

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Zvonimir Dabčević

David Klepo

Ivan Radić

Borna Rašperić

Dominik Semren

# SUVREMENI KONCEPTI UPRAVLJANJA HIDRAULIČKIH I PNEUMATSKIH SUSTAVA

Zagreb, 2020.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za strojarsku automatiku, Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava pod vodstvom prof. dr. sc. Željka Šituma i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2019./2020.

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
A/D	Analogno digitalni pretvornik
CSS	Stilski jezik za izradu web stranice ( <i>engl. Cascading Style Sheets</i> )
DDEH	izravno pogonjeni elektrohidraulički sustav ( <i>eng. Direct driven electrohydraulic drive</i> )
EEPROM	Električno izbrisive programibilne ispisne memorije ( <i>engl. Electrically erasable programmable read-only memory</i> )
HIC	hidraulički integrirani krug ( <i>eng. hydraulic integrated circuit</i> )
HTML	Prezentacijski jezik za izradu web stranica ( <i>engl. HyperText Markup Language</i> )
LAN	Lokalna računalna mreža ( <i>engl. Local area network</i> )
OSI	Apstraktni, slojeviti model ( <i>engl. Open System Interconnection</i> )
PID	Proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator
PWM	Pulsno širinska modulacija ( <i>engl. Pulse-width modulation</i> )
RAM	Radna memorija računala ( <i>engl. Random-access memory</i> )
RJ-45	8-polni modularni konektor ( <i>engl. Registered jack-45</i> )
SD	Vrsta memorijske kartice ( <i>engl. Secure Digital</i> )
SQL	Programski jezik namijenjen za rad sa bazama podataka ( <i>engl. Structured Query Language</i> )
TCP	Mrežni protokol ( <i>engl. Transmission Control Protocol</i> )
UART	Elektronički uređaj koji oblikuje i nadzire podatke ( <i>engl. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> )
UDP	Mrežni protokol ( <i>engl. User Datagram Protocol</i> )
USB	Vrsta serijske sabirnice ( <i>engl. Universal Serial Bus</i> )
WEB	Internetski servis ( <i>engl. World Wide Web</i> )

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
1. UVOD .....	1
2. PNEUMATSKA PREŠA UPRAVLJANA PUTEM WEB-a .....	2
2.1. Komponente sustava .....	3
2.2. Princip rada sustava.....	8
2.3. Glasovno upravljanje sustavom .....	10
2.4. Izrada web aplikacije.....	12
2.4.1. Upravljačko sučelje .....	13
2.4.2. Sustav prijave .....	13
2.4.3. Administratorsko sučelje.....	14
2.4.4. Korisničko sučelje .....	15
3. USPOREDBA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI HIDRAULIČKIH SUSTAVA.....	17
3.1. Proporcionalna hidraulika .....	17
3.2. Izravno pogonjeni elektrohidraulički sustavi .....	18
3.3. Opis eksperimentalnog postava.....	20
3.4. Rezultati testiranja.....	21
3.4.1. Pozicija klipa .....	21
3.4.2. Moment pumpe proporcionalnog sustava .....	22
3.4.3. Moment elektromotora DDEH sustava .....	23
3.4.4. Potrošnja energije oba sustava .....	24
4. SORTIRANJE PROIZVODA PRIMJENOM VIZIJSKOG SUSTAVA.....	25
4.1. Vizijski sustav .....	25
4.2. Projektiranje uređaja .....	27
4.3. Pokretna traka.....	31

5. UPRAVLJANJE PLATFORMOM S DVA STUPNJA SLOBODE POMOĆU PNEUMATSKIH AKTUATORA .....	34
5.1. Primjena u koncepta tehničkoj praksi .....	34
5.2. Projektiranje sustava .....	34
5.3. Pneumatski aktuator .....	35
5.4. Proporcionalni razvodnik .....	36
5.5. Akcelerometar/ žiroskop MPU-6050 .....	38
5.6. Princip rada MEMS akcelerometra .....	38
5.7. Princip rada MEMS žiroskopa .....	39
5.8. Povezivanje mikrokontrolera sa MPU6050 .....	39
6. REGULACIJA POLOŽAJA HIDRAULIČKOG CILINDRA PRIMJENOM LOGIČKIH VENTILA.....	41
6.1. Proces projektiranja eksperimentalnog postava .....	41
7. ZAKLJUČAK .....	53
Zahvala .....	54
Literatura .....	55
Sažetak .....	57
Summary .....	59
Životopis.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1 Pneumatska preša .....	3
Slika 2 a) Senzor sile, b) Senzor pomaka Sharp, c) Pojačalo.....	4
Slika 3 a) Mikrokontroler Arduino MEGA, b) Arduino Ethernet shield, c) Mikroračunalo Raspberry PI 3B+ .....	5
Slika 4 Tiskana pločica .....	5
Slika 5 Pneumatski cilindar .....	6
Slika 6 a) Proporcionalni tlačni regulator, b) Monostabilni razvodnik, c) Pretvarač signala ....	6
Slika 7 Usmjerivač tp-link AC 750 .....	7
Slika 8 USB kamera Logitech C170 .....	7
Slika 9 Uređaji spojeni u lokalnu mrežu .....	7
Slika 10 Blokowska shema sustava.....	9
Slika 11 Prikaz zvučnih datoteka: a) vremenska domena, b) frekvencijska domena, c) mel-frekvencijski prikaz .....	11
Slika 12 Usporedba struktura neuronskih mreža.....	12
Slika 13 Upravljačko sučelje aplikacije .....	13
Slika 14 Sustav prijave .....	14
Slika 15 Naslovna stranica administratorskog sučelja .....	15
Slika 16 Korisničko sučelje.....	15
Slika 17 Onemogućen pristup korisničkom sučelju u vremenu izvan rezerviranog termina...	16
Slika 18 Otvoreni upravljački krug proporcionalnog hidrauličkog sustava.....	17
Slika 19 Proporcionalni hidraulički sustav s cilindrom kao izvršnim elementom.....	17
Slika 20 Proporcionalni razvodnik .....	18
Slika 21 Shematski prikaz idealnog DDEH sustava .....	19
Slika 22 Shema DDEH sustava .....	19
Slika 23 Eksperimentalni postav: a) proporcionalni hidraulički sustav, b) DDEH sustav .....	20
Slika 24 Shema eksperimentalnog postava: 1) DDEH, 2) Proporcionalni hidraulički sustav .	20
Slika 25 Odzivi proporcionalnog hidrauličkog sustava za različita opterećenja.....	21
Slika 26 Odzivi DDEH sustava za različite mase tereta .....	22
Slika 27 Moment hidrauličke pumpe proporcionalnog sustava .....	23
Slika 28 Moment elektromotora DDEH sustava .....	23
Slika 29 Usporedba potrošnje energije hidrauličkih sustava.....	24
Slika 30 Princip obrade slike.....	25

Slika 31 Princip rada vizijskog sustava.....	26
Slika 32 Upravljačka shema uređaja .....	27
Slika 33 Cilindar SMC-CD85F25-160-B.....	28
Slika 34 Cilindar CJ2B10-60 .....	28
Slika 35 SMC VQD1121 razvodnik.....	29
Slika 36 Regulator tlaka AR20-F02H-N .....	29
Slika 37 Struktura upravljačke jedinice Raspberry Pi 2.....	30
Slika 38 Kamera Raspberry Pi V2.1 .....	30
Slika 39 Prva faza izrade sustava za sortiranje .....	32
Slika 40 Izrada pokretne trake.....	32
Slika 41 Postavljanje remena pokretne trake .....	33
Slika 42 Eksperimentalni postav za sortiranje proizvoda primjenom vizijskog sustava .....	33
Slika 43 CAD model platforme s dva stupnja slobode gibanja.....	34
Slika 44 CAD model sustava, drugi pogled .....	35
Slika 45 Pneumatski aktuator DRVS .....	36
Slika 46 Proporcionalni pneumatski razvodnik MPYE-5-1/8.....	37
Slika 47 Prikaz pinova na razvodniku .....	37
Slika 48 Akcelerometar/žiroskop MPU-6050 .....	38
Slika 49 Shema MEMS akcelerometra .....	39
Slika 50 Coriolisova sila na masi [20] .....	39
Slika 51 Senzor MPU-6050 sa pinovima .....	40
Slika 52 Eksperimentalni postav za regulaciju položaja hidrauličkog cilindra korištenjem logičkih ventila.....	45
Slika 53 Shematski prikaz eksperimentalnog postava .....	46
Slika 54 Ugradbeni ventil MDV30E.....	47
Slika 55 Ugradbeni ventil MSV30E.....	47
Slika 56 Ventil za ograničenje tlaka VMDC20A.....	48
Slika 57 Prigušni ventil STBO2 .....	48
Slika 58 Grafički prikaz brzine cilindra tijekom ciklusa gibanja.....	50
Slika 59 Shematski prikaz alternativne varijante eksperimentalnog postava .....	51
Slika 60 Grafički prikaz brzine gibanja cilindra tijekom jednog ciklusa(alternativna varijanta eksperimentalnog postava).....	52

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1 Osnovne karakteristike DRVS-32-270-P (u zagradi veličine za DRVS-25-270-P).	36
Tablica 2 Osnovne karakteristike MYPE proporcionalnog razvodnika.....	37
Tablica 3 Osnovne karakteristike senzora MPU-6050.....	38
Tablica 4 Popis korištenih komponenti .....	44
Tablica 5 Prikaz stanja na ventilima obzirom na napon upravljanja.....	49



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{mm}^2$	Površina klipa cilindra
$A_A$	$\text{mm}^2$	Površina klipa na strani A
$A_B$	$\text{mm}^2$	Površina klipa na strani B
$D$	mm	Promjer klipa
$d$	mm	Promjer klipnjače
$l$	mm	Duljina cilindra
$n$	-	Broj impulsa
$n$	o/min	Broj okretaja
$n_M$	$\text{min}^{-1}$	Brzina vrtnje
$n'_M$	$\text{s}^{-1}$	Brzina vrtnje
$p_{max}$	Pa	Maksimalan tlak sustava
$P_M$	kW	Snaga motora
$\Delta p_p$	bar	Razlika tlakova
$Q$	$\text{cm}^3/\text{s}$	Protok pumpe
$Q_p$	$\text{cm}^3/\text{s}$	Protok prema cilindru
$Q_{byp}$	$\text{cm}^3/\text{s}$	Protok prema bypass vodu
$Q_{max}$	$\text{cm}^3/\text{s}$	Maksimalni protok
$R$	-	Omjer protoka
$s$	m	Hod cilindra
$T_{prop}$	Nm	Moment hidrauličke pumpe proporcionalnog sustava
$t_{Amin}$	s	Minimalno vrijeme gibanja A
$t_{Bmin}$	s	Minimalno vrijeme gibanja B
$v_A$	mm/s	Brzina A gibanja cilindra
$v_{Amax}$	mm/s	Maksimalna brzina A gibanja cilindra
$v_B$	mm/s	Brzina B gibanja cilindra
$v_{Bmax}$	mm/s	Maksimalna brzina B gibanja cilindra
$v_g$	$\text{cm}^3/\text{okr}$	Radni volumen pumpe
$\eta$	-	Stupanj korisnog djelovanja
$\eta_{EM}$	-	Stupanj korisnog djelovanja elektromotora
$\eta_P$	-	Stupanj korisnog djelovanja hidrauličke pumpe
$\eta_v$	-	Volumetrički stupanj djelovanja pumpe

## 1. UVOD

Povećanje energetske učinkovitosti različitih tehničkih sustava predstavlja jedan od glavnih pravaca istraživanja u znanstvenoj zajednici. Minimizacija potrošnje energije prioritet je u gotovo svim proizvodnim pogonima s obzirom da svaka tvrtka želi smanjiti financijski gubitak korištenjem strojeva i procesa koji rasipaju energiju. S obzirom na široku primjenu pneumatskih i hidrauličkih sustava u različitim proizvodnim procesima, a samim time i njihov veliki utjecaj u potrošnji energije, pitanje energetske učinkovitosti takvih sustava od velike je važnosti i to ne samo u financijskom smislu, već i po pitanju štetnog utjecaja na okoliš. S druge strane, mnogi projektanti i konstruktori tehničkih rješenja smatraju pneumatske i hidrauličke sustave energetski neučinkovitim, a proizvođači industrijske opreme i robota fokus usmjeravaju ka osiguravanju izvršavanja osnovnih zadaća samih sustava ne vodeći brigu pri tome da se smanje operacijski troškovi tijekom eksploatacije sustava. Samim time, sustavi fluidne tehnike (zajednički naziv za pneumatiku i hidrauliku) postaju manje konkurentnijim tehnološkim izborom. Istodobno, svjedoci smo ubrzanog napretka digitalne tehnologije, gotovo a pojmovi kao što su internet stvari, Industrija 4.0, vizijski sustavi, 5G mreža ili umjetna inteligencija postaju dio svakodnevnog govora. Međutim, rijetko tko će spomenute tehnologije vezati s pneumatikom ili hidraulikom. Štoviše, često susrećemo mišljenja da se u današnjoj, digitalnoj eri pneumatika i hidraulika smatraju "dinosauruskim" tehnikama koje nemaju potencijala prilagodbe novijim tehnologijama.

Upravo su navedeni izazovi ključni elementi ovoga rada. S jedne strane razmatra se pitanje poboljšanja energetske učinkovitosti te pametnog upravljanja pneumatskih i hidrauličkih uređaja, a s druge strane razmatrana je prilagodba sustava fluidne tehnike novim, modernim tehnologijama. Rad se sastoji od pet različitih, realnih sustava izrađenih na Fakultetu strojarstva i brodogradnje: pneumatske preše upravljane putem WEB-a, postava za usporedbu energetske učinkovitosti hidrauličkih sustava, postava za sortiranje proizvoda primjenom vizijskog sustava, platforme s dva stupnja slobode gibanja upravljane pomoću pneumatskih aktuatora i hidrauličkog cilindra čiji položaj je reguliran primjenom logičkih ventila. U svim izrađenim hidrauličkim i pneumatskim sustavima implementirani su napredni upravljački koncepti temeljeni na suvremenim tehnološkim rješenjima.

## 2. PNEUMATSKA PREŠA UPRAVLJANA PUTEM WEB-a

Epidemija virusa COVID-19 uzrokovala je prekid kontaktne nastave u školama i na visokim učilištima. Shodno tome na fakultetima se nastava odvijala isključivo na daljinu putem raznih web alata. Ovakav oblik nastave na tehničkim fakultetima najviše je utjecao na izvođenje praktičnog dijela nastave gdje su laboratorijske vježbe u najboljem slučaju zamijenjene video materijalima snimljenim od strane profesora ili asistenata. Uzeći to u obzir, postavlja se pitanje: je li moguće primjenom suvremenih tehnologija omogućiti studentima izvođenje klasičnih laboratorijskih vježbi na realnim sustavima neovisno o lokaciji na kojoj se nalaze?

Internet više ne uključuje samo računala. Danas se na internet mogu povezati različiti uređaji koje svakodnevno koristimo uključujući automobile, lampe, hladnjake, pa čak i žlice. Ovakav sustav međusobne povezanosti različitih uređaja poznat je pod nazivom internet stvari (engl. Internet of things). Ilustrativno, internet stvari može se zamisliti kao divovska mreža koja uključuje veliki broj uređaja koji prikupljaju i međusobno razmjenjuju informacije. Ovakvi uređaji imaju novu razinu digitalne inteligencije koja im omogućuje komuniciranje i razmjenu podataka u realnom vremenu bez ljudske uključenosti u tu komunikaciju. Puni potencijal ove tehnologije tek ćemo osjetiti uvođenjem pete generacije mobilne mreže (5G). Scenarij u kojem pacijentu iz jedne zemlje vrlo osjetljivu operaciju izvodi kirurški tim koji se nalazi u drugoj zemlji nekoliko tisuća kilometara udaljen od mjesta operacije i danas je nezamisliv, međutim značajnim povećanjem brzine prijenosa podataka uz minimalne latencije koje donosi 5G mreža u kombinaciji sa internetom stvari i algoritmima umjetne inteligencije imaju potencijal značajno promijeniti naše živote.

Kako jedan klasičan mehatronički uređaj postaje član interneta stvari te koje sve prednosti takav sustav posjeduje, teme su razrađene u ovome poglavlju.

## 2.1. Komponente sustava

Na Slika 1 prikazana je pneumatska preša zajedno sa svim korištenim komponentama [1].



**Slika 1 Pneumatska preša**

1-Pneumatski cilindar, 2-Proporcionalni tlačni regulator, 3-Pretvarač signala, 4-Opruga, 5-Senzor sile, 6-Napajanje, 7-Monostabilni razvodnik, 8-Senzor pozicije, 9-Arduino shield pločica, 10-Tiskana pločica, 11-Arduino MEGA mikrokontroler

**Senzor sile** vijcima je učvršćen za donju ploču pneumatske preše. Senzor ima sposobnost pretvaranja sile u iznosu do 2000 N u naponski signal, a sastoji se od 4 mjerača naprezanja (tenzometarske trake) međusobno spojenih u Wheatstonov most. Svaki mjerač ima sposobnost mjerenja električnog otpora koji je proporcionalan naprezanju na kaloti. Senzor je prikazan na Slika 2 a).

**Pojačalo** - kako bi se pojačao izlazni signal senzora u cilju povećanja točnosti mjerenja sile koristi se pojačalo prikazano na Slika 2 b). Pojačalo koristi 24 bitni A/D čip za precizno mjerenje težine s dvokanalnim analognim ulazom i 128x programabilnim pojačalom signala, a ulazni signal može davati mosni ('bridge') senzor.

**Senzor pozicije** - raspon mjerenja senzora pozicije prikazanog na Slika 2 c) je 4 do 30 cm, što je za ovaj sustav pneumatske preše pogodno s obzirom na visinu same preše kao i progib opruge. Senzor radi na jednostavnom principu: infracrveni signal poslan sa senzora nailazi na

prepreku, a analogni napon koji se vraća definira koliko je prepreka udaljena. U pravilu što je prepreka bliže, napon je veći.

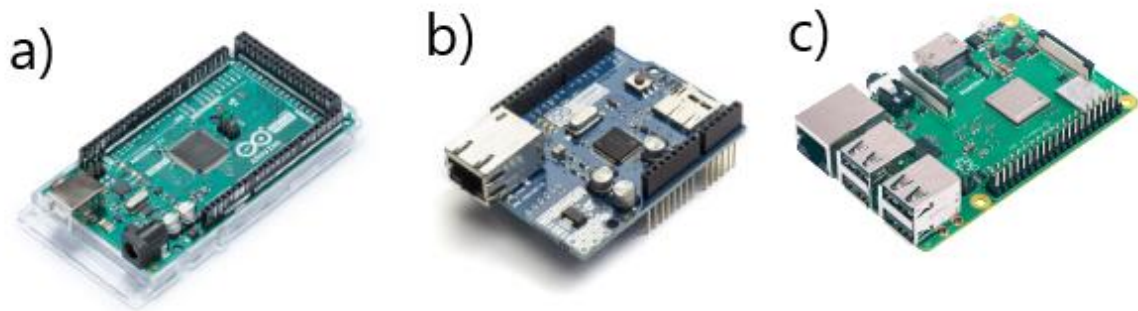


Slika 2 a) Senzor sile, b) Senzor pomaka Sharp, c) Pojačalo

**Arduino Mega** je mikrokontroler baziran na Atmega2560 čipu [2]. Sadrži 54 digitalnih izlazno/ulaznih pinova, 16 analognih ulaza, 4 UART pinova, 16 MHz kristalni oscilator, USB konektor, napajanje, ICSP zaglavlje i dugme za reset. Može se napajati putem USB veze ili pomoću vanjskog napajanja. Sadrži 256 kB flash memorije za pohranu programskog koda, 8 kB statičkog RAM-a i 8 kB EEPROM-a (električno izbrisive programibilne ispisne memorije). Mikrokontroler je prikazan na Slika 3 a).

