 3D printer. Before the print itself, it was necessary to select the appropriate material and examine its properties. Then it was necessary to make a pneumatic control system and select parts that will allow actuation of the hand. The control of the pneumatic system is realized by connecting the pneumatic system with a microcontroller which will control the electromechanical components of the system based on the readings from the sensors. In order for the whole system to be portable, it was necessary to design and make a portable energy source that would ensure sufficient autonomy of the system. After selecting all the components of the system, it was necessary to connect them into a functional unit.

Key words: hand prosthesis, 3D print, microcontroller, pneumatic system, soft robotics

1. UVOD

Klasični, kruti roboti, danas su nezamjenjivi kod proizvodnje i automatizacije procesa. Takvi roboti obično su namijenjeni za izvršavanje repetitivnih zadataka u precizno definiranoj okolini i uvjetima. Iako su vrlo efikasni u izvršavanju zadatka za koji su namijenjeni, imaju ograničenu prilagodljivost glede promjene okoline ili parametra procesa. Zbog svoje krutosti i velike mase, nesigurni su za interakciju s ljudima te su obično i ograđeni i udaljeni od područja rada ljudi. Meka robotika je grana robotike koja se bavi elektromehaničkim i mehatroničkim sustavima napravljenim od mekanih, deformabilnih, struktura. Posljednjih godina interes za korištenje deformabilnih i mekanih struktura u mehatroničkim sustavima sve je veći. Meki roboti imaju mnoge prednosti s obzirom na krute robote, a izuzev usporedbe dane u tablici 1 izdvojit će se par najvažnijih [1] [2] [3]:

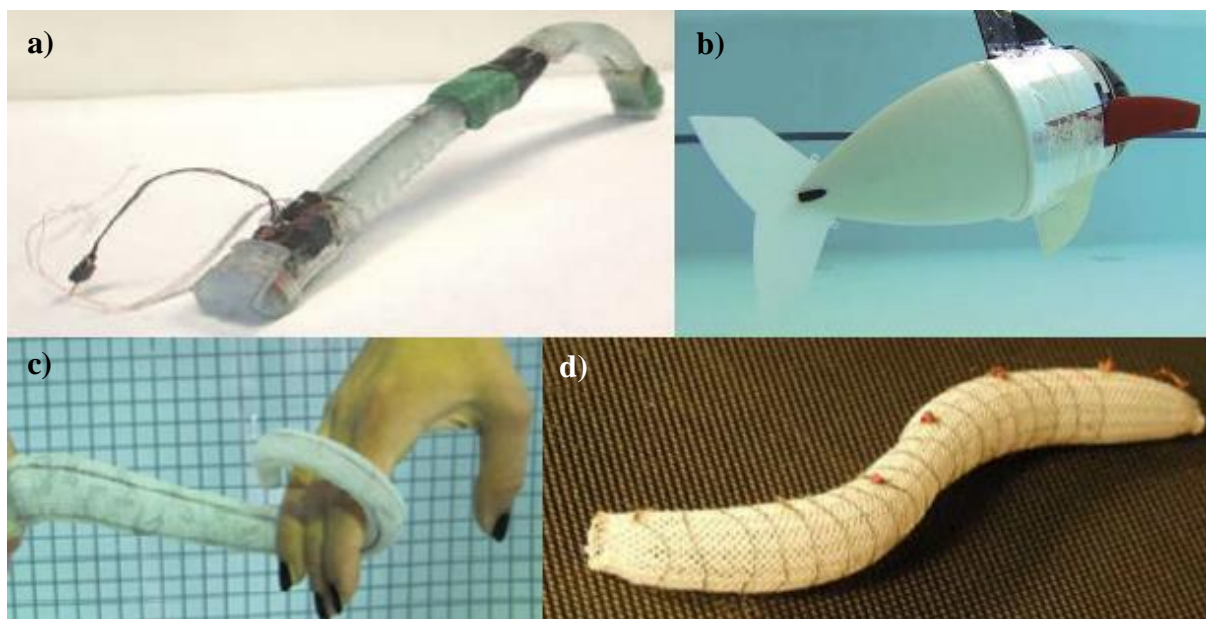
- Meke strukture omogućavaju robotima da se nose s nepoznatim okruženjima kao što su hvatanje objekata nepoznate geometrije ili kretanje po nepoznatom terenu.
- Korištenjem mekih materijala za izradu robota omogućena je sigurna interakcija s ljudima i drugim živim organizmima.
- Deformabilni materijali zbog svoje elastičnosti imaju sposobnost pohrane energije, koja se može koristiti za efikasnije kretanje.
- Meki materijali su jeftiniji od metalnih dijelova korištenih za izradu krutih robota.

Tablica 1. Usporedba krutih i mekih robota [1]

Svojstvo	Kruti roboti	Meki robot
Stupnjevi slobode gibanja	Par	Beskonačno
Aktuatori	Diskretni	Kontinuirani
Deformabilnost	Nema	Velika
Materijali	Metal, plastika	Guma, elastični polimeri
Preciznost	Vrlo visoka	Mala
Nosivost	Visoka	Vrlo mala
Radna okolina	Definirana	Definirana i nedefinirana
Objekti manipulacije	Predefiniranog oblika	Nepoznatih oblika

Upravljanje	Jednostavno	Teško
Pozicioniranje	Jednostavno	Teško

Meka robotika svoje nadahnuće pronalazi u živućim organizmima i njihovim kompleksnim biološkim strukturama. To je dovelo do razvoja raznih mekih robotskih sustava inspiriranih živim bićima (Slika 1).



Slika 1. Meki roboti inspirirani živim organizmima: a) gusjenicom, b) ribom, c) hobotnicom, d) crvom [4]

Područje primjene meke robotike širi se iz godine u godinu, a danas se primjerice koristi za izradu umjetnih organa [5], medicinskih uređaja za rehabilitaciju [6], hvataljki [7], mekih nosivih uređaja [8], itd. Meka robotika je široko područje koje se ubrzano razvija. Neki od glavnih fokusa istraživanja u mekoj robotici trenutno su:

- metode izrade mekih robota (aditivna proizvodnja, meka litografija, lijevanje),
- način aktucije (mehanička aktucija žicom, hidraulika, pneumatika, vakuum, elektroaktivni polimeri),
- materijali za izradu mekih robota (silikonski elastomer, poliuretan, hidrogel).

Danas se meki roboti najčešće izrađuju lijevanjem iz silikonskih materijala. U ovom radu pokušat će se izraditi funkcionalne meke aktuatorne tehnologijom trodimenzionalnog printa.

Prednost ove tehnologije izrade jest u tome što ona omogućuje mnogo veću fleksibilnost pri izradi kompleksnih geometrija te puno bržu izradu iteracija prototipa. Meki aktuatori koristit će se kao prsti na protezi šake.

2. MODEL PROTEZE ŠAKE

Ljudske ruke su nezamjenjiv alat koji čovjeku omogućuju direktnu interakciju s okolinom u svakodnevnicu. Ruke čovjeku omogućuju obavljanje preciznih i složenih pokreta, a sastoje se od nadlaktice, podlaktice i šake.

Šaka je dio ruke koji služi za hvatanje. To je vrlo kompleksan mehanizam kojeg čine kosti, zglobovi, mišići, ligamenti i tetive. U ovome radu neće se pokušati rekreirati mehanička kompleksnost šake, već će se cijela kinematika šake svest na tri nezavisno upravljana meka aktuatora.

Za izradu modela šake koristit će se programski alat SolidWorks. SolidWorks je CAD programski alat za koji se koristi za izradu trodimenzionalnih modela i dokumentacije. Ovaj programski alat razvila je kompanija Dassault Systemes, te je trenutno jedan od najpopularnijih CAD programskih alata.

Model u SolidWorksu nastaje iz dvodimenzionalnih skica. Skice su sastavljene od zatvorenih kontura u obliku linija, lukova, raznih krivulja i sl. Trodimenzionalni objekt oblikuje se stvaranjem ili uklanjanjem volumena, nastalog iz dvodimenzionalne skice.

Zahtjevi za dizajn modela šake su sljedeći:

- Izgled – mora biti antropomorfna - izgledom treba podsjećati na ljudsku šaku.
- Veličina – veličina šake treba dimenzijama odgovarati prosječnoj ljudskoj šaci.
- Masa – masa šake mora biti što manja.
- Jednostavnost – na šaci mora biti čim manje dodanih struktura.

Šaka će se izraditi od dva materijala, od krutog materijala napraviti će se dlan, a od mekanog prsti šake. Aktuacija šake vršiti će se preko prstiju, koji će se podijeliti u tri nezavisno aktuirane zračne komore. Prva komora bit će u palcu ruke, druga će biti u kažiprstu i srednjem prstu, a treća u prstenjaku i malom prstu (Slika 2). Na dlan će se pričvrstiti prsti te će se kroz njega provući pneumatske cijevi do aktuiranih komora.



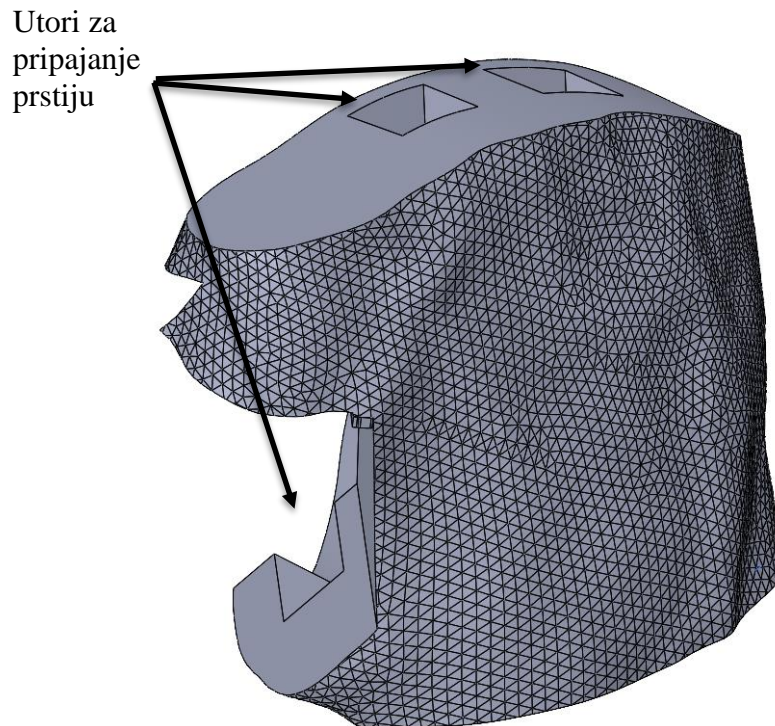
Slika 2. Podjela šake

Aktuacija prstiju šake vršit će se pomoću stlačenog zraka. Kako bi se mogao regulirati tlak pri aktuaciji koristit će se proporcionalan ventil. S obzirom na to da je dostupan jedan proporcionalan ventil, a tri su aktuirane komore, istovremena regulacija tlaka u svim komorama neće biti moguća. Komore će se do nekog tlaka aktuirati istovremeno, a zatim, pomoću solenoidnih ventila, pojedinačno. Korištenjem tri nezavisno upravljive komore željela se postići veća fleksibilnost u upravljanju pokretima šake, te mogućnost preciznijeg hvatanja objekata i regulacije fleksije prstiju.

2.1. Dlan

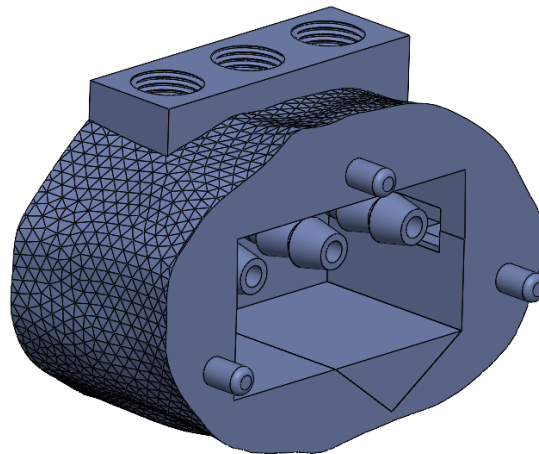
Obzirom na kompleksnu geometriju dlana, izrada realnog trodimenzionalnog modela dlana vrlo je komplicirana i vremenski neisplativa. Stoga je za model dlana preuzet trodimenzionalni sken ljuske ruke [9]. S ovog modela sa šake će se ukloniti prsti, koji će biti zamijenjeni pneumatskim aktuatorima. Dlan će imati dvojaku ulogu – služiti će kao baza za pričvršćivanje prstiju, te će kroz njega provući pneumatske veze i cijevi.

Na trodimenzionalnom modelu dlana napravljeni su utori kvadratnog oblika za povezivanje s odgovarajućim profilom na prstima (Slika 3). Ovaj kvadratni utor je malo većih dimenzija od profila na prstu kako bi se osigurala dovoljna zračnost prilikom spajanja. Izuzev utora, unutar dlana napravljena je šupljina kroz koju će se provesti pneumatske cijevi od prstiju do nastavka za spajanje s pneumatskim sustavom. S donje strane dlana napravljena su tri provrta preko kojih će se na dlan spojiti nastavak s pneumatskim priključcima.



Slika 3. Model dlana proteze

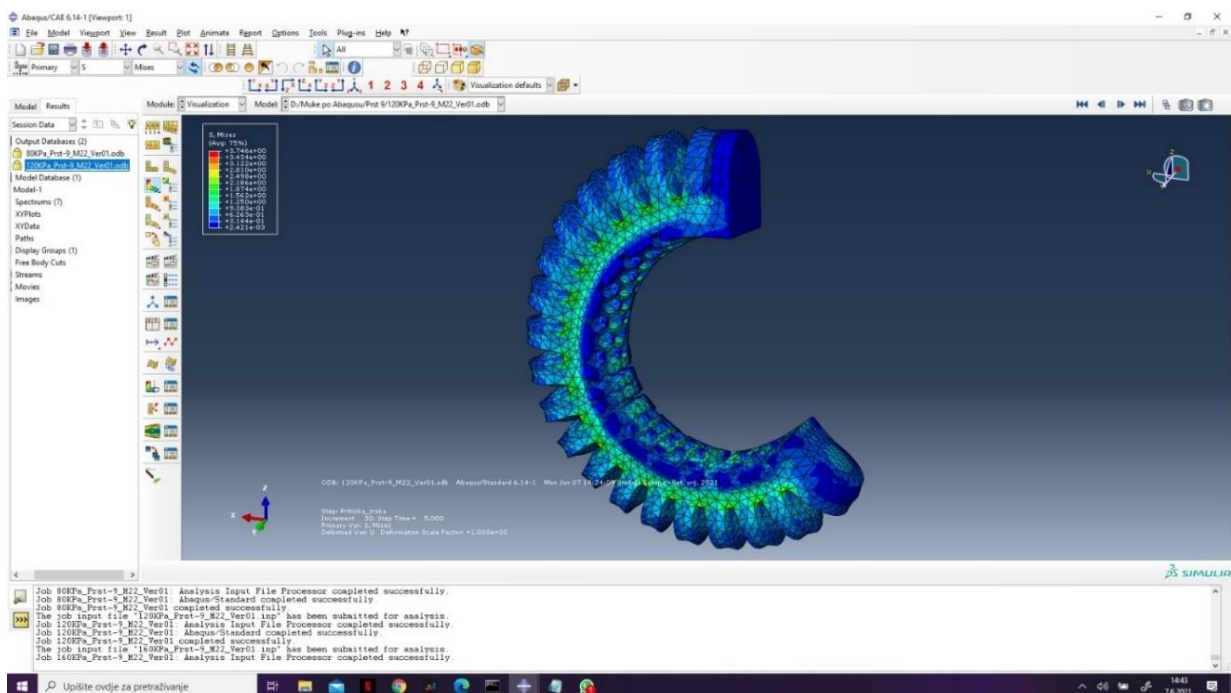
Nastavak s pneumatskim priključcima spaja se u produžetku na dlan te se preko njega prsti spajaju na priključke za pneumatske cijevi. Pneumatske cijevi koje idu iz prsta spajaju se na kružni profil s naborima koji je povezan na provrt navojem na koji će se spojiti pneumatski priključak. Na ovome dijelu napravljen je i kvadratni utor u koji će se staviti konektor za spajanje sa senzorom u šaci (Slika 4).



Slika 4. Nastavak s pneumatskim priključcima

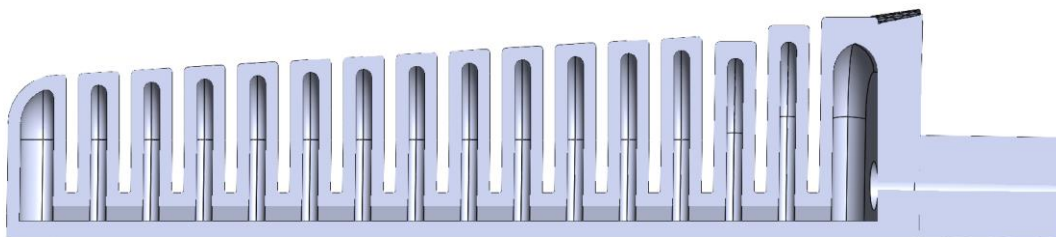
2.2. Prsti

Uloga prstiju bit će savijanje pod različitim kutovima, ovisno o danom tlaku, kako bi uhvatili objekte različitih dimenzija. Da se ne bi trošilo vrijeme i materijal za izradu prstiju, provedena je simulacija napreznja u programskom alatu Abaqus (Slika 5). Simulacija se provela metodom konačnih elemenata za različite dizajne prsta i zračnih komora. Pomoću simulacije željela se predvidjeti fleksija prsta te unutarnja opterećenja koja se javljaju pri određenim tlakovima.



Slika 5. Simulacija napreznja u Abaqus-u

Aktuacija prstiju omogućena je njihovom specifičnom strukturom te hiperelastičnim materijalom. Sami prsti sastoje se od mnogo međusobno povezanih zračnih komora (Slika 6) koje se, dovođenjem stlačenog zraka, zbog elastičnosti materijala napuhuju. Komore se nalaze s gornje strane prsta dok je donja strana prsta napravljena od punog, debljeg sloja materijala. Zbog kombinacije ekspanziranih komora i krute donje strane prsta dolazi do fleksije istog.

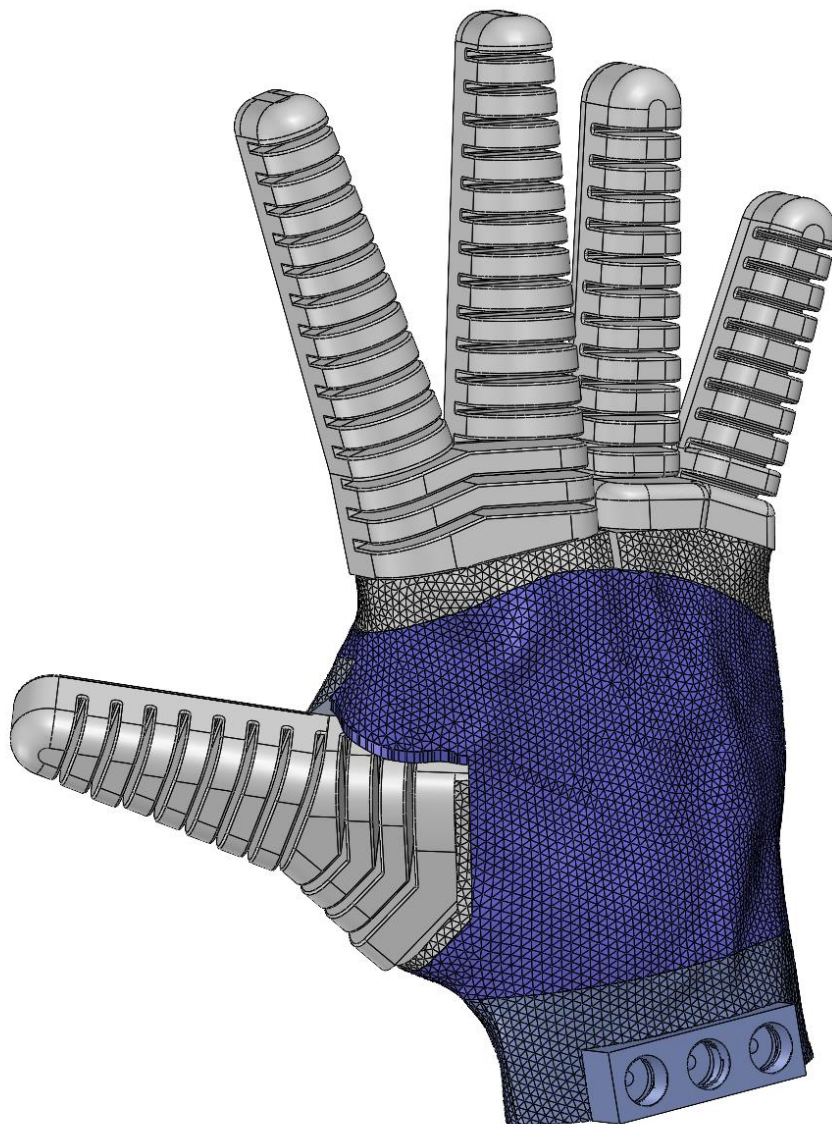


Slika 6. Presjek prsta

Kada se definirao dizajn kojim se postigla željena fleksija prsta, bilo je potrebno osmisliti način povezivanja prsta i dlana.

Prsti će se sa dlanom spojiti preko kvadratnog utora te je stoga na prstu napravljen kvadratni profil. Ovaj profil na prstu imati će dvojaku ulogu te će se kroz njega prsti spojiti sa pneumatskom sustavom, pomoću pneumatske spojnice. U sredini kvadratnog profila na prstu nalazi se provrt promjera 6 mm koji će se spojiti sa spojnicom. Kako je vanjski promjer rebara na spojnici 7 mm doći će do rastezanja fleksibilnog materijala čime će se ujedno smanjiti zračnost u spoju prsta i dlana, te će se time prst učvrstiti za dlan.

