Daljinsko upravljanje i nadzor pneumatskog manipulatora

Vico, Anđelko

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Anđelko Vico

Zagreb, godina 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing. Anđelko Vico

Zagreb, godina 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu, dipl.ing. na ukazanom povjerenju prihvaćanjem mentorstva te na odvojenom vremenu za savjete i pomoć.

Također, zahvaljujem se ko-mentoru Juraju Beniću, mag.ing. na ukazanom povjerenju te za vođenje tijekom izrade rada s korisnim savjetima.

Zahvaljujem obitelji na neprestanoj potpori pruženoj kroz studij.

Anđelko Vico

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: **ANĐELKO VICO** Mat. br.: 0035201621

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Daljinsko upravljanje i nadzor pneumatskog manipulatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Remote control and monitoring of the pneumatic manipulator**

Opis zadatka:

U Laboratoriju za automatiku i robotiku nalazi se pneumatski manipulator koji je prije tridesetak godina izrađen u tvrtki Festo za edukacijske svrhe. Sastoji se od devet pneumatskih cilindara, dvije vakuumske prihvatnice te od jedanaest elektromagnetskih ventila za upravljanje cilindrima i prihvatnicama. Cilindri omogućuju dva translacijska i dva rotacijska gibanja manipulatora te jedno translacijsko gibanje za svaku od dvije palete. Palete služe za odlaganje valjkastih predmeta koje manipulator prenosi iz jedne palete u drugu. Upravljanje je bilo izvedeno pomoću programabilnog logičkog kontrolera (PLC-a) proizvođača Festo. S obzirom da navedeni PLC više nije u upotrebljivom stanju, potrebno ga je zamijeniti novim upravljačkim uređajem i osuvremeniti upravljanje s ciljem daljinskog upravljanja i nadzora rada manipulatora primjenom tehnologije Interneta stvari prema načelima Industrije 4.0.

U radu je potrebno:
- pregledati sve pneumatske i elektroničke dijelove radne stanice, zamijeniti dotrajale komponente i dovesti radnu stanicu u funkcionalno stanje,
- načiniti upravljački program u Arduino jeziku za implementaciju u PLC,
- ostvariti upravljanje radne stanice putem Interneta korištenjem Modbus TCP/IP protokola, s mogućnošću prikaza podataka na korisničkom računalu,
- povezati upravljački program s aplikacijom za daljinsko upravljanje i nadzor sustava.

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: prof. dr. sc. Željko Šitum

Predsjednica Povjerenstva: prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS TEHNIČE DOKUMENTACIJE

PROGRAMSKI KÔD STANICE

SAŽETAK

U ovom zadatku opisana je obnova edukacijske radne stanice pneumatskog manipulatora. Opisan je koncept Interneta stvari, protokol Modbus TCP/IP i njihova primjena na radnu stanicu. Zatim je prikazan proces programiranja upravljačkog uređaja (PLC) stanice u Arduino jeziku. Naposljetku, opisana je konfiguracija Internet postavki i video nadzora kako bi se cijela radna stanica mogla upravljati i nadzirati preko razvijene web platforme *CyberHydraulic*.

Ključne riječi: Internet stvari, Modbus TCP/IP, pneumatika, Arduino, Raspberry Pi

SUMMARY

This work describes the renewal of a educational pneumatic manipulator station. The concept of the Internet of Things, the Modbus TCP / IP protocol and their application to the pneumatic station are also described. Afterwards, the process of programming the station's PLC in Arduino language is shown. Finally, the configuration of Internet and video surveillance settings is explained so that the entire station can be managed and monitored via the web platform *CyberHydraulic*.

Key words: Internet of Things, Modbus TCP/IP, pneumatics, Arduino, Raspberry Pi

1. UVOD

Napretkom tehnologije nezaobilazno dolazi do zastarenja ustaljenih načina proizvodnje, istraživanja, ali i razmišljanja. Prije ili kasnije javlja se potreba za modernizacijom. U ovom diplomskom radu načinjena je obnova jedne zastarjele edukacijske radne stanice pneumatskog manipulatora u Laboratoriju za automatiku i robotiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Oprema koja se trenutno nalazi na radnoj stanici datira iz 1980.-ih i potrebno ju je zamijeniti suvremenim dijelovima. Iako su mnogi dijelovi i dalje, zbog svoje robusnosti, funkcionalni kao npr. razvodnici, prigušivači i ventili, moderna oprema donosi niz drugih pogodnosti. Veličinom su puno manji, lakše je održavanje, a jednostavnija je instalacija i povezivanje s PLC-om. Ne treba zaboraviti kako današnji PLC-ovi nude nove mogućnosti nezamislive do prije 40 godina, koliko je stara oprema.

Kako se nalazimo u dobu u kojem je Internet sve dostupniji, uređaji sve pametniji i sve dostupniji cijenom, prirodno se javlja potreba za primjenom novih tehnologija i usvajanjem novih pristupa. Ovdje se naravno govori o Industriji 4.0. Ona ovisi o nizu novih i inovativnih tehnologija, a najvažnija među njima je Internet stvari, o čemu će biti riječ u nastavku. Stoga će se u ovom radu, osim osuvremenjivanjem opreme, obrađivati implementacija upravljanja i nadzora radne stanice putem Interneta.

2. INTERNET STVARI

Prije nego razmotrimo što je *Internet stvari*, dobro je shvatiti što točno riječ Internet označava. Internet je skraćenica od "network of intra-networks" ili jednostavno mreža više mrežâ. Bilo koje poduzeće ili kućanstvo može imati svoju lokalnu mrežu uređaja koji komuniciraju međusobno bez da su spojeni na Internet tj. s ostatkom svijeta. Ovakva mreža zove se intranet. Ako više intraneta umnožimo kroz neki zajednički protokol kao što je to Internet, dobivamo povezanost na globalnoj razini.

S druge strane Internet stvari, ili skraćeno IoT (eng. Internet of Things), odnosi se na sustav međusobno povezanih uređaja gdje svatko ima svoj unikatni identifikacijski broj i mogućnost da samostalno šalje podatke preko mreže. Glavni cilj interneta stvari jest imati sustav u kojem uređaji sami javljaju svoje stanje u stvarnom vremenu. IoT uređaji su opremljeni senzorima, aktuatorima, sustavom za komunikaciju i software-om koji dohvaća, filtrira i izmjenjuje podatke o sebi, svom stanju i stanju okoliša. Time se povećava cjelokupna efikasnost, jer sustav može sam donositi odluke i manje je ovisan o ljudskoj intervenciji. "Stvar" u imenu "Internet stvari" može, u teoriji, označavati bilo koju komponenetu povezanu na Internet s IoT tehnologijom, bio to fizički objekt ili živo biće. Pojam IoT se uglavnom koristi za uređaje od kojih generalno ne očekujemo da imaju mogućnost spajanja na Internet. Dakle, pod tim pojmom ne podrazumijevamo laptope, pametne mobitele ili servere.

Slika 1. Vizualan prikaz koncepta Interneta stvari [1]

Na potrošačkoj razini se vidi sve veća dostupnost "pametnih uređaja". Prednosti internetske povezanosti za neke uređaje su očite, dok za druge nisu toliko da bi kupci bili odmah zainteresirani, nešto što se može reći, između ostalog, za pametne hladnjake. Pametni zvučnici nam omogućuju da putem glasovnih naredbi interaktivno komuniciramo s ugrađenim virtualnim asistentom koji nam može servirati informacije o vremenu, reproducirati glazbu, podsjetiti na obveze itd. Termostati mogu naučiti kada smo najčešće doma i time automatski regulirati temperaturu prostorije. Pametni automobili mogu sami izvršiti tehničku dijagnozu i naručiti potrebne dijelove [2].

Iako je tržište prepuno primjera kako Internet stvari postaje realnost, ono se i dalje nalazi u začetku što se tiče razvoja zbog tehničkih izazova koje je potrebno prebroditi. Uspješna primjena Interneta stvari podrazumijeva pronalazak najprije smislenog slučaja upotrebe, a potom prilagodbu postojećeg sustava i organizacije. Nakon uspješne tehničke provedbe javlja se potreba za kontinuiranim održavanjem cijelog sustava. Uz sve to, potrebno je istovremeno zadržati privatnost korisnika i kibernetičku sigurnost koja je *condicio sine qua non*, jer koliko pozitivnih stvari može donijeti toliko kod zloporabe može biti opasan.

Na koncu, važno je naglasiti da, slično kao i u slučaju pojave Interneta, samim povezivanjem uređaja ne stvara se nikakva vrijednost, nego ona nastaje tek kad se pronađe praktična primjena. U ovom radu, praktična primjena se očituje u omogućivanju daljinskog upravljanja i nadzora nad radnom stanicom korištenjem komunikacijskog protokola Modbus TCP/IP.

3. PREGLED PNEUMATSKE RADNE STANICE

U sklopu izrade ovog rada, korištena je postojeća pneumatska radna stanica koja se nalazi u Laboratoriju za automatiku i robotiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Stanica može poslužiti za demonstraciju rada pneumatskih aktuatora u svrhu manipulacije objektima koji se nalaze na razdvojenim stolovima.

3.1. Zatečeno stanje

Na slici 2 prikazana je radna stanica u zatečenom stanju. Stanica se sastoji od pomične glave manipulatora s dvije vakuumske hvataljke i dva pomična stola, svaki sa po 9 mjesta za valjčiće. Na slici se također vidi da na stanici nedostaju pneumatske cijevi, da su senzori razmješteni i da se koriste stari tipovi elektromagnetskih ventila.

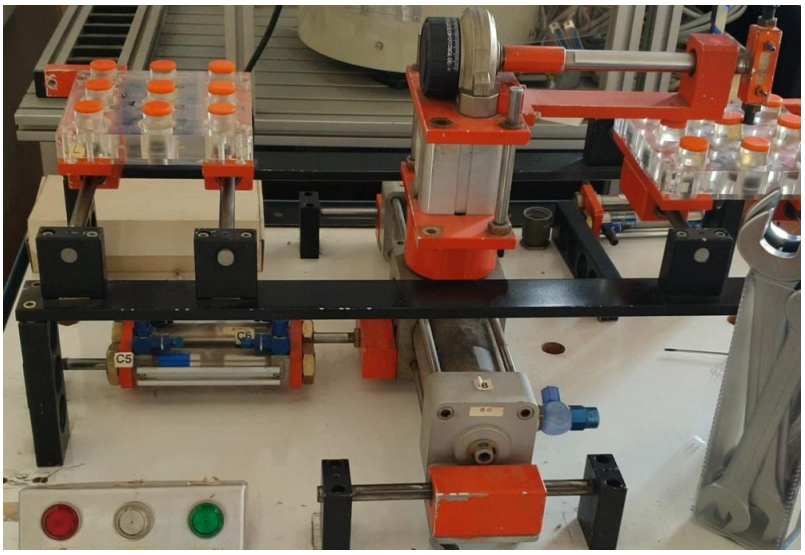
Slika 2. Stanica pneumatskog manipulatora u zatečenom stanju

Manipulator radne stanice ima četiri stupnja slobode gibanja:

- **Rotacija glave manipulatora** – Omogućuje korištenje dviju vakuumski hvataljki na jednoj glavi. Zbog svoje istrošenosti silikonske hvataljke će biti zamijenjene novima.

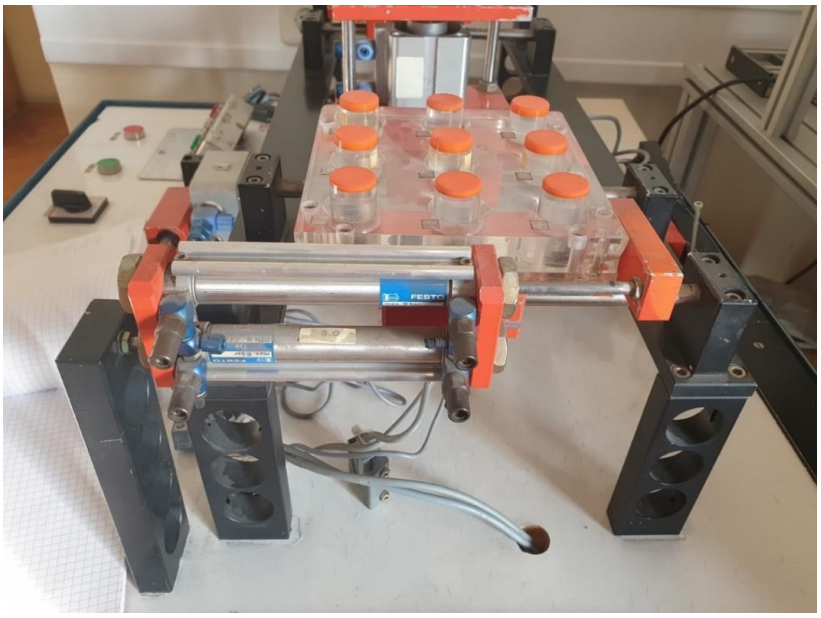
Slika 3. Glava manipulatora

- **Pomak glave gore-dolje** – Dvije moguće pozicije glave.
- **Rotacija postolja za 180 stupnjeva** – Dvije moguće pozicije postolja.
- **Pomak postolja lijevo-desno** – Korištenjem dva cilindra moguće je ostvariti tri različite pozicije postolja.



Slika 4. Stanica manipulatora - prednji pogled

Oba stola mogu se, uz pomoć dva cilindra, pravocrtno gibati u neku od tri moguće pozicije. Time se glavi manipulatora omogućuje pristup ka sva tri reda valjčića na stolu, kao što je to vidljivo na slici 5.



Slika 5. Stanica manipulatora - bočni pogled

U sklopu obnove stanice cilindri neće biti zamjenjivani novima, međutim priključci za vodove na njima hoće. Svaki konektor na stanici, koji ujedno služi kao prigušnica zraka, spaja se na vodove promjera 6 mm.

3.2. Komponente za zamjenu

U uvodnom dijelu je spomenuto kako neke zastarjele dijelove, iako su i dalje funkcionalni, je isplativo zamijeniti modernim varijantama. U ovom poglavlju opisat će se dijelovi koji će dobiti zamjenu.

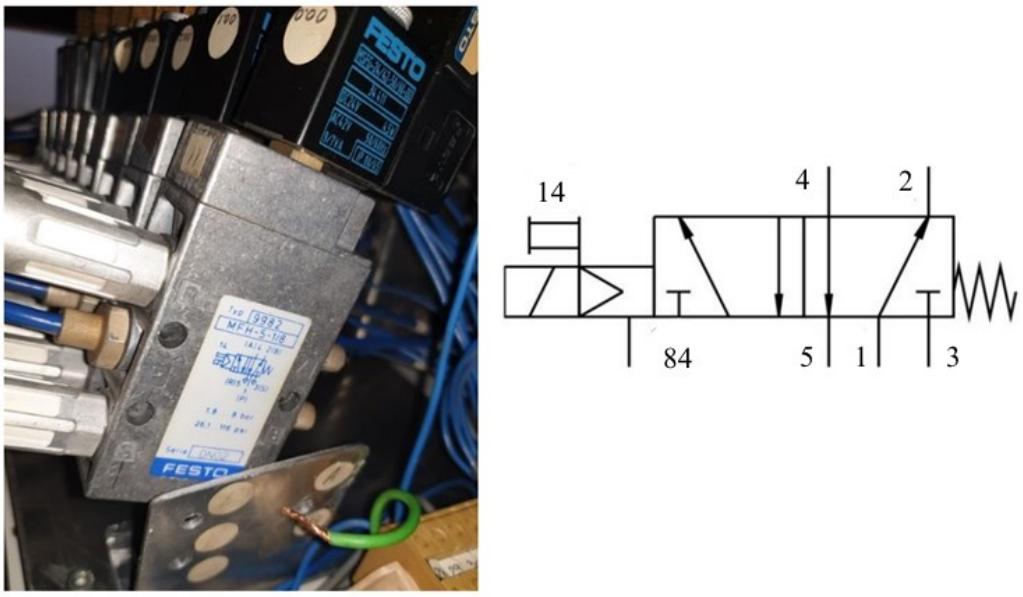
Programabilni logički kontroler Festo FPC 202

Na radnoj stanici je korišten Festo FPC 202 PLC koji datira iz 1980.-ih godina. Ima 16 ulaza, 8 tranzistorskih izlaza i 8 relejnih izlaza, a postoji mogućnost proširenja ulaza/izlaza uz spajanje drugog PLC-a. Na slici 6 se vidi da je takav pristup korišten. Za programiranje ovog PLC-a potrebno je računalo sa "FST200C" programom proizvođača Festo. Podržano je programiranje samo s Ladder dijagramima (LAD) i sa Statement list (STL) jezikom. PLC je mogao pohraniti do 8 programa u memoriji, a oni su se mijenjali uz pomoć tipki na prednjoj strani. [3]

Slika 6. Festo FPC 202 (gore) s proširenjem (dolje)

Pneumatski ventil MFH-5-1/8

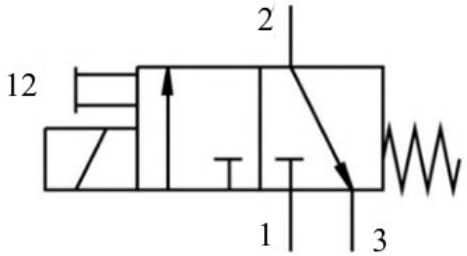
Ventil MFH-5-1/8 je monostabilni 5/2 ventil, električki aktuiran, nazivnog protoka 500 l/min s radnim tlakom u rasponu 1,8 do 8 bar [4]. Na slici 7 prikazan je blok od 9 takvih ventila. Za aktiviranje ventila koriste se elektromagnetske zavojnice MSFG-24/42-50/60-OD koje se moraju zasebno naručiti.



Slika 7. Blok MFH-5-1/8 ventila

Pneumatski ventil MFH-3-M5

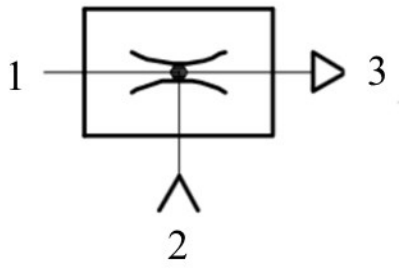
Neposredno pored prethodno spomenutih 9 ventila nalaze se dva MFH-3-M5 ventila. To su monostabilni 3/2 ventili, električki aktuirani sa nazivnim protokom u iznosu od 58 l/min [5]. Za rad ventila potrebno je zasebno nabaviti elektromagnetsku zavojnicu. Na ovoj stanici se koristila zavojnica MSFG-24/42-50/60-OD s radnim napon od 24 V [6].



Slika 8. Pneumatski 3/2 ventil s elektromagnetskom zavojnicom

Generator vakuuma VAD-1/4

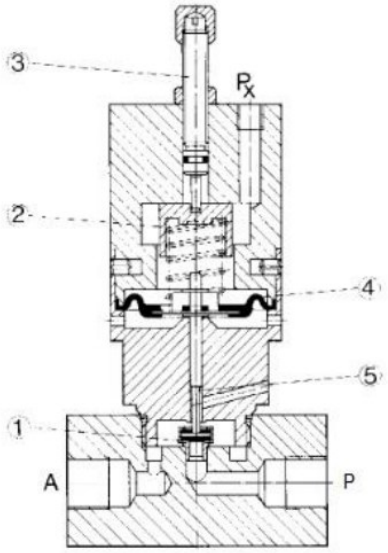
VAD-1/4 je kompaktni generator vakuuma koji djeluje prema Venturijevom principu nastajanja podtlaka. Oba generatora koriste prigušnice radi smanjena buke. Njihov radni tlak iznosi 1.5 - 10 bar i mogu stvoriti podtlak u iznosu do -1 bar [7].



Slika 9. Dva VAD-1/4 generatora vakuuma s prigušnicama

Glava za kontrolu vakuuma VUV

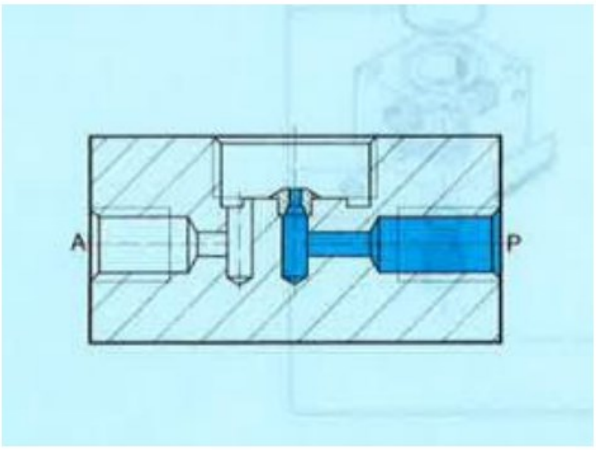
Glava za kontrolu vakuuma (njem. Vakuumschaltkopf) služi kao ventil koji se aktivira dovodom vakuumskog signala. Uz pomoć vijka moguće je namjestiti silu opruge tj., potreban iznos vakuuma za aktivaciju.



