Мастер рад

[1. Увод 2](#_Toc1)

[2. Пројектовање и израда система за балансирање лопте на шини 4](#_Toc2)

[2.1. Пројектовање система за балансирање лопте на шини 5](#_Toc3)

[2.2. Израда и склапање 8](#_Toc4)

[2.3. Шема за повезивање серво мотора и ултрасоничног сензора са миркоконтролером 8](#_Toc5)

[3. Математички модел система за балансирање лопте на шини 9](#_Toc6)

[3.1. Математички модел система за балансирање лопте на шини 9](#_Toc7)

[3.2. Серво мотор - Идентификација система 9](#_Toc8)

[3.2.1. Шта је идентификација система 9](#_Toc9)

[3.2.2. Прикупљање података 9](#_Toc10)

[3.2.3. Обрада податак 9](#_Toc11)

[3.2.4. Grey Box 9](#_Toc12)

[3.2.5. Black Box 9](#_Toc13)

[4. Пројетовање и имплементација PID регулатора 9](#_Toc14)

[5. Упоређивање симулације и стварног модела 9](#_Toc15)

[6. Закључак 9](#_Toc16)

[7. Додатак 10](#_Toc17)

[7.1. Додатак А – Техничка документација стандардних компоненти 10](#_Toc18)

[7.1.1. Микроконтролер – Arduino Uno 10](#_Toc19)

[7.1.2. Ултрасонични сензор – HC – SR04 13](#_Toc20)

[7.1.3. Серво мотор 14](#_Toc21)

[7.1.4. Микропроцесор - Raspbery Pi 4 14](#_Toc22)

[7.1.5. Ротациони енкодер 14](#_Toc23)

[7.2. Додатак Б – Адитивна технологија производње и 3D штампа 14](#_Toc24)

[7.3. Додатак В – Софтверски алати 16](#_Toc25)

[7.3.1. CATIA 16](#_Toc26)

[7.3.2. Матлаб и Симулнинк 17](#_Toc27)

[7.3.3. Путхон и Вижуал студио код 17](#_Toc28)

[7.3.4. Улти макер цура 17](#_Toc29)

[7.3.5. Ардуино ИДЕ 17](#_Toc30)

[7.4. Додатак Г – Технички цртежи и склопни цртеж система за балансирање лопте на шини 17](#_Toc31)

[7.5. Додатак Д – Технички цртежи тест бенча за прикупљање података 17](#_Toc32)

[8. Литература 17](#_Toc33)

# Увод

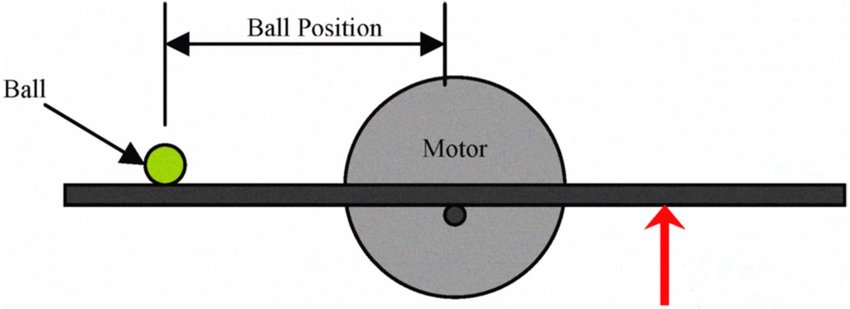
Управљање нестабилним системимам је веома важан задатак у аутоматском управаљањеу,а како се ови системи сматрају веома опасним када су нестабилни, они се испитују у лабараторијама. Систем за балансирање лопте на шини јесте нестабилан систем и може се поистоветити са реалним проблемима као што су хоризонтална стабилизација авиона током слетања или у средини турбулентног струјања.

Систем за балансирања лопте на шини је веома лак за разумевање и многе технике управљања се могу изучавати на њему, па се због тога често може наћи у лабараторијама инжињера за аутоматско управљање.

Овај систем се састоји из лопте и шине чији се угао заогретања контрилише мотором, а циљ оваквог система јесте да се лопта заустави на тачно одређеној позицији на шини. Ако је управљање лоше, лопта ће пасти са шине.

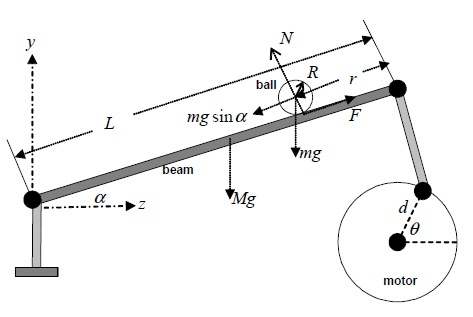
Систем балансирања лопте на шини се може видети у две конфигурације.

Прва конфигурација је приказана на слици 1.1. Са слике се види да је греда ослоњена у средини и да се ротира око своје централне осе. Оваква конфигурација поседује две предности. Прва предност је та, што је лака за израду, а друга јесте то што јој је математички модел релативно једноставан.



*Конфигурација 1 – Слика 1.1*

Друга конфигурација је нешто сложенија, а приказана је на слици 1.2. У овој конфигурацији греда има две тачке ослонца. Један крај је непокретан и греда се ротира око његове тачке, док је други крај преко система полуга спојен на мотор. Оваква конфигурација је теже за израду и има мало сложенији математички модел.