Na šaku je zatim dodan dio podlaktice te je time model završen. Gotov model prikazan je na slici 7.



Slika 7. Gotov trodimenzionalni model šake

3. AKTUACIJA ŠAKE

Aktuaciju šake moguće je izvesti na više načina. Razmotreni načini upravljanja bili su mehanički i pneumatski. Kod mehaničke aktuacije šake pokreti prsta bi se realizirali pomoću elektromotora, a kod pneumatske aktuacije to bi bilo izvedeno stlačenim zrakom. Zahtjevi kod odabira načina aktuacije bili su:

- Mala masa na samoj šaci
- Niska potrošnja energije/visoka autonomija
- Jednostavnost izvedbe

S obzirom na navedene zahtjeve, odabrani je pristup pneumatske aktuacije šake. Ovaj pristup omogućit će da na samoj šaci nema nikakvih dodatnih komponenti, već će se ona spojiti na udaljeni pneumatski sustav cijevima.

3.1. Pneumatski sustav

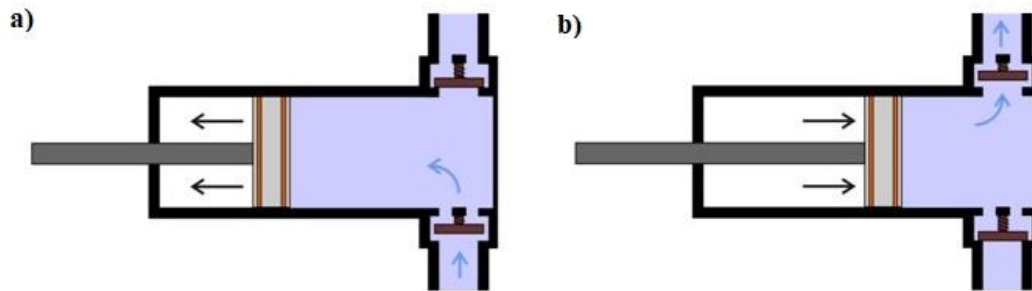
Pneumatski sustav upravljanja je sustav koji koristi komprimirani zrak pri generiranju, upravljanju i prijenosu energije. Pneumatski sustav sastoji se od pet osnovnih komponenata, a to su kompresor, spremnik tlaka, ventili, cijevi i aktuator. Kompresor je uređaj koji koristi energiju kako bi povisio tlak fluida, pritom mu smanjujući volumen. Spremnik tlaka ili tlačni spremnik je spremnik u kojem je pohranjena energija pneumatskog sustava u obliku stlačenog zraka. Ventili služe za upravljanje protokom zraka. Aktuator koristi stlačeni zrak za obavljanje korisnog rada- u ovom slučaju aktuatori su prsti na protezi.

3.1.1. Odabir kompresora

Kompresor ili tlačna pumpa je uređaj pomoću kojeg se mehanička energija elektromotornog ili motora s unutarnjim izgaranjem pretvara u potencijalnu energiju stlačenog zraka. Postoji mnogo različitih vrsta pumpa, a za potrebe ovog rada razmotrit će se dvije pumpe s pozitivnom istisninom- klipna i peristaltička pumpa.

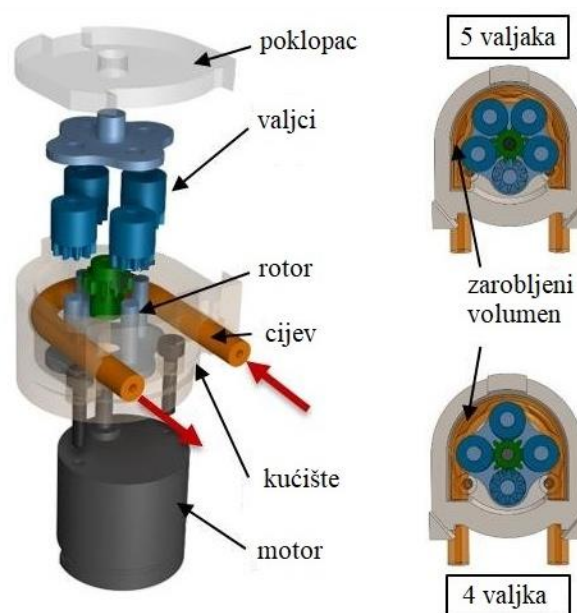
Klipna pumpa sastoji se od radnog cilindra sa stapom te ostatka klipnog mehanizma pogonjenog elektromotorom. Kretanje fluida kod ovih pumpi ostvaruje se pravocrtnim gibanjem stapa te ventilima koji se otvaraju ili zatvaraju podtlakom odnosno pretlakom [10]. Klipna pumpa koja će se razmatrati u ovom slučaju je jednoradna klipna pumpa, što znači da ima jedan ulaz za usis

i jedan izlaz, a radni takt sastoji se od dvije pozicije (Slika 8). Gibanjem cilindra u donju mrtvu točku u cilindru se stvara podtlak, koji uzrokovan atmosferskim pritiskom uzrokuje usis fluida u cilindar. Zatim se kretanjem klipa u gornju mrtvu točku stvara pretlak koji uzrokuje strujanje fluida kroz tlačnu cijev.



Slika 8. Klipna pumpa [11]

Peristaltička pumpa sastoji se od kućišta unutar kojeg je rotor s valjcima pogonjen elektromotorom koji pritišće cijev sa fluidom. Pritisak valjaka na cijev je dovoljan da zabrtvi zarobljeni volumen, a rotacijom valjaka istiskuje se volumen fluida zarobljen između dva valjka iz usisne u ispusnu cijev (Slika 9). Velika prednost ovakvog tipa pumpi, iako to za ovu primjenu nije važno, je to što fluid ne dolazi u kontakt sa mehaničkim dijelovima pumpe u niti jednom trenutku pumpanja. Fluid ostaje u kontaktu samo sa cijevi kroz koju putuje.



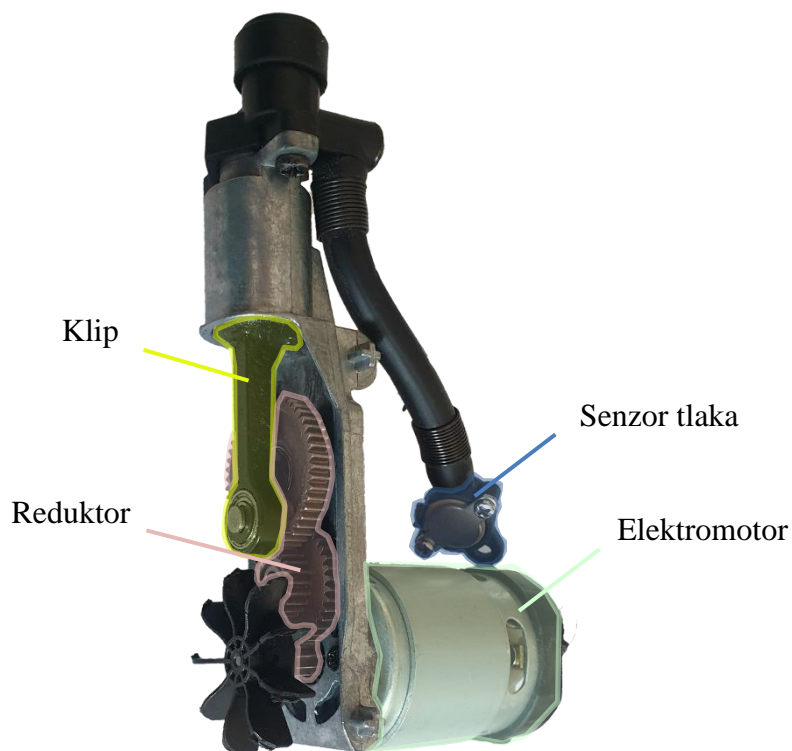
Slika 9. Peristaltička pumpa [12]

Klipna pumpa koja će se razmatrati u ovome radu nalazi se u prijenosnom kompresoru tvrtke Xiaomi. Ovaj kompresor korišten je prilikom testiranja te se pokazao kao dobra opcija za glavnu pumpu pneumatskog sustava. Stoga je sam uređaj rastavljen te je iz njega izuzeta klipna pumpa za daljnje testiranje (Slika 10).



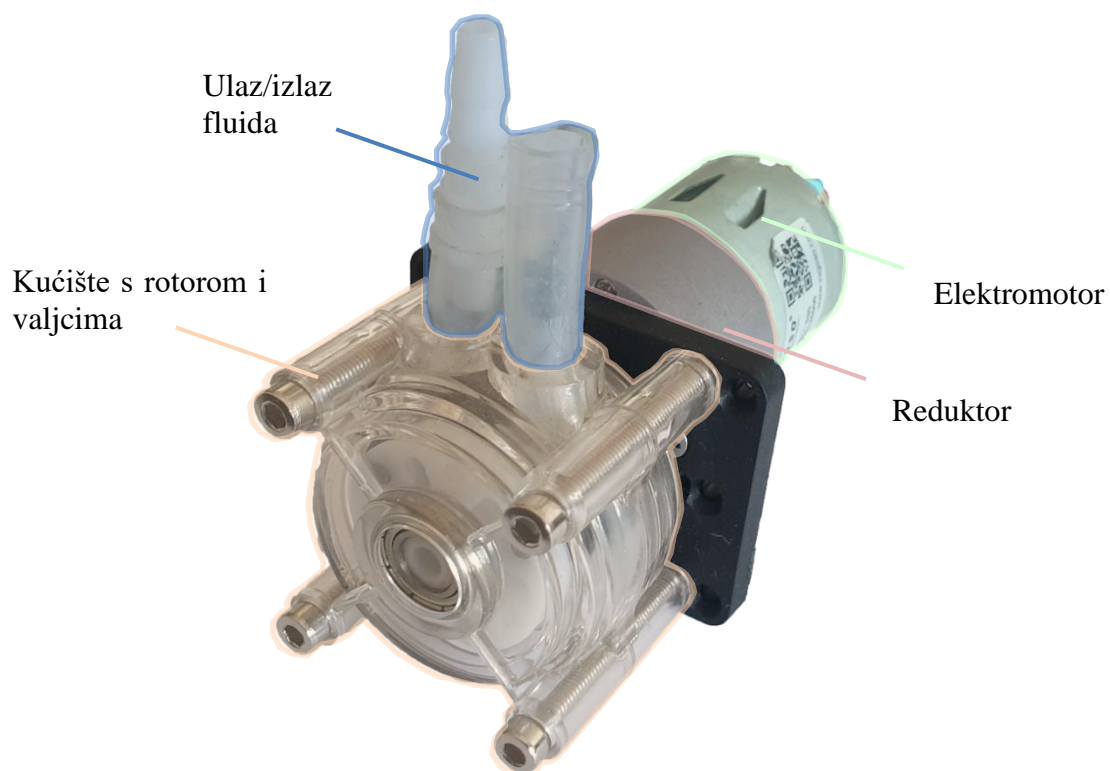
Slika 10. Rastavljen Xiaomi prijenosni kompresor

Ova klipna pumpa sastoji se od elektromotora, reduktora, klipa s klipnjačom te senzora tlaka (Slika 11). Kako za ovu pumpu nisu poznate tehničke karakteristike, one će se eksperimentalno odrediti.



Slika 11. Dijelovi klipne pumpe

Razmatrana peristaltička pumpa nosi oznaku GOSO GB37-530. Sastoji se od elektromotora s reduktorom, kućišta s rotorom na kojem se nalaze valjci, a unutar kojeg prolazi cijev za fluid (Slika 12).



Slika 12. Dijelovi peristaltičke pumpe

Za peristaltičku pumpu dostupne tehničke karakteristike dane su u tablici 2.

Tablica 2. Tehničke karakteristike peristaltičke pumpe

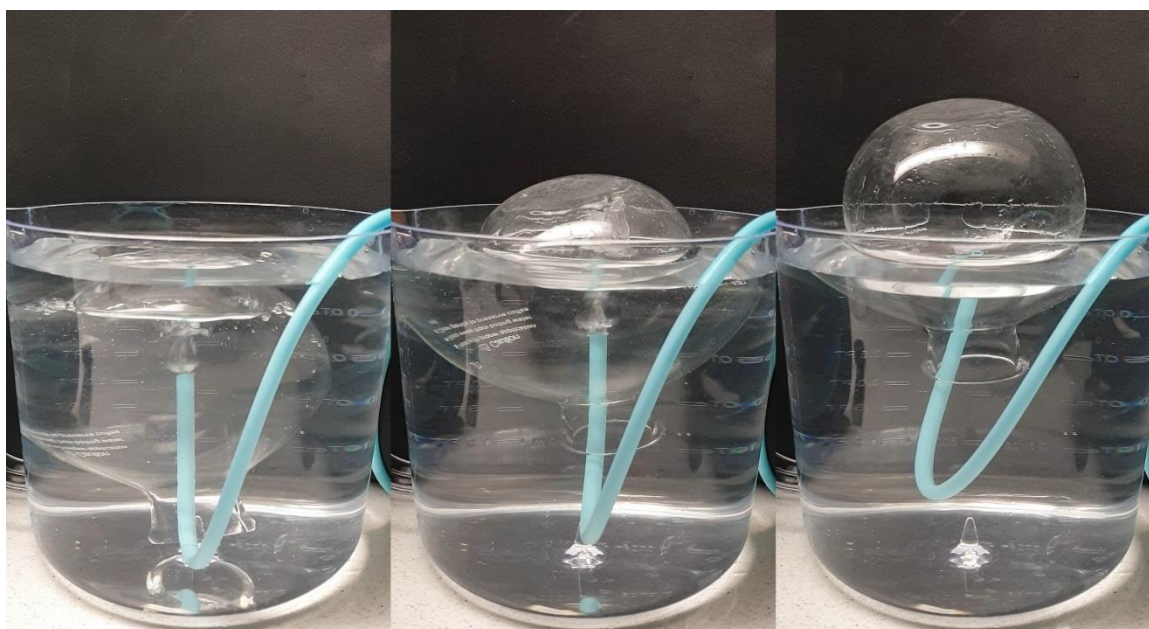
Napon	12 V
Struja	0,5-1,4 A
Protok	0-400 ml/min

3.1.1.1. Usporedba pumpa

Kako bi se moglo odrediti koja pumpa je prikladnija za pneumatski sustav proteze, izmjerit će se svi važni parametri kod obje pumpe te će se zatim usporediti. Parametri koji će se mjeriti su:

- Protok fluida
- Potrošnja energije
- Maksimalan tlak
- Buka

Izračun protoka izvršen je tako da je manja staklena posuda napunjena vodom uronjena u veću staklenu posudu napunjenu vodom. Zatim se u manju staklenu posudu pumpao zrak pomoću pumpe, te se pritom mjerilo vrijeme potrebno da bi se manja staklena posuda napunila zrakom. (Slika 13)



Slika 13. Ispitivanje protoka

Taj postupak ponovljen je za obje pumpe. Nakon što su poduzeta navedena mjerenja, bilo je potrebno izračunati volumen manje staklene posude. Uz poznatu gustoću vode, volumen je moguće dobiti mjerenjem mase vode u manjoj posudi.

$$V_p = \frac{m_v}{\rho_v} \quad (3.1)$$

gdje su:

V_p - volumen posude,

ρ_v - gustoća vode,

m_v - izmjerena masa vode u posudi.

Nadalje, da bi se dobio protok potrebno je dobiveni volumen podijeliti sa vremenom potrebnim za ispunjavanje posude zrakom.

$$Q_{\text{pumpe}} = \frac{V_p}{t_p} = \frac{m_v}{\rho_v t_p} \quad (3.2)$$

Za klipnu pumpu izmjereno je vrijeme punjenja $t_{pk} = 10,746$ s, a za peristaltičku $t_{pp} = 82,43$ s.

Zatim su izračunati pripadajući protoci:

$$Q_{\text{klip}} = \frac{m_v}{\rho_v t_{pk}} = \frac{0,646}{997,77 \cdot 10,746} = 60,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (3.3)$$

$$Q_{\text{peris}} = \frac{m_v}{\rho_v t_{pp}} = \frac{0,646}{997,77 \cdot 82,43} = 7,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Odnosno ako pretvorimo jedinice u litre po minuti, dobivamo:

$$Q_{\text{klip}} = 3,614 \frac{\text{l}}{\text{min}} \quad (3.4)$$

$$Q_{\text{peris}} = 0,471 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Važno je napomenuti da se ovaj protok očekuje u praznom hodu pumpe. Kada će pumpa biti spojena na pneumatski sustav pod tlakom, protok će biti manji.

Nakon izračuna protoka za obje pumpe izračunata je potrošnja energije te maksimalan tlak koji je moguće njima postići. Za izračun potrošnje energije, izmjerene su vrijednosti napona i struje u neopterećenom stanju (praznom hodu) i opterećenom stanju (kod maksimalnog tlaka).

Zatim je dobivena snaga prema

$$P = UI \quad (3.5)$$

Preko dobivene snage izračunata je efikasnost potrošnje energije tako da se potrošnja energije u gorem slučaju (opterećenom stanju) podijeli sa protokom fluida

$$E_f = \frac{P}{Q} \quad (3.6)$$

Dobiveni rezultati dani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja

	Klipna crpka	Peristaltička crpka
U	7,3 V	13,2 V
I₀	2,84 A	0,53 A
I_{opt}	3,4 A	0,9 A
P₀	20,73 W	7 W
P_{opt}	24,82 W	11,88 W
E_f	412 J/l	1513 J/l

Maksimalan tlak izmjeren je spajanjem pumpa na senzor tlaka. Da bi usporedba bila potpuna, izmjerena je još i razina buke na udaljenosti od 1 m te su uzete u obzir dimenzije pumpa. Konačno, svi važni parametri za usporedbu pumpa prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Usporedba parametara klipne i peristaltičke pumpe

	Klipna pumpa	Peristaltička pumpa
Protok	3,614 l/min	0,471 l/min
Efikasnost	412 J/l	1513 J/l
Maksimalan tlak	>6 bar	5,2 bar
Buka	69 dB	45 dB
Dimenzije	+	-

Kako se u većini važnih parametara klipna pumpa pokazala kao bolja opcija, ona je odabrana kao kompresor za pneumatski sustav proteze.

Na ovaj kompresor spaja se preko navoja za bicikle. Veza između kompresora i ostatka pneumatskog sustava ostvarit će se pomoću pneumatske cijevi unutarnjeg promjera 3mm, koja sa jedne strane ima navoj za bicikle (Slika 14). S obzirom da su ostale pneumatske cijevi unutarnjeg promjera 4mm, bit će potrebno izraditi adapter za povezivanje ovih dviju cijevi.



Slika 14. Pneumatska cijev za spajanje na kompresor

3.1.2. Tlačni spremnik

Tlačni spremnik služiti će za pohranu stlačenog zraka, potrebnog za rad aktuatora. Svrha tlačnog spremnika je da se omogući upravljanje aktuatorima šake bez potrebe za kontinuiranim radom kompresora. Tlačni spremnik omogućit će trenutno opskrbljivanje aktuatora traženim tlakom.

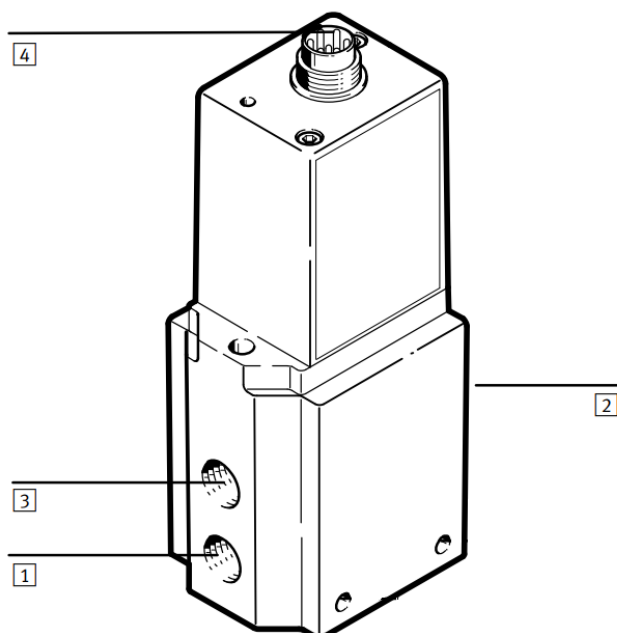
Kod odabira tlačnog spremnika pazilo se da on bude kompaktan, male mase, lako nabavljiv te dostatan za pohranu dovoljne količine stlačenog zraka, te je stoga za tlačni spremnik odabrana PET ambalaža za gazirani sok. Prema [13] i [14], neotvorena PET ambalaža je pod tlakom od $3,7 \pm 1$ bar. Planirani tlak u tlačnom spremniku bit će do 5 bar. Ukoliko uračunamo faktor sigurnosti za ovu ambalažu, može se pretpostaviti da ona može izdržati tlakove veće od 8 bar, što je puno više nego će biti potrebno za ovu primjenu. Kako se ovakve ambalaže često koriste kod hobista za tlačne spremnike vodenih raketa, njihova sposobnost držanja stlačenog zraka dobro je poznata. Prema ispitivanju izdržljivosti [15] sve ispitivane PET ambalaže izdržale su tlakove veće od 10 bar. Te je stoga tlačni spremnik u ovom obliku procijenjen kao siguran za korištenje za tlakove potrebne za akciju proteze.

Kako bi tlačni spremnik u obliku PET ambalaže bilo moguće spojiti sa ostatkom pneumatskog sustava, bit će potrebno izraditi poseban čep na koji će biti moguće postaviti pneumatski priključak.

3.1.3. Ventili pneumatskog sustava

3.1.3.1. Proporcionalni ventil

Za precizno upravljanje tlakom koristit će se proporcionalni ventil tvrtke Festo MPPE-3-1/8-10-010-B. Proporcionalni ventil je podvrsta ventila u kojoj se protok fluida regulira ograničavanjem prolaza fluida kroz ventil, a to je ostvareno pomakom elektromagneta koji je proporcionalan upravljačkom naponu. Model korištenog proporcionalnog ventila prikazan je na slici 15.



