

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Огњен Д. Милорадовић
Електронско управљање
лабораторијским системом ваздушне
левитације

завршни рад

Крагујевац, 2017.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Електроника

Број индекса: 28/2015

Огњен Д. Милорадовић
Електронско управљање
лабораторијским системом ваздушне
левитације

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Драган Тарановић, доцент-ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру рада је потребно реализовати електронско управљање лабораторијским системом ваздушне левитације на бази отворене електронске платформе Ардуино. Описати принцип рада и параметре примењених електронских и електричних компоненти за реализацију задатка. Направити одговарајући управљачки софтвер и затим га испитати на моделу. Резултате испитивања графички представити и образложити. Полазна литература:

[1] R. Nguyen, S. Richter, IfA Fachpraktikum - Experiment 2.7 : Air Ball, Automatic Control Laboratory, http://control.ee.ethz.ch/~ifa-fp/wiki/uploads/Main/ExperimentsWinter/airball_manual.pdf, ETHZurich, 2013.

[2] K. Schlacher, K. Rieger, Regelung des Labormodells Air Levitated Ball mittels LinuxEchtzeitsystem und einer Hardware von National Instruments, Johannes Kepler Universit  atLinz, 2009. <http://regpro.mechatronik.uni-linz.ac.at/education/projektsem/galerie-von-projektseminaren/air-levitated-ball-1>

[3] J. Hillard, K. Branch, A. Butterfield, *Teaching fluid dynamics with the ball-in-the-tube device*, IJMEE Vol. , 2015

[4] Каталог произвођача електронских компоненти,

Крагујевац, 21.08.2017.

Ментор:
Др Драган Тарановић, доцент

Air stream levitation laboratory model electronic control

Abstract

This bachelor's work presents the air stream levitation laboratory model. It contains the necessary analysis of utilised components and describes the synthesis of the entire mechatronic system. Automatic control was implemented using the Arduino Uno computer platform. Control algorithms and automatization of the controlled process was realized through software. An analysis of the achieved dynamic characteristics of the realized control is given.

Keywords: Arduino Uno, automatic control, air stream levitation, electronics

Електронско управљање лабораторијским системом ваздушне левитације

Резиме

У оквиру овог завршног рада представљен је лабораторијски модел система ваздушне левитације. Извршена је анализа употребљених компонената и описана синтеза мехатроничког система. Управљање је извршено помоћу *Ардуино Уно* рачунарске платформе. Извршена је софтверска имплементација и подешавање контролера. Дата је анализа постигнутих динамичких карактеристика реализованог управљања.

Кључне речи: Ардуино Уно, аутоматско управљање, ваздушна левитација, електроника

Садржај

Увод	1
1. Опис лабораторијског модела система ваздушне левитације	2
1.1 Управљани процес и његов математички модел.....	4
1.2 Ардуино	6
1.3 Актуатор: Вентилатор са интегрисаним мотором једносмерне струје управљан струјом у ротору	10
1.4 Ултразвучни сензор.....	14
1.5 Прилагодна електроника.....	18
1.6 Интеграција система у систем са затвореном повратном спрегом.....	23
2. Софтверско решење и имплементација контролера	25
3. Експериментални резултати	29
Закључак	31
Литература.....	32

Увод

Лабораторијска поставка система ваздушне левитације представља једну од најчешће употребљаваних едукационих средстава за илустровање принципа управљања процесима. Систем ваздушне левитације се састоји од пластичне цеви у којој се налази лоптица. На дну цеви се налази аксијални вентилатор којим се задаје одговарајући проток ваздуха унутар цеви и постиже кретање лоптице и одржавање у ваздуху. Задатак који је потребно остварити јесте прецизно одржавање лоптице унутар цеви на одређеној висини управљањем брзине струјања ваздуха. Управљање позицијом је тешко остварити мануелном контролом услед сложене зависности позиције од брзине струјања и ефеката турбуленције. Због овога се употребљавају системи са затвореном повратном спрегом и алгоритми аутоматског управљања.

У оквиру овог рада је разматрано моделирање процеса над којим се врши управљање као и структура мехатроничког система коју је потребно остварити како би се управљало позицијом лоптице. Разматране су електричне карактеристике употребљених сензорских и актуаторских система, као и ток и обрада сигнала коју је потребно реализовати између употребљених елемената. Извршен је развој софтвера за аквизицију сигнала и управљање процесом.

На лабораторијском моделу система ваздушне левитације је примењен развијени електронски систем управљања и успешно је реализована левитација лоптице у цеви.

1. Опис лабораторијског модела система ваздушне левитације

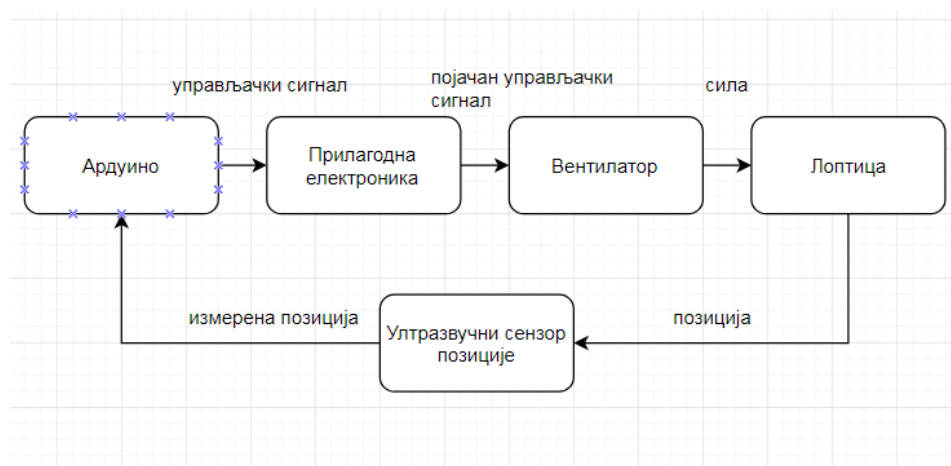
Систем ваздушне левитације се састоји од вертикално постављене пластичне, провидне цеви, која представља ваздушни тунел и у којој се налази наранџаста лоптица. Кроз цев струји ваздух захваљујући аксијалном вентилатору, који је монтиран на дну цеви, чиме се постиже померање и левитирање лоптице. У овој поставци лоптица представља објекат управљања и над њом се врши актуација, односно промена њене висине, помоћу аксијалног вентилатора. То се постиже мењањем његове брзине обртања, а тиме и брзина струјања ваздуха у цеви. У циљу управљања над датим објектом неопходно је реализовати управљачки систем.

Суштински постоје две категорије управљачких система: са и без повратне спреге. У системима без повратне спреге излазна величина система нема утицаја на управљање. Излазна величина код оваквих система је једнозначно одређена улазном величином и зависна само од исте. Због тога за практичну употребу оваквих система потребно је потпуно познавање системских параметара, висока калибрација и одсуство поремећаја у систему (како спољашњих, тако и унутрашњих). Са друге стране код система са затвореном повратном спрегом излазна величина се пореди са улазном и формира се сигнал грешке. Овај сигнал се прослеђује контролеру и на основу њега се формира управљање које тежи да изврши актуацију над системом која доводи до резултата да се разлика између улазне и излазне величине сведе на нулу. Овакав вид контроле је доста мање осетљив на варијације параметара система, као и на спољашње и унутрашње поремећаје. Систем који је предмет овог рада није у потпуности математички могуће описати и садржи извршан број спољашњих поремећаја. Последица овога је да извршан број системских параметара није познат. Поред овога на сам објекат управљања током кретања утичу ефекти турбуленције што доводи до тога да сигнал позиције има стохастичку компоненту. Због наведеног је неопходно, да би се остварила контрола позиције лоптице, конкретан систем реализовати као систем са затвореном повратном спрегом.

Као сензор за одређивање висине лоптице је искоришћен ултразвучни сензор позиције, постављен на врху цеви, док је контролер остварен помоћу Ардуино развојне платформе. Ардуино врши аквизицију података са сензора и њихову обраду и пореди их са дефинисаном референтном (жељеном) позицијом лоптице. На основу овако обрађених података о позицији лоптице и задате референтне вредности врши се генерисање управљачког сигнала (у форми PWM сигнала) коришћењем управљачких алгоритама. Овако генерисан управљачки сигнал се прослеђује прилагодној електроници, која заправо представља појачавач снаге, и он се доводи на потребан напонски ниво и користи за напајање аксијалног вентилатора. Тиме се постиже промена броја обртаја и актуација над објектом управљања. Лабораторијски модел система ваздушне левитације приказан је на слици 1.1, док је на слици 1.2 дата блок шема управљачког система. Табелом 1.1 су дате релевантне димензије модела.



Слика 1.1 Лабораторијски модел система ваздушне левитације



Слика 1.2 Блок шема лабораторијски модел система ваздушне левитације

Табела 1.1 Параметри лоптице и цеви

Лоптица		Цев	
Параметар	Вредност	Параметар	Вредност
Пречник	64 mm	Унутрашњи пречник	73 mm
Маса	11 g	Висина	2 m
Материјал	пластика	Материјал	плексиглас
Боја	наранџаста	Боја	прозирна

1.1 Управљани процес и његов математички модел

Да би смо у потпуности математички описали кретање лоптице у зависности од брзине кретања флуида, као и размотрили услове равнотеже, неопходно је формирати одговарајући математички модел процеса. Левитација лоптице у разматраном лабораторијском моделу се остварује услед дејства силе отпора ваздуха који опструјава лоптицу. Ова сила се супроставља дејству силе земљине теже и у зависности од њихових интензитета разликујемо три случаја:

- лоптица се помера вертикално навише (сила отпора ваздуха је већа од силе земљине теже)
- лоптица се помера вертикално наниже (сила отпора ваздуха је мања од силе земљине теже)
- лоптица левитира (сила отпора ваздуха и сила земљине теже су изједначене)

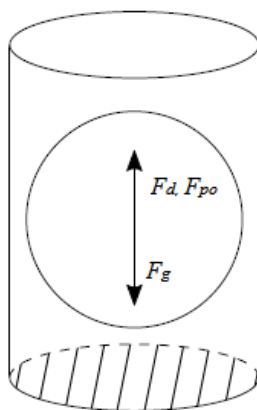
Силе које делују на лоптицу коју опструјава ваздух су: сила земљине теже, F_g , сила отпора ваздуха, F_d , и сила потиска, F_{po} , и оне су тим редоследом дате следећим релацијама:

$$F_g = m_l g \quad (1.1)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho (v - v_l)^2 C_d S_l \quad (1.2)$$

$$F_{po} = V_l \rho g \quad (1.3)$$

где су величине које се јављају у наведеним једначинама: m_l [kg] маса лоптице, g [m/s²] убрзање земљине теже, ρ [kg/m³] густина ваздуха, v [m/s] брзина струјања ваздуха, v_l [m/s] брзина лоптице, C_d коефицијент отпора, S_l [m²] површина попречног пресека лоптице, V_l [m³] запремина лоптице. Распоред описаних сила је дат сликом 1.3.