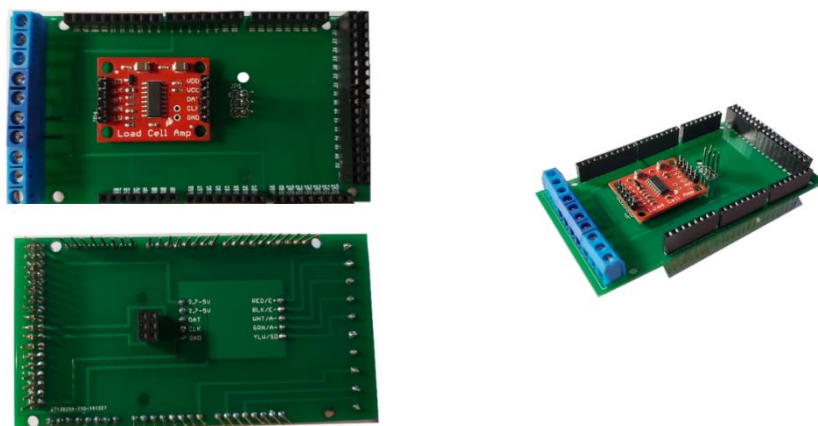
**Arduino Ethernet shield** prikazan na Slika 3 b) omogućuje Arduino mikrokontroleru spajanje na internet pomoću standardne RJ-45 konekcije. Baziran je na Wiznet W5100 Ethernet čipu. Wiznet W5100 podržava do 4 istovremenih socket konekcija (odnosi se i na TCP i UDP protokol). Također, na pločici se nalazi utor za mikro-SD karticu koja se može koristiti za pohranjivanje i slanje podataka preko mreže te reset dugme [3].

**Mikroračunalo Raspberry PI** jedan je od najpoznatijih mikroračunala na svijetu. Model 3B+ prikazan na Slika 3 c) sadrži: 64bitni 4-jezgreni procesor koji radi na frekvenciji od 1.4 GHz, 1 GB RAM memorije, WiFi, Bluetooth, HDMI izlaz, 4 USB priključka, slot za SD karticu na koju je spremljen operacijski sustav (u ovom slučaju Raspbian) kao i ostali podaci te LAN priključak [4]. Raspberry PI korišten je za implementaciju video prijenosa uživo, odnosno praćenje ponašanja samog uređaja (pneumatske preše).



Slika 3 a) Mikrokontroler Arduino MEGA, b) Arduino Ethernet shield, c) Mikroračunalo Raspberry PI 3B+

**Tiskana pločica** smještena je između Arduino mikrokontrolera i Arduino Ethernet pločice koji međusobno komuniciraju preko tiskane pločice. Na samoj pločici smješteno je pojačalo, Arduino ICSP konektor, stezaljke za vodove te Arduino konektori. Konačna verzija tiskane pločice prikazana je na Slika 4.



Slika 4 Tiskana pločica

**Pneumatski cilindar** prikazan na Slika 5 ima ulogu aktuatora u pneumatskom sustavu. Dvoradni cilindar ima jedan stupanj slobode gibanja (vertikalnu translaciju), a klip cilindra se izvlači i uvlači djelovanjem stlačenog zraka. Promjer cilindra iznosi  $D_c = 50\text{mm}$ , a hod klipa  $l=80\text{mm}$ .

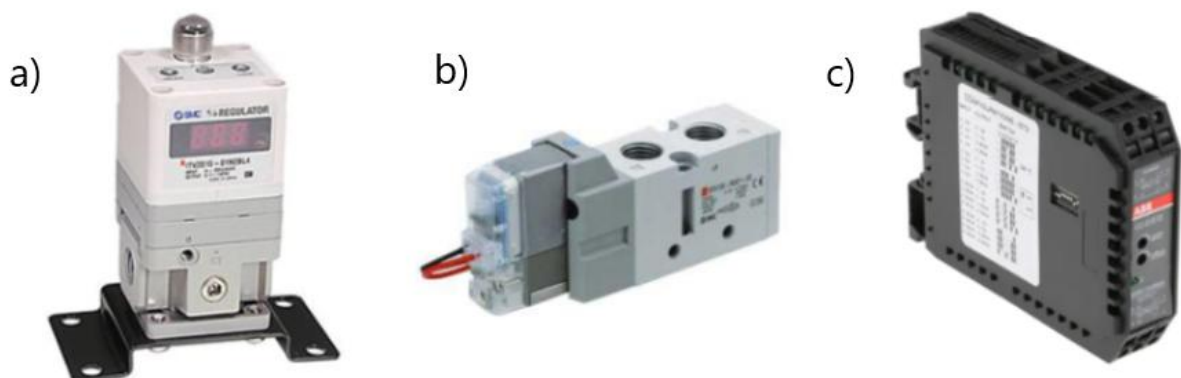


**Slika 5 Pneumatski cilindar**

**Proporcionalni tlačni regulator** je ventil sa implementiranim automatiziranim sustavom prekida dovoda zraka pri referentnoj vrijednosti tlaka pomoću strujnog signala na ulazu. Proporcionalni tlačni regulator prikazan je na Slika 6 a).

**Pneumatski monostabilni razvodnik** usmjerava tok stlačenog zraka propuštanjem, zatvaranjem i promjenom smjera toka. Tip razvodnika prikazan na Slika 6 b) je 5/2 (pet kroz dva) odnosno riječ je o razvodniku s 5 priključaka i dva razvodna položaja. Karakteristika monostabilnog razvodnika jest da se poslije prestanka signala vraća u početni položaj.

**Pretvarač signala** - funkcija pretvarača signala je pretvaranje izlaznog napona Arduino mikrokontrolera (PWM signala) od 0 do 5 V (0 do 255 PWM) u ulazni strujni signal proporcionalnog tlačnog regulatora u iznosu od 4 do 20 mA. Pretvarač signala prikazan je na slici Slika 6 c).



**Slika 6 a) Proporcionalni tlačni regulator, b) Monostabilni razvodnik, c) Pretvarač signala**

**Usmjerivač (engl. Router)** je mrežni uređaj zadužen za usmjeravanje podatkovnih paketa na njihovom putu kroz računalnu mrežu pri čemu se taj proces odvija na mrežnom sloju OSI modela. Usmjerivač marke tp-link korišten u ovom postavu prikazan je na Slika 7.

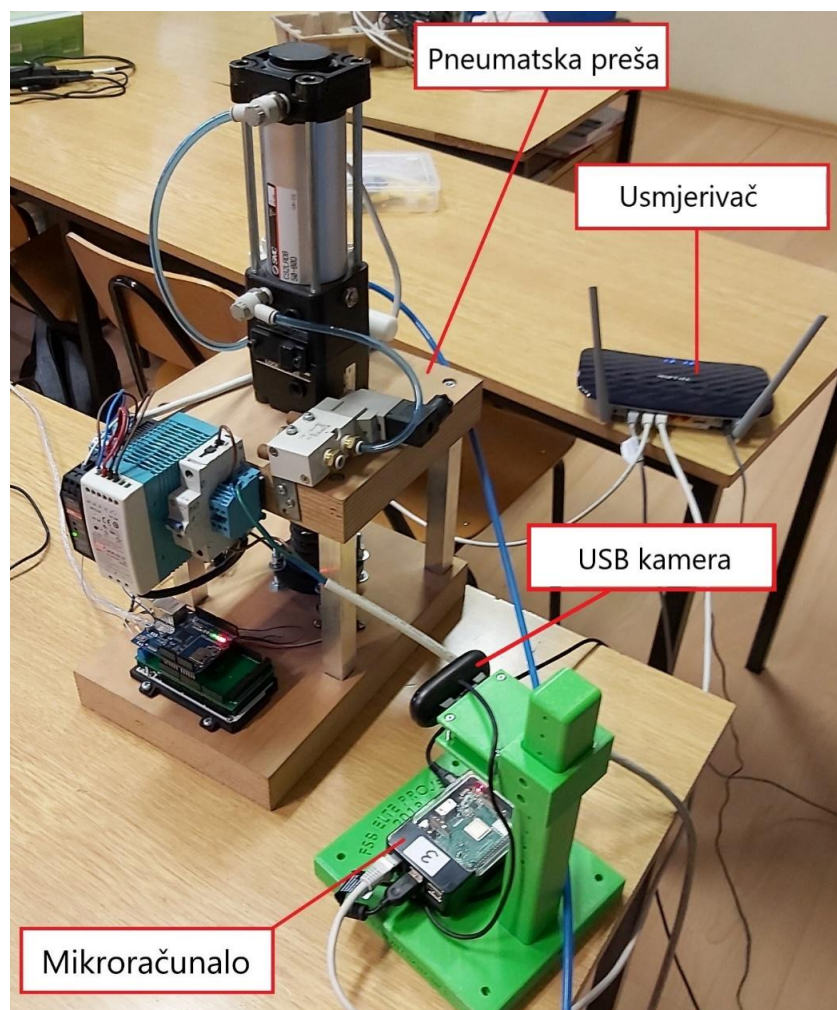


**Slika 7** Usmjerivač tp-link AC 750

**USB kamera** - za ostvarivanje video prijenosa u realnome vremenu korištena je USB kamera spojena na mikroracunalo. Kamera je prikazana na Slika 8.



**Slika 8** USB kamera Logitech C170



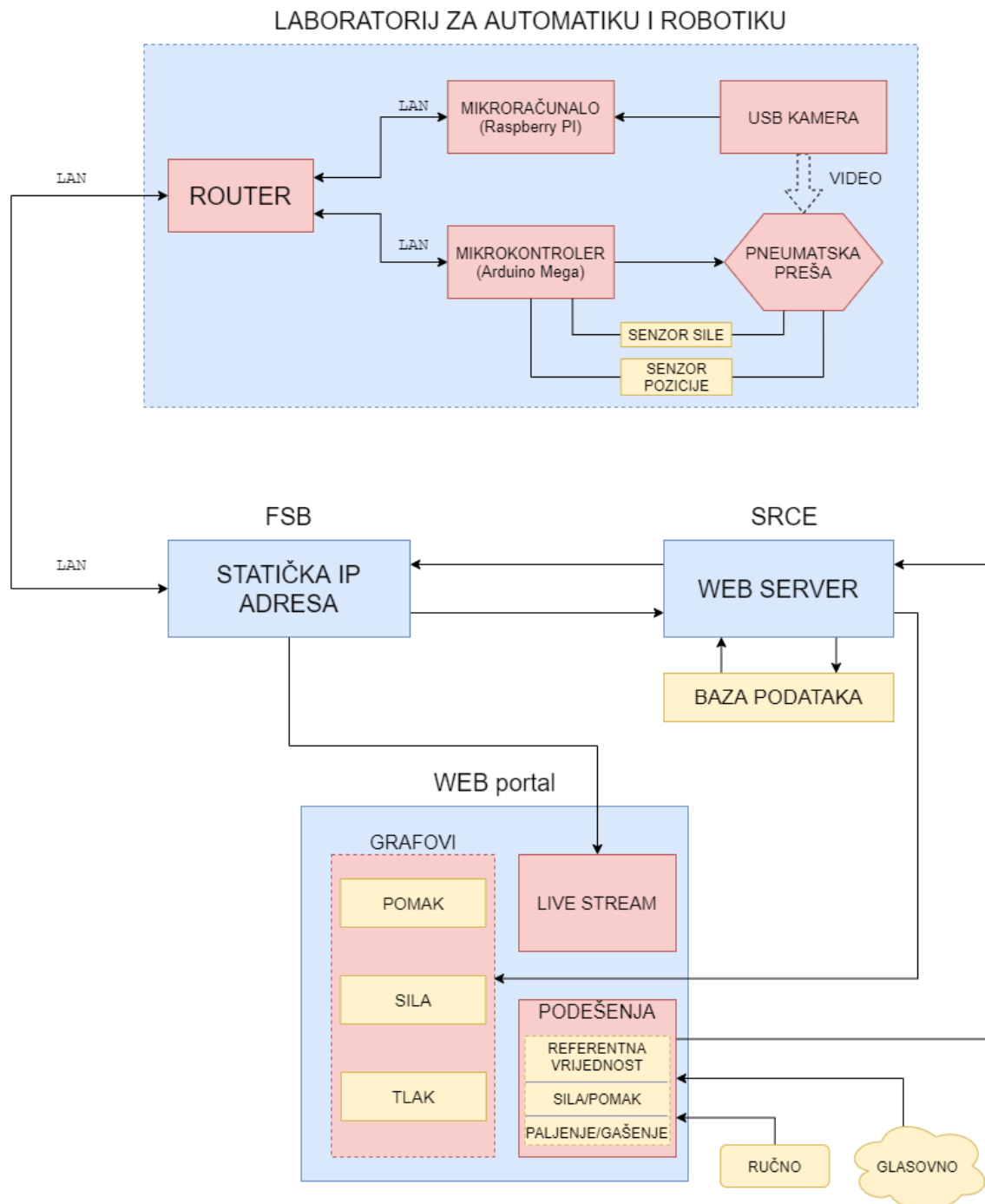
**Slika 9** Uređaji spojeni u lokalnu mrežu



## 2.2. Princip rada sustava

Na WEB portalu implementirana su dva sučelja: administratorsko i korisničko. Administrator ima mogućnost definiranja termina pristupa upravljačkom sučelju WEB portala na način da isključivo jedan korisnik u jednome terminu može upravljati jednom pneumatskom prešom u vremenskom periodu određenom od strane administratora kako bi se izbjegla kolizija upravljanja. Mogućnosti koje se korisniku nude pri upravljanju su: uključivanje i isključivanje pneumatske preše, odabir vrste regulacije (regulacija sile ili regulacija pomaka) te definiranje referentne vrijednosti (sile ili pomaka). Korisnik navedene opcije može definirati ručno (tipkovnica i miš) ili glasovno (implementirana neuronska mreža). Definirani podaci od strane korisnika šalju se na WEB server smješten u Sveučilišnom računskom centru (SRCE) koji preko socket komunikacije (UDP protokola) iste te podatke prosljeđuje vanjskoj statičkoj IP adresi servera lociranom na FSB-u (Fakultetu strojarstva i brodogradnje). Sa statičke IP adrese podaci se preko mrežnog kabela dostavljaju usmjerivaču (engl. Router). Usmjerivač dobivene podatke prenosi mikrokontroleru s kojim se nalazi u istoj lokalnoj mreži. Mikrokontroler podatke raspakirava i interpretira očitavajući vrstu regulacije i referentnu vrijednost definiranu od strane korisnika. Na mikrokontroler spojeni su senzori sile i pozicije koji neprekidno mjere navedene fizikalne veličine pneumatske preše. S obzirom da mikrokontroler sada posjeduje informacije o referentnoj vrijednosti, vrsti regulacije i senzorskim vrijednostima, pomoću implementiranog algoritma PID regulacije izračunava se naponski PWM signal. Izračunati PWM signal se pomoću pretvarača signala konvertira u ulazni strujni signal za elektro-pneumatski proporcionalni tlačni regulator kojim se regulira tlak u pneumatskom cilindru. Pneumatski cilindar s jednim stupnjem slobode gibanja (vertikalnom translacijom) koristi se kao aktuator pretvaranjem komprimiranog zraka u mehaničku silu. Nakon dobivanja podataka, mikrokontroler počinje odgovarati na dobivenu poruku gdje prikupljene podatke sa senzora pozicije, sile i tlaka neprekidno šalje u suprotnome smjeru do WEB servera, gdje se podaci spremaju u bazu podataka. Slanje podataka mikrokontroler prekida po nalogu korisnika odnosno odabirom opcije isključivanja preše na WEB portalu ili izlaskom iz WEB preglednika. Podaci iz baze podataka također se konstantno prikazuju korisniku na WEB portalu u obliku grafova čime korisnik dobiva povratnu informaciju vrijednosti sa senzora. Također, korisniku se nudi mogućnost praćenja ponašanja pneumatske preše tokom cijelog vremena odabranog termina. Na mikroračunalo spojena je USB kamera koja neprekidno snima pneumatsku prešu. Video signal mikroračunalo šalje usmjerivaču koji dobiveni signal prosljeđuju FSB serveru te se u

konačnici signal prikazuje u pregledniku korisnika. Blokovska shema sustava prikazana je na Slika 10.



Slika 10 Blokovska shema sustava

### 2.3. Glasovno upravljanje sustavom

Klasifikacija zvukova trenutačno je veoma popularno područje istraživanja sa brojnim primjenama u stvarnome svijetu. Uzimajući u obzir nedavna ostvarenja u klasifikaciji slika pomoću konvolucijskih neuronskih mreža, isti pristup primijeniti će se na klasifikaciju zvučnih datoteka [5].

Cilj neuronske mreže je uspješno prepoznavanje određenih riječi. U ovome radu definirano je 7 riječi koje će se klasificirati: „dolje“, „gore“, „pomak“, „sila“, „stani“, „ugasi“ i „upali. S obzirom da ne postoji dostupan set podataka zvučnih datoteka navedenih riječi, podaci su osobno prikupljeni. Za svaku riječ prikupljeno je 2000 zvučnih uzoraka, koje će činiti ulaz neuronske mreže. Nakon prikupljanja podataka, podatke je potrebno što bolje reprezentirati na način da uzorci istih riječi imaju s jedne strane što veću međusobnu sličnost, a s druge strane da budu što različitiji ostalim riječima.

U prvom koraku podaci su prikazani u vremenskoj domeni. Korak vizualizacije signala u vremenskoj domeni dobar je početni korak za daljnju analizu i poboljšanu reprezentaciju signala, međutim jasno je da odnos amplitude i vremena nije previše informativan s obzirom da iz njega jedino iščitavamo glasnoću zvučnog signala. Zvučni signal u vremenskoj domeni prikazan je na Slika 11 a).

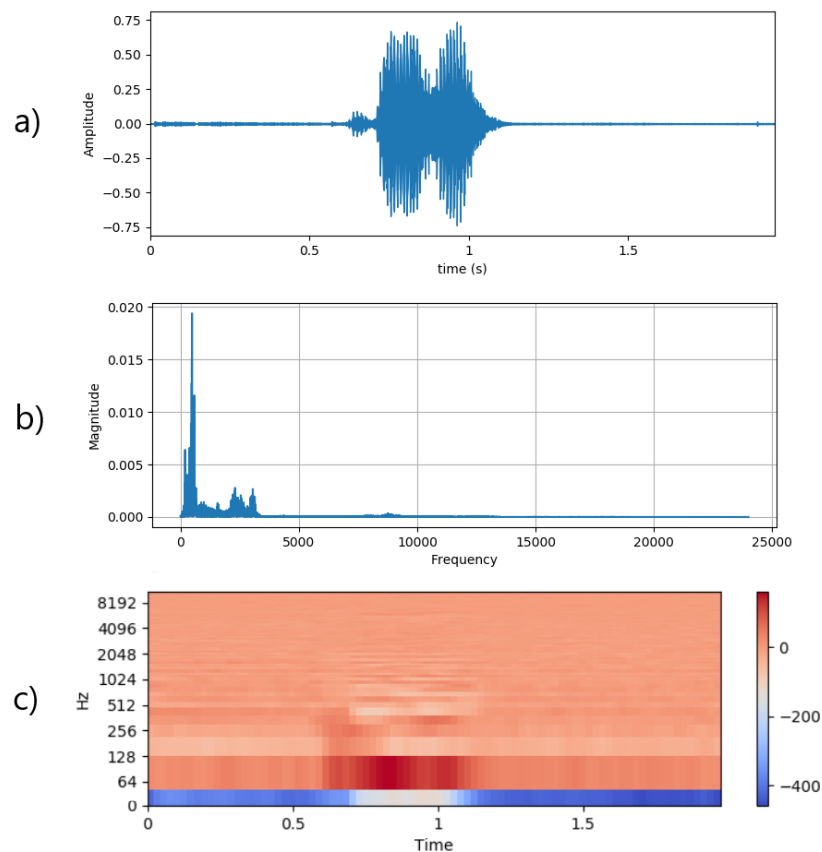
Shodno tome, signale prikazujemo u frekvencijskoj domeni u kojoj tumačimo koje su sve frekvencije u signalu prisutne. Za prikaz signala u frekvencijskoj domeni nužna je određena matematička operacija koja će signal iz vremenske domene transformirati u frekvencijsku. Takva operacija naziva se Fourierova transformacija. S obzirom da su zvučni signali u ovom slučaju izgovorene ljudske riječi, normalno je za očekivati da su jake frekvencije u području između 0 i 1 kHz koje u ljudskome govoru dominiraju što je i prikazano na Slika 11 b).

Diskretnom Fourierovom transformacijom signali su prikazani u frekvencijskom području, međutim, informacije o vremenu su izgubljene. Vremenska domena važna je zbog prikaza poretka slogova tj. slova u samoj riječi. Stoga, signale je potrebno prikazati ne samo u frekvencijskoj već i u vremenskoj domeni.

Vizualna reprezentacija frekvencije signala u ovisnosti o vremenu naziva se spektogram. Na apscisnoj osi spektograma prikazana je promjena vremena, a na osi ordinata promjena frekvencije, dok su bojom prikazane veličine (amplitude) promatranih frekvencija u određenom vremenu.