*Конфигурација 2 – Слика 1.2*

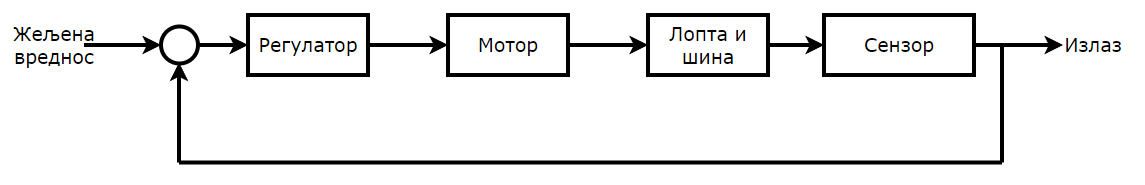
У овом раду ће се користи користи друга конфигурација, без обзира на сложеност. Такође, напоменуо бих да ће и следеће теме бити обрађене:

* Пројектовање и изрда система за балансер лопте на шини,
* Одређивање математичког модела и различите методе идетификације система,
* Дизајнирање и имплементација регулатора и
* Испитивање у реалном времену.

# Пројектовање и израда система за балансирање лопте на шини

Први пробелми и задаци овог мастер рада јесу пројектовање и израда система за балансирање лопте на шини. А да би смо у опште могли испројектовати систем за балансирање лопте на шини потребно је знати одговоре на питања “Шта је циљ овог система? И како у опште он ради?”.

Циљ овог система јесте да доведе лоптицу на одређену позицију тако што ће сам себе избацити из равнотежног стања. Да би смо то боље разумели, претпоставимо да имамо шину дугачку 50cm, да се лопта налази и мирује на десном крају те шине и да ми желимо да се та иста лоптица налази на средине те шине. У следећем кораку, на основу наше жељене вредности, мотор треба да се заокрене за угао α и нагне шину на лево, односно за угао β, сензор очита нову позицију лопте, која сада креће према среди, а затим ће регулатор на основу наше грешке да формира нови управљачки сигнал за мотор. У другом кораку мотор ће се поново заокренути за угао α и кориговаће угао шине, а сензор очита нову вредност и помоћи регулатор формирати нови сигнал за мотор. Ови кораци ће се понављати све док се лопта не доведе на жељену позицију. Све предходно објашњено може се представити и једним алгоритмом (*слика 2.1*).



*Глобални дизајн система Слика 2-1*

Сада када имамо глобални дизајн и знамо генералну конфигурацију система можемо кренути и са пројектовањем и додатним питањима.

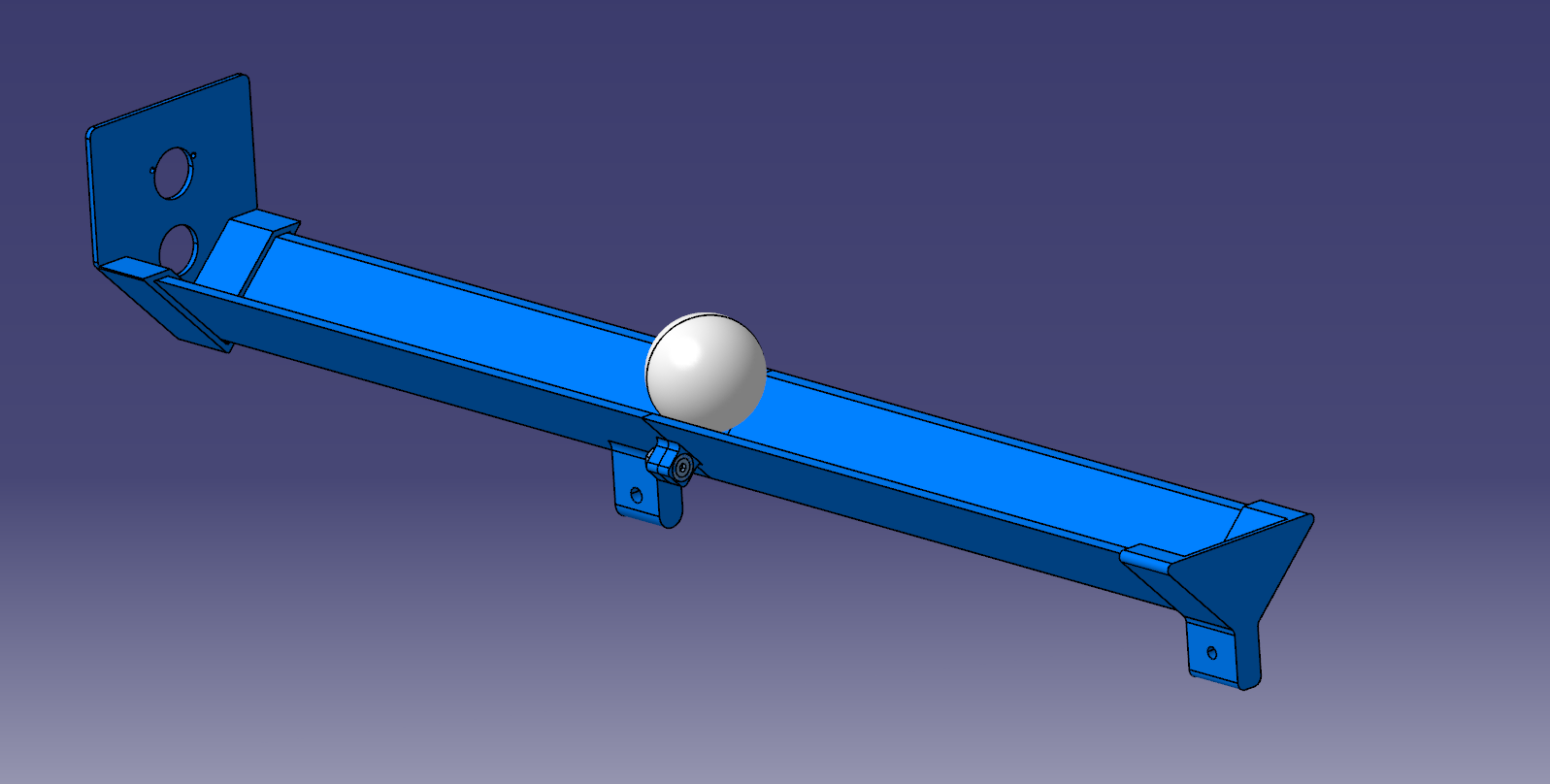
Прво питање на које треба одговорити је *“Шта се пројектује?”*, а одговор на то је: *“Систем за балансирање лопте на шини који се гони мотором преко система система полуга”*. Следећа питања на која је требало одговорити јеси:

* Како ће се и чиме мерити позиција лопте на шини? Којим мотором ће се гонити цео систем? Као и како ће се управљати целим системом?
  + Имајући у виду да је примарни циљ овог мастер рад имплементација свог стеченог знања из области аутоматског управљања све компоненте које су изабране су нискобуџетне. Па је тако за мерење позиције изабран ултрасонични сензор ХЦ-04, затим серво мотор СГ5010 и микроконтролер АРДУИНО УНО. Техничка документација и више информација о овим компонента, као и осталим компонентама које су коришћење приликом израде овог мастер рада, потражити на крају овог рада у додатку А.
* Како ће се сви испројектовани, не стандардни, делови израдити?
  + Сви делови који су испорјетовани за овај мастер рад су израђени адитивном технологијом израде, тј. уз помоћ 3Д штампача. Више речи о овој технологији, као и штампачу који је коришћен можете пронаћи на крају овог рада у додатку Б.

## Пројектовање система за балансирање лопте на шини

Након што смо дали одговоре на сва предходна питања, слика самог система постаје јаснија и може се приступи пројектовању.

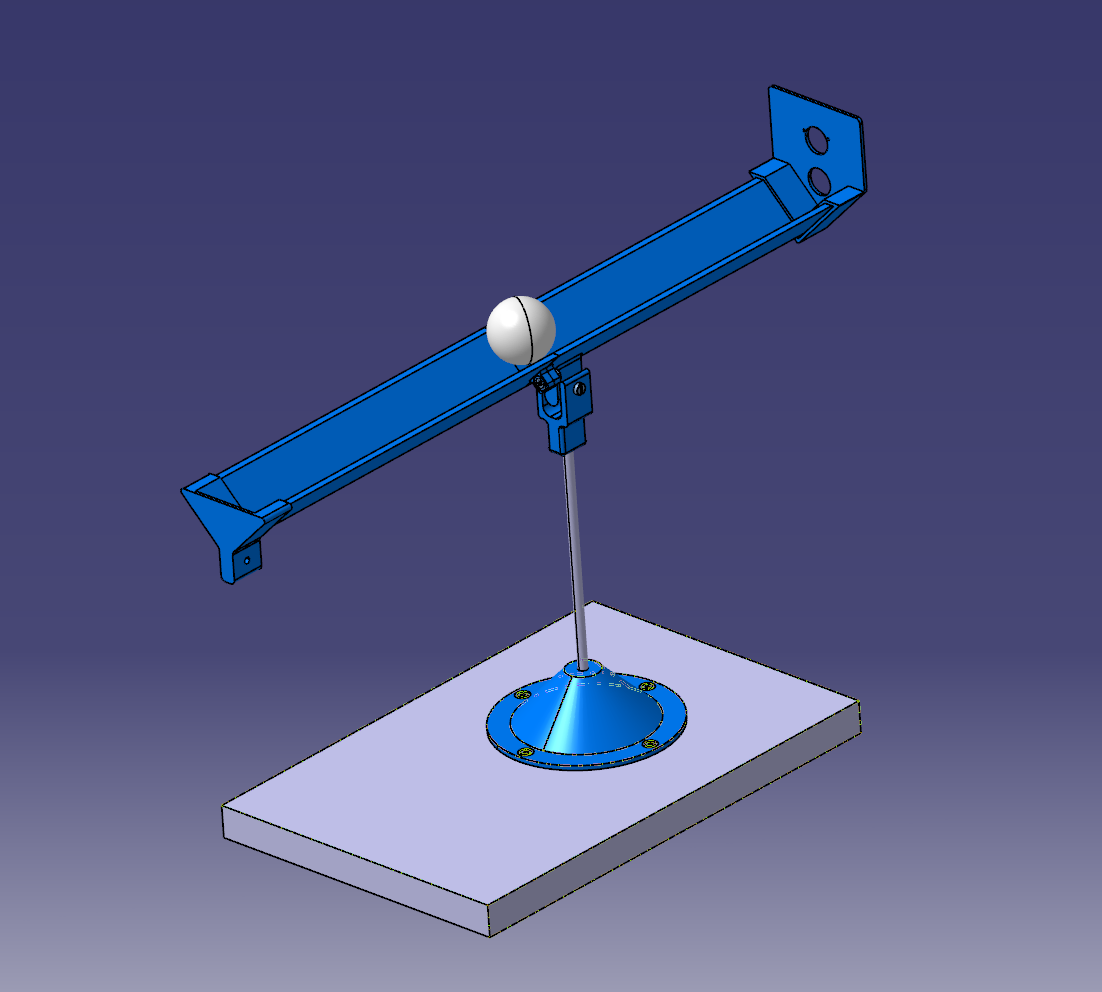
Први део који је измоделиран јесте шина и она је кроз пар итерација добила следећи изглед:



*Шина са лоптицом – Слика 2.2*

Са слике се види да се шина састоји из четри дела. Саме шине која се састоји из два дела, који се вијчаном везом спајају на среди, и два граничника, који су залепљена епоксидним лепком на крајеве шине. Једна половина шине поседује ушицу преко које ће се шина везати са ослонцем. Као и један граничник чија ушица служи за везу са мотором преко система полуга. Док други граничник је уједно и носач за ултрасонични сензор.

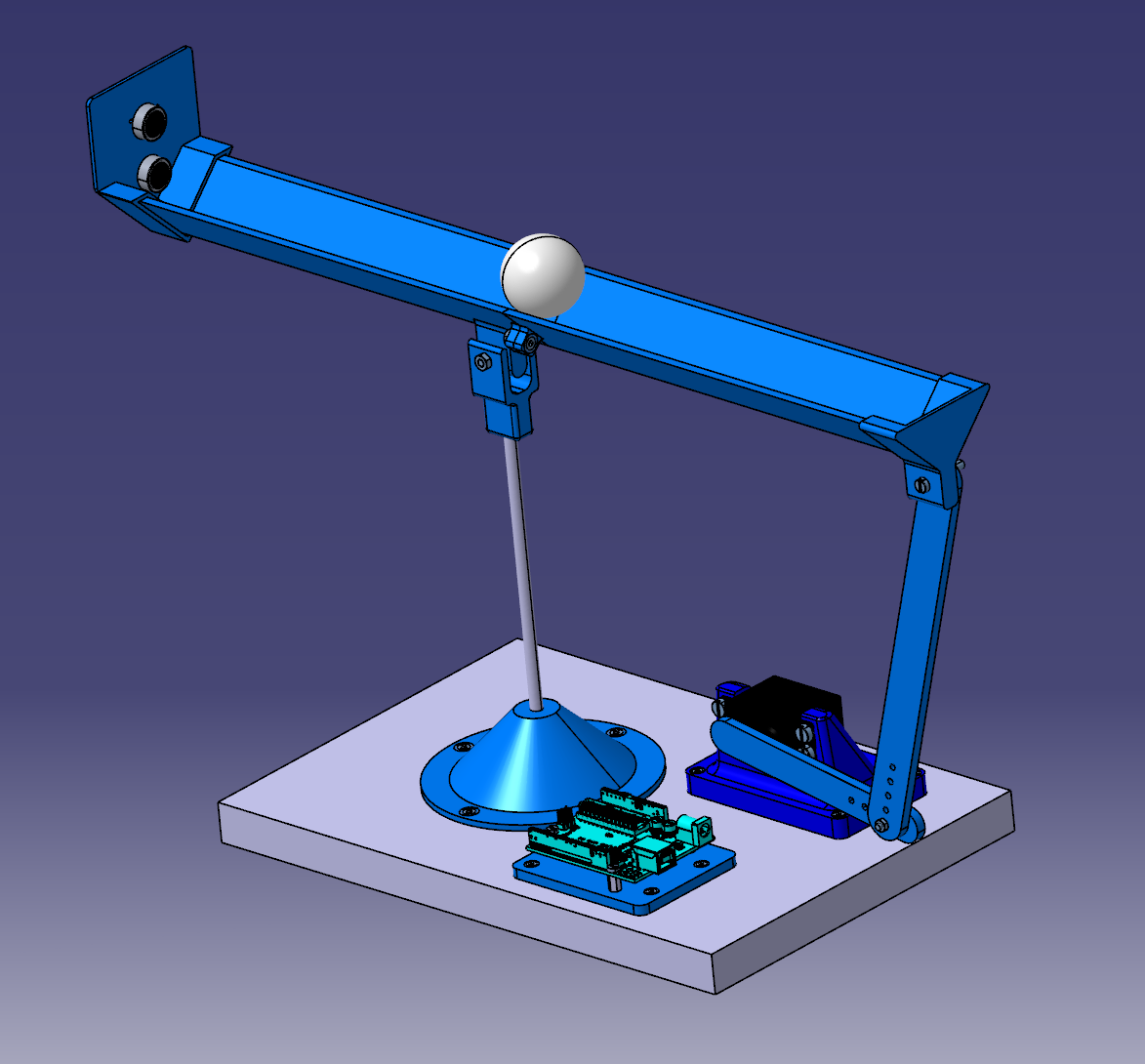
Следећи део који је испројектован јесте носач шине. Сам носач се састоји из три дела, ушице, навојне шипке и базе. Ова три дела су спојена или боље речено заварена. И ако на моделима се могу видети рупе за навојну шипку. Исте те рупе су запуњене уз помоћ пиштоља за лепак, а затим је навојна шипка загрејана и убачена у исте те, сад већ запуњене, рупе. Овака техника спајања је обезбедила стабилну и чврсту везу ова три дела. Такође, напоменуо бих да је цео носач зашрафљен за медијапанску плочу.