Слика 1.3 Скица лоптице у цеви са означеним силама[15]

Сила отпора ваздуха је аеродинамичка сила и она представља главну погонску силу која омогућава покретање лоптице унутар цеви. Последица је дејства притисних и смицајних сила флуида који опструјава лоптицу и пропорционална је квадрату релативне брзине струје ваздуха у односу на лоптицу. Коефицијент отпора који је битан за дефинисање нумеричке вредности ове силе је завистан од Рејнолдсовог броја који је дефинисан датим условима струјања. За режиме рада овог лабораторијског модела се може усвојити вредност коефицијента отпора од 0,5.

Налажењем резултанте сила које делују на лоптицу и применом другог Њутновог закона добијамо диференцијалну једначину која описује кретање лоптице у зависности од брзине струјања ваздуха, као и резултантну силу која делује на лоптицу, F_l :

$$F_l = m_l \ddot{y} = \frac{1}{2} \rho (v - \dot{y})^2 C_d S_l + V_l \rho g - m_l g \quad (1.4)$$

где је са у означена вертикална позиција лоптице у цеви у односу на дно цеви.

На основу једначине 1.4 се може закључити да је диференцијална једначина која описује кретање лоптице у зависности од брзине струјања ваздуха нелинеарна, што доводи до њене ограничене употребљивости приликом пројектовања контролера и анализе математичког модела система.

У случају левитације лоптице, можемо искористити једначину 1.4 за израчунавање неопходне брзине струјања ваздуха, односно протока који је потребно остварити да би лоптица левитирала. Тада имамо да је позиција лоптице константа ($y = const$), што

значи да су сви изводи по времену једнаки нули. Коришћењем овог услова у једначини 1.4 и изражавањем брзине струјања ваздуха из исте, добијамо:

$$v = \sqrt{\frac{m_l g - V_l \rho g}{0,5 \rho C_d S_l}} = 10,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.5)$$

односно, имамо да је проток који је потребно остварити:

$$Q = v S_c = 0,03345 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (1.6)$$

где је $S_c [\text{m}^2]$ површина попречног пресека цеви.

1.2 Ардуино

Ардуино је физичко рачунарска платформа „отвореног кода“ (енг. open-source) заснована на једноставној улазно/излазној плочи и развојном окружењу. Намењена је брзој изради прототипова и поседује могућност аквизиције дигиталних и аналогних сигнала, њихове обраде, имплементације различитих типова контролера и генерисање дигиталних и аналогних сигнала. Сва поменута функционалност се остварује софтверском имплементацијом.

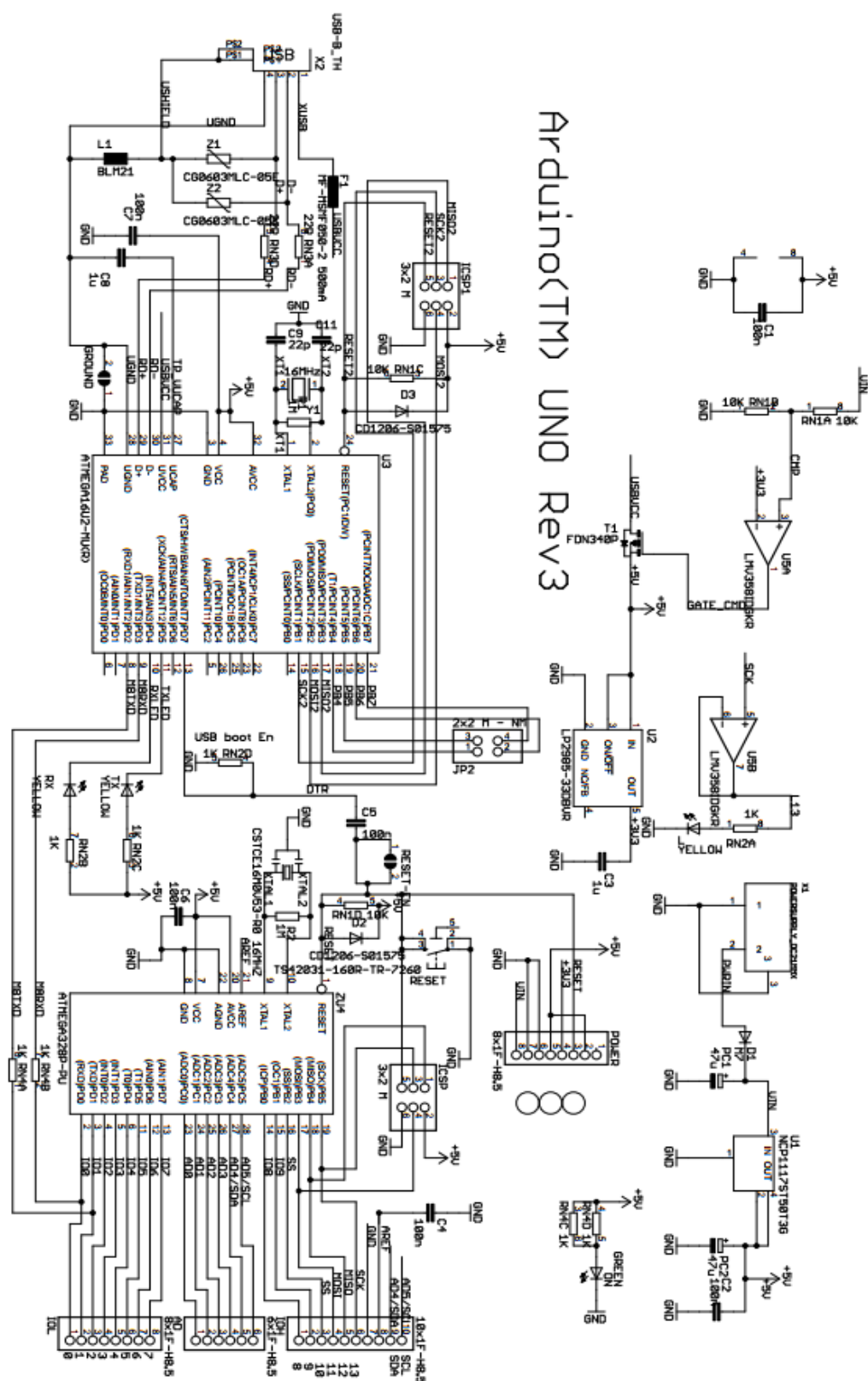
У овом раду искоришћен је модел „Arduino Uno R3“ који има микроконтролерску плочу базирану на ATMEGA328 осмобитном микроконтролеру AVR архитектуре. Контролер поседује 14 дигиталних излазно/улазних пинова, од којих 6 могу да се користе као PWM (Pulse Width Modulation) излази, један десетобитни аналого/дигитални претварач који преко мултиплексера омогућава 6 аналогних улаза, USB конектор за остваривање комуникације са рачунаром, прикључак за напајање, ICSP конектор и тастер за ресетовање. Напајање плоче може бити омогућено путем USB конектора или коришћењем екстерног извора напајања. На слици 1.4 је дат приказ плоче Ардуино Уно са означеним изводима, док је детаљнија спецификација дата табелом 1.2. Слика 1.5 је дата електрична шема Ардуино рачунарске платформе.



Слика 1.4 Ардуино Уно развојна плоча[6]

Табела 1.2 Техничка спецификација Ардуино Уно развојне плоче

Микроконтролер	ATmega328P
Погонски напон	5V
Препоручени улазни напон	7-15 V
Дозвољени улазни напон	6-20 V
Дигитални И/У изводи	14
PMW дигитални И/У пинови	6
Аналогни улазни изводи	6
Једносмерна струја по У/И изводу	20 mA
Једносмерна струја за 3.3V извод	50 mA
Флеш меморија	32 KB, 0,5 KB се користи за bootloader
Статички рам	2 KB
ЕЕПРОМ	1 KB
Радни такт	16 MHz
Димензије	68,8 mm x 53,4 mm



Слика 1.5 Електрична шема Ардунио развојне плоче[5]

Као што је приказано на електричној шеми Ардуино има у себи интегрисана два микроконтролера: ATMEGA16U2 и ATMEGA328P. Микроконтролер ATMEGA16U2 има улогу драјвера и користи се за омогућавање комуникације између персоналног рачунара и ATMEGA328P микроконтролера. На основу предпрограмираног софтвера врши конверзију USB комуникацијског протокола у TTL серијску комуникацију. ATMEGA328P микроконтролер представља главни микроконтролерски чип који се може програмирати и са којим се врши интеракција са окружењем преко улазно/излазних прикључака.

Сваки од 14 дигиталних прикључака се може користити као улаз или излаз, коришћењем софтверских функција *pinMode()*, *digitalWrite()* и *digitalRead()*. Радни напон им износи 5V. Према препорученим радним условима сваки прикључак може бити извор или понор струје од 20mA и поседује унутрашње *pull-up* отпорнике од 20-50 kΩ. Максимална струја ових прикључака износи 40mA и њеним прекорачењем може доћи до оштећења микроконтролера.

Ардуино поседује 6 аналогних улаза, означених од A0 до A5, од којих сваки поседује 10-битну резолуцију (1024 различитих вредности). Подразумевано подешавање мерења је од 0 до 5V, али је могуће подесити горњу границу опсега коришћењем AREF прикључка на који се доводи референтни напон и *analogReference()* функције.