Slika 15. Proporcionalni ventil Festo MPPE-3-1/8-10-010-B [16]

Na slici su označeni tlačni ulazni konektor na koji se spaja zračni vod pod tlakom (1), izlazni konektor kroz koji se ispušta zrak pod podešenim tlakom (2), ispušni konektor (3) te konektor za napajanje i upravljanje (4).

Pomoću ovog proporcionalnog ventila moguće je precizno regulirati tlak na izlazu podešavanjem tražene vrijednosti tlaka pomoću električnih signala. Ventil ima ugrađeni senzor tlaka kojim uspoređuje izmjerenu vrijednost tlaka sa referentom vrijednosti te na temelju toga vrši regulaciju tlaka. Ukoliko postoji odstupanje od navedenih dviju vrijednosti ventil se aktivira sve do kad izlazni tlak ne dosegne traženu vrijednost.

Ventilom je moguće regulirati tlakove do 10 bar što je mnogo više od očekivanih maksimalnih vrijednosti tlaka ovog pneumatskog sustava. Ventil se napaja naponom od 24 V a referentne vrijednosti tlaka zadaju se signalom napona od 0-10 V što je ekvivalent tlaku od 0-10 bar. Tehničke karakteristike ventila dane su u tablici 5.

Tablica 5. Karakteristike proporcionalnog ventila

Napon napajanja	18-30 VDC
Potrošnja energije	max 3,6 W
Napon upravljanja	0-10 VDC
Struja upravljanja	4-20 mA
Maksimalan protok Qn	1200 l/min
Maksimalan tlak na ulazu	12 bar
Maksimalan regulirani tlak	10 bar
Histereza	50 mbar

Na navedeni ventil spaja se Festovim 8-žičnim MSSD-PE konektorom. Zbog jednostavnijeg povezivanja ventila sa mikrokontrolerom, napravljen je adapter sa MSSD-PE na RJ45 (Ethernet) konektor.

3.1.3.2. Solenoidni ventil

Kako je na raspolaganju jedan proporcionalni ventil, a na protezi šake postoje 3 aktuirane komore, koristit će se tri dvopoložajna solenoidna ventila kako bi bilo moguće ostvariti pojedinačnu akciju svake komore.

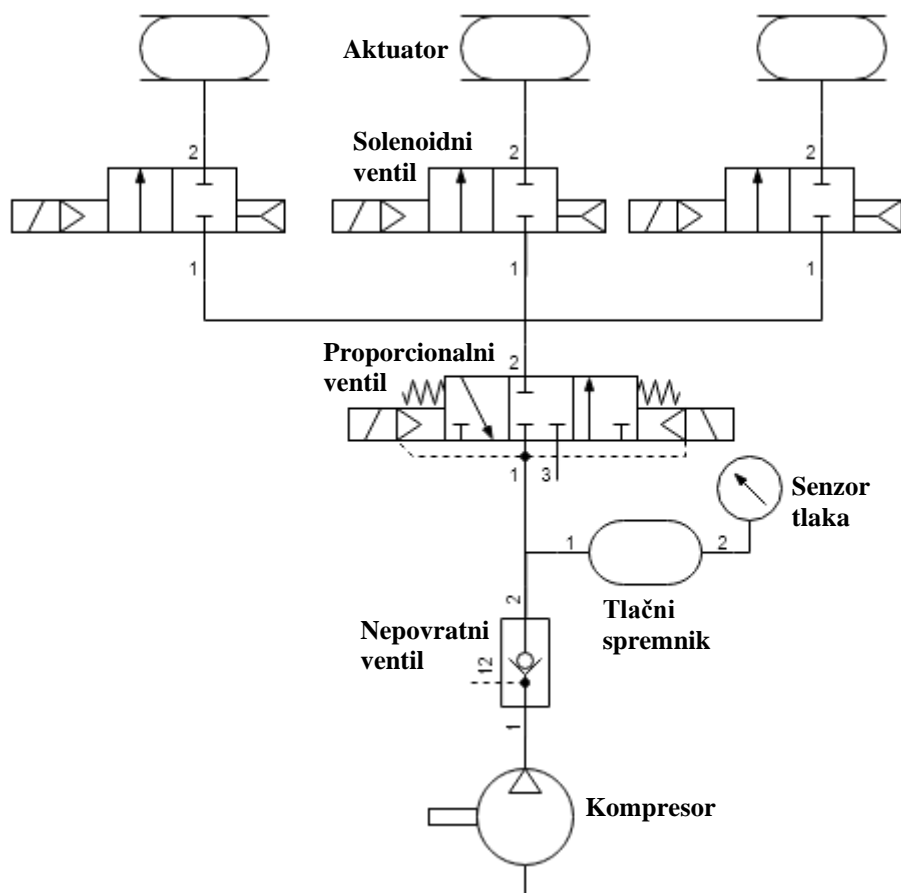
Odabrani solenoidni ventili nose oznaku EVI 7/9, a sastoje se od elektromagneta napajanog naponom od 12 V i dva konektora za spajanje zračnog voda (Slika 16). Dok nisu aktivirani, ventili su u zatvorenom položaju.



Slika 16. Solenoidni ventil [17]

3.1.4. Shema pneumatskog sustava

Shema povezivanja komponenti pneumatskog sustava dana je na slici 17.



Slika 17. Shema pneumatskog sustava

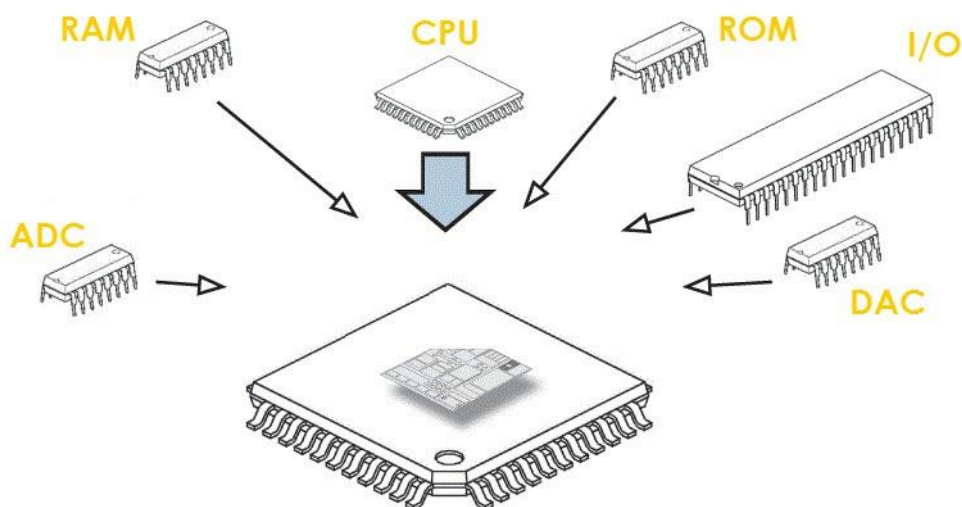
3.2. Sustav upravljanja

Nakon što su odabrane sve elektromehaničke komponente, potrebno je odabrati ostatak elektroničkih komponenti kako bi sve bilo moguće povezati u funkcionalan upravljački krug.

3.2.1. Mikrokontroler

Najvažnija komponenta sustava upravljanja jest programibilni mikrokontroler. Mikrokontroler jest, kao što mu ime sugerira, mali integrirani strujni krug koji služi za upravljanje drugim dijelovima elektroničkog sustava [18]. Mikrokontroler sastoji se od 3 osnovne komponente (Slika 18):

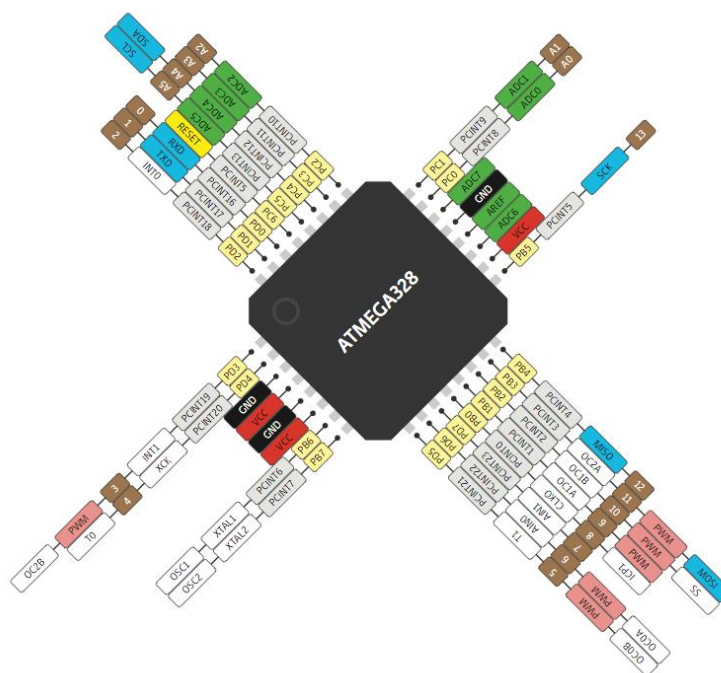
1. procesora (CPU)
2. memorije (RAM/ROM)
3. ulazno-izlaznog registara (I/O).



Slika 18. Sastavni dijelovi mikrokontrolera [19]

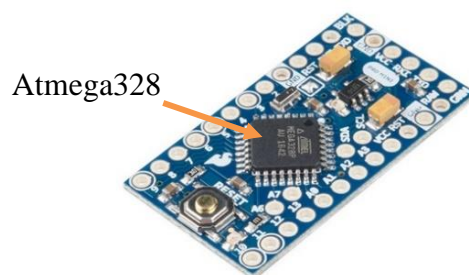
Procesor služi za izvršavanje logičkih i aritmetičkih operacija, pritom spremajući rezultate u RAM (eng. *Random Access Memory*) memoriju. ROM (eng. *Read Only Memory*) je nepromjenjiva memorija u kojoj su spremljene instrukcije za procesor. Ulazno-izlazni registri služe za komunikaciju s vanjskim uređajima, odnosno za slanje i primanje informacija iz okoline.

S obzirom na dostupnost velikog broja mikrokontrolera, različitih mogućnosti i arhitektura, važno je znati odabrati adekvatni mikrokontroler za željenu primjenu. Za upravljanje pneumatskim sustavom proteze šake odabran je mikrokontroler ATmega328 tvrtke Atmel. Ovaj mikrokontroler odabran je radi svoje dostupnosti, pouzdanosti te više nego dovoljnim performansama. ATmega328 jest 8-bitni mikrokontroler sa 32kB flash memorije, 23 ulazno/izlaznih porta te 10-bitnim A/D pretvornikom [20]. Shema navedenog mikrokontrolera dana je na (Slika 19).



Slika 19. Atmega328 pin dijagram [21]

S obzirom na male dimenzije mikrokontrolera, zbog jednostavnosti koristit će se razvojna pločica Pro Mini 328 tvrtke Arduino. Ova pločica u olakšava povezivanje I/O kanala mikrokontrolera te sadrži 5V linearni regulator napona i 16 MHz kvarcni oscilator koji je potreban za njegov rad (Slika 20).



Slika 20. Arduino Pro Mini [22]

Tehničke specifikacije navedenog mikrokontrolera dane su u tablici 6.

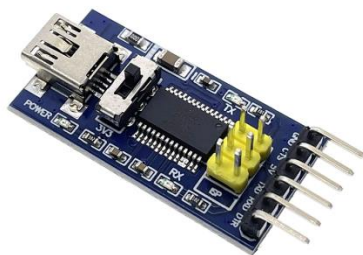
Tablica 6. Tehničke karakteristike ATmega328 mikrokontrolera [23]

Mikrokontroler	ATmega328
Napajanje	5 - 12 V
Radni napon	5 V
Digitalni ulazno-izlazni kanal	14
PWM izlazni kanal	6
UART komunikacija	1
SPI komunikacija	1
I2C komunikacija	1
Analogni ulaz	6
Vanjska prekidna rutina	2
Maks. struja I/O	40 mA
Flash memorija	32 kB
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Brzina takta	16 MHz

Mikrokontroler će služiti za primanje i obradu informacija sa senzora te za upravljanje aktuatorima i ventilima.

3.2.1.1. Programiranje mikrokontrolera

Programiranje mikrokontrolera vršit će se preko UART-a(eng. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). UART je uređaj koji služi za ostvarivanje asinkrone serijske komunikacije između dva uređaja, a na računalo se spaja preko USB-a (eng. *Universal Serial Bus*)(Slika 21).



Slika 21. UART programator

Za pisanje programskog koda koristit će se PlatformIO IDE. PlatformIO IDE je integrirano razvojno okruženje s podrškom za razvoj velikog broja mikrokontrolera. Programski kod za Atmel-ove mikrokontrolere piše se u modificiranoj inačici C i C++ programskog jezika koji će se pomoću PlatformIO-a prevesti u strojni kod koji mikroprocesor razumije.

Najosnovniji programski kod za Atmel-ove mikroprocesore sastoji se od dvije funkcije:

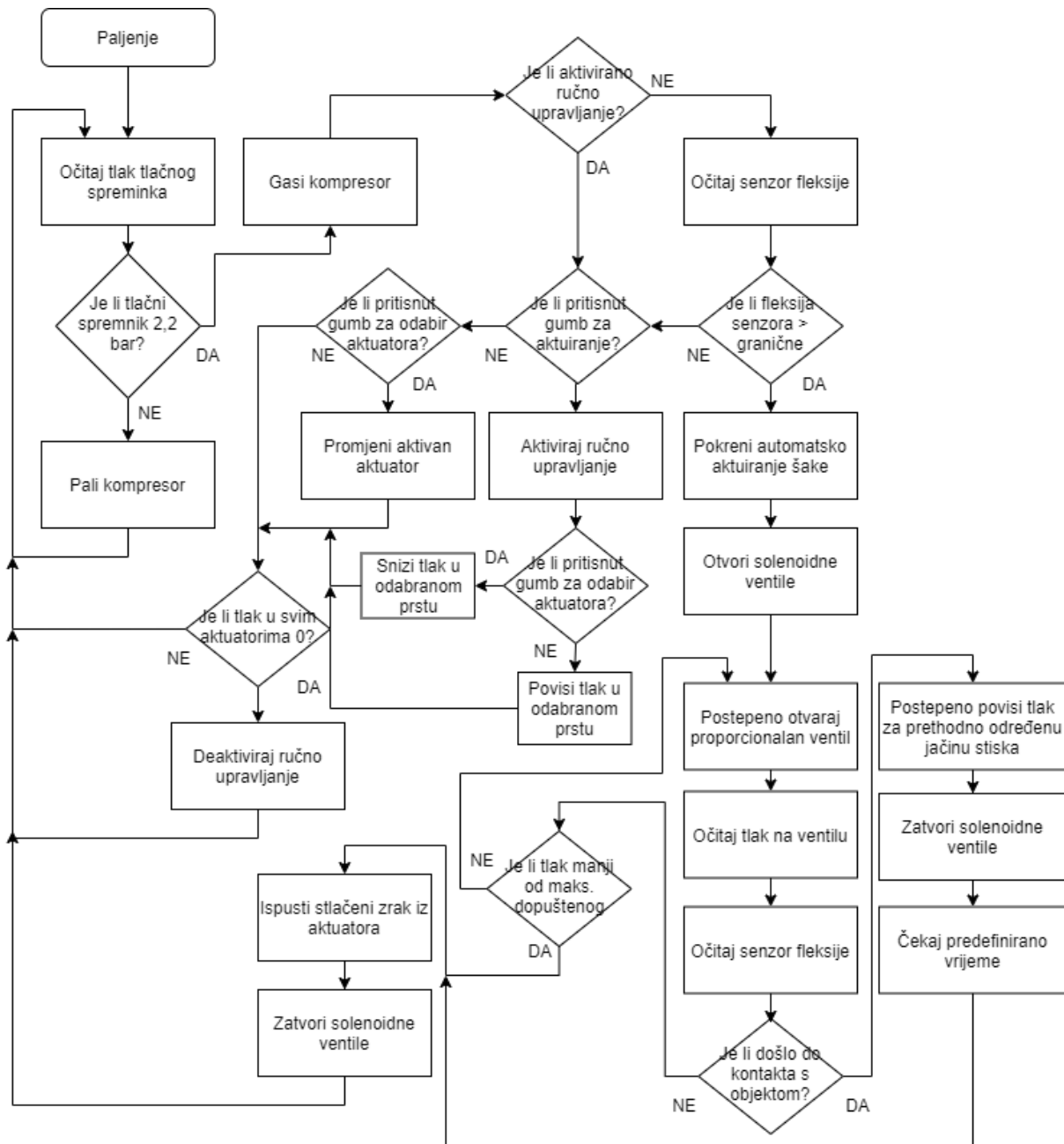
- *Setup* – funkcija koja se izvršava jednom, prilikom paljenja mikrokontrolera.
- *Loop* – funkcija koja se izvršava kontinuirano nakon *setup* funkcije.

Unutar *loop* funkcije nalazi se programski kod koji definira ponašanje mikrokontrolera. Izuzev navedenih dviju funkcija koje su neophodne, moguće je definirati i vlastite funkcije koje će se pozivati prilikom rada mikrokontrolera. Programski kod za protezu strukturiran je pomoću funkcija kako bi se olakšalo razumijevanje ponašanja programa.

Upravljanje protezom realizirano je kroz 2 režima rada – ručni režim i automatski režim. U ručnom režimu rada protezom se upravlja pomoću dva tipkala. Jednim tipkalom bira se zračna komora, odnosno prst, kojim se želi aktuirati, a drugim se manipulira tlakom u komori. Tlak u komori će se postepeno povećavati ukoliko se drži tipkalo za promjenu tlaka, a smanjivati ako se pritom drži i drugo tipkalo. Tlak u komori može se povećavati do prethodno određene maksimalne vrijednosti. U automatskom režimu rada, aktuacija komora odvija se istovremeno za sve tri komore. Aktuacija se pokreće dodiranjem prsta u kojem se nalazi senzor fleksije te se tlak u komorama pritom inkrementalno povećava sve dok nije zadovoljen jedan od dva uvjeta. Prvi uvjet je doseg predefiniranog maksimalnog tlaka u komorama, a drugi je doticanje objekta hvatanja. Doticanje objekta hvatanja prepoznaje se pomoću senzora fleksije. Kada se prepozna doticanje objekta tlak u komorama povećava se još malo, za predefiniranu vrijednost koja predstavlja jačinu stiska prilikom hvatanja objekta. Tada se objekt drži 10 sekundi nakon čega

se objekt pušta, a komore prazne. Tokom izvršavanja programa također se kontinuirano prati stanje tlaka u tlačnom spremniku, te ako tlak padne ispod 1,6 bar, pali se kompresor koji tlačni spremnik vraća na 2,2 bar.

Programski kod proteze dan je u prilogu rada, a dijagram toka programa s pregledom najvažnijih obrazaca postupanja dan je na slici 22.



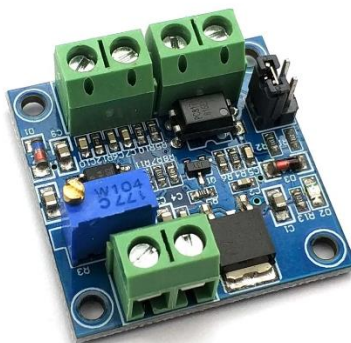
Slika 22. Dijagram toka programa

3.2.2. Ventili

Za podešavanje tlaka na proporcionalnom ventilu tvrtke Festo potrebno je podesiti analogni signal između 0 i 10 V DC, ovisno o željenom tlaku [16]. S obzirom da Arduino radi sa signalima do 5 V, u teoriji bi trebalo biti moguće upravljati ventilom do polovice maksimalnog raspona (0-5 bar) što bi za ovu primjenu bilo i više nego dovoljno.

Problem proizlazi iz toga što mikrokontroler ne može slati analogne signale, već samo PWM (pulsno širinsku modulaciju). Pulsno-širinska modulacija je metoda smanjenja napona promjenom trajanja impulsa, odnosno za naponski impuls duplo manjeg trajanja, srednja vrijednost napona na izlazu jest duplo manja. Kod pulsno-širinske modulacije napon signala i dalje iznosi 5 V, samo njegova srednja vrijednost opada, odnosno signal je i dalje digitalan te kao takav nije primjenjiv za upravljanje tlakom na Festo ventilu.

Da bi se dobio analogni signal raspona 0-10 V korišten je naponski modul LC-LM358-PWM2V (Slika 23). Ovaj modul na ulazu prima PWM signal te ovisno o periodu signala na izlazu daje analogni napon u rasponu od 0-10 V. Modul je potrebno napajati naponom 12-30 V te na ulazu prima PWM frekvencije 1-3 kHz.



Slika 23. Naponski modul LC-LM358 [24]

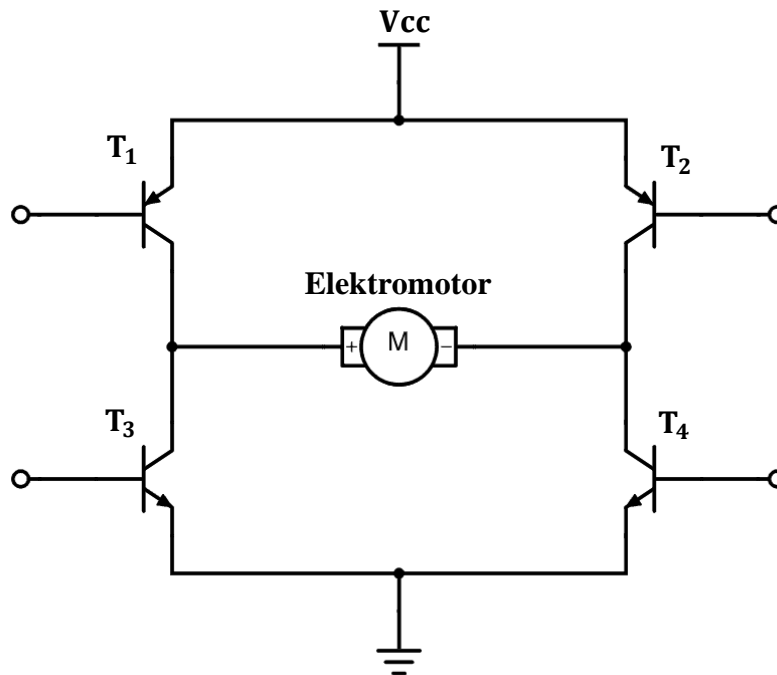
Solenoidne ventile potrebno je napajati naponom od 12 V, te će se njima upravljati indirektno, preko tranzistora. Arduino će sa svojim naponskim nivoom od 5 V upravljati tranzistorom, koji će nadalje zatvarati strujni krug sa ventilom na naponskom nivou od 12 V. Za ovu namjenu odabran je tranzistor TIP122, čije su tehničke karakteristike dane u tablici 7.