*Шина са носачем – Слика 2.3*

Након шине и носача, било је потребно испројетовати везу између шине и мотора и додати сензор и микроконторлер и носач за исти. Веза између шине и мотора се састоји из две полуге различитих дужина, серво мотора и носаче за серво мотор. Финални модел система за балансирање лопте на шини може се видети на слици 2.4

Цео овај систем је испројектован у софтверу за Компјутерски Адидитвни Дизајн (ЦАД) КАТИЈА. Више о овом софтверу, као и о другим софтверским алатима које сам користио за израду овог мастер рада, можете наћи и додатку В.



*Систем за балансирање лопте на шини – Слика 2.4*

## Израда и склапање

Узимају ћи обзир да је циљ овог мастер рад имплементација свог стеченог знања из области аутоматског управљања овај део ће садржати опште информације о изради, као и круцијалних информација о склапању.

Израда – Сви делови који су испројектовани за овај мастер рад су израђени адитивном методом поизводње и више о тој мети поизводње можете наћи на крају рада у додатку Б.

Склапање – сви технички и радионички цртежи који садрже се могу наћи у додатку Г. Редослед којим сам се водио приликом склапања система за балансирање лопте на шини је:

1. Склапање шине
   * Напомена – граничнике залепити епоксидним лепком за шину
2. Склапање носача за шину
3. Спајање шине и носача
4. Позиционирање шине и носача на медијапанској плочи + причвршћивање уз медијапанску плочу
   * Напомена – ножицу серво мотора и краћу полугу залепити епоксидним лепком. Затим направити отвор кроз који је потрбно провући вијак који иде на вратило серво мотора.
5. Позиционирање носача серво мотора са серво мотором и система полуга у односу на шину са носачем + причвршћивање за медијапанску плочу
6. Позиционирање носача за микроконтролер
7. Постављање микроконтролера и ултрасоничног сензора на предвиђена места за то
8. Повезивање сензора и серво мотора са микроконтролером (шема за повезивање је дата у наредном поглављу)

## Шема за повезивање серво мотора и ултрасоничног сензора са миркоконтролером

# Математички модел система за балансирање лопте на шини

## Математички модел система за балансирање лопте на шини

## Серво мотор - Идентификација система

### Шта је идентификација система

### Прикупљање података

### Обрада податак

### Grey Box

### Black Box

# Пројетовање и имплементација PID регулатора

# Упоређивање симулације и стварног модела

# Закључак

# Додатак

## Додатак А – Техничка документација стандардних компоненти

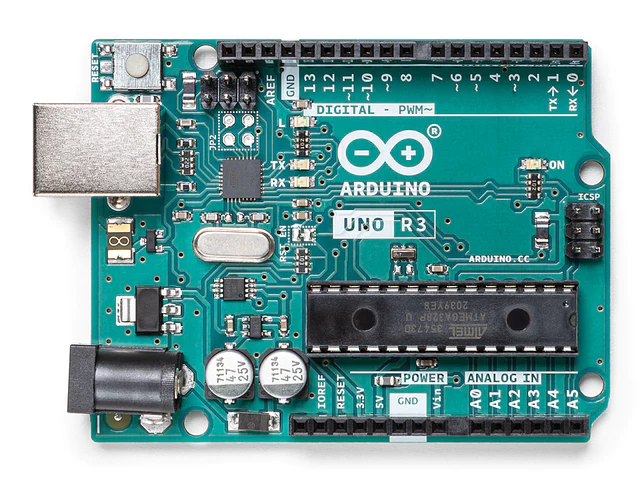
### Микроконтролер – Arduino Uno

У данашње време је немогуће замислити аутоматски систем без присуства неког типа рачунара. Рачунарске јединице попут PLC-а се данас користе у различитим индустријама где је потребно управљати робусним стварима попут производних линија и котловима за прављење полуфабриката од различитх метала, док се рачунари попут микроконтролере и микропроцесоре користе у авионима, аутомобилима, али и многим другим другим индустријама за обраду сигнала и фино управљање актуатора.

У системима аутоматског управљања рачунари на улаз добијају сигнал жељеног динамичког понашања система (мада то често може бити и записано у његовој меморији), као и мерени одзив система, односно стварно динамичко понашање система. На основу ових улазних величина и одговарајућег алгоритма управаљања он израчунава вредност управљања.

За потребе овог система изабрана је Arduino Uno (слика 2.3) развојна плоча са Atmel-овим микроконтролером. Arduino Uno је платформа отвореног кода коју је развио Arduino тим. Ова платформа се састоји од хардверског и софтверског дела, а користи се за стварање и контролисање интерактивних електронских пројеката.