Поред наведених аналогних и дигиталних прикључака постоји и извештај број прикључака са специјализованом функцијом [5]:

- Прикључци за серијску комуникацију: 0(RX) и 1(TX). Користе се за пријем (RX) и слање (TX) TTL серијских података. Ови прикључци су повезани са одговарајућим прикључцима на ATMEGA16U2 микроконтролеру.
- Прикључци за екстерне прекидне рутине: 2 и 3. Могу се подесити за покретање прекидне рутине уколико је на њима логичка нула, на узлазну и силазну ивицу и приликом промене вредности сигнала.
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10 и 11. Користе се за генерисање 8-битног PWM сигнала уз помоћу функције *analogWrite()*.
- SPI: 10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK). Подржавају SPI комуникацију коришћењем SPI библиотеке.
- LED: 13. Поседује интегрисану LED диоду који је повезана са дигиталним излазом. Када је прикључак на логичкој јединици диода светли, када је на логичкој нули, диода је угашена.
- TWI: A4 или SDA прикључак и A5 или SCL прикључак. Подржавају TWI комуникацију коришћењем *Wire* библиотеке.

Ардуино се програмира помоћу *Arduino Software* интегрисаног развојног окружења заснованом на *java*, *processing* и другим програмским језицима. Само писање програма се врши на персоналном рачунару и након његовог успешног компајлирања се уписује

на микроконтролер. ATMEGA328P на себи поседује *bootloader* софтвер који омогућава уписивање новог софтвера путем серијске комуникације, без употребе додатног хардверског програматора.

Главна структура програма се састоји од две процедуре *setup()* и *loop()*. Прва се покреће једном на почетку извршења програма и уобичајено се користи за иницијализацију променљивих и извршавање процедура припреме прикључака за упис или читање. Процедура *loop()* представља заправо бесконачну петљу и подпрограми унутар ње се извршавају током сваке итерације петље. Она се користи за формирање програма који омогућавају реализацију „скен“ циклуса: аквизиција података, референтног сигнала, израчунавање управљања, генерисање управљачког сигнала итд. Унутар библиотека Ардуино развојног окружења постоји велики број процедура и функција које омогућавају различите манипулације улазно/излазним прикључцима, уписивање и читање вредности и имплементацију стандардних програмских алгоритама.

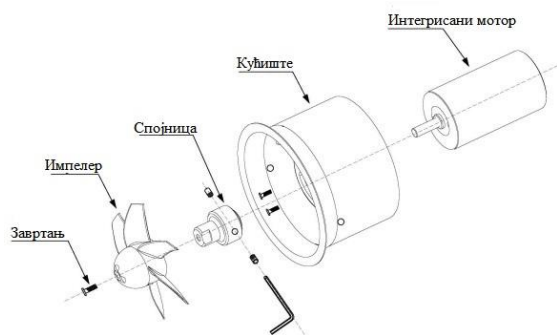
1.3 Актуатор: Вентилатор са интегрисаним мотором једносмерне струје управљан струјом у ротору

Као актуатор се користи аксијални вентилатор GW/EDF-40H. Његове техничке карактеристике, дате од стране произвођача су приказане следећом табелом:

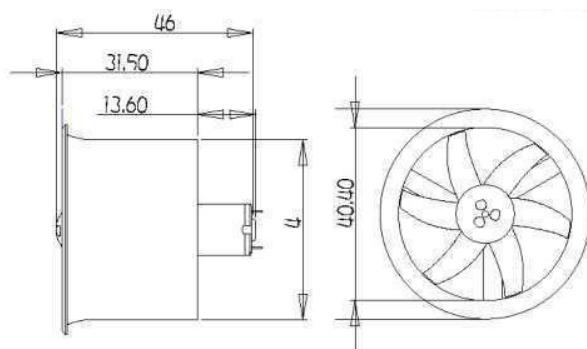
Табела 1.3 Техничке карактеристике вентилатора GW/EDF-40H дате од стране произвођача[8]

Ротор	Напон (V)	Струја (A)	Потисак (g)	Снага (W)	Ефикасност (g/W)
EP1630x6	9,6	1,5	53	14,40	3,68
EP1630x6	10,8	1,8	65	19,44	3,34
EP1630x6	12	2,1	74	25,20	2,94

Изглед вентилатора је дат следећим цртежима:



Слика 1.6 Приказ склопа вентилатора[8]



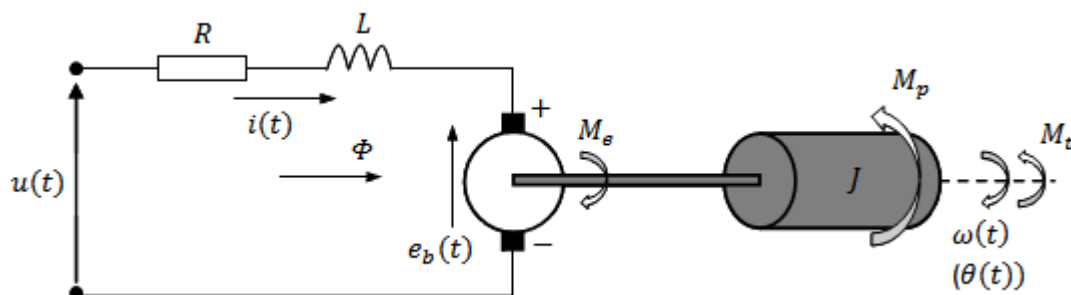
Слика 1.7 Приказ вентилатора са релевантним димензијама (јединисе су у mm)[8]

Актуација над објектом управљања, односно померање лоптице унутар цеви, се врши дејством струје ваздуха, постизањем одговарајућег протока и притиска у цеви. Ове величине су директно зависне од брзине обртања импелера, односно вратила мотора једносмерне струје CN12-RXC који је саставни део склопа вентилатора. Да би смо реализовали управљачки систем неопходно је размотрити математичке моделе компоненти склопа разматраног актуатора. На овај начин можемо сагледати динамичке карактеристике актуатора и какве одзиве производе задата управљања. Циљ нам је да математички опишемо целокупан систем како би тачно знали каква померања лоптице производе задата управљања. Познавајући целокупан математички опис система можемо пројектовати прецизне контролере и остваривати много боље и прецизније динамичке одзиве. Уколико није могуће целокупно математичко описивање система, мора се приступити експерименталном подешавању контролера. Познавање делова математичког модела нам може указати на одговарајућа техничка решења која се могу имплементирати за реализацију система са затвореном повратном спрегом.

Анализа зависности оствареног протока и притиска вентилатора од угаоне брзине и момента мотора услед своје сложености није разматрана у оквиру овог рада. Са становништва пројектовања оваквог мехатроничког система недостатак ових података уноси одређена ограничења у погледу остваривања контроле. Другим речима, неопходно је експериментално утврђивање ефективности имплементираних управљачких алгоритама, као и само њихово подешавање. Уколико је ефективна контрола остварива, ова чињеница не уноси ограничења по погледу прецизности управљања, већ одсуство методолошког начина подешавања параметара контролера само продужава време потребно за пројектовање управљачког система. У даљем тексту је разматран модел мотора једносмерне струје како би се илустровало да се управљање актуатором може остварити управљањем улазног напона мотора.

Мотор једносмерне струје управљан струјом у ротору

Математички модел једносмерног мотора управљаног струјом у ротору може бити дат у односу на следећи шематски приказ.



Слика 1.8 Шематски приказ мотора једносмерне струје

где су:

R – отпорност у намотајима ротора (отпорност арматуре)

L – индуктивност у намотајима ротора

$u(t)$ – улазни напон (управљачки напон)

$i(t)$ – струја у намотајима ротора

Φ – флуks електромагнетног поља сталног магнета

$e_b(t)$ – контраелектромоторна сила

$\omega(t)$ – угаона брзина ротора

$\theta(t)$ – угаона позиција ротора

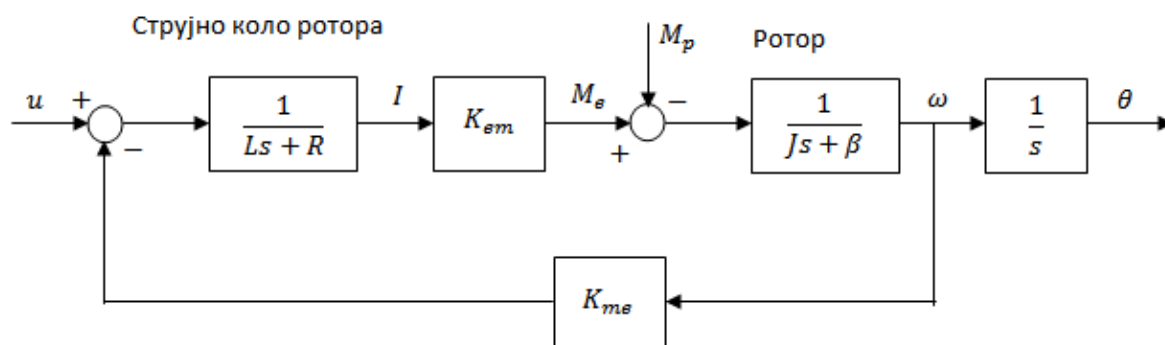
M_e – електромеханички обртни момент

M_t – обртни момент вискозног трења

J – момент инерције покретних делова (ротора и импелера)

$M_p(t)$ – поремећајни (спољашњи) момент оптерећења који делује на оптерећеном вратилу

Односно, са становишта математичког моделирања, мотор се може приказати следећим структурним блок дијаграмом и математичким моделом



Слика 1.9 Блок дијаграм мотора једносмерне струје

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_{em}}{(Ls + R)(Js + \beta) + K_{em}K_{me}} - \frac{M_p(s)(Ls + R)}{(Ls + R)(Js + \beta) + K_{em}K_{me}} \frac{1}{U(s)} \quad (1.7)$$

Математички модел се може даље упростити (када је механичка импеданса оптерећења $(Js + \beta)$ велика, индуктивност роторског намотаја се може сматрати занемарљиво малом ($L \approx 0$), што је у овом случају и оправдано, услед великог момента инерције и отпора ваздуха), и свести на облик:

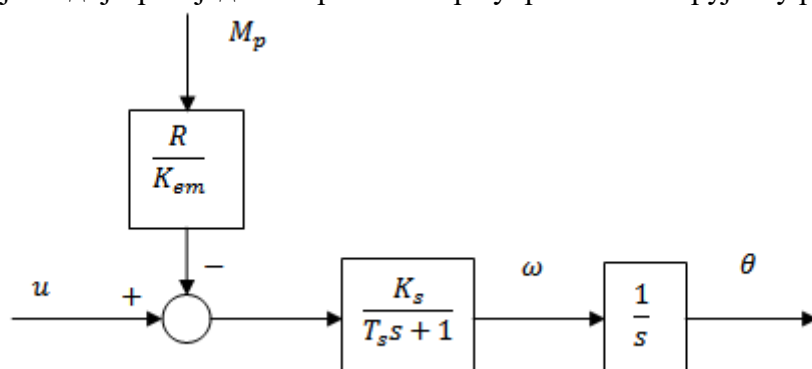
$$\omega(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} U(s) - \frac{R}{K_{em}} \frac{K_s}{T_s s + 1} M_p(s) \quad (1.8)$$

где су K_s фактор статичког појачања мотора и T_s временска константа мотора дати изразима:

$$K_s = \frac{K_{em}}{R\beta + K_{em}K_{me}} \quad (1.9)$$

$$T_s = \frac{JR}{R\beta + K_{em}K_{me}} \quad (1.10)$$

Коначно добијамо дијаграм једносмерног мотора управљаног струјом у ротору

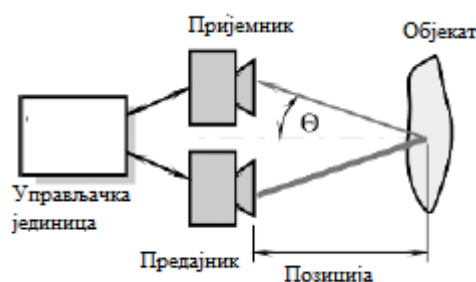


Слика 1.10 Упроишћени блок дијаграм једносмерног мотора управљаног струјом у ротору

На основу претходне анализе може се закључити да се интегрисани мотор актуатора понаша као систем првог реда и да је у усталеним режимима рада брзина обртања импелера директно пропорционална напону доведеном на прикључке мотора (константа пропорционалности је K_s). Другим речима, управљање брзином обртања импелера можемо остварити контролом напона напајања интегрисаног мотора. Ово се постиже помоћу управљачког сигнала генерисаног од стране Ардуино микроконтролера и прилагођеног одговарајућим електричним колом за напајање мотора једносмерне струје.

1.4 Ултразвучни сензор

Принцип рада овог сензора се заснива на емитовању и детектовању ултразвучних таласа, ради утврђивања позиције жељеног објекта. Састоје се од два ултразвучна претварача и управљачке јединице. Један ултразвучни претварач врши улогу предајника и претвара електрични сигнал у ултразвучни талас који се емитује ка објекту. Када таласни фронт инцидентног, емитованог ултразвучног таласа наиђе на објекат, део његове енергије се рефлектује. Други ултразвучни претварач врши улогу пријемника и претвара енергију рефлектованог таласа у електрични сигнал. Основна поставка ултразвучног сензора приказана је сликом 1.11.



Слика 1.11 Основна поставка ултразвучног сензора[9]

Уколико познајемо брзину простирања таласног фронта у датом медијуму, и време потребно таласном фронту да пређе растојање од предајника, до објекта, и назад до пријемника, удаљеност објекта од сензора можемо израчунати према следећој формули:

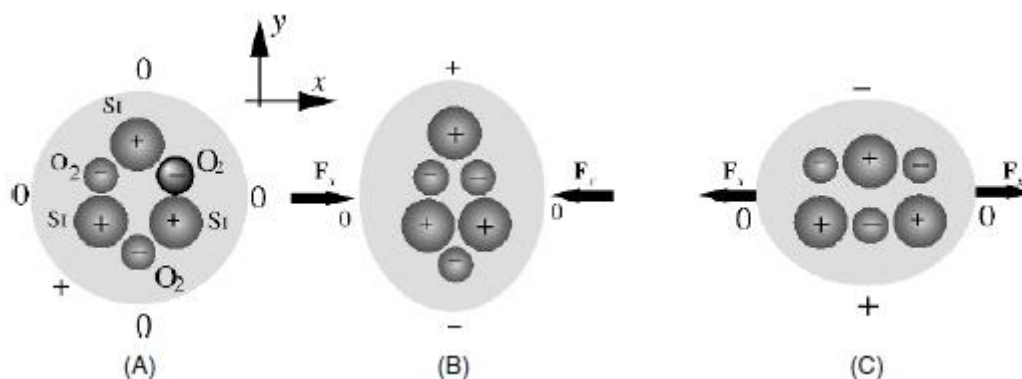
$$L_0 = \frac{v t \cos \theta}{2} \quad (1.11)$$

где су: v - брзина простирања таласа, t – време простирања таласа од пријемника до предајника, θ - нападни угао инцидентног таласа, L_0 - растојање између објекта и ултразвучног сензора. Уколико је нападни угао довољно мали може се сматрати да је $\cos \theta \approx 1$.

За генерисање ултразвучних механичких таласа неопходно је произвести осцилаторно померање неке мембране коришћењем електричног сигнала. За претварање ултразвучног таласа у електрични сигнал, неопходно је превести осцилаторно кретање мембране у струју или напон. У ову сврху се користе пиезоелектрични претварачи јер захваљујући пиезоелектричном ефекту могу извести обе функције.

Пиезоелектрици имају способност стицања електричног диполног момента при механичкој деформацији, раздвајањем центара позитивних и негативних наелектрисања. Пиезоелектрични модул (d) карактерише промену електричног помераја (D) при промени механичког напона (σ): $d = \partial D / \partial \sigma$. Захваљујући обрнутом

пиезоелектричном ефекту дејством наизменичног електричног поља долази до генерисања наизменичног напона, односно осцилација пиезоелектричног елемента. Монокристални кварц (SiO_2) представља један од најзначајнијих пиезоелектрика, те ће на његовом примеру бити илустративно објашњен пиезоелектрични ефекат (слика 1.12).



Слика 1.12 Илустрација пиезоелектричног ефекта код монокристалног кварца[9]

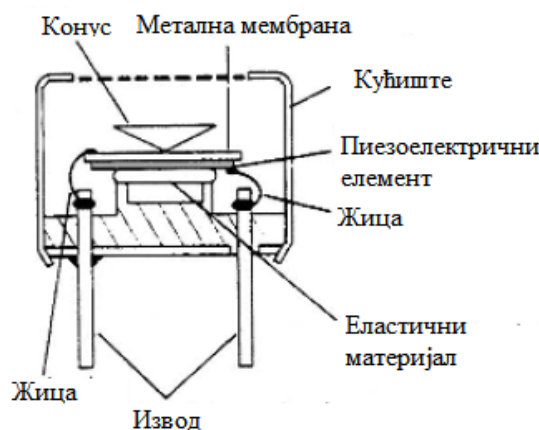
Кварц кристалише по хексагоналној решетки, где је на Слици 1.12А дат поглед базе и оријентација координатног система је таква да x у равни лежи у равни базе, док је z оса паралелна са висином шестоугаоне призме. У једној бази кристала се налазе три атома силицијума и шест атома кисеоника, који су груписани по паровима. Сваки атом силицијума носи четири позитивна наелектрисања, док сваки пар атома кисеоника носи четири негативна наелектрисања (два по атому). У том смислу раванска ћелија кварца је електрично неутрална када на њу не делује механичко оптерећење. Када оптеретимо кристал на притисак, спољном силом F_x дуж x осе, кристална решетка се деформише. На слици 1.12В је приказано да услед дејства притиска долази до прерасподеле наелектрисања на тај начин да се формира диполни момент усмерене у смеру z осе. Уколико се кристал оптерети на затезање, хексагонална решетка се деформише тако да се формира диполни момент супротног смера (Слика 1.12С). Као што је већ поменуто, могуће је постигнути и обрнуто, дејством електричног поља и формирањем диполних момената долази до појављивања механичког напона. Релације које повезују диполни момент и механички напон у пиезоелектрику су дате следећим системом једначина:

$$\begin{aligned}
 P &= P_{xx} + P_{yy} + P_{zz} \\
 P_{xx} &= d_{11}\sigma_{xx} + d_{12}\sigma_{yy} + d_{13}\sigma_{zz} \\
 P_{yy} &= d_{21}\sigma_{xx} + d_{22}\sigma_{yy} + d_{23}\sigma_{zz} \\
 P_{zz} &= d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz}
 \end{aligned}
 \tag{1.12}$$

где су P_{xx} , P_{yy} и P_{zz} вектори густине диполних момената дуж одговарајућих оса, σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{zz}

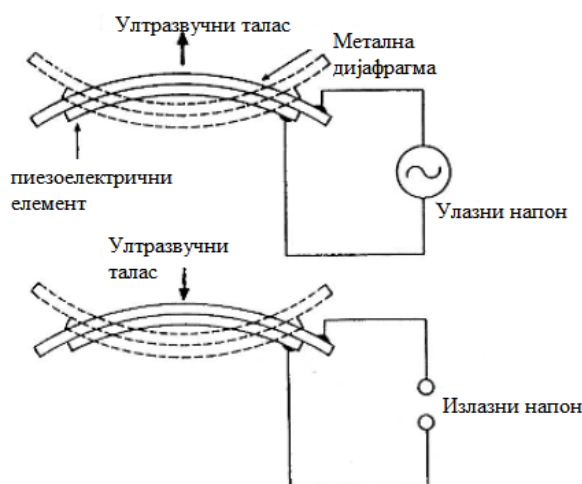
нормални напони дуж одговарајућих оса и d_{ij} одговарајући пиезоелектрични коефицијенти ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$).

За израду пиезоелектричних резонатора (ултразвучних претварача), кварц се сече на танке плочице, које се облажу металним електродама. Типична конструкција пиезоелектричног претварача је дата сликом 1.13.



Слика 1.13 Типична конструкција ултразвучног претварача за ваздушни радни медијум[9]

Уколико доведемо наизменични напон на изводе пиезоелектричног претварача долази до његовог осциловања и генерисања ултразвучног таласа исте фреквенције. Захваљујући обрнутом пиезоелектричном ефекту, уколико ултразвучни талас делује на металну мембрану, генерисаће се наизменични напон на изводу (слика 1.14). Другим речима, већина ултразвучних претварача може радити као пријемник и као предајник. Типична радна учестаност пиезоелектричног предајника износи 32 KHz. Када се аквизиција позиције обавља у импулсном режиму могуће је исти пиезоелектрични елемент користити као пријемник и као предајник. Уколико постоји потребна за континуалним емитовањем ултразвучних таласа неопходно је користити засебне елементе.



