

Пројектовање и имплементација система за адаптивно управљање силом хватања заснованог на анализи микро-вибрација

ДИПЛОМСКИ РАД

Кандидат: Душан Грковић

Ментор: Проф. Др. Зоран Јеличић

1. УВОД

Овај рад је у потпуности посвећен пројектовању, развоју и имплементацији новог алгоритма адаптивног управљања силом хватања где се на место сензора јавља 3D магнетени давач. Наиме, уобичајено је да се у инжењерској пракси на месту овог сензора налази крут сензор попут тензиометарске траке или комплексних сензора који имају способност да мере у више тачака, а у овом раду је предложено да се овај конвенционални приступ замени јефтинијим и бесконтактним 3D магнетним сензором. Увидом у стручну литературу нису нађена слична решења што не искључује њихово постојање, али се овај рад са сигурношћу може сматрати једним од ретких у тој области. Према првим експерименталним резултатима који су представљени између 2 решења, конвенционалног и новопонуђеног нема суштнске разлике уз природну ограду аутора да се ипак резултати могу сматрати субјективним и могу бити везани за сам квалитет софтверског решења.

Важно је напоменути да је основна идеја потекла са финалне рунде на европском нивоу такмичења EESTech challenge, где су осим аутора овог дипломског рада учествовале колеге Марко Миленковић и Константин Малешевић. Од рада за такмичење задржан је пројектни задатак, док су сви остали алгоритми и решења оригинална и по први пут се срећу у овом раду.

Аутор лично дугује велику захвалност коелгама на инспирацији и сарадњи, не само на такмичењу већ и све ове године школовања.

Рад је подељен у неколико целина :

У оквиру другог поглавља постављене су теоријске основе неопходне за разумевање физике феномена трења. Детаљно је анализиран *stick-slip* ефекат и генерисање микро-вибрација. Дефинисан је математички модел сензорског елемента представљеног као систем маса-опруга-пригушивач, чиме је постављена основа за разумевање динамичког одзива система. Такође, обрађени су принципи дигиталне обраде сигнала, са фокусом на Брзу Фуријеову трансформацију (ФФТ) и дигиталне филтре, који представљају кључне алате за издавање корисног сигнала из шума у реалном времену.

У оквиру трећег поглавља детаљно је описан процес пројектовања и израде хардвера. Представљен је развој еластичног механизма који омогућава 3D магнетном сензору да детектује микро-помераје. Образложени су избори актуатора и материјала (PETG/TPU) за израду паралелне хватальке методом адитивне производње. Посебан акценат стављен је на пројектовање електронског подсистема заснованог на ESP32 микроконтролеру, као и на конструкцију наменске аутоматизоване тестне платформе (енгл. Test Rig) која осигурава поновљивост експеримената и елиминише људски фактор при валидацији.

У оквиру четвртог поглавља представљено је комплексно софтверско решење које покреће систем. Описана је имплементација *firmware-a* заснованог на FreeRTOS оперативном систему у реалном времену, који користи двојезгарну архитектуру за паралелну аквизицију података и комуникацију. Детаљно су разрађени алгоритми за спектралну анализу (ФФТ) и детекцију клизања, као и машина стања (State Machine) која аутономно управља фазама хватања, држања и реакције. Такође, приказан је развој пратеће десктоп апликације за визуализацију и дијагностику сигнала, која је била кључна за фино подешавање параметара система.

У оквиру петог поглавља приказан је процес финог подешавања параметара као и финална валидација система. Документован је итеративни процес подешавања крутости сензорског елемента како би се његова природна

фреквенција ускладила са опсегом микро-вибрација од интереса. Кроз серију тестова на аутоматизованој платформи, демонстрирана је способност алгоритма да детектује почетно клизање и адекватно реагује повећањем силе. Посебна пажња посвећена је тестирању робусности система на различитим објектима – од крутih кутија, преко меких сунђера, до објекта неправилне геометрије, чиме је потврђена адаптивност и практична применљивост предложеног решења.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Како омогућити роботу да „осети“ почетак клизања пре него што предмет испадне? Ово поглавље покрива теорију трења као и сензорски интерфејс који омогућава превођење физичког феномену у сигнал који обрађујемо.

Прво ће бити истражени физички феномени који се јављају при губитку контакта. Затим ћемо представити кључне компоненте система: 3D магнетни сензор упарен са посебно дизајнираним еластичним сензорским елементом. Објаснићемо како овај „механичко-електронски“ тандем претвара невидљиве вибрације у корисне податке, а поглавље ћемо заокружити описом конструкције саме хватальке која све ове делове обједињује у функционалну целину.

2.1. Физика контакта и феномени трења

Клизно кретање се може поделити на две главне фазе, **почетно клизање** (микро клизање) и **грубо клизање** (макро клизање) [1, 2]

2.1.1. Процес клизања

1. **Фаза пријањања (Stick):** Контактне површине мирују у односу једна на другу [3].
2. **Почетно клизање (Incipient Slip):** Ово је стање у коме **део контактне површине** клизи у односу на другу контактну површину, док други делови још увек пријањају [2, 4]. Детекција почетног клизања се дефинише као први тренутак када било који мерени обележивач (нпр. на сензору) пређе унапред дефинисани prag померања [1].

3. **Грубо клизање (Gross Slip):** Дефинише се као тренутак када централна тачка (обележивач) контактне површине такође пређе дефинисани праг померања, што указује на потпуно губљење пријања [2].

2.1.2 Модел трења

Класичан модел трења даје основне принципе за разумевање овог феномена. Основни модел је познат **Кулонов модел трења**, а он наводи да је сила трења пропорционална нормалној сили и независна од брзине клизања након што се постигне макро-клизање. Међутим, неки експериментални резултати показују одступања од овог модела [1, 5].

2.1.3 Физика микровибрација током клизања

Микровибрације су динамичка манифестација промена у фрикционом стању која се јављају пре него што дође до грубог, неконтролисаног клизања [5]. Оне се често могу уочити као вибрације високе фреквенције [6].

2.1.3.1. Макроскопски механизам: "Ефекат хватања и повлачења" (Catch-and-Snap Effect)

Основна физика која производи високофреквентне вибрације током клизања је циклични механички процес који се назива ефекат пријања-клизања (или ефекат хватања и повлачења):

1. Пријањање (Stick): Због трења и еластичности материјала контактне површине, површина пријања за објекат и креће да се помера заједно с њим на малу удаљеност. [1]
2. Деформација: Током фазе пријањања, тангенцијална сила доводи до истезања еластичног елемента.
3. Клизање/Руптура (Slip/Snap Back): Када еластична сила буде већа од локалне сile трења, еластични материјал се нагло откачи од објекта и врати се у првобитни положај ("snap back").
4. Вибрације: Овај процес наизменичног пријањања, истезања и наглог враћања у првобитан положај (catch-and-snap back) понавља се током целог клизања. Ово понављање генерише вибрације на мерном уређају.

Овај механички циклус узрокује промену мерене нормалне сile са одређеном фреквенцијом. Експерименти су показали да је доминантна фреквенција овог ефекта "хватања и повлачења" око 60–70 Hz за Holweg-ов експеримент, док се код других сензора могу јавити и у опсегу од 50–250 Hz.

2.1.3.2. Микроскопски феномен: Секвенце прекида

- **Иницијални прекид контаката:** Почетак кретања је посредован прекидом микро-веза између површина (asperities) [2].
- **Спектрални потпис:** Детекција ових брзих, дискретних догађаја захтева анализу у фреквентном домену (нпр. ФФТ анализа), јер су у временском домену често маскирани шумом. Микровибрације које се детектују представљају мерљиви сигнал енергетске дисипације услед ових локалних прекида [5].

Закључак: Микровибрације које се детектују спектралном анализом представљају мерљиви сигнал енергетске дисипације. Оне настају услед брзих, локализованих прекидања контаката на додирној површини између хватальке и објекта.

2.2. Метода за детекцију клизања

Постоје различити приступи за детекцију клизања, од мерења коефицијента трења до коришћења оптичких сензора. У овом раду примењена је методологија детекције микровибрација које настају услед *stick-slip* ефекта, прилагођена за 3D магнетни сензор који има мерење у једној тачки [1, 2].

Будући да је коришћен 3D магнетни сензор чији рад је заснован на Холовом ефекту, неопходна је употреба еластичног механизма у који је уgraђен магнет (детаљније о механизму и сензору у поглављу 3). Овај бесконтактни метод омогућава мерење померања магнета изазваног микровибрацијама еластичног слоја током почетног клизања [2].

2.2.1. Принцип обраде сигнала

Метода се заснива на спектралној анализи сигнала у фреквенцијском опсегу од **40 до 200 Hz**, што покрива опсег у којем се најчешће јављају вибрације изазване клизањем [1, 3]. Добијени сигнал магнетног поља се обрађује у реалном времену помоћу Брзе Фуријеове трансформације (ФФТ) како би се

изоловале високофреквентне компоненте од нискофреквентних промена сile притиска.

Систем врши корекцију сile стиска када индикатор клизања пређе емпириски дефинисани праг. Физички, већа вредност овог параметра указује на интензивније кидање микро-веза трења и ослобађање веће енергије у кратком временском интервалу [4].

2.3. Принцип рада 3D магнетних сензора

3Д магнетни сензори, попут модела TLV493D-A1B6 који је коришћен, су уређаји који мере густину магнетног флукса (јачину магнетног поља) у три ортогонална правца (X, Y и Z) користећи принцип холовог ефекта (Hall-effect). Ова технологија омогућава бесконтактно мерење интензитета магнетног поља, што је у овом раду искоришћено као бесконтактна метода мерења позиције магнета и да се на основу тога израчуна деформација сензорског елемента.

2.3.1. Архитектура TLV493D-A1B6 сензора

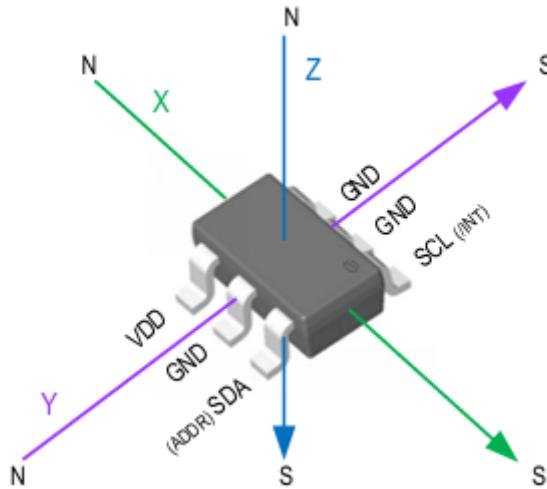
Сензор TLV493D-A1B6 је пројектован са 3 Холове сонде ортогонално постављене на чипу како би се омогућило тродимензионално мерење:

- Мерење Z-осе (Bz):** Магнетни флукс у Z-правцу детектује се помоћу латералне Холове плоче (енгл. lateral-Hall plate), која је постављена паралелно површини чипа.
- Мерење X и Y-осе (Bx, By):** Магнетни флукс у X и Y-правцу детектује се помоћу вертикалних Холових плоча (vertical-Hall plates), које су постављене нормално површини чипа и нормално једна на другу.

Сензор има дигитални излаз и користи двожични I²C стандардни интерфејс за комуникацију. Кључне карактеристике су:

- Линеарни опсег мерења: ± 130 mT.
- Резолуција података: Сензор пружа 12-битну резолуцију за сваки правац мерења (Bx, By, Bz).
- Регистри: Вредности за све три осе се чувају у засебним регистрима.