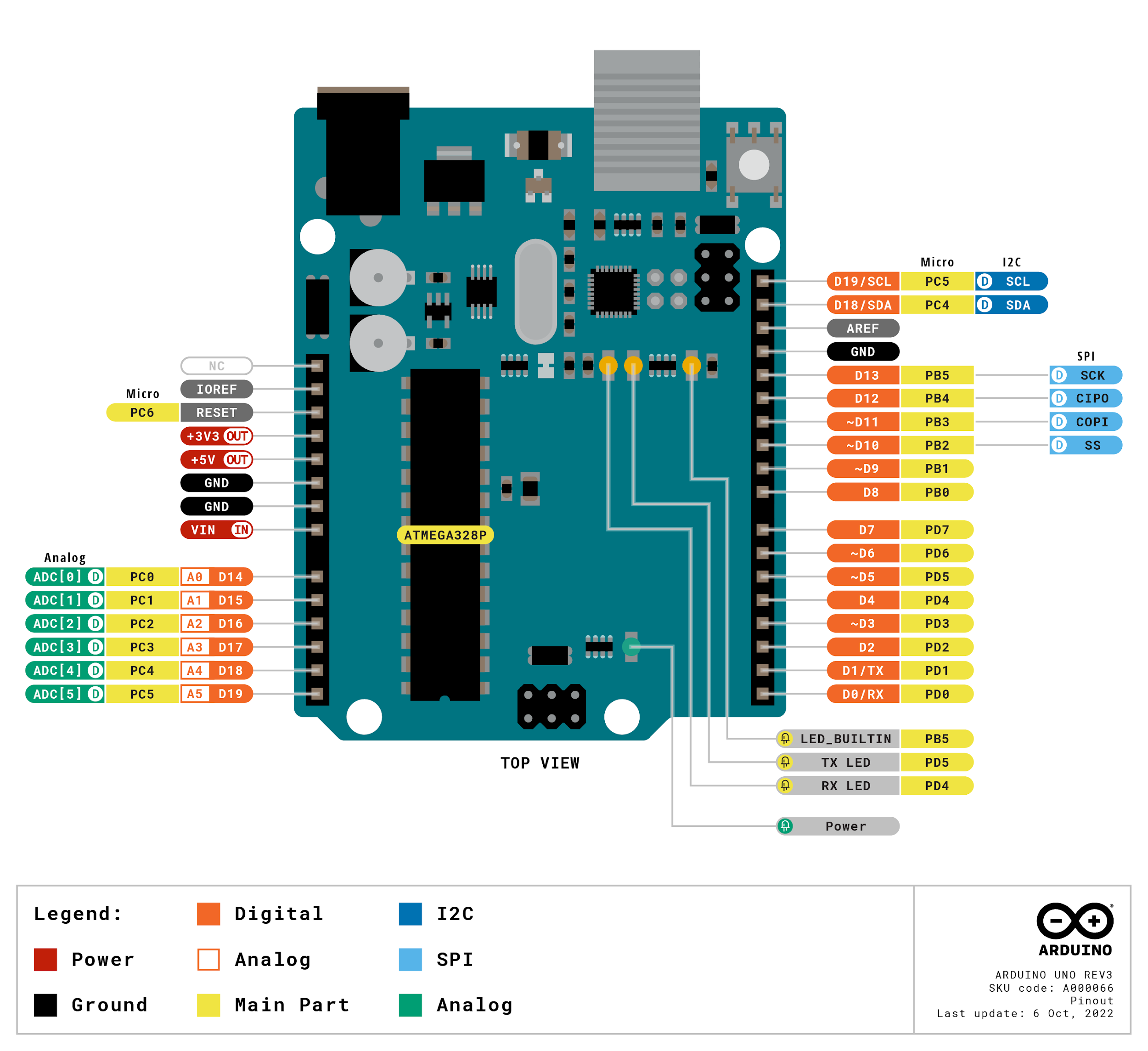
Техничке карактеристике и шема улазно/излазних пинова овог микроконтролера су приказани у табели 7.1 и слици 7.1.



*Arduino Uno – Слика 7.1*

|  |  |
| --- | --- |
| Микроконтролер | ATmega328P |
| Радни напон | 5 V |
| Улатни напон | 7-12 V |
| Дигитални У/И пинови | 14 |
| PWM дигитални У/И пинови | 6 |
| Аналогни улазни пинови | 6 |
| Једносмерна струја по У/И пину | 20 mA |
| Флеш меморија | 32 KB (ATmega328P) |
| SRAM | 2 KB (ATmega328P) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega328P) |
| Радни такт | 16 MHz |
| Дужина | 68.6 mm |
| Ширина | 53.4 mm |
| Маса | 25 g |

Техничке карактеристике микроконтролера Arduino Uno – Табела 7.1



*Шема улазно/излазних пинова – Слика 7.2*

### Ултрасонични сензор – HC – SR04

Ултрасонични сензор HC-SR04 је широко коришћен сензор за мерење удаљености, који ради на принципу емитовања и примања звучних таласа. Овај сензор користи ултразвучне таласе, чија је фреквенција већа од 20 kHz (изван људског слуха), да би утврдио растојање до објеката у свом домету.

Принцип рада ултрасоничног сензора се може објаснити у наредна четри корака:

1. Емитовање сигнала: Сензор има два главна дела – један за емитовање ултразвучног сигнала (предајник) и други за пријем тог сигнала (пријемник). Када се покрене, предајник емитује ултразвучни сигнал у трајању од око 10 микросекунди.
2. Одбијање сигнала: Када ултразвучни сигнал наиђе на објекат, он се одбија назад према сензору.
3. Пријем сигнала: Пријемник на сензору бележи време које је прошло од тренутка емитовања сигнала до пријема одбијеног сигнала.
4. Израчунавање удаљености: Сензор користи формулу да би израчунао растојање на основу времена које је прошло од емитовања до пријема сигнала. Формула за растојање је:  
     
     
   Где је:
   * **D** - растојање до објекта
   * 𝞾 – брзина звука (приближно 343 м/с на собној температури)
   * **t** – време проласка сигнала

HC-SR04 се често користи у разним пројектима роботике, аутоматизације и система за избегавање препрека због своје једноставности, ниске цене и поузданости. Лако се интегрише са микроконтролерима попут Arduino, Raspberry Pi и других, чинећи га идеалним за примене у разним “уради сам” пројектима. Овај сензор је приказан на слици 7.3, док се његове карактеристике могу наћи у табели 7.2.