Slika 10. Glava za kontrolu vakuuma [8]

Element LC-3-1/8

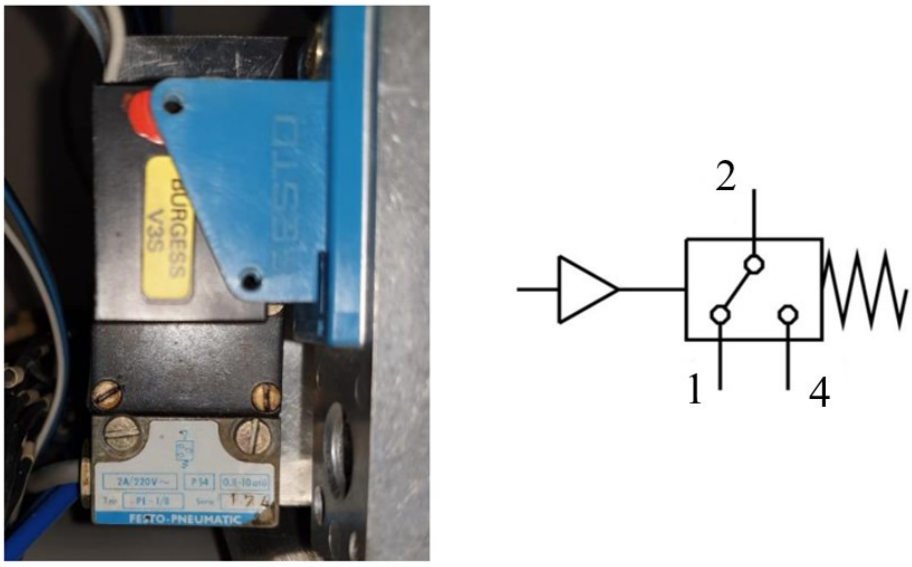
Funkcija ovog elementa ovisi o dodatku koji se koristi na njemu. U našem slučaju to je VUV glava za kontrolu vakuuma iz prethodnog poglavlja. Na slici 11 moguće je vidjeti ovaj dio bez dodataka.



Slika 11. Element LC-3-1/8 [9]

Tlačna sklopka PE-1/8-1N

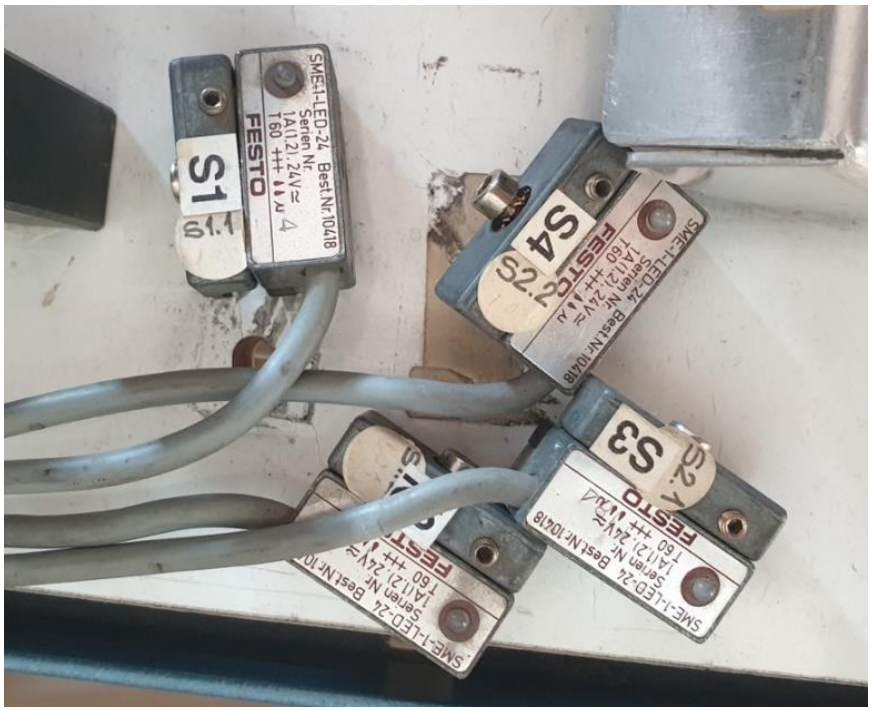
Na slici 12 prikazana je tlačna sklopka koja za aktivaciju koristi zrak pod tlakom do 8 bar. U oznaci komponente „1N“ označen je tip šine na koju se spaja, a „1/8“ označava navoj priključka za crijevo zraka.



Slika 12. Tlačna sklopka PE-1/8-1N [9]

Senzor SME-1-LED-24

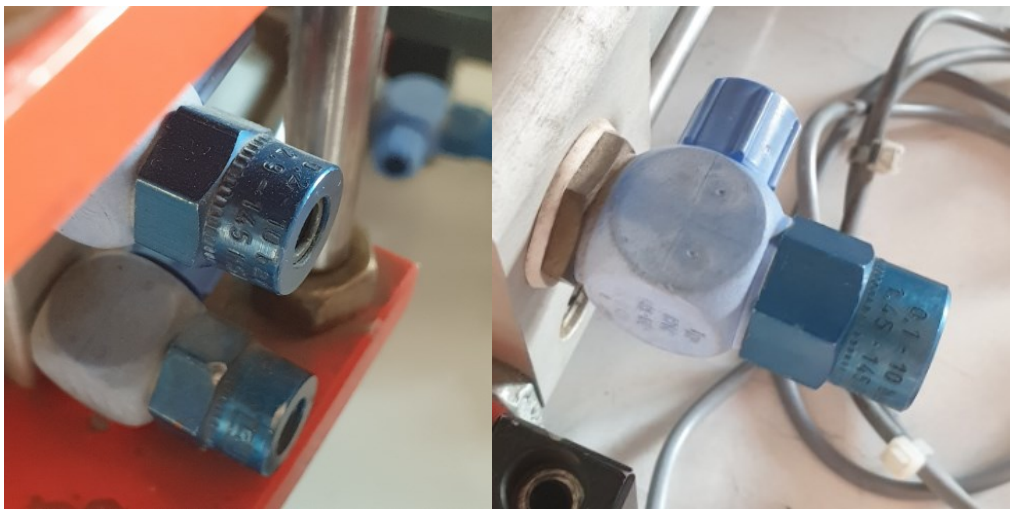
Ovaj senzor služi za detekciju položaja klipa cilindra. Prilikom detekcije, uključuje se LED lampica na senzoru. Nakon testiranja ispravnosti induktivnih senzora na cilindrima uspostavljeno je da su dva neispravna te će stoga biti naručen odgovarajući novi.



Slika 13. Induktivni senzori za poziciju klipa SME-1-LED-24

Raznovrsni prigušni ventili starog tipa

Na radnoj stanici koristili su se prigušni ventili različitih veličina, a zajedničko im je bilo to što se protok u jednom smjeru može regulirati. U svrhu pojednostavljenja, prilikom narudžbe novih prigušnih ventila pazilo se da, koliko god je moguće, budu iste veličine. Kod modernih varijanti pojednostavljen je način spajanja pneumatskih vodova time što više nije potrebno stezati navoj.



Slika 14. Prigušni ventil GRL-1/4-PK-6-KU

3.3. Nove komponente za ugradnju

Upravljački uređaj CONTROLLINO MAXI Automation

Za potrebe ovog projekta odabran je CONTROLLINO industrijsko računalo. CONTROLLINO je industrijski PLC u potpunosti kompatibilan s Arduinom. Osnovna značajka ovog proizvoda je kombinacija pouzdanosti PLC-a i fleksibilnost i otvorenost Arduino ekosustava. Proizvod je austrijske tvrtke CONELCOM GmbH sa sjedištem u Innsbruck-u. U svojoj ponudi nude 3 linije proizvoda:

- CONTROLLINO MINI
- CONTROLLINO MAXI
- CONTROLLINO MEGA

Slika 15. Upravljački uređaji: CONTROLLINO MINI, MAXI i MEGA [10]

CONTROLLINO je moguće programirati u bilo kojem okruženju koje podržava Arduino.

Najpoznatija razvojna okruženja za Arduino su:

- Arduino IDE
- Atmel Studio
- Visual Studio (uz proširenje VisualMicro)
- Eclipse for Arduino
- EmbedXcode (sa MacOS sustav)

U sklopu ovog projekta koristit će se model „MAXI Automation“, jedini model koji ima analogne izlaze i ulaze. U Tablici 1. prikazana je usporedba glavnih karakteristika pojedinog CONTROLLINO modela.

Tablica 1. Usporedba CONTROLLINO modela [11]

	MINI	MAXI	MAXI Automation	MEGA
Analogno/digitalni ulazi	6	10	**12**	16
Isključivo digitalni ulazi	2	2	**6**	5
Analogni 0-10V ulazi	-	-	**2**	2
Digital 2A izlazi	8	12	**8**	24
Analogni 0-10V izlazi	-	-	**2**	-
Releji	6	10	**10**	16
Serijski TTL protokol	DA	DA	**DA**	DA
I²C protokol	DA	DA	**DA**	DA
RS485 protokol	NE	DA	**NE**	DA
Ethernet podrška	NE	DA	**DA**	DA

Ethernet veza omogućit će nam implementaciju razvijenih web-aplikacija npr., daljinsko upravljanje i očitavanje senzora. Deset galvanski izoliranih relejnih izlaza prikladni su za veća opterećenja ili za situacije gdje se koriste uređaji koji rade s 230 V izmjenične struje.

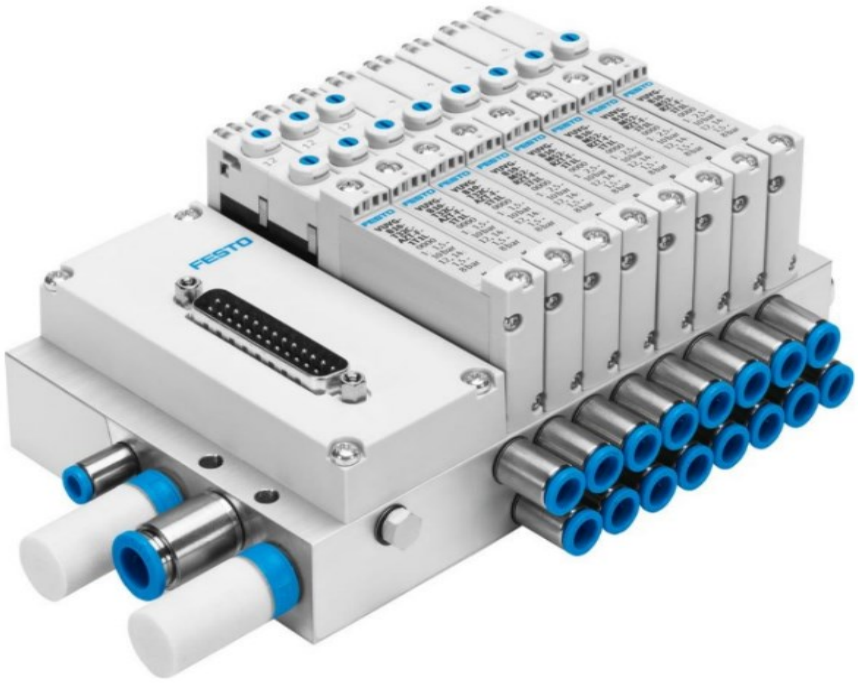
Slika 16. Upravljački uređaj CONTROLLINO MAXI Automation [12]

Ventilski razvodnik VTUG

Ventilski razvodnik VTUG podržava rad do 24 ventila s mogućnošću odabira električne veze. U ovom radu koristit će se multipolski konektor kao na slici 17, no moguće je naručiti model s I/O link-om, CANopen-om, PROFIBUS-om itd. Maksimalni protok za model koji će se koristiti u ovom projektu jest 330 l/min, a nominalno on iznosi 130 l/min -1150 l/min, ovisno o varijanti modela. Razvodnik radi s tlakom u rasponu od -0,9 do 10 bar [13].

U domeni ovog projekta, svi pneumatski ventili koji će se koristiti bit će ugrađeni na jednom ventilskom bloku. Usporedno s trenutnim načinom kako je stanica konstruirana, prednosti koje ćemo s tim dobiti su kompaktnost i organiziranost ožičenja.

.

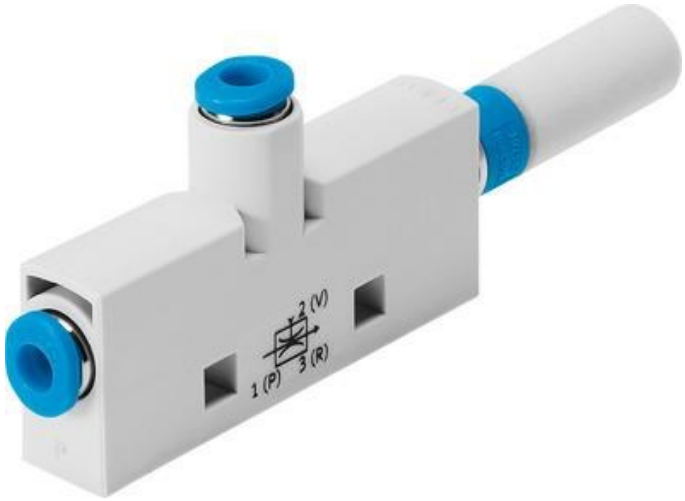


Slika 17. Primjer VTUG ventilskog razvodnika s 8 ventila [13]

Potpuni naziv modela koji će se naručiti glasi: VTUG-10-MSDRB1T-25V20-Q8L-UL-Q6S-11AK-M1. Razvodnik koji će biti korišten na stanici imat će jedanaest 5/2 monostabilnih ventila i dva 3/2 monostabilna ventila. Devet od jedanaest 5/2 ventila mijenjat će stare ventile iz prethodnog poglavlja, a ostala dva će se koristiti kod upravljanja protokom za vakuumske hvataljke.

Generator vakuuma VN-05-H-T3-PQ2-VQ2-RO1

S ovom komponentom zamjenjujemo stari generator vakuuma opisanog u prethodnom poglavlju. Radi s ulaznim tlakom u rasponu 1–8 bar i generira maksimalan vakuum u iznosu od -0,9 bar. Još jedna razlika naspram starog generatora vakuuma, osim u veličini, jest u tome što se ovdje koriste utični priključci za vodove promjera 6 mm [14].



Slika 18. Generator vakuuma VN-05-H-T3-PQ2-VQ2-RO1 [14]

Senzor vakuuma SDE5-V1-FP-Q6-P-M8

S ovim senzorom dobivamo povratnu informaciju o tome da li je predmet prihvaćen s vakuumskom hvataljkom. Na senzoru postoji tipka s kojom se može programirati modul rada. Za konekciju se koristi 3-pinski kabel (puno ime: NEBU-M8G3-K-5-LE3) kao na slici 19.

Slika 19. Senzor vakuuma i njegov konektor [15]

Vakuumska hvataljka VAS-15-1/8-NBR

Stare i dotrajale vakuumske hvataljka potrebno je zamijeniti novima. Dimenzije novih su iste, a jedina razlika je u materijalu izrade. Novi model je izrađen od nitrilne gume (skraćeno: NBR).

Slika 20. Vakuumska hvataljka [16]

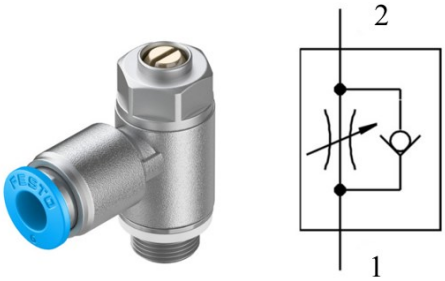
Induktivni senzor SME-8M-DS-24V-K-2,5-OE

Kako dva induktivna senzora ne rade ispravno, potrebno je naručiti nove. Uz njega naručen je i montažni komplet SMBR-8-16 (slika 21, desno).

Slika 21. Induktivni senzor i njegov držač [17]

Prigušno nepovratni ventili

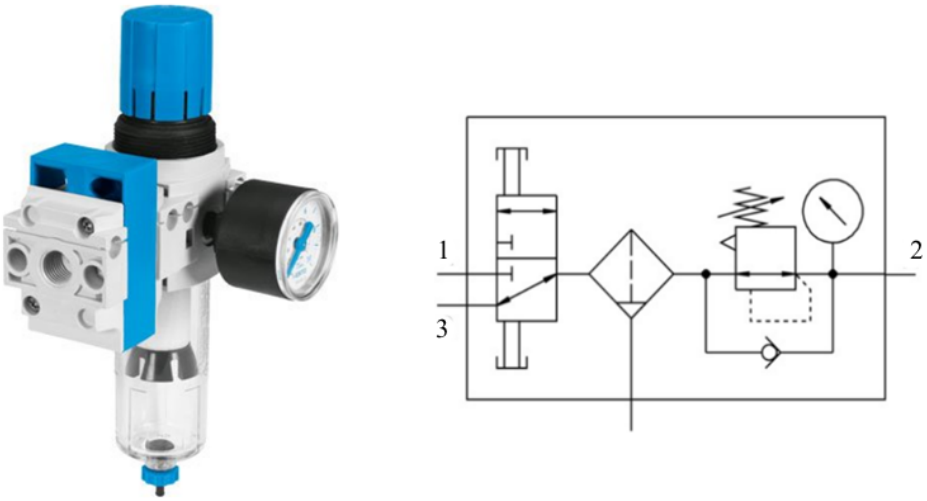
Postojeći ventili na radnoj stanici koriste zastarjele načine spajanja vodova i uz to svaki od njih prima različite promjere crijeva. S ovom narudžbom riješit će se oba problema. Naručeni su modeli: GRLA-1/8-QS-6-D, GRLA-M5-QS-6-D, GRLA-3/8-QS-6-D.



Slika 22. Novi prigušno nepovratni ventil [18]

Pripremna grupa LFR-1/4-DB-7-MINI-KC

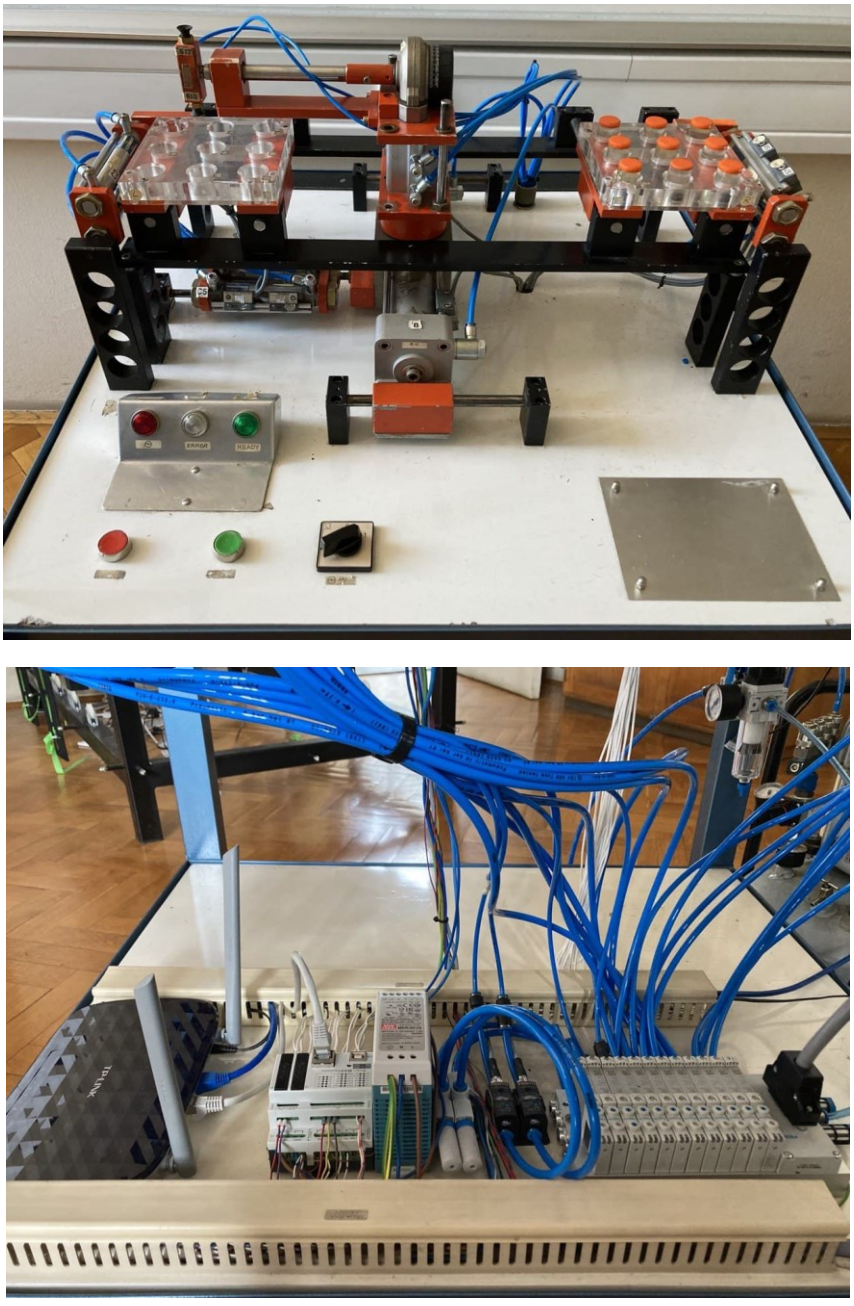
Pripremna grupa za zrak je kombinacija filtra, zauljivača i regulatora u jednom. Moguće je regulirati tlak zraka u rasponu od 0,5 do 7 bar-a. Dotok zraka se aktivira i deaktivira ručno, a nazivni protok iznosi 1900 l/min. [19]



Slika 23. Pripremna grupa LFR-1/4-DB-7-MINI-KC [19]

3.4. Stanje nakon ugradnje novih komponenti

Na slici 24 prikazano je stanje na radnoj stanici nakon što se ugrade novi dijelovi. Na slici se još vidi 24V napajanje i ruter o kojem će se kasnije biti riječ.



Slika 24. Stanje radne stanice nakon ugradnje novih komponenti

4. PROTOKOL ZA PODATKOVNU KOMUNIKACIJU MODBUS TCP/IP

Modbus je komunikacijski protokol za prijenos informacija između elektroničkih uređaja putem serijske veze ili preko Etherneta. U upotrebi je više od 40 godina, a svoj uspjeh i rasprostranjenost duguje ponajviše svojoj jednostavnosti, robusnosti i činjenici da je besplatan za korištenje. Svoju primjenu pronalazi ponajviše u području industrijske automatizacije.