Позитивно поље се дефинише када је јужни пол (South-Pole) окренут ка одговарајућем Холовом елементу, као што се може видети на слици 2.1.



слика 2.1

2.4. Дигитална обрада сигнала (ДСП)

2.4.1. Брза Фуријеова трансформација (ФФТ)

Брза Фуријеова трансформација (ФФТ) је алгоритам дигиталне обраде сигнала који се користи за пребацивање сигнала из временског домена у фреквентни домен. У контексту детекције клизања, ФФТ се примењује за спектралну анализу микровибрација у реалном времену. Клизање објекта генерише карактеристичан спектрални потпис у домену високих фреквенција, па је циљ ФФТ анализе да идентификује ове значајне фреквенцијске опсеге како би разликовали догађаје клизања од неклизања. У имплементацији, ФФТ се израчунава над прозором од 128 узорака.

2.4.2. Дигитални филтри

Нископропусни филтар (Low Pass Filter): Примењује се на 1000 Hz ради елиминације шума сензора. Даљи нископропусни филтар са преломном учестаношћу од 30 Hz користи се за добијање ниских фреквенција из којих се добија DC компонента, која представља силу стиска (статички притисак).

Високопропусни филтар (High Pass Filter): Ефекат високопропусног филтрирања постиже се одузимањем вредности ниско пропусног филтра од оригиналног сигнала, и иако овај приступ може да проузрокује проблем са фазним изобличењем, у овом раду у комплетном ланцу обраде сигнала нема значајан утицај. Овај процес омогућава издвајање AC компоненте (високофреквентних вибрација), које су кључне за детекцију клизања.

$$y_{LP}[n] = (1 - \gamma)y_{LP}[n - 1] + \gamma x[n]$$

y_n је излазни сигнал

x_n је улазни сигнал

$$\boxed{\gamma = 1 - e^{-2\pi f_c/f_s}} \quad [7]$$

f_c је преломна учестаност а f_s је фреквенција одабирања.

За издавање високофреквентне компоненте коришћена је техника одузимања нископрофреквентног сигнала од оригиналне фреквенције. Прво се на сигнал примењује IIR нископропусни филтар првог реда (Low-Pass Filter), чији је циљ праћење DC компоненте. Високопропусна компонента (High-Pass) се потом добија одузимањем излаза нископропусног филтра од оригиналног сигнала

$$\boxed{y_{HP}[n] = x[n] - y_{LP}[n]}$$

y_{HP} - Излазна вредност нископропусног филтра у тренутку n (процена средње вредности)

y_{LP} - Излазна вредност високопропусног филтра (филтрирани сигнал микровибрација)

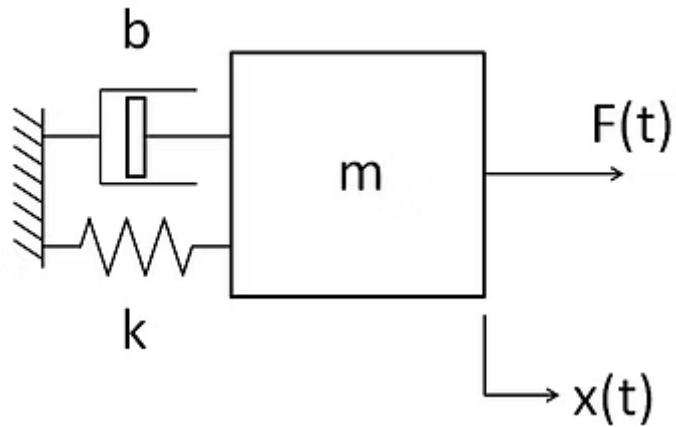
$x[n]$ - Улазни (сирови) сигнал са магнетног сензора.

2.5. Механика сензорског елемента са попустљивом везом

Будући да је била потребна контрола над параметрима еластичности при покретању сензора, за најбоље решење је изабран еластичан механизам израђен од лако доступне PETG пластике која је изабрана због својих својстава (жилав, дуктилан, висока стопа издужења, отпорност на замор) и произведен адитивном методом како би се убрзали итерације.

Овај приступ омогућава пуну контролу над еластичном константом. Будући да овај елемент може да се линеаризује за мале помераје као систем маса-опруга-пригушивач који по својој природи пригушава високе фреквенције, које су од интереса за ову методу.

Иако је систем нелинеаран, за мале помераје модел другог реда (маса-опруга-пригушивач) је добра апроксимација. Овај модел служи да за боље разумевање приликом мењања параметара.



Слика 2.2

нека су дефинисани следећи параметри система:

m је маса

b је коефицијент пригушења

k је константа опруге (крутост)

$x(t)$ је померај масе као функција времена

Једначина кретања је дата са:

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

Где је:

$\ddot{x}(t)$ убрзање (други извод помераја по времену)

$\dot{x}(t)$ брзина (први извод помераја по времену)

$x(t)$ померај

Ако на систем делује спољашња сила $F(t)$, једначина кретања постаје:

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = F(t)$$

Даље се изводи функција преноса применом Лапласове трансформације, под претпоставком стационарног почетног стања:

$$m(s^2X(s)) + b(sX(s)) + kX(s) = F(s)$$

Извлачењем заједничког члана се добија:

$$X(s)(ms^2 + bs + k) = F(s)$$

Функција преноса $H(s)$ је однос излаза и улаза:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

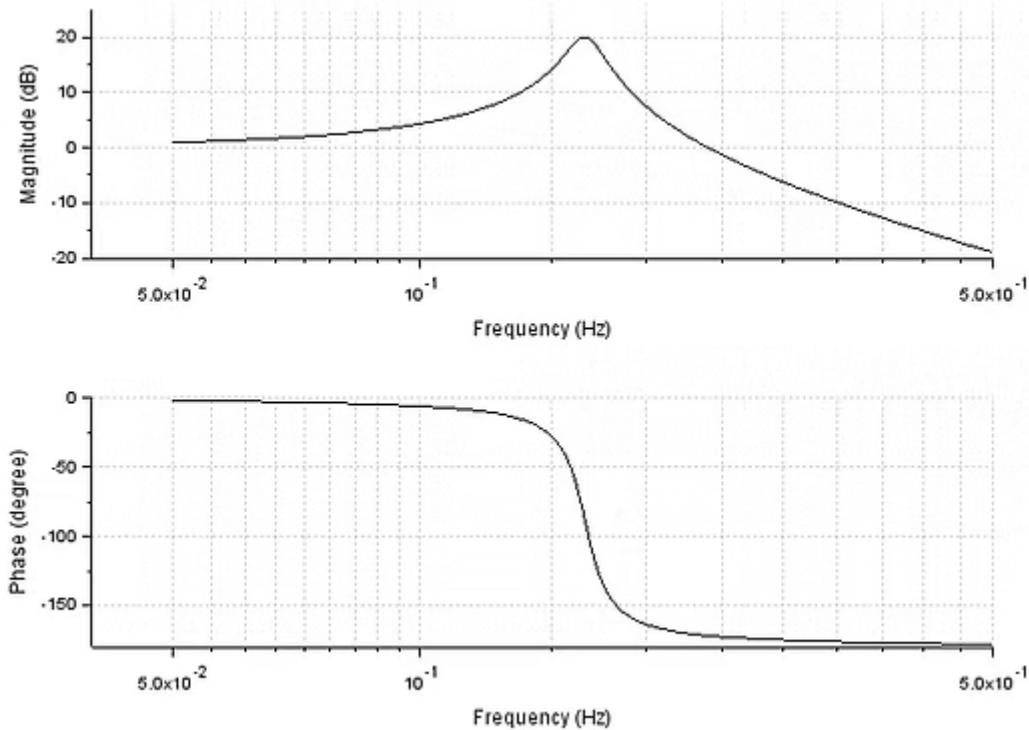
Затим изводимо фреквенцијски одзив заменом $s = j\omega$:

$$H(j\omega) = \frac{1}{m(j\omega)^2 + b(j\omega) + k}$$

Сређивањем израза (где је $j^2 = -1$) се добија:

$$H(j\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + bj\omega + k}$$

овај систем, уколико је стабилан, има бодеов график:



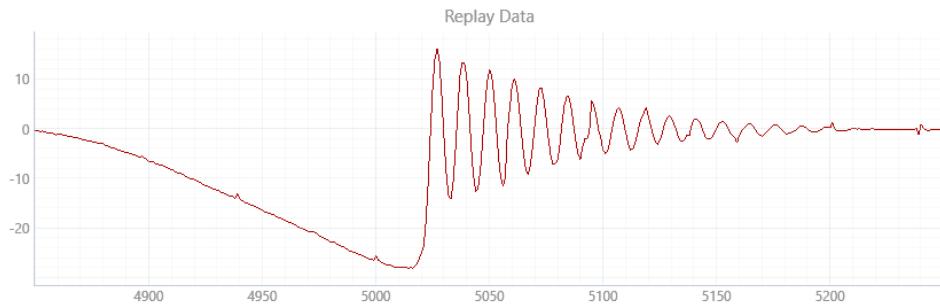
Слика 2.3

Овај дијаграм (слика 2.3) указује да у опсегу око преломне учестаности постоји значајно појачање, пре преломне учестаности је појачање 1, док се након преломне учестаности високе фреквенције пригушују.

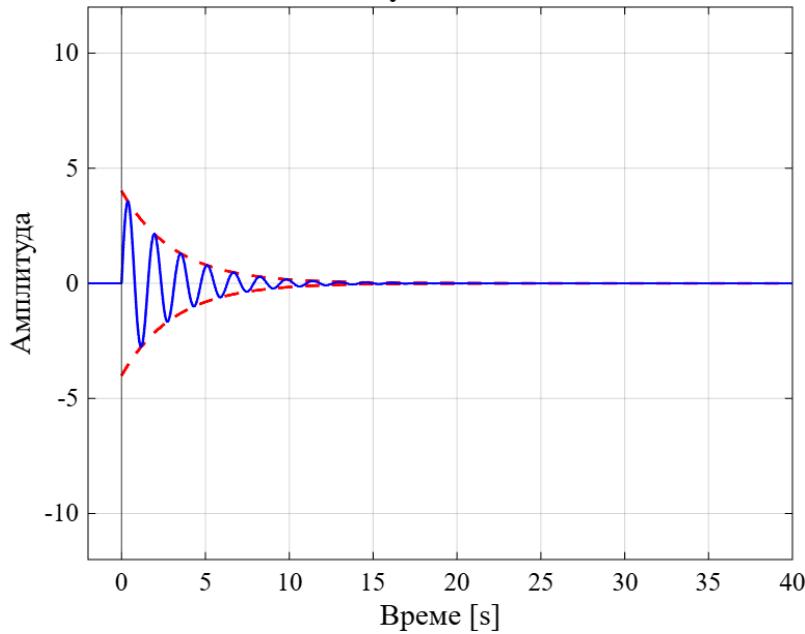
Апроксимација овог система је потврђена упоређивањем експерименталног одзива са већ познатим одзивом описаног система. У оба случаја, побуђивање система дираковим импулсом (у случају овог рада, јаким и брзим ударцем у крај мемране) и анализа временског и фреквенцијског домена као што се види, одзив се поклапа са системом који је описан.

Слика 2.4 представља очитавање са сензора, јединице за Y осу су милитесле [mT] а за X осу милисекунд [ms].