Tablica 7. Tehničke karakteristike tranzistora TIP122 [25]

Napon kolektor-emiter	100 V
Napon kolektor-baza	100 V
Napon emiter-baza	5 V
Struja kolektor	5 A
Struja baze	120 mA
Rasipanje snage	2 W

3.2.3. Kompresor

Kompresor, odnosno klipna pumpa, će se napajati direktno preko baterije. Da bi bilo moguće upravljati stanjem kompresora pomoću mikrokontrolera koristit će se MOSFET (metal-oksidni-poluvodič tranzistor sa efektom polja). MOSFET je naponski upravljiv tip tranzistora koji se koristi kada se njima upravlja strujnim krugom s velikim trošilima. Od klasičnog FET tranzistora razlikuje se u tome što nije upravljani strujom, već naponom, a to se postiže dodavanjem posebnog tankog sloja silicijevog dioksida oko upravljačke diode [26]. MOSFET će u ovom strujnom krugu predstavljati svojevrsnu sklopku koja pali i gasi elektromotor, a kojom upravlja mikrokontroler. Za upravljanje elektromotorom koristit će se tranzistorski H-most, čija je shema dana na slici 24. Ovaj strujni krug sastoji se od četiri tranzistora, u ovom slučaju MOSFETA, koji se aktiviraju dovođenjem signala s mikrokontrolera na bazu tranzistora. U danom trenutku polariziran je samo jedan par tranzistora (T_1 i T_4 ili T_2 i T_3), a smjer rotacije elektromotora ovisi o tome koji par tranzistora je polariziran.



Slika 24. Shema H-mosta [27]

Za upravljanje pumpom koristit će se integrirani elektronički sklop naziva BTS7960. BTS7960 je integrirani H-mosni modul za upravljanje elektromotorima velike snage (Slika 25).



Slika 25. BTS7960 driver

Ovaj modul sastoji se od integriranog H-mosta. Izuzev H-mosta, na modulu se nalazi upravljački strujni krug preko kojeg se upravlja MOSFET-ima. Karakteristike ovog modula dane su u tablici 8.

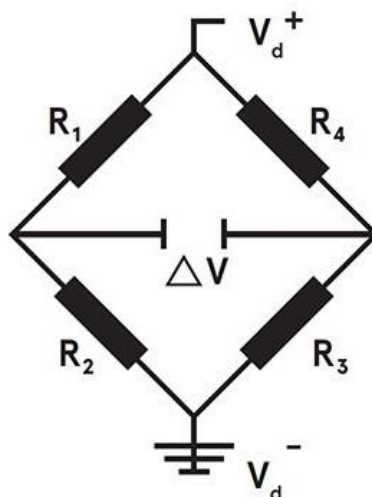
Tablica 8. Tehničke karakteristike BTS7968 [28]

Ulazni napon	6-27 V
Maksimalna struja	43 A
PWM frekvencija	do 25 kHz
Napon upravljanja	3,3-5 V
Dimenzije	50 mm x 50 mm x 43 mm
Težina	66 g

Brzina rada elektromotora ovisiti će o naponu ulaznog signala koji će isporučiti mikrokontroler. Struja potrebna za napajanje elektromotora pumpe mnogo je manja od maksimalne struje ovog modula, te je time osigurano da neće doći do pregrijavanja MOSFET-a prilikom rada kompresora.

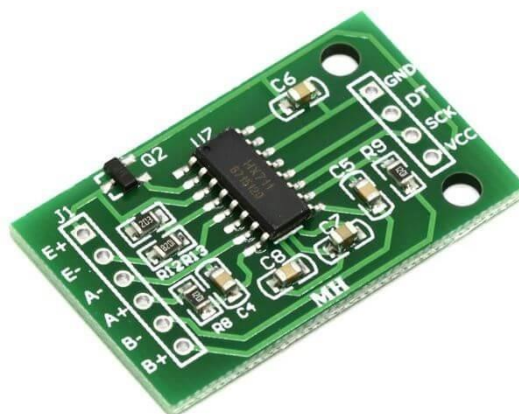
3.2.4. Senzor tlaka

Za model senzora tlaka koji se nalazi u sklopu klipne pumpe nije pronađena tehnička dokumentacija, pa je bilo potrebno odrediti o kakvom tipu senzora se radi. S obzirom na to da senzor ima 4 žice pretpostavljeno je da se radi o Wheatstone-ovom mostu, odnosno MEMS senzoru tlaka s piezootpornim mjernim člancima. Ovakav senzor tlaka sastoji se od 4 piezootporna mjerna članka povezanih u Wheatstone-ov most (Slika 26). Promjenom tlaka na dijafragmi mijenja se otpor mjernih članaka a promjenom otpora dolazi do većeg ili manjeg pada napona na otporniku čime se dobiva korelacija između izmjerenog napona i tlaka na dijafragmi.



Slika 26. Wheatstone-ov most

Kako su promjene napona vrlo malene, a ATmega328 mikrokontroler ima ugrađeni 10-bitni analogno-digitalni konverter što je premalo za ovu vrstu mjerenja, koristit će se vanjski analogno-digitalni konverter HX711 (Slika 27). HX711 je 24-bitni analogno-digitalni konverter industrijske primjene, a obično se koristi za vage temeljene na Wheatstone-ovom mostu. Ovaj A/D konverter ima dva kanala te pojačalo signala s mogućnošću pojačanja signala od 32, 64 ili 128 puta [29].



Slika 27. HX711 [30]

Senzor tlaka spojen je na B kanal HX711 pretvarača uz pojačanje signala od 32 puta. Spajanjem HX711 na mikrokontroler moguće je očitati izmjerene vrijednosti napona ali one kao takve ništa ne predstavljaju pa je potrebno prvo korelirati očitane vrijednosti s stvarnim tlakom. To je učinjeno tako da su za iste tlakove istovremeno uzeta očitavanja napona na HX711

modulu i signala sa Festo proporcionalnog ventila. Kako je odnos naponskog nivoa sa Festo ventila i tlaka poznat, koreliranje napona sa HX711 s vrijednosti tlakom bilo je trivijalno.

3.2.5. *Senzor fleksije*

Senzor fleksije je varijabilni otporni uređaj u obliku trake, duljine 5,5 cm. Na sebi ima elektrootporni film, čiji se otpor mijenja ovisno o savijenosti trake (Slika 28). Ukoliko se senzor savija vlačno otpor senzora raste, a prilikom tlačnog opterećenja otpor na senzoru pada.



Slika 28. Senzor fleksije [31]

Stanje savijenosti senzora očituje se u padu napona preko otpornika. Da bi bilo moguće očitati taj pad napona preko mikrokontrolera, potrebno je napraviti djelitelj napona. Djelitelj napona jest strujni krug koji se sastoji od dva otpornika spojena u seriju. U ovom slučaju jedan otpornik bit će poznate vrijednosti otpora, a drugi će biti onaj kojeg mjerimo, odnosno senzor fleksije. Dovođenjem napona od 5 V dolazi do njegovog pada preko spomenuta dva otpornika, a poznavanjem vrijednosti jednog od njih te izmjerenim padom napona, može se izračunati vrijednost drugog, nepoznatog, otpornika. Dobivena vrijednost ovisit će o fleksiji senzora.

Ovisnost pada napona o otporima u djelitelju napona definirana je sljedećim izrazom:

$$U_{\text{izlaz}} = U_{\text{ulaz}} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right), \quad (3.7)$$

gdje je:

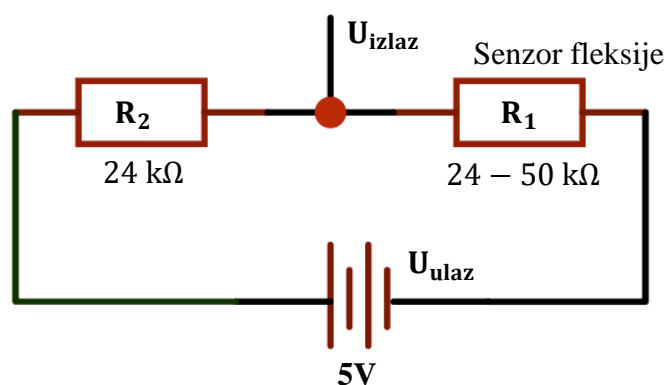
U_{izlaz} - mjereni napon

U_{ulaz} - napon napajanja

R_1 - otpor senzora fleksije

R_2 - otpornik poznatog iznosa.

Otpornik poznatog iznosa odabran je tako da pad napona u neutralnoj poziciji senzora iznosi 50%, odnosno 2,5 V. Ta vrijednost pada napona dobit će se ukoliko vrijedi $R_1 = R_2$. Mjerenjem otpora utvrđeno je da senzor fleksije u neutralnoj poziciji pruža otpor od 24 k Ω , te će se stoga za poznati otpor uzeti otpornik iste vrijednosti. Shema strujnog kruga dana je na slici 29.



Slika 29. Shema spajanja senzora fleksije

Za ovu konfiguraciju izračunate su sljedeća maksimalna i minimalna vrijednost izmjenog napona:

$$U_{\min} = 5 \cdot \left(\frac{24}{24 + 24} \right) = 2,5 \text{ V},$$

$$U_{\max} = 5 \cdot \left(\frac{50}{50 + 24} \right) = 3,37 \text{ V}. \quad (3.8)$$

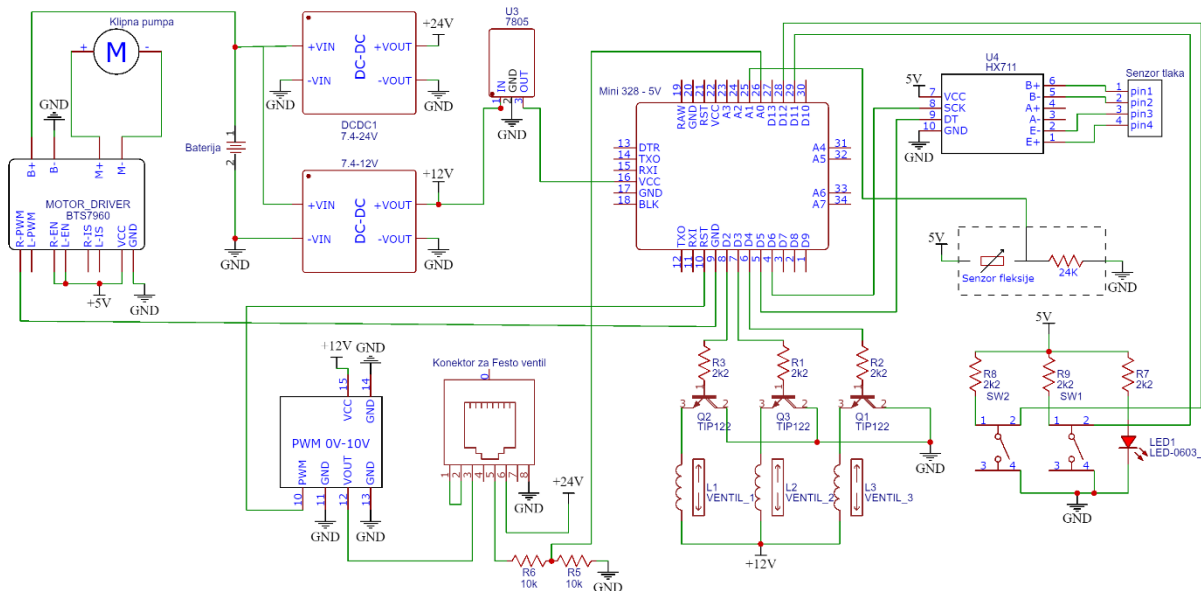
Senzor fleksije pričvrstit će se sa donje strane kažiprsta, a služiti će za prepoznavanje doticaja objekta hvatanja. Pomoću ovog senzora bit će moguće regulirati jačinu stiska hvatanog objekta.

3.2.6. Kontroler za ručno upravljanje protezom

Kako bi se realizirala mogućnost ručnog aktuiranja zračnih komora, napraviti će se kontroler kojim će biti moguće birati i aktuirati zračne komore. To će se realizirati pomoću dva tipkala spojena na mikrokontroler. Uz navedena tipkala spojit će se i statusna LED dioda koja će svijetliti kada je sustav upaljen.

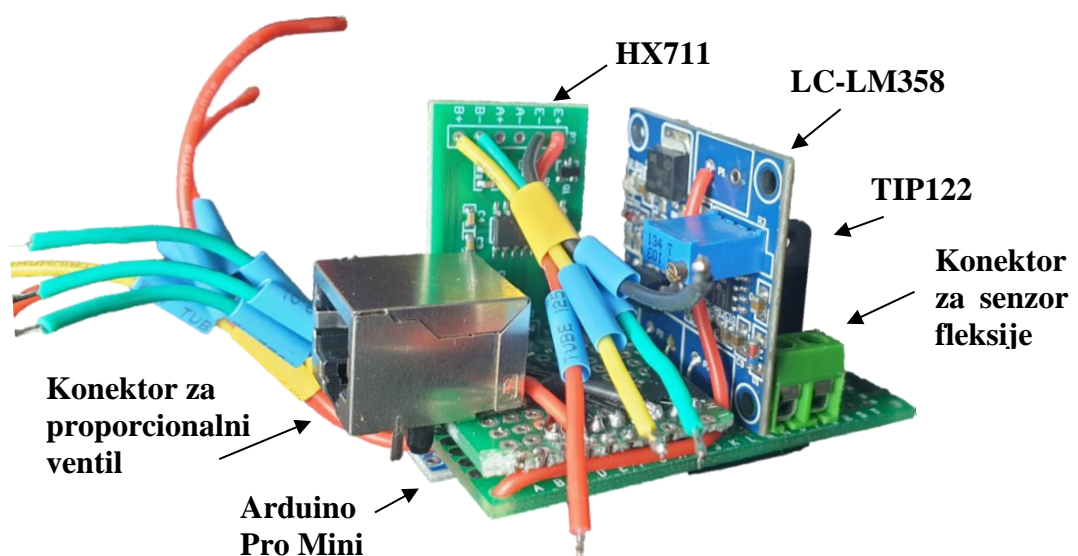
3.2.7. Shema električnog sustava

Nakon odabira svih potrebnih elektroničkih komponenti, iste je bilo potrebno pravilno povezati sa mikrokontrolerom. Komponente na razvojnoj pločici povezane su prema shemi datoj na slici 30.



Slika 30. Shema spajanja električnog sustava

Žice potrebne za povezivanje sa vanjskim komponentama grupirane su, te će biti spojene na odgovarajuće konektore kada se napravi kućište za razvojnu pločicu (Slika 31).



Slika 31. Razvojna pločica s elektroničkim komponentama

3.3. Sustav napajanja

Sustav proteze šake napajat će se preko baterija. Prije izrade prijenosnih baterija za uređaj, potrebno je procijeniti potrošnju energije samog uređaja te postaviti zahtjev za autonomiju istog kako bi bilo moguće napraviti bateriju zahtijevanog kapaciteta.

3.3.1. Potrošnja energije

Kako bi se dobila ideja o potrebnom kapacitetu baterijskog sustava napravljen je okvirni proračun potrošnje energije. Prvo je izmjerena potrebna struja za rad pojedinih komponenti. Struja je mjerena pri naponu napajanja od 7,4 V, a dobiveni rezultati dani su u tablici 9.

Tablica 9. Izmjerena struja potrebna za napajanje komponenti

Komponenta	Izmjerena struja
Mikrokontroler i ostale upravljačke komponente	50 mA
Solenoidni ventil	900 mA
Proporcionalni ventil	450 mA
Klipna pumpa	2900 mA

Za jednu akciju potrebno je aktivirati sve navedene komponente i uzeti u obzir da su u sustavu 3 solenoidna ventila. Ukupna struja tada iznosi

$$I_{\text{uk}} = 50 + 3 \cdot 900 + 450 + 2900 = 6,1 \text{ A.} \quad (3.9)$$

Što znači da bi na bateriji kapaciteta 6,1Ah sustav proteze mogao raditi neprestano točno jedan sat prije nego li bi potrošio pohranjenu energiju. Ukoliko se za procijenjeno vrijeme jedne akcije uzme 5 sekundi, a željena autonomija 500 akcija, može se izračunati potreban kapacitet baterije koji iznosi

$$C_{\text{bat}} = 500 \cdot \frac{5}{3600} \cdot 6,1 = 4236 \text{ mAh} \quad (3.10)$$

Iako je ovaj proračun napravljen uz pretpostavku najveće potrošnje energije, za slučaj u kojem su sve komponente aktivne, daje dobru okvirnu procjenu autonomije sustava proteze. Na temelju izračunatog rezultata koristit će se baterija kapaciteta minimalno 4000mAh.

3.3.2. Baterijske ćelije

Za izradu baterije koristit će se punjive litij-ionske baterije. Kod ovog tipa baterija litijevi ioni prilikom pražnjenja prelaze kroz elektrolit s anode na katodu te su po tome i dobile ime. Ove baterijske ćelije imaju sposobnost pohrane velike količine energije u odnosu na svoju masu, čime se postiže vrlo visoka gustoća energije (100-265 Wh/kg). Nadalje imaju dugi životni vijek, te ne zahtijevaju nikakvo posebno održavanje. Vrlo važna prednost kod ovih baterija jest to što se mogu brzo prazniti i isporučiti veliku struju, koja je u ovom slučaju potrebna za napajanje kompresora.

Baterijske ćelije koje će se koristiti za izradu baterijskog sustava su baterije INR18650-30Q proizvođača Samsung (Slika 32). Ove baterijske ćelije odabrane su jer imaju visok kapacitet, lako su dobavljive te zadovoljavaju potrebe napajanja sustava. Karakteristike ovih ćelija dane su u tablici 10.



Slika 32. Baterije Samsung 30Q [32]

Tablica 10. Tehničke karakteristike baterija Samsung 30Q [33]

Nominalni kapacitet	3000 mAh
Nominalan napon	3,7 V
Maksimalna struja punjenja	4 A
Maksimalna struja pražnjenja	15 A

Napon prazne ćelije	2,5 V
Težina ćelije	48 g
Dimenzije	Visina: 64,85 mm Promjer: 18,33 mm

S obzirom da elektromotor kompresora radi na 7,4 V, a baterijska ćelija ima nominalni napon 3,7 V, koristit će se dvije ćelije spojene u seriju. Time se dobiva baterijski sustav nominalnog napona 7,4 V i kapaciteta 3000 mAh. Kako bi se dobila duža autonomija sustava, povećat će se kapacitet baterijskog sustava paralelnim spajanjem još jednog para baterija. Time se u konačnici dobiva baterijski sustav nominalnog napona 7,4 V i kapaciteta 6000 mAh.

Glavni nedostatak litij-ionskih baterija jest u tome da može doći do njihovog pregrijavanja a zatim oštećenja ili zapaljenja ukoliko ih se koristi van propisanog područja rada. Stoga će se u svrhu osiguranja da baterija radi unutar propisanog područja rada koristiti sustav upravljanja baterijom. Sustav upravljanja baterijom ili BMS (eng. *Battery Management System*) je strujni krug koji prati napone na pojedinačnim ćelijama baterije, struju koju baterija daje, kapacitet baterije te upravlja pražnjenjem i punjenjem baterija. Ukoliko se dogodi da neki parametar rada baterije izađe iz propisanog područja rada, BMS isključuje bateriju da bi se spriječilo možebitno oštećenje ćelija.

Model odabranog BMS-a je HX-2S-D20 (Slika 33), a karakteristike su dane u tablici 11.