Cijela komunikacija temelji se na Master/Slave odnosu između uređaja. U takvom odnosu komunikacija se uvijek odvija u paru - jedan uređaj inicira zahtjev i čeka odgovor. Modbus uređaj koji inicira zahtjeve zove se *Master (*ili *Server* kod Modbus TCP/IP *)* i on je odgovoran za započinjanje svake interakcije.

Postoje četiri tipa poruka koji se mogu izmijeniti unutar Modbus komunikacije:

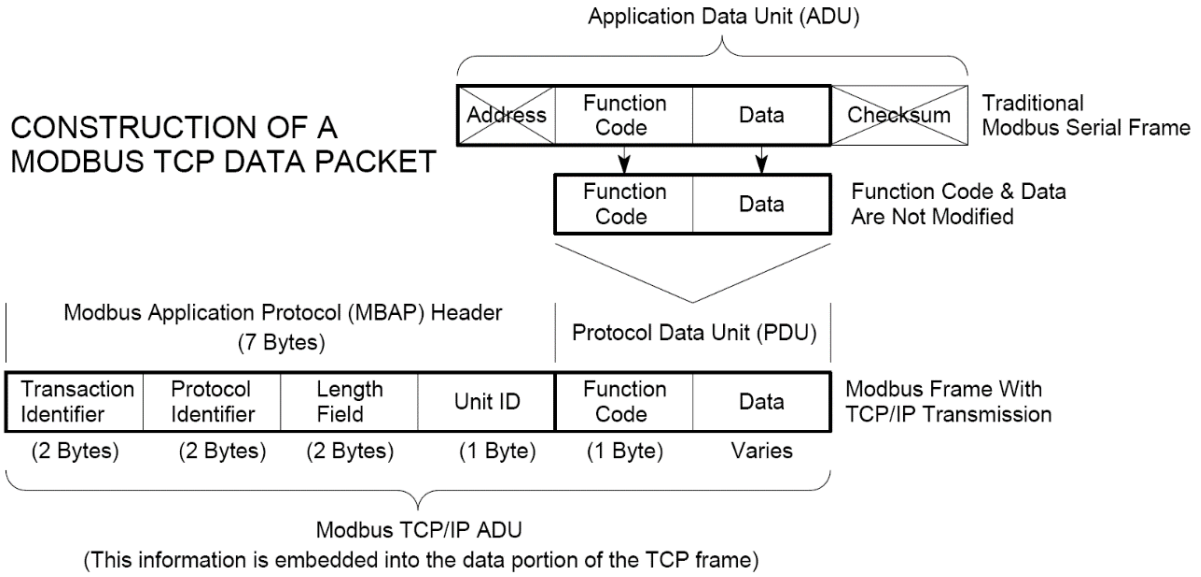
- MODBUS Request - poruka koju šalje klijent da bi inicirao izmjenu
- MODBUS Response - odgovor koji šalje server (npr. glavni PLC) klijentu
- MODBUS Indication - poruka koju je primio server
- MODBUS Confirmation - poruka koju je primio klijent

Redoslijed izmjena poruka prikazan je vizualno na slici 25:

Slika 25. Modbus *Client*/*Server* izmjena poruka [20]

Modbus je izvorno kreiran kao jedan protokol namijenjen samo za serijske veze. Kako je rasla potražnja za Modbusom, javila se potreba za promjenom u jezgri protokola koja bi omogućila implementaciju ostalih komunikacijskih veza. Stoga sad postoje dva sloja u Modbus poruci: Protocol data unit (PDU) i, onaj mrežni sloj, Application data unit (ADU). PDU se sastoji od 1-bitnog funkcijskog koda koji je popraćen sa 252-bitnim podatkom. ADU dio se odnosi na cjelokupnu poruku tj. to je PDU koji u zaglavlju još ima i dio za TCP/IP komunikaciju. Razlika u strukturi ADU-a naspram serijskog Modbus RTU (engl. Remote Terminal Unit) je u tome što

je izbačen dio za provjeru integriteta poruke i u tome što se za adresiranje sad koriste IP adrese, kao što je prikazano na slici 26.



Slika 26. Struktura jednog Modbus TCP/IP paketa [21]

Svaki Modbus *Slave*/*Client* uređaj koristi tablice kako bi upravljao ulazno/izlaznim podacima. Podaci se mogu spremati u jedan od četiri moguća tipa tablica kao što je to prikazano u tablici 2. Na jednoj adresi stane 2 bajta podataka, točnije jedan pozitivan decimalni broj u rasponu od 0 do 65536. U slučaju da želimo poslati više od 2 bajta podataka, npr. neki broj puno veći od 65536, potrebno je zauzeti dvije adrese za taj podatak.

Tablica 2. Tipovi Modbus tablica

Ime tablice	Tip	Adresni rang	Veličina
Diskretni izlazi	Čitanje/pisanje	00001 - 09999	1 bit
Diskretni ulazi	Samo čitanje	10001 - 19999	1 bit
Analogni ulazni registri	Samo čitanje	30001 - 39999	16 bita
Analogni izlazni registri	Čitanje/pisanje	40001 - 49999	16 bita

Da bi se manipuliralo podacima u tablici potrebno je najprije *Slave*/*Client* uređaju poslati neki od funkcijskih kodova. Definicija svakog funkcijskog koda određena je standardom. Tablica 3. prikazuje najčešće korištene funkcijske kodove.

Tablica 3. Najbitniji funkcijski kodovi

Tip funkcije		Ime funkcije	Kod
1-bit pristup	Fizički diskretni ulaz	Čitanje statusa ulaza	2
	Interni bitovi	Čitanje statusa bita	1
		Postavljanje jednog bita	5
		Postavljanje više bitova	15
16-bit pristup	Fizički ulazni registri	Čitanje ulaznog registra	4
	Interni registri	Čitanje *Holding* registra	3
		Postavljanje jednog registra	6
		Postavljanje više registara odjednom	16

U sklopu ovog diplomskog rada korištene su samo funkcije za postavljanje i čitanje *holding* registara, dakle funkcijski kodovi 3 i 6.

TCP (engl. Transmission Control Protocol) je komunikacijski standard koji omogućuje izmjenu podataka između uređaja na mreži. TCP definira da se, nakon uspostave konekcije između servera i klijenta, poruka najprije podijeli u manje pakete kako bi se izbjegla situacija u kojoj se cijela poruka mora ispočetka poslati u slučaju greške u prijenosu. IP (engl. Internet Protocol) protokol se često spominje zajedno uz TCP. On je odgovoran za ispravno adresiranje poruka i usmjeravanje poruka između uređaja.

TCP i IP su protokoli za prijenos podataka, međutim oni ne određuju kako će se ti isti podaci interpretirati. To je zadatak aplikacijskog protokola, u našem slučaju Modbus-a. Stoga, Modbus TCP/IP koristi fizičku mrežu (Ethernet) da bi, zajedno sa mrežnim standardom (TCP/IP), enkapsulirao Modbus komunikaciju.

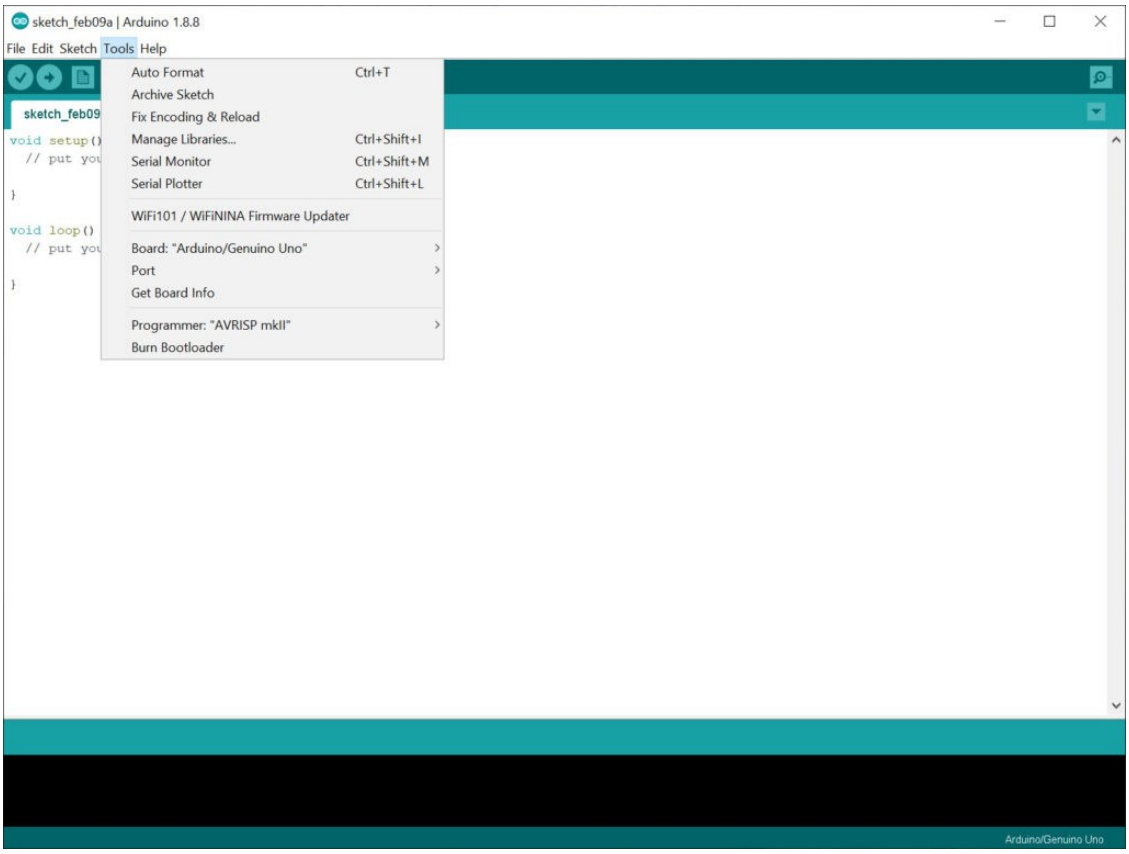
5. UPRAVLJAČKI PROGRAM PNEUMATSKE RADNE STANICE

U ovom poglavlju obradit će se izrada programa koji će izvoditi na CONTROLLINO PLC-u.

5.1. Arduino programski jezik

CONTROLLINO PLC, kao što je već spomenuto, se programira u Arduino jeziku koji se temelji na C++ jeziku. Koristi se ograničen broj standardnih C++ biblioteka tako da bi program bio kompatibilan s Arduino uređajima koji sami po sebi imaju malo radne memorije i ograničene procesorske mogućnosti.

Arduino IDE (engl. Integrated Development Enviroment) je program otvorenog kôda koji služi za pisanje i učitavanje kôda na Arduino kompatibilnim pločicama. Navedeno sučelje je više nego dovoljno opremljeno za pisanje jednostavnih programskih rješenja. Međutim, kako složenost programa raste, javlja se potreba za korištenjem naprednijih razvojnih okruženja koji nude dodatne mogućnosti.

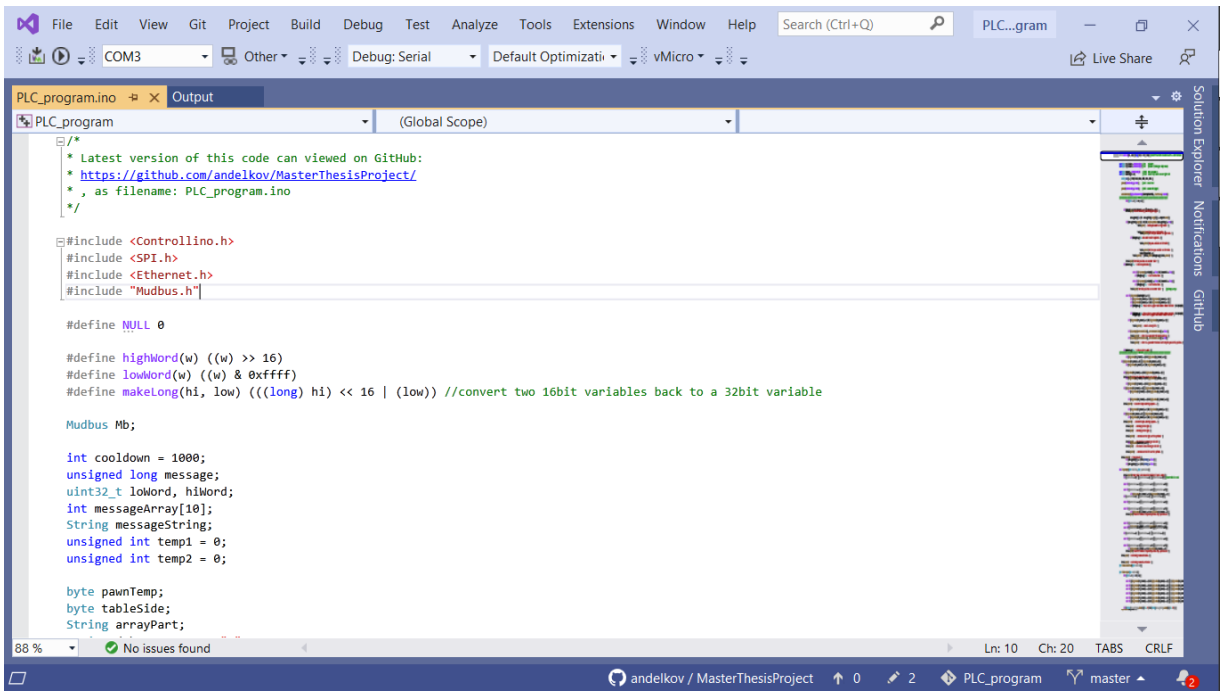


Slika 27. Arduino IDE sučelje

.

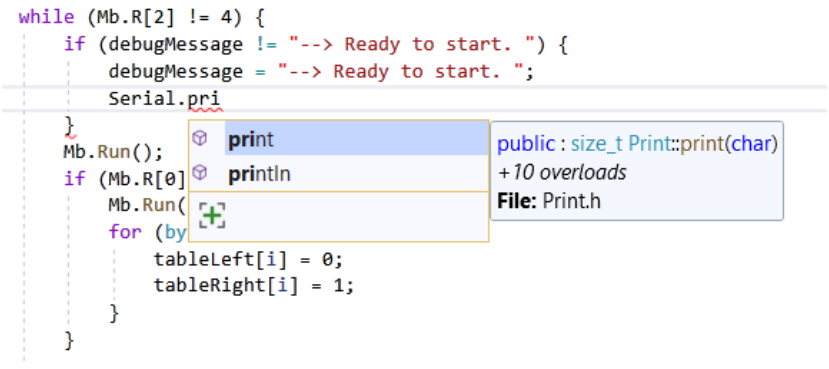
5.2. Razvojno okruženje Visual Studio 2019

Programski kôd stanice napisan je u programu Visual Studio 2019. Proizveden i održavan od strane Microsoft-a, Microsoft Visual Studio ili kraće VS je integrirano razvojno okruženje koje se koristi za razvoj računalnih programa, web stranica, web aplikacija, web servisa, mobilnih aplikacija itd. Sučelje nije vezano za jedan jezik kao što je to npr. Arduino IDE (engl. Integrated Development Enviroment) pa se stoga može koristiti za pisanje kôda u C, C++, C#, Python, JavaScript i za mnoge druge programske jezike.



Slika 28. Visual Studio 2019 sučelje

Visual Studio, kao i većina naprednih IDE-a, ima ugrađeni alat za inteligentno dovršavanje kôda imena *IntelliSense*. Dok unosimo kod, *IntelliSense* pokušava preko različitih algoritama predvidjeti što želimo upisati i potom nam nudi prijedloge u iskočnom prozoru (slika 29). Time se značajno smanjuju tipografske i sintaksne pogreške prilikom programiranja.



Slika 29. *IntelliSense* prijedlog prilikom tipkanja

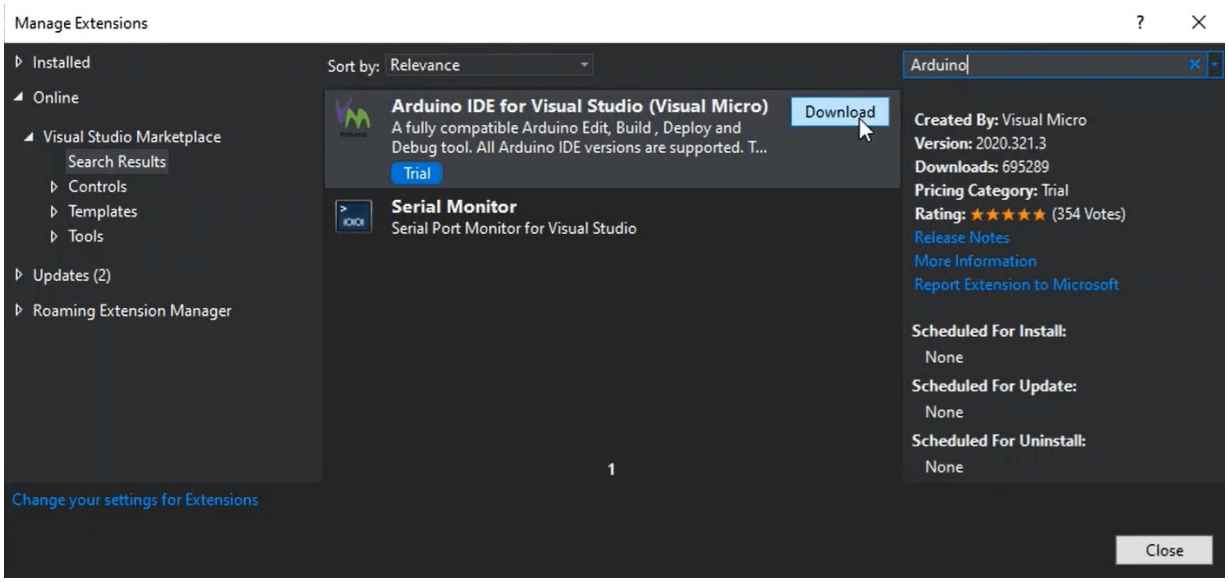
Nadalje, ako se program u bilo kojem trenutku ne izvodi očekivano, moguće je iznova pokrenuti program u tzv. *debugging* način rada. U tom načinu rada moguće je npr. pauzirati program kada izvršavanje dođe do određene linije koda te na taj način ući u trag *bug*-u. Također, prilikom izrade rada korišten je *git* sustav kontrole verzije preko proširenja „GitHub“ kojeg je potrebno zasebno instalirati.

Ove i mnoge druge mogućnosti nisu dostupne u programu Arduino IDE. Program Visual Studio sam po sebi ne podržava Arduino jezik, stoga je potrebno instalirati dodatak Visual Micro. Osim što s ovim proširenjem dobijemo podršku pisanja za Arduino jezik, taj dodatak je neophodan ako želimo kôd kompilirati i poslati na PLC ili Arduino pločicu.

5.3. Konfiguriranje razvojnog okruženja

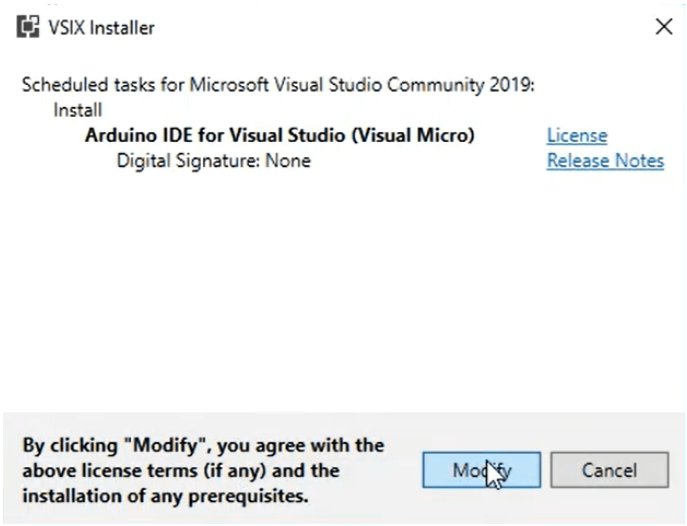
Potrebno je najprije program Visual Studio 2019 preuzeti s Interneta. Na raspolaganju se nude tri inačice: Visual Studio 2019 *Community, Professional* i *Enterprise*. *Community* verzija je dovoljno opremljena značajkama za potrebe ovog rada i besplatna je ako se prijavimo s Microsoft računom.

Nakon instalacije, potrebno je preuzeti dodatak VisualMicro. Jedan od lakših načina za preuzeti taj dodatak jest da koristimo upravitelj za proširenja unutar programa. To činimo tako da na glavnoj izbornoj traci odaberemo: *Extensions* > *Manage Extension*, u tražilicu unesemo „Arduino“ i potom odaberemo „Arduino IDE for Visual Studio (Visual Micro)“.