Слика 2.5 представља симулацију описаног система



**Слика 2.4
Импулсни одзив**



Слика 2.5

Пошто за интуицију није потребан цео модел, исти је упрощен тако што је фактор пригушења $b = 0$ и закључује се да је поједностављен систем другог реда за који се добија природна фреквенција помоћу ове једначине.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

k - еластична константа

m - маса

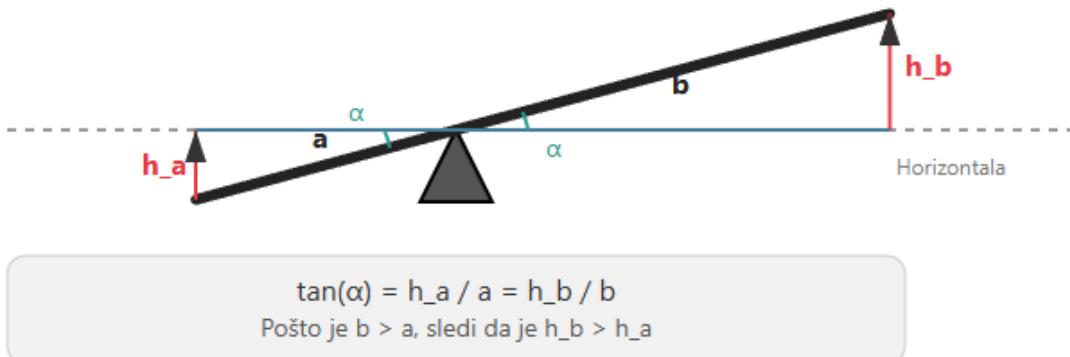
f - природна фреквенција

Пошто су својства пластике штампане на FDM штампачу непредвидива и зависе од многих фактора (оријентација, температура, састав пластике ...) прецизна симулација није могућа, једини метод подешавања фреквенције је био емпириски приступ.

2.6. Геометријска оптимизација осетњивости сензора

Микровибрације од интереса су веома ниске амплитуде, па будући да овај сензор није имао могућност повећавања прецизности на рачун смањивања радног опсега једина опција је била да се искористи принципа полуге.

Принцип полуге, дозвољава да се мали линеарни помак врха хватальке у X и Y правцу трансформише у угаони померај. Пошто је угаони померај константан, а дужина полуге ближе сензору је већа, те се изводи закључак да ће померај магнета бити појачан у односу на страну контактне површине.



Слика 2.6

За леву страну полуге, висина је h_a , а хоризонтална дужина је a , као што се види на слици 2.6:

$$\tan(\alpha) = \frac{h_a}{a}$$

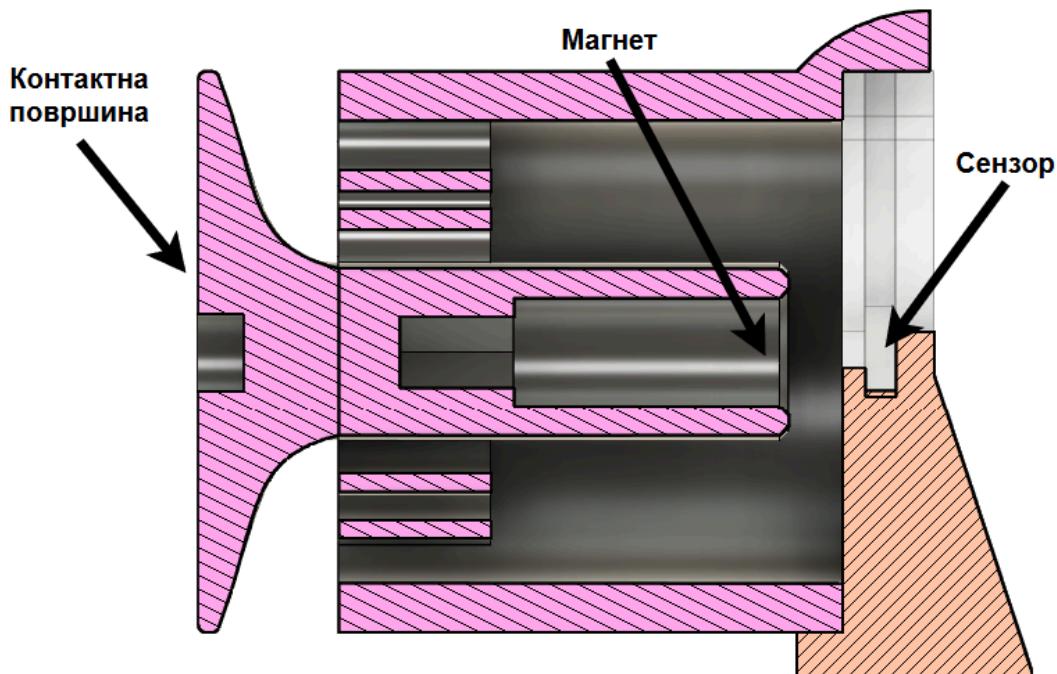
$$h_a = a \cdot \tan(\alpha)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{h_b}{b}$$

$$h_b = b \cdot \tan(\alpha)$$

$$\tan(\alpha) = \tan(\alpha) \text{ (уздуж услов да је } \alpha \neq 90^\circ)$$

$$\frac{h_b}{b} = \frac{h_a}{a}$$



Слика 2.7

Применом овог решења је осигурано повећање амплитуда, али ово повећање долази са ценом, а то је већа маса и моменат силе који смањују природну фреквенцију па је било потребно пронаћи оптимум између ова два параметра (дужина врата и крутост опруге)

2.7. Кинематика механизма паралелне хватальке

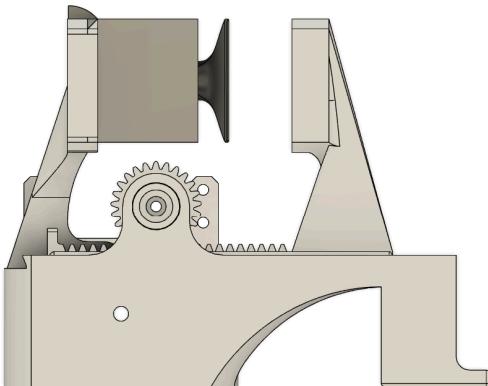
За потребе овог рада изабрана је паралелна хваталька као механизам за хватање. За разлику од угаоних хватальки, паралелно хватање обезбеђује константну оријентацију контактних површина у односу на објекат, што поједностављује алгоритам детекције клизања. У обзир су узимани и дизајн комплементарних механизама хватальки попут Yale OpenHand [8], али паралелни хватач може најбоље да представи предности и мане предложеног алгоритма.

Трансформација ротационог кретања мотора у линеарно кретање прстију реализована је употребом механизма зупчасте летве и зупчаника (енгл. Rack and Pinion).

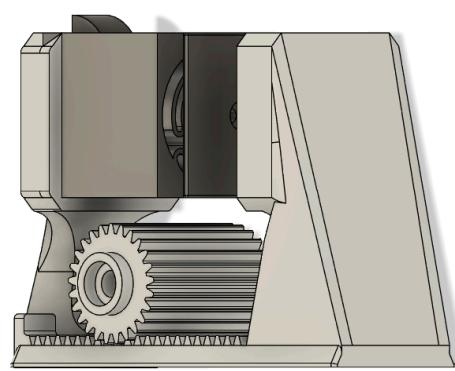
- **Принцип рада:** Централни зупчаник, спрегнут са осовином серво мотора, покреће зупчасту летву. Ово обезбеђује транслационо кретање прста док је други прст стационаран.
- **Дизајн:** Базични дизајн преузет са интернета [10], модификован за примену и сензор који се користи, коришћењем CAD софтвера
- **Вођење:** Линеарно вођење се дешава на штампаној вођици са повећаним толеранцијама, овај приступ додатно доказује да је алгоритам робустан.

- **Начин израде:** За израду хватача одабран је PETG (полиетилен-терефталат гликол) материјал. Овај избор је првенствено условљен радним условима механизма, где се услед трења у кинематичким паровима зупчаник-летвта и летва-шина долази до генерисања топлотне енергије. Обзиром на то, употребом материјал попут PLA, услед термичких појава насталих силом трења у оваквим условима довела до ризика од термичке деформације. Сви делови су штампани у оптималној конфигурацији како би издржали највећу количину сile, методом адитивне производње типа *FDM*.

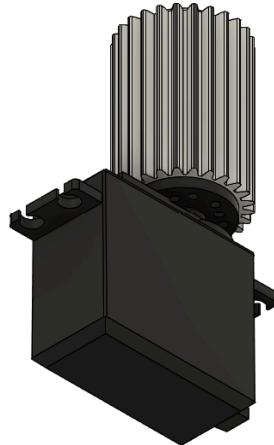
Овакав приступ омогућава да систем поуздано може да измери силу која је примењена на објекат, и да је увек позната оса клизања.



Слика 2.8



Слика 2.9



Слика 2.10

2.8. Избор актуатора и анализа преноса сile

Као актуатор изабран је мотор MG996R (слика 2.9). Овај модел је изабран због својих карактеристика које одговарају примени.

- Метални пренос, омогућава дуготрајност и отпорност као и већи преносни моменат

- Висок обртни моменат декларисани обртни моменат омогућава довољну силу стиска за све објекте и омогућава прецизност за објекте које захтевају мању силу



Слика 2.11

Иако би било идеално да се користи серво мотор који поседује уграђено мерење обртног момента, овај мотор је довољан за демонстрацију функционалности алгоритма детекције клизања.

2.8.1. Анализа потрошње струје и ефекат трења у преносу

Теоријски модели предвиђају линеарну зависност између струје мотора и обртног момента $\tau = k_t * I$, у пракси овај однос није линеаран због значајног утицаја трења у редуктору мотора и механизму хватальке.

Уочено је да механизам поседује изражену особину статичког трења, која у одређеним условима доводи до ефекта самоблокирања (self-locking).

- Фаза активног стискања: Док се мотор креће и сабија објекат, струја расте пропорционално оптерећењу, од одређене тачке, то значи да није могуће очитати обртни моменат на веома малом интензитету стиска.
- Фаза држања : Након што се мотор заустави, трење између зупчаника и зупчасте летве преузима део оптерећења. Због тога, струја потребна за одржавање позиције може бити знатно мања од струје која би теоријски била потребна да се савлада еластична сила објекта. Уколико објекат захтева већу силу потрошња се повећава али за објекте који се деформишу под релативно малом силом, где је и битнија прецизност обртног момента мотора, мерење струје није могуће.

Ова карактеристика има двоструку улогу:

- Предност: Смањује потрошњу енергије током фазе држања објекта.
- Ограниччење: Онемогућава прецизно мерење силе стиска искључиво путем мерења струје.

Због овог ограничења, у овом раду се мерење струје користи само као редундантна информација за заштиту мотора и грубу детекцију контакта, док се

за прецизну контролу клизања користи примарни 3D магнетни сензор описан у претходним поглављима.