*Ултрасонични сензор HC – SR04 – Слика 7.3*



|  |  |
| --- | --- |
| Радни напон | 3.3Vdc ~ 5Vdc |
| Струја у мировању | <2mA |
| Радна струја | 15mA |
| Радна фреквенција | 40KHz |
| Опсег рада и прецизност | 2cm ~ 400cm (1in ~ 13ft) ± 3mm |
| Осетљивост | -65dB мин. |
| Ефективни угао | 15° |
| Димензије | 45mm x 20mm x 15mm |
| Тежина | 9g |

*Техничке карактеристике ултрасоничног сензора HC – SR04 – Табела 7.2*

### Серво мотор - TowerPro SG-5010

Серво мотори једносмерне струје су специјализовани типови електромотора дизајнирани за прецизну контролу угла или линеарне позиције, брзине и убрзања. Широко се користе у апликацијама где је прецизна контрола кретања критична, као што су роботи, CNC машине и аутоматизациони системи.

За овај пројекат изабран је TowerPro SG-5010 серво мотор, који је свестран и широко коришћен модел, погодан за различите апликације, укључујући хоби роботику, возила на даљинско управљање (RC) и основне задатке аутоматизације. Пружа добар баланс између перформанси и цене, чинећи га популарним избором како за почетнике тако и за искусне програмере. Техничке карактеристике овог мотора можете наћи у табели 7.3.

|  |  |
| --- | --- |
| Тип мотора | Стандардни серво мотор једносмерне струје |
| Радни напон | 4.8V до 6.6V |
| Стални обртни момент | 4.8V: 4.3 kg.cm, 6V: 5.5 kg.cm |
| Радна брзина | 4.8V: 0.20 сек/60°, 6V: 0.16 сек/60° |
| Тип зупчаника | Пластични зупчаници |
| Контролни систем | PWM (Ширина импулса модулација) |
| Опсег ширине импулса | 1000-2000 µs |
| Опсег ротације | 180° (стандардно) |
| Тежина | 38g |
| Димензије | 40.7mm x 19.7mm x 42.9mm |
| Тип конектора | тропински JR |
| Тип лежаја | Једноредни куглични лежај |
| Температурни опсег | -10°C до +50°C |
| Материјал кућишта | Пластика |

*Техничке карактеристике серво мотора TowerPro SG-5010 – Табела 7.3*



*Серво мотора TowerPro SG-5010 – Слика 7.4*

### Микропроцесор - Raspberry Pi 4

Raspberry Pi 4 је моћна и свестрана развојна плоча са микропроцесором, дизајнирана за широк спектар апликација, од образовања до напредних уграђених система. Са својим четворојезгарним ARM Cortex -А72 процесором, вишеструким опцијама меморије и обимним могућностима повезивања, Raspberry Pi обезбеђује процесорску снагу и флексибилност неопходну за једноставне прототипе, као и за сложене уграђене пројекте. Подржава два 4К дисплеја, брзе USB 3.0 везе и има робусне могућности умрежавања, што га чини идеалним за мултимедијалне апликације, IoT уређаје и много више. Било да развијате хоби пројекат малог обима или индустријску апликацију у пуном обиму, Raspberry Pi је поуздана и богата функцијама платформа.Техничке карактеристике овог сензора се могу пронаћи у табели 7.4.



*Raspberry Pi 4 и шема улазно/излазних пинова – Слика 7.5*

|  |  |
| --- | --- |
| Процесор | Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit, 1.5 GHz |
| Графичка карта | VideoCore VI, подржава OpenGL ES 3.0, Vulkan, H.265 (4Kp60 декодирање) |
| Меморија (RAM) | 8GB LPDDR4 SDRAM |
| Меморија за складиштење | MicroSD картица (подржава велике брзине UHS-I), USB boot support |
| Мрежа | Gigabit Ethernet, Dual-band 802.11ac Wi-Fi, Bluetooth 5.0 |
| USB портови | 2x USB 3.0, 2x USB 2.0 |
| Видео излаз | 2x Micro-HDMI (подржава резолуцију до 4Kp60) |
| Аудио излаз | четворо полни стерео излаз и композитни видео, HDMI аудио, I²S аудио |
| Улазно/Излазни Пинови | 40 пинова, 3.3V логика |
| Интерфејс за камеру | MIPI CSI |
| Интерфејс за дисплеј | MIPI DSI (Display Serial Interface) |
| Напајање | 5V/3A преко USB-C конектора |
| Оперативни системи | Raspberry Pi OS, Ubuntu, Manjaro, LibreELEC, RetroPie |
| Димензије | 85.6mm x 56.5mm x 17mm |
| Маса | 46g |
| Типови комуникације | 2x UART, 2x SPI, 5x I²C, 27x GPIO, 1x PCM/I²S, 1x SDIO |
| Потрошња енергије | У стању мировања 2.7W, приликом максималног оптерећења 7W |

*Техничке карактеристике микропроцесора Raspberry Pi 4 – Табела 7.4*

### Ротациони енкодер – LDP3806–600BM–5G –24C

Ротациони енкодер је електромеханички уређај који конвертује угаону позицију или кретање осовине у аналогни или дигитални сигнал. Ови сигнали су кључни за одређивање позиције, брзине и правца ротационог кретања. Ротациони енкодери се широко користе у апликацијама које захтевају прецизну контролу ротационог кретања, као што су системи за контролу мотора, роботика, CNC машине и индустријска аутоматизација.