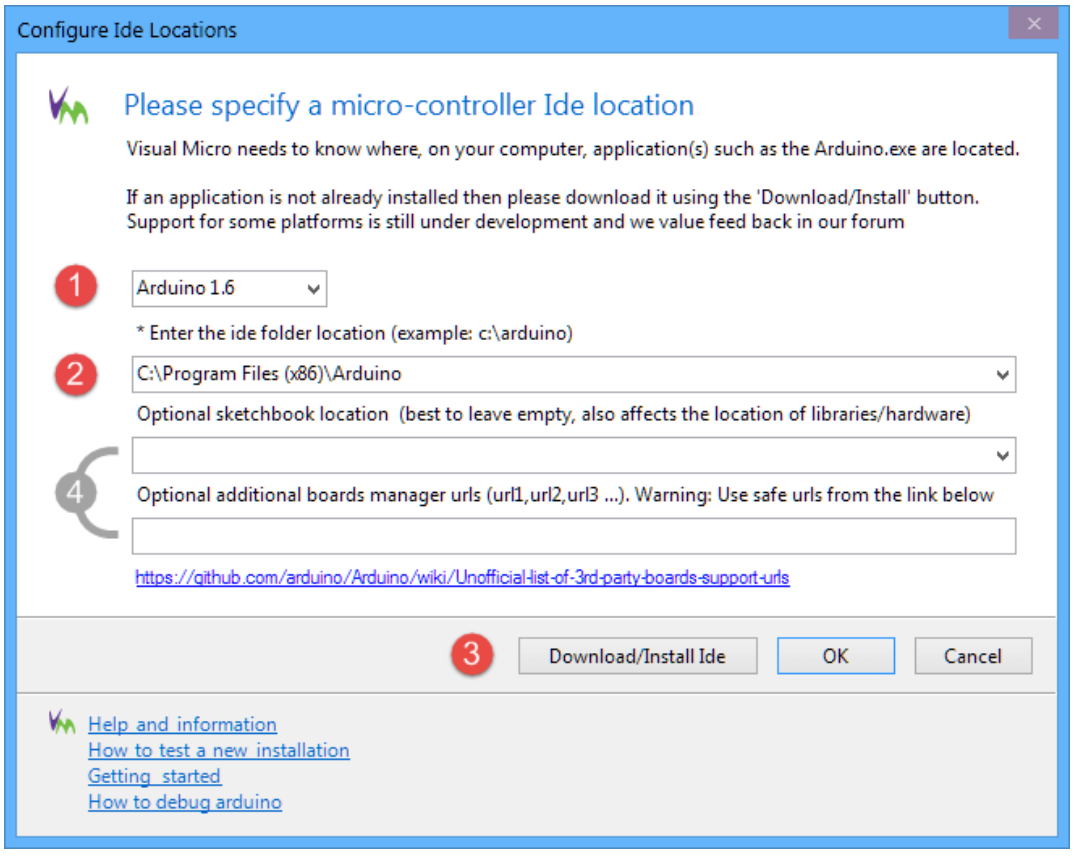
Slika 30. Preuzimanje proširenja Visual Micro

Klikom na *Download* dočekat će nas prozor kao na slici 31. Instalaciju možemo započet odabirom *Modify*. Nakon uspješne instalacije potrebno je ponovno pokrenuti Visual Studio.



Slika 31. Instaliranje dodatka Visual Micro

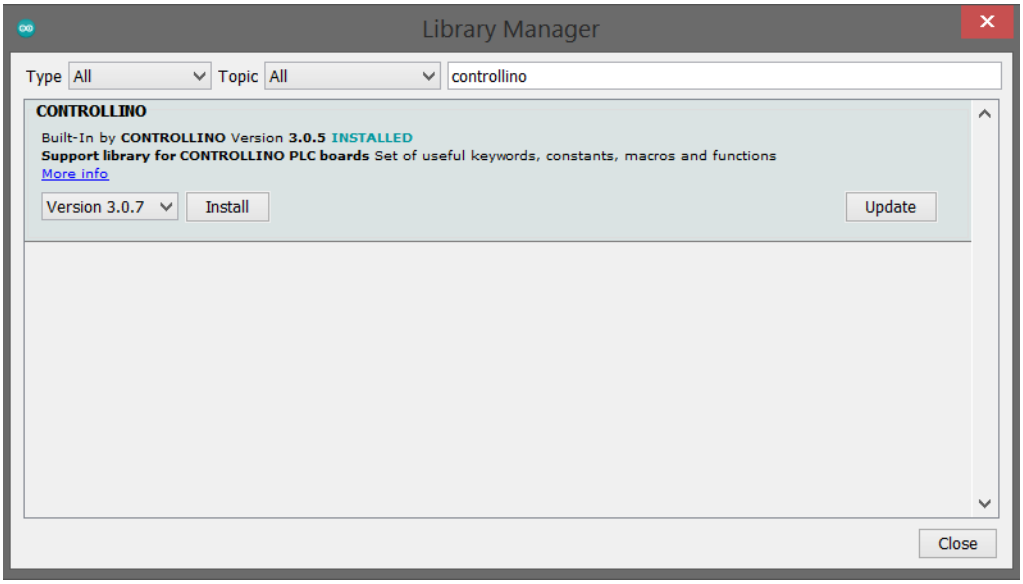
Prilikom prvog pokretanja nakon instalacije dočekat će nas prozor *Configuration Manager* gdje je potrebno definirati mapu u kojoj se nalazi instalacija Arduino IDE-a. Ako on ne postoji, moguće ga je preuzeti i instalirati odabirom tipke *Download/Install Ide.*



Slika 32. Definiranje Arduino IDE instalacijske mape

Polje *Optional sketchbook location* definira adresu mape u kojoj će Visual Micro potražiti korisničke biblioteke. Ako se ovo polje ostavi prazno, Visual Micro će koristiti istu lokaciju kao što ju koristi Arduino IDE.

Da bi mogli programirati PLC potrebno je najprije instalirati službene CONTROLLINO biblioteke za Arduino. Ovdje će se pokazati instalacija preko programa Arduino IDE. Nakon pokretanja programa, u glavnoj izbornoj traci potrebno je odabrati *Sketch>Include Library>Manage Libraries*. Pojavit će se prozor kao na slici 33. U tražilicu upišemo „controllino“ i odabiremo *Install* na prvom rezultatu.



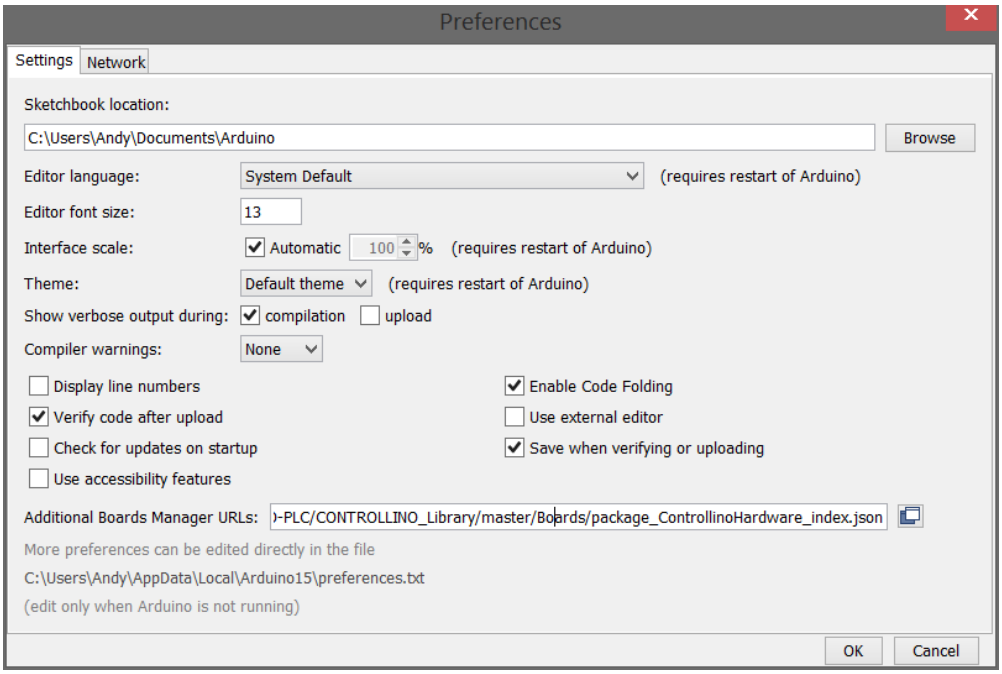
Slika 33. Instaliranje CONTROLLINO biblioteka

Uspješnost instalacije možemo provjeriti tako da u glavnoj alatnoj traci pod Sketch>Include vidimo da li postoji biblioteka CONTROLLINO. Na isti način potrebno je provjeriti da je instalirana biblioteka „Ethernet“ i „SPI“. Za implementaciju Modbus TCP/IP protokola korištena je bilbioteka „Mudbus.h“, koja se ručno instalira tako da se kopira u mapu *libraries* koja se nalazi unutar instalacijske mape Arduina, a ona se može preuzeti s poveznice:

https://github.com/luizcantoni/mudbus

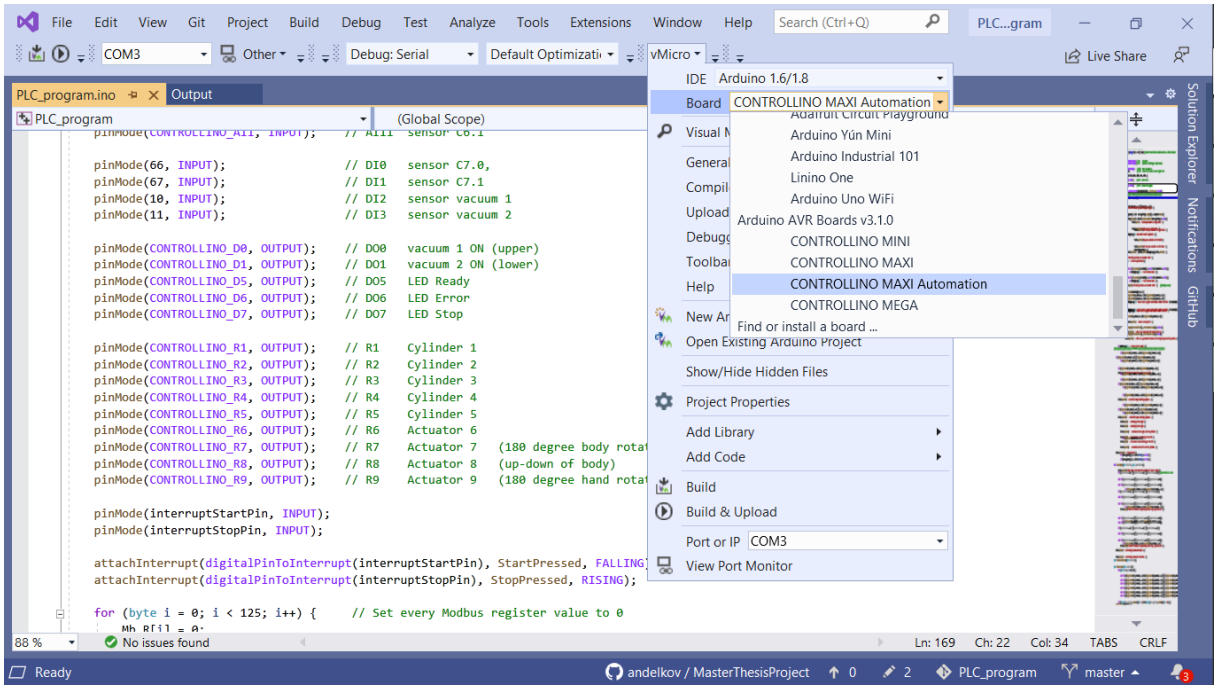
U posljednjem koraku konfiguracije potrebno je još da u postavkama navedemo web poveznicu koja nosi dodatne informacije o CONTROLLINO pločama. Poveznica se unosi u postavkama pod *File>Preferences* u polju *Additional Boards Manager URLs* kao što je prikazano na slici 34. Poveznica koju je potrebno unijeti glasi [22]:

https://raw.githubusercontent.com/CONTROLLINO-PLC/CONTROLLINO_Library/master/Boards/package_ControllinoHardware_index.json



Slika 34. Unos web poveznice u Arduino IDE-u

CONTROLLINO PLC, kao i bilo koja druga Arduino pločica, se s računalom može povezati pomoću USB kabela. Nakon povezivanja još preostaje odabrati *port* i vrstu uređaja kojeg programiramo pod *Extensions>vMicro>Board* i pod *Extensions>vMicro>Port or IP* kao što je prikazano na slici 35.



Slika 35. Instaliranje CONTROLLINO biblioteka

5.4. Struktura programa

Programski kôd radne stanice može se podijeliti na četiri dijela:

- U **prvom dijelu** navedene su globalne varijable, definicije konstanti i biblioteke koje se uvoze.
- U **drugom dijelu**, pod funkcijom *setup*, izvršava se inicijalizacija. Ovdje se definiraju mrežne postavke za PLC, uspostavlja serijska komunikacija i definiraju ulazni/izlazni pinovi. Ovaj dio kôda izvršava se jedanput i to prilikom pokretanja PLC-a.
- U **trećem dijelu**, pod funkcijom *loop*, nalazi se dio kôda koji će se izvršavati u petlji dokle god je PLC uključen.
- U **četvrtom dijelu**, ispod funkcije *loop*, nalaze se funkcije koje će se pozivati unutar *loop*-a. Pisanjem funkcija značajno skraćujemo kôd i olakšavamo njegovo čitanje.

5.4.1. Inicijalizacijski dio programa

U prvom dijelu pozivamo biblioteke sa ključnom riječi *#include* kao u primjeru na slici 36.

```
#include <Controllino.h>
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include "Mudbus.h"

#define NULL 0

#define highWord(w) ((w) >> 16)
#define lowWord(w) ((w) & 0xffff)
#define makeLong(hi, low) (((long) hi) << 16 | (low)) //convert two 16bit variables back to a 32bit variable

Mudbus Mb;
```

Slika 36. Uvodni dio kôda radne stanice

Biblioteka *Controllino.h* olakšava posao pisanja kôda time što za pozivanje pinova je potrebno samo koristiti ključne riječi, umjesto da se pamti broj za svaki pin. Primjer korištenja bit će vidljiv kasnije. Biblioteka *SPI.h* (skraćeno Serial Peripheral Interface) omogućuje komunikaciju s perifernim uređajima. U našem slučaju ova biblioteka je potrebna da bi mogli koristiti Ethernet modul na CONTROLLINO PLC-u. *Ethernet.h* biblioteka omogućava spajanje Arduina s Internetom. U ovom radu PLC će biti konfiguriran sa statičnom IP adresom, mada je moguće postaviti da se Arduino spaja u lokalnu mrežu s DHCP-om. Biblioteka *Mudbus.h* implementira Modbus TCP/IP protokol za *Slave/Client* uređaje.

Ispod biblioteka, sa ključnom riječi *#define* odredili smo da riječ *NULL* označava brojčanu vrijednost nula i ispod toga još tri, uvjetno rečeno, funkcije. S tim „funkcijama“ moguće je zaobići jedno ograničenje koje nosi Modbus, a to je činjenica da je on dizajniran da prenosi 16-bitne podatke. Jedan od načina da se doskoči problemu jest da se 32-bitni broj najprije podjeli na dva 16-bitna broja i da se oni pošalju u dva registra. Program će pročitati te registre, te uz pomoć *bitwise* operacija rekonstruirati originalni broj.

Nadalje, sa dva *array*-a spremamo aktualne pozicije valjčića na stolovima. Svaki stol ima po 9 pozicija, ali odabran je *array* s 10 članova tako da bi se olakšalo čitanje koda pošto numeriranje članova počinje od 0 (nula). Iz tog razloga je dodan *NULL* na prvom mjestu, odnosno 0. Ti *array*-i, kao i varijable ispod njih, globalne su varijable što znači da one mogu pozvati i modificirati u bilo kojem dijelu programa.

U drugom dijelu programa, unutar vitičastih zagrada ispred *setup()* stavlja se kôd koji će se izvoditi jedanput, prilikom pokretanja Arduina. U ovom dijelu konfiguriraju se Internet postavke. MAC adresa je jedinstveni identifikacijski broj uređaja na mreži. Nije neuobičajeno da se ona definira od strane korisnika programatski kao što je to pokazano na slici 37. Ispod toga definira se IP adresa uređaja. Radna stanica će imati svoju statičnu IP adresu, međutim nju će koristiti ruter koji će potom promet preusmjeravati na lokalnu IP adresu PLC koju smo definirali ovdje. *Gateway* je IP adresa čvorišne točke koja stoji na putu između jedne mreže i druge. Ovdje je definirana čvorišna točka jedne mreže na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Subnet adresu nije nužno unijeti, ali je koristna ako se podesi, pošto pomaže da poruka kraće putuje do mrežnog odredišta.

```
void setup() {
    uint8_t mac[] = { 0x90, 0xA2, 0xDA, 0x00, 0x51, 0x06 };
    uint8_t ip[] = { 192, 168, 0, 160 };
    uint8_t gateway[] = { 161, 53, 116, 1 };
    uint8_t subnet[] = { 255, 255, 252, 0 };
    Ethernet.begin(mac, ip, subnet);

    delay(2000);

    Serial.begin(9600);
    Serial.print("Started. ");
    Serial.print("My IP address: ");
    Serial.println(Ethernet.localIP());
```

Slika 37. Isječak iz *setup()* dijela kôda

Unutar *setup()* je također potrebno explicitno definirati način rada za svaki *pin* koji ćemo koristiti. Umjesto da pišemo broj *pin*-a, koristit ćemo ključne riječi koje nudi CONTROLINNO biblioteka za Arduino pa tako, umjesto pisanja broja 29, može se napisati samo „CONTROLLINO_R9“.

Kako bi se mogle koristiti start i stop tipke na stanici, potrebno je koristiti *attachInterupt()* funkciju. U slučaju da korisnik pritisne neku od tipki, program na glavnoj petlji se zaustavlja i nastavlja se izvoditi unutar funkcije koju smo sami definirali. Na slici 38 se vidi da su za to definirane funkcije *StartPressed* i *StopPressed.*

Zadnji korak unutar *setup()* jest postaviti sve Modbus adrese u nulu, osim registra 5 i 2. Registar 2 služi kao statusni registar i upisivanjem vrijednosti 2 u njega javljamo *Masteru*/*Serveru* da se stanica nalazi u pripravnom stanju. Registar 5 i 6 primaju naredbe o pozicioniranju valjčića i, pošto vrijednost 0 (nula) ima značenje, ovdje su oni postavljeni u negativnu vrijednost.

```
    pinMode(CONTROLLINO_R7, OUTPUT);    // R7    Actuator 7   (180 degree body rotate)
    pinMode(CONTROLLINO_R8, OUTPUT);    // R8    Actuator 8   (up-down of body)
    pinMode(CONTROLLINO_R9, OUTPUT);    // R9    Actuator 9   (180 degree hand rotate)

    pinMode(interruptStartPin, INPUT);
    pinMode(interruptStopPin, INPUT);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptStartPin), StartPressed, FALLING);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptStopPin), StopPressed, RISING);

    for (byte i = 0; i < 125; i++) {     // Set every Modbus register value to 0
        Mb.R[i] = 0;
    }
    Mb.R[5] = -1;   // For Auto mode
    Mb.R[6] = -1;   // For Auto mode
    Mb.R[2] = 2;    // Set status to "Power on"
    Serial.println("Modbus registers set to 0.");
}
```

Slika 38. Isječak iz *setup()* dijela kôda

5.4.2. Izvršni dio programa

Program stranice ima tri modula rada:

- Automatski
- *Point-to-point*
- Ručno upravljanje

O svakom načinu rada bit će zasebno napisano kako funkcionira. Struktura izvršnog dijela programa prikazana je na slici 39.

```
//////////////////////////////// MAIN ////////////////////////////////////////////
void loop() {

    while (Mb.R[2] != 4) {
        if (debugMessage != "--> Ready to start. ") {
            debugMessage = "--> Ready to start. ";
            Serial.println(debugMessage);
        }
        Mb.Run();
        if (Mb.R[0] == 2){ ... }

        digitalWrite(LED_Start, 0);
        delay(500);

        digitalWrite(LED_Start, 1);
        delay(500);
        Mb.Run();
    }

    Mb.Run();

    switch (Mb.R[3]) {
    case 1:
        ...
        break;
    case 2:
        ...
        break;
    case 3:
        ...
        break;
    default:
        if (modeMessage != "--> Please select a mode."){ ... }
        break;
    }
}
```

Slika 39. Pregled *loop()* petlje

Ulaskom programa u *loop()* prvo se ispiše poruka u terminalu. Program potom čeka da se vrijednost statusnog registra 2 promjeni u 4 što bi označavalo da program nije više u stanju mirovanja. Dok se ona ne promjerni, moguće je definirati koji stol je popunjen s valjčićima preko registra 0. Na mjestima gdje se kôd vrti u petlji, dodana je naredba „Mb.Run()“ koja služi za osvježavanje Modbus tablice i slanje povratnih poruka *Server*-u. Nakon izlaska iz stanja mirovanja, sljedeća naredba koju očekuje program jest odabir modula rada. Za to se koristi registar 3 i Arduino naredba *switch*.

5.4.2.1. Automatski način

Ideja ovog načina rada jest da se sa jednom naredbom od 9 binarnih znamenki definira raspored i brojčano stanje valjčića na pojedinom stolu. Odabrano je da naredba mora imati 9 znamenki pošto je to broj mjesta za valjčiće na svakom stolu. Broj „1“ označava popunjeno, a „0“ prazno

polje. Pa tako naredba „111000111“ govori da želimo da prvi i treći red na stolu budu popunjeni. Prije slanja te naredbe potrebno je najprije odabrati stol koji želimo popuniti ili isprazniti tako što ispunimo registar 7 s vrijednošću „1“ (lijevi stol) ili „2“ (desni stol).