3. АНАЛИЗА И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ХАРДВЕРА

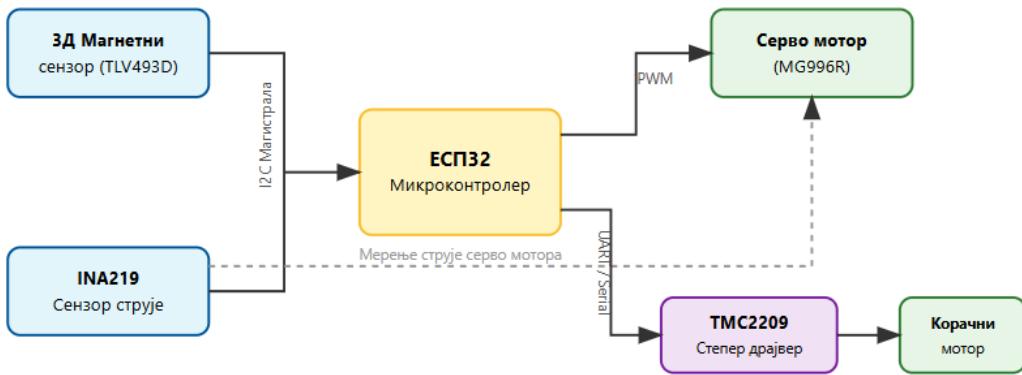
Након што су у претходном поглављу постављене теоријске основе, ово поглавље описује процес инжењерске реализације система, од идеје до функционалног прототипа. Циљ је приказати како су специфични захтеви за детекцију микровибрација диктирали дизајн хардвера.

Излагање почиње концептуалним решењем система (3.1), након чега се прелази на детаљан опис пројектовања кључних подсистема.

Прво је анализиран развој сензорског елемента (3.2) и специфичне геометрије која омогућава детекцију микровибрација, а затим и конструкција актуаторског система (3.3) који реализује функцију хватања. Како би ови механички делови функционисали као целина, посебна пажња посвећена је електронском подсистему (3.4) и дизајну хардверских интерфејса. У том делу је објашњено како су повезани сензори, погонске јединице и управљачка логика, као и начини комуникације између њих.

Конечно, ради валидације система у контролисаним условима, описана је израда аутоматизоване тестне платформе (3.5), чиме се заокружује приказ комплетног хардверског решења.

3.1. Концептуално решење система

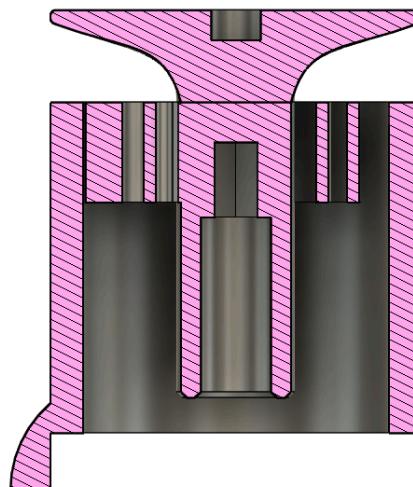


Слика 3.1

3.2. Дизајн сензорског елемента (Еластични механизам)



Слика 3.2



Слика 3.3

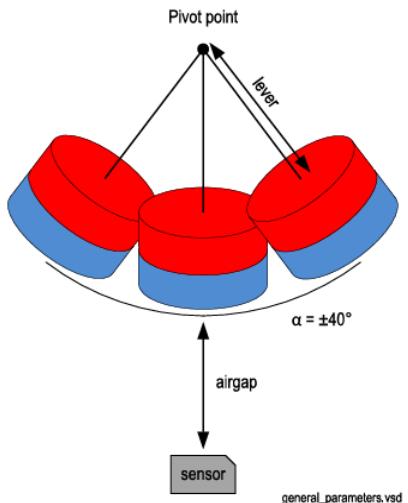
Како је у поглављу 2.5 анализиран утицај крутости и масе на фреквентни одзив, овде је описана конкретна геометрија која задовољава услове.

Геометрија "Joystick" механизма:

- Као носач магнета пројектована је планарна опруга са спиралном геометријом (енгл. Planar Spiral Flexure) ова геометрија, приказана на слици 3.2 састоји се од 3 симетрична крака која повезују централни магнет са кушиштем.
 - **Линеарност помераја:** омогућава већи линеарни ход по Z-оси без пластичне деформације.
 - **Центрирање:** геометрија природно враћа еластични зглоб ("џојстик") у неутрални положај, битно за поновљивост мерења.
- На пресеку (слика 3.3) се тачно уочава принцип полузе који је описан у теоријском делу. Механизам се састоји из три целине

- 1. Контактна површина:** пројектована да буде равна али са издужењем како би се осигурао једнак пренос сile са веће на мању површину. Монтажа се врши вијчаном везом, што омогућава брзу замену.. Додат је уложак од TRU како би повећао коефицијент трења.
- 2. Стабло:** крути елемент који пролази кроз центар планарне опруге. Тачка везивања представља ослонац опруге. Један од параметара је била дужина стабла од опруге.
- 3. Комора магнета:** Магнет је смештен на супротном крају стабла и остављена је могућност за додавање више магнета како интензитет поља не би толико драстично опадао.

- Механизам је дизајниран као опруга која може да се креће у све три димензије.
- Параметри који су могли да се подешавају су
 - висина зида опруге
 - ширина зида опруге
- Емпириски је утврђено да повећавањем дебљине зида повећава се крутост опруге.
- Успостављен је ваздушни зазор између магнета и сензора, овај зазор је заштићен зидовима кућишта и параметар је који омогућава подешавање интензитет магнета као и максимални дозвољен пут за магнет.
- Дизајн геометрије је заснован на произвођачким дизајнерским спецификацијама како се дизајнира 3D магнетни сензор, будући да су параметри рађени са другачијим магнетима, спецификација је служила као смерница у ком смеру треба мењати параметре[9].
- Као ограничење PETG материјала јавља се феномен пузња материјала (енгл. creep), који се манифестије кроз лагану деформацију сензорског елемента при дуготрајном статичком оптерећењу. Међутим, с обзиром на то да се ова деформација одвија на веома ниским учестаностима, она не утиче на детекцију клизања. Примењени алгоритам заснован на високопропусном филтру (High-Pass Filter) и ФФТ анализи успешно елиминише ово одступање сигнала од почетних вредности, изолујући искључиво високофреквентне микровибрације које су од интереса. У реалном систему би била потребна повремена аутоматска калибрација сензора док је потпуно отворен како би се елиминисала грешка настала деформацијом сензорског елемента. Такође, у реалном систему би се користила опруга израђена од материјала са карактеристикама прикладнијим за примену.



Слика 3.4

3.2.2 Подешавање преломне учестаности

Како што је наведено у поглављу 2.5, адитивна производња, посебно FDM, отежава прецизну симулацију система.

Метод који је коришћен се састоји се из анализе резултата фуријеове трансформације, за шта је развијена десктоп апликација за визуелизацију. Оса од интереса се побуђује кратким и снажним ударцем. Овим се симулира дираков импулс, иако није био ни бесконачно кратак ни бесконачне амплитуде, из њега може да се закључи преносна карактеристика система. Будући да је познат ред система, наведено у поглављу 2.6, једини битан параметар је максимум амплитуде (енгл. peak) фреквентног спектра и из њега се извлачи закључак о природној фреквенцији склопа. Пример изгледа графика и апликације за подешавање параметара је на слици 3.5, која омогућава да се види одзив система и функционалост имплементираних филтара.

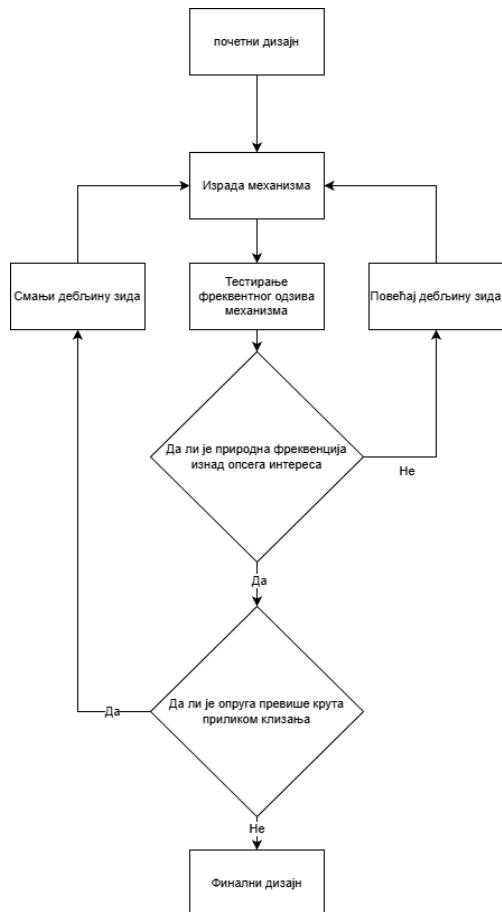
Циљ је да се природна фреквенција налази изнад фреквенција на којима се појављују микровибрација. Разлог за овај захтев је да не би свака спољна вибрација, па чак и звук доприносили осцилацијама и алгоритам би детектовао клизање где не постоји.

Иако овај проблем није у потпуности решен, механизам сензорског елемента има природну учестаност око горње границе, око 180 Hz. Коришћењем другог материјала или променом геометрије сензорског елемента, овакав проблем би требало да буде решен.

У теоријском делу је покривен део зашто прецизан модел и симулација осцилаторне фреквенције објекта није могућа, па је једина опција да се итеративним начином дође до оптималног решења. Алгоритам је описан на слици 3.6



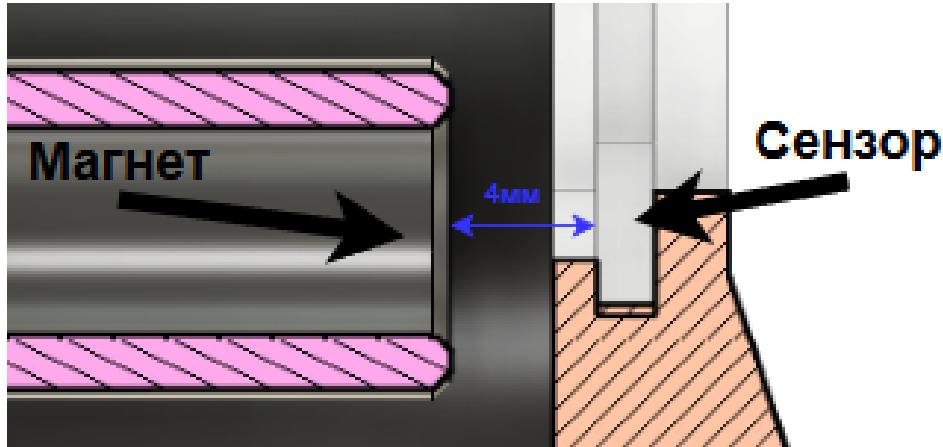
Слика 3.5



Слика 3.6

3.2.3 Избор магнета

Како би био искоришћен пун потенцијал сензора без додавања других сензора било је неопходно да се предвиди простор између магнета и сензора. Усвојени дизајн предвиђа ваздушни зазор (air-gap) од 4 mm између краја стабла и сензора (слика 3.7). Овим се омогућава кретање приликом деформације сензорског елемента у случају силе нормалне на хватач. Овај параметар је критичан за алгоритам хватања.



Слика 3.7

Будући да се интензитет поља повећава са повећањем димензије магнета у правцу магнетног поља, стављено је више магнета како би приближан ефекат са бенефитом финог подешавања био постигнут. Повећавањем интензитета магнeta појачава снагу магнетног поља и повећава сензитивност на мале помераје.



Slika 3.8

3.3. Актуаторски систем и хваталька

На основу кинематичке анализе изложене у поглављу 2.7, реализована је модификована верзија паралелне хватальке са једним активним (покретним) и једним пасивним (стационарним) прстом. Оваква конфигурација је изабрана јер омогућава једноставнију механичку конструкцију уз задржавање функционалности потребне за верификацију алгоритма.