Slika 33. BMS modul [34]

Tablica 11. Tehničke karakteristike BMS modula

Model	HX-2S-D20
Raspon prekomjernog punjenja	4,25-4,35 V \pm 0,05 V
Raspon pretjeranog pražnjenja	2,5-3,0 V \pm 0,05 V
Maksimalna kontinuirana struja	13 A
Maksimalna kratkotrajna struja	20 A
Unutarnji otpor	<300 m Ω
Zaštita od kratkog spoja	Ima
Napon punjenja	8,4-9 V
Dimenzije	46 mm x 20 mm x 3,6 mm

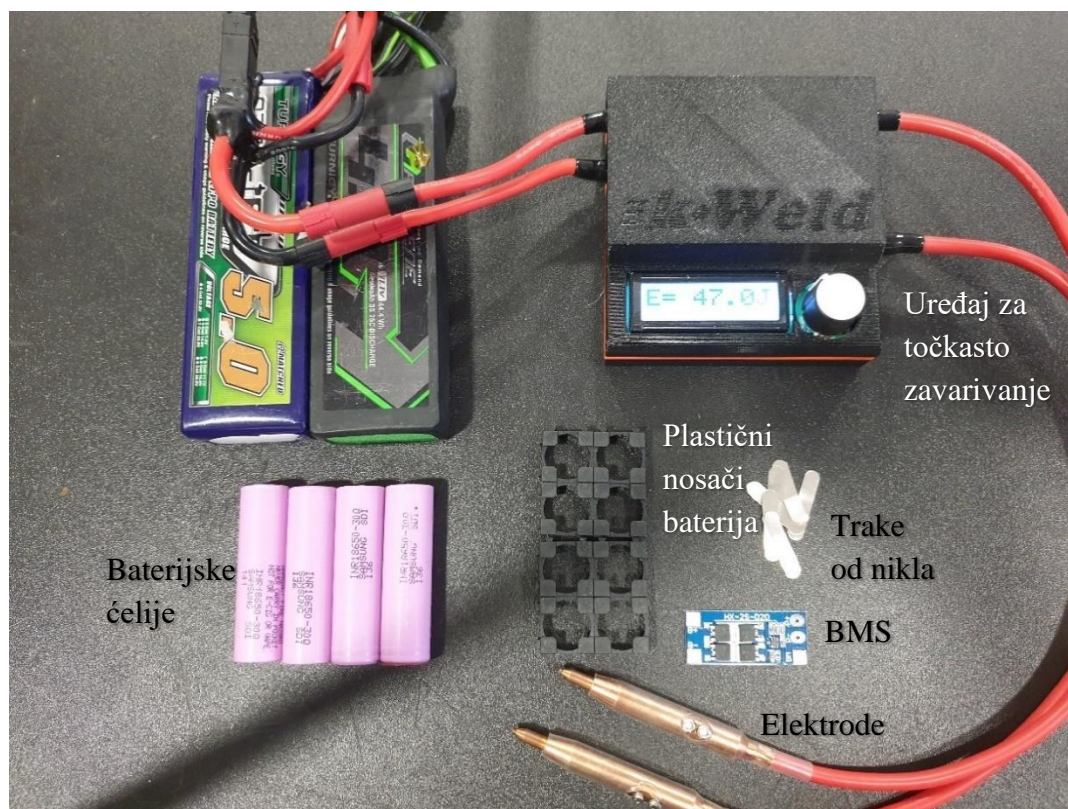
Nakon što su odabrane sve komponente baterijskog sustava, potrebno ih je povezati. Baterijske ćelije spojit će se trakom od nikla postupkom točkastog zavarivanja. Traka od nikla koristi se za povezivanje baterijskih ćelija zbog malog unutarnjeg otpora i lakoće točkastog zavarivanja [35].

Točkasto zavarivanje je vrsta elektrootpornog zavarivanja kod kojeg se zavarivanje ostvaruje taljenjem dvaju dijelova stegnutih između dviju elektroda, a nastali zavar tada ima oblik točke [36]. Taljenje se postiže tako da se između elektroda dovede struja iznosa 50-800 A te se pritom metal zagrije na temperaturu taljenja zbog omskog otpora. Ova tehnologija spajanja koristi se zato što se prilikom elektrootpornog zavarivanja energija otpušta vrlo brzo i koncentrirano samo na mjesto zavara. Pritom nema rasipanja toplinske energije i neželjenog grijanja baterijskih ćelija.

3.3.2.1. Postupak izrade baterije

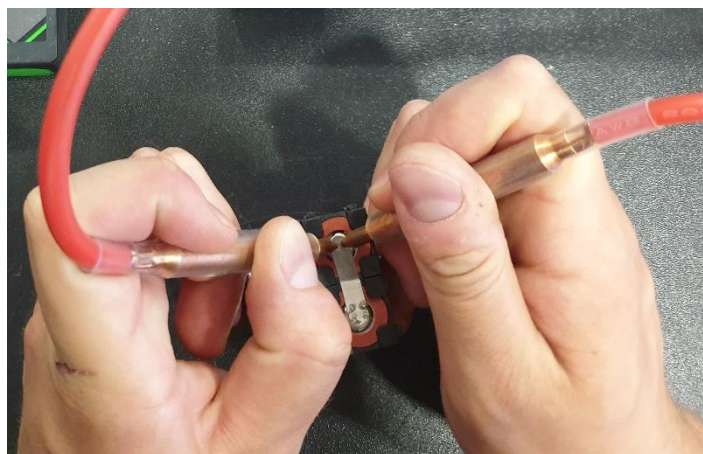
Sve komponente potrebne za izradu baterije prikazane su na slici 34, a to su:

- uređaj za točkasto zavarivanje
- baterijske ćelije Samsung 30Q
- držači baterijskih ćelija
- trake od nikla za povezivanje ćelija
- BMS – Sustav nadgledanja baterije
- žice za povezivanje.



Slika 34. Komponente za izradu baterije

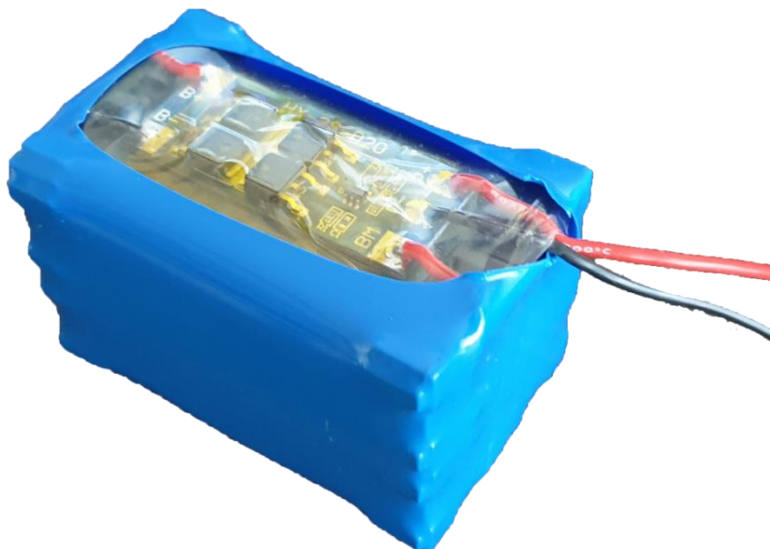
Prvo je baterijske ćelije potrebno postaviti u plastične nosače, pazeći pritom na njihovu orijentaciju, a koja će ovisiti o traženoj konfiguraciji. Zatim se baterijske ćelije povezuju trakama od nikla, pomoću točkastog zavarivanja (Slika 35).



Slika 35. Točkasto zavarivanje baterija

Nakon što su baterijske ćelije spojene u traženu konfiguraciju, potrebno ih je povezati sa sustavom nadgledanja baterije. Nakon provjere ispravnosti istih, potrebno je zaštititi baterijske

ćelije. Baterija će se zaštititi toplinsko osjetljivim polimerom, koji će se zagrijavanjem skupiti i čvrsto omotati baterijske ćelije. Time je izrada baterije gotova te je ona spremna za upotrebu (Slika 36).

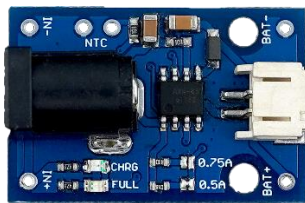


Slika 36. Gotova baterija

3.3.2.2. Punjenje baterije

Za punjenje baterije koristit će se 12 V naponski pretvarač. Da bi bateriju bilo moguće napuniti na siguran način, potrebno je ugraditi upravljački strujni krug koji će se pobrinuti da baterija dobi odgovarajući napon preko 12 V naponskog pretvarača. U tu svrhu koristit će se elektronički modul temeljen na HX6038-NG integriranom strujnom krugu.

HX6038-NG integrirani strujni krug služi za punjenje litij-ionskih baterija konstantom strujom ili naponom (CC/CV punjenje). Litij-ionske baterije potrebno je prvo puniti konstantnom strujom do određenog naponskog nivoa te tada nastaviti punjenje konstantnim naponom. Ovaj strujni krug pobrinut će se da se baterija puni pravilno te će automatski prebaciti režim punjenja, ovisno u postotku napunjenosti baterije. Modul koji će se pritom koristiti ima na sebi DC koaksijalni konektor za 12 V naponski pretvarač, LED diode koje pokazuju status punjenja, te konektor za bateriju (Slika 37).



Slika 37. Modul s HX6038-NG IC [37]

Iako u specifikacijama ovog modula stoji da može puniti baterije strujom od 0,5 A ili 0,75 A, testiranjem se uvidjelo da dolazi do prekomjernog zagrijavanja integriranog strujnog kruga HX6038-NG pa se prema tehničkim specifikacijama proizvođača [38] zamijenio otpornik preko kojeg se određuje struja punjenja, koja je pritom smanjena na 0,2 A. Izuzev smanjenja struje punjenja, smanjen je i napon napajanja modula s 12 V na 9 V.

3.3.3. Napajanje komponenti

S obzirom da je baterijski sustav izlaznog napona nominalne vrijednosti 7,4 V, a različite komponente za rad zahtijevaju druge vrijednosti napona, potrebno je osigurati zahtijevanu vrijednost napona za ispravan rad komponenata.

Razvojna pločica Arduino Pro Mini ima ugrađen regulator napajanja te prima ulazni napon raspona 5-12 V pritom ga spuštajući na 5 V potrebnih za rad mikroprocesora. Ugrađeni regulator napajanja jest linearni regulator, što znači da se razlika između ulaznog i izlaznog napona regulatora oslobađa u obliku topline. Ta toplina treba se osloboditi u okolni prostor konvekcijom, a s obzirom da je navedeni linearni regulator malih dimenzija, neće moći prenijeti puno toplinske energije u kratkom vremenu. Stoga postoji opasnost od pregrijavanja istog, pa će se provjeriti postoji li potreba za ugradnjom većeg regulatora napajanja.

Izraz kojim je definirana najveća snaga koju regulator može podnijeti a da se pritom dovoljno hladi glasi:

$$P_{\max} = \frac{T_{J(\max)} - T_A}{\theta_{JA}}, \quad (3.11)$$

gdje je

P_{\max} – najveća snaga

$T_{J(\max)}$ – najveća dopuštena temperatura regulatora

T_A – sobna temperatura

θ_{JA} – toplinski otpor.

Ugrađeni regulator nosi oznaku MIC5205, te prema tehničkim karakteristikama regulatora [39] toplinski otpor iznosi $220 \text{ }^\circ\text{C/W}$, a najveća dopuštena temperatura $125 \text{ }^\circ\text{C}$. Kao sobna temperatura uzet će se temperatura od $40 \text{ }^\circ\text{C}$, kao što bi mogla iznositi u slučaju vrućeg dana. Stoga najveća snaga iznosi

$$P_{\max} = \frac{125 - 40}{220} = 0,386 \text{ W.} \quad (3.12)$$

Poznavajući najveću snagu regulatora, može se izračunati najveća dopuštena struja preko

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \Delta U I_{\max}, \\ P_{\max} &= (U_{\text{ulaz}} - U_{\text{izlaz}}) I_{\max}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

gdje je

ΔU – pad napona na regulatoru

I_{\max} – najveća dopuštena struja kroz regulator.

S obzirom da će se mikrokontroler napajati s naponskog izvora od 12 V , slijedi da je najveća dopuštena struja

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\Delta U} = \frac{0,386}{12 - 5} = 0,055 \text{ A.} \quad (3.14)$$

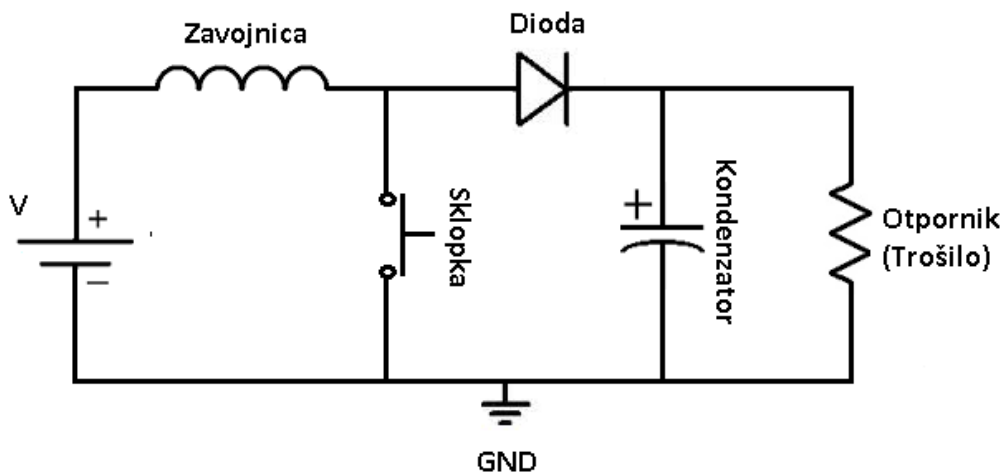
Prilikom napajanja mikrokontrolera preko USB-a izmjerena je potrebna struja u rasponu $40\text{-}50 \text{ mA}$, što je vrlo blizu dopuštenih 55 mA . Kako ne bi došlo do pregrijavanja malog linearnog regulatora, ipak će se koristiti veći linearni regulator napajanja.

Za tu svrhu odabran je LM7805. Ovaj linearan regulator napajanja ima istu funkciju kao i ugrađeni ali zbog većih dimenzija može se brže hladiti te pritom prenijeti više snage. Prema tehničkim karakteristikama [40] toplinski otpor ovog regulatora iznosi $19 \text{ }^\circ\text{C/W}$, najveća temperatura rada $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Stoga će najveća struja koju ovaj regulator može isporučiti biti

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\Delta U} = \frac{T_{J(\max)} - T_A}{\theta_{JA} \Delta U} = \frac{150 - 40}{19(12 - 5)} = 0,827 \text{ A.} \quad (3.15)$$

Struja od $0,827 \text{ A}$ bit će i više nego dovoljna za napajanje mikrokontrolera te se pritom neće morati brinuti o pregrijavanju regulatora napajanja.

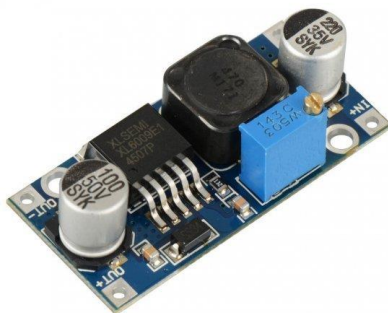
Proporcionalni ventil tvrtke Festo zahtijeva naponski nivo od 24 V za rad, stoga je potrebno povisiti naponski nivo koji daje baterijski sustav. Elektronički sklop koji će pritom koristiti naziva se naponski pretvarač, preciznije pojačivač napona (eng. *boost converter*). To je pretvarač istosmjernog napona kod kojeg je izlazni napon veći od ulaznog. Ovaj pretvarač se u principu sastoji od zavojnice, sklopke, kondenzatora i diode (Slika 38).



Slika 38. Boost pretvarač

Princip rada pojačivača napona zasniva se na sposobnosti zavojnice da se odupire promjeni napona. Ukoliko se strujni krug zavojnice, preko sklopke, dovoljno brzo otvara i zatvara, svakim ciklusom dio magnetske energije na zavojnici pretvorit će se natrag u električnu te time povisiti napon strujnoga kruga [41].

U tu svrhu koristit će se naponski pretvarač modela XL6009, odnosno elektronički modul koji sadrži navedeni pretvarač te elektroničke komponente potrebne za ispravan rad istog (Slika 39).



Slika 39. Naponski modul s XL60099 [42]

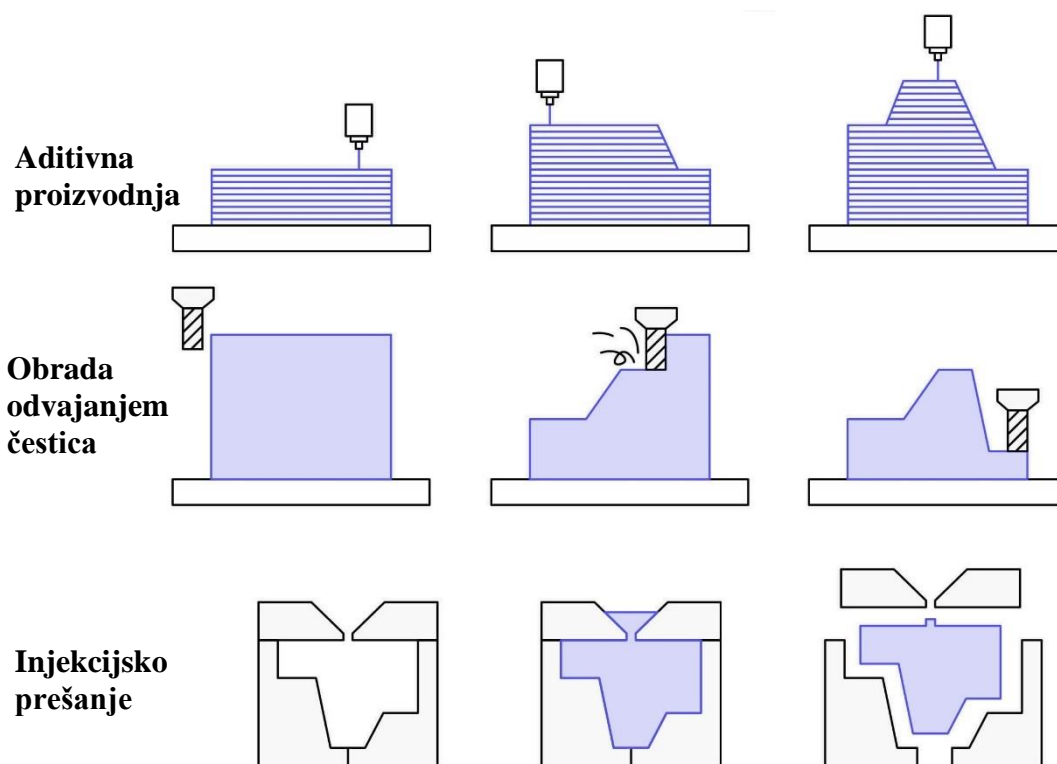
Ovaj modul na ulazu prima napon od 5-32 V te se promjenom otpora na potenciometru podešava željeni izlazni napon u rasponu 5-35 V. Maksimalna struja na izlazu modula iznosi 4 A, a njegova efikasnost pretvorbe napona 92% [43].

Isti modul koristit će se i za napajanje solenoidnih ventila, samo što će se na tom modulu izlazni napon podesiti na 12 V.

4. IZRADA PROTOTIPA

4.1. Aditivna proizvodnja

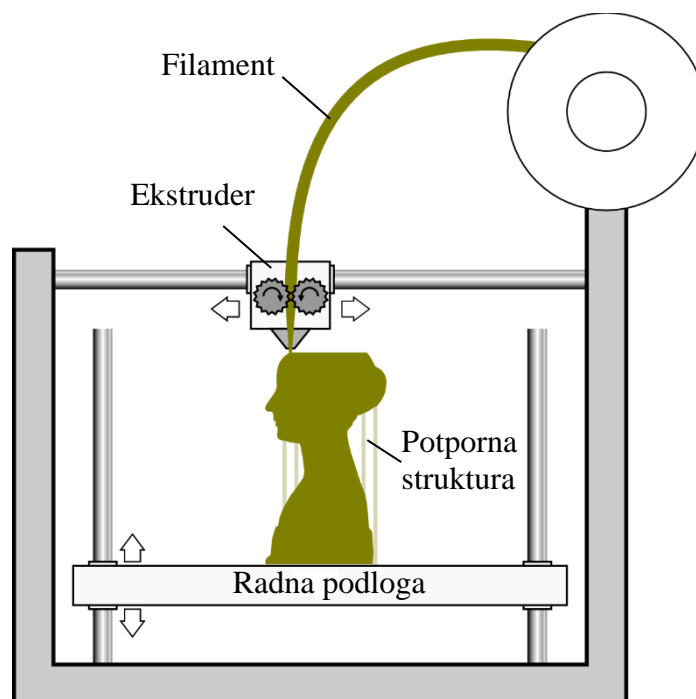
Trodimenzionalni print je tehnologija aditivne proizvodnje koja se koristi za brzu izradu prototipa. Glavna značajka aditivne proizvodnje jest da se kod izrade proizvoda materijal postepeno dodaje, sloj po sloj. Spajanjem tih slojeva nastaje trodimenzionalni model. Iako se pojmovi aditivna proizvodnja i 3D print koriste kao sinonimi, prema [44] aditivna proizvodnja jest proces spajanja materijala u svrhu izrade dijelova dobivenih iz 3D modela, obično sloj po sloj, za razliku od izrade dijelova odvajanjem čestica ili injekcijskim prešanjem, dok je 3D printanje definirano kao izrada proizvoda deponitom materijala kroz ekstruder (Slika 40).



Slika 40. Usporedba tehnologija proizvodnje

Postupak u kojem se materijal dovodi do ekstrudera u čvrstom stanju te se zatim tali i slojevito nanosi na radnu podlogu naziva se taložno očvršćivanje ili printanje FDM metodom. Materijal se tada na sobnoj temperaturi očvršćuje, povezujući se pritom sa prethodno nanesenim slojem materijala. Ovisno o materijalu, radna podloga printera te radni prostor mogu biti grijani. Zbog jednostavne izvedbe, ova metoda 3D printa je danas najzastupljenija. Maksimalne dimenzije

proizvoda dobivenih ovim postupkom definirane su površinom radne podloge te hodom radne podloge po vertikalnoj osi. Velika prednost ove metode jest to što se njome mogu dobiti oblici i strukture vrlo složene geometrije, koje ne bi bilo moguće dobiti drugim proizvodnim metodama. Uz to u ovom proizvodnom procesu u pravilu nema škarta, odnosno troši se samo onoliko materijala koliko je potrebno za izradu modela. To ne vrijedi u slučaju kada model ima slojeve takve da su prethodno printani slojevi manjih dimenzija, odnosno dolazi do printanja sloja u zraku. Tada se koriste potporna strukture koje pridržavaju navedene slojeve. Ilustracija 3D printa taložnim očvršćivanjem (FDM metodom) dana je na slici 41.



Slika 41. FDM printer [45]

Još jedna prednost ove tehnologije jest veliki izbor materijala koji se uvelike razlikuju u svojim mehaničkim svojstvima. Iako su najčešće korišteni materijali za 3D print polimeri, ovom tehnologijom mogu se printati i mnogi metali, legure metala, keramika te kompozitni materijali. Materijal koji se koristi kod 3D printa naziva se još i *filament* te se obično dobavlja u obliku plastične niti zamotane na rolu (Slika 42).