Budući da za spremanje broja s 9 znamenki potrebna 32-bitna varijabla, zadaća je *Server*/*Master* uređaja da ispravno ispuni dva registra s 16-bitnim podacima. Na slici 40 prikazan je dio koji se bavi zaprimanjem 32-bitnog broja.

```
case 1:
    if (modeMessage != "--> Auto-mode selected.") {
        modeMessage = "--> Auto-mode selected.";
        Serial.println(modeMessage);
    }

    temp1 = Mb.R[6];
    temp2 = Mb.R[5];

    if ((Mb.R[6] >= 0) && ((Mb.R[7] == 1) || (Mb.R[7] == 2))) {

        message = makeLong(temp1, temp2);
        Serial.print("Received Mb.R[5] and Mb.R[6] messages: ");
        Serial.print(Mb.R[5]);
        Serial.print(", ");
        Serial.println(Mb.R[6]);
        Serial.print("Coververted Mb.R[5] and Mb.R[6] messages: ");
        Serial.print(temp1);
        Serial.print(", ");
        Serial.println(temp2);

        messageString = String(message);
```

Slika 40. Zaprimanje 32-bitnog broja

Nadalje, program provjerava je li zaprimljeni broj kraći od 10 znamenki i sadrži li samo binarne znamenke. Potom se, ovisno o odabranoj strani stola, izvršava algoritam za raspoređivanje valjčića za tu stranu. Na slici 41 prikazan je dio tog algoritma.

```
if ((messageString.length() < 10) && (onlyBinaryNumbers(messageString) == true)) {
    if (Mb.R[7] == 1) {
        Serial.println("--> Filling table 1. ");
        for (byte j = 1; j < 10; j++) {
            Mb.Run();
            Serial.print("--> Doing j number: ");
            Serial.println(j);
            if (messageArray[j] == 1) {

                if (tableLeft[j] != 1) {
                    pawnTemp = findAvailablePawn(2);
                    Serial.print("--> Found pawn number at right table: ");
                    Serial.println(pawnTemp);
                    if (pawnTemp == 0) {
                        Serial.println("No pawns available at right table");
                    }
                    else {
                        rotateRight();
                        goTo(2, pawnTemp);
                        pawnPickUp();
                        tableRight[pawnTemp] = 0;

                        rotateLeft();
                        goTo(1, j);

                        pawnDrop();
                        tableLeft[j] = 1;
                    }
                }
            }
            else if (messageArray[j] == 0) {
```

Slika 41. Isječak algoritma za automatsko slaganje valjčića

Algoritam se sastoji od *for* petlje koja broji od 1 do 9. Taj broj koristi se da bi se pristupilo vrijednostima u *array*-u. Ako je za zadanu iteraciju pronađena vrijednost „1“, algoritam će potražiti figuru na suprotnom stolu, uzet ju i potom ostaviti na traženi stol u broj pozicije jednak broju iteracije. Ako je za zadanu iteraciju pronađena vrijednost „0“, algoritam će potražiti prvo slobodno mjesto na drugom stolu i, ako ga ima, odnijet će valjčić tamo. Nakon što sve iteracije završe, algoritam će registre 5 i 6 postaviti u negativnu vrijednost tako da se modul zaustavi od ponovnog izvršavanja i čekat će sljedeći unos korisnika.

5.4.2.2. Point-to-point

U ovom modulu rada korisnik odabire jedan valjčić koji će biti prihvaćen i potom definira mjesto na kojem će se on ostaviti. Strana stola s kojeg će uzeti ili ostaviti valjčić se definira u registru 9. Ako se taj registar ostavi praznim, program će automatski definirat stranu stola preko senzora za poziciju stola. Koristeći Arduino petlju *do,while* spriječeno je da korisnik promijeni modul programa dok je valjčić u zraku (slika 42).

```
case 2:
    if (modeMessage != "--> Point-to-point mode.") {
        modeMessage = "--> Point-to-point mode.";
        Serial.println(modeMessage);
    }

    if (Mb.R[9] == 0) {
        Mb.R[9] = currentTableSide();
    }

    do {
        Mb.Run();

        if ((Mb.R[9] == 1) || (Mb.R[9] == 2)) {
            if ((Mb.R[10] >= 1) && (Mb.R[10] <= 9)) {
                if (Mb.R[9] == 1) { ... }
                else if (Mb.R[9] == 2) { ... }
            }
            Mb.R[10] = 0;
        }
    } while (isHandFull == true);
    break;
```

Slika 42. Struktura kôda drugog modula

5.4.2.3. Ručno upravljanje

U modulu ručnog upravljanja tj. *Jog mode* moguće je, kao što ime sugerira, manualno upravljati pokretima stolova i manipulatora. Naredbe za stol koje je moguće koristiti su pomicanje gore, dolje, lijevo ili desno. Naredbe za manipulator koje je moguće koristiti su rotacija tijela manipulatora lijevo ili desno, uzimanje i ispuštanje valjčića. Prije korištenja nekih od naredbi, potrebno je definirati koji stol želimo upravljati. Ako ovaj registar ostavimo praznim, algoritam će koristiti informaciju senzora pozicije manipulatora da bi odredio stranu. Slično kao i u prošlom modulu, *do, while* petlja zaustavlja korisnika da mijenja modul rada dok je valjčić u zraku.

```
case 3:
    if (modeMessage != "--> Jog mode.") {
        modeMessage = "--> Jog mode.";
        Serial.println(modeMessage);

        if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
            Mb.R[20] = 1;
        }
        else if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
            Mb.R[20] = 2;
        }
    }

    if (Mb.R[20] == 0) {
        Mb.R[20] = currentTableSide();
    }
    do {
        Mb.Run();
        //go up
        if (Mb.R[22] == 1) { ... }
        //go down
        if (Mb.R[21] == 1) { ... }
        //go left
        if (Mb.R[23] == 1) { ... }
        //go right
        if (Mb.R[24] == 1) { ... }
        //rotate left or right
        if ((Mb.R[25] == 1) || (Mb.R[25] == 2)) { ... }
        // pick up the pawn
        if (Mb.R[26] == 1) { ... }
        // drop the pawn
        if (Mb.R[27] == 1) { ... }
    } while (isHandFull == true);
    break;
```

Slika 43. Struktura kôda trećeg modula rada programa

6. PROGRAMSKO RJEŠENJE ZA UPRAVLJANJE I NADZOR PREKO WEB-A

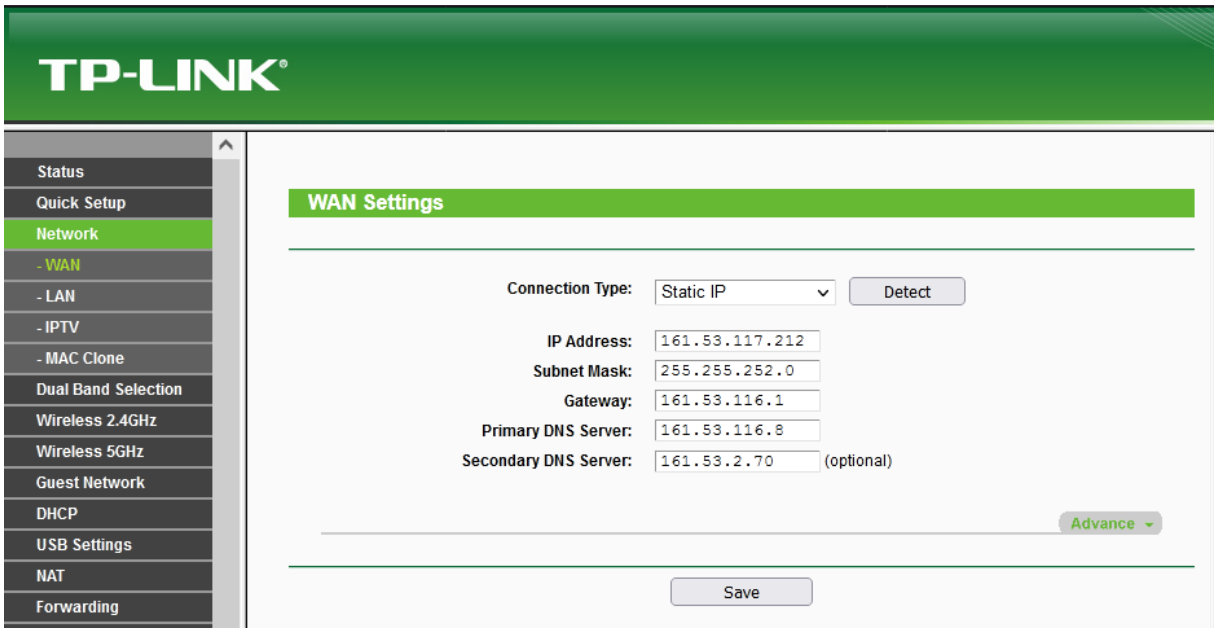
Za upravljanje sustavom koristit će se platforma *CyberHydraulic* kreirana od strane asistenta J. Benića. Također, ista platforma koristit će se i za video nadzor stanice. Prije nego se platforma može koristiti za upravljanje i nadzor, potrebno je najprije konfigurirati internet postavke na ruteru koji se nalazi na stanici.

6.1. Konfiguriranje Internet postavki rutera

Model rutera koji se koristi jest *TP-Link* Archer C20 AC750, iako je moguće koristiti praktički bilo koji ruter, jer ih većina ima osnovne funkcionalnosti koje se ovdje traže. Da bi se pristupilo postavkama rutera, potrebno je preko UTP kabla spojiti računalo na jedan od četiri *switch* porta na ruteru. Računalo treba u TCP/IP postavkama imati omogućeno automatsko dobavljanje IP adresa. Nakon uspješno dobivene IP adrese, moguće je spojiti se na ruter preko Internet pretraživača tako se u polje za URL adrese unese 192.168.0.1. Ako je sve u redu, dočekat će nas stranica za prijavljivanje gdje je potrebno unijeti korisničko ime i lozinku.

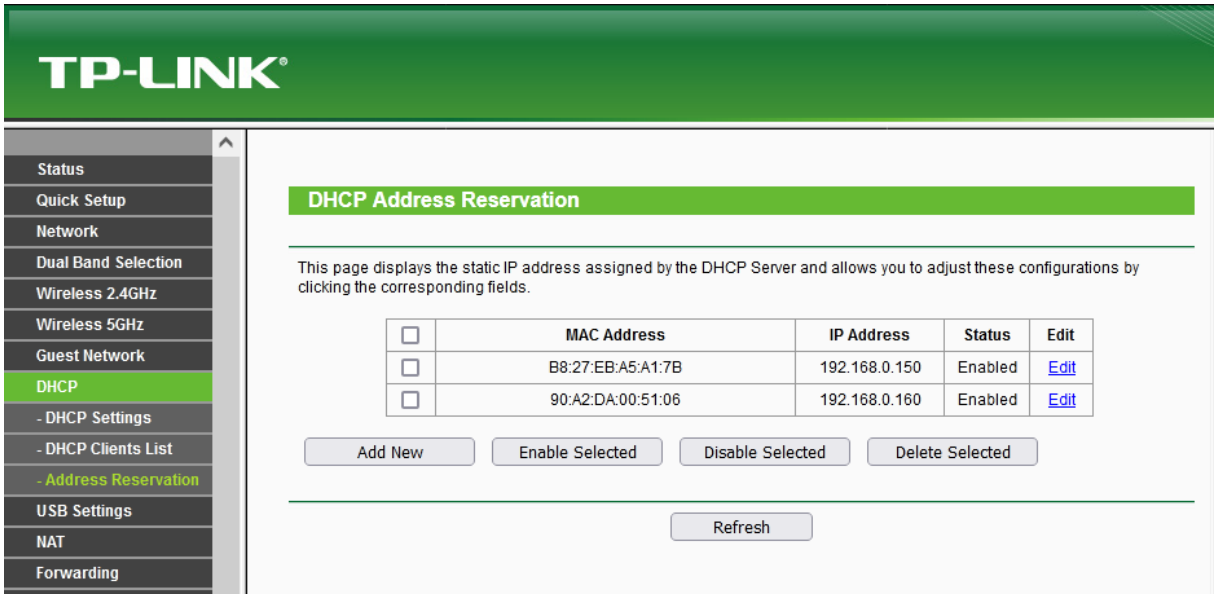
Slika 44. Ruter *TP-Link* Archer C20 AC750 [23]

Za povezivanje na internet koristit će se statička IP adresa. Stoga prva stvar koju treba postaviti jest tip konekcije na ruteru. Pod *Network* > *WAN* u postavkama u padajućem izborniku *Connection Type:* odabiremo *Static IP* kao na slici 45. U poljima ispod unosimo statičku IP adresu, *gateway* i ostale unaprijed od fakulteta definirane adrese.



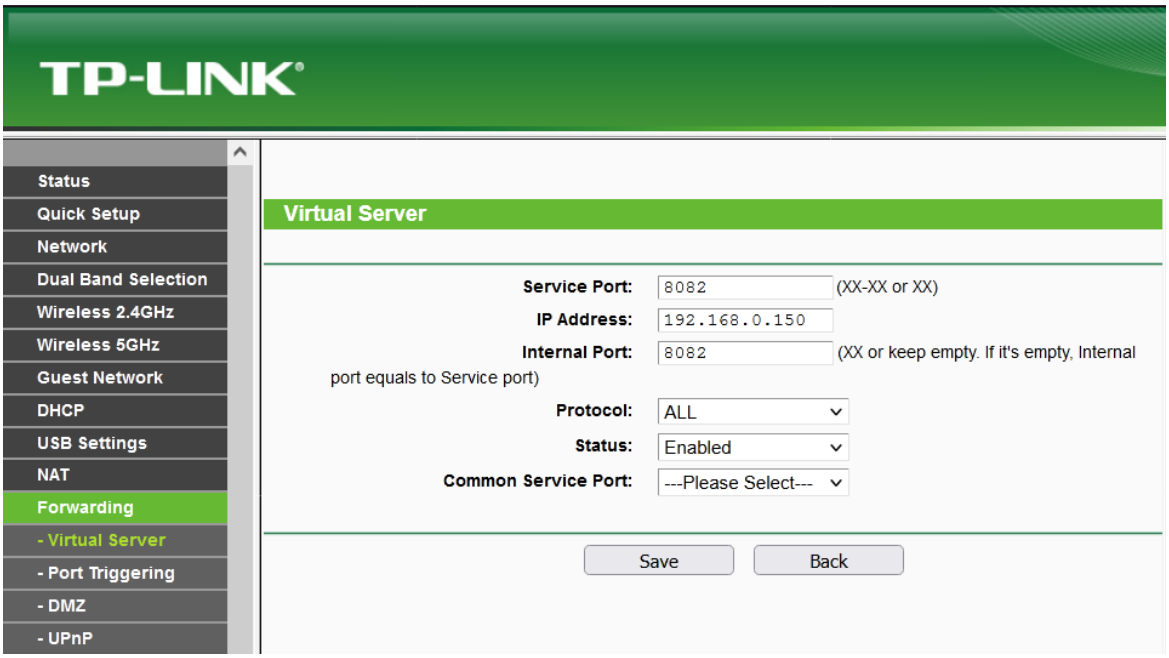
Slika 45. Postavljanje statičke IP adrese

Uređaji koji se povežu na ruter nalaze se unutar LAN mreže. IP adrese koje će im dodijeliti DHCP nalaze se u rasponu od 192.168.0.100 do 192.168.0.199. Kako bi osigurali da PLC i IP kamera svaki put dobiju istu IP adresu, potrebno je rezervirati adrese za njih. Na slici 46 prikazane su MAC adrese uređaja i IP adrese koje su vezane uz njih.



Slika 46. Rezervacija lokalnih IP adresa

Da bi se izvana komuniciralo s uređajima koji se nalaze unutar LAN mreže rutera, potrebno je uspostaviti *port forwarding*. Port koji će koristiti IP kamera je 8082, a za PLC glasi 502 što je uobičajeno za Modbus uređaje.



Slika 47. Postavljanje *Port-forwarding*-a za IP kameru

U sljedećem poglavlju je prikazano kako se može pristupiti postavkama IP kamere koristeći *port forwarding*.

6.2. Konfiguriranje video nadzora

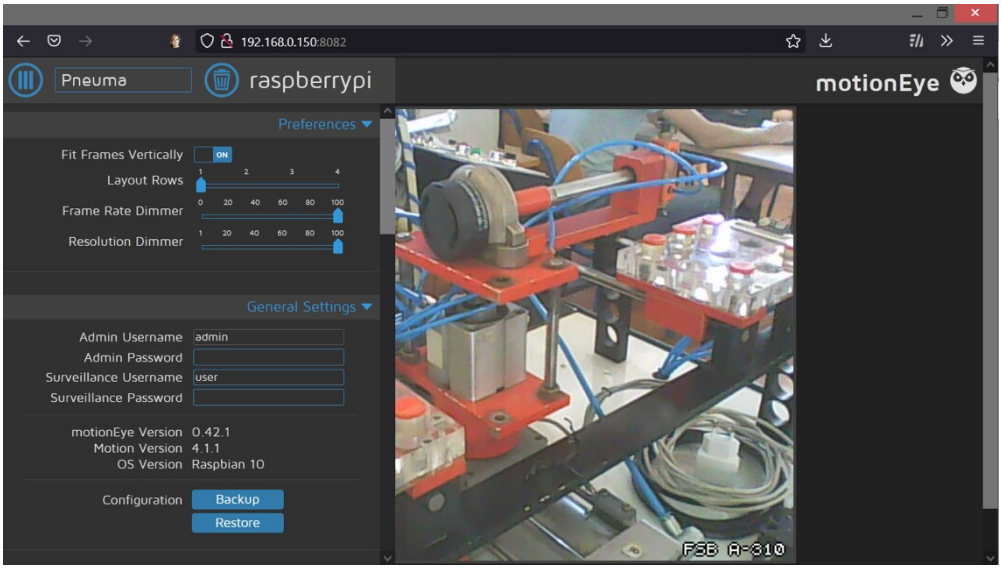
Za realizaciju video nadzora korištena je web kamera Logitech C170 i računalo Raspberry Pi 4 model B prikazani na slici 48.

Slika 48. Raspberry Pi 4 model B (lijevo) [24]; Logitech C170 web kamera (desno) [25]

Rapsberry Pi je moguće spojiti na internet preko RJ45 utora, a sama kamera spaja se na jedan od četiri USB utora. Prije nego se Rapsberry Pi može koristiti kao računalo, potrebno je instalirati operativni sustav na njega. Korišten je operativni sustav *Rasbian* tj. *Raspberry Pi OS.* Operativni sustav se najprije instalira na MicroSD karticu koja se potom umetne u Raspberry Pi. Navedeni operativni sustav ne koristi GUI tj. grafičko sučelje, pa tako za instalaciju programa *MotionEye* potrebno je koristi komandne linije.

Spajanjem Raspberry Pi-a na ruter on dobiva adresu koja je prethodno rezervirana za njega. Postoje dva načina za pristup postavkama. Ako smo spojeni na LAN mrežu rutera, postavkama pristupamo sa adresom: http://192.168.0.150:8082. Ako želimo pristupiti postavkama izvana onda koristimo statičku IP adresu rutera i broj *port*-a koji je konfiguriran u *port forwarding*-u. U našem slučaju to je *port* 8082.

Sučelje postavki za video nadzor prikazane su na slici 49. Unutar njih moguće je namještati postavke za osvjetljenje, rezoluciju, *frame rate*, detekciju pokreta, pohranjivanje snimki itd.

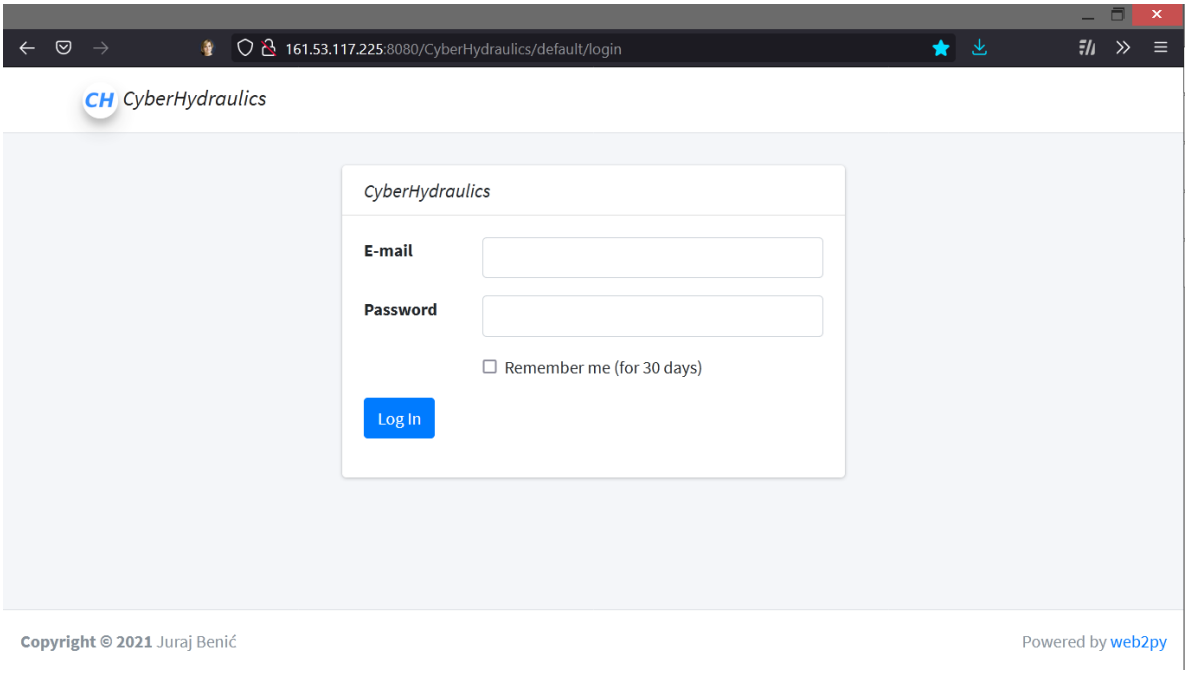


Slika 49. Postavke unutar programa MotionEye

U sljedećem poglavlju bit će opisano postavljanje i korištenje aplikacije *CyberHydraulic*.