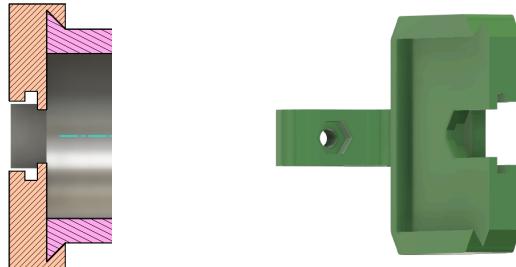
3.3.1. Модификација механичког дизајна

Као полазна основа коришћен је open-source дизајн доступан на GitHub-u [10], који је значајно модификован како би се интегрисао сензорски систем

Кључне модификације укључују:

- **Интеграција сензорског модула:** Конструкција главе пасивног прста је изменењена. Уместо стандардне контактне површине, пројектовано је

лежиште које прихвата еластични сензорски елемент ("џојстик" описан у поглављу 3.2) и може да се види на слици 3.9. Ово омогућава да се сила стиска преноси кроз еластични механизам, померајући магнет и омогућавајући да магнетни сензор очита померај механизма. Додато је и лежиште у које је постављен сензор, слика 3.10.



Слика 3.9

Слика 3.10

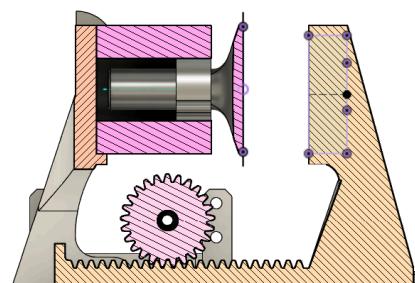
- **Вођење:** Елементи за линеарно вођење су израђени технологијом адитивне производње са намерно димензионираним већим зазорима слика 3.11. Циљ овог приступа је демонстрација робусности алгоритма – систем мора бити у стању да детектује микровибрације услед клизања иако постоје макро-вибрације услед несавршености механичког вођења.



Слика 3.11

3.3.2. Преносни механизам (Rack and Pinion)

Трансформација ротационог кретања у транслаторно реализована је системом зупчасте летве и зупчаника (Слика 3.12).



Слика 3.12

- **Централни зупчаник (енгл. Pinion):** Директно је спрегнут са излазним вратилом серво мотора.
- **Зупчаста летва (енгл. Rack):** Интегрисана је у основу покретног прста. Ротацијом мотора, зупчаник гура летву, чиме се остварује линеарно померање сензорског модула ка објекту.

Овај механизам обезбеђује директан пренос сile без употребе додатних полууга које би могле унети еластичност и пригушити корисне вибрације.

3.3.3. Интеграција актуатора (MG996R)

Као погонска јединица уgraђен је дигитални серво мотор MG996R. Мотор је монтиран у горњем делу кућишта, изнад механизма за вођење, чиме се постиже компактност склопа.

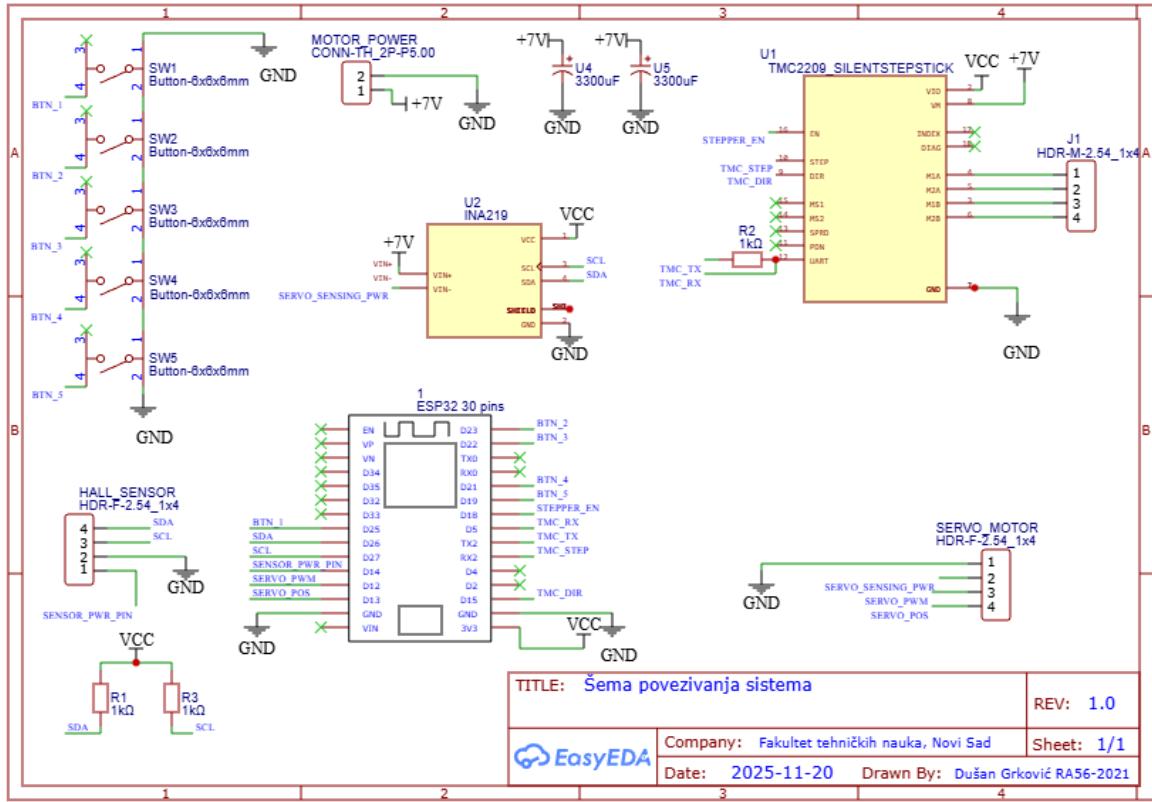
Карактеристике имплементираног погона од значаја за рад система су:

- **Метални зупчаници:** Обезбеђују крутост преноса неопходну да се нагле промене сile (попут *stick-slip* ефекта) пренесу до механичке структуре без апсорпције у пластичним зупчаницима. Иако овај мотор поседује доста зазора између зупчаника, брзина алгоритма компензује евентуално кашњење изазваном механиком преноса.
- **Обртни момент:** Са декларисаним моментом од 11 kg·cm (на 6V), мотор обезбеђује довољну силу стиска за тестирање различитих материјала, али и довољну резолуцију помака за фину регулацију сile током фазе реакције на клизање.

Комплетан склоп хватальке израђен је од PETG пластике, што представља економично решење погодно за брзу израду прототипа и итеративно побољшање дизајна.

Потенцијална побољшања би се огледала у примени серво мотора са подесивим обртним моментом. Ова модификација би омогућила прецизну контролу сile у затвореној петљи и побољшала би прецизност алгоритма.

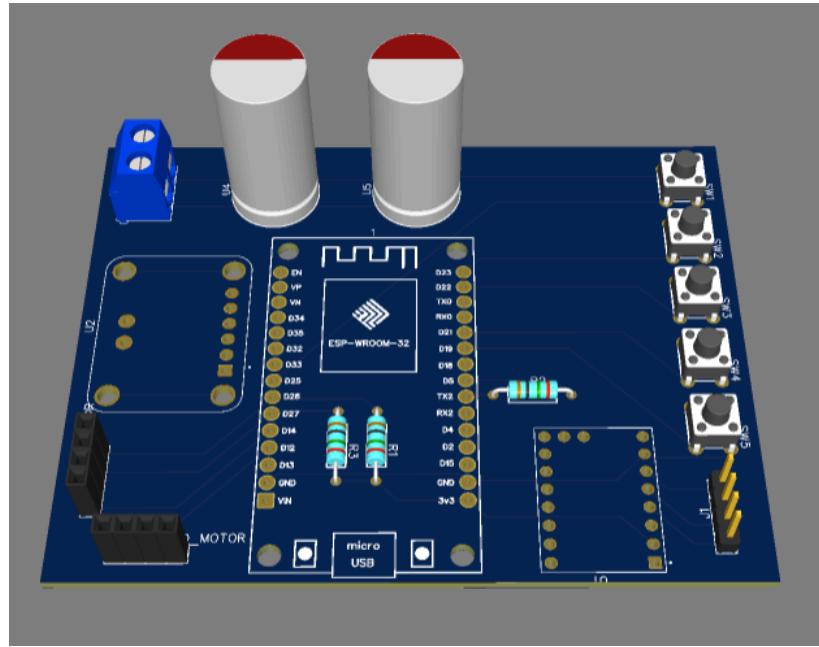
3.4. Електронски подсистем



Слика 3.13

Електронски део система пројектован је са циљем да повеже сензорске елементе, актуаторе и управљачку логику у једну функционалну целину. Дизајн се заснива на модуларном приступу, где централна процесорска јединица управља периферијама путем стандардизованих комуникационих протокола (I2C, UART, PWM). Електрична шема повезивања приказана је на Слици 3.13.

Дизајнирана је и PCB плоча, али због ограниченог времена, прототип је урађен на перфорираној плочи. 3Д модел PCB плоче приказан је на слици 3.14. Сви фајлови се налазе на репозиторијуму [12].



Слика 3.14

3.4.1. Централна управљачка јединица

Као процесорски модул система изабран је развојни модул заснован на ESP32 микроконтролеру (Espressif Systems). Овај избор одговара захтевима софтвера, пре свега потребом за брзим израчунавањем Фуријеве трансформације (енгл. FFT) у реалном времену, FreeRTOS и двојезгарна архитектура која омогућава несметану комуникацију са рачунаром.

Перформансе: Двојезгарни процесор на 240 MHz омогућава да једно језгро буде посвећено искључиво аквизицији података, ДСП обради и управљању, док друго језгро управља комуникацијом.

Напонски нивои: Логика ради на 3.3V, што је компатибилно са употребљеним сензорима.

3.4.2. Напајање и дистрибуција енергије

Систем се напаја екстерним извором једносмерног напона од 7V (конектор MOTOR_POWER слика 3.13). Овај напон је одабран као компромис између максималних перформанси серво мотора (MG996R) и радног опсега степер драјвера.

- **Филтрирање:** Због индуктивне природе оптерећења (мотори) и наглих скокова услед полазне струје, на напонску магистралу су додата два електролитичка кондензатора великог капацитета ($2 \times 3300\mu\text{F}$, ознаке C4 и C5 на шеми). Они служе као енергетски бафер и спречавају пад напона

који би могао ресетовати контролну логику серво мотора и степер драјвера.

- Сензорска контрола напајања: Напајање Холовог сензора није везано директно на 3.3V шину, већ на дигитални пин микроконтролера (sensor_power_pin). Ово омогућава софтверски ресет сензора ("power cycling") у случају поновне иницијализације. Енергетска потрошња сензора је испод максималне струје коју пин може да пружи.

3.4.3. Сензорски интерфејс и комуникација

Комуникација са сензорима реализована је путем I2C магистрале (линије SDA и SCL).

3D Магнетни сензор (TLV493D): Повезан је преко конектора. Користи се за примарну детекцију микровибрација.

Сензор струје (INA219): Коло U2 је постављено редно у грану напајања серво мотора (SERVO_sensing_power). Оно мери струју коју серво мотор троши и шаље податке микроконтролеру. Ово омогућава детекцију прекомерне силе и заштиту од преоптеређења.