Spektogramska reprezentacija zvučnih signala koristi linearno mjerilo frekvencije. Međutim, u analizi zvučnih signala često se spominje pojam mel-frekvencije [6]. Mel-frekvencija koristi

kvazi-logaritamsko mjerilo radi što točnijeg opisa ljudskog glasovnog aparata. Prikaz signala u mel-frekvenciji prikazan je na Slika 11 c). Time je problem klasifikacije zvučnih datoteka sveden na klasičan problem klasifikacije slika gdje su grafički prikazi zvučnih datoteka u obliku mel-frekvencija matrično zapisani i u tom obliku čine ulaz neuronske mreže.

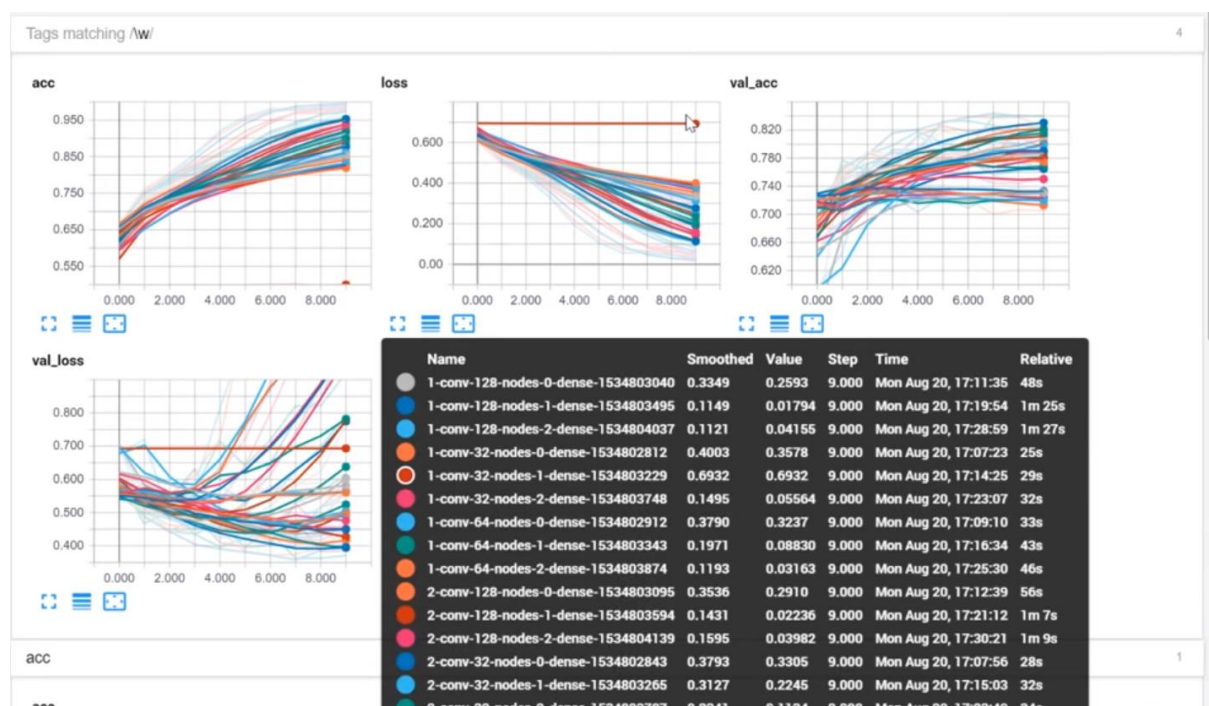


**Slika 11 Prikaz zvučnih datoteka: a) vremenska domena, b) frekvencijska domena, c) mel-frekvencijski prikaz**

Proces treniranja neuronske mreže ponovljen je za više različitih struktura gdje su se mijenjali sljedeći parametri:

- vrsta slojeva,
- broj slojeva,
- broj čvorova,
- aktivacijske funkcije,
- iznosi dropout-a.

Strukture neuronskih mreža su uspoređene te je odabrana struktura sa najmanjom funkcijom gubitaka. Usporedba je prikazana na Slika 12.



Slika 12 Usporedba struktura neuronskih mreža

## 2.4. Izrada web aplikacije

Kako bi korisnik mogao upravljati pneumatskom prešom putem WEB-a nužna je izrada WEB aplikacije gdje će korisnik definirati željene parametre i tako započeti komunikaciju sa mikrokontrolerom. Također, potrebno je onemogućiti istovremeno upravljanje pneumatskom prešom od strane više korisnika, odnosno samo jedan korisnik u jednom terminu ima pravo upravljati jednom pneumatskom prešom. Ukoliko se u laboratoriju nalazi više pneumatskih preša, potrebno je osigurati da  $n$  korisnika može upravljati  $n$  pneumatskim prešama u jednome terminu, pri čemu svaki korisnik upravlja jednom pneumatskom prešom. Kao odgovor na navedeni problem osmišljena je WEB aplikacija kalendara. Za izradu WEB aplikacije na *back-endu* je korišten Python programski jezik sa *web2py framework-om* te SQLite baza podataka, dok je na *front-endu* uz tri standardne tehnologije (HTML, CSS, JavaScript) korištena Bootstrap biblioteka (HTML + CSS) te jQuery biblioteka (JavaScript).

### 2.4.1. Upravljačko sučelje

Upravljačko sučelje aplikacije prikazano je na Slika 13.

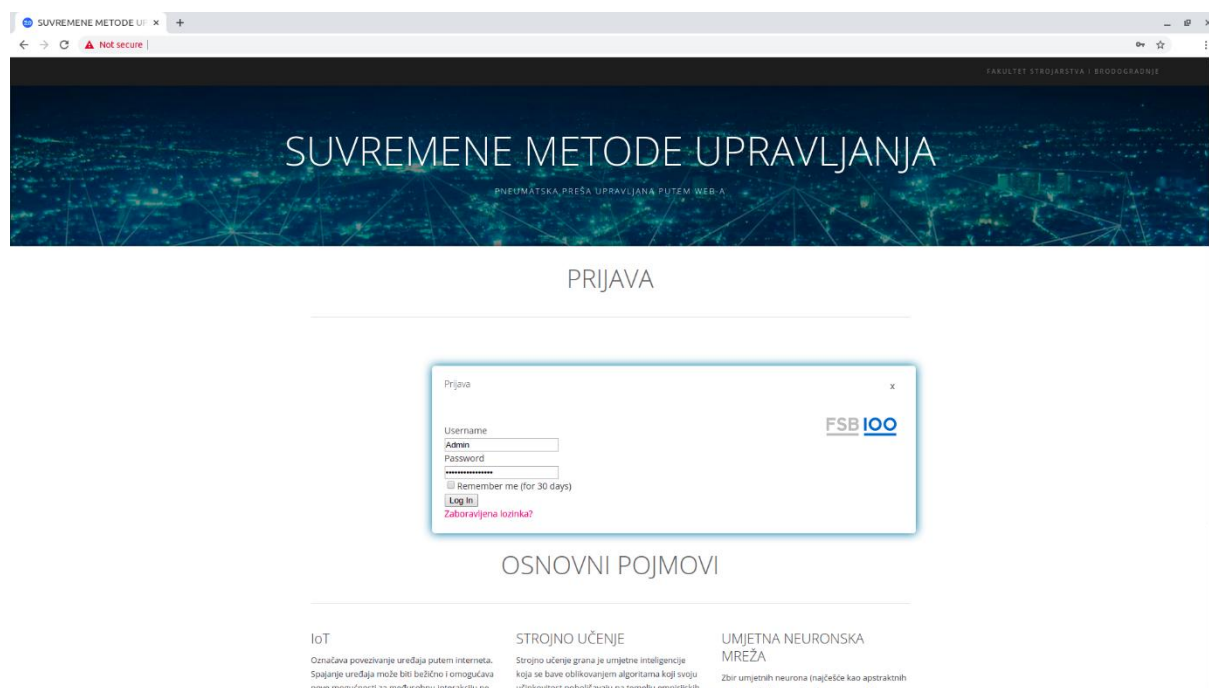


Slika 13 Upravljačko sučelje aplikacije

Korisnik u realnome vremenu putem video prijenosa može pratiti pneumatsku prešu putem video prozora (1). Vrsta regulacije zadaje se klikom na željeno dugme (3) ovisno želi li se provesti regulacija sile ili pomaka. S obzirom na vrstu regulacije zadaje se referentna vrijednost (2). Maksimalna referentna vrijednost pomaka iznosi 2,1 cm, dok maksimalna referentna vrijednost sile iznosi 1000 N. Klikom na dugme (5) diktira se isključenje i uključenje pneumatske preše. Također, svim ovim opcijama može se glasovno upravljati klikom na dugme (4) te izgovaranjem jedne od sljedećih riječi: „upali“, „ugasi“, „sila“, „pomak“, „gore“, „dolje“, „stani“.

### 2.4.2. Sustav prijave

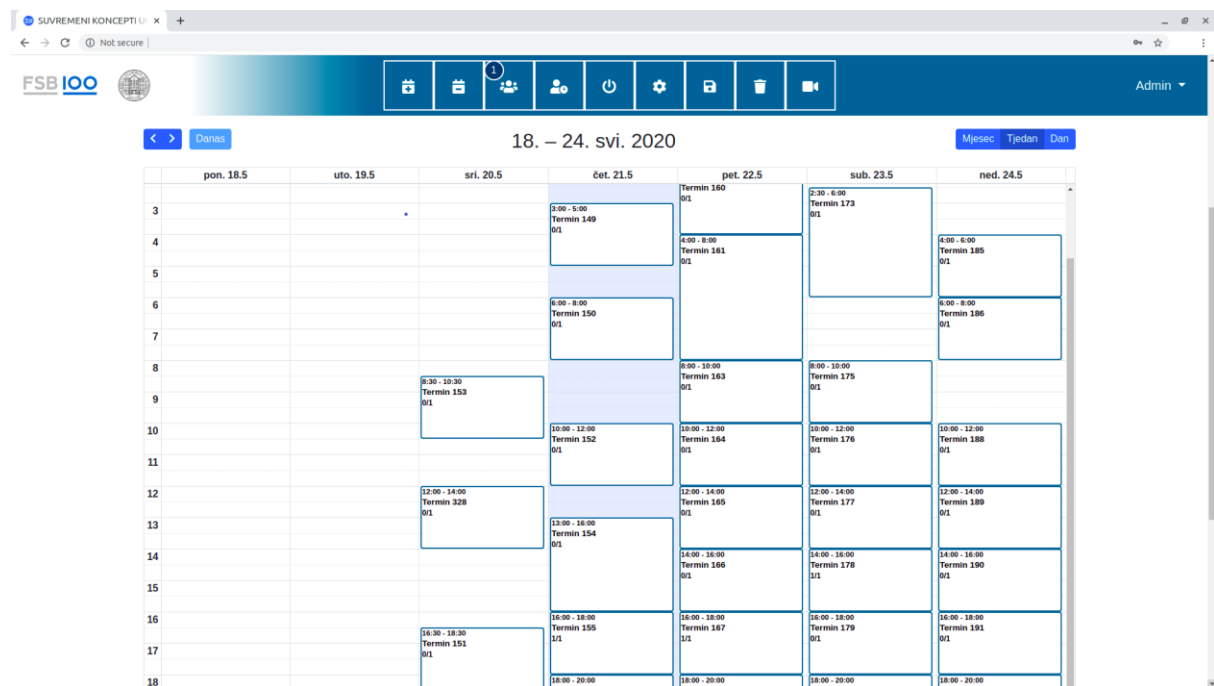
Kako bi posjetitelj mogao pristupiti korisničkom sučelju, mora izvršiti prijavu. Moguće su dvije vrste prijave: kao administrator i kao korisnik. Ovisno o vrsti prijave pristupa se jednom od grafičkih sučelja. Sustav prijave prikazan je na Slika 14.



**Slika 14** Sustav prijave

### 2.4.3. Administratorsko sučelje

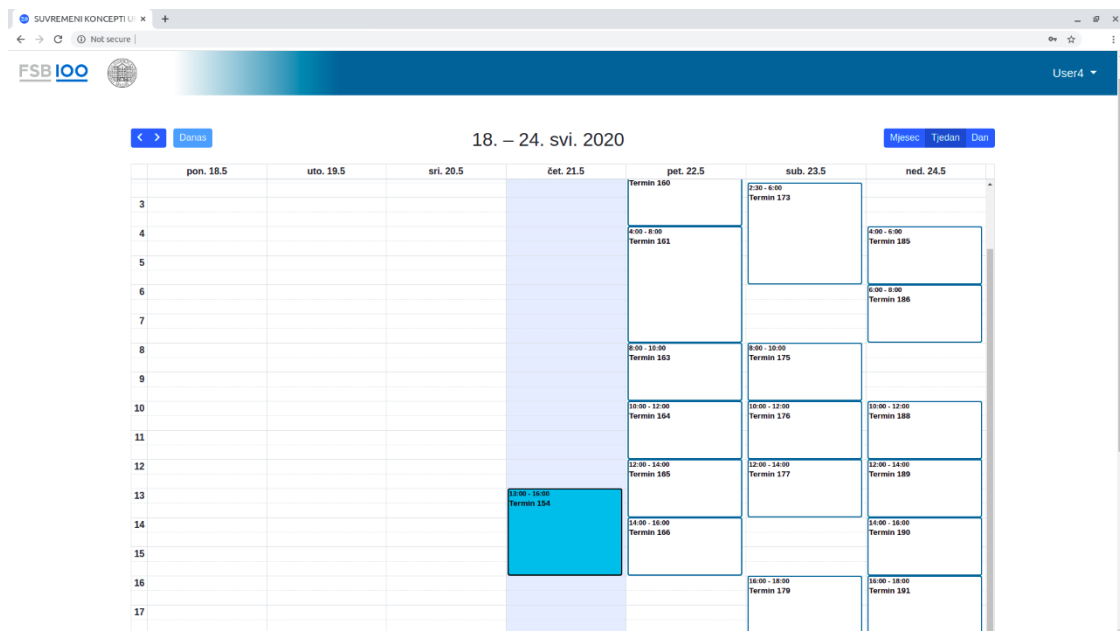
WEB aplikacija kalendara zamišljena je na način da administrator (profesor) zadaje termine, a studentima se nudi mogućnost izbora jednog od zadanih termina. Nakon prijave u WEB aplikaciju otvara se administratorsko sučelje u kojem se administratoru nudi mogućnost generiranja termina upravljanja pneumatske preše kao i pregled trenutne situacije sustava, te pregled studenata čiji termin je prošao. Cilj je bilo osmisliti što jednostavniji princip generiranja termina što je omogućeno kroz niz opcija koje se nalaze u gornjoj naslovnoj traci. Opcije koje su nude administratoru su: kreiranje termina (pojednog ili seta), brisanje termina (pojednog ili seta), definiranje broja korisnika po terminu, definiranje ograničenja termina (definiranje broja uključenja pneumatske preše kao i vremenski period u kojem će preša biti u aktivnom stanju), pregled korisnika u pojedinom terminu te dodatna mogućnost njihove prijave/odjave, definiranje IP adresa (mikrokontrolera i mikroračunala), status preša (uključivanje/isključivanje aktivnosti pojedine preše), čišćenje baza podataka, video nadzor svih aktivnih preša te automatsko slanje obavijesti korisnicima putem elektronske pošte u slučaju nemogućnosti izvođenja vježbi u pojedinom terminu. Izgled naslovne stranice administratorskog sučelja prikazan je na Slika 15.



Slika 15 Naslovna stranica administratorskog sučelja

## 2.4.4. Korisničko sučelje

Korisnik ima mogućnost odabira jednog od ponuđenih termina definiranih od strane administratora. Nakon prijave, korisniku se prikazuje kalendar sa svim dostupnim terminima koji nisu popunjeni ili istekli. Korisničko sučelje prikazano je na Slika 16.

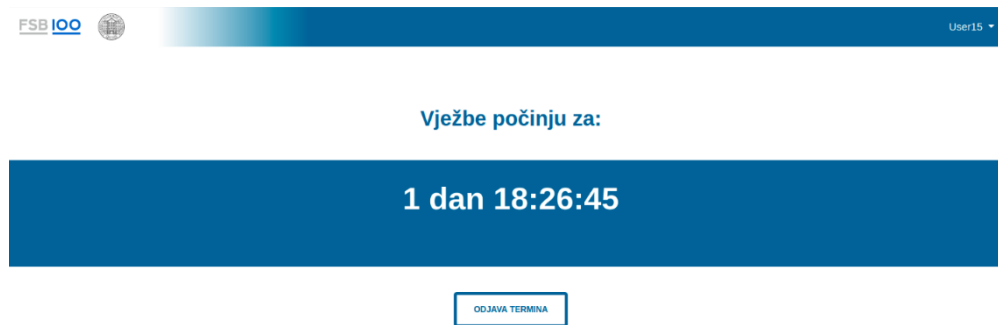


Slika 16 Korisničko sučelje

Korisnik ima pravo pristupa upravljačkom sučelju jedino u rezerviranom terminu. Ukoliko je rezervirani termin prošao, korisniku se onemogućuje pristup upavljačkom sučelju, a ukoliko



je korisnik rezervirao budući termin prikazuje mu se vrijeme do mogućeg pristupa samom sučelju.

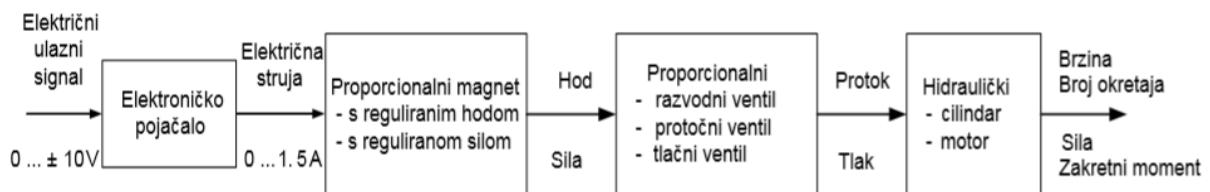


**Slika 17 Onemogućen pristup korisničkom sučelju u vremenu izvan rezerviranog termina**

### 3. USPOREDBA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI HIDRAULIČKIH SUSTAVA

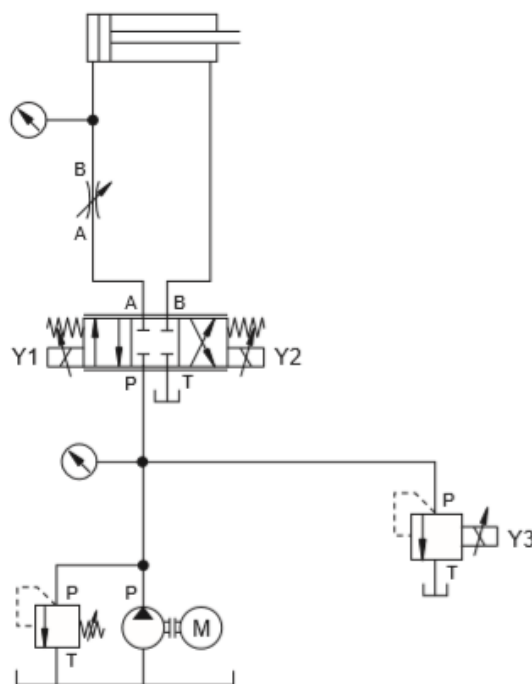
#### 3.1. Proporcionalna hidraulika

Proporcionalna hidraulika koristi proporcionalne razvodnike za upravljanje hidrauličkim sustavima i tako objedinjuje prednosti elektronike s prednostima hidraulike. Pomoću električnih signala može se postići kontinuirani prijelaz između radnih položaja s proporcionalnim razvodnicima što im omogućuje visoku preciznost te široku primjenu u industriji. [7]



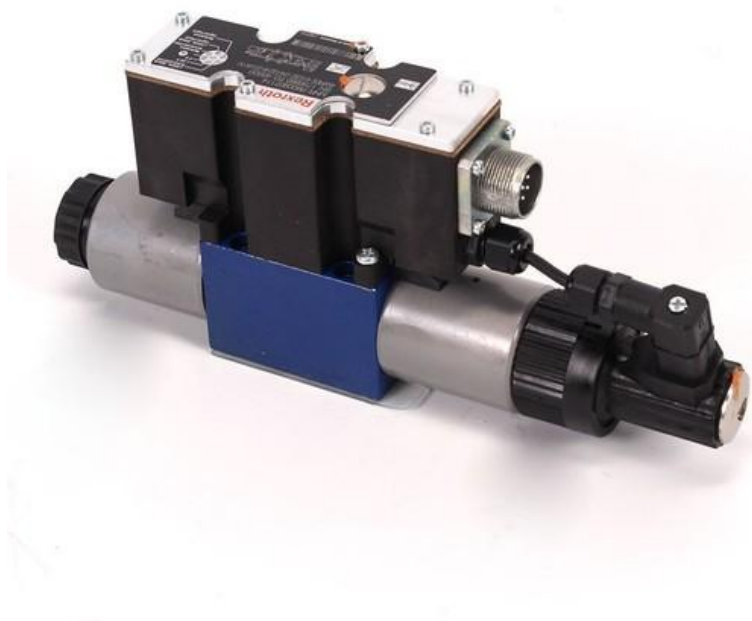
**Slika 18** Otvoreni upravljački krug proporcionalnog hidrauličkog sustava

Proporcionalni hidraulički sustavi rade tako da se pomoću motora pokreće pumpa koja stvara protok ulja konstantnog tlaka (tlaka napajanja). Ulje se dovodi do razvodnika i ovisno o položaju proporcionalnog razvodnika, usmjerava se dalje u sustav gdje dolazi do izvršnih elemenata (hidraulički cilindar, hidromotor) koji će energiju fluida pretvoriti u koristan mehanički rad.