Слика 1.14 Принципи рада ултразвучног претварача у пријемном и предајном режиму[9]

За утврђивање позиције лоптице у цеви лабораторијског модела коришћен је ултразвучни сензор позиције HC-SR04 приказан на слици 1.15.



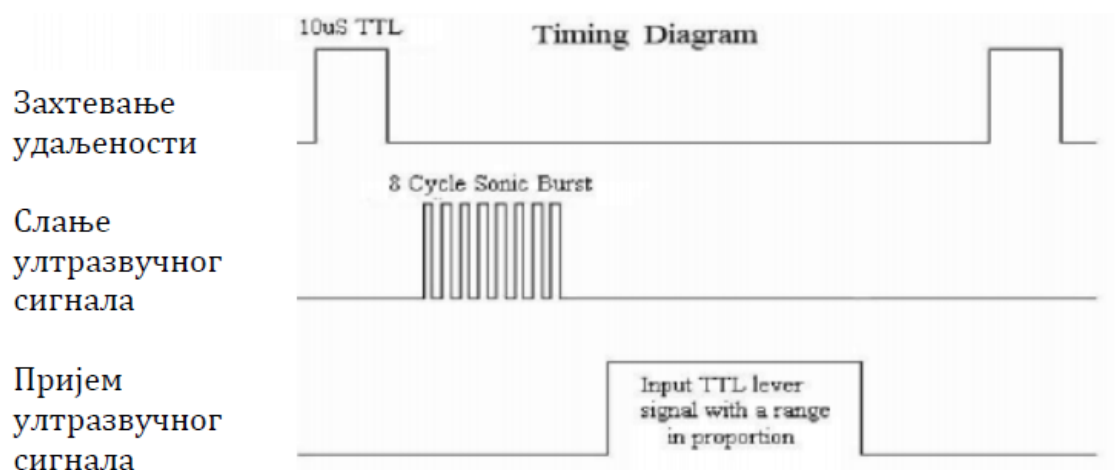
Слика 1.15 Ултразвучни сензор HC-SR04, коришћен при изради лабораторијског модела[10]

Карактеристике сензора су дате следећом табелом

Табела 1.4 Техничке карактеристике ултразвучног сензора HC-SR04[10]

Напон напајања	5V – DC
Струја мирног рада	<2 mA
Радна струја	15 mA
Угао детекције	<15°
Опсег позиције	2cm – 400cm
Резолуција	0.3cm
Ширина окидног импулса	10μs
Димензије	45mm x 20mm x 15mm

Ултразвучни сензор HC-SR04 се састоји од ултразвучног одашиљача, пријемника и интегрисаног микроконтролера. Да би се започео процес мерења неопходно је на извод Trig довести импулс високог напонског нивоа (5 V) чија је ширина не мања од 10μs. Овим се иницијализује процес аквизиције. Ултразвучни одашиљач емитује у трајању од осам периода ултразвучни импулсни сигнал учестаности од 40 kHz и сензор чека детекцију рефлектованог ултразвучног сигнала. Када пријемник детектује рефлектовани звучни талас на изводу Echo се генерише импулс високог напонског нивоа (5 V) чија ширина је пропорционална растојању до објекта. На временском дијаграму који следи је илустративно описан принцип рада.



Слика 1.16 Временски дијаграм ултразвучног сензора[10]

Позиција објекта се утврђује на основу временског трајања импулса са Echo извода према формули датој од стране произвођача[10]:

$$\text{Позиција [cm]} = \text{Време трајања излазног импулса [\mu\text{s}]} / 58$$

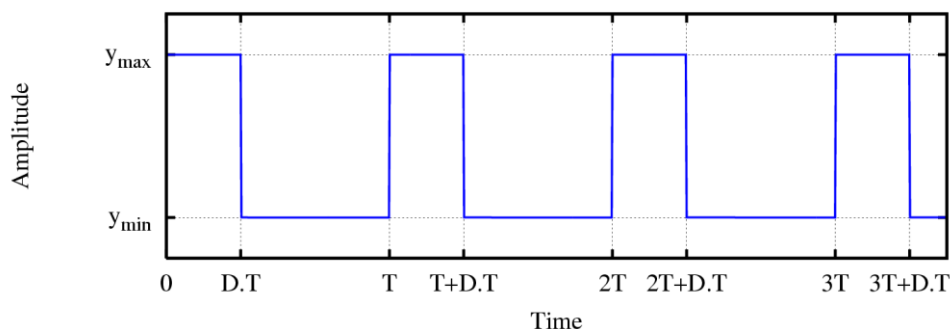
1.5 Прилагодна електроника

У претходном тексту описан је начин аквизиције сензорских информација. Прикупљене вредности се прослеђују микроконтролеру и обрађују, чиме се формира управљачка величина. Да би се овом величином остварило управљање интегрисаним DC мотором и жељена актуација неопходна је прилагодна електроника. Помоћу ње се врши појачање управљачког сигнала и постиже потребна снага и напонски ниво. У конкретној имплементацији генерисани напон се користи као напон напајања мотора. Према математичком моделу мотора, напон напајања производи одговарајућу угаону брзину и обртни момент импелера, чиме постижемо потребну брзину струјања ваздуха и напон вентилатора. Коришћена електрична кола, као и природа управљачког сигнала ће бити детаљно описани у даљем тексту.

Управљачки (PWM) сигнал

Угаона брзина импелера се контролише напоном на улазу мотора. Будући да је једносмерни мотор линеаран систем, брзина на вратилу ће бити сразмерна интезитету напона на улазу мотора. Напон на улазу може бити произвољног интезитета, унутар дозвољених граница, у било ком временском тренутку. Другим речима улазни напон је континуална величина, док употребљени микроконтролер не поседује способност генерисања истих. У том случају је неопходно употребити методу дигиталног управљања која најближе симулира аналогни сигнал који је потребно остварити. Из овог разлога користимо импулсно ширинску модулацију (енг. Pulse Width Modulation,

слика 1.17). Принцип рада је следећи: излазни сигнал је по природи дигиталан и његова амплитуда може бити на напону од нула волти (пауза) или на максималном напону (импулс); укупно време трајања паузе и импулса се назива периоде и она је фиксна, док се однос времена трајања импулса и периоде назива испуна (енг. Duty Cycle) и мења се током времена; величина испуне диктира средњу вредност сигнала током једне периоде, односно средњу вредност излазног напона; уколико је учестаност сигнала довољно висока (периода довољно мала) аналогни објекат управљања ће се понашати као нископропусни филтар, тако да вредност сигнала коју објекат региструје током једне периоде јесте заправо средња вредност.



Слика 1.17 График PWM сигнала[11]

Уколико узмемо да је импулсна поворка дефинисана функцијом $f(t)$, периодом T , минималном вредношћу y_{min} , максималном вредношћу y_{max} и испуном D , тада се средња вредност сигнала $\bar{y}$ може изразити као:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.13)$$

решавањем овог интеграла се добија:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \quad (1.14)$$

$$= \frac{1}{T} (DT y_{max} + T(1 - D) y_{min}) \quad (1.15)$$

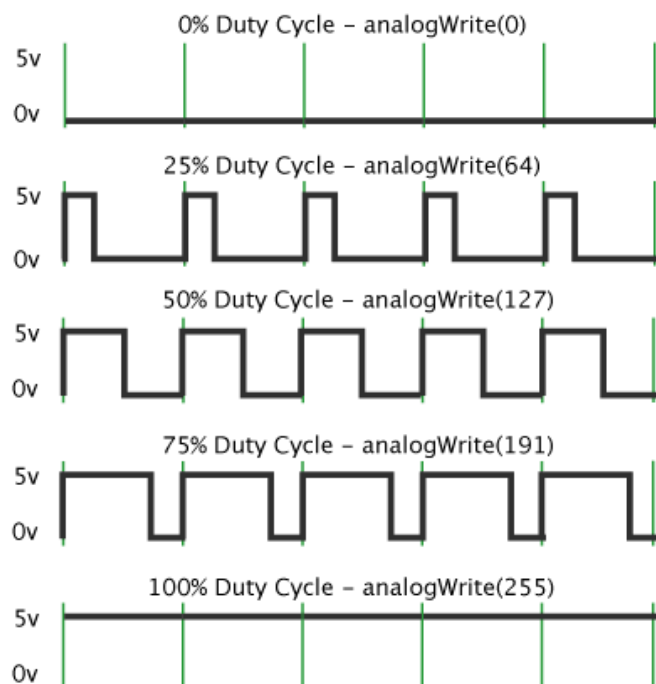
$$= D y_{max} + (1 - D) y_{min} \quad (1.16)$$

У нашем случају је $y_{min} = 0$, па из релације 1.16 следи да је средња вредност излазног напона директно пропорциона испуни.

У микроконтролерима као што је и онај употребљен у овом раду се ова врста модулације имплементира софтверски. Потребно је направити бројач који у правилном временском интервалу додаје један на своју вредност. Када дође до максималне предефинисане вредности, враћа се на нулу. У истој рутини где се додаје један на

вредност, потребно је упоредити тренутну вредност бројача са жељеном вредношћу. Ако је тренутна вредност испод жељене, на излаз се поставља логичка јединица, а у супротном логичка нула. Максимална вредност бројача представља резолуцију модулятора (примера ради, ако је максимална вредност 4, могуће је имати само пет нивоа на излазу, резолуција је 20%). Време за које бројач дође до максималне вредности представља периоду.

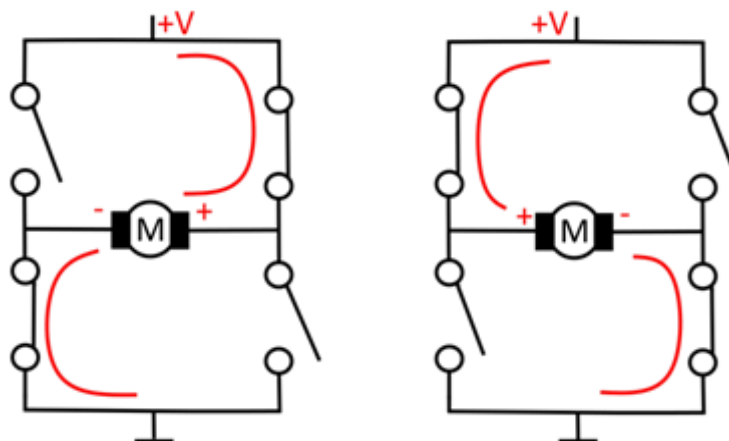
Ардуино поседује предефинисану функцију `analogWrite()` која као аргумент узима вредност испуне. Овај аргумент је скалиран на вредност од 0 до 255, тако да 0 представља 0% испуне, док 255 представља 100% испуне. Следећом сликом су приказане различите вредности испуне за различите вредности аргумента.