Slika 42. Filament za 3D printanje [46]

Te plastične niti standardiziranih su dimenzija te dolaze u promjerima od 1.75mm ili 3mm. One mogu biti od različitih vrsta polimera, svaki sa svojim prednostima i nedostacima. Koji polimer odabrati ovisit će o namjeni modela koji se printa. Neke od najčešćih vrsta polimera korištenih za izradu polimernih niti su:

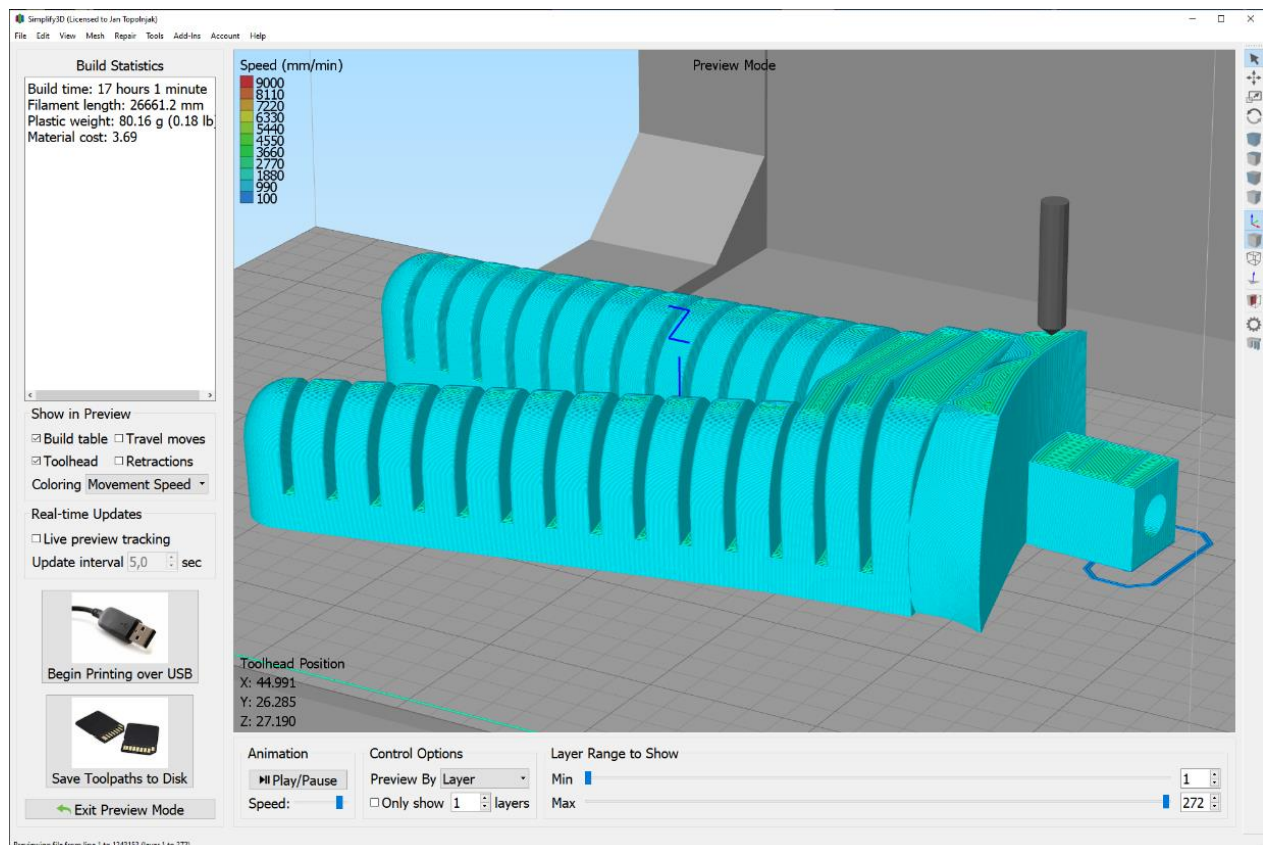
- ABS (akrilonitril-butadien-stiren)
- PLA (polilaktid)
- PET (polietilen-tereftalat)
- PVA (polivinil-amid)
- TPE (elastoplastomer).

Ovakva metoda izrade proizvoda nije pogodna za masovnu proizvodnju zbog spore brzine printa, ali zato omogućava, s obzirom na druge metode, brzu i jednostavnu izradu pojedinačnih modela te je kao takva idealna za izradu prototipa ili proizvodnje s malim brojem uzoraka [47].

Prije samog 3D printa potrebno je napraviti trodimenzionalni CAD model u nekom od programa za 3D modeliranje. Trodimenzionalni model je prije samog printanja potrebno isjeći u slojeve te prevesti u numerički kod koji printer razumije. Programski alati koji služe takvo raslojavanje modela nazivaju se *sliceri*. Programski alat koji će se koristiti naziva se Simplify3D (Slika 43). U ovom softveru će, nakon učitavanja i raslojavanja modela, biti potrebno podesiti i ostale parametre printa, a najvažniji su:

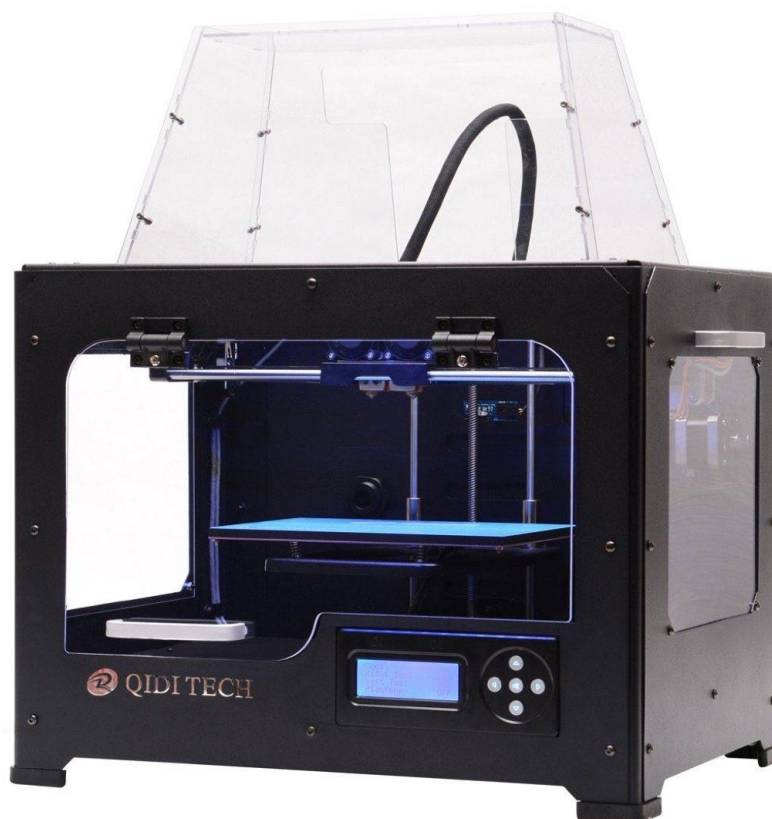
- temperatura ekstruzije
- brzina kretanja alata (ekstrudera)
- debljina pojedinog sloja printa

- temperatura podloge
- brzina ekstruzije
- postotak ispune punih volumena
- potporne strukture.



Slika 43. Simplify3D slicer

Za printanje proteze šake korišten je printer Qidi Tech I tvrtke Qidi. Qidi Tech I je printer metalnog kućišta i zatvorenog prostora ispisa. Ima dvostruki ekstruder plastike i grijanu staklenu platformu. Dimenzije volumena radnog prostora su 15 cm x 23 cm x 15 cm, a debljina isprintanog sloja iznosi 0,1-0,3 mm (Slika 44).



Slika 44. 3D printer Qidi Tech I [48]

4.2. Odabir materijala

Za izradu mekih aktuatora bilo je potrebno pronaći pogodan materijal za ispis. Razmatrali su se mekani TPU (elastoplastomerni poliuretan) materijali. Prvi izbor bio je materijal NinjaFlex od NinjaTek-a. NinjaFlex je vrlo rašireni i dostupan fleksibilan materijal tvrdoće 85A. Iako je materijal vrlo elastičan, nakon par neuspješnih testiranja pokazao se kao nedovoljno elastičan za ovu primjenu. Nakon NinjaFlex-a isproban je materijal naziva Filaflex 60A Pro tvrtke Recreus, tvrdoće 63A. Nakon testiranja Filaflex se, zahvaljujući svojoj velikoj elastičnosti, pokazao kao pogodnijim odabirom od NinjaFlex-a te je odlučeno da će se mekani aktuatori printati pomoću ovog materijala. Usporedba fleksije oba materijala za teret iste mase dana je na slici 45. Kao što je vidljivo sa slike Filaflex je, puno elastičniji od NinjaFlex-a.



Slika 45. Usporedba fleksije NinjaFlex (lijevo) i Filaflex (desno)

Tehničke specifikacije materijala dane od proizvođača date su u tablici 12.

Tablica 12. Tehničke karakteristike materijala NinjaFlex i Filaflex [49], [50]

	NinjaFlex	Filaflex 60A Pro
Gustoća	1,19 g/cm ³	1,07 g/cm ³
Tvrdoća	85A	63A
Vlačna čvrstoća	26 MPa	26 MPa
Elongacija	660%	950%

Izuzev fleksibilnih aktuatora, printat će se i kućišta za pojedine komponente sustava proteze. Materijal koji će se pritom koristiti jest PLA (polilaktid). PLA je biorazgradivi termoplastični polimer te je uz ABS najkorišteniji materijal za 3D printanje.

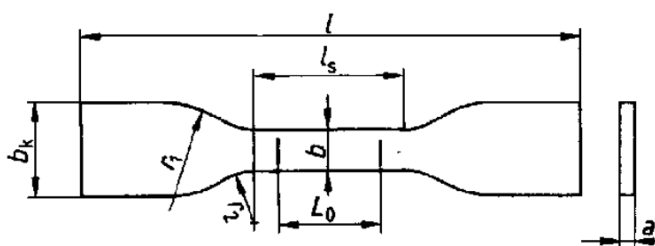
4.3. Ispitivanje materijala

Kako bi bilo moguće analizirati modele metodom konačnih elemenata [51], bilo je potrebno odrediti mehanička svojstva materijala Filaflex. Mehanička svojstva ovog materijala odredit će se jednoosnim statičkim vlačnim ispitivanjem. Ovo ispitivanje provodi se na uređaju koji se naziva kidalica, a njime se određuju svojstva materijala poput vlačne čvrstoće, modula elastičnosti, istežljivosti, itd.

Kidalica je uređaj koji služi za ispitivanje mehaničkih svojstava (vlačne i tlačne čvrstoće) materijala primjenom vlačnih odnosno tlačnih naprezanja na uzorku materijala. Kidalica se sastoji od sljedećih glavnih dijelova:

- postolja
- čeljust za prihvat uzorka
- mehanizma za opterećivanje
- uređaja za mjerenje sile
- uređaja za očitavanje rezultata.

Na postolju kidalice nalazi se okvir velike krutosti na kojem se nalazi pokretni most sa gornjom čeljusti za prihvat uzorka. Uzorak koji se testira na kidalici mora biti točno određenog oblika i dimenzija, propisanog standardima. Takav standardizirani uzorak naziva se epruveta. Dimenzije i oblik epruveta za testirane su prema normi DIN 53504, propisane za ispitivanje gume. Oblik uzorka propisanog tom normom dat je na slici 46, a propisane dimenzije u tablici 13.



Slika 46. Oblik epruvete

Tablica 13. Normirane dimenzije uzorka [52]

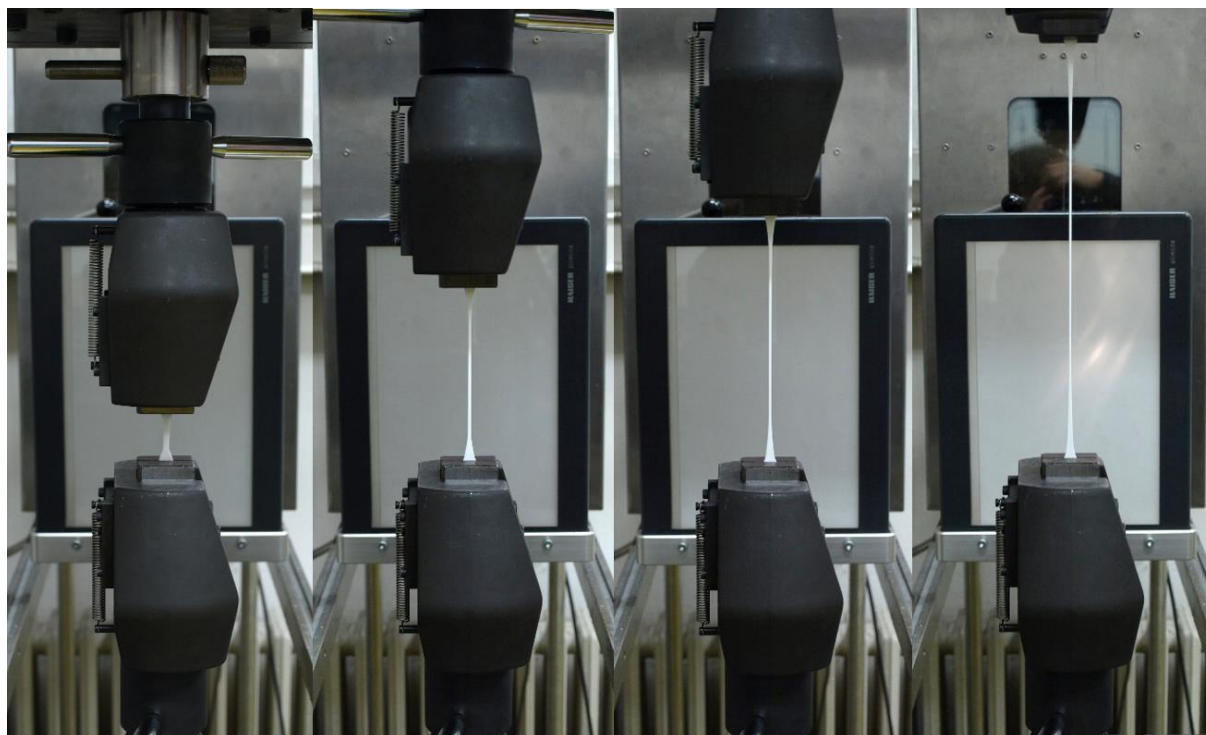
TIP UZORKA	S1 [mm]	S2 [mm]	S3 [mm]	S3A [mm]
Duljina uzorka, l	115	75	35	50
Širina, b_k	25	12,5	6	8,5
Duljina, l_s	33	25	12	16
Širina, b	6	4	2	4
Mali promjer, r_1	25	12,5	3	10
Veliki promjer, r_2	14	8	3	7,5

Debljina, a	2	2	1	2
Početa duljina, L_0	25	20	10	10

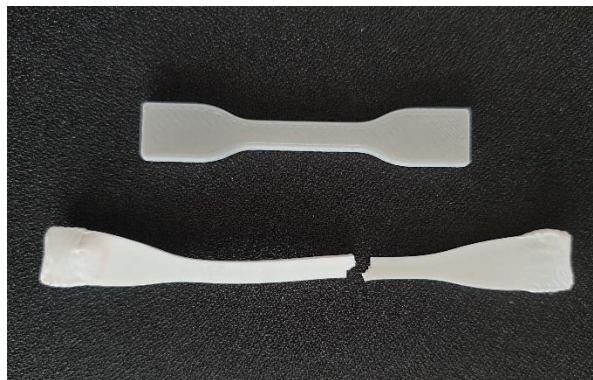
Prema navedenoj normi trebalo bi po mogućnosti koristiti uzorak S2, ali zbog velike elastičnosti ispitivanog materijala i prekratkog hoda kidalice, bilo je potrebno koristiti tip uzorka S3A.

Ispitivanje se provodi tako da se uzorak stegne u čeljusti kidalice te se zatim kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Pritom se bilježi elongacija epruvete te sila na čeljustima, pomoću kojih se dobiva dijagram naprezanja i deformacije. Prije samog ispitivanja potrebno je definirati i brzinu hoda kidalice. Ova brzina definirana je prema normi DIN 53504 i iznosi 200 mm/min za tip uzorka S3A.

Ispitivanje se izvršilo na uzorku od 11 epruveta. Ispitivanje epruvete na kidalici prikazano je na slici 47, a izgled epruvete S3A prije i nakon testiranja na slici 48.

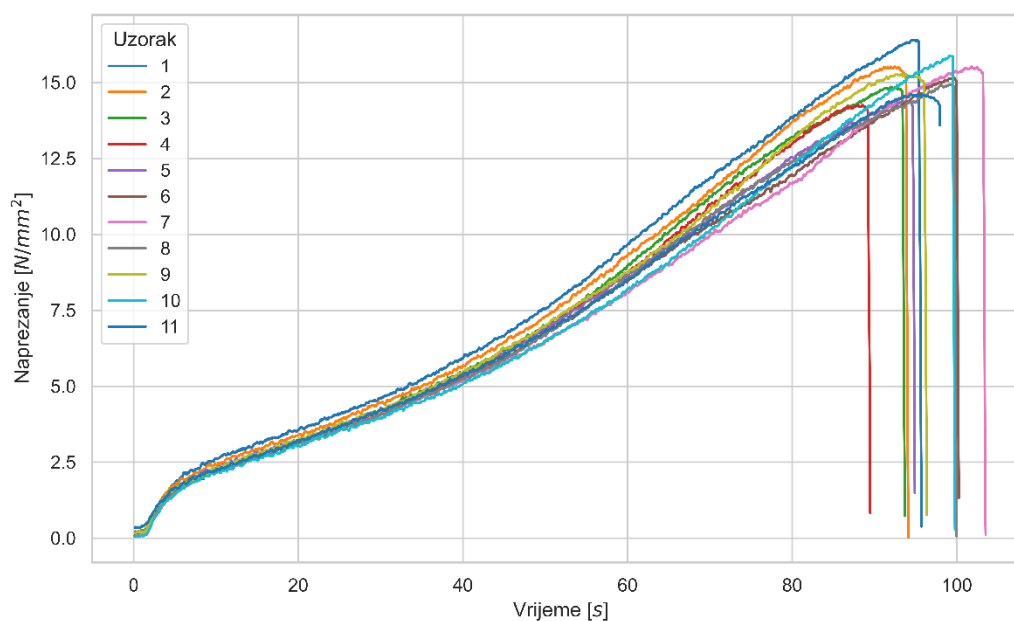


Slika 47. Ispitivanje epruvete na kidalici



Slika 48. Epruveta S3A prije i nakon ispitivanja

Rezultati ispitivanja spremljeni su u digitalnom obliku te se njihovom obradom dobio dijagram napreznja (Slika 49). Ovi rezultati ubačeni su u programski alat Abaqus, čime je omogućeno simuliranje deformacija materijala u različitim uvjetima napreznja.



Slika 49. Dijagram napreznja dobiven statičkim vlačnim ispitivanjem

4.4. 3D print

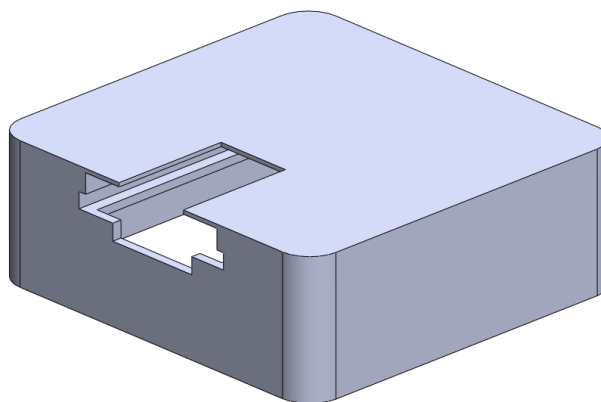
4.4.1. Kućišta komponenti

Sustav prijenosne proteze podijeljen je na 5 glavnih sastavnih dijelova, a to su: kompresor, napajanje, baterija, upravljački dio te ventili. Pri izradi kućišta pristup je bio modularan te je

svaka sastavnica promatrana kao dio za sebe. Tako je za svaku od sastavnica napravljeno zasebno kućište s potrebnim konektorima za međusobno povezivanje. Ovakav pristup odabran je zato što omogućava veću fleksibilnost i prilagodljivost, pošto će uređaj morat biti nosiv. Sva kućišta printana su iz PLA polimera s debljinom sloja 0.2 mm te ispunom punog volumena od 50% pri temperaturi od 205 °C.

4.4.1.1. Baterija

Kako je baterija već zaštićena plastičnim omotom, za nju nije rađeno nikakvo dodatno kućište, već je samo napravljen nosač na kojem će se nalaziti utor za punjenje (Slika 50).



Slika 50. 3D model nosača

Ovaj nosač pričvrstit će se na gornju stranu baterije, a unutar njega će biti smješten strujni krug za punjenje baterije. Sa stražnje strane nosača napravljen je provrt kroz kojeg će se provesti žice za napajanje elektroničkog dijela sustava, a sa prednje strane će se nalaziti konektor za punjenje baterije. Stavljanjem nosača na bateriju te povezivanjem baterije sa strujnim krugom za punjenje, baterijski modul je dovršen (Slika 51).