**Slika 19** Proporcionalni hidraulički sustav s cilindrom kao izvršnim elementom

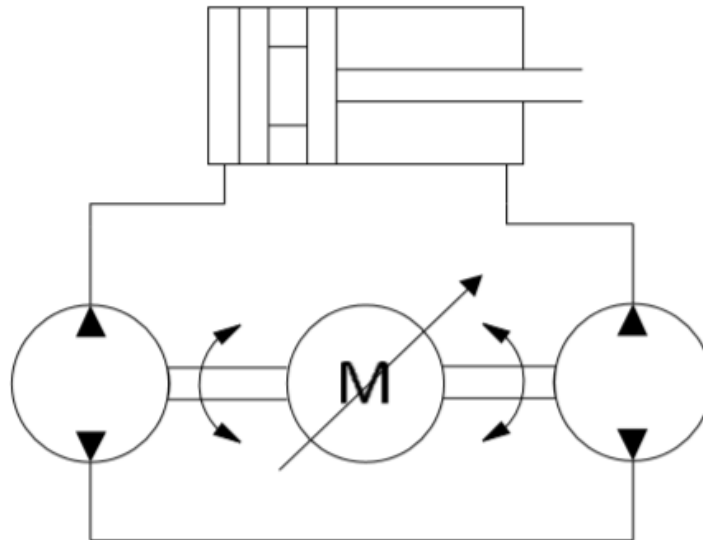
Slika 19 prikazuje proporcionalni hidraulički sustav, ako se proporcionalni razvodnik nalazi u položaju 1, tada fluid struji od točke P prema A i puni se lijeva komora cilindra te se klipnjača izvlači. Ako se proporcionalni razvodnik nalazi u položaju 2, tada sustav miruje, a ako se nalazi u položaju 3 tada fluid struji od točke P prema B i puni se desna komora cilindra, odnosno klipnjača se uvlači. [8]



**Slika 20 Proporcionalni razvodnik**

### **3.2. Izravno pogonjeni elektrohidraulički sustavi**

Hidraulički sustavi imaju nizak stupanj korisnog djelovanja ( $\eta$ ), a kako su sastavni dio gotovo svake industrije tako se želi povećati njihova učinkovitost boljim i jednostavnijim rješenjima. Izravno pogonjeni elektrohidraulički sustavi (DDEH) osmišljeni su kako bi se izbjegli elementi s najmanjom učinkovitosti u sustavu, a to su razvodnici, ventili i regulatori tlaka. Smanjenje potrošnje energije očituje se u tome da pumpa ne radi cijelo vrijeme nego radi samo po potrebi, tj. kada postoji zahtjev za gibanjem aktuatora. DDEH sustav ne koristi proporcionalni razvodnik, već se upravlja jednim elektromotorom koji preko vratila pokreće 2 hidrauličke pumpe i tako upravlja brzinom i pozicijom klipa cilindra. Regulacijom brzine elektromotora upravlja se protokom ulja u sustavu, a samim time i brzinom kao i pozicijom cilindra. [9]

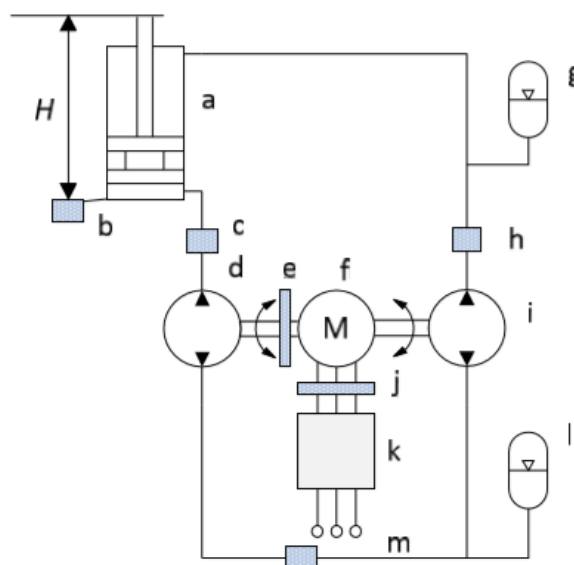


**Slika 21 Shematski prikaz idealnog DDEH sustava**

Idealni sustav nije izvediv zbog gubitaka koji se javljaju u sustavu i zbog industrijskog dimenzioniranja hidrauličkih komponenti. Da bi sustav bio izvediv, mora se zadovoljiti omjer protoka  $R$ :

$$R = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} . \quad (1)$$

Ako stvarni protoci ne zadovoljavaju odnos koji nalaže omjer protoka, tada dolazi do „zarobljavanja fluida“ u desnoj komori cilindra što za posljedicu ima nagli porast tlaka zbog kojeg dolazi do istjecanja fluida, prekomjernog zagrijavanja i oštećenje opreme. Taj se problem rješava dodavanjem hidrauličkih akumulatora koji preuzimaju „višak“ tlaka.

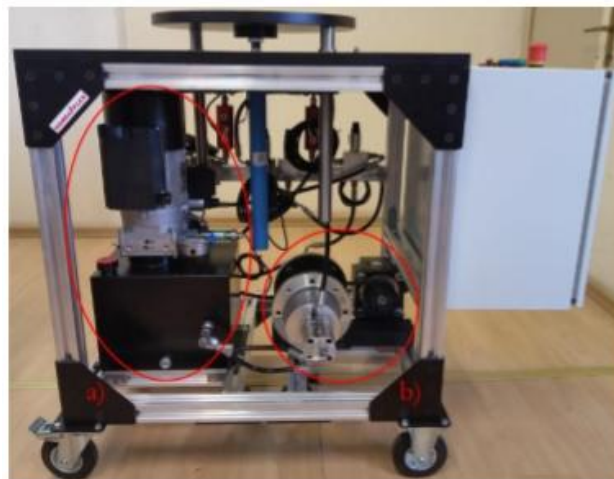


**Slika 22 Shema DDEH sustava**

a) dvoradni cilindar, b) linearni senzor pozicije, c) senzor tlaka, d) hidraulička pumpa, e) inkrementalni enkoder, f) elektromotor, g) hidraulički akumulator, h) senzor tlaka, i) hidraulička pumpa, j) strujna i naponska sonda, k) frekvencijski pretvarač, l) hidraulički akumulator, m) senzor tlaka

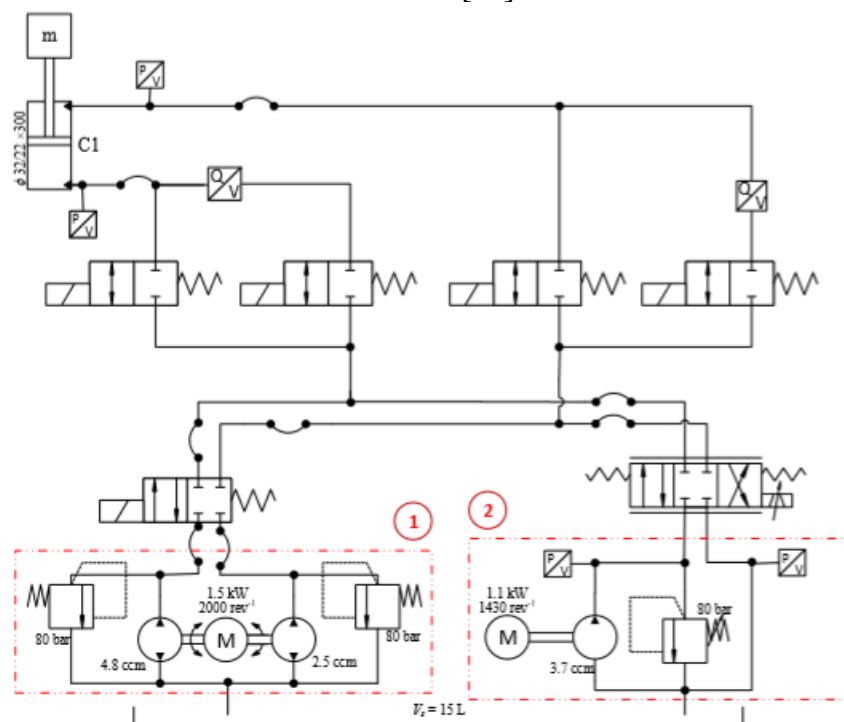
### 3.3. Opis eksperimentalnog postava

Eksperimentalni postav sastoji se od 2 zasebna sustava, DDEH sustava i proporcionalnog hidrauličkog sustava.



Slika 23 Eksperimentalni postav: a) proporcionalni hidraulički sustav, b) DDEH sustav

Slika 23 prikazuje eksperimentalni postav na kojem su vršena testiranja, a Slika 24 shemu tog sustava. [11]



Slika 24 Shema eksperimentalnog postava: 1) DDEH, 2) Proporcionalni hidraulički sustav

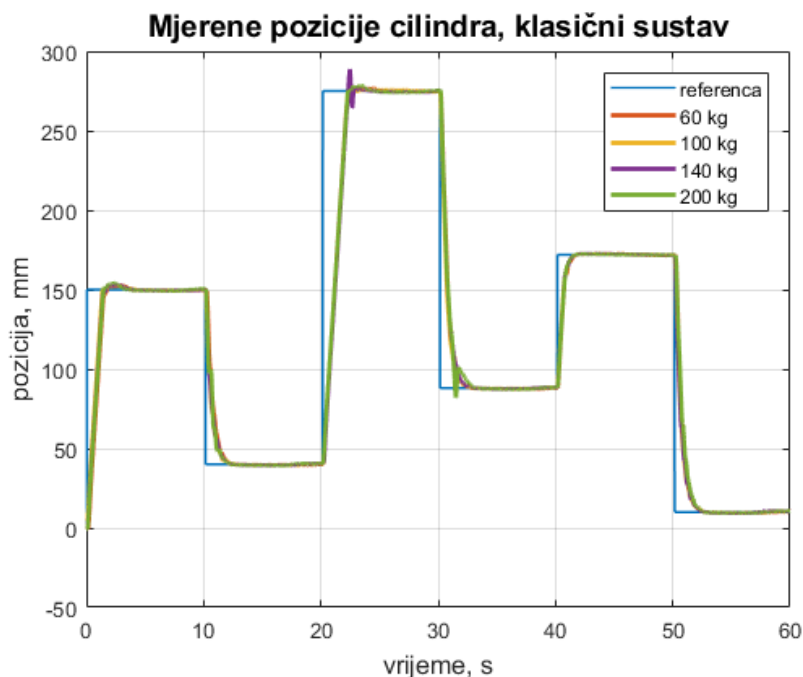
Ako se koristi DDEH sustav za testiranje, tada se razvodnik 4/2 pomiče u položaj 1 i fluid struji do razvodnika 2/2. Ako se teret podiže, fluid struji prema lijevim 2/2 razvodnicima, a ako se teret spušta tada fluid struji prema desnim razvodnicima. Dva razvodnika su paralelno spojena, ovisno o tome želimo li da fluid struji kroz senzor protoka ili ne. Prije ulaska komoru cilindra, fluid prolazi kroz senzor tlaka kako bi se tlakovi očitali direktno sa senzora. Proporcionalni sustav radi na istom principu, samo što fluid prvo mora proći kroz proporcionalni razvodnik kod kojeg će se odrediti smjer strujanja i izns protoka fluida [11].

### 3.4. Rezultati testiranja

Izvršena su 4 testiranja na svakom sustavu, a svakim testiranjem povećavana je masa tereta kako bi se razmotrilo ponašanje sustava za različita opterećenja. Opterećenja su redom bila 60kg, 100kg, 140kg i 200kg. Grafovi za dobivene rezultate mjerenja izrađeni su pomoću programskog paketa Matlab R2017b.

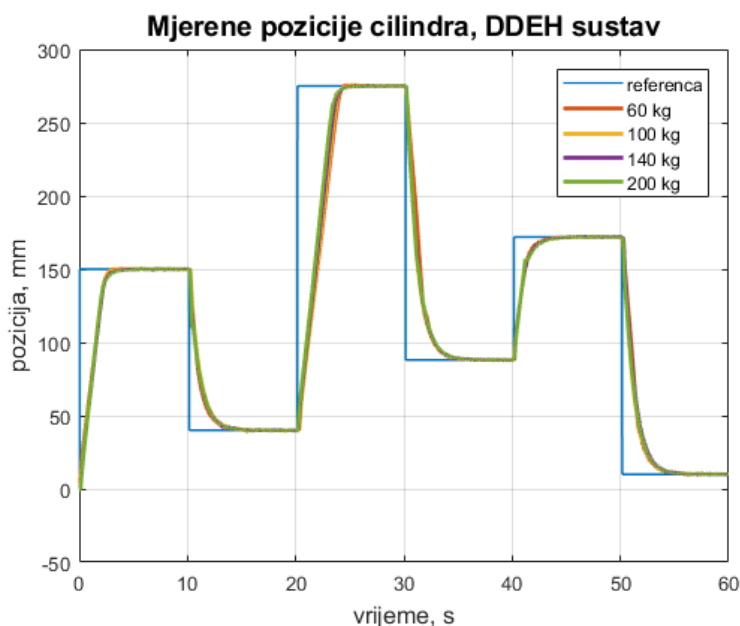
#### 3.4.1. Pozicija klipa

Referentna pozicija sustava zadana je pomoću kombinacije step signala, a trenutna pozicija klipa cilindra mjerena je pomoću linearnog senzora pozicije.



Slika 25 Odzivi proporcionalnog hidrauličkog sustava za različita opterećenja

Tokom spuštanja tereta može se dogoditi prebačaj, jer tad, osim mase tereta, djeluje i sila fluida u gornjoj komori cilindra.



**Slika 26 Odzivi DDEH sustava za različite mase tereta**

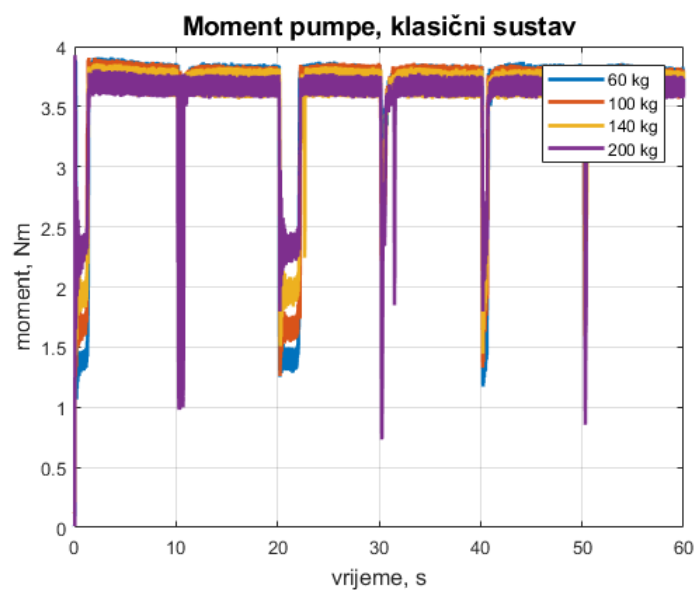
DDEH sustav tokom spuštanja tereta nije napravio prebačaj, ali se može uočiti nešto sporiji odziv u odnosu na proporcionalni hidraulički sustav.

### 3.4.2. Moment pumpe proporcionalnog sustava

Kako bi se izračunao moment pumpe proporcionalnog hidrauličkog sustava, korišten je izraz:

$$T_{prop} = \Delta p_p \cdot \frac{V_0}{2\pi}, \quad (2)$$

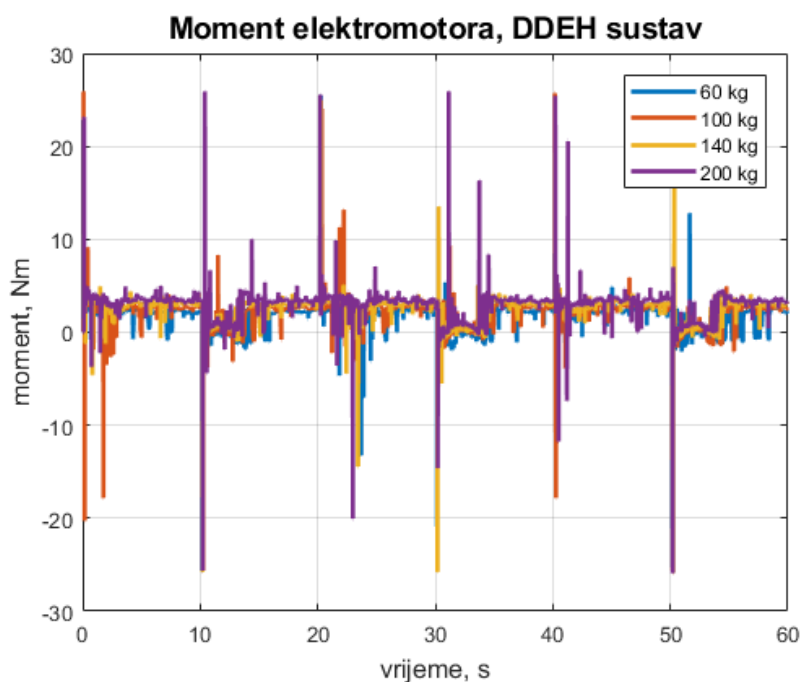
gdje je  $T_{prop}$  moment hidrauličke pumpe,  $\Delta p_p$  radni tlak (tlak napajanja) i  $V_0$  radni volumen pumpe. Slika 27 prikazuje moment hidrauličke pumpe tokom pokusa. Kada sustav miruje iznos momenta je veći, jer tada pumpa mora savladati tlak od 65 bara (vrijednost namještena na regulatoru tlaka), a kada se klip cilindra giba, iznos momenta je manji, jer tada svladava tlak tereta koji ne prelazi 50 bara. Za veće terete veći su i tlakovi koje pumpa svladava, pa se zbog toga moment tijekom gibanja povećava kako raste iznos tereta.



Slika 27 Moment hidrauličke pumpe proporcionalnog sustava

### 3.4.3. Moment elektromotora DDEH sustava

Momentna karakteristika elektromotora DDEH sustava prikazana je na Slika 28. Primjećuje se kako tokom gibanja klipa cilindra moment naglo poraste radi bržeg odziva, a tokom mirovanja ima iznos potreban za držanje tereta na istoj visini. Moment držanja raste povećanjem tereta. Momenti za DDEH sustav direktno su očitani s kontrolera elektromotora, podaci su bili u postotku nazivnog momenta pa ih je bilo potrebno podijeliti sa 100 i pomnožiti s nazivnim momentom elektromotora koji iznosi 7,16 Nm.