3.4.4. Управљање актуаторима

Серво мотор (Хваталька): Управља се директно путем PWM сигнала (SERVO_PWM) са дигиталног пина ESP32. Повратна спрега о позицији се чита преко SERVO_POS линије, ово захтева модификацију мотора, преспајањем средњег пина потенциометра серво мотора на пин 13 микроконтролера, као што је приказано на слици 3.15



Слика 3.15

Корачни мотор (Тестна платформа): За управљање вертикалним померањем (платформа за подизање) користи се TMC2209 драјвер.

Драјвер је повезан са ESP32 путем UART интерфејса (пинови за TX/RX) што омогућава софтверско подешавање струје мотора, детекцију кочења мотора и микро-корака (microstepping) без потребе за физичким ћамперима, док се команда врши преко два pin-а:

- **DIR** за одређивање смера кретања
- **POS** за задавање следећег корака мотора

Коришћењем корачног мотора омогућава се поновљивост позиције мотора без потребе за сензор положаја који уводи непотребну комплексност у систем.

3.4.5. Кориснички интерфејс

За ручно управљање процесом и покретање различитих фаза тестира, предвиђена су четири тастера (SW1–SW5). Тастери су везани у конфигурацији са заједничком масом (GND), при чему се интерни pull-up отпорници микроконтролера користе за дефинисање логичког стања. Ови тастери имају следећу функционалност

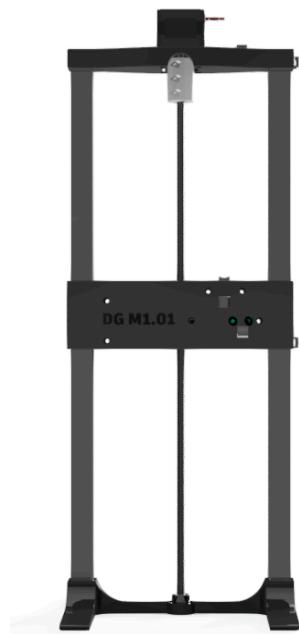
- **Тастер 1** - активација функције хватања оптималном силом
- **Тастер 2** - активација потпуно гашења хватача.
- **Тастер 3** - дизање хватача на предефинисану висину
- **Тастер 4** - спуштање хватача у почетни положај
- **Тастер 5** - стопирање дизача у тренутном положају

3.5. Аутоматизована тестна платформа (Test Rig)

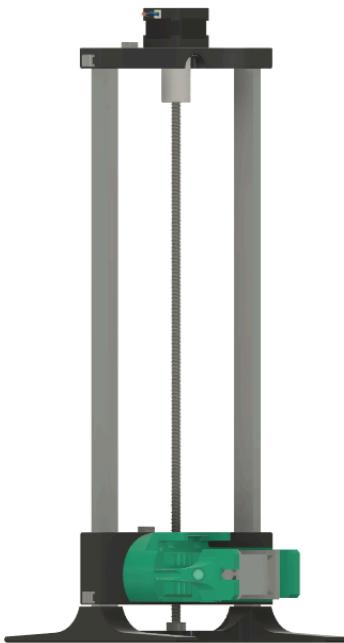
Како би се обезбедила валидација алгоритма у строго контролисаним условима, пројектован је и израђен наменски мехатронички систем за вертикално позиционирање (Слика 3.17).

- **Разлог имплементације:** Кључни мотив за израду ове платформе је елиминација субјективног фактора оператора. Ручно подизање објекта уноси неконзистентна убрзања и нежељене механичке вибрације (шум) које могу замаскирати стварни сигнал клизања или изазвати лажне детекције. Овај систем осигурује да је профил брзине подизања идентичан и линеаран у сваком експерименталном циклусу.
- **Конструкција и функционалност:** Платформа се састоји од чврстог рама са линеарним вођицама и навојним вретеном којег покреће корачни мотор (NEMA 17) управљан TMC драјвером, драјвер је изабран због тихог рада и проналажење нулте тачке преко детекције заустављања мотора, поједностављајући хардверски део система.

- Ради поједностављења система напајања, сви мотори се напајају на 7V, будући да је то максимум за изабрани серво мотор. Овај избор ограничава максималну брзину померања платформе као и максималну тежину дизања, будући да корачни мотор при већим брзинама почиње да проклизава.
- Посебна пажња посвећена је поновљивости, због чега је имплементирана функција аутоматског позиционирања (Homing) и приликом сваког стартовања система покреће се рутина која преко детекције закочености мотора проналази нулту тачку. О овом алгоритму ће бити детаљнија реч у 4. поглављу.
- Пре почетка сваког теста, систем аутоматски враћа хватальку у дефинисану нулту тачку користећи особину степер мотора да у отвореној спрези може прецизно бити одређен положај. Будући да је коришћена стандардизована навојна шипка M8x1.25mm, мотор са познатим углом корака и предефинисаним бројем међу корака. Ове информације омогућавају израчунавање помоћу формуле, се добија број корака који су потребни да се хватач помери за 1mm [11]. Овим приступом се гарантује да сваки експеримент започиње са идентичне висине и под истим почетним условима. Као и да корисник лакше управља мотором Изабрана је ова висина како би се постигао оптимум између трајања експеримента и максималне димензије предмета.



Слика 3.16



Слика 3.17



Слика 3.18

4. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА СОФТВЕРА

Након дефинисања хардверских компоненти, ово поглавље описује софтверску интелигенцију система развијену на **ESP32** платформи коришћењем Arduino framework-а уз примену објектно-оријентисаног приступа. Код је организован модуларно, где су хардверски драјвери (Drivers), алгоритми за обраду сигнала (Logic) и конфигурациони параметри јасно раздвојени. Оваква архитектура олакшава отклањање грешака, омогућава будућа проширења система и повећава прегледност кода.

Фокус је на архитектури која обезбеђује рад у реалном времену (енгл. Real-Time) коришћењем **FreeRTOS** оперативног система, где су задаци комуникације и критичне контролне петље раздвојени на два процесорска језгра ради максималне стабилности и брзине.

Читалац ће се упознати са комплетним током обраде сигнала – од строго детерминистичког узорковања и дигиталног филтрирања, преко **ФФТ анализа** за детекцију микро-клизања, па све до доношења одлука кроз **машину коначних стања**.

Поред управљачког алгоритма, поглавље покрива и пратеће софтверске модуле: драјвере за аутоматизовану тестну платформу са напредним **позиционирањем без сензора** (енгл. Sensorless Homing), као и наменску **десктоп апликацију** за телеметрију, која омогућава визуелизацију и детаљну анализу свих параметара система током рада.

4.1. Архитектура фирмвера (FreeRTOS)

Рад у реалном времену (Real-Time) је критичан захтев за овај систем. Софтвер је имплементиран коришћењем FreeRTOS оперативног система, искоришћавајући двојезгарну архитектуру ESP32 микроконтролера за паралелизацију задатака.

Задаци су распоређени на два језгра како би се осигурало да комуникација и споредни процеси не блокирају контролну петљу и омогућили детерминизам налик SCAN-циклусу.

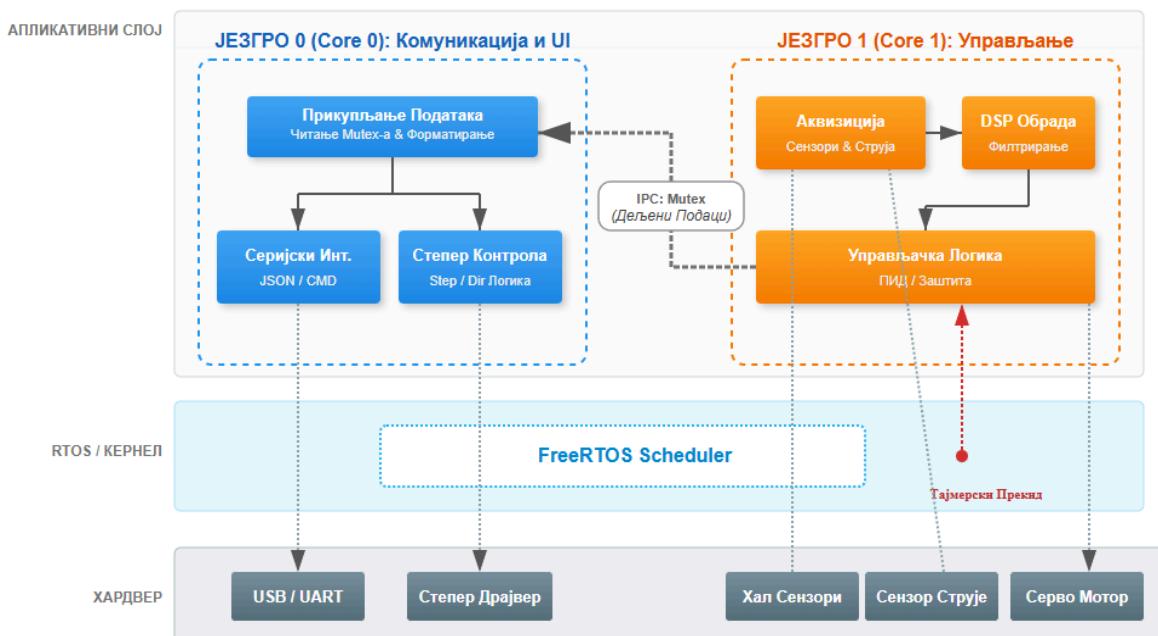
- **Језгро 0 (Core 0):** Комуникација, логовање података и *debug* интерфејс.

- **Језгро 1 (Core 1):** Критична контролна петља (Узорковање, Филтрирање, ФФТ, ПИД логика).

С обзиром на то да два независна процеса (задатка) приступају истим глобалним променљивим (резултати ФФТ анализа, индикатори клизања, улазима), имплементиран је механизам заштите интегритета података коришћењем мутекса (енгл. **Mutually Exclusive Semaphores**).

Комуникациони задатак (Core 0) мора да сачека слободан мутекс пре него што копира податке за слање. Тек након завршетка уписа, мутекс се откључава. Овим се спречава појава "стања трке" (Race Condition) и осигурува да се на рачунар увек шаљу валидни и комплетни пакети података, без успоравања критичне петље управљања.

Визуелизација поделе задатака се може видети на слици 4.1



Слика 4.1

4.2. Организација времена и управљање прекидима (ISR)

Како би био обезбеђен прецизан рад ФФТ-а, узорковање сигнала мора бити строго детерминистичко. Варијације у времену узорковања би директно унеле грешку у прорачуну спектра. Због тога посебна пажња је посвећена прекидима и мерењу трајања управљачке петље.

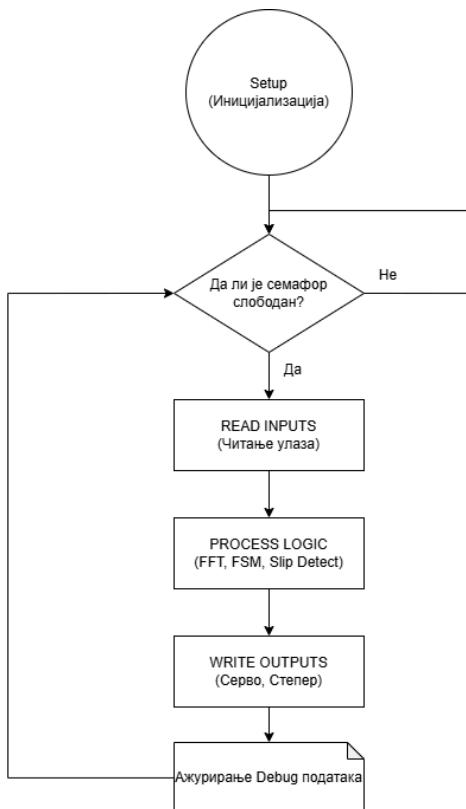
Систем користи хардверски тајмер подешен да генерише прекид (Interrupt) сваких 500 µs, што одговара фреквенцији узорковања од 2000 Hz.