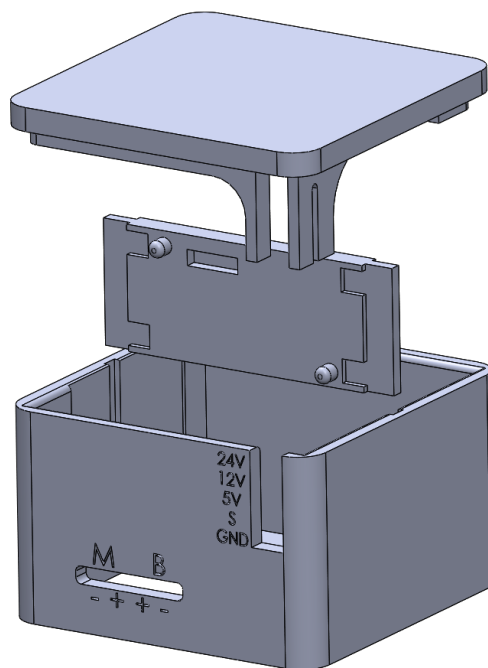


Slika 51. Gotov baterijski modul

4.4.1.2. Napajanje

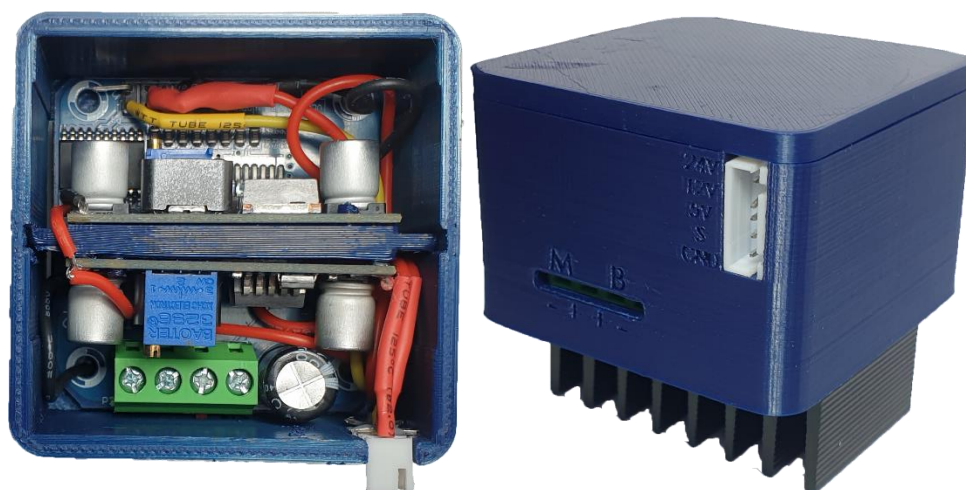
Komponente napajanja čine 2 *boost* modula, linearni regulator napajanja LM7805 te modul za napajanje i upravljanje elektromotorom. S obzirom da se na modulu za napajanje elektromotora nalazi radiator za pasivno hlađenje, kućište će se napraviti tako da radiator ostane s vanjske strane kućišta.

Za dva *boost* modula napravljena je razdjelna pločica na koju će se oni pričvrstiti, svaki sa jedne strane. Zatim će se razdjelna pločica sa montiranim modulima umetnuti u dva utora sa unutarnje strane kućišta, koja će tu pločicu pridržavati. Kućište se zatvara poklopcem na kojem je napravljena konstrukcija koja će pridržavati konektor i učvrstiti razdjelnu pločicu kako se ne bi gibala u utoru (Slika 52).



Slika 52. 3D model kućišta za komponente napajanja

Na samom kućištu napravljena su dva kvadratna utora. U jednom utoru nalazit će se konektor preko kojeg će se ostatak elektronike spojiti na bateriju, a drugi će služiti za spajanje baterije i elektromotora na strujni krug H-mosta. Izgled gotovog kućišta dan je na slici 53.



Slika 53. Tlocrt modula za napajanje (lijevo), gotov modul (desno)

4.4.1.3. Kompresor

Za kompresor je napravljeno jednostavno dvodijelno kućište koje koristi postojeće strukturalne elemente na samoj konstrukciji kompresorske pumpe kako bi se ona učvrstila. Izuzev

kompresora, unutar ovog kućišta nalaziti će se i senzor tlaka. Na kućištu su napravljeni otvori za usis zraka, provrt za spajanje tlačnog voda na kompresor te kvadratni utor u koji će se staviti konektor za povezivanje sa senzorom tlaka. Kućište je prikazano na slici 54.



Slika 54. Kućište za kompresor

4.4.1.4. Tipkala za upravljanje

Tipkala za upravljanje smještena su u dvodijelno kućište s provrtom za LED diodu i utorom za žice. Tipkala su označena drugim bojama kako bi se lakše razlikovala njihova funkcija (Slika 55).



Slika 55. Kontroler za ručno upravljanje protezom

4.4.1.5. Mikrokontroler

Mikrokontroler i razvojna pločica na koju su spojene ostale komponente bit će spremljene u dvodijelno kućište. Na poklopcu kućišta napravljeni su kvadratni utori za potrebne konektore. Gotovo kućište prikazano je na slici 56.



Slika 56. Kućište za mikrokontroler

4.4.2. Pneumatski priključci

Za povezivanje različitih dijelova pneumatskog sustava bilo je potrebno izraditi odgovarajuće priključke.

4.4.2.1. Čep tlačnog spremnika

Kako bi se tlačni spremnik u obliku PET ambalaže mogao povezati s pneumatskim sustavom, potrebno je napraviti čep na koji se može pričvrstiti pneumatski priključak. Na modelu čepa standardiziranih dimenzija [53] napravljen je provrt za navoj pneumatskog priključka. Pneumatski priključak koji će se koristiti služi za spajanje pneumatskih cijevi vanjskog promjera 6mm te ima cijevni (Whithwortov) navoj oznake G 1/8. Dimenzije i profil navoja iščitane su te modelirane prema [54].

Kako ne bi došlo do curenja zraka iz spremnika, potrebno je zabrtviti vezu čepa i boce te pneumatskog priključka i čepa. Stoga će se uz čep napraviti i podloška za brtvljenje te matica s navojem za pritezanje pneumatskog priključka (Slika 57).



Slika 57. 3D model čepa (lijevo), isprintani dijelovi (desno)

Čep i matica printat će se iz PLA, a pločica za brtvljenje bit će izrađena od elastičnog FilaFlex materijala. Nakon printanja čep je stegnut na grlo boce te je time spremnik tlaka dovršen (Slika 58).



Slika 58. Gotov čep s pneumatskim priključkom

4.4.2.2. Spojnice za pneumatske cijevi

Za međusobno spajanje cijevi za zrak izrađene su kružne spojnice sa naborima, nešto većim od unutarnjeg promjera cijevi. Svrha nabora jest učvršćivanje i brtvljenje veze cijevi i spojnice. Izrađena su tri tipa spojnica, sa dva, tri i četiri ulaza za cijev. Zbog bolje kvalitete isprintane površine, svi ulazi printani su vertikalno (Slika 59).



Slika 59. Spojnice za pneumatske cijevi

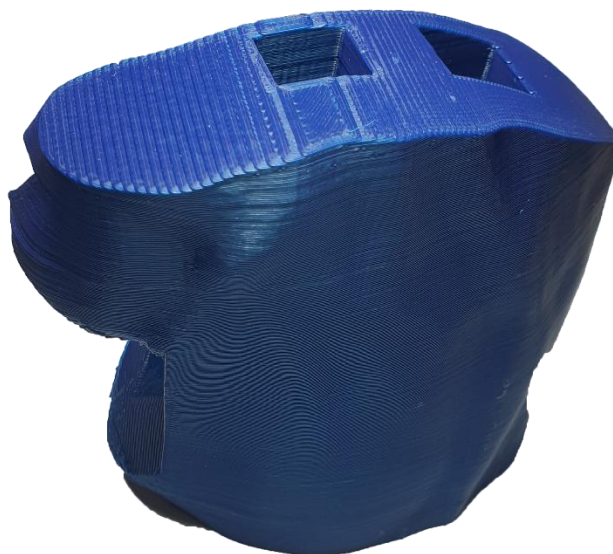
Spojnice s dva ulaza za cijev koristit će se za spajanje pneumatskih cijevi sa aktuatorima, spojnica s tri ulaza koristit će se za spajanje pneumatskog sustava s tlačnim spremnikom, a spojnica s četiri ulaza za spajanje aktuatora na zajedničku cijev. Izuzev navedenih spojnica, isprintana je i spojnica s dva ulaza različitih dimenzija koja će se koristiti za spajanje pneumatske cijevi s navojem za kompresor i ostatkom pneumatskog sustava.

4.4.3. Proteza

Za printanje proteze koristit će se dva materijala, meki Filaflex za printanje fleksibilnih aktuatora, te čvrsti PLA za printanje dlana. Meki materijal nije bio tako jednostavan za isprintat kao kruti. Kod printanja mekog materijala bilo je vrlo važno podesiti parametre printa koji će omogućiti da se model isprinta bez poroznosti, što se ujedno pokazalo kao i najveći problem prilikom izrade aktuatora.

4.4.3.1. Dlan

Dlan je isprintan od PLA polimera s debljinom sloja 0.2mm te ispunom punog volumena od 40% pri temperaturi ekstrudera od 205 °C i grijanom podlogom temperature 60 °C. Isprintan model prikazan je na slici 60.



Slika 60. Isprintan dlan

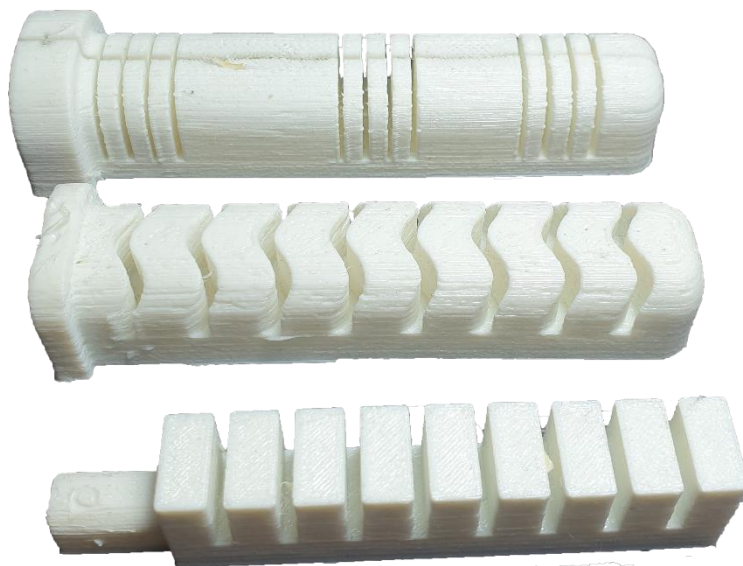
Nastavak s pneumatskim priključcima prikazan je na slici 61. Printan je s istim postavkama i materijalom kao i dlan. Za ovaj dio još je bilo potrebno isprintati pločice za brtvljenje na mjestu spajanja pneumatskih priključaka s dlanom.



Slika 61. Nastavak s pneumatskim priključcima

4.4.3.2. Prsti

Prije nego se došlo do konačnog dizajna, isprobano je više različitih iteracija prsta (Slika 62). Kroz iteracije se željelo isprobati kako dizajn i parametri utječu na konačnu kvalitetu printa, posebice na poroznost isprintanog modela.



Slika 62. Iteracije modela prsta

Problem s poroznošću javlja se jer ne dolazi do potpune fuzije materijala između slojeva. Ovaj problem je vrlo ozbiljan jer ukoliko se želi dobiti funkcionalan aktuator, poroznosti u isprintanom modelu ne smije biti. Iako je ispunjena punih volumena u programskom alatu za *slicing* anje modela stavljena na 100%, linije ekstruzije i zračnosti pojavljuju se na isprintanom modelu zbog nekonzistentnosti ekstrudiranja materijala (Slika 63).



Slika 63. Poroznost na testnim uzorcima

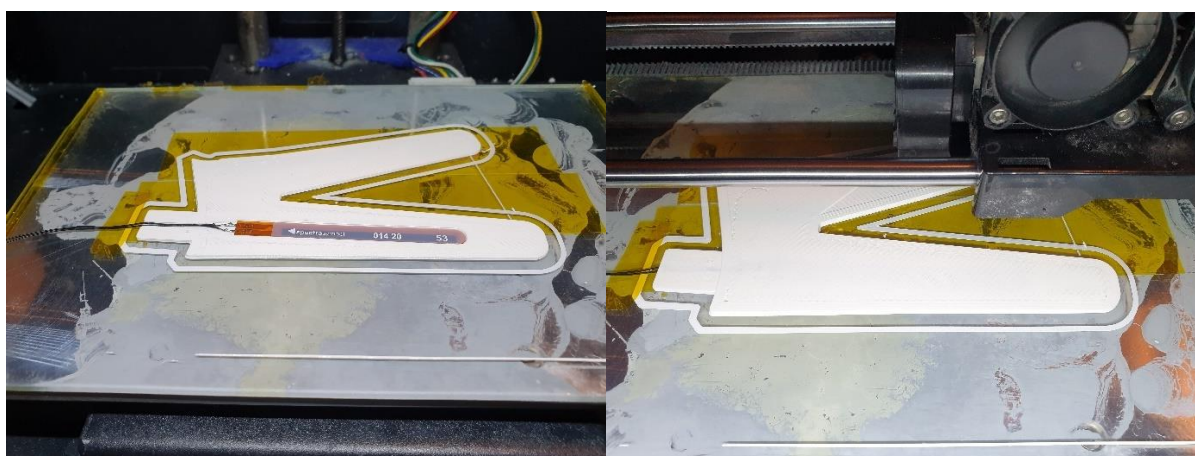
Nakon dugotrajnog testiranja i isprobavanja različitih parametara na kraju se došlo do uspješnog printa koji nije bio porozan s parametrima printa danim u tablici 14. Izuzev navedenih parametara promijenila se i mlaznica ekstrudera, te je dosadašnja mlaznica s promjerom od 0,4 mm zamijenjena većom koja ima promjer 0,6 mm. Zbog pretpostavke da su

nekonzistentnosti kod printa uzrokovane i time da je materijal upio vlagu, isti je stavljen na sušenje u pećnicu grijanu na 50 °C u trajanju od 24 sata.

Tablica 14. Parametri printanja Filaflex materijala

Temperatura ekstruzije	220 °C
Temperatura platforme	40 °C
Ispuna punih volumena	100 %
Širina mlaznice	0,6 mm
Multiplikator ekstruzije	1,6
Širina ekstruzije	0,72 mm
Debljina isprintanog sloja	0,2 mm
Retrakcija materijala	3,5 mm
Brzina retrakcije	30 mm/s
Brzina printanja	16,6 mm/s

S donje strane srednjeg prsta bilo je potrebno ugraditi senzor fleksije, a to je realizirano tako da se u trodimenzionalnom modelu prsta izrezao volumen koji dimenzijama odgovara volumenu senzora fleksije, uz malu zračnost. Navedeni volumen nije napravljen na samom dnu prsta, već 0,4 mm iznad prvog sloja. Senzor se tada ugradio pauziranjem printera na prethodno definiranoj visini te ručnim stavljanjem senzora u prst (Slika 64). Nakon toga print je nastavljen, a preko senzora isprintano je još par slojeva materijala kako bi se volumen u kojem se nalazi senzor zatvorio.



Slika 64. Ugradnja senzora fleksije u prst (lijevo); nakon zatvaranja volumena (desno)

Gotovi prsti prikazani su na slici 65. Nakon testiranja prsta sa senzorom fleksije utvrđeno je da nije moguće očitati otpor na senzoru zbog puknuća jedne od žica. Za promjenu žice bilo je potrebno izrezati mali dio prsta na mjestu spajanja žica sa senzorom fleksije kako bi se nova žica mogla pripojiti. Ovaj postupak je uspješno izveden, a pritom napravljeni mali izrez neće utjecati na fleksiju prsta.

Kod testiranja aktuatora primijećeno je da fleksija aktuatora prstenjaka i malog prsta zaostaje za fleksijom druga dva aktuatora. To je kompenzirano programski, povećanjem maksimalnog tlaka u navedenoj komori.



Slika 65. Prsti proteze

4.4.3.3. *Strukture ispod prstiju*

Ispod prstiju staviti će se dodatne strukture isprintane od fleksibilnog materijala. Ove strukture osim što su estetskog karaktera pridonose smanjenju klizanja hvatanog objekta zbog svojstva površine fleksibilnog materijala. Na njima su izrezani profili kako bi se olakšalo njihovo deformiranje prilikom fleksije prstiju (Slika 66). Ovim strukturama dovršen je konačan izgled dlana.



Slika 66. Strukture ispod prstiju

4.4.3.4. Spajanje printanih dijelova

Nakon printa svih dijelova proteze potrebno ih je međusobno povezati. Veze između pneumatskih spojnica i prsta dodatno su zabrtvljene uz pomoć epoksidne smole jer je testiranjem utvrđeno da između navedenih spojeva dolazi do ispuštanja zraka. Teksture ispod prsta također su pomoću epoksidne smole povezane s prstima. Ostatak dijelova proteze spojen je rastavljivim spojevima.

5. GOTOVA PROTEZA

Sada kada su sve komponente sustava definirane i svi trodimenzionalni modeli isprintani potrebno ih je međusobno povezati i osmisliti način prenošenja. Proteza će se spojiti s pneumatskim sustavom pomoću 3 pneumatske cijevi- jedna za svaku aktuiranu komoru, te dvjema žicama koje će povezati senzor fleksije s mikrokontrolerom. Time je minimalizirana masa proteze na šaci i olakšano nošenje iste.

Nakon razmatranja mogućih opcija, odlučeno je da će se cjelokupni pneumatski i regulacijski sustav spremi u torbicu koja će se pričvrstiti uz tijelo. Sve komponente sustava, međusobno povezane, prikazane su na slici 67, a sustav spremljen u torbicu na slici 68.



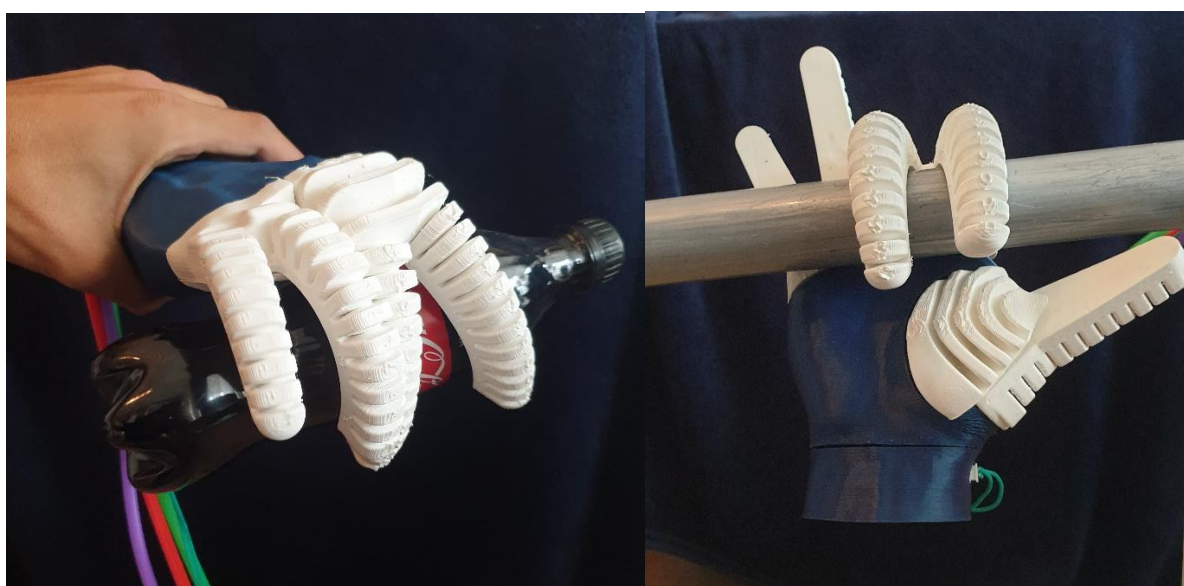
Slika 67. Sve komponente sustava proteze



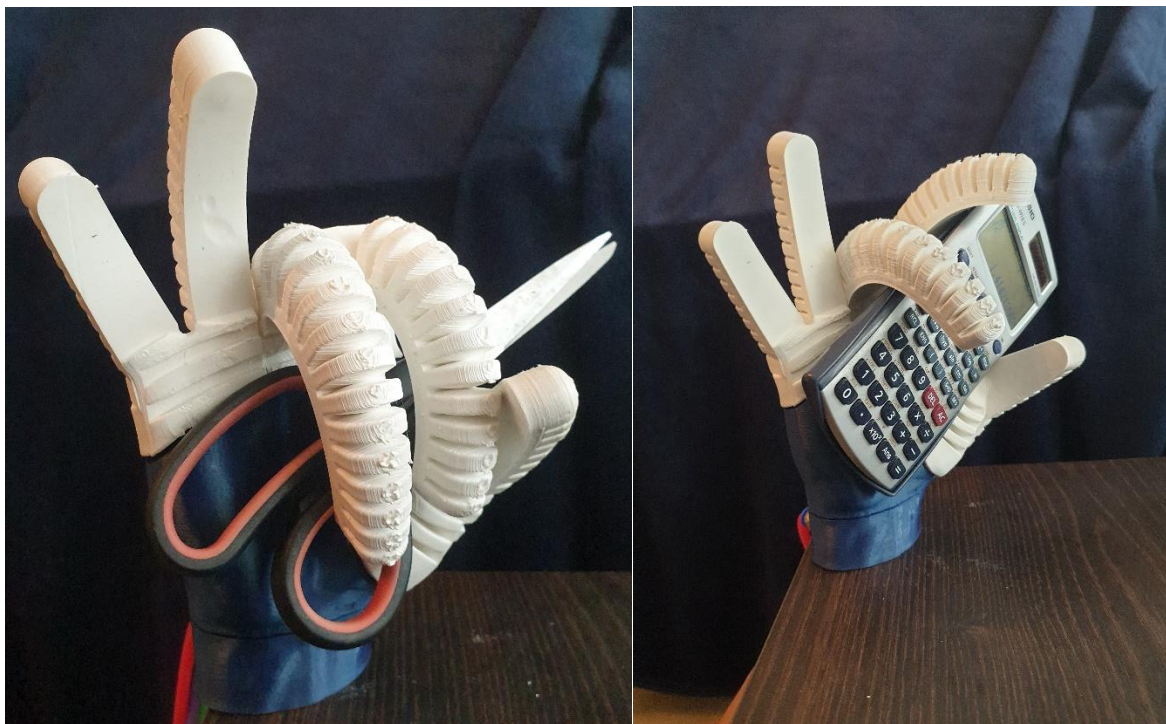
Slika 68. Konačan izgled sustava proteze

5.1. Testiranje hvatanja proteze

Proteza se isprobala hvatanjem različitih objekata. Rezultati testiranja prikazani su na slici 69 i slici 70. Testiranje se pokazalo kao uspješno te se protezom može ugrabiti objekte različitih dimenzija i oblika.