Slika 28 Moment elektromotora DDEH sustava

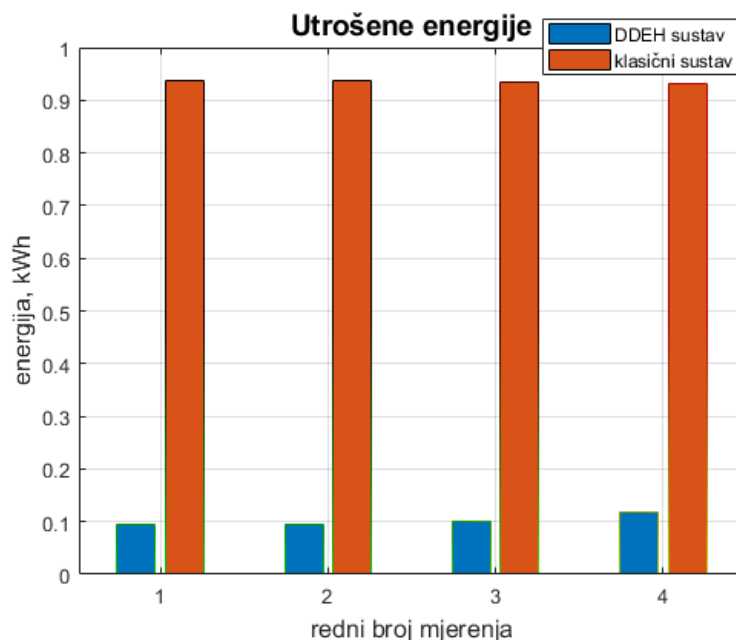


### 3.4.4. Potrošnja energije oba sustava

Integriranjem snage sustava dobije se potrošena energija. Za računanje snage proporcionalnog hidrauličkog sustava korišten je izraz:

$$P_{prop} = \frac{\Delta p_p \cdot V_0 \cdot n}{\eta_p \cdot \eta_{EM}} \quad (3)$$

gdje je  $P_{prop}$  snaga pumpe,  $n$  broj okretaja pumpe,  $\eta_p$  i  $\eta_{EM}$  faktori korisnosti pumpe i elektromotora koji pogoni hidrauličku pumpu. Broj okretaja pumpe iznosi 1430 o/min,  $\eta_{EM}$  iznosi 0,67 prema podacima dobivenima od proizvođača,  $\eta_p$  nije zapisan u dokumentaciji pumpe, stoga je podatak očitana iz dokumentacije pumpe sličnih karakteristika i iznosi 0,85. Snaga DDEH sustava direktno je očitana s kontrolera elektromotora (snaga je bila izražena u vatima pa su vrijednosti podijeljene s 1000 da se dobiju kilovati).



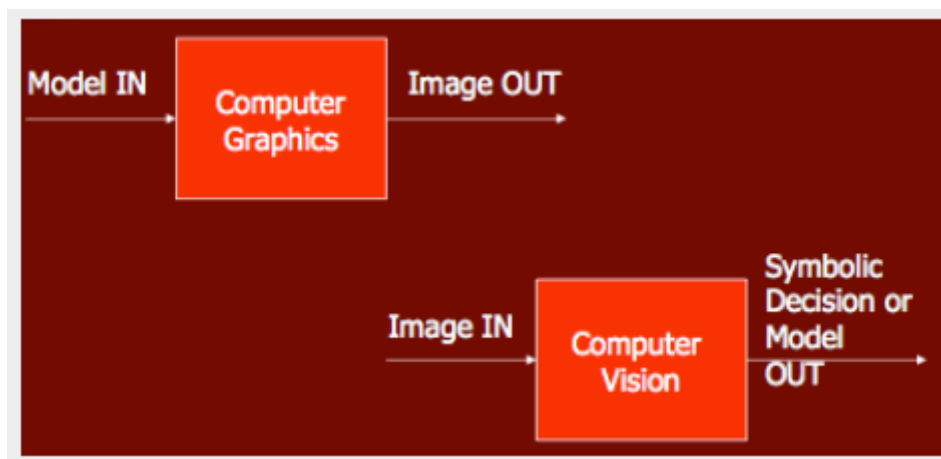
**Slika 29** Usporedba potrošnje energije hidrauličkih sustava

Opterećenje je mijenjano kako je ranije spomenuto (prvo mjerenje 60 kg, drugo 100 kg, treće 140 kg i četvrto 200 kg), a pokus sa svakim opterećenjem trajao je 60 s. Potrošnja energije DDEH sustava gotovo je 10 puta manja, a takvi rezultati mogli su se zaključiti i prema iznosima momenta za oba sustava. Razlog je u činjenici što se kod mirovanja moment DDEH sustava smanjivao gotovo na nulu, a kod proporcionalnog hidrauličkog sustava imao je stalan iznos.

## 4. SORTIRANJE PROIZVODA PRIMJENOM VIZIJSKOG SUSTAVA

### 4.1. Vizijski sustav

Kao što ljudsko oko i mozak funkcioniraju i čovjeku stvaraju percepciju okoline, tako i vizijski sustav međusobnim radom kamere i računala daje sustavu podatke o okolini. Zadaća vizijskog sustava je da omogući percepciju okoline. Jer primjerice, krivim definiranjem okoline u možda samo par milimetara može dovesti do havarije i oštećenja robota ili sličnog sustava prilikom zabijanja u neku prepreku koja nije dobro definirana.

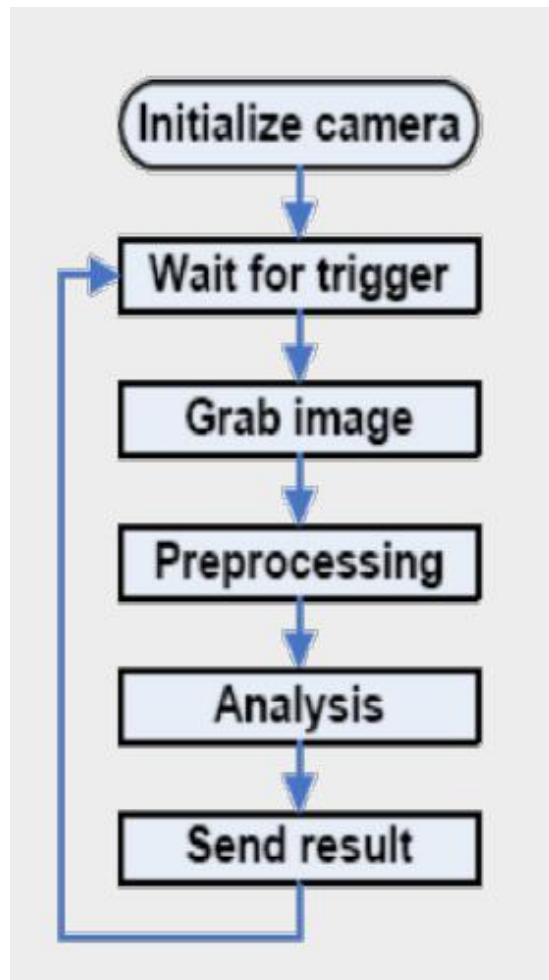


**Slika 30 Princip obrade slike**

Kroz godine rada i istraživanja na ovome dijelu industrije, vizijski sustavi su napredovali i njihova primjena je svakim danom sve šira. Koriste se u strojarstvu, prometu, trgovini, medicini, sigurnosnim sustavima.

Rad vizijskog sustava se zasniva na kameri koja prikuplja informacije o okolini. Prikupljeni podatci se šalju procesoru koji ih obrađuje i nakon toga šalje rezultate te izvršava određene operacije koje su uvjetovane detekcijom. [12]

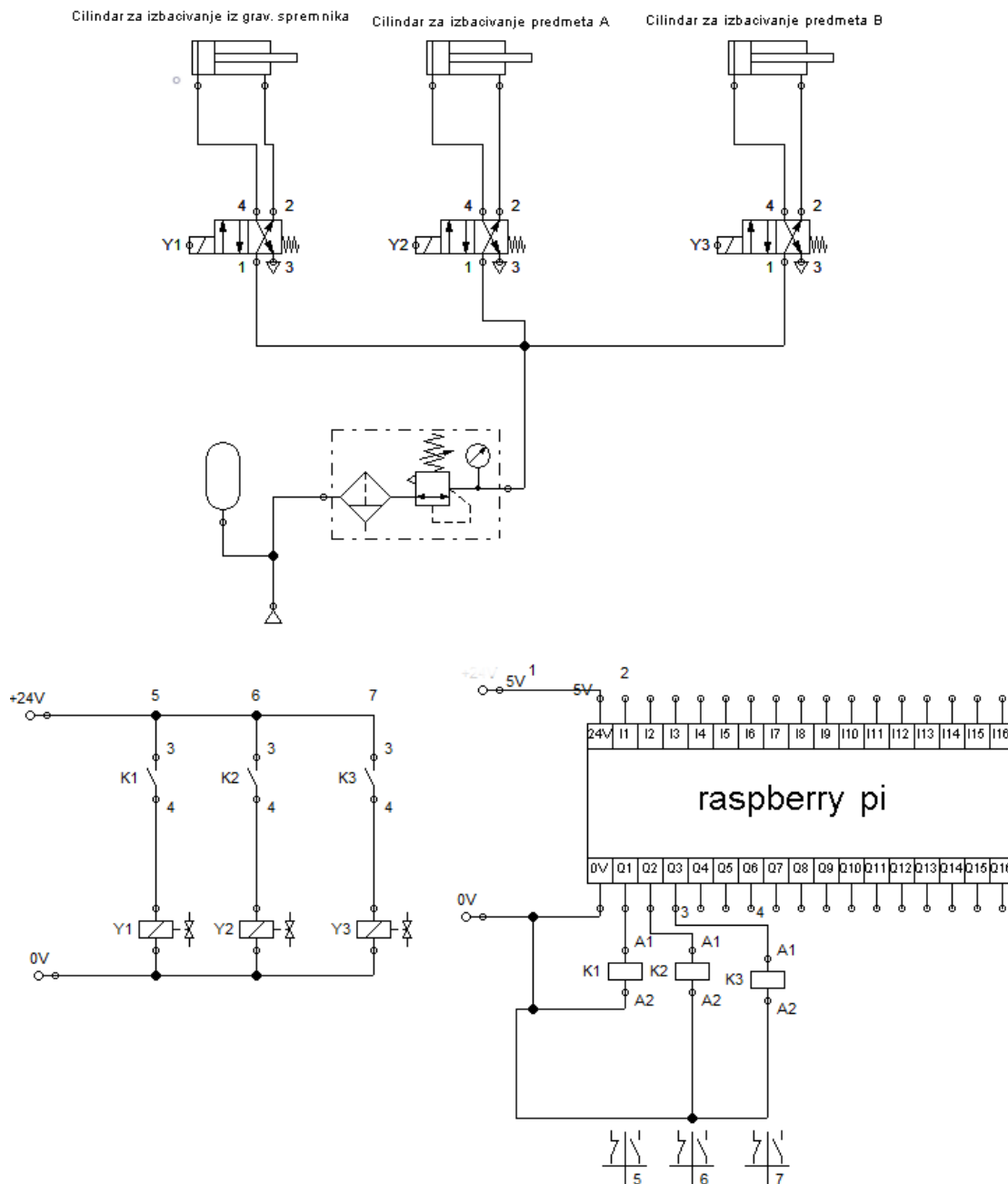
U ovom radu kamera konkretno očitava crtični 2D kod (*engl. barcode*). Očitanjem crtičnog koda podatci se šalju na upravljačku jedinicu koja je u ovom slučaju Raspberry Pi2 modul. Vrsta kamere i upravljačkog uređaja bit će kasnije detaljnije objašnjeni.



**Slika 31 Princip rada vizijskog sustava**

Označavanje proizvoda putem crtičnog koda je univerzalan način koji je standardiziran svugdje u svijetu i ima široku primjenu. U ovom sustavu se to pokazalo kao najbolje rješenje, jer kamera može očitati svaku vrstu crtičnog koda, a samim time se mogu i sortirati razne vrste proizvoda. Takav način rada omogućuje široku primjenu ovakvog uređaja za sortiranje. Jedini uvjet takvog sortiranja je da crtični kod mora biti okrenut prema kameri, jer u suprotnom kamera ne može očitati kod i ne može se izvršiti sortiranje, ali taj se problem mora riješiti prije dolaska proizvoda do vizijskog sustava.

## 4.2. Projektiranje uređaja



Slika 32 Upravljačka shema uređaja

Na prethodnoj slici se vidi da se u sustavu nalaze tri cilindra, tri razvodnika i tri releja čiji kontakti pokreću kotve elektropneumatskih monostabilnih razvodnika. Koriste se monostabilni razvodnici zato što je potrebno samo izbacivanje komada sa pokretne trake. Potrebno je da se cilindar nakon izbacivanja proizvoda s trake automatski vrati u početni položaj. Prvi cilindar služi za izbacivanje predmeta iz gravitacijskog spremnika na pokretnu traku. Druga dva cilindra su dimenzijski veća od prvog i oni služe za izbacivanje određene

vrste proizvoda sa trake u za to predviđen prostor. Ovaj uređaj može sortirati tri vrste proizvoda. Svaki od prethodno navedena dva cilindra izbacuje jednu vrstu proizvoda, a treća vrsta samo prolazi dužinom cijele trake i dolaskom na kraj pada u za to predviđeni prostor, pri čemu niti jedan od ova dva cilindra se ne aktivira.

Treba napomenuti da je uređaj projektiran da se pokaže princip rada vizijskog sustava u zadacima sortiranja različitih proizvoda. Naravno, većim brojem cilindara i dužinom trake može se projektirati sustav koji će sortirati puno više vrsta proizvoda.

Pneumatske komponente koje se koriste u sustavu su:

Cilindar SMC-CD85F25-160-B, a to su zapravo dva veća cilindra koji služe za izbacivanje proizvoda sa trake kao što je prethodno opisano. Cilindri su dvoradni i imaju hod 160 mm.

[13]



**Slika 33 Cilindar SMC-CD85F25-160-B**

Cilindar SMC-CJ2B10-60 je cilindar koji služi za izbacivanje proizvoda iz gravitacijskog spremnika na pokretnu traku. Također je dvoradni cilindar s hodom od 60 mm. [13]



**Slika 34 Cilindar CJ2B10-60**

Elektromagnetski razvodnik SMC-VQD1121 je monostabilni 4/2 razvodnik koji se aktivira relejno. U ventilskom bloku se nalaze tri ovakva razvodnika. Svaki služi za aktiviranje jednog cilindra.



**Slika 35 SMC VQD1121 razvodnik**

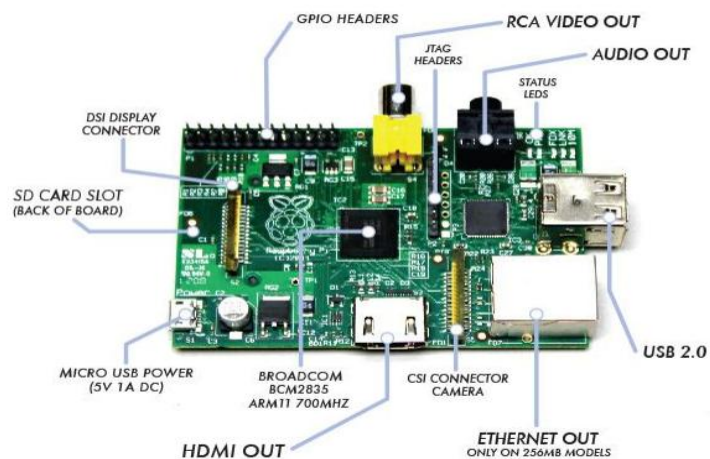
Regulator tlaka SMC-AR20-F02H-N je komponenta koja se nalazi na ulazu zraka u sustav čime se određuje tlak zraka u sustavu. Tlakovi na kojima radi ovaj sustav su između 2 i 4 bara.



**Slika 36 Regulator tlaka AR20-F02H-N**

Raspberry Pi je najbitnija komponenta cijelog sustava. To je svestrano računalo u obliku matične pločice na kojoj se nalaze svi potrebni moduli preko kojih će se povezati upravljački dio sa izvršnim dijelom sustava. Konkretno, upravljački dio je Raspberry Pi, a izvršni dio su cilindri koji se upravljaju dovođenjem upravljačkih signala.

U ovom uređaju se koristi Raspberry Pi druge generacije. Proizveden je 2015. godine kao poboljšanje prve generacije koja je bila namijenjena kao edukacijska oprema za školstvo i sl., ali svojom jednostavnošću i velikim mogućnostima ovakav način upravljanja sustavima je doživio i doživljava sve češću primjenu u svim granama industrije. Treba navesti i da je cijena pristupačna svima [14].



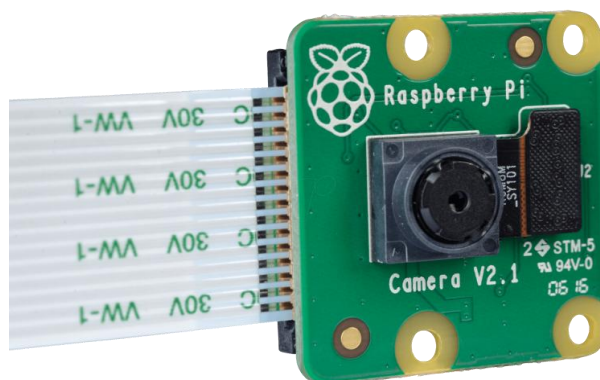
**Slika 37** Struktura upravljačke jedinice Raspberry Pi 2

Za programiranje upravljačke jedinice koristi se Python. To je integrirani programski jezik operativnog sustava Raspbian kojeg Raspberry Pi koristi.

Kamera koja se koristi na ovome postavu je istog proizvođača kao i upravljačka jedinica. Nabavljena je iz razloga međusobne kompatibilnosti i veće brzine očitavanja kritičnog koda što je presudno u procesu sortiranja proizvoda.

Kamera ima 8 megapiksela i mogući modovi su 1080p30, 720p60 i VGA90.

Također, matična ploča upravljačke jedinice sadrži originalni priključak za ovu kameru. Instalacijom osnovnih modula u terminal software-u i priključivanjem kamere na matičnu ploču, kamera kreće sa svojim radom. To je jako jednostavno i brzo. Moduli koje je potrebno instalirati su SimpleCV i Zbar.



**Slika 38** Kamera Raspberry Pi V2.1

### 4.3. Pokretna traka

Pokretna traka služi za dopremanje proizvoda sa jednog kraja pogona na drugi. Konkretno, u ovom radu su razvijena rješenja za sortiranje proizvoda na završnoj traci u pogonu. Na završnu traku u pogonu masovne proizvodnje sa drugih traka ili stanica proizvodnje dolaze sve vrste proizvoda koje taj pogon proizvodi. Na traci su zaposlene osobe koje sortiraju različite proizvode. Primjenom ovakvog sustava koji je tema ovoga rada ljudski faktor bi bio isključen iz procesa sortiranja. Problem kod ručnog sortiranja je što postoji potreba za zapošljavanjem više ljudi, a također dolazi do umora i potrebe za odmorom. Ovaj uređaj radi konstantno istom brzinom (sortira isti broj proizvoda u jedinici vremena) te se traka nikad ne zaustavlja.

Za potrebu ispitivanja ove metode sortiranja, izrađena je pokretna traka na kojoj je testiran sustav. Traka se nalazi na OSB drvenoj ploči po kojoj su smještene ostale komponente sustava.

Konstrukcija same trake je izrađena od aluminijskog profila kvadratnog presjeka 50x50mm. Rezanjem tog profila na dva jednaka dijela dobiju se dva glavna stupa između kojih se uležište osovina. Preko osovina je navučen remen koji se sam zateže preko lima koji se nalazi između dva glavna stupa. Na jednom od stupova se nalazi tzv. L stup na kojem su smještene kamera, upravljačka jedinica i releji.

Na početku trake je napravljen gravitacijski spremnik. To je u principu limena kutija sa otvorom na vrhu u koji se slažu proizvodi. Na dnu spremnika se nalazi rupa veličine proizvoda kroz koju će cilindar izbaciti proizvod na pokretnu traku.

Druga dva cilindra su pričvršćena za traku i za postolje tako da budu udaljeni približno jednako jedan od drugoga.

Postupak izrade sustava za sortiranje proizvoda primjenom vizijskog sustava prikazan je na sljedećim slikama:





**Slika 39 Prva faza izrade sustava za sortiranje**

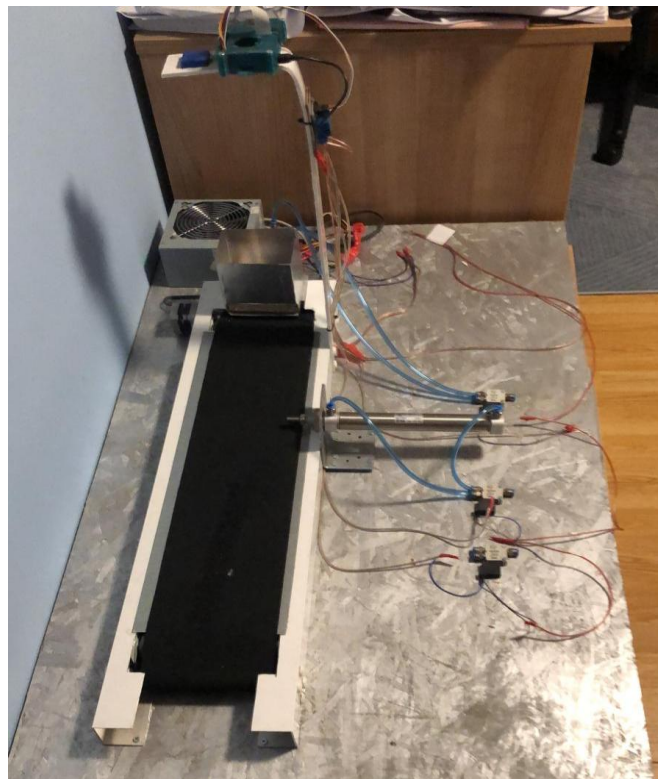


**Slika 40 Izrada pokretne trake**

U ovoj fazi se vidi kako se lijepio lim na glavna dva stupa pokretne trake. Lim služi da se, preko njega remen dodatno zateže prilikom rada pokretne trake.