Слика 1.18 Зависност испуне од различитих аргумената у функцији `analogWrite()` [12]

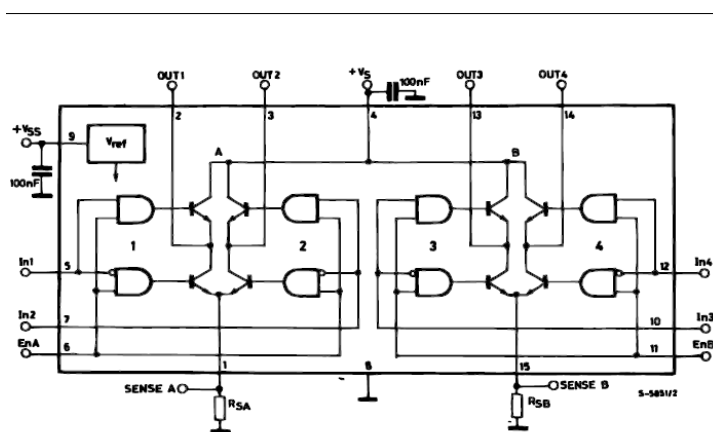
Х-мост

За управљање датим мотором неопходно је обезбедити одговарајући напон, који заузврат, на основу математичког модела, генерише тражени обртни момент. Пошто номинални напон мотора износи 12V, док максимална струја достиже вредност од 1.5A узимајући у обзир ограничења Ардуина (максимални излазни напон и струја су 5V и 20mA респективно) ово за собом повлачи чињеницу да уколико желимо да постигнемо захтеване радне режиме мотора неопходно је обезбедити додатно напајање за њега од 12V у виду генератора једносмерног напона, док се излазни сигнал микроконтролера може користити искључиво као управљачки. У ту сврху употребљен је Х-мост приказан на слици 1.19. [6]



Слика 1.19 X-мост[6]

Карактеришу га четири прекидачка елемента, између којих се налази електромотор, док је са V означено додатно напајање мотора. Два прекидача која се налазе на једној дијагонали су увек затворена, док су друга два отворена. Избором дијагонале која је отворена, бира се смер кретања мотора. Брзина кретања мотора је пропорционална напону који се доводи на X мост. Уместо механичких прекидача, могуће је поставити транзисторе, и регулацијом напона на бази транзистора могуће је пропуштати струју кроз транзистор, ефективно га користећи као прекидач. Коришћен X мост има ознаку L298 и представља интегрално коло које у себи садржи транзисторе као прекидачке елементе и њиме се могу истовремено управљати са два мотора. [6]



Слика 1.20 Електрична шема X-моста са означеним прикључцима[13]

Прикључци на X мосту приказаном на слици 1.20 су дати у табели 1.5

Табела 1.5 Прикључци X-моста

Прикључак	Функција
V_s	Извор напајања мотора

V_{ss}	Извор напајања логике
In1, In2	Прикључци за контролу прекидача првог мотора
EnA	Прикључак за галванско спајање првог мотора
In3, In4	Прикључци за контролу прекидача другог мотора
EnB	Прикључак за галванско спајање другог мотора
OUT1, OUT2	Прикључци првог мотора
OUT3, OUT4	Прикључци другог мотора

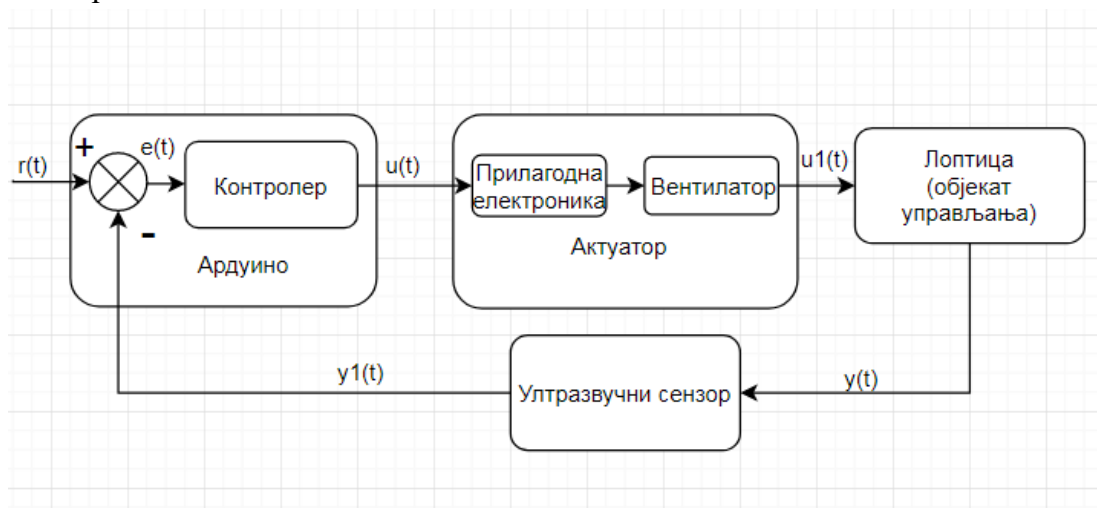
X - мост има два режима рада, који диктирају како се X - мост понаша када је напон *PWM* сигнала једнак нули, а то су 'Run-Coast' – слободно кретање мотора при ниском нивоу *PWM* сигнала, и 'Run-Brake' – кочење мотора при ниском нивоу *PWM* сигнала. Први режим рада доводи до високе нелинеарности у раду мотора, док други режим рада смањује ту нелинеарност. X мост се доводи у први режим рада тако што се прикључак EnA или EnB доводи на логичку нулу при ниском нивоу *PWM* сигнала, а други тако што се дати прикључци увек држе на логичкој јединици. При првом режиму рада, мотор се физички искључује из струјног кола (висока импеданса), па се између терминала на мотору јавља напон услед контраелектромоторне силе, а у другом режиму рада, терминали мотора се спајају (кратки спој), долази до наглог пражњења, и мотор се кочи услед Лоренцове силе. Са извода 12 и 10 Ардуино развојне платформе се доводи *PWM* сигнал радне учестаности 20 kHz на извод In2, док се извод In1 држи на логичкој нули. Мотор је повезан на изводе OUT1, OUT2, а извод EnA се држи на логичкој јединици. У табели 1.6 приказана је табела истинитости X моста којим је одређено стање мотора.

Табела 1.6 X-мост таблица истинитости[6]

ENA	IN1	IN2	Стање DC мотора
0	X	X	мотор мирује
1	0	0	кочница
1	1	0	ротација у позитивном математичком смеру
1	0	1	ротација у негативном математичком смеру
1	1	1	кочница

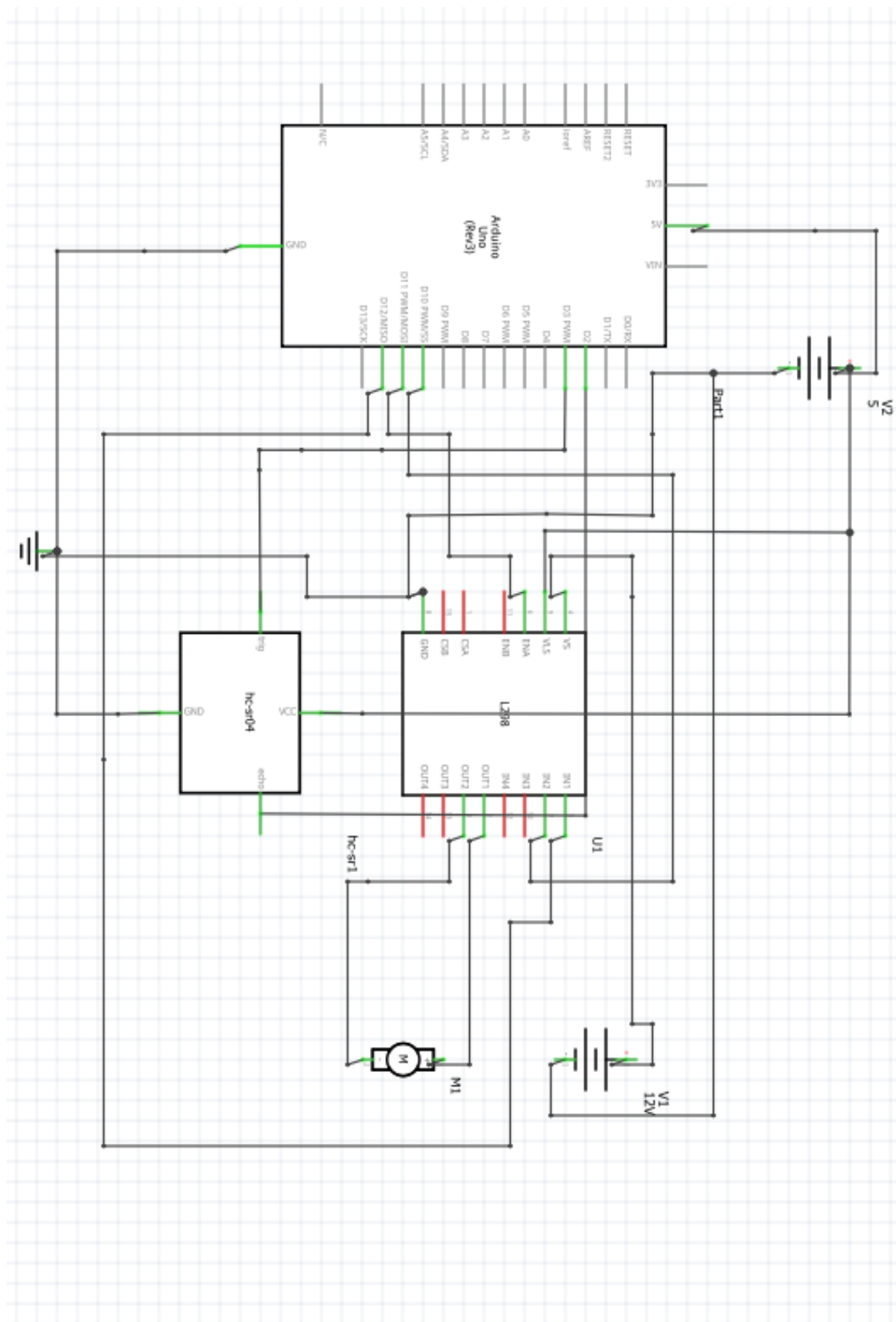
1.6 Интеграција система у систем са затвореном повратном спрегом

Интеграција компонената система, односно објекта управљања, актуатора, микроконтролера и сензора, у систем са затвореном повратном спрегом је илустративно описана следећим блок дијаграмом, док је конкретна имплементација дата електричном шемом.