Slika 69. Hvatanje kružnih profila



Slika 70. Hvatanje nepravilnih oblika

5.2. Moguća poboljšanja proteze

S obzirom da je bio dostupan samo jedan senzor fleksije, on je iskorišten za prepoznavanje doticaja objekta i regulaciju jačine stiska. Kada bi se ugradilo više senzora fleksije u prste moglo bi napraviti prepoznavanje objekata i prilagođavanje fleksije prsta geometriji hvatanog objekta.

Aktivacija proteze mogla bi se realizirati pomoću EMG signala. Takva aktivacija proteze uključivala bi pričvršćivanje par elektroda na kožu iznad nekog mišića. Tada bi aktivacija tog mišića izazvala razliku potencijala između elektroda koja bi se mogla prepoznati pomoću mikrokontrolera, a koji bi zatim aktivirao aktuator ili pokrenuo neku radnju proteze.

Solenoidni ventili korišteni u ovom radu nepotrebno su veliki i teški. Kako bi sustav bio još kompaktniji i lakši, moguće je ugraditi solenoidne ventile manjih dimenzija. Time bi se ujedno postigla i bolja autonomija proteze s obzirom da bi zavojnica manjih solenoidnih ventila zahtijevala manje struje za aktivaciju.

Iako se modul za punjenje baterije pokazao funkcionalan, ipak nije uspio zadovoljiti predviđene performanse punjenja. Stoga bi se sustav punjenja baterije mogao zamijeniti nekim boljim kojim će se baterija moći brže puniti.

Pneumatske spojnice napravljene tehnologijom trodimenzionalnog printa iako funkcionalne, pokazale su se kao nepouzdana, pogotovo pri većim tlakovima. Ukoliko je tlak previsok dolazi do puštanja zraka ili sklizanja cijevi sa spojnice. Kada bi ih se zamijenilo s klasičnim pneumatskim spojnica, korištenim u industriji, mogao bi se postići veći tlak tlačnog spremnika.

6. ZAKLJUČAK

U ovome radu pristupilo se izradi antropomorfne proteze šake, čija se aktuacija temelji na principima meke robotike. U radu je bilo potrebno osmisliti oblik same proteze te simulacijom i iteracijom dizajna doći do modela prstiju proteze koji će vršiti željenu aktuaciju. Fokus ovog rada svakako je bio odabir i razrada upravljačkog sustava proteze, uz zahtjev da bude lagan i prenosiv. Upravljanje protezom realizirano je pneumatskim sustavom, za koji je bilo potrebno odabrati sve važne komponente te ih povezati u funkcionalnu cjelinu. Da bi prste na protezi bilo moguće aktuirati bilo je potrebno osmisliti prijenosni pneumatski izvor aktuacije, a koji je nakon razmatranja više dostupnih opcija odabran u obliku klipne pumpe. Zatim je bilo potrebno osmisliti elektronički sustav koji će upravljati pneumatskim sustavom, te time regulirati aktuaciju šake. U tu svrhu koristi se mikrokontroler koji upravlja pneumatskim ventilima i kompresorom. Mikrokontroler je bilo potrebno programirati te implementirati regulaciju aktuatora. Kako bi cijeli sustav bio prenosiv bilo je potrebno osmisliti i izvor napajanja, a u tu svrhu izrađena je prijenosna baterija s mogućnošću punjenja. Nakon odabira svih komponenti pristupilo se modeliranju kućišta za komponente koja su zatim materijalizirana tehnologijom trodimenzionalnog printa.

Za uspješnu realizaciju ovog rada bilo je potrebno povezati i koristiti široki spektar znanja iz područja strojarstva, mehatronike, robotike i automatike. Pokazalo se da niti jedan problem nije nerješiv te da je i izrada kompleksnih sustava poput proteze šake moguća ako se problem raščlani i rješava korak po korak. Iako sama proteza nije savršena, te su već po završetku izrade prepoznata mnoga moguća poboljšanja, ona pokazuje što je danas kao pojedinac moguće napraviti kombinacijom raširenih i dostupnih tehnologija.

Meka robotika je relativno mlada grana robotike koja će zasigurno pronaći vrlo široku primjenu kako u industriji tako i u svakodnevnicu. Zbog svoje inherentne sigurnosti idealna je za izradu robota za interakciju s ljudima. Uspješnim trodimenzionalnim printom mekih aktuatora pokazalo se da svatko može pristupiti izradi mekih robota s kompleksnim i, u krutoj robotici, nezamislivim geometrijama.

LITERATURA

- [1] S. Xie, M. Zhang i W. Meng, *Soft Robots for Healthcare Applications*, Hertfordshire: The Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [2] P. Curkovic and A. Jambrecic, "Improving structural design of soft actuators using finite element method analysis," *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, vol. 18, no. 4, p. 10, 2020.
- [3] P. Curkovic and G. Cubric, "Fused Deposition Modelling for 3D printing of Soft Anthropomorphic Actuators," *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 20, no. 2, p. 12, 2021.
- [4] D. Rus i M. Tolley, »Design, fabrication and control of soft robots,« *Nature*, svez. 521, p. 467–475, 2015.
- [5] R. Mutlu, G. Alici, M. in het Panhuis i G. Spinks, »3D Printed Flexure Hinges for Soft Monolithic Prosthetic Fingers,« *Soft Robotics*, svez. 3, br. 3, pp. 120-133, 2016.
- [6] Y. Park, B. Chen, N. Pérez-Arancibia, D. Young, L. Stirling, R. Wood, E. Goldfield i R. Nagpal, »Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation,« *Bioinspir Biomim*, 2014.
- [7] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano i H. Shea, »Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electroadhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators,« *Advanced Materials*, svez. 28, br. 2, pp. 231-238, 2015.
- [8] C. Walsh, »Human-in-the-loop development of soft wearable robots,« *Nature Reviews Materials*, svez. 3, p. 78–80, 2018.
- [9] <https://grabcad.com/library/hand-110>, Pristupljeno: 10. lipnja 2021.
- [10] <https://www.pumpe.hr/opcenito-o-pumpama/klipna-pumpa>, Pristupljeno: 23. svibnja 2021.
- [11] <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/mse/uploads/UsefulInfo/UsefulInfoPD/BASIC-RECIPROCATING-PUMP-DESIGNS.jpg>, Pristupljeno: 23. svibnja 2021.
- [12] I. Tamadon, V. Simoni, V. Iacovacci, F. Vistoli, L. Ricotti i A. Menciassi, »Miniaturized peristaltic rotary pump for non-continuous drug dosing*,,« u *1st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2019.
- [13] H. de Grys, »Determining the Pressure inside an Unopened Carbonated Beverage,« *Journal of Chemical Education*, 2007.
- [14] <https://www.chemedx.org/blog/what-pressure-inside-bottle-soda>, Pristupljeno: 13. lipnja 2021.
- [15] <http://www.aircommandrockets.com/procedures.htm>, Pristupljeno: 27. lipnja 2021.
- [16] https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/405129/MPPE-B_2015-06i_8043292g1.pdf, Pristupljeno: 23 svibnja 2021.
- [17] <https://www.amazon.com/Solenoid-Normally-Pneumatic-Aluminum-Electric/dp/B01M0UEISP>, Pristupljeno: 20. svibnja 2021.
- [18] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/what-is-a-microcontroller-introduction-component-characteristics-component/>, Pristupljeno: 25. svibnja 2021.
- [19] <https://www.electronicshub.org/wp-content/uploads/2017/11/Basics-of-Microcontrollers-Image-2.jpg>, Pristupljeno: 06 lipnja 2021.

- [20] https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf, Pristupljeno: 06. lipnja 2021.
- [21] <https://aws1.discourse-cdn.com/arduino/original/4X/5/d/7/5d795ff3e6a315c0eee8202d54d3cbbd91941882.png>, Pristupljeno: 06. lipnja 2021.
- [22] <https://www.hgshop.hr/articleImages/140105-878.jpg?preset=product>, Pristupljeno: 06. lipnja 2021.
- [23] <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardProMini>, Pristupljeno: 06. lipnja 2021.
- [24] <https://www.aliexpress.com/item/4000122291959.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.67e94c4dj0ASdH>, Pristupljeno: 27. svibnja 2021.
- [25] <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/tip120-d.pdf>, Pristupljeno: 08. lipnja 2021.
- [26] <https://e-radionica.com/hr/blog/2017/12/10/sto-je-to-mosfet/>, Pristupljeno: 18. lipnja 2021.
- [27] <https://www.build-electronic-circuits.com/wp-content/uploads/2018/11/H-bridge.png>, Pristupljeno: 25. lipnja 2021.
- [28] <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf>, Pristupljeno: 18. lipnja 2021.
- [29] https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf, Pristupljeno: 07. lipnja 2021.
- [30] <https://www.jsumo.com/hx711-module-load-cell-voltage-amplifier>, Pristupljeno: 07. lipnja 2021.
- [31] https://static.generation-robots.com/15150-product_cover/flex-sensor-22.jpg, Pristupljeno: 12. lipnja 2021.
- [32] <https://italvideo-split.com/proizvod/baterija-samsung-li-ion-icr-18650-2600mah/>, Pristupljeno: 16. lipnja 2021.
- [33] https://www.imrbatteries.com/content/samsung_30Q.pdf, Pristupljeno: 17. lipnja 2021.
- [34] https://www.banggood.com/HX-2S-D20-2S-7_4V-18650-Lithium-Battery-Protection-Board-8_4-V-Battery-Protection-Board-13A-Working-Current-20A-Current-limiting-p-1815266.html?cur_warehouse=CN, Pristupljeno: 16. lipnja 2021.
- [35] <http://www.ebikeschool.com/how-to-differ-between-pure-nickel-strip-battery-tabs-vs-steel-core/>, Pristupljeno: 16. lipnja 2021.
- [36] https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrootporno_zavarivanje, Pristupljeno: 16. lipnja 2021.
- [37] <https://e-radionica.com/en/2s-lithium-battery-charger-made-by-e-radionica.html#>, Pristupljeno: 17. lipnja 2021.
- [38] <http://www.hxsemi.com/upfiles/2014924152650.pdf>, Pristupljeno: 28. lipnja 2021.
- [39] <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005785A.pdf>, Pristupljeno: 19. lipnja 2021.
- [40] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>, Pristupljeno: 19. lipnja 2021.
- [41] <https://e-radionica.com/hr/blog/2018/04/04/kkm-step-up-modul-s-xl6009-boost-converter/>, Pristupljeno: 15. lipnja 2021.
- [42] <https://www.flyrobo.in/xl6009-dc-dc-step-up-boost-converter-module>, Pristupljeno: 17. lipnja 2021.

- [43] <https://www.haoyuelectronics.com/Attachment/XL6009/XL6009-DC-DC-Converter-Datasheet.pdf>, Pristupljeno: 17. lipnja 2021.
- [44] <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>, Pristupljeno: 12. lipnja 2021.
- [45] https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#/media/File:Schematic_representation_of_Fused_Filament_Fabrication_01.png, Pristupljeno: 09. lipnja 2021.
- [46] https://www.chipoteka.hr/images/proizvodi/_tmb/nit-za-3d-olovku-pla-175mm-bijela-1kg-71337-1063-600x600xA.jpg, Pristupljeno: 09. lipnja 2021.
- [47] <https://www.investopedia.com/terms/1/3d-printing.asp>, Pristupljeno: 10. lipnja 2021.
- [48] <https://www.bestof3dprinters.com/200-2/>, Pristupljeno: 20. svibnja 2021.
- [49] <https://ninjatek.com/wp-content/uploads/NinjaFlex-TDS.pdf>, Pristupljeno: 23. svibnja 2021.
- [50] <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1pn87sLUkfVwzr6DXZcoTYlePyjuE6S0x>, Pristupljeno: 23. svibnja 2021.
- [51] P. Curkovic, »Optimization of Generatively Encoded Multi-Material Lattice Structures for Desired Deformation Behavior,« *Symmetry*, svez. 13, br. 2, p. 18, 2021.
- [52] http://www.iso-iran.ir/standards/din/DIN_53504_1994_-_Determination_of.pdf, Pristupljeno: 25. svibnja 2021.
- [53] <https://grabcad.com/library/46-cap-1>, Pristupljeno: 22. lipnja 2021.
- [54] B. Kraut, Krautov strojarski priručnik, Zagreb: Sajema, 2009.
- [55] <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>, Pristupljeno: 10. lipnja 2021.
- [56] <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/mems/>, Pristupljeno: 27. svibnja 2021.
- [57] <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>, Pristupljeno: 15. lipnja 2021.
- [58] <https://battlebornbatteries.com/battery-management-system/>, Pristupljeno: 16. lipnja 2021.
- [59] <https://theconstructor.org/practical-guide/universal-testing-machine-components-functions/2449/>, Pristupljeno: 25. svibnja 2021.
- [60] <http://softrobotics.org/basic-information/>, Pristupljeno: 19. lipnja 2021.
- [61] <http://www.hxsemi.com/upfiles/2014924152650.pdf>, Pristupljeno: 19. lipnja 2021.

PRILOZI

I. Programski kod

PRILOG I

Programski kod

```
#include <Arduino.h>
#include <HX711.h>

#define HXSCK 4
#define HXDT 5
#define VENTIL1 6
#define VENTIL2 7
#define VENTIL3 8
#define GUMB1 11
#define GUMB2 12
#define KOMPRESOR 9
#define TLAKEFESTO 10
#define FESTO_OCITANO A0
#define FLEX_SEN A1

const int HX711_PIN[] = {HXDT, HXSCK}; // [DOUT, SCK]
HX711 tlak;

bool rucno = false;
float tlakovi[] = {0, 0, 0};

const float maksimalan_tlak = 1;

uint16_t tlak_komp()
{
    if (tlak.wait_ready_timeout(100))
    {
        long reading = tlak.read();
        return round(reading / 10000);
    }
    else
    {
        Serial.println("Greska u komunikaciji sa senzorom");
        return 1000;
    }
}

float ocitaj_senzor(uint8_t odabir)
{
    int ocitanje;
    float ocitanje_map;
    switch (odabir)
    {
        case 1:
```



```
    ocitanje = analogRead(FESTO_OCITANO);
    ocitanje_map = (map(ocitanje, 0, 1024, 0, 1000));
    return (ocitanje_map);
    break;
case 2:
    ocitanje = analogRead(FLEX_SEN);
    ocitanje_map = (map(ocitanje, 490, 555, 0, 100));
    return (ocitanje_map);
    break;
default:
    return 0;
}
}
```

```
void podesi_tlak(float koliko_bar)
{
    uint8_t vrijednost = round(25.5 * (koliko_bar));
    analogWrite(TLAK_FESTO, vrijednost);
}
```

```
void podesi_solenoide(byte status)
{
    digitalWrite(VENTIL1, status);
    digitalWrite(VENTIL2, status);
    digitalWrite(VENTIL3, status);
}
```

```
void provjeri_spremnik()
{
    uint16_t ocitanje_spremnik = tlak_komp();
    const uint16_t max_tlak = 470; //2.35 bar
    const uint16_t granica = 350; //1.7 bar
    if (ocitanje_spremnik > max_tlak)
    {
        digitalWrite(KOMPRESOR, 0);
    }
    else if (ocitanje_spremnik < granica)
    {
        digitalWrite(KOMPRESOR, 1);
    }
}
```

```
int flexBuffer(byte opcija = 0)
{
    static int prvi_prolaz = 0;
    static int pozicija = 0;
    const uint8_t buff_velicina = 5;
    float ocitanje = ocitaj_senzor(2);
```

```
static float flexbuf[buff_velicna];
flexbuf[pozicija] = ocitanje;
pozicija += (pozicija == buff_velicna - 1) ? -4 : 1;
float suma = 0;
for (int i = 0; i < buff_velicna; i++)
{
    suma += flexbuf[i];
}
int fleksija = round((suma / buff_velicna));
if ((fleksija < 0) && !opcija)
{
    fleksija = 0;
}
if (prvi_prolaz < buff_velicna)
{
    prvi_prolaz += 1;
    return 0;
}
else
{
    return fleksija;
}
}
```

```
void isprazni_aktuator()
{
    podesi_solenoide(1);
    podesi_tlak(0);
    delay(4000);
    podesi_solenoide(0);
}
```

```
void fina_aktucija(float trenutni_tlak)
{
    Serial.println("Fina aktucija");
    podesi_tlak(0);
    digitalWrite(VENTIL1, 0);
    digitalWrite(VENTIL2, 1);
    digitalWrite(VENTIL3, 1);
    float tlak_aktucije = 0;
    float jacina_stiska = 1.1;
    unsigned long brojac;
    while ((tlak_aktucije < trenutni_tlak))
    {
        podesi_tlak(tlak_aktucije);
        tlak_aktucije += 0.02;
        delay(10);
    }
}
```

```
brojac = millis();
podesi_solenoide(1);
podesi_tlak(maksimalan_tlak * jacina_stiska);
podesi_solenoide(0);
digitalWrite(VENTIL2, 1);
while (millis() - brojac < 5000)
{
    podesi_tlak(maksimalan_tlak * jacina_stiska * 1.5);
}

Serial.println("Pustam");
isprazni_aktuatore();
}

void provjeri_auto()
{
    static unsigned long brojac_zadnje = 0;
    if ((flexBuffer(1) > -40) or (millis() - brojac_zadnje < 3000) or rucno)
    {
        return;
    }
    Serial.println("Pokrecem auto");
    float trenutni_tlak = 0;
    float maksimalan_tlak2 = 1.1;
    int detekcija = 0;
    bool fina_akt = false;
    unsigned long brojac = millis();
    int fleksija_stara = 0;
    podesi_solenoide(0);
    digitalWrite(VENTIL1, 1);
    while ((trenutni_tlak < maksimalan_tlak2) && !fina_akt)
    {
        podesi_tlak(trenutni_tlak);
        trenutni_tlak += 0.005;
        Serial.println(flexBuffer());
        delay(5);
        if (((millis() - brojac) > 100) && (flexBuffer() > 10) && (flexBuffer() < 90))
        {
            brojac = millis();
            if (abs(fleksija_stara - flexBuffer()) < 5)
            {
                Serial.println("Nema promjene fleksije");
                detekcija++;
            }
        }
        else
        {
            fleksija_stara = flexBuffer();
            detekcija = 0;
        }
    }
}
```

```
    }
  }
  if (detekcija > 4)
  {
    Serial.println("Objekt ulovljen");
    fina_akt = true;
  }

  delay(15);
}
if (fina_akt)
{
  fina_aktuacija(trenutni_tlak);
}
else
{
  Serial.println("Nisam naisao na objekt");
  podesi_tlak(0);
  delay(1500);
  isprazni_aktuatore();
}
brojac_zadnje = millis();
}

void rucna_aktuacija(uint8_t odabrani_ventil, float tlak)
{
  switch (odabrani_ventil)
  {
  case 0:
    digitalWrite(VENTIL1, 1);
    digitalWrite(VENTIL2, 0);
    digitalWrite(VENTIL3, 0);
    break;
  case 1:
    digitalWrite(VENTIL1, 0);
    digitalWrite(VENTIL2, 1);
    digitalWrite(VENTIL3, 0);
    break;
  case 2:
    digitalWrite(VENTIL1, 0);
    digitalWrite(VENTIL2, 0);
    digitalWrite(VENTIL3, 1);
    break;
  }
  podesi_tlak(tlak);
  delay(5);
}

void provjeri_gumbe()
```

```
{
  static uint8_t odabrani_solenoid = 0;
  static float tlakovi[] = {0, 0, 0};
  const float max_tlakovi[] = {1, 1.5, 1};
  unsigned long brojac_drzanja;
  if (digitalRead(GUMB1))
  {
    rucna_aktuacija(odabrani_solenoid, tlakovi[odabrani_solenoid]);
    tlakovi[odabrani_solenoid] = (tlakovi[odabrani_solenoid] <= max_tlakovi[odabrani_solenoid]) ? tlakovi[
odabrani_solenoid] + 0.05 : max_tlakovi[odabrani_solenoid];
  }
  else
  {
    podesi_solenoid(0);
  }
  if (digitalRead(GUMB2))
  {
    brojac_drzanja = millis();
    while (digitalRead(GUMB2))
    {
      if (digitalRead(GUMB1))
      {
        tlakovi[odabrani_solenoid] = (tlakovi[odabrani_solenoid] >= 0.05) ? tlakovi[odabrani_solenoid] -
= 0.05 : 0;
        rucna_aktuacija(odabrani_solenoid, tlakovi[odabrani_solenoid]);
      }
    }
    if (millis() - brojac_drzanja < 500)
    {
      (odabrani_solenoid == 2) ? (odabrani_solenoid = 0) : odabrani_solenoid++;
      podesi_solenoid(0);
      podesi_tlak(tlakovi[odabrani_solenoid]);
    }
  }
  rucno = ((tlakovi[0] + tlakovi[1] + tlakovi[2]) > 0.1) ? true : false;
}

void setup()
{
  //Definiranje izlaza
  pinMode(VENTIL1, 1);
  pinMode(VENTIL2, 1);
  pinMode(VENTIL3, 1);
  pinMode(KOMPRESOR, 1);
  pinMode(TLAK_FESTO, 1);
  //Definiranje ulaza
  pinMode(FLEX_SEN, 0);
  pinMode(FESTO_OCITANO, 0);
}
```

```
pinMode(GUMB1, 0);
pinMode(GUMB2, 0);

//Pokreni serijsku vezu (za debbuging)
Serial.begin(9600);

//Inicijaliziraj senzor tlaka
tlak.begin(HX711_PIN[0], HX711_PIN[1]);
tlak.set_gain(32);

isprazni_aktuatore();
}

void loop()
{
  provjeri_spremnik();
  provjeri_gumbe();
  provjeri_auto();
}
```