LDP3806-600BM-G5-24C је инкрементални ротациони енкодер познат по својој високој резолуцији и робусном дизајну, што га чини погодним за апликације које захтевају прецизну контролу кретања. Идеалан је за примене које захтевају повратне информације високе резолуције у изазовним окружењима, као што су прецизна контрола мотора, роботика и индустријска аутоматизација. Његова робусна конструкција обезбеђује поуздан рад у захтевним условима.

|  |  |
| --- | --- |
| Тип енкодера | Инкрементални ротациони енкодер |
| Резолуција | 600 импулса по револуцији |
| Пречник осовине | 6mm |
| Радни напон | 5V до 24V DC |
| Тип излаза | Квадратни (А и Б фаза сигнали) |
| Излазни напон | Високо: ≥2.4V (TTL-компатибилан), Ниско: ≤0.4V |
| Максимална фреквенција одговора | 100 kHz |
| Максимална брзина ротације | 5000 ротација у минути |
| Излазна струја | 30 mA макс по каналу |
| Радна температура | -10°C до +70°C |
| Конекција | Кабл са штитом, 5-пински конектор |
| Димензије | Пречник 38mm x дужина 44mm |
| Тежина | 150g |

*Техничке карактеристике ротационог енкодера LDP3806-600BM-G5-24C – Табела 7.5*



*Ротационог енкодера LDP3806-600BM-G5-24C – Слика 7.6*

## Додатак Б – Адитивна технологија производње и 3D штампа

Адитивна производња, позната и као 3D штампање или адитивна израда, је процес израде тродимензионалних објеката додавањем материјала у слојевима, уместо сечења или обликовања материјала.

У адитивној производњи, машине користе податке о CAD моделу да би додавале материјал у слојевима да би се израдио објекат, за разлику од традиционалних начина производње где машине уклањају материјал из блока или компоненте да би се добио жељени део.

Адитивна производња, у даљем тексту 3D штампа, има многе предности у односу на традиционалну производњу, укључујући већу сложеност дизајна, брзину производње, ниског трошкова производње малих серија или јединичних производа, могућност производње на захтев и низ других предности.

Због свих ових предности 3D штампач је нашао велику примену у различитим индустријама као што су авио и аутомовлиска, медицинска и многе друге индустрије, али поред индустрије 3D штампач се је постао и стандардна опрема многих лабараторија, као и радионица разних хобиста.

Постоје различите врсте 3D штампања, а неке од њих јесу фузија ласера, слој по слој (FDM) и селективна ласерска синтеризација (SLS). Која ће се врста 3D штампе користити зависи од жељеног материјала, величине објекта и других фактора.

За потребе мастер рада, добар део делова је израђен на 3D штампачу Ender 3 Pro (слика 7.7) компаније Creality. Овај штампач користи технологију слој по слој (FDM), а његове основне карактеристике можете видети у табели 7.6.



*Ender 3 Pro - Слика 7.7*

|  |  |
| --- | --- |
| Назив штампача | Ender 3 Pro |
| Запремина штампања | 220x220x250mm |
| Габарити штампача | 440x410x465mm |
| Пречник млазнице | 0.4mm |
| Максимална температура млазнице | 250°C |
| Максимална температура подлоге за штампање | 110°C |
| Дебљина слоја | 0.1–0.4mm |
| Повезвање | USB, SD картица |
| Материјали за штампање | PLA, ABS, PETG, TPU |

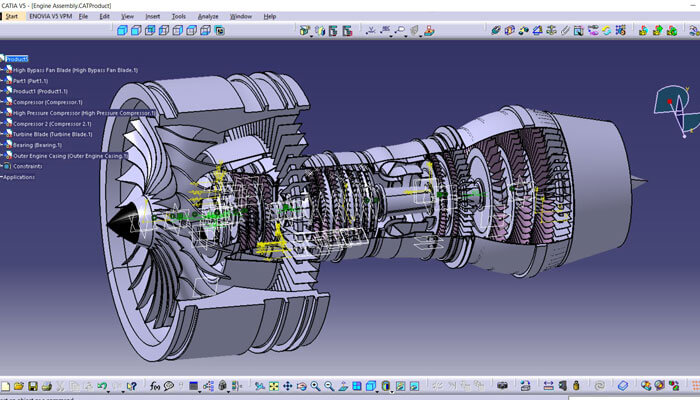
*Техничке карактеристике штампача Ender 3 Pro – Табела 7.6*

## Додатак В – Софтверски алати

### CATIA

CATIA је софтверски пакет за CAD/CAM/CAE дизајн и инженњеринг који се користи у различитим индустријама, као што су аутомобилска, авио, производна и многе друге индустрије. CATIA је развио француски софтверски гигант Dassault Systèmes и први пут је пуштен у употребу 1977. године.

Предности CATIA-е укључују могућност унапређења квалитета производа, повећања ефикасности производње, смањење трошкова развоја и производње и брже време доношења одлука. Међутим, мане укључују велику комплексност софтвера, велики трошак за набавку и обуку, и потребу за јаким рачунарским капацитетом.



*CATIA – Слика 7.1*

### Matlab и Simulink

### Python

### Улти макер цура

## Додатак Г – Технички цртежи и склопни цртеж система за балансирање лопте на шини

## Додатак Д – Технички цртежи тест бенча за прикупљање података

# Литература

* Mustafa Saad, Mohammad Khalallah, “Design and Implementation of an Embedded Ball-beam Controller Using PID Algorithm”, Universal Journal of Control and Automation 5(4): 63-70, 2017, DOI: 10.13189/ujca.2017.050402