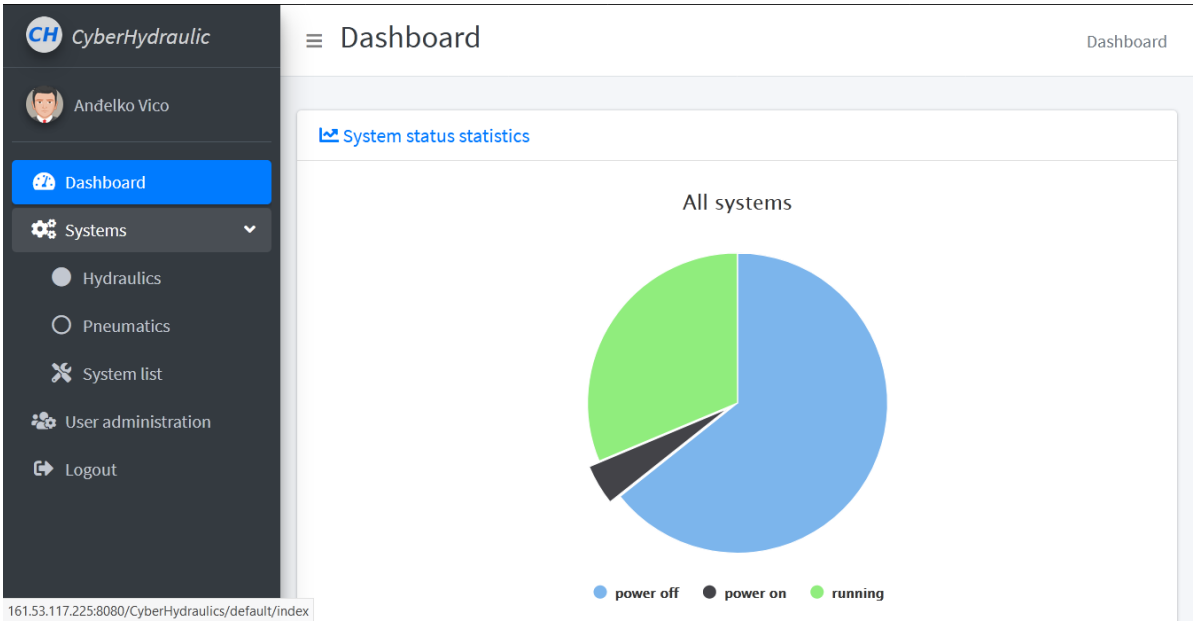
6.3. Korištenje sučelja aplikacije *CyberHydraulic*

Ove web aplikacije služe kao platforma za upravljanje i nadzor nad hidrauličkim i/ili pneumatskim sustavima. Također, putem iste moguće je uspostaviti i prikupljanje podataka. Prvi prvom pokretanju stranice dočekat će nas *login screen* kao na slici 50. Pristup je moguć tek nakon uspješne autorizacije s e-mail adresom i lozinkom.



Slika 50. Prikaz aplikacije *CyberHydraulic*

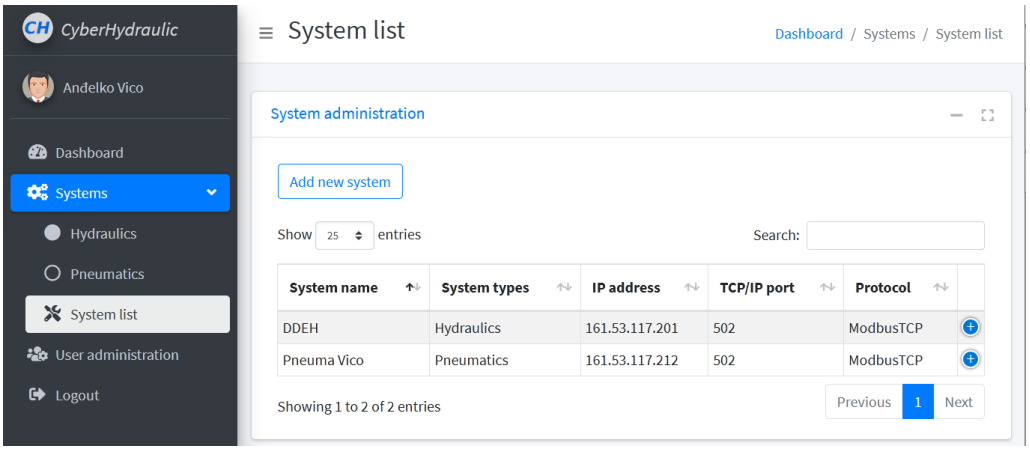
Nakon prijave dolazimo na *Dashboard*, odnosno početnu stranicu gdje se nalazi vizualan pregled stanja svih sustava.



Slika 51. *Dashboard* aplikacije *CyberHydraulic*

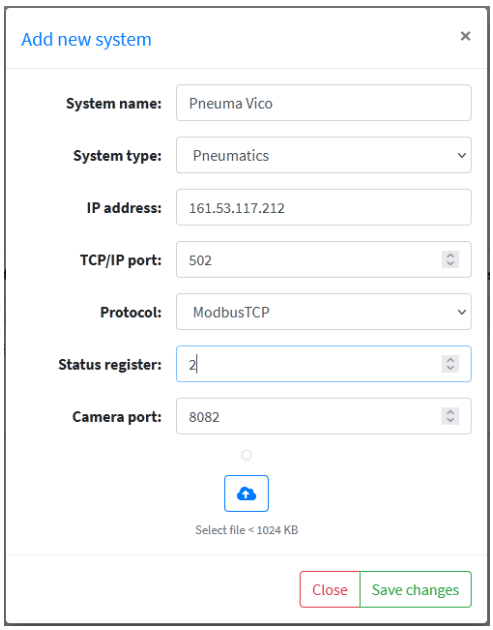
S lijeve strane nalazi se izbornik iz kojeg je moguće odabrati *Dasboard*, *Systems, User administration* i naposljetku *Logout.* Odabirom *Dashboard* vraćamo se na početnu stranicu. Pod *Systems* padajućim izbornikom nalaze se kategorija sustava *Hydraulics* i *Pneumatics*, a pod *Systems list* moguće je dodati nove ili izmijeniti postojeće sustave. Unutar *User administration* moguće je dodati nove korisnike aplikacije i mijenjati njihova ovlaštenja. Odabirom *Logout* prekida se trenutna korisnikova sesija.

Odabirom *Systems>System list* možemo vidjeti sve sustave koje pokriva aplikacija, kao što je to prikazano na slici 52.



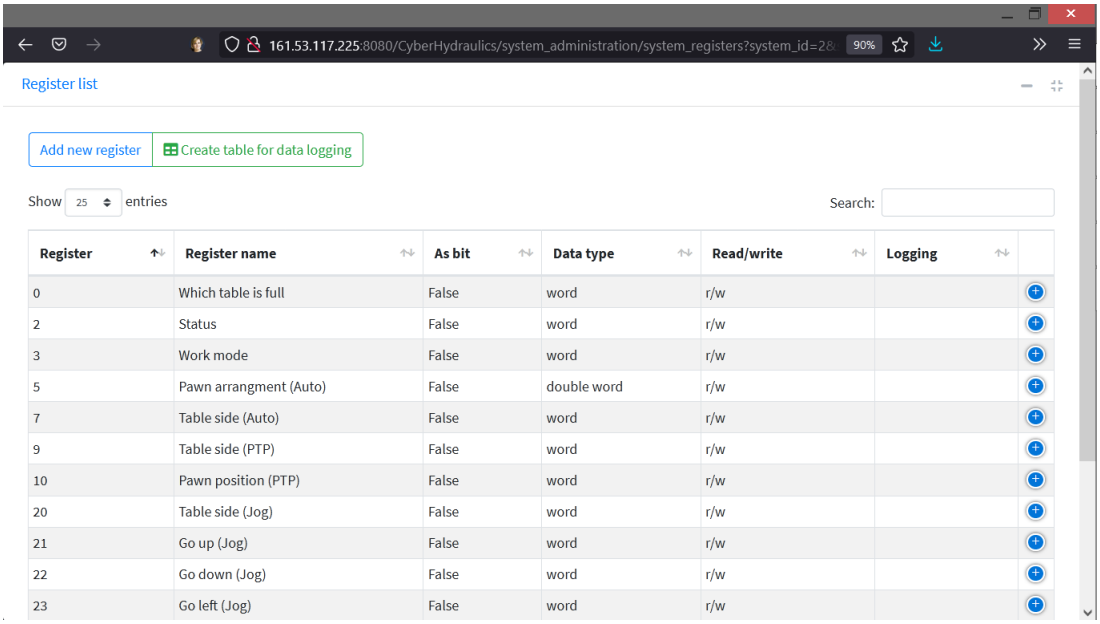
Slika 52. Izbornik *System list*

Nova pneumatska radna stanica dodaje se pod *Systems>System list* te klikom na *Add new system* nakon čega nas dočeka iskočni prozor kao na slici 53.



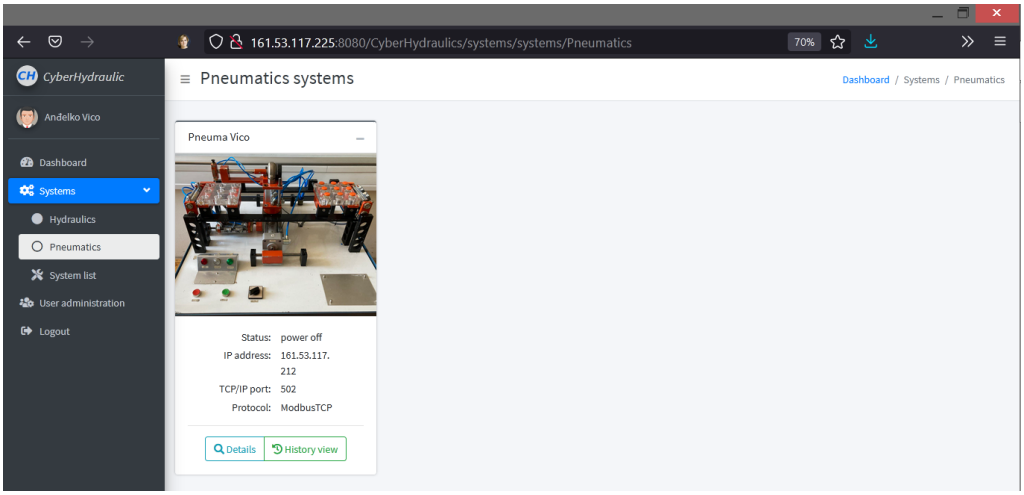
Slika 53. Prozor za dodavanje novog sustava

Za novo dodani sustav potrebno je još sastaviti tablicu registara s kojim će se upravljati putem Modbus TCP protokola. Tablica za pneumatski sustav prikazana je na slici 54. Za svaki registar nužno je unijeti njegov broj, proizvoljno ime, *True*/*False* za svojstvo registra ako je bit, tip podatka i pristup čitanja i/ili pisanja. Tipovi podataka koji se mogu unijeti su *word, double word, signed word* i *float.* Moguće je, ali ne i nužno, aktivirati zapisivanje podataka u bazu te dodavanje kratkog opisa tog registra.



Slika 54. Tablica registara sustava

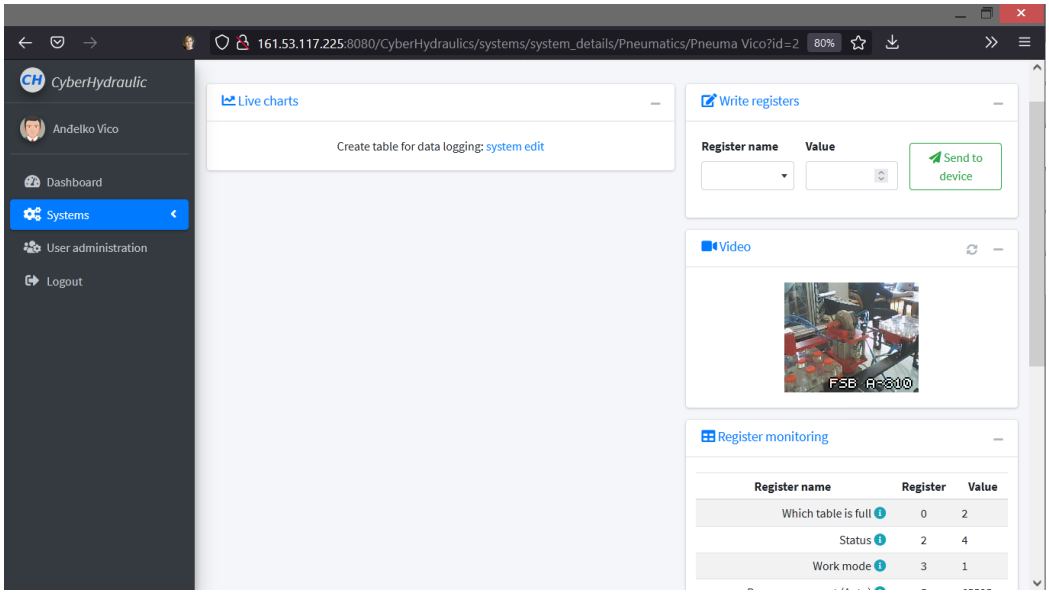
Nakon postavljanja svih parametara, sustav je sad moguće vidjeti pod *Systems>Pneumatics* kao na slici 55.



Slika 55. Pregled pneumatskih sustava

Klikom na *Details* aplikacija će nas odvesti na kontrolnu ploču kao na slici 56. S desne strane nalazi se padajući izbornik sa svim registrima i polje za unos vrijednosti. Ispod toga nalazi se

video prikaz stanice koju pruža Raspberry Pi zajedno sa programom *MotionEye*. Pri dnu desne strane nalazi se tablica vrijednosti svakog registra u stvarnom vremenu.



Slika 56. Kontrolna ploča sustava

Program se pokreće tako što se u padajućem izborniku odabere registar *Status* i postavi u vrijednost 4. Nakon unosa nužno je kliknuti na *Send to device.* Ako kod slanja bilo koje poruke dobijemo potvrdan odgovor od *Slave*/*Client* uređaja, na ekranu će pojaviti poruka *Sent successful.* Prije postavljanja statusnog registra moguće je definirati stol na kojem se nalaze valjčići. Ako korisnik ništa ne unese, podrazumijeva se da je unio vrijednost 1 odnosno da se valjčići nalaze na lijevom stolu. Potom se od korisnika očekuje da odredi modul rada unosom vrijednost 1, 2 ili 3 u registar *Work mode*.

Vrijednost „1“ predstavlja Automatski način rada. U tom modulu korisnik najprije treba s registrom *Table side (Auto)* odrediti s kojom stranom stola želi raditi. Potom s registrom *Pawn arrangement (Auto)* postavlja raspored tako što unosi 9-znamenkasti binarni broj.

Vrijednost „2“ predstavlja modul *Point-to-point.* S registrom *Pawn position (PTP)* korisnik bira valjčić koji želi uzeti tako da unese neki broj od 1 do 9. Stol s kojeg želimo uzeti valjčić definiramo s registrom *Table side (PTP)*. Međutim, modul se može koristiti i bez unosa u to polje, jer program sam definira stranu ovisno gdje se nalazi ruka manipulatora. Nakon što se valjčić pokupi, program automatski postavlja stranu stola na suprotnu od one odakle je uzeo, a valjčić se ispušta tako što ponovno unesemo neku vrijednost u registar *Pawn positon (PTP).*

Vrijednost „3“ označava modul ručnog upravljanja. U ovom modulu korisnik može ručno upravljati gibanjem stola, micati manipulator, okretati ruku manipulatora i manipulirati valjčićima. Program automatski prepoznaje stranu stola, a može ju i korisnik ručno definirat.

7. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog projekta bio je zastarjelu industrijsku opremu zamijeniti suvremenim rješenjima. Pojedini dijelovi edukacijske radne stanice zahtijevali su zamjenu oštećenih elemenata, obnovu ožičenja i druge oblike popravka.

Nakon montaže novih dijelova osmišljena je nova funkcija stanice. Funkcija tj. program stanice sastoji se od manipulacije valjčićima koji se nalaze na dvama razdvojenim stolovima. Program se nalazi na CONTROLLINO PLC-u, ima tri modula rada, a isprogramiran je u cijelosti u Arduino jeziku. Unutar programa implementiran je Modbus TCP/IP, a PLC je preko rutera spojen na Internet. Ruteru je dodijeljena statička IP adresa. Za upravljanje i nadzor korištena je web platforma *CyberHydraulic* koju je razvio asistent Juraj Benić. Platforma omogućuje, na vizualno pregledan način, upravljanje Modbus tablicom te video nadzor nad pneumatskom stanicom.

Prijedlozi za unaprjeđenje uključuju zamjenu drugih dotrajalih dijelova, proširenje funkcionalnosti kôda, poboljšanje stabilnosti kôda te dodavanje novih mogućnosti na platformi *CyberHydraulic*. Na ovom radu pokazano je kako stara oprema može dobiti novi dah života ako se u nju ugradi jedan dio silnih mogućnosti Interneta stvari koji, u svakom slučaju, nam donosi zanimljivu budućnost.

LITERATURA

[1] Definicija Interneta stvari: Jednostavno objašnjenje, https://leastwastefulcities.com/sigurnost-na-internetu/definicija-interneta-stvari-jednostavno-objanjenje, pristupljeno 23.6.2021.

[2] F. Lambert, Tesla vehicles can now diagnose themselves and even pre-order parts for service, https://electrek.co/2019/05/06/tesla-diagnose-pre-order-parts-service, pristupljeno 23.6.2021.

[3] A. Lücke, Festo FPC 202C Program Logic Controller: Operating manual, Esslingen: FESTO Electronic, 1988.

[4] Pneumatski ventil, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/9982, pristupljeno 24.6.2021.

[5] Pneumatski ventil, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/4450, pristupljeno 24.6.2021.

[6] Elektromag. zavojnica, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/34411 , pristupljeno 24.6.2021.

[7] Pneumatski ventil, https://www.festo.com/media/pim/275/D15000100123275.PDF, pristupljeno 24.6.2021.

[8] Vakuumska sklopka, https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/339903/VUV_1982-06_219816F3.pdf, pristupljeno 24.6.2021.

[9] Element LC-3-1/8, https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/44034/LC-3-18.pdf, pristupljeno 24.6.2021.

[10] https://www.facebook.com/Controllino, pristupljeno 24.6.2021.

[11] CONTROLLINO product comparison, https://www.controllino.biz/controllino-product-comparison, pristupljeno 24.6.2021.

[12] CONTROLLINO Maxi Automation, https://www.controllino.com/product/controllino-maxi-automation, pristupljeno 25.6.2021.

[13] Ventilski razvodnik, https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/VTUG-G_EN.PDF, pristupljeno 25.6.2021.

[14] Novi generator vakuuma, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/193488, pristupljeno 25.6.2021.

[15] Senzor vakuuma, https://www.festo.com/media/pim/034/D15000100123034.PDF, pristupljeno 25.6.2021.

[16] Hvataljka, https://www.festo.com/media/pim/034/D15000100123034.PDF, pristupljeno 25.6.2021.

[17] Induktivni senzor, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/543862, pristupljeno 25.6.2021.

[18] Priključak, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/193144, pristupljeno 25.6.2021.

[19] Pripremna grupa, https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/8002799, pristupljeno 25.6.2021.

[20] Modbus messaging implementation guide v1.0b, https://www.modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf, pristupljeno 27.6.2021.

[21] Modbus TCP, https://www.throughput.co.za/protocols/modbus-tcp-protocols.html, pristupljeno 27.6.2021.

[22] Arduino board library setup, https://www.controllino.com/knowledge-base/board-library-setup-in-arduino-ide/, pristupljeno 27.6.2021.

[23] Ruter TP-LINK, https://www.tp-link.com/us/home-networking/wifi-router/archer-c20/, pristupljeno 28.6.2021.

[24] Ruter TP-LINK, https://www.tp-link.com/us/home-networking/wifi-router/archer-c20/, pristupljeno 28.6.2021.

[25] Raspberry Pi, https://bs.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi, pristupljeno 28.6.2021.

[26] Arduino in IoT, https://www.youtube.com/watch?v=dQw4w9WgXcQ, pristupljeno 29.6.2021.