Архитектура прекида је дизајнирана да буде минимална.

1. Када тајмер истекне, активира се прекидна рутина (ISR).
 2. ISR не врши никакву обраду (како не би блокирао систем), већ само поставља бинарни семафор.
 3. Главна петља, која чека на овај семафор, одмах наставља извршавање.
- Овај механизам осигурува да је систем стабилан и независан од осталих процеса у микроконтролеру, будући да I2C комуникација, као и филтрирање сигнала одузимају доста времена.

4.3. Стандардизовани SCAN циклус

Главна извршна петља програма (loop()) дизајнирана је по узору на индустриске PLC контролере, пратећи концепт стандардизованог скан циклуса. Један циклус се извршава тек када тајмер да сигнал, и састоји се од три јасно одвојене фазе приказане на дијаграму, слика 4.2.



Слика 4.2

1. Синхронизација и читање улаза (Synchronization & Input Read):

Почетак сваког циклуса иницира хардверски тајмер (Interrupt). Процесор се налази у стању мировања и чека сигнал тајмера, чиме се елиминише

временско одступање (*jitter*). Када циклус почне, улази се читају према приоритету како би се растеретила I2C магистрала:

- **Високи приоритет (High Priority - 2 kHz):** Магнетни сензор се чита у сваком циклусу (сваких 0.5 ms). Ово је неопходно за прикупљање довољног броја узорака за ФФТ анализу и прецизну детекцију микро-вибрација (клизања).
- **Ниски приоритет (Low Priority - Decimated):** Спорији сигнали се читају периодично коришћењем бројача циклуса:
 - **Сензор струје:** Чита се сваки 20. циклус (100 Hz). Промене струје су споре услед индуктивитета мотора, па чешће читање није потребно.
 - **Тастери:** Читају се сваки 100. циклус (20 Hz), што је довољно за људску реакцију (Human-Machine Interface).

2. Логичка обрада (Process Logic):

Након прикупљања података, врши се обрада сигнала над замрзнутим стањем улаза:

- Примена дигиталних филтара (Low-pass / High-pass).
- Израчунавање ФФТ(енгл. Fast Fourier Transform) над подацима магнетног сензора.
- Алгоритми за детекцију клизања (Slip Detection).
- Ажурирање машине стања (Finite State Machine) која доноси одлуке о промени силе стиска или покретању лифта.

3. Упис излаза (Write Outputs):

На крају циклуса, на основу одлука донетих у логичкој фази, шаљу се команде извршним уређајима:

- Ажурирање PWM сигнала за серво мотор (хватальку) у случају промене вредности.

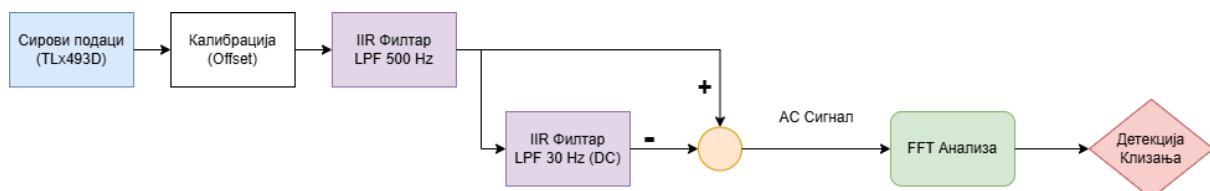
Оваква архитектура осигуруја да критични алгоритми (попут ФФТ-а) увек добијају податке у прецизним временским интервалима, што је кључни услов за стабилност адаптивног управљања.

4.4. Аквизиција и обрада сигнала

Сигнал са магнетног сензора пролази кроз вишеструку дигиталну обраду како би се изоловале микро-вибрације.

Процес обраде садржи следеће кораке :

1. **Узорковање:** врши се фреквенцијом од 2000 Hz, контролисано хардверским тајмером ради детерминизма.
2. **Калибрација:** Одузима се вредност сензора од вредности које су очитане приликом подизања система како би вредности биле приближне нули.
3. **Нископропусни филтар (500 Hz):** Елиминација шума сензора, филтер је нископропусни филтар првог реда.
4. **Нископропустни филтар (30 Hz):** Елиминација високих фреквенција како би се добила једносмерна компонента
5. **Високопропусни филтар:** Од сигнала се одузима вредности нископропусног филтра како једносмерна компонента не би утицала на рачунање ФФТ-а
6. **ФФТ анализа:** Израчунавање спектра над AC компонентом над прозором од 128 узорака. Будући да је природна учестаност сензорског елемента близу 0 Hz, повећањем узорака се добија већа резолуција спектра и боље разликовање фреквенција.



Слика 4.3

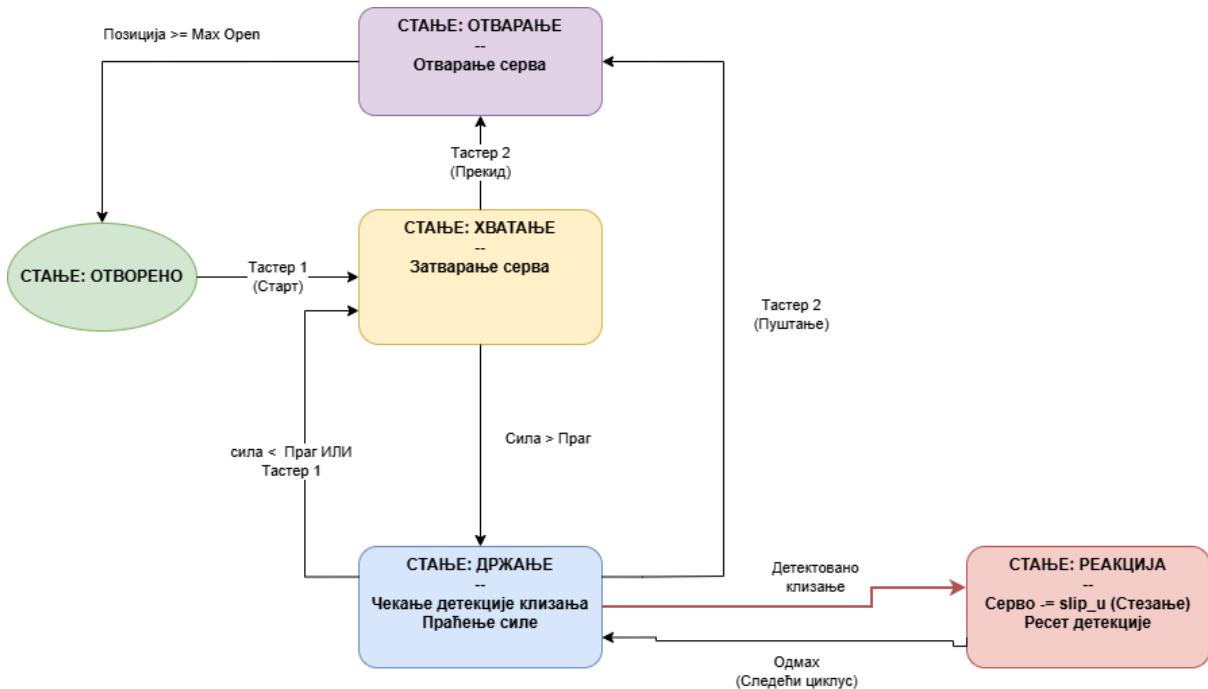
Разлог за овакав приступ је да релативно велика DC компонента не прави проблем приликом рачунања ФФТ-а, посебно у смислу расипања спектра (енгл. spectral leakage). Будући да се врши рачунање снаге спектра у широком опсегу и филтери нам елиминишу нежељене фреквенције, прозорске функције нису потребне. Такође за рачунање снаге спектра над фуријевим спектром јавља се проблем да уколико се клизање догоди на почетку или крају спектра, због природе прозорских функција (слабљење узорака на почетку и крају улазног низа за обраду, може да се деси занемаривање високих фреквенција од интереса). Због тога се у овом раду користи правоугаона функција.

Овај ланац омогућава добијање нове информације о клизању сваких 64ms

4.5. Алгоритам детекције и управљања (Машина стања)

Управљачка логика система имплементирана је као машина коначних стања (енгл. Finite State Machine - FSM). Овај приступ омогућава јасно дефинисано понашање система у сваком тренутку. Прелази између стања зависе од података сензора и корисничких команда.

- **GRASPING (Хватање):** Мотор затвара хватальку док померај магнетног поља не пређе праг, сензорски елемент се деформисао, овим приступом се омогућава хватање предмета са минималном силом.
- **HOLDING (Држање):** Стабилно стање где објекат чврсто стоји. Систем прати индикатор клизања, израчунат из ФФТ-а.
 - Уколико је индикатор клизања изнад константе клизања, изведене из емпријских закључака, систем улази у стање корекције стиска: Реакције
 - Уколико индикатор деформисања сензорског елемента достигне вредност испод прага, изводи се закључак да објекат није ухваћен и да се систем враћа у стање хватања .
- **REACTING (Реакција):** У случају детекције клизања, систем тренутно прелази у ово стање. Мотор инкрементално повећава силу стиска пропорционално индикатору клизања до сатурације дозвољеног померања у једном циклусу.
- **OPENING (Отварање):** Отварање мотора полако, уколико је потпуно отворен прелазимо у стање отворен.



Слика 4.4

4.5.1 Фреквенција узорковања у односу на ФФТ прозор

Сензор се узоркује на сваких 2000 Hz, ФФТ прозор је 128 узорака, дакле минимално време пуњења бафера је $128/2000=0.064\text{ s}$ (64 ms).

Из овога се закључује да је минимално време реакције 64ms + обрада, овакво кашњење је прихватљиво и доказано је као прихватљиво време реакције у истраживачком раду [5].

4.6. Софтверска имплементација аутоматизоване тестне платформе

Управљање вертикалним померањем тестне платформе (лифта) реализовано је помоћу наменског модула `MotorDriver`, који служи као хардверска апстракција за TMC2209 драјвер и корачни мотор. За разлику од класичног приступа који користи само дигиталне сигнале за корак и смер (Step/Dir), овај систем користи **UART серијску комуникацију** за динамичку конфиурацију параметара драјвера. Ово омогућава напредне функционалности попут подешавања струје мотора у реалном времену и читања дијагностичких података о оптерећењу.

4.6.1. Аутоматско позиционирање без сензора (Sensorless Homing)

Корачни (енгл. stepper) мотори су одличан избор за актуатор платформе за подизање хватача јер им је особина да у отвореној спрези раде са високом прецизношћу, омогућавајући поновљивост. Њихова мана за ову примену је да је непозната апсолутна позиција, решење се може пронаћи управо у машинама које користе корачне моторе и захтевају високу прецизност, ЦНЦ (енгл. Computer Numerical Control). Овакви приступи обично захтевају сензор који се налази на нултој позицији и активирањем сензора, попут микропрекидача, управљачка петља добија сигнал да је позиција на нултој тачки.