**Slika 41** Postavljanje remena pokretne trake



**Slika 42** Eksperimentalni postav za sortiranje proizvoda primjenom vizijskog sustava

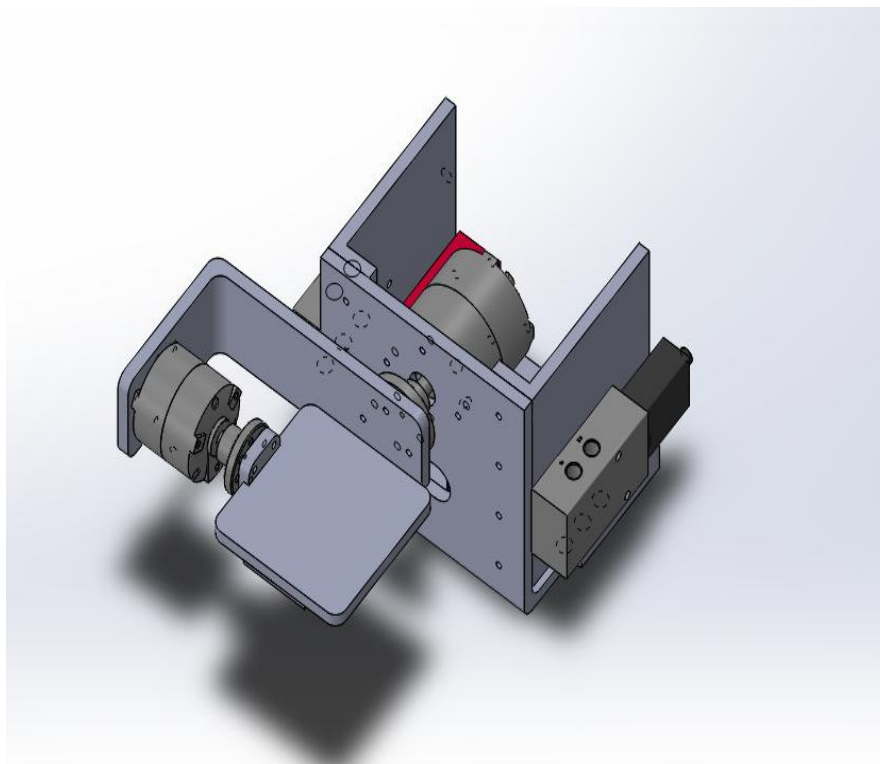
Sustav je ispitan i uredno funkcionira, aktiviranje cilindara je namješteno tako da se prvi cilindar aktivira 4 sekunde nakon detekcije crtičnog koda, drugi cilindar se aktivira nakon 8 sekundi, a ukoliko je riječ o trećoj vrsti proizvoda onda sustav miruje 12 sekundi do sljedećeg izbacivanja proizvoda iz gravitacijskog spremnika i započinjanja novog ciklusa sortiranja.

## 5. UPRAVLJANJE PLATFORMOM S DVA STUPNJA SLOBODE POMOĆU PNEUMATSKIH AKTUATORA

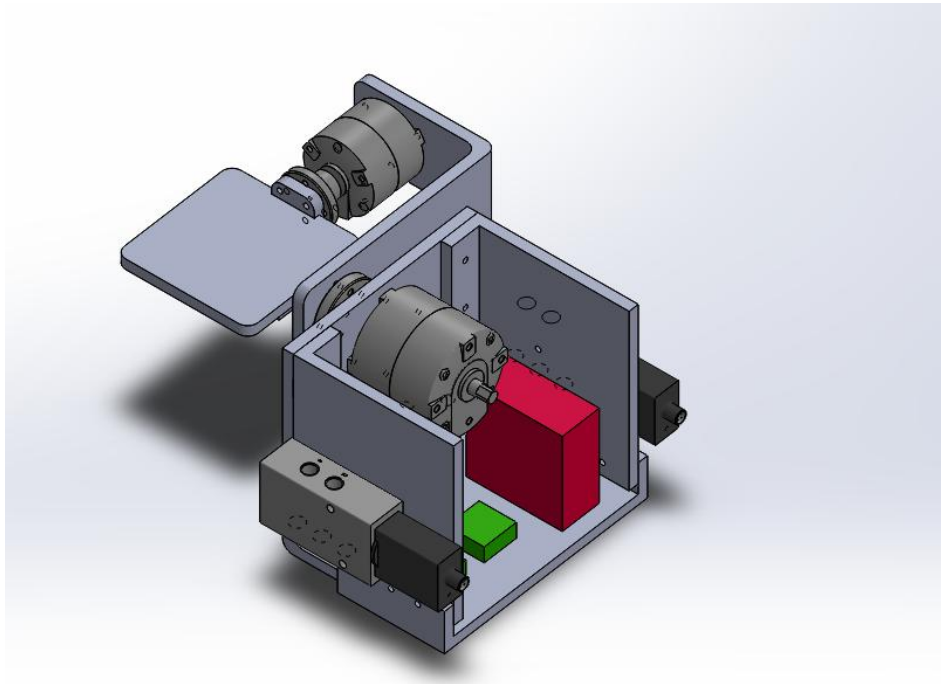
### 5.1. Primjena koncepta u tehničkoj praksi

Upravljanje platformom s dva stupnja slobode gibanja se općenito u praktičnim izvedbama ostvaruje električnim aktuatorima kod primjena manjih potrebnih sila, dok se kod većih sila primjenjuju hidraulički aktuatori. Korištenje pneumatskog manipulatora unosi dodatne nelinearnosti pri ostvarivanju zadatka upravljanja ovakvih sustava. Nelinearnost je uzrokovana prvenstveno time što je zrak, kao medij prenošenja energije, stlačiv zbog čega se odziv u sustavu ostvaruje sa znatnim kašnjenjem. Za razliku od zraka hidraulički i električni aktuatori imaju brže vrijeme reakcije i djeluju gotovo trenutačno. Neka od glavnih područja primjene u tehničkoj praksi koje bi se mogle svesti na pojednostavljeni mehanički model upravljanja platforme sa dva stupnja slobode gibanja su npr. ručni stabilizatori kamera, stabilizacija raketa u zraku prema zadanom cilju, stabilizacija topovske cijevi na tenkovima i ostalim vozilima pri vožnji kako bi se omogućilo uništavanje meta dok se samo vozilo kreće.

### 5.2. Projektiranje sustava



Slika 43 CAD model platforme s dva stupnja slobode gibanja



**Slika 44 CAD model sustava, drugi pogled**

Cilj ovog sustava je ostvarivanje stabilnog položaja platforme (horizontalnog položaja) unatoč unošenja vanjskih poremećaja kao što je pomicanje cijelog sustava u prostoru ili točnije pomicanje u smislu posrtanja i valjanja. Da bi željeni sustav bio upravljiv pomoću pneumatskih aktuatora potrebno je imati odgovarajuće upravljačke elemente. Za svrhu upravljanja gibanjem pneumatskih motora upotrijebljena su dva proporcionalna razvodnika tvrtke FESTO model MPYE-5-1/8. Proporcionalni razvodnik je upravljan preko D/A pretvornika pomoću mikroracunala tipa Arduino UNO. Mjerni element koji se koristi u povratnoj vezi je akcelerometar i žiroskop MPU 6050. Konstrukcija je izrađena od pleksiglasa pretežito debljine 10 mm te izgleda dosta jednostavno i praktično za rukovanje. Najveći izazov za funkcioniranje ovog sustava je integriranje programskog, konstrukcijskog i aktuatorskog dijela u jednu funkcionalnu regulacijsku cjelinu koja predstavlja pravi mehatronički sustav, prema izvornoj definiciji pojma mehatronika.

### **5.3. Pneumatski aktuator**

Za ovaj sustav su odabrani pneumatski aktuatori sa kutnim zakretom od  $0^\circ$  do  $270^\circ$  model DRVS. Razlog odabira aktuatora sa ograničenim hodom je pretpostavka u početnoj analizi rada komponenti sustava da se u realnim okolnostima sustav nikad neće zakretati u većim razmjerima. Manji motor modela DRVS-25-270-P je odabran kako bi veći motor (DRVS-32-

270-P) koji preuzima opterećenje za zakretanje platforme i manjeg motora bio manje opterećen. Aktuatori su različitih dimenzija ali funkcionalno isti. [15]



Slika 45 Pneumatski aktuator DRVS

Tablica 1 Osnovne karakteristike DRVS-32-270-P (u zagradi veličine za DRVS-25-270-P)

Veličina	32	(25)
Kut zakreta	0 do 270°	(isto)
Radni tlak	2 do 8 bar	(isto)
Radna temperatura	0 do 60°C	(isto)
Dopuštena aksijalna sila	75N	(40N)
Dopuštena radijalna sila	200N	(60N)
Teoretski moment pri 6 bar	10Nm	(5 Nm)
Masa	0,896 Kg	(0,486 Kg)

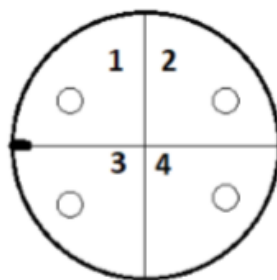
#### 5.4. Proporcionalni razvodnik

Upravljanje platforme s dva stupnja slobode gibanja korištenjem klasičnih uključno/isključnih ventila bi bio izuzetno zahtjevan zadatak. Za ovaj sustav je potreban upravljački element koji će omogućiti finu regulaciju medija za pokretanje aktuatora odnosno dovoda zraka. Proporcionalni ventil, kako i njegovo samo ime govori, omogućuje fino kontroliranje dovoda i odvoda zraka proporcionalno ulaznom signalu. Sam proporcionalni razvodnik je vrlo kompleksne izvedbe zbog tolerancija koje su potrebne za njegov ispravan rad, što ga čini ključnim i najskupljim dijelom sustava.



**Slika 46** Proporcionalni pneumatski razvodnik MPYE-5-1/8

Za izvedbu sustava su potrebna dva proporcionalna ventila MPYE-5-1/8, po jedan ventil za svaku os upravljanja pneumatskim motorom. Sam ventil na sebi ima priključak s četiri pina prikazan na slici 47. Pin 1 i 2 služe za napajanje, a 3 i 4 služe za upravljački signal proporcionalnog ventila. Iznos od 0 V na upravljačkom pinu predstavlja krajnji lijevi položaj, a 10 V predstavlja krajnji desni položaj. Iznos od 5V predstavlja srednji (neutralni) položaj razvodnog klipa ventila [16].



**Slika 47** Prikaz pinova na razvodniku

**Tablica 2** Osnovne karakteristike MYPE proporcionalnog razvodnika

Ulazni napon	17-30V
Maksimalan tlak	10 bar
Temperatura kućišta	-20 do 60 °C
Temperatura okoliša	0 do 50°C
Ulazni napon	0-10V
Izlazna struja	4-20 mA
Standardni nominalni protok	350 l/min
Masa	0,285 Kg

### 5.5. Akcelerometar/ žiroskop MPU-6050

Kao mjerni element ovog sustava se koristi žiroskop i akcelerometar MPU6050. To je integriran krug koji koristi MEMS (*engl. micro electromechanical system tehnologiju*). Ovaj mjerni element ima 6 mjernih stupnjeva slobode, tri stupnja za akcelerometar i tri stupnja za žiroskop. Akcelerometar mjeri ubrzanje sile teže te se pomoću pretvornih funkcija može izračunati pomak kuta oko pojedine osi. Žiroskop pomoću Coriolisove sile mjeri kutnu brzinu oko pojedine osi MPU 6050. Žiroskop i akcelerometar sami po sebi nisu adekvatni za ovaj sustav, žiroskop ima stalno odstupanje u signalu, a akcelerometar je nestabilan pri brzim promjenama položaja, pa se javlja šum u signalu. Taj problem rješavamo implementacijom komplementarnog filtra koji objedinjuje najbolja svojstva akcelerometra i najbolja svojstva žiroskopa u mjerni signal koji se može dalje koristiti [17].



Slika 48 Akcelerometar/žiroskop MPU-6050

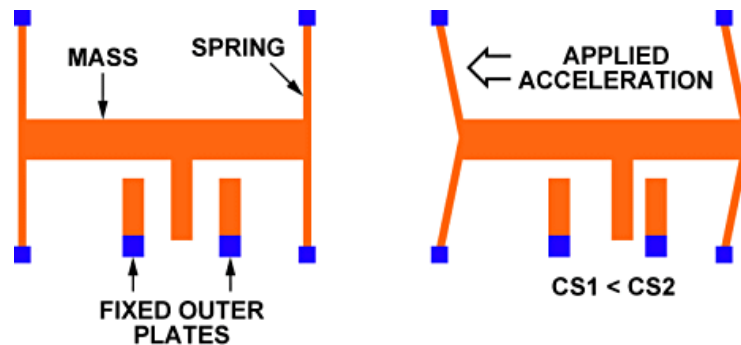
Tablica 3 Osnovne karakteristike senzora MPU-6050

Napon	3 do 5V
Komunikacija	I2C
AD konverter	16 bitova
Raspon žiroskopa	250/500/1000/2000 °/s
Raspon akceleracije	±2/4/8/16 g
Veličina	21x15x1,2 mm

### 5.6. Princip rada MEMS akcelerometra

MEMS akcelerometar radi na principu promjene kapaciteta koji se često primjenjuje u mjernim sustavima. MEMS akcelerometar se sastoji od najmanje dvije komponente, stacionarne i pomične. Stacionarna komponenta je pričvršćena za kućište, a pomična ima na sebi ovješenu masu i slobodno se giba unutar kućišta. Ovisno o veličini ubrzanja koje se javlja

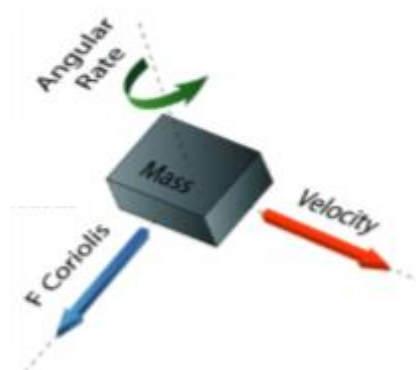
uslijed pomicanja MEMS mjernog elementa, masa se više ili manje otkloni od kućišta i time mijenja iznos kapaciteta prema kojem se određuje ubrzanje [18].



Slika 49 Shema MEMS akcelerometra

### 5.7. Princip rada MEMS žiroskopa

MEMS žiroskop mjeri kutnu brzinu na principu Coriolisovog efekta. Rotiranjem mase oko osi nekom brzinom, kao što je prikazano zelenom strelicom na sljedećoj slici pojavit će se sila koja uzrokuje pomicanje mase, a time se slično kao i kod akcelerometra mijenja iznos kapaciteta. Nakon mjerenja i obrade tog signala koja se obavljaju u samom sklopu MPU6050 dobiva se kutna brzina oko pojedine osi [19].



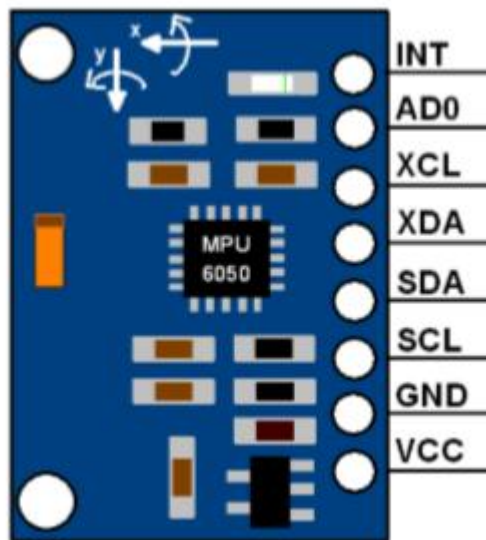
Slika 50 Coriolisova sila na masi [20]

### 5.8. Povezivanje mikrokontrolera sa MPU6050

Na PCB pločici su jasno napisane oznake pinova koje treba povezati sa mikrokontrolerom. MPU 6050 akcelerometar/žiroskop je sam po sebi podređeni uređaj (*engl. slave*), odnosno ne može nezavisna djelovati već se mora njime upravljati izvana pomoću mikrokontrolera. Po potrebi se može na njegove pinove XDA i XCL spojiti još jedan „slave“ uređaj i na taj način se mogu preko istih veza prenositi podaci od više perifernih sklopova. Pin Vcc se spaja na 3,3



V, GND na uzemljenje , SCL na istoimeni pin mikrokontrolera koji je zadužen za takt rada, SDA služi za prijenos podataka. Pin INT odnosno interupt koristi se kada procesor radi sa više „slave“ uređaja kako ne bi konstantno morao biti opterećen podacima već po potrebi pošalje signal na INT pin i nakon toga dobiva natrag željene podatke. Na slici 51 se jasno mogu vidjeti prethodno objašnjeni pinovi [20].



Slika 51 Senzor MPU-6050 sa pinovima

## 6. REGULACIJA POLOŽAJA HIDRAULIČKOG CILINDRA PRIMJENOM LOGIČKIH VENTILA

Ugradbeni ili logički ventili (*engl. logic valves, cartridge valves*) vrsta su hidrauličkih ventila koja omogućuje dobivanje različitih funkcija u hidrauličkim krugovima. U svojoj primjeni, hidraulički krugovi često moraju biti kompaktni odnosno zauzimati manji volumen zbog skučenosti prostora u kojima se ugrađuju. Pri projektiranju hidrauličkih sustava također se treba voditi računa o propuštanjima fluida. Korištenjem logičkih ventila moguće je postići manja propuštanja (curenje) fluida, a vremena prebacivanja su kratka. U radnom vijeku hidrauličkih sustava dolazi do povećanja nečistoća u fluidu, ali to predstavlja manji problem za sustave kod kojih se koriste ugradbeni ventili sa sjedištem, jer su oni manje osjetljivi na nečistoće. Ugradbeni ili logički ventile lako i brzo se ugrađuju u aluminijske blokove što hidrauličkim sustavima daje bolji izgled. Prednost sustava u kojima se koriste logički ventili očituje se i u ekonomičnosti koja je veća nego kod klasičnih hidrauličkih sustava [21].

Ugradbeni ventili, zbog prethodno opisanih karakteristika, često su dio sustava za držanje tereta u kombinaciji sa dvoradnim cilindrima, gdje se ugrađuju pojedinačno u kućišta uvrtnjem, a moguća je i izvedba uvrtnjem ugradbenih ventila u paru u standardna kućišta.

Primjena ugradbenih ventila česta je u mobilnim strojevima gdje su ugradbeni ventili sastavni dio krugova radne hidraulike. Budući da pri procesu projektiranja strojeva često postoji zahtjev za kompaktnošću hidrauličkih sustava, česte su izvedbe HIC (*engl. Hydraulic integrated circuit*) blokova [22], gdje se korištenjem različitih podvrsta ugradbenih ventila poput razvodnih ventila, ventila za regulaciju tlaka, protoka, ventila za držanje tereta, slijednih ventila postižu složeni HIC blokovi koji omogućuju pogon i više od deset aktuatora.

### 6.1. Proces projektiranja eksperimentalnog postava

U sustavu za pozicioniranje hidrauličkog cilindra izvedenom korištenjem ugradbenih 2/2 ventila ugrađen je hidraulički cilindar 40/22x300 mm sljedećih karakteristika:

- promjer klipa:  $D=40$  mm
- promjer klipnjače:  $d=22$  mm
- hod cilindra:  $l=300$  mm

Kao dio pogonskog dijela sustava korišten je četverpolni monofazni električni motor s B14 pribudnicom s mogućnošću montaže na Hydronit centralni blok. Karakteristike korištenog motora su:

- snaga:  $P=1,5$  kW
- brzina vrtnje:  $n=1410$  min<sup>-1</sup> [23]

Pomak i brzina klipnjače cilindra koji se postižu upravljanjem ventila mjere se pomoću inkrementalnog enkodera s 600 impulsa po okretaju. Zupčastim remenom se postiže okretanje osovine enkodera. Zupčaste remenice imaju broj zubi  $z=30$ , a korak remena je  $T=2,5$  mm iz čega slijedi da jedan okretaj remenice odgovara pomaku od 75 mm. Iz navedenih podataka može se izračunati razlučivost koja iznosi 0,125 milimetara po impulsu, tj. jednom milimetru odgovara 8 impulsa.