PRILOZI

I. Programski kôd PLC-a

```
/*
* Latest version of this code can viewed on GitHub:
* https://github.com/andelkov/MasterThesisProject/
* , as filename: PLC_program.ino
*/

#include <Controllino.h>
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include "Mudbus.h"

#define NULL 0

#define highWord(w) ((w) >> 16)
#define lowWord(w) ((w) & 0xffff)
#define makeLong(hi, low) (((long) hi) << 16 | (low)) //convert two 16bit variables
back to a 32bit variable

Mudbus Mb;

int cooldown = 1000;
unsigned long message;
uint32_t loWord, hiWord;
int messageArray[10];
String messageString;
unsigned int temp1 = 0;
unsigned int temp2 = 0;

byte pawnTemp;
byte tableSide;
String arrayPart;
String debugMessage = " ";
String modeMessage = "";


bool isUp = false;
bool isMoving = false;
bool isHandFull = false;

byte tableLeft[10] = { NULL, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 };
byte tableRight[10] = { NULL, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 };

//Pin configuration:
const byte C1_cilindar = CONTROLLINO_R1; // R1    Cylinder 1
const byte C2_cilindar = CONTROLLINO_R2; // R2    Cylinder 2

const byte C3_cilindar = CONTROLLINO_R3; // R3    Cylinder 3
const byte C4_cilindar = CONTROLLINO_R4; // R4    Cylinder 4

const byte C5_cilindar = CONTROLLINO_R5; // R5    Cylinder 5
const byte C6_cilindar = CONTROLLINO_R6; // R6    Cylinder 6

const byte C7_cilindar = CONTROLLINO_R7; // R7    Cylinder 7 (180 degree body rotate)
const byte C8_cilindar = CONTROLLINO_R8; // R8    Cylinder 8 (up-down of body)
const byte C9_cilindar = CONTROLLINO_R9; // R9    Cylinder 9 (180 degree hand rotate)

const byte C1_izvucen = CONTROLLINO_A0;  // AI0   sensor C1.0
const byte C1_uvucen = CONTROLLINO_A1;   // AI1   sensor C1.1
const byte C2_uvucen = CONTROLLINO_A2;   // AI2   sensor C2.0
const byte C2_izvucen = CONTROLLINO_A3;  // AI3   sensor C2.1
```

```
60
61 const byte C3_izvucen = CONTROLLINO_A4;  // AI4   sensor C3.0
62 const byte C3_uvucen = CONTROLLINO_A5;   // AI5   sensor C3.1
63 const byte C4_uvucen = CONTROLLINO_A6;   // AI6   sensor C4.0
64 const byte C4_izvucen = CONTROLLINO_A7;  // AI7   sensor C4.1
65
66 const byte C5_izvucen = CONTROLLINO_A8;  // AI8   sensor C5.0
67 const byte C5_uvucen = CONTROLLINO_A9;   // AI9   sensor C5.1
68 const byte C6_uvucen = CONTROLLINO_A10;  // AI10  sensor C6.0
69 const byte C6_izvucen = CONTROLLINO_A11; // AI11  sensor C6.1
70
71 const byte Vacuum_1 = CONTROLLINO_D0;    // DO0   turn on vacuum 1
72 const byte Vacuum_2 = CONTROLLINO_D1;    // DO1   turn on vacuum 2
73
74 const byte LED_Start = CONTROLLINO_D5;   // DO5   light Start/ON
75 const byte LED_Error = CONTROLLINO_D6;   // DO6   light Error
76 const byte LED_Stop = CONTROLLINO_D7;    // DO7   light Stop
77
78 const byte handIsRight = 66;             // DI0   sensor C7.0, hand is now at right
   side
79 const byte handIsLeft = 67;              // DI1   sensor C7.1, hand is now at left
   side
80
81 const byte pawnGrabbed_V1 = 10;          // DI2   sensor vacuum 1
82 const byte pawnGrabbed_V2 = 11;          // DI3   sensor vacuum 2
83
84 const byte interruptStartPin = 18;       // IN0   interrupt input, Start button
85 volatile byte startPressed = LOW;
86
87 const byte interruptStopPin = 19;        // IN1   interrupt input, Stop button
88 volatile byte stopPressed = LOW;
89
90 void setup() {
91   uint8_t mac[] = { 0x90, 0xA2, 0xDA, 0x00, 0x51, 0x06 };
92   uint8_t ip[] = { 192, 168, 0, 160 };
93   uint8_t gateway[] = { 161, 53, 116, 1 };
94   uint8_t subnet[] = { 255, 255, 252, 0 };
95   Ethernet.begin(mac, ip, subnet);
96
97   delay(2000);
98
99   Serial.begin(9600);
100  Serial.print("Started. ");
101  Serial.print("My IP address: ");
102  Serial.println(Ethernet.localIP());
103
104  pinMode(CONTROLLINO_IN0, INPUT);  // IN0   button Start
105  pinMode(CONTROLLINO_IN1, INPUT);  // IN1   button Stop
106
107  pinMode(CONTROLLINO_A0, INPUT);   // AI0   sensor C1.0
108  pinMode(CONTROLLINO_A1, INPUT);   // AI1   sensor C1.1
109  pinMode(CONTROLLINO_A2, INPUT);   // AI2   sensor C2.0
110  pinMode(CONTROLLINO_A3, INPUT);   // AI3   sensor C2.1
111  pinMode(CONTROLLINO_A4, INPUT);   // AI4   sensor C3.0
112  pinMode(CONTROLLINO_A5, INPUT);   // AI5   sensor C3.1
113
114  pinMode(CONTROLLINO_A6, INPUT);   // AI6   sensor C4.0
115  pinMode(CONTROLLINO_A7, INPUT);   // AI7   sensor C4.1
116  pinMode(CONTROLLINO_A8, INPUT);   // AI8   sensor C5.0
117  pinMode(CONTROLLINO_A9, INPUT);   // AI9   sensor C5.1
```

```
  pinMode(CONTROLLINO_A10, INPUT);  // AI10  sensor C6.0
  pinMode(CONTROLLINO_A11, INPUT);  // AI11  sensor C6.1

  pinMode(66, INPUT);         // DI0   sensor C7.0,
  pinMode(67, INPUT);         // DI1   sensor C7.1
  pinMode(10, INPUT);         // DI2   sensor vacuum 1
  pinMode(11, INPUT);         // DI3   sensor vacuum 2

  pinMode(CONTROLLINO_D0, OUTPUT);  // DO0   vacuum 1 ON (upper)
  pinMode(CONTROLLINO_D1, OUTPUT);  // DO1   vacuum 2 ON (lower)
  pinMode(CONTROLLINO_D5, OUTPUT);  // DO5   LED Ready
  pinMode(CONTROLLINO_D6, OUTPUT);  // DO6   LED Error
  pinMode(CONTROLLINO_D7, OUTPUT);  // DO7   LED Stop

  pinMode(CONTROLLINO_R1, OUTPUT);  // R1    Cylinder 1
  pinMode(CONTROLLINO_R2, OUTPUT);  // R2    Cylinder 2
  pinMode(CONTROLLINO_R3, OUTPUT);  // R3    Cylinder 3
  pinMode(CONTROLLINO_R4, OUTPUT);  // R4    Cylinder 4
  pinMode(CONTROLLINO_R5, OUTPUT);  // R5    Cylinder 5
  pinMode(CONTROLLINO_R6, OUTPUT);  // R6    Actuator 6
  pinMode(CONTROLLINO_R7, OUTPUT);  // R7    Actuator 7   (180 degree body rotate)
  pinMode(CONTROLLINO_R8, OUTPUT);  // R8    Actuator 8   (up-down of body)
  pinMode(CONTROLLINO_R9, OUTPUT);  // R9    Actuator 9   (180 degree hand rotate)

  pinMode(interruptStartPin, INPUT);
  pinMode(interruptStopPin, INPUT);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptStartPin), StartPressed, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptStopPin), StopPressed, RISING);

  for (byte i = 0; i < 125; i++) {   // Set every Modbus register value to 0
    Mb.R[i] = 0;
  }
  Mb.R[5] = -1; // For Auto mode
  Mb.R[6] = -1; // For Auto mode
  Mb.R[2] = 2;  // Set status to "Power on"
  Serial.println("Modbus registers set to 0.");
}

////////////////////////////// MAIN ////////////////////////////////////////
void loop() {

  while (Mb.R[2] != 4) {
    if (debugMessage != "--> Ready to start. ") {
      debugMessage = "--> Ready to start. ";
      Serial.println(debugMessage);
    }
    Mb.Run();
    if (Mb.R[0] == 2) {
      Mb.Run();
      for (byte i = 1; i < 10; i++) {
        tableLeft[i] = 0;
        tableRight[i] = 1;
      }
    }

    digitalWrite(LED_Start, 0);
    delay(500);

    digitalWrite(LED_Start, 1);
```

```
    delay(500);
    Mb.Run();
  }

  Mb.Run();

  switch (Mb.R[3]) {
  case 1:
    if (modeMessage != "--> Auto-mode selected.") {
      modeMessage = "--> Auto-mode selected.";
      Serial.println(modeMessage);
    }

    temp1 = Mb.R[6];
    temp2 = Mb.R[5];

    if ((Mb.R[6] >= 0) && ((Mb.R[7] == 1) || (Mb.R[7] == 2))) {

      message = makeLong(temp1, temp2);
      Serial.print("Received Mb.R[5] and Mb.R[6] messages: ");
      Serial.print(Mb.R[5]);
      Serial.print(", ");
      Serial.println(Mb.R[6]);
      Serial.print("Coververted Mb.R[5] and Mb.R[6] messages: ");
      Serial.print(temp1);
      Serial.print(", ");
      Serial.println(temp2);

      messageString = String(message);

      Serial.print(" The re-converted received message is: ");
      Serial.println(messageString);
      Serial.println(onlyBinaryNumbers(messageString));

      if (messageString.length() == 9) {
        for (char i = 0; i < 9; i++) {
          arrayPart = messageString.charAt(i);
          messageArray[i + 1] = arrayPart.toInt();
        }
        messageArray[0] = 0;
      }
      else if (messageString.length() < 9) {
        for (char i = 0; i < messageString.length(); i++) {
          arrayPart = messageString.charAt(i);
          messageArray[i + (10 - messageString.length())] = arrayPart.toInt();
        }
        for (char i = 1; i < (10 - messageString.length()); i++) {
          messageArray[i] = 0;
        }
        messageArray[0] = NULL;
      }

      Serial.print("Our message Int array is: ");
      for (int i = 1; i < 10; i++)
      {
        Serial.print(messageArray[i]);
      } Serial.println(" ");

      if ((messageString.length() < 10) && (onlyBinaryNumbers(messageString) == true)
{
```

```
237         if (Mb.R[7] == 1) {
238           Serial.println("--> Filling table 1. ");
239           for (byte j = 1; j < 10; j++) {
240             Mb.Run();
241             Serial.print("--> Doing j number: ");
242             Serial.println(j);
243             if (messageArray[j] == 1) {
244 
245               if (tableLeft[j] != 1) {
246                 pawnTemp = findAvailablePawn(2);
247                 Serial.print("--> Found pawn number at right table: ");
248                 Serial.println(pawnTemp);
249                 if (pawnTemp == 0) {
250                   Serial.println("No pawns available at right table");
251                 }
252                 else {
253                   rotateRight();
254                   goTo(2, pawnTemp);
255                   pawnPickUp();
256                   tableRight[pawnTemp] = 0;
257 
258                   rotateLeft();
259                   goTo(1, j);
260 
261                   pawnDrop();
262                   tableLeft[j] = 1;
263                 }
264               }
265             }
266             else if (messageArray[j] == 0) {
267               if (tableLeft[j] == 1) {
268                 pawnTemp = findFreeSpot(2);
269                 Serial.print("Found free spot at right table: ");
270                 Serial.println(pawnTemp);
271                 if (pawnTemp == 0) {
272                   Serial.println("No free spot available at right table. ");
273                 }
274                 else {
275                   rotateLeft();
276                   goTo(1, j);
277                   pawnPickUp();
278                   tableLeft[j] = 0;
279 
280                   rotateRight();
281                   goTo(2, pawnTemp);
282                   pawnDrop();
283                   tableRight[pawnTemp] = 1;
284                 }
285               }
286             }
287           }
288           if (debugMessage != "Auto-mode transfer completed. ") {
289             debugMessage = "Auto-mode transfer completed. ";
290             Serial.println(" ");
291             Serial.println(debugMessage);
292           }
293         }
294         else if (Mb.R[7] == 2) {
295           Serial.println("--> Filling table 2. ");
296           for (byte j = 1; j < 10; j++) {
```

```
            Mb.Run();
            Serial.print("--> Doing j number: ");
            Serial.println(j);
            if (messageArray[j] == 1) {
              if (tableRight[j] != 1) {

                pawnTemp = findAvailablePawn(1);
                Serial.print("--> Found pawn at left table: ");
                Serial.println(pawnTemp);

                if (pawnTemp == 0) {
                  Serial.println("No pawns available at left table");

                }
                else {
                  rotateLeft();
                  goTo(1, pawnTemp);
                  pawnPickUp();
                  tableLeft[pawnTemp] = 0;

                  rotateRight();
                  goTo(2, j);
                  pawnDrop();
                  tableRight[j] = 1;
                }
              }
            }
            else if (messageArray[j] == 0) {
              if (tableRight[j] == 1) {
                pawnTemp = findFreeSpot(1);
                Serial.print("Found free spot at left table: ");
                Serial.println(pawnTemp);
                if (pawnTemp == 0) {
                  Serial.println("No free spot available at left table. ");
                }
                else {
                  rotateRight();
                  goTo(2, j);
                  pawnPickUp();
                  tableRight[j] = 0;

                  rotateLeft();
                  goTo(1, pawnTemp);
                  pawnDrop();
                  tableLeft[pawnTemp] = 1;
                }
              }
            }
          }
          if (debugMessage != "Auto-mode transfer completed.") {
            debugMessage = "Auto-mode transfer completed.";
            Serial.println(" ");Serial.println(debugMessage);Serial.println(" ");
          }
        }
        else {
          Serial.println("Wrong table side choosen. Check input.");
        }
      }
      else {
        Mb.R[5] = -1;
```

```
357         Mb.R[6] = -1;
358       }
359
360       Serial.print("Our table positions are on LEFT table: ");
361       for (int i = 1; i < 10; i++)
362       {
363         Serial.print(tableLeft[i]);
364       } Serial.println(" ");
365
366       Serial.print("Our table positions are on RIGHT table: ");
367       for (int i = 1; i < 10; i++)
368       {
369         Serial.print(tableRight[i]);
370       } Serial.println(" ");
371
372       Mb.R[5] = -1;
373       Mb.R[6] = -1;
374     }
375
376     break;
377   case 2:
378     if (modeMessage != "--> Point-to-point mode.") {
379       modeMessage = "--> Point-to-point mode.";
380       Serial.println(modeMessage);
381     }
382
383     if (Mb.R[9] == 0) {
384       Mb.R[9] = currentTableSide();
385     }
386
387     do {
388       Mb.Run();
389
390       if ((Mb.R[9] == 1) || (Mb.R[9] == 2)) {
391         if ((Mb.R[10] >= 1) && (Mb.R[10] <= 9)) {
392           if (Mb.R[9] == 1) {
393
394             if ((isHandFull == true) && (isSpotEmpty(1, Mb.R[10]) == true)) {
395               rotateLeft();
396               goTo(1, Mb.R[10]);
397               pawnDrop();
398               tableLeft[Mb.R[10]] = 1;
399
400               Mb.R[9] = 2;
401               isHandFull == false;
402             }
403             else if ((isSpotEmpty(1, Mb.R[10]) == false) && (isHandFull == false)) {
404               rotateLeft();
405               goTo(1, Mb.R[10]);
406               pawnPickUp();
407               tableLeft[Mb.R[10]] = 0;
408
409               Mb.R[9] = 2;
410               isHandFull = true;
411             }
412             else {
413               if (debugMessage != "--> Can't do that move. ") {
414                 debugMessage = "--> Can't do that move. ";
415                 Serial.println(debugMessage);
416                 flashError();
```

```
417               }
418
419             }
420           }
421           else if (Mb.R[9] == 2) {
422             if ((isHandFull == true) && (isSpotEmpty(2, Mb.R[10]) == true)) {
423               rotateRight();
424               goTo(2, Mb.R[10]);
425               pawnDrop();
426               tableRight[Mb.R[10]] = 1;
427
428               Mb.R[9] = 1;
429               isHandFull == false;
430             }
431             else if ((isSpotEmpty(2, Mb.R[10]) == false) && (isHandFull == false)) {
432               rotateRight();
433               goTo(2, Mb.R[10]);
434               pawnPickUp();
435               tableRight[Mb.R[10]] = 0;
436
437               Mb.R[9] = 1;
438               isHandFull = true;
439             }
440             else {
441               if (debugMessage != "--> Can't do that move. ") {
442                 debugMessage = "--> Can't do that move. ";
443                 Serial.println(debugMessage);
444                 flashError();
445               }
446             }
447           }
448
449           debugMessage = "Auto-movement fullfiled. ";
450           Serial.println(debugMessage);
451
452           Serial.print("Our table positions are on LEFT table: ");    //printanje
arraya
453           for (int i = 1; i < 10; i++)
454           {
455             Serial.print(tableLeft[i]);
456           } Serial.println(" ");
457
458           Serial.print("Our table positions are on RIGHT table: ");    //printanje
arraya
459           for (int i = 1; i < 10; i++)
460           {
461             Serial.print(tableRight[i]);
462           } Serial.println(" ");
463
464         }
465         Mb.R[10] = 0;
466       }
467     } while (isHandFull == true);
468
469     break;
470   case 3:
471     if (modeMessage != "--> Jog mode.") {
472       modeMessage = "--> Jog mode.";
473       Serial.println(modeMessage);
474
```

```
      if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
        Mb.R[20] = 1;
      }
      else if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
        Mb.R[20] = 2;
      }
    }

    if (Mb.R[20] == 0) {
      Mb.R[20] = currentTableSide();
    }
    do {
      Mb.Run();
      //go up
      if (Mb.R[22] == 1) {
        if (Mb.R[20] == 1) {
          if ((digitalRead(C1_uvucen) == 1) && (digitalRead(C2_uvucen) == 1)) {
            tableGoCenterY(1);
          }
          else {
            tableGoUp(1); //
          }

          Mb.R[22] = 0;
        }
        else if (Mb.R[20] == 2) {
          if ((digitalRead(C3_uvucen) == 1) && (digitalRead(C4_uvucen) == 1)) {
            tableGoCenterY(2);
          }
          else {
            tableGoUp(2); //
          }

          Mb.R[22] = 0;
        }
        else {
          if ((debugMessage != "Please select a proper table number. Number received:
") && (Mb.R[20] != 0)) {
            debugMessage = "Please select a proper table number. Number received: ";
            Serial.print(debugMessage);
            Serial.println(Mb.R[22]);
          }
        }
      }
      //go down
      if (Mb.R[21] == 1) {
        if (Mb.R[20] == 1) {
          if ((digitalRead(C1_izvucen) == 1) && (digitalRead(C2_izvucen) == 1)) {
            tableGoCenterY(1);
          }
          else {
            tableGoDown(1); //
          }
          Mb.R[21] = 0;
        }
        else if (Mb.R[20] == 2) {
          if ((digitalRead(C3_izvucen) == 1) && (digitalRead(C4_izvucen) == 1)) {
            tableGoCenterY(2);
          }
          else {
```

```
534             tableGoDown(2); //
535           }
536
537           Mb.R[21] = 0;
538         }
539         else {
540           if ((debugMessage != "Please select a proper table number. Number received:
    ") && (Mb.R[20] != 0)) {
541             debugMessage = "Please select a proper table number. Number received: ";
542             Serial.print(debugMessage);
543             Serial.println(Mb.R[21]);
544             flashError();
545           }
546         }
547       }
548       //go left
549       if (Mb.R[23] == 1) {
550         if ((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_izvucen) == 1)) {
551           tableGoCenterX();
552         }
553         else {
554           tableGoLeft();
555         }
556         Mb.R[23] = 0;
557       }
558       //go right
559       if (Mb.R[24] == 1) {
560         if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
561           tableGoCenterX();
562         }
563         else {
564           tableGoRight();
565         }
566         Mb.R[24] = 0;
567       }
568       //rotate left or right
569       if ((Mb.R[25] == 1) || (Mb.R[25] == 2)) {
570
571         if (Mb.R[25] == 1) {
572           if (digitalRead(handIsLeft) == 0) {
573             rotateLeft();
574             Mb.R[20] = 1;
575           }
576           else {
577             Serial.println("--> Hand is already left. ");
578             flashError();
579           }
580
581         }
582         else if (Mb.R[25] == 2) {
583           if (digitalRead(handIsRight) == 0) {
584             rotateRight();
585             Mb.R[20] = 2;
586           }
587           else {
588             Serial.println("--> Hand is already right. ");
589             flashError();
590           }
591
592         }
```

```
593
594         Mb.R[25] = 0;
595       }
596       // pick up the pawn
597       if (Mb.R[26] == 1) {
598
599         if (isSpotEmpty(currentTableSide(), currentPawnPosition()) == false) {
600           pawnPickUp();
601
602           if (currentTableSide() == 1) {
603             tableLeft[currentPawnPosition()] = 0;
604           }
605           else if (currentTableSide() == 2) {
606             tableRight[currentPawnPosition()] = 0;
607           }
608
609           Serial.print("--> Picked pawn from position: ");
610           Serial.println(currentPawnPosition());
611         }
612         else {
613           Serial.println("--> There is no pawn under the hand to pick up. ");
614           flashError();
615         }
616
617         Mb.R[26] = 0;
618       }
619       // drop the pawn
620       if (Mb.R[27] == 1) {
621         if (isSpotEmpty(currentTableSide(), currentPawnPosition()) == true) {
622           pawnDrop();
623
624           if (currentTableSide() == 1) {
625             tableLeft[currentPawnPosition()] = 1;
626           }
627           else if (currentTableSide() == 2) {
628             tableRight[currentPawnPosition()] = 1;
629           }
630
631           Serial.print("--> Picked pawn from position: ");
632           Serial.println(currentPawnPosition());
633         }
634         else {
635           Serial.println("--> There is a pawn under the hand. Can't drop the pawn in
    this position. ");
636           flashError();
637         }
638
639         Mb.R[27] = 0;
640       }
641     } while (isHandFull == true);
642
643     break;
644   case 4:
645     //For testing:
646
647     Serial.print(Mb.R[5]);
648     Serial.print(Mb.R[6]);
649
650     message = makeLong(Mb.R[6], Mb.R[5]);
651     Serial.print("Message string is: ");
```

```
    messageString = String(message);
    Serial.print(messageString);



    Mb.R[3] = 5;
    break;
  default:
    if (modeMessage != "--> Please select a mode.") {
      modeMessage = "--> Please select a mode.";
      Serial.println(modeMessage);
    }
    break;
  }
}
////////////////////////////// FUNCTIONS
//////////////////////////////////////////////

void tableGoRight() {

  if ((digitalRead(C5_izvucen) == 0) || (digitalRead(C6_izvucen) == 0)) {
    isMoving = true;
    Serial.print("--> Going right. ");

    digitalWrite(CONTROLLINO_R6, HIGH);
    digitalWrite(CONTROLLINO_R5, HIGH);
    delay(cooldown);

    while (isMoving == true) {
      Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6... ");
      if ((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_izvucen) == 1)) {
        isMoving = false;
        Serial.println("Move completed. ");
      }
    }
  }
  else {
    Serial.println("--> Can't go anymore right.");
    digitalWrite(LED_Error, 1);
    delay(500);
    digitalWrite(LED_Error, 0);
  }
}

void tableGoLeft() {
  if ((digitalRead(C5_uvucen) == 0) || (digitalRead(C6_uvucen) == 0)) {

    isMoving = true;
    Serial.print("--> Going left. ");

    digitalWrite(CONTROLLINO_R6, LOW);
    digitalWrite(CONTROLLINO_R5, LOW);
    delay(cooldown);

    Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6. ");
    while (isMoving == true) {

      if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
        isMoving = false;
        Serial.println("Move completed.");
```

```
      }
    }
  }
  else {
    Serial.println("--> Can't go anymore left.");
    digitalWrite(LED_Error, 1);
    delay(500);
    digitalWrite(LED_Error, 0);
  }
}

void tableGoCenterX() {

  Serial.print("---> Going to the center in the X direction. ");
  isMoving == true;
  digitalWrite(CONTROLLINO_R6, LOW);
  digitalWrite(CONTROLLINO_R5, HIGH);
  delay(cooldown);

  while (isMoving == true) {
    Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6. ");
    if ((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
      isMoving = false;
      Serial.println("Move completed. Table in X centre. ");
    }
  }
}

void tableGoCenterY(char tableSide) {

  if (tableSide == 1) {

    isMoving = true;
    Serial.print("---> Moving left table to the Y centre. ");

    digitalWrite(C1_cilindar, HIGH);
    digitalWrite(C2_cilindar, LOW);
    delay(cooldown);

    Serial.print("Waiting for input from sensors on C1 and C2. ");
    while (isMoving == true) {

      if ((digitalRead(C1_izvucen) == 1) && (digitalRead(C2_uvucen) == 1)) {
        isMoving = false;
        Serial.println("Move completed. ");
      }
    }
  }
  else if (tableSide == 2) {

    isMoving = true;
    Serial.print("---> Moving right table to the Y centre. ");

    digitalWrite(C3_cilindar, HIGH);
    digitalWrite(C4_cilindar, LOW);
    delay(cooldown);

    Serial.print("Waiting for input from sensors on C3 and C4. ");
    while (isMoving == true) {
      if ((digitalRead(C3_izvucen) == 1) && (digitalRead(C4_uvucen) == 1)) {
```

```
        isMoving = false;
        Serial.println("Move completed. ");
      }
    }

  }
  else {
    Serial.println("--> Check input number for table positon.");
  }

}

void tableGoUp(char tableSide) {
  if (tableSide == 2) {
    if ((digitalRead(C3_izvucen) == 0) || (digitalRead(C4_izvucen) == 0)) {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> Moving right table up. ");

      digitalWrite(C3_cilindar, HIGH);
      digitalWrite(C4_cilindar, HIGH);
      delay(cooldown);

      Serial.print("Waiting for input from sensors on C3 and C4. ");
      while (isMoving == true) {

        if ((digitalRead(C3_izvucen) == 1) && (digitalRead(C4_izvucen) == 1)) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else {
      Serial.println("--> Can't go up anymore.");
      digitalWrite(LED_Error, 1);
      delay(500);
      digitalWrite(LED_Error, 0);
    }
  }
  else if (tableSide == 1) {
    if ((digitalRead(C1_izvucen) == 0) || (digitalRead(C2_izvucen) == 0)) {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> Moving left table up. ");

      digitalWrite(C1_cilindar, HIGH);
      digitalWrite(C2_cilindar, HIGH);
      delay(cooldown);

      Serial.print("Waiting for input from sensors on C1 and C2. ");
      while (isMoving == true) {

        if ((digitalRead(C1_izvucen) == 1) && (digitalRead(C2_izvucen) == 1)) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else {
      Serial.println("--> Can't go up anymore.");
      digitalWrite(LED_Error, 1);
      delay(500);
```

```
      digitalWrite(LED_Error, 0);
    }
  }
  else
  {
    Serial.println("--> Incorrect input. Aborting sequence...");
  }

}

void tableGoDown(char tableSide) {
  if (tableSide == 2) {
    if ((digitalRead(C3_uvucen) == 0) || (digitalRead(C4_uvucen) == 0)) {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> Moving right table down. ");

      digitalWrite(C3_cilindar, LOW);
      digitalWrite(C4_cilindar, LOW);
      delay(cooldown);

      Serial.print("Waiting for input from sensors on C3 and C4. ");
      while (isMoving == true) {

        if ((digitalRead(C3_uvucen) == 1) && (digitalRead(C4_uvucen) == 1)) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else {
      Serial.println("--> Can't go further down.");
      digitalWrite(LED_Error, 1);
      delay(500);
      digitalWrite(LED_Error, 0);
    }
  }
  else if (tableSide == 1) {
    if ((digitalRead(C1_uvucen) == 0) || (digitalRead(C2_uvucen) == 0)) {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> Moving left table down. ");

      digitalWrite(C1_cilindar, LOW);
      digitalWrite(C2_cilindar, LOW);
      delay(cooldown);

      Serial.print("Waiting for input from sensors on C1 and C2. ");
      while (isMoving == true) {

        if ((digitalRead(C1_uvucen) == 1) && (digitalRead(C2_uvucen) == 1)) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else {
      Serial.println("--> Can't go further down.");
      digitalWrite(LED_Error, 1);
      delay(500);
      digitalWrite(LED_Error, 0);
    }
```

```
  }
  else
  {
    Serial.println("---> Incorrect input. Aborting sequence...");
  }
}

void rotateRight() {
  if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
    Serial.println("---> Table is already right. ");
    digitalWrite(LED_Error, 1);
    delay(500);
    digitalWrite(LED_Error, 0);

  }
  else {
    if (isUp == true)
    {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> Rotating to the right.");
      digitalWrite(C7_cilindar, HIGH);
      delay(cooldown);

      while (isMoving == true) {

        if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else if (isUp == false)
    {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> Rotating to the right.");
      digitalWrite(C8_cilindar, LOW);
      delay(cooldown);

      isUp = true;

      digitalWrite(C7_cilindar, HIGH);
      delay(cooldown);

      while (isMoving == true) {

        if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else
    {
      Serial.println("---> Rotation to the right can't be perfomed. ");
    }
  }
}

void rotateLeft() {
  if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
```

```
    Serial.println("---> Table is already left. ");
    digitalWrite(LED_Error, 1);
    delay(500);
    digitalWrite(LED_Error, 0);
  }
  else {
    if (isUp == true)
    {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> The hand is up. Rotating to the left.");

      digitalWrite(C7_cilindar, LOW);
      delay(cooldown);

      while (isMoving == true) {

        if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else if (isUp == false)
    {
      isMoving = true;
      Serial.print("---> The hand is down. Rotating to the left.");

      digitalWrite(C8_cilindar, LOW);
      delay(cooldown);

      isUp = true;

      digitalWrite(C7_cilindar, LOW);
      delay(cooldown);

      while (isMoving == true) {
        if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else
    {
      Serial.println("---> Rotation to the left can't be perfomed. ");
    }
  }
}

void StartPressed() {
  Serial.println("--> Start pressed.");
  startPressed = HIGH;

  digitalWrite(LED_Start, LOW);
  digitalWrite(LED_Stop, LOW);

  Mb.R[2] = 4;

}