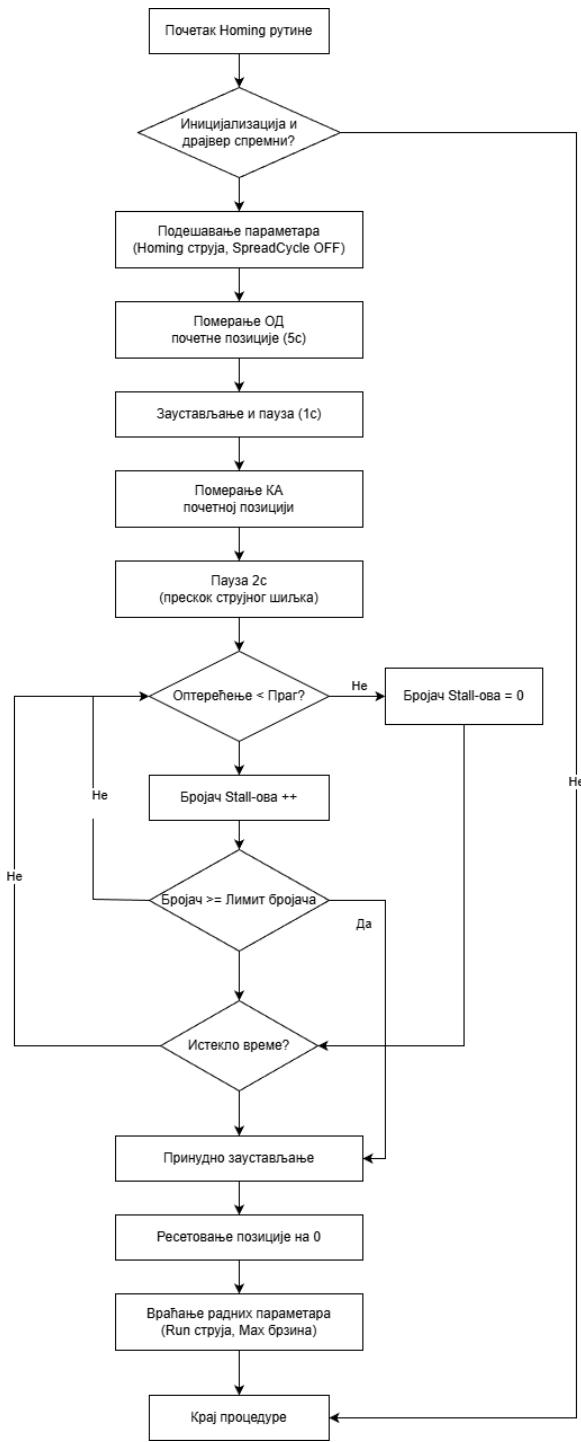
Уместо употребе физичких крајњих прекидача (limit switches) за детекцију почетне позиције (нуле), развијен је алгоритам за позиционирање без додатних сензора, **Sensorless Homing** који користи *StallGuard4* технологију интегрисану у TMC2209 чип.

Принцип рада се заснива на праћењу повратне електромоторне силе (Back-EMF). Драјвер интерно израчунава вредност оптерећења мотора

(`SG_RESULT`), која је обрнуто пропорционална механичком оптерећењу. Када платформа удари у физичку препреку (дно), оптерећење нагло расте, а вредност `SG_RESULT` пада ка нули.

Имплементирана рутина иницијализације (`runHomingRoutine`) извршава се у следећим корацима:

- Конфигурација за осетљивост:** Пре почетка кретања, струја мотора се софтверски смањује на 500 mA (`TMC_HOME_CURRENT`), а праг детекције (`SGTHRS`) се поставља на високу осетљивост. Ово спречава механичка оштећења приликом удара у крајњу позицију.
- Безбедносно померање:** Платформа се прво помера у супротном смеру (naviше) у трајању од неколико секунди. Ово осигурува да мотор има простора за убрзање пре него што крене ка нули, чиме се елиминише проблем у случају да се платформа налазила у нултој позицији и нема дововољно времена да убрза да драјвер мотора детектује кочење ротора.
- Прилаз нултој тачки:** Мотор почиње кретање ка доле. Током кретања, микроконтролер у петљи континуирано чита вредност оптерећења путем UART интерфејса.
- Филтрирање и детекција:** Како би се избегле лажне детекције услед вибрација или неравнине на вођици, имплементиран је алгоритам дигиталног филтрирања. Заустављање се иницира искључиво ако вредност оптерећења остане испод дефинисаног прага током 3 узастопна читања.
- Постављање нуле:** Након детекције физичке препреке, мотор се хитно зауставља, а тренутна позиција се у софтверу дефинише као апсолутна нула. Након тога, систем враћа параметре струје и убрзања на номиналне радне вредности.



Слика 4.5

4.6.2. Управљање профилом кретања

За прецизно позиционирање током експеримената користи се библиотека `FastAccelStepper`. Ова библиотека омогућава генерисање управљачких

сигнала са трапезоидним профилом брзине (линеарно убрзање и успорење). Такође библиотека прави своје прекиде, то омогућава да оба језгра раде без значајног прекида.

Овакав начин управљања је битан будући да мотор не може да достigne жељену брзину у једном тренутку. Трапезоидно управљање омогућава да мотор ради брже, тестирајући алгоритам и скраћивајући време трајање једног експеримента.

Како би била осигурана поновљивост и лакше контролисан корак дизања додата је функција која претвара милиметре у кораке, користећи формулу.

Ограниччење брзине мотора у систему је напон, иако може да ради на 7V, обртни моменат мотора као и максимална брзина при оптерећењу су ограничени. Разлог за избор нижег напона је потреба за поједностављивањем напајања плоче. 7V је максималан напон серво мотора. Решење за овај проблем би била два напајања или интегрисање DC-DC претватрача, за спуштање напона, на плочу.

4.7. Софтверска имплементација модула за аквизицију и телеметрију

Аквизиција и визуализација података су кључни елементи код сваког система, а посебно код система у реланом времену која захтевају емпиријска подешавања. Из тог разлога је развијена десктоп апликација која комуницира са микроконтролером визуализује податке и чува их.

4.7.1. Софтверска архитектура за аквизицију и телеметрију

С обзиром на то да се контролна петља извршава фреквенцијом од 2 kHz (сваких 500 µs), слање података ка рачунару у реалном времену представља уско грло. Класично слање текстуалних података (`Serial.print`) је блокирајућа операција која би нарушила детерминизам контролног алгоритма. Проблем је решен коришћењем двојезгарне архитектуре ESP32 микроконтролера и **Producer-Consumer** модела.

4.7.2. Асинхрони пренос података и синхронизација језгара

Систем користи FreeRTOS оперативни систем за расподелу задатака:

- **Језгро 1 (Real-Time Core):** Извршава временски критичне задатке (читање сензора, ФФТ, детекција клизања). На крају сваког циклуса, ажурира дељену структуру података (`DebugData`) која је заштићена **мутексом** (`mutexSlipData`).
- **Језгро 0 (Telemetry Core):** Извршава засебан задатак `DebugTask` ниског приоритета. Овај задатак периодично (сваке 1 ms) покушава да "закључча" мутекс. Уколико успе, копира тренутно стање система у локални бафер, откључава мутекс и затим врши серијализацију и слање података преко UART порта.

Овим приступом, тешка операција форматирања стрингова и слања преко серијске везе не блокира извршавање главне петље, чиме се гарантује стабилан *sampling rate* од 2 kHz.

4.7.3. JSON комуникациони протокол

За разлику од једноставних CSV формата, имплементиран је робустан JSON (JavaScript Object Notation) протокол који омогућава лакшу интеграцију са софтвером вишег нивоа (Python/MATLAB). Структура пакета је динамичка и зависи од тренутног режима рада. Иако овај приступ оптерећује серијски порт знаковима који не носе значајне информације, форматирање и лакше парсирање оправдавају додатно оптерећење.

Пример стандардног телеметријског пакета:

```
{
  "mx": 12.45,          // Филтрирана вредност магнетног поља (X оса)
  "cur": 150.2,         // Струја мотора [mA]
  "slip": 1,             // Детектовано клизање (Boolean)
  "s_ind": 85.4,        // Индикатор интензитета клизања
  "srv": 45              // Тренутна позиција серво мотора
}|XOR_checksum
```

Посебан изазов представља слање спектралних података (ФФТ), који садрже 64 тачке. Слање овако великог пакета поред информација које се шаљу високом фреквенцијом би загушио комуникациони канал. Због тога је уведен **ексклузивни режим рада**: када систем детектује захтев за ФФТ подацима,

привремено обуставља слање стандардне телеметрије и шаље цео спектар у једном пакету:

```
{  
    "type": "fft",  
    "data": [0.45, 1.23, 5.67, ...] // Низ амплитуда по  
фреквенцијама  
}|XOR_checksum
```

Да би се елиминисао утицај грешака приликом серијског преноса, које могу довести до нетачне анализе података и погрешних закључака, имплементирана је 8-битна XOR контролна сума (енгл. checksum). Иако овај метод није робустан као CRC (енгл. Cyclic Redundancy Check) алгоритми, одабран је јер пружа довољно добар ниво поузданости за потребе овог пројекта, уз минимално оптерећење процесора.

4.7.4. Динамичка конфигурација и Command Interface

Како би се додатно оптимизовао проток података, развијен је двосмерни комуникациони интерфејс. Рачунар може слати JSON команде микроконтролеру за укључивање или искључивање одређених токова података у реалном времену, без потребе за репограмирањем.

Имплементиране команде у `DebugTask` модулу укључују:

- `{"fft": true/false}`: Активација стримовања спектралне анализе.
- `{"slip": true/false}`: Активација стримовања статуса клизања.
- `{"mag_raw": true/false}`: Активација стримовања сирових података са сензора.
- `{"mag_filtered": true/false}`: Активација стримовања филтрираних података.
- `{"servo": true/false}`: Активација стримовања задате позиције серво мотора и машине стања са хватање.
- `{"system": true/false}`: Активација стримовања одступања системског тајминга од предефинисаног скен циклуса.
- `{"cur": true/false}`: Активација стримовања струје серво мотора

4.7.5. Десктоп апликација

Како би лакше били визуализовани и подешавани подаци без ручног уноса података у терминал, развијена је десктоп апликација у програмском језику Python која помаже у анализи и визуализацији.

Битне особине

- Активација и деактивација преноса промењивих од интереса (како не би била оптерећена серијска комуникација)
- Бирање серијског порта и брзине комуникације (енгл. baud rate)
- Подешавање опсега Y осе графика и аутоматски опсег
- Подешавање опсега X осе графика
- Аутоматско центрирање око DC компоненте сигнала
- Снимање података у фајл.
- Поновно прегледање снимљених података са избором брзине пуштања
- Контрола суме (енгл. checksum) преко XOR-а
- Могућност за више графика у једном прозору
- Могућност за мењање изгледа сигнала (боја, дебљина, тип линије)
- Извоз графика у стандардизоване формате (CSV, PNG, matplotlib, SVG...)
- Подешавање опсега и индикатори преласка опсега ради лакшег подешавања параметра система без мењања кода
- Преглед фуријеове трансформације, као и преглед спектограма са подесивим трајањем и максималним интензитетом

Приказ корисничког интерфејса дат је на сликама у наставку:

Слика 4.6 приказује функционалност приказивања више сигнала у различитим прозорима са могућностима подешавања граница.