Слика 1.21 Шематски приказ хардверске структуре система са затвореном повратном спрегом

Идејно решење подразумева софтверско задавање референтног сигнала позиције $r(t)$ који представља величину позиције у коју желимо да доведемо лоптицу. Ултразвучни сензор позиције мери тренутну позицију лоптице $y(t)$ и производи сигнал $y1(t)$, који се нешто разликује од стварне вредности тренутне позиције услед мерног шума. На основу ова два сигнала се формира сигнал грешке $e(t)$, који представља њихову разлику. Контролер на основу овог сигнала формира управљање. Циљ је да се сигнал грешке сведе на нулу, због тога је управљање такво да производи актуацију која доводи ка овом циљу. Генерисано управљање $u(t)$ се прослеђује актуатору који уз помоћ прилагодне електронике (појачавач снаге) и самог актуаторског система трансформише физичку природу овог сигнала. У нашем случају електрични сигнал се преводи у проток, односно струјање ваздуха. Реализованим актуаторским дејством $u1(t)$ делујемо на објект управљања (лоптицу) и мењамо тренутно стање система, односно тренутну позицију лоптице.



Слика 1.22 Електрична шема реализованог система са затвореном повратном спрегом

Принцип рада реалног система је следећи: у оквиру микроконтролера ардуино је софтверски дефинисана управљачка петља која се циклично понавља након дефинисаног временског интервала. Инструкције и програми унутар ове петље се извршавају током сваког циклуса и служе за аквизицију, обраду и генерисање сигнала. Најпре се преко дигиталног излаза 3 шаље импулс од 5V ширине 10μs сензору, што иницијализује процес аквизиције позиције. Сензор шаље повратни сигнал на дигитални улаз 2 у виду импулса чија је дужина трајања пропорционална удаљености и утврђује се вредност позиције у cm. На основу разлике задате и измерене вредности позиције прерачунава се управљање. Управљање представља број чија вредност се креће у интервалу од 0 до 255. На основу њега се генерише PWM сигнал на дигиталном излазу 10, где је вредност овог броја пропорционална испуни. Овај сигнал се помоћу Х-моста појачава, тако да временски облик сигнала остаје исти, док се амплитуде импулса повећавају на 12V. Довођењем оваквог сигнала мотору актуатора, врши се промена брзине струјања ваздуха и жељена актуација, након чега се цео поступак понавља.

2. Софтверско решење и имплементација контролера

Алгоритам који је коришћен за контролу позиције лоптице јесте ПИД управљање. Разлог лежи у доказаној применљивости ове врсте алгоритма у пракси. Посебно, у случају када математички модел објекта управљања и акутаторског система није познат, и није могуће применити аналитичке методе пројектовања контролера, ова врста управљања се показала веома корисном. Услед своје једноставности и малог броја параметара, ПИД алгоритам управљања се може са релативном лакоћом подесити експериментално. Општа форма ПИД управљања у дискретном домену је дата следећом релацијом:

$$u(kT) = K \left(e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(iT) + \frac{T_d}{T} (e(kT) - e(kT - T)) \right) \quad (2.1)$$

где су: $u(kT)$ - одбирак управљања, $e(kT)$ - одбирак грешке, T - периода одабирања, а K , T_i и T_d подесиви параметри контролера.

За имплементацију управљања неопходно је програмски, у току сваког циклуса, формирати величину управљања $u(kT)$ која заправо представља испуну PWM сигнала у току једног циклуса. Дужина трајања једног циклуса заправо представља периоду одабирања T и може се програмски подешавати. У нашем случају износи 50 ms. На основу једначине 2.1 можемо закључити да нам је за рачунање управљања потребно познавање вредности грешке $e(kT)$ коју добијамо као разлику референтне и измерене позиције у тренутној периоди одабирања. Подесиви параметри контролера су коефицијенти који одређују динамику и особине оствареног управљања и они су одређени експериментално.

Софтверска имплементација контролера је дата програмским листингом који следи.

```
1. //ucitavanje biblioteka
2. #include <Arduino.h>
3. #include <PID_v1.h>
4. #include <NewPing.h>
5. #include <math.h>
6. //inicijalizacija promenljivih
7.
8. long cm = 0; //ocitana vrednost pozicije sa senzora [cm]
9.
10. int enA = 11; // prikljucak za galvansko povezivanje motora sa H-mostom
11. int in1 = 12; // prikljucak 1 H-mosta
12. int in2 = 10; // prikljucak 2 H-mosta
13.
14. int sp = 0; // Referentna vrednost pozicije
15. long ms = 0; // pomocna promenljiva
16. long Time = 0; // Vreme trajanja eksperimenta
17.
18. const int trigPin = 3; // Trig prikljucak senzora
19. const int echoPin = 2; // Echo prikljucak senzora
20.
21. double Setpoint, Input, Output; // prilagodjene vrednosti referentne vrednosti, pozi
    cije i upravljanje
22. PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, 2.15, 2.05, 0.3, REVERSE); // definisanje myPI
    D objekta sa definisanim parametrima kontrolera
23. NewPing sonar(trigPin, echoPin, 220); // definisanje sonar objekta
24.
25. long userOutputDistance, userOutputSetpoint, userOutputTime; // parametri koji se pr
    ikazuju korisniku na racunaru
26.
27. void setup() {
28.     Serial.begin(19200); //komunikacija racunara sa arduinom
29.     //inicijalizacija prikljucaka ka H-mostu kao digitalnih izlaza
30.     pinMode(enA, OUTPUT);
31.     pinMode(in1, OUTPUT);
32.     pinMode(in2, OUTPUT);
33.
34.     digitalWrite(enA, HIGH); //galvansko spajanje motora sa H-mostom
35.     digitalWrite(in1, LOW);
36.     digitalWrite(in2, LOW);
37.
38.     myPID.SetOutputLimits(0, 255); //postavljanje granica upravljanja
39.     myPID.SetMode(AUTOMATIC);
40.     myPID.SetSampleTime(50); //podesavanje periode odabiranja kontrolera
41.
42.     ms = millis();
43.
44. }
45.
46. void loop() {
47.     Time = millis();
48.
49.     if (0.001 * Time < 5) {
50.         sp = 0; //dovodjenje loptice u radnu tacku
```

```
51. } else {
52.   sp = 20; //zadavanje zakona kretanja loptice
53. }
54.
55. sp = (sp > 30) ? 30 : (sp < -30) ? -
    30 : sp; //ogranicavanje vrednosti zadate pozicije
56. Setpoint = 170 - sp; //mapiranje zadate pozicije
57.
58. cm = sonar.ping_cm(); //citanje pozicije sa senzora
59. Input = cm;
60.
61. myPid.compute(); //racunanje upravljanja
62. analogWrite(in2, Output); //generisanje PWM signala
63.
64. userOutputDistance = 170 - cm;
65. userOutputSetpoint = sp;
66. userOutputTime = Time * 0.001;
67. Serial.println(userOutputTime + ", " + userOutputSetpoint + ", " + userOutputDistance); //prikazivanje rezultata korisniku
68.
69. while (millis() - ms < 50) { //podesavanje trajanja ciklusa
70.   continue;
71. }
72.   ms = millis();
73.
74. }
```

У програму се прво врши иницијализација глобалних променљивих и додељивање вредности (додељујемо бројеве прикључака променљивама, иницијализујемо објекте које користимо током програма итд.). Након тога се покреће подпрограма *setup()*. Инструкције у оквиру њега се извршавају само једном. У оквиру њега се помоћу функција *pinMode()*, дигитални прикључци који су повезани са Х-мостом декларишу као излази и на њих се доводе одговарајуће вредности сигнала. Прикључци *in1* и *in2* нам служе за контролисање мотора и они се тренутно постављају на логичку нулу. Прикључак *in1* се и даље задржава на логичкој нули, док ћемо довођењем PWM сигнала на прикључак *in2* касније вршити управљање мотором. Главни део програма представља подпрограма *loop()* који заправо представља бесконачну петљу у оквиру које вршимо задавање референтне вредности, аквизицију сигнала, прерачунавање управљања и генерисање управљачког сигнала.

Део програма којим задајемо референтну позицију је:

```
1. if (0.001 * Time < 5) {
2.   sp = 0; //dovodjenje loptice u radnu tacku
3. } else {
4.   sp = 20; //zadavanje zakona kretanja loptice
5. }
6.
7. sp = (sp > 30) ? 30 : (sp < -30) ? -
    30 : sp; //ogranicavanje vrednosti zadate pozicije
8. Setpoint = 170 - sp; //mapiranje zadate pozicije
```

Променљива *sr* нам представља референтну вредност. Најпре доводимо лоптицу у радну тачку да бисмо постигли боље карактеристике објекта управљања. То чинимо помоћу *if* кондиционала, тако што првих пет секунди од почетка програма задржавамо референтну вредност на нули. Након тога се задаје произвољна референтна вредност (у овом случају степ сигнал од 20cm, али је могуће задати синусни или други вид сигнала). Вршимо проверу да ли је задата вредност у границама од 30cm испод и изнад радне тачке и вршимо линеарну трансформацију задате вредности. Ово је неопходно јер је сензор позиције постављен на врху цеви, док се референтна вредност задаје у односу на дно.