Obzirom da odabrani cilindar ima hod od 300 mm s tim podatkom se ulazi u daljni proračun sustava. Proračun se nastavlja uvođenjem pretpostavke o vremenu potrebnom da cilindar napravi hod od 300 mm. Pretpostavlja se da je za izvođenje hoda od 300 milimetara potrebno 2 sekunde. Iz navedene pretpostavke slijedi da maksimalna brzina iznosi 0,15 m/s.

Kako bismo izračunali potrebni protok za maksimalnu brzinu moramo izračunati površine obje strane klipa. U tu svrhu se lijeva strana klipa označava slovom A, a desna strana slovom B.

Uzimajući u obzir da promjer klipa  $D$  iznosi 40 mm, a promjer klipnjače  $d$  iznosi 22 mm, površine na strani A, odnosno B,  $A_A$  i  $A_B$  iznose:

$$A_A = \frac{D^2\pi}{4} = \frac{0,04^2\pi}{4} = 0,001257 \text{ m}^2 = 12,567 \text{ cm}^2, \quad (4)$$

$$A_B = \frac{D^2\pi}{4} - \frac{d^2\pi}{4} = \frac{0,04^2\pi}{4} - \frac{0,022^2\pi}{4} = 0,0008765 \text{ m}^2 = 8,765 \text{ cm}^2. \quad (5)$$

Za isti protok na strani A i B veća će brzina biti na strani B, jer vrijedi da je  $A_B < A_A$ . Slijedi da je  $v_B = 0,15$  m/s te potreban protok za ovu brzinu iznosi

$$Q_{max} = v_{Bmax} A_B = 131,48 \text{ cm}^3/\text{s}. \quad (6)$$

Izračunati protok treba dobiti pumpa koja ima broj okretaja  $n_M = 1410$  min<sup>-1</sup>.

Količina dobave pumpe dobije se prema sljedećem izrazu:

$$Q_p = v_g n'_M \eta_v \text{ gdje je:}$$

- $Q_p$  količina dobave pumpe
- $v_g$  geometrijski radni volumen pumpe
- $n'_M$  brzina vrtnje
- $\eta_v$  volumetrički stupanj djelovanja pumpe [24].

Količina dobave pumpe izjednači se s maksimalnim protokom, pa vrijedi da je:

$$Q_p = v_g n'_M \eta_v = Q_{max} \quad (7)$$

Iz prethodne jednadžbe može se dobiti geometrijski radni volumen pumpe:

$$v_g = \frac{Q_{max}}{n'_M \eta_v} = \frac{131,48 \text{ cm}^3/\text{s}}{23,5 \text{ s}^{-1} \cdot 0,94} = 5,89 \text{ cm}^3/\text{okr}. \quad (8)$$

Obzirom da je potrebni radni volumen pumpe  $5,89 \text{ cm}^3/\text{okr}$  odabiremo prvi veći standardni volumen koji iznosi  $6 \text{ cm}^3/\text{okr}$ .

Kako bismo s odabranim standardnim radnim volumenom pumpe mogli izračunati maksimalne brzine u A i B smjeru odnosno minimalna vremena gibanja u A i B smjeru za iznos od 300 mm (hod cilindra), prvo računamo maksimalni protok sljedećim izrazom:

$$Q_{max} = v_g n'_M \eta_v = 6 \frac{\text{cm}^3}{\text{okr}} \cdot 23,5 \frac{\text{okr}}{\text{s}} \cdot 0,95 = 133,95 \text{ cm}^3/\text{s} \quad (9)$$

Iz dobivenog maksimalnog protoka dobivamo maksimalnu brzinu gibanja u smjeru A:

$$v_{Amax} = \frac{Q_{max}}{A_A} = 10,669 \text{ cm/s}, \quad (10)$$

a maksimalna brzina gibanja u smjeru B iznosi:

$$v_{Bmax} = \frac{Q_{max}}{A_B} = 15,282 \text{ cm/s}. \quad (11)$$

Minimalna vremena potrebna da cilindar izvrši hod od 300 mm tada su:

$$T_{Amin} = \frac{s}{v_{Amax}} = 2,814 \text{ s}, \quad (12)$$

$$T_{Bmin} = \frac{s}{v_{Bmax}} = 1,963 \text{ s}. \quad (13)$$

Kako bi se dobio maksimalni tlak na koji se može postaviti ventil za ograničenje tlaka, a da motor ne bude preopterećen, vrši se izračun maksimalnog tlaka u sustavu prema sljedećem izrazu:

$$p_{max} = \frac{600 \eta P_M}{v_g n_M} = 93,62 \text{ bar} \quad (14)$$

gdje je:

- $p_{max}$  maksimalni tlak sustava,
- $\eta$  stupanj djelovanja agregata,
- $P_M$  snaga motora,
- $v_g$  radni volumen pumpe,
- $n_M$  brzina vrtnje.

Nakon što smo odabrali pumpu slijedi odabir sljedećih komponenti eksperimentalnog postava kako slijedi u tablici 4.

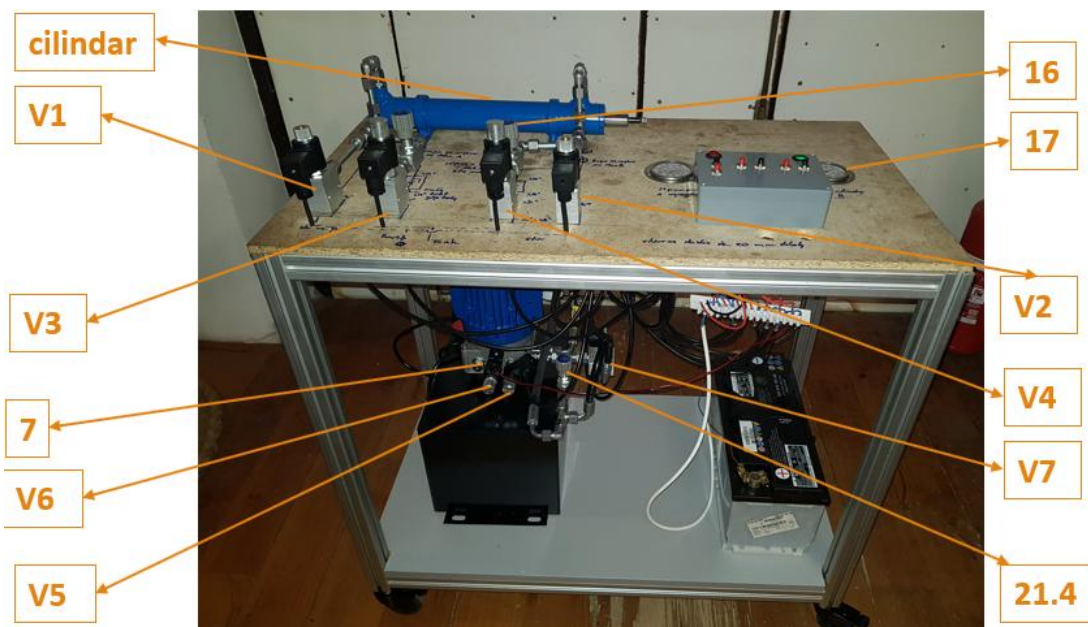
**Tablica 4 Popis korištenih komponenti**

Pozicija	Komponenta	Oznaka	Proizvođač
1	Uisni filter 100 $\mu\text{m}$	P1 1710/3	Filtrationgroup
2	Motor 1,5 kW, $n=1410 \text{ min}^{-1}$	5AZCD 90LB-4	Končar
3	Pumpa 6 $\text{cm}^3/\text{okr}$	E60306010	Hydronit
4	Spremnik 15 l	E60303014	Hydronit
5	Povratni filter	E342000 1	Hydronit
6	Ventil za ograničenje tlaka	VMDC20B	Hydronit
7	Nepovratni ventil	VUC 20	Hydronit
8	Manometar 100 bar	MIR63/100	Hydronit
9.3	2/2 NC 24VDC 1x brtvljenje	MSV30E	Hydronit
10.3	2/2 NC 24VDC 1x brtvljenje	MSV30E	Hydronit
11.3	Regulator protoka	VCF 06	Hydronit
14	2/2 NC 24VDC 2x brtvljenje	MDV30E	Hydronit
15	2/2 NC 24VDC 1x brtvljenje	MSV30E	Hydronit

16	Prigušni ventil	STBO2	Hydronit
17	Manometar	MIR63/100	Hydronit
18	Cilindar	40/22 x 300mm	Hidraulika Kutina
19	Ventil za ograničenje tlaka	VMDCA	Hydronit

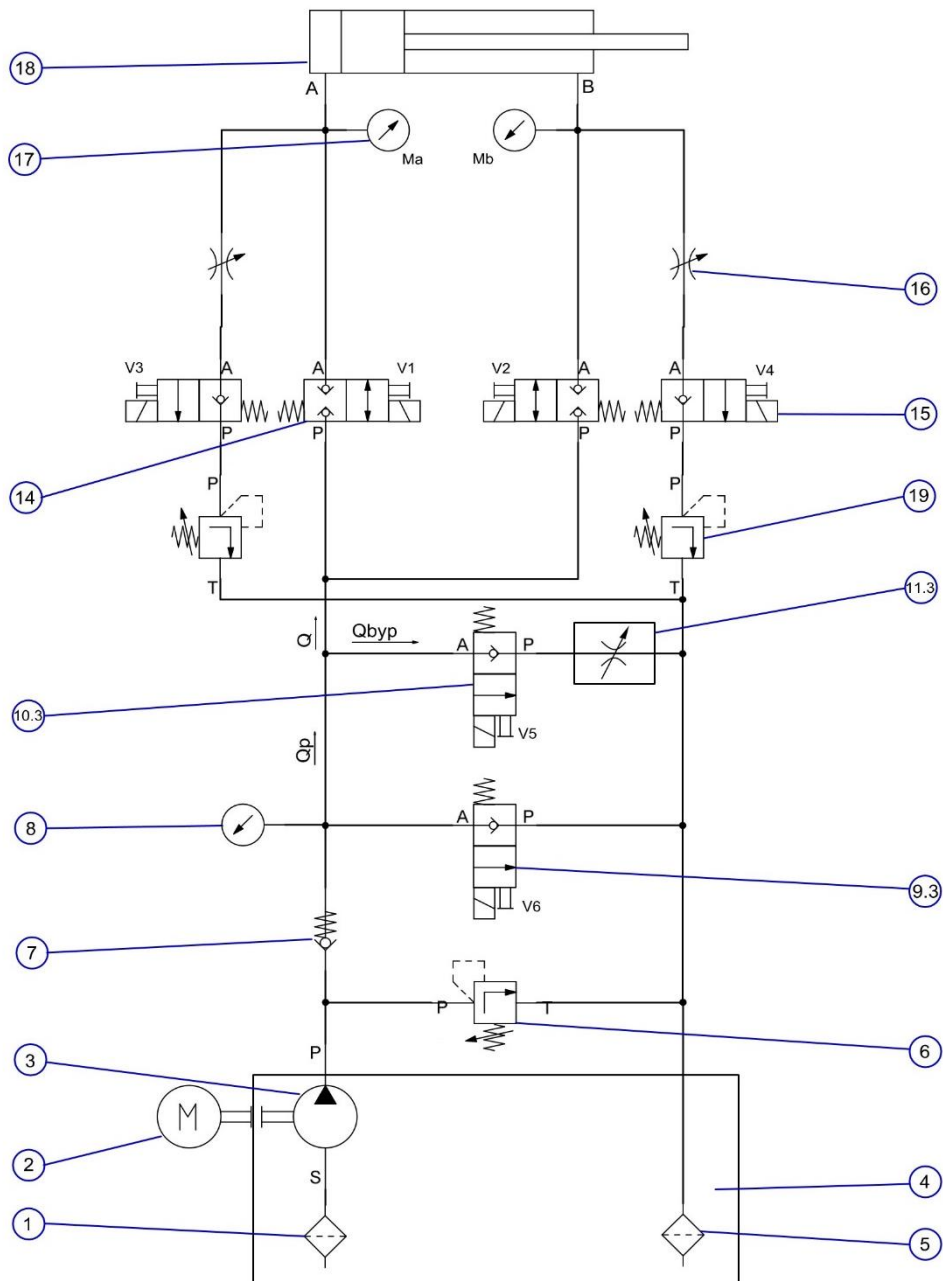
Navedenim tabličnim prikazom dan je popis komponenti eksperimentalnog postava koji služi za posrednu regulaciju ventilom V<sub>5</sub> (pozicija 10.3) i prigušnicom (pozicija 11.3) u *bypass* vodu, dok se rasterećenje vrši ventilom V<sub>6</sub> (pozicija 9.3.).

Eksperimentalni postav prikazan je na sljedećoj fotografiji.



**Slika 52** Eksperimentalni postav za regulaciju položaja hidrauličkog cilindra korištenjem logičkih ventila

Navedene pozicije vidljive su na slici 53 koja predstavlja shematski prikaz eksperimentalnog postava.



Slika 53 Shematski prikaz eksperimentalnog postava

Kako bi se moglo ostvariti gibanje cilindra u A ili B smjeru potrebni su ugradbeni 2/2 dvostruko brtvljujući normalno zatvoreni ventili MDV30E, koji se nalaze u tlačnim vodovima (pozicija 14). Ventili se aktiviraju naponom upravljanja od 24V DC [25] pri čemu se u stanju 1 (24 V) otvara dotok ulja iz pumpe u cilindar, a u stanju 0 (0 V) se zatvara dotok ulja iz pumpe u cilindar.



**Slika 54 Ugradbeni ventil MDV30E**

Ulje se iz cilindra odvodi povratnim vodom preko ugradbenih 2/2 jednostruko brtvljujućih ventila MSV30E (pozicija 15). Navedenim ugradbenim ventilima u povratnom vodu upravlja se naponom upravljanja od 24 V DC [25]. U stanju 1 (24 V) otvara se dotok ulja iz cilindra prema spremniku, a u stanju 0 zatvara se dotok ulja iz cilindra prema spremniku.



**Slika 55 Ugradbeni ventil MSV30E**

U svrhu simuliranja opterećenja koje ne ovisi o protoku koriste se ventili za ograničenje tlaka VMDC20A (pozicija 19), iza ventila  $V_3$  i  $V_4$  u povratnim vodovima ventili su radnog područja od 3 do 60 bara [25]. Ovim ventilima namješteni tlak treba biti minimalno 20 bara niži od maksimalnog tlaka sustava.



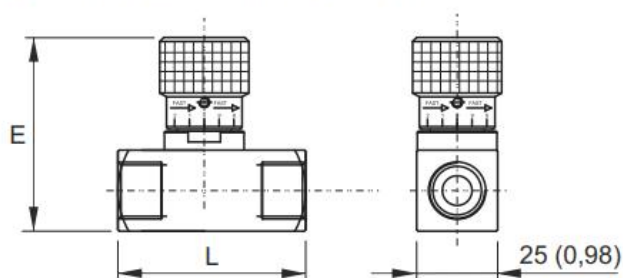


Slika 56 Ventil za ograničenje tlaka VMDC20A

Pozicija 16 predstavlja prigušne ventile koji služe kao komponente za simulaciju opterećenja koje ovisi o protoku. Prigušni ventili nalaze se između cilindra i ventila V<sub>3</sub> i V<sub>4</sub> u povratnome vodu.



In-line bidirectional flow control valve



Slika 57 Prigušni ventil STBO2

Maksimalni tlak u sustavu može se ograničiti ventilom za ograničenje tlaka VMDC20B (pozicija 6), čiji kataloški opis je isti kao za poziciju 19, a razlika je u radnom području koje je od 40 do 120 bara [25].

Navedenim eksperimentalnim postavom postizemo gibanje u smjeru A stavljanjem pod napon ventila  $V_1$  i  $V_4$  dok se gibanje u smjeru B postiže stavljanjem pod napon ventila  $V_2$  i  $V_3$ . Time se omogućuje protok ulja u cilindar te povrat ulja iz cilindra u spremnik povratnim vodom. U oba slučaja (gibanje A i B) stanjem 0 (0 V) postiže se zaustavljanje cilindra.

Kao što je i vidljivo na shemi sustava vrijedi da je:

$$Q = Q_p - Q_{byp},$$

$$Q_p = 8 \text{ l/min},$$

$$Q_{byp} = 5 \text{ do } 7 \text{ l/min},$$

odnosno može se upravljati protokom koji se dovodi u cilindar pomoću ventila  $V_5$  smještenim u *bypass* vodu. Ovisno o tome je li zatvoren ventil  $V_5$  protok prema cilindru je:

$$Q = 1 \text{ do } 3 \text{ l/min}$$

iz čega slijedi da je:

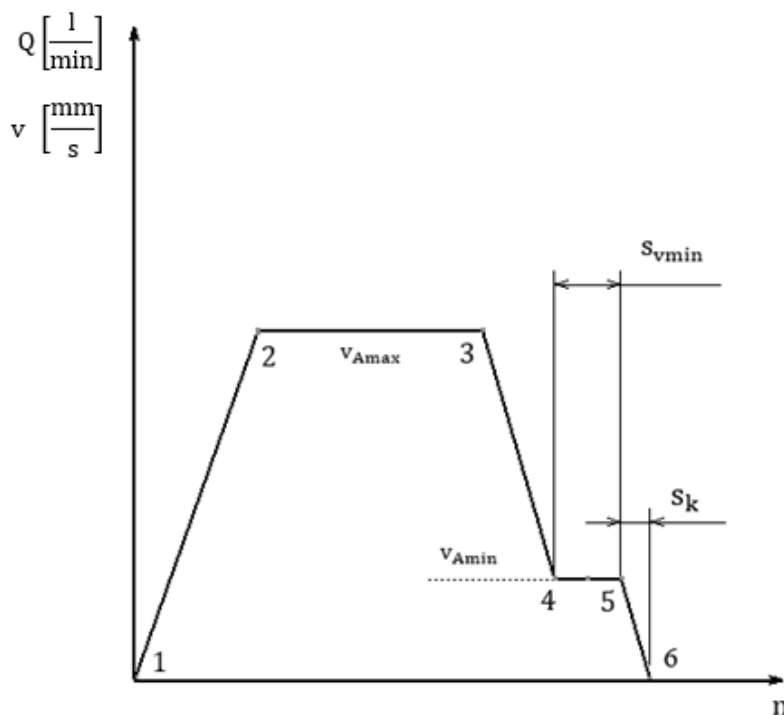
$$v_{Amin} = 13,33 \frac{mm}{s} \text{ do } 39,98 \frac{mm}{s}.$$

Stanja na pojedinim ventilima za vrijeme ciklusa s obzirom na upravljački napon (stanje 0 i 1) dana su sljedećom tablicom.

**Tablica 5 Prikaz stanja na ventilima obzirom na napon upravljanja**

Pozicija	$V_5$	$V_1$	$V_4$
1	0	1	1
2	0	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	0
6	0	0	0

Kvalitativnim dijagramom može se prikazati promjena brzine cilindra, odnosno protoka ulja prema cilindru za vrijeme jednog ciklusa. Na sljedećem grafičkom prikazu na ordinati je brzina gibanja cilindra, dok na apscisi  $n$  predstavlja broj impulsa inkrementalnog enkodera.