```

```
1011 void StopPressed() {
1012   Serial.println("--> Stop pressed.");
1013   Mb.R[2] = 3;
1014   digitalWrite(LED_Stop, HIGH);
1015 }
1016
1017 bool isTableEmpty(byte tableSide) {
1018   bool notEmpty = false;
1019   if (tableSide == 1) {
1020
1021     for (char i = 1; i < 10; i++) {
1022       if ((messageArray[i] == 1) && (notEmpty == false)) {
1023         notEmpty = true;
1024       }
1025     }
1026     if (notEmpty == true) {
1027       return true;
1028     }
1029     else {
1030       return false;
1031     }
1032
1033   }
1034   else if (tableSide == 2) {
1035     for (char i = 1; i < 10; i++) {
1036
1037       if ((messageArray[i] == 1) && (notEmpty == false)) {
1038         notEmpty = true;
1039       }
1040
1041     }
1042     if (notEmpty == true) {
1043       return true;
1044     }
1045     else {
1046       return false;
1047     }
1048   }
1049   else {
1050     return false;
1051   }
1052 }
1053
1054 bool isSpotEmpty(byte tableSide, byte pawnPosition) {
1055   //treba testirat ovo
1056   if (tableSide == 1) {
1057     if (tableLeft[pawnPosition] == 1) {
1058       return false;
1059     }
1060     else {
1061       return true;
1062     }
1063   }
1064   else if (tableSide == 2) {
1065     if (tableRight[pawnPosition] == 1) {
1066       return false;
1067     }
1068     else {
1069       return true;
1070     }
```

```
  }
  else {
    Serial.println("Wrong table side choosen for checking if spot is empty.");
  }
}

void goTo(byte tableSide, byte pawnPosition) {

  if (tableSide == 1) {

    if ((pawnPosition == 1) || (pawnPosition == 4) || (pawnPosition == 7)) { // move table in x-axis
      if (digitalRead(C5_uvucen) == 0 || digitalRead(C6_uvucen) == 0) {

        isMoving = true;
        Serial.print("Going left. ");

        digitalWrite(CONTROLLINO_R6, LOW);
        digitalWrite(CONTROLLINO_R5, LOW);
        delay(cooldown);

        Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6. ");
        while (isMoving == true) {

          if (digitalRead(C5_uvucen) == 1 && digitalRead(C6_uvucen) == 1) {
            isMoving = false;
            Serial.println("Move completed.");
          }
        }

      }
    }
    else if ((pawnPosition == 2) || (pawnPosition == 5) || (pawnPosition == 8)) {
      if (digitalRead(C5_izvucen) == 0 || digitalRead(C6_uvucen) == 0) {

        isMoving = true;
        Serial.print("Going right. ");

        digitalWrite(CONTROLLINO_R6, LOW);
        digitalWrite(CONTROLLINO_R5, HIGH);
        delay(cooldown);

        while (isMoving == true) {
          Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6... ");
          if (digitalRead(C5_izvucen) == 1 && digitalRead(C6_uvucen) == 1) {
            isMoving = false;
            Serial.println("Move completed.");
          }
        }

      };
    }
    else if ((pawnPosition == 3) || (pawnPosition == 6) || (pawnPosition == 9)) {
      if (digitalRead(C5_izvucen) == 0 || digitalRead(C6_izvucen) == 0) {

        isMoving = true;
        Serial.print("Going right. ");

        digitalWrite(CONTROLLINO_R6, HIGH);
        digitalWrite(CONTROLLINO_R5, HIGH);
```

```
        delay(cooldown);

        while (isMoving == true) {
          Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6... ");
          if (digitalRead(C5_izvucen) == 1 && digitalRead(C6_izvucen) == 1) {
            isMoving = false;
            Serial.println("Move completed.");
          }
        }

      };
    }

    if ((pawnPosition == 1) || (pawnPosition == 2) || (pawnPosition == 3)) {
      if (digitalRead(C1_uvucen) == 0 || digitalRead(C2_uvucen) == 0) {
        isMoving = true;
        Serial.print("Moving left table up. ");

        digitalWrite(C1_cilindar, LOW);
        digitalWrite(C2_cilindar, LOW);
        delay(cooldown);

        Serial.print("Waiting for input from sensors on C1 and C2. ");
        while (isMoving == true) {

          if (digitalRead(C1_uvucen) == 1 && digitalRead(C2_uvucen) == 1) {
            isMoving = false;
            Serial.println("Move completed.");
          }
        }
      }
    }
    else if ((pawnPosition == 4) || (pawnPosition == 5) || (pawnPosition == 6)) {
      if (digitalRead(C1_izvucen) != 1 || digitalRead(C2_uvucen) != 1) {
        isMoving = true;
        Serial.print("Moving left table to centre. ");

        digitalWrite(C1_cilindar, HIGH);
        digitalWrite(C2_cilindar, LOW);
        delay(cooldown);

        Serial.print("Waiting for input from sensors on C1 and C2. ");
        while (isMoving == true) {

          if (digitalRead(C1_izvucen) == 1 && digitalRead(C2_uvucen) == 1) {
            isMoving = false;
            Serial.println("Move completed.");
          }
        }
      }
    }
    else if ((pawnPosition == 7) || (pawnPosition == 8) || (pawnPosition == 9)) {
      if (digitalRead(C1_izvucen) == 0 || digitalRead(C2_izvucen) == 0) {
        isMoving = true;
        Serial.print("Moving left table down. ");

        digitalWrite(C1_cilindar, HIGH);
        digitalWrite(C2_cilindar, HIGH);
        delay(cooldown);

```

```
        Serial.print("Waiting for input from sensors on C1 and C2. ");
        while (isMoving == true) {

          if (digitalRead(C1_izvucen) == 1 && digitalRead(C2_izvucen) == 1) {
            isMoving = false;
            Serial.println("Move completed.");
          }
        }
      }
    }
    else {
      Serial.print("Incorrect format of requested position. Req. position was: ");
      for (int i = 0; i < 10; i++)
      {
        Serial.print(messageArray[i]);
      }
      Serial.println(" ");
    }

  }
  else if (tableSide == 2) {

    if ((pawnPosition == 1) || (pawnPosition == 4) || (pawnPosition == 7)) {

      isMoving = true;
      Serial.print("Going left. ");

      digitalWrite(CONTROLLINO_R6, LOW);
      digitalWrite(CONTROLLINO_R5, LOW);
      delay(cooldown);

      Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6. ");
      while (isMoving == true) {

        if (digitalRead(C5_uvucen) == 1 && digitalRead(C6_uvucen) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else if ((pawnPosition == 2) || (pawnPosition == 5) || (pawnPosition == 8)) {

      isMoving = true;
      Serial.print("Going right. ");

      digitalWrite(CONTROLLINO_R6, LOW);
      digitalWrite(CONTROLLINO_R5, HIGH);
      delay(cooldown);

      while (isMoving == true) {
        Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6... ");
        if (digitalRead(C5_izvucen) == 1 && digitalRead(C6_uvucen) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }
    }
    else if ((pawnPosition == 3) || (pawnPosition == 6) || (pawnPosition == 9)) {

      isMoving = true;
```

```
1250      Serial.print("Going right. ");
1251
1252      digitalWrite(CONTROLLINO_R6, HIGH);
1253      digitalWrite(CONTROLLINO_R5, HIGH);
1254      delay(cooldown);
1255
1256      while (isMoving == true) {
1257        Serial.print("Waiting for input from sensors C5 and C6... ");
1258        if (digitalRead(C5_izvucen) == 1 && digitalRead(C6_izvucen) == 1) {
1259          isMoving = false;
1260          Serial.println("Move completed.");
1261        }
1262      }
1263    }
1264
1265    if ((pawnPosition == 1) || (pawnPosition == 2) || (pawnPosition == 3)) {
1266
1267      isMoving = true;
1268      Serial.print("Moving right table up. ");
1269
1270      digitalWrite(C3_cilindar, LOW);
1271      digitalWrite(C4_cilindar, LOW);
1272      delay(cooldown);
1273
1274      Serial.print("Waiting for input from sensors on C3 and C4. ");
1275      while (isMoving == true) {
1276
1277        if (digitalRead(C3_uvucen) == 1 && digitalRead(C4_uvucen) == 1) {
1278          isMoving = false;
1279          Serial.println("Move completed.");
1280        }
1281      }
1282
1283    }
1284    else if ((pawnPosition == 4) || (pawnPosition == 5) || (pawnPosition == 6)) {
1285
1286      isMoving = true;
1287      Serial.print("Moving right table to centre. ");
1288
1289      digitalWrite(C3_cilindar, HIGH);
1290      digitalWrite(C4_cilindar, LOW);
1291      delay(cooldown);
1292
1293      Serial.print("Waiting for input from sensors on C3 and C4. ");
1294      while (isMoving == true) {
1295
1296        if (digitalRead(C3_izvucen) == 1 && digitalRead(C4_uvucen) == 1) {
1297          isMoving = false;
1298          Serial.println("Move completed.");
1299        }
1300      }
1301
1302    }
1303    else if ((pawnPosition == 7) || (pawnPosition == 8) || (pawnPosition == 9)) {
1304
1305      isMoving = true;
1306      Serial.print("Moving right table down. ");
1307
1308      digitalWrite(C3_cilindar, HIGH);
1309      digitalWrite(C4_cilindar, HIGH);
```

```
      delay(cooldown);

      Serial.print("Waiting for input from sensors on C3 and C4. ");
      while (isMoving == true) {

        if (digitalRead(C3_izvucen) == 1 && digitalRead(C4_izvucen) == 1) {
          isMoving = false;
          Serial.println("Move completed.");
        }
      }

    }
    else {
      Serial.print("Incorrect format of requested position. Req. position was: ");
      for (int i = 0; i < 10; i++)
      {
        Serial.print(messageArray[i]);
      }
      Serial.println(" ");
    }
  }
  else {
    Serial.println("Wrong table side number choosen.");
  }
}

void pawnPickUp() {
  Serial.print("--> Initiating vacuum activation. ");
  while (digitalRead(pawnGrabbed_V1) != 1) {
    digitalWrite(C8_cilindar, HIGH);
    delay(cooldown);
    digitalWrite(Vacuum_1, HIGH);
    delay(cooldown);
    digitalWrite(C8_cilindar, LOW);
    delay(cooldown);
  }
  digitalWrite(C9_cilindar, HIGH);
  delay(cooldown);
  Serial.print("Pawn is picked up. ");
  isHandFull = true;
}

void pawnDrop() {

  digitalWrite(C9_cilindar, LOW);
  delay(cooldown);
  delay(cooldown);
  digitalWrite(C8_cilindar, HIGH);
  delay(cooldown);

  Serial.print("--> Initiating vacuum de-activation. ");
  digitalWrite(Vacuum_1, LOW);
  digitalWrite(C8_cilindar, LOW);
  delay(cooldown);

  isHandFull = false;
  Serial.println("Pawn dropped. ");
}

byte findAvailablePawn(byte tableSide) {
```

```
1370   byte pawn;
1371   if (tableSide == 1) {
1372     for (byte i = 9; i > 0; i--) {
1373       if (tableLeft[i] == 1) {
1374         pawn = i;
1375         break;
1376       }
1377       pawn = 0;
1378     }
1379   }
1380   else if (tableSide == 2) {
1381     for (byte i = 9; i > 0; i--) {
1382       if (tableRight[i] == 1) {
1383         pawn = i;
1384         break;
1385       }
1386       pawn = 0;
1387     }
1388   }
1389   return pawn;
1390 }
1391
1392 byte findFreeSpot(byte tableSide) {
1393   byte pawn;
1394   if (tableSide == 1) {
1395     for (byte i = 1; i < 10; i++) {
1396       if (tableLeft[i] == 0) {
1397         pawn = i;
1398         break;
1399       }
1400       pawn = 0;
1401     }
1402   }
1403   else if (tableSide == 2) {
1404     for (byte i = 1; i < 10; i++) {
1405       if (tableRight[i] == 0) {
1406         pawn = i;
1407         break;
1408       }
1409       pawn = 0;
1410     }
1411   }
1412   return pawn;
1413 }
1414
1415 byte currentPawnPosition() {
1416   // function for finding the position under the hand
1417   if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
1418
1419     if ((digitalRead(C1_uvucen) == 1) && (digitalRead(C2_uvucen) == 1)) {
1420
1421       if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
1422         return 1;
1423       }
1424       else if (((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C6_izvucen) == 1) && (digitalRead(C5_uvucen) == 1))) {
1425         return 2;
1426       }
1427       else {
1428         return 3;
```

```
1429      }
1430
1431    }
1432    else if (((digitalRead(C1_izvucen) == 1) && (digitalRead(C2_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C2_izvucen) == 1) && (digitalRead(C1_uvucen) == 1))) {
1433
1434      if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
1435        return 4;
1436      }
1437      else if (((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C6_izvucen) == 1) && (digitalRead(C5_uvucen) == 1))) {
1438        return 5;
1439      }
1440      else {
1441        return 6;
1442      }
1443    }
1444    else {
1445
1446      if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
1447        return 7;
1448      }
1449      else if (((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C6_izvucen) == 1) && (digitalRead(C5_uvucen) == 1))) {
1450        return 8;
1451      }
1452      else {
1453        return 9;
1454      }
1455    }
1456  }
1457  else if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
1458
1459    if ((digitalRead(C3_uvucen) == 1) && (digitalRead(C4_uvucen) == 1)) {
1460
1461      if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
1462        return 1;
1463      }
1464      else if (((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C6_izvucen) == 1) && (digitalRead(C5_uvucen) == 1))) {
1465        return 2;
1466      }
1467      else {
1468        return 3;
1469      }
1470    }
1471    else if (((digitalRead(C3_izvucen) == 1) && (digitalRead(C4_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C4_izvucen) == 1) && (digitalRead(C3_uvucen) == 1))) {
1472
1473      if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
1474        return 4;
1475      }
1476      else if (((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) ||
    ((digitalRead(C6_izvucen) == 1) && (digitalRead(C5_uvucen) == 1))) {
1477        return 5;
1478      }
1479      else {
1480        return 6;
1481      }
1482    }
```

```
    else {

      if ((digitalRead(C5_uvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) {
        return 7;
      }
      else if (((digitalRead(C5_izvucen) == 1) && (digitalRead(C6_uvucen) == 1)) ||
((digitalRead(C6_izvucen) == 1) && (digitalRead(C5_uvucen) == 1))) {
        return 8;
      }
      else {
        return 9;
      }
    }
  }
}

byte currentTableSide() {

  if (digitalRead(handIsLeft) == 1) {
    return 1;
  }
  else if (digitalRead(handIsRight) == 1) {
    return 2;
  }
}

bool onlyBinaryNumbers(String messageString) {
  for (char i = 0; i < messageString.length(); i++) {
    if ((String(messageString.charAt(i)) != "1") && (String(messageString.charAt(i))
!= "0")) {
      Serial.println("--> The received message contains non-binary numbers.");
      return false;
    }
  }
  return true;
}

void flashError() {
  digitalWrite(LED_Error, 1);
  delay(500);
  digitalWrite(LED_Error, 0);
}

```