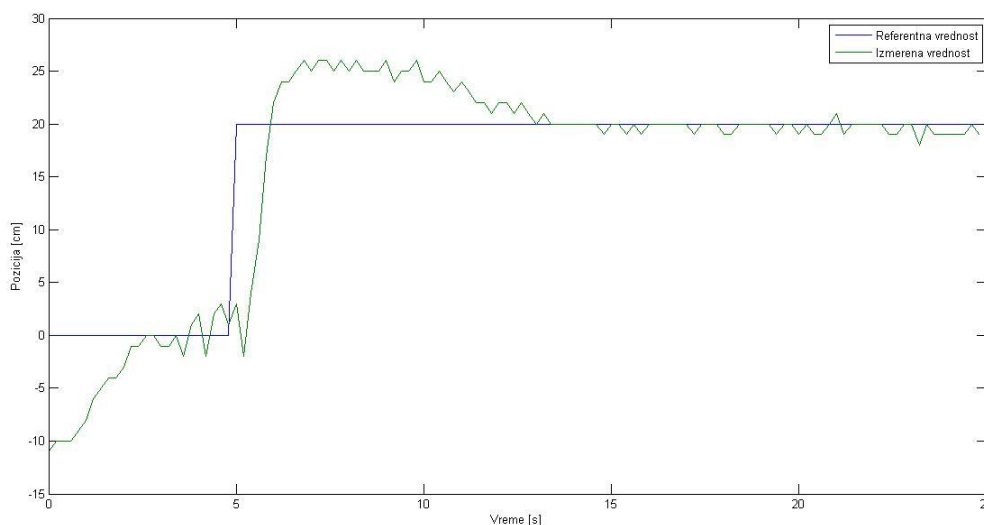
Очитавање позиције са сензора се врши помоћу *sonar()* објекта из *NewPing.h* библиотеке. Током иницијализације се овом објекту прослеђују вредности *Trig* и *Echo* прикључака, као и опсег мерене висине у cm. Само мерење позиције се врши позивањем методе *sonar.ping_cm()* која као резултат враћа очитану позицију са сензора у cm.

За реализацију ПИД контролера је коришћен објекат *myPID()*. За иницијализацију овог објекта неопходно му је проследити показиваче улазне, излазне и референтне променљиве, пропорционално, интегрално и диференцијалнопојачање, као и специфицирати режим рада. Разликујемо *DIRECT* и *REVERSE* режиме где у првом позитивној грешки одговара позитивно управљање, а негативној негативно, док је у другом режиму обрнуто. Након иницијализације објекта користимо неколико метода за подешавање одговарајућих параметара. Методом *myPid.setOutputLimits()* подешавамо опсег управљања, односно излазне вредности, као аргументе прослеђујемо доњу и горњу границу. Методом *myPID.SetMode()* вршимо активирање или деактивирање регулатора током програма помоћу аргумената *AUTOMATIC* и *MANUAL* у првом, односно другом случају. Методом *myPID.SetSampleTime()* вршимо подешавање периоде одабирања регулатора која се прослеђује као вредност у ms. Ово је један и од главних разлога зашто користимо овај објекат за реализацију регулатора, јер нам омогућава дефинисање сталне периоде одабирања, која је независна од времена трајања једног циклуса подпрограма. Након што ажурирамо вредности улазне и референтне променљиве управљање добијамо позивањем методе *myPid.compute()*.

3. Експериментални резултати

Зарад утврђивања квалитета оствареног контролера извршена је анализа експерименталних резултата, односно посматране су динамичке карактеристике одзива система на одскочну и просту хармонијску побуду.

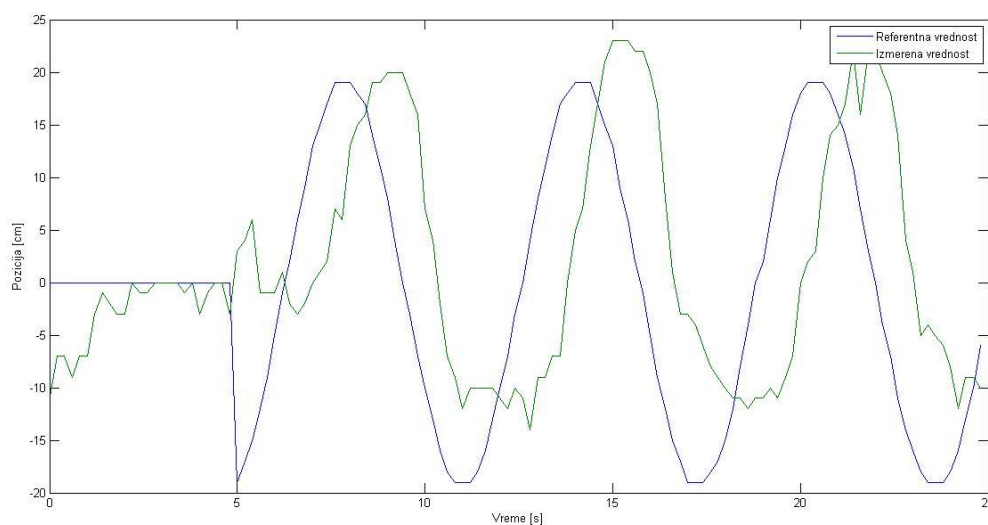
Као одскочна побуда коришћен је одскочни сигнал вредности од 20cm. Одзив система на ову побуду и референтна вредност су приказани следећим графиком.



Слика 3.1 Одзив система на одскочну побуду

Са приложеног графика видимо да одзив система има прескок од 25%, време кашњења износи 0,6s, док је време смирења 7,4s. Грешка стационарног стања је 0.

За просту хармонијску побуду коришћен је синусна побуда кружне учестаности од 1 rad/s и амплитуде од 20cm. Одзив система на ову побуду и референтна вредност су приказани следећим графиком.



Слика 3.2 Одзив система на просту хармонијску побуду

Са приложеног графика можемо уочити да систем поседује фазно кашњење од 1 rad и да већ на овој фреквенцији показује одређене филтарске особине, односно да појачање износи $0,875$. Можемо закључити да се систем понаша као нискофреквенцијски филтар са врло уским пропусним опсегом.

Из добијених експерименталних података можемо закључити да је понашање система са контролером на релативно задовољавајућем нивоу. Финијим подешавањем параметара контролера би било могуће добити боље динамичке карактеристике.

Закључак

У оквиру рада је описана анализа и синтеза лабораторијске поставке система ваздушне левитације и направљен контролер за управљање позицијом лоптице. За реализацију једног оваквог мехатроничког система неопходно је познавање математичког модела управљаног процеса. На основу овога може се оформити идејно решење целокупног система и одабрати сензорске и актуаторске компоненте као и оформити стратегија управљања. Да би се пројектовао контролер неопходно је познавање принципа рада употребљених компоненти као и природа и потребна обрада сигнала који се јављају. Недостаци који се могу јавити у виду непознавања системских параметара се могу уклонити употребом робусних типова контролера.

Употребом дигиталних контролера на бази микрорачунарских плоча за контролу аналогних система стиче се велики опсег могућности по питању реализације управљачких алгоритама. Недостаци који се јављају формирају се у виду проблема при одабиру периоде одабирања и прилагођавању различитих периода свих системских компоненти. У овом раду је извршена примена ПИД алгоритама управљања чиме је показано и да се при непознавању великог броја системских параметра са применом довољно робусних алгоритама може произвести задовољавајући исход контроле по питању динамичких особина. Могућа је реализација и других видова контроле, док се побољшање контроле целокупног система може постићи одабиром актуатора са бољим динамичким својствима, применом идентификационих метода за проналажење непознатих системских параметара и другим методама.

Применом развијеног електронског система управљања постигнута је левитација лоптице и развијена могућност управљања њеном позицијом. Реализованим управљањем могуће је задавати произвољну трајекторију лоптице у току времена. У зависности од динамике задате трајекторије лоптица ће је испратити са мање или више успешности, где се бољи резултати добијају за спорије промене позиције у току времена. За довођење и одржавање лоптице у мирној радној тачки у оквиру радног опсега могуће је остварити прецизно позиционирање.

Литература

- [1] М. Матијевић, Г. Јакуповић, Ј. Цар, *Рачунарски подржано мерење и управљање*, Машински факултет, Крагујевац, 2005.
- [2] R. Nguyen, S. Richter, IfA Fachpraktikum - Experiment 2.7 : Air Ball, Automatic Control Laboratory, ETHZurich, 2013.
http://control.ee.ethz.ch/~ifa-fp/wiki/uploads/Main/ExperimentsWinter/airball_manual.pdf
- [3] K. Schlacher, K. Rieger, Regelung des Labormodells Air Levitated Ball mittels LinuxEchtzeitsystem und einer Hardware von National Instruments, Johannes Kepler Universit  atLinz, 2009. <http://regpro.mechatronik.uni-linz.ac.at/education/projektsem/galerie-von-projektseminaren/air-levitated-ball-1>
- [4] J. Hillard, K. Branch, A. Butterfield, *Teaching fluid dynamics with the ball-in-the-tube device*, IJMEE Vol. , 2015
- [5] *Arduino Uno Rev3* техничка документација, приступљено: септембар 2017.
<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [6] Д. Милошевић, „Пројектовање дигиталних система за управљање позиције и брзине DC мотора помоћу S7 1200 PLC-а и микроконтролера Atmega328P“, *Дипломски - мастер рад*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
- [7] В. Поткоњак, *Роботика*, Научна књига, Београд, (1989), Универзитет у Београду
- [8] GW/EDF-40H техничка документација, приступљено: септембар 2017.
<http://www.gws.com.tw/english/product/powersystem/019.htm>
- [9] J. Fraden, *Handbook of modern sensors: Physics, Design and Applications*, Springer, 2003.
- [10] HC-SR04 техничка документација, приступљено: септембар 2017.
<http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- [11] З. Живановић, „Пројектовање и имплементација система ваздушне левитације са ардуино рачунарском платформом“, *Дипломски рад*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [12] <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM> приступљено: септембар 2017.

- [13] L298 техничка документација, приступљено: септембар 2017.
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/82/cc/3f/39/0a/29/4d/f0/CD00000240.pdf/files/CD00000240.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000240.pdf>
- [14] <https://playground.arduino.cc/Code/Code> приступљено: септембар 2017.
- [15] J Klapálek, “Vzduchová levitace dvou ping-pongových míčku”, *Bakalářská práce*, České vysoké učení technické v Praze, 2017.