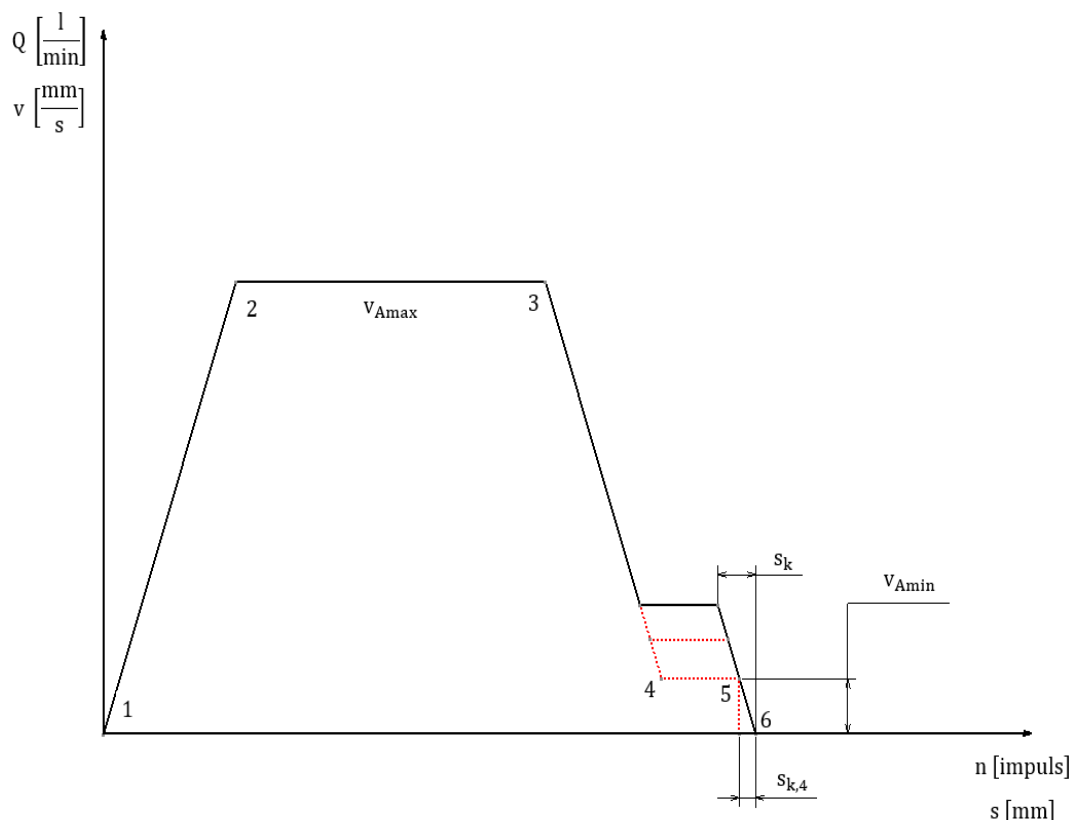
**Slika 58 Grafički prikaz brzine cilindra tijekom ciklusa gibanja**

Iz prethodnog grafičkog prikaza vidljivo je da u trenutku 1 kao posljedica stavljanja pod napon od ventila  $V_1$  i  $V_4$ , obzirom da je ventil  $V_5$  zatvoren (jer je napon upravljanja 0V), cjelokupni protok pumpe dovodi se prema cilindru odnosno iznos protoka  $Q_{byp}$  iznosi nula. Brzina gibanja cilindra raste od 0 do maksimalne vrijednosti ovisne o protoku  $Q$  te površini klipa cilindra. U trenutku 2 maksimalna brzina je postignuta te sve do trenutka 3 u kojem se stanje ventila  $V_5$  mijenja iz 0 u 1, odnosno obzirom da je ventil  $V_5$  pod naponom on se otvara te sada iznos protoka prema cilindru je jednak iznosu protoka pumpe umanjenom za protok koji ide u bypass vod. Obzirom da protok  $Q$  u trenutku 3 pada, pada i brzina gibanja cilindra sve do minimalnog iznosa u trenutku 4. Od trenutka 4 do trenutka 5 cilindar minimalnom brzinom prijeđe put  $s_{vmin}$ . U trenutku 5 ventil  $V_4$  prelazi u stanje 0 odnosno zatvara se, a cilindar nakon što prođe put kočenja  $s_k$  zaustavlja se. Obzirom da se nastoji što više skratiti vrijeme ciklusa, potrebno je minimizirati put koji cilindar prijeđe minimalnom brzinom te put kočenja.



U ovoj varijanti sustava vrši se direktna regulacija minimalne brzine zatvaranjem ventila  $V_7$  (2/2 NO jednostruko brtvljujući ugradbeni ventil MSV30E) i propuštanjem ulja kroz prigušnicu (pozicija 21.4) prema cilindru.

Iz sljedećeg grafičkog prikaza može se uočiti prednost alternativne projektirane verzije sustava izvedenog direktnom regulacijom u tlačnom vodu umjesto regulacije protoka u povratnom vodu. Postignuto je smanjenje minimalne brzine kojom se giba cilindar od trenutka 4 do trenutka 5, a put kočenja  $s_{k,4}$  od trenutka 5 do trenutka 6 manji je nego put kočenja  $s_k$  u prethodnoj varijanti sustava.



**Slika 60 Grafički prikaz brzine gibanja cilindra tijekom jednog ciklusa (alternativna varijanta eksperimentalnog postava)**

Iako je alternativna verzija bolja od prvotne u pogledu bolje točnosti pozicioniranja, izvedba procesa regulacije korištenjem ventila u tlačnom vodu znatno je energetski nepovoljnije od izvedbe procesa regulacije korištenjem ventila u *bypass* vodu.

## 7. ZAKLJUČAK

Pneumatski i hidraulički aktuatori su zbog svojih mnogobrojnih prednosti u mnogim aspektima još uvijek nezamjenjive pogonske jedinice. U prilog tome svjedoči i činjenica njihove prisutnosti u velikom broju tehnoloških postrojenja, a danas je gotovo nemoguće pronaći industrijski pogon koji ne koristi neki od pneumatskih ili hidrauličkih uređaja. Međutim, postavlja se pitanje mogu li pneumatski i hidraulički uređaji zadržati takvu raznolikost primjene s obzirom na značajne promjene zahtjeva tržišta u kojem se teži digitalizaciji i energetske učinkovitosti. Drugim riječima, ima li mjesta u svijetu nove Industrije 4.0 za tehnologije koje datiraju još od prve industrijske revolucije? Neki odgovori na ta pitanja prikazani su u ovome radu. Od internetom upravljane pneumatske preše i sortiranja proizvoda primjenom vizijskih sustava, gdje je naglasak stavljen na sinergiji fluidne tehnike s aktualnim tehnologijama, pa sve do testiranja energetske učinkovitosti hidrauličkih sustava, kao i pametnog upravljanja pneumatskim i hidrauličkim aktuatorom prikazana je fleksibilnost pneumatskih i hidrauličkih uređaja i mogućnost prilagodbe ovih sustava suvremenim pravcima tehnološkog razvoja. Upravo ta fuzija klasičnih, provjerenih i što je najvažnije funkcionalnih tehnologija u kombinaciji s aktualnim i modernim tehnologijama može imati značajne prednosti u tehnološkom napretku.

## **Zahvala**

Zahvaljujemo se prof. dr. sc. Željku Šitumu na pomoći i potpori tijekom izrade ovoga rada, korisnim savjetima te financiranju i pomoći kod nabave dijelova za izradu eksperimentalnih sustava.

Zahvaljujemo se asistentu Juraju Beniću na pomoći i mnogim korisnim savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Zahvaljujemo se tvrtkama SMC Industrijska automatika d.o.o., Festo Hrvatska d.o.o. i BIBUS Zagreb d.o.o. za donirane pneumatske i hidrauličke komponente koje su bile potrebne za izradu eksperimentalnih postava.

Zahvaljujemo se obrtu Namuro za donaciju kože za izradu pokretne trake.

## Literatura

- [1] Rajčić, N.: Konstrukcija i upravljanje pneumatske preše, završni rad, FSB, 2017.
- [2] URL izvor: <https://www.sparkfun.com/products/11061>, 25. 05. 2020.
- [3] URL izvor: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShieldV1>, 25. 05. 2020.
- [4] URL izvor: <https://www.chipoteka.hr/artikl/139241/raspberry-pi-3-model-b-wifi-bluetooth-onboard-8208000133>, 25. 05. 2020.
- [5] URL izvor: <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>, 24. 05. 2020.
- [6] URL izvor: <http://practicalcryptography.com/miscellaneous/machine-learning/guide-mel-frequency-cepstral-coefficients-mfccs/>, 24. 05. 2020.
- [7] Ž. Šitum: Pneumatika i hidraulika, Proporcionalna hidraulika, Katedra za strojarstvu automatiku, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu - Predavanja
- [8] D. Scholz, Proportional hydraulics, Festo Didactic GmbH & Co., 73770 Denkendorf, Germany, 2002.
- [9] T. Minav, P. Sainio, M. Pietola: Direct driven hydraulic drive without conventional tank, 2014.
- [10] T. Minav, P. Sainio, M. Pietola: Efficiency of direct driven hydraulic setup in arctic conditions, 2015.
- [11] J. Benić, Ž. Šitum: Position controller for direct driven electro-hydraulic system
- [12] T. Stipančić: Vizijski sustavi, Fakultet strojarstva i brodogradnje – Predavanja
- [13] URL izvor: [www.smc.eu](http://www.smc.eu), 20. 05. 2020.
- [14] URL izvor: [www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org), 20. 05. 2020.
- [15] URL izvor:  
[https://www.festo.com/cat/hr\\_hr/data/doc\\_engb/PDF/EN/DRVS\\_EN.PDF](https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/DRVS_EN.PDF), 26. 05. 2020.
- [16] Proportional directional control valves MPYE, FESTO katalog proizvoda, 2015.
- [17] URL izvor:  
[https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu6050&gclid=Cj0KCQiA7aPyBRChARIsAJfWCgLLGT4tIxH9w3QG6KYHEhmvTxnw7CzJwkNscipW5WFXnUFe935KUaAvcDEALw\\_wcB](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu6050&gclid=Cj0KCQiA7aPyBRChARIsAJfWCgLLGT4tIxH9w3QG6KYHEhmvTxnw7CzJwkNscipW5WFXnUFe935KUaAvcDEALw_wcB), 26. 05. 2020.
- [18] URL izvor: <https://www.fierceelectronics.com/embedded/sonic-nirvana-mems-accelerometers-as-acoustic-pickups-musical-instruments>, 26.05.2020.
- [19] URL izvor: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module>, 26.05.2020.



- [20] URL izvor: <https://howtomechatronics.com/?s=mpu6050> , 27.05.2020.
- [21] URL izvor:  
[https://www.sunhydraulics.com/sites/default/files/media\\_library/tech\\_resources/TT\\_US\\_Logics-N.pdf?fbclid=IwAR0IloFVchCWe7YgijNm8gh6n2SUwUVv\\_5PPrLBj2qyQlAm2bJXDBTmkFQE](https://www.sunhydraulics.com/sites/default/files/media_library/tech_resources/TT_US_Logics-N.pdf?fbclid=IwAR0IloFVchCWe7YgijNm8gh6n2SUwUVv_5PPrLBj2qyQlAm2bJXDBTmkFQE), 21.05.2020.
- [22] URL izvor: <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/manifolds-hics/article/21883374/the-how-and-why-of-hics>, 21.05.2020.
- [23] URL izvor: [http://www.koncar-mes.hr/wp-content/uploads/katalog/katalog\\_elektromotori\\_2014\\_jednofazni-asinkroni\\_elektromotori.pdf](http://www.koncar-mes.hr/wp-content/uploads/katalog/katalog_elektromotori_2014_jednofazni-asinkroni_elektromotori.pdf), 21.05.2020.
- [24] M. Fancev, K. Franjić, „Pumpe“, Tehnička enciklopedija Sv. 11, JLZ Miroslav Krleža, 1988, Zagreb
- [25] URL izvor:  
[https://www.bibus.hr/fileadmin/editors/countries/bizag/Katalozi/Hidraulika/Mali\\_hidraulicki\\_agregati/Mali\\_hidrauli%C4%8Dki\\_agregati\\_HYDRONIT.pdf](https://www.bibus.hr/fileadmin/editors/countries/bizag/Katalozi/Hidraulika/Mali_hidraulicki_agregati/Mali_hidrauli%C4%8Dki_agregati_HYDRONIT.pdf), 21.05.2020.

## **Sažetak**

**Pneumatska preša upravljana putem WEB-a** sustav je kojeg je implementirao Zvonimir Dabčević, a omogućuje upravljanje pneumatskog uređaja putem globalne mreže. Proces implementacije sustava sastoji se od: (1) ostvarivanja komunikacije zasnovane na internetskim tehnologijama, (2) izradi web aplikacije, (3) osiguravanje reakcije na događaj te analize i pohrane zaprimljenih podataka i njihov prikaz korisniku kroz aplikaciju, (4) provedbi PID regulacije, (5) implementaciji glasovnog upravljanja sustavom korištenjem neuronskih mreža.

**Usporedba energetske učinkovitosti hidrauličkih sustava** kojeg je izradio David Klepo obuhvaća programiranje i testiranje eksperimentalnog postava na kojem se uspoređuju dva načina upravljanja gibanjem hidrauličkog cilindra. Kod prvog načina koristi se proporcionalni ventil za upravljanje gibanjem hidrauličkog cilindra. Drugi način predstavlja izravno pogonjeni elektrohidraulički sustav u kojem se dvije reverzibilne pumpe/motori spajaju u komore cilindra. Kako se teži sve većoj energetske učinkovitosti tako se istražuju bolji i jednostavniji načini rada hidrauličkih sustava. Ovaj postav je izrađen kako bi se usporedila dva koncepta upravljanja i dokazala bolja energetska učinkovitost izravno pogonjenog hidrauličkog sustava. Za upravljanje sustava koristi se Mitsubishi electric PLC FX5U-32MT/ESS.

**Sortiranje proizvoda primjenom vizijskog sustava** kojeg je izradio Ivan Radić obuhvaća projektiranje, izradu i upravljanje pokretne trake za sortiranje proizvoda pomoću vizijskog sustava. Gotovo svaki pogon serijske i masovne industrije zahtijeva sortiranje proizvoda na završnoj pokretnoj traci pogona. U većini slučajeva, sortiranje obavljaju zaposlenici na završnoj traci i ručno obavljaju zadaću sortiranja. Taj je posao jako zamoran i teško je ovu zadaću obavljati bez pogreške puno radno vrijeme. Treba napomenuti da se pokretna traka zaustavlja samo u iznimnim situacijama tako da na traci mora biti zaposleno više ljudi. Iz prethodno navedenih razloga cilj ovog rada je zamijeniti ljudski rad automatiziranim pneumatskim sustavom. U radu je opisan način izvedbe i upravljanja pneumatskim sustavom. Također, navedene su prednosti pneumatike i u kojim industrijama bi se moglo koristiti predloženo rješenje.

**Upravljanje platformom s dva stupnja slobode gibanja pomoću pneumatskih aktuatora** je izradio Borna Rašperić. Cilj ovoga rada je izrada i regulacija sustava stabilizirajuće platforme primjenom pneumatskih aktuatora, što zahtijeva integriranje konstrukcijskog, aktuatorskog i programskog inženjerstva u jedinstvenu cjelinu. Ovaj mehatronički sustav se

sastoji od konstrukcijskih elemenata, upravljačkih komponenti, mjernih članova, sklopova za pretvorbu signala i programskog dijela.

**Regulacija položaja hidrauličkog cilindra primjenom logičkih ventila** kojeg je izradio Dominik Semren sastoji se od projektiranja i upravljanja hidrauličkog sustava. Eksperimentalni elektrohidraulički sustav s ugradbenim ventilima vrlo je kompaktan sustav koji omogućava precizno pozicioniranje hidrauličkog cilindra. Osim toga, omogućava vrlo jednostavnu simulaciju opterećenja te ostvarenje aktiviranja ventila ugrađenih u sustavu. Na eksperimentalnom elektrohidrauličkom sustavu mogu se pratiti i analizirati tlak, položaj cilindra te brzina gibanja cilindra.

Ključne riječi: pneumatska preša, izravno pogonjena hidraulika, sortiranje korištenjem vizijskog sustava, platforma s dva stupnja slobode gibanja, regulacija položaja hidrauličkog cilindra korištenjem logičkih ventila

## Summary

**WEB controlled pneumatic press** is a system created by Zvonimir Dabčević and is designed to allow control of pneumatic devices via global area network (GAN). System implementation is divided into a number of phases: (1) establishment of Internet Protocol-based communication, (2) Web application development, (3) reaction to events, data analysis and data display on web page, (4) implementation of PID control, (5) design and implementation of the voice control system using artificial neural networks.

**Comparison of energy efficiency od hydraulic systems** created by David Klepo includes programming and testing of an experimental setup in which two methods of controlling the movement of a hydraulic cylinder are compared. In the first method, proportional valve is used to control the movement of the hydraulic cylinder. The second method is directly driven electrohydraulic system in which two reversible pumps/motors are connected to the cylinder chambers. As it tends to increase energy efficiency therefore better and simpler modes od operation of hydraulic systems are being researched regularly. This setup was designed so two hydraulic systems could be compared and to prove that energy efficiency of DDEH system is greater than energy efficiency of proportional hydraulic system. System is controlled by Mitsubishi electric PLC FX5U-32MT/ESS.

**Product sorting by applying vision system** created by Ivan Radić includes design, production and control of a conveyor belt for product sorting with applied vision system. Almost every plant in the serial and mass production requires product sorting on the final conveyer belt. In most cases, sorting is done by the employees at final conveyer belt, and they perform the sorting task. This job is very tedious and it is difficult to perform this task flawlessly full working time. It should also be noted that this conveyer belt only stops in exceptional situations, because of that more people should be employed on that place. For the foregoing reasons, the aim of this work is to replace human labor with a automated pneumatic system. This paper describes method of implementation and control of this pneumatic system. The benefits of the pneumatics are also outlined and in which industries this setup could be implemented.

**Platform control with two degrees of freedom of movement using pneumatic actuators** created by Borna Rašperić. The aim of this work is to construct and regulate a stabilizing platform system using pneumatic actuators, which requires integration of construction, actuator and software engineering in a unique whole. This mechatronic system consists of

structural elements, control components, measuring elements, energy conversion circuits and program part.

**The regulation of the position of hydraulic cylinder using logic valves** implemented by Dominik Semren consists of the design and management of the hydraulic system. The experimental electro-hydraulic system with cartridge valves is a very compact system that enables accurately positioning of hydraulic cylinder. Furthermore, it enables very simple load simulations and activation of valves used in system. The experimental electro-hydraulic system enables analysis and monitoring of pressure, cylinder position and velocities in the system.

Key words: pneumatic press, directly driven hydraulics, sorting with applied vision system, platform with two degrees of freedom of movement, hydraulic cylinder position regulation using logic valves

## Životopis

**Zvonimir Dabčević** rođen je 26.07.1995. u Zagrebu, a odrastao je u Velikoj Gorici. Nakon završene osnovne škole Eugena Kvaternika u Velikoj Gorici, upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Zagrebu gdje stječe zvanje tehničar za računalstvo. Tijekom srednje škole aktivno proučava svjetsku književnost, a posebice ga fasciniraju Bukowski, Poe i Dante. Trenutačno je student diplomskog studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Slobodno vrijeme koristi za proučavanje prirodnih znanosti i filozofije te njihove povezanosti.

**David Klepo** rođen je 14.5.1997. u Đakovu. Pohađao je Osnovnu školu Ivan Goran Kovačić u Đakovu u kojoj odlazi na regionalna (koja i osvaja dvije godine zaredom) i državno natjecanje iz matematike. Nakon osnovne škole upisuje prirodoslovno matematički odjel gimnazije Antun Gustav Matoš u Đakovu. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja 2016. godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Godine 2017. opredjeljuje se za smjer Mehatronika i robotika na kojem nastavlja studirati na diplomskom dijelu studija nakon završetka preddiplomskog studija.

**Ivan Radić** rođen je 28.12.1997. u Zagrebu gdje je pohađao Osnovnu školu Granešina. Završetkom iste upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Zagrebu, smjer mehatronika i robotika, s nadom da će mu ta škola biti najbolja priprema za FSB. Tijekom srednjoškolskog razdoblja sudjelovao je na županijskom natjecanju iz matematike. Po završetku srednje škole, stječe zvanje tehničara za mehatroniku i upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Nakon uspješne prve godine, opredjeljuje se za isti smjer kao i u srednjoj školi, a to je mehatronika i robotika. U slobodno vrijeme igra mali nogomet i prati sport.

**Borna Rašperić** rođen je 19.01.1998. u Zagrebu. Pohađao je Osnovnu školu Savski Gaj gdje po njenom završetku upisuje zagrebačku srednju Strojarsko tehničku školu Fausta Vrančića, zanimanje tehničar za mehatroniku. Srednju školu završava 2016. godine. Iste godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te na drugoj godini izabire smjer mehatronika i robotika kako bi time nastavio i nadogradio svoje znanje stečeno kao tehničar za mehatroniku.

**Dominik Semren** rođen je 06.04.1995. u Uznachu u Švicarskoj Konfederaciji. Pohađao je osnovnu školu Ante Kovačića u Zagrebu. Po završetku osnovnoškolskog obrazovanja upisuje prirodoslovno-matematički smjer Gimnazije Lucijana Vranjanina u Zagrebu. Nakon završene srednje škole upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na istom fakultetu nakon završene prve godine studija, 2015. godine upisuje smjer Mehatronika i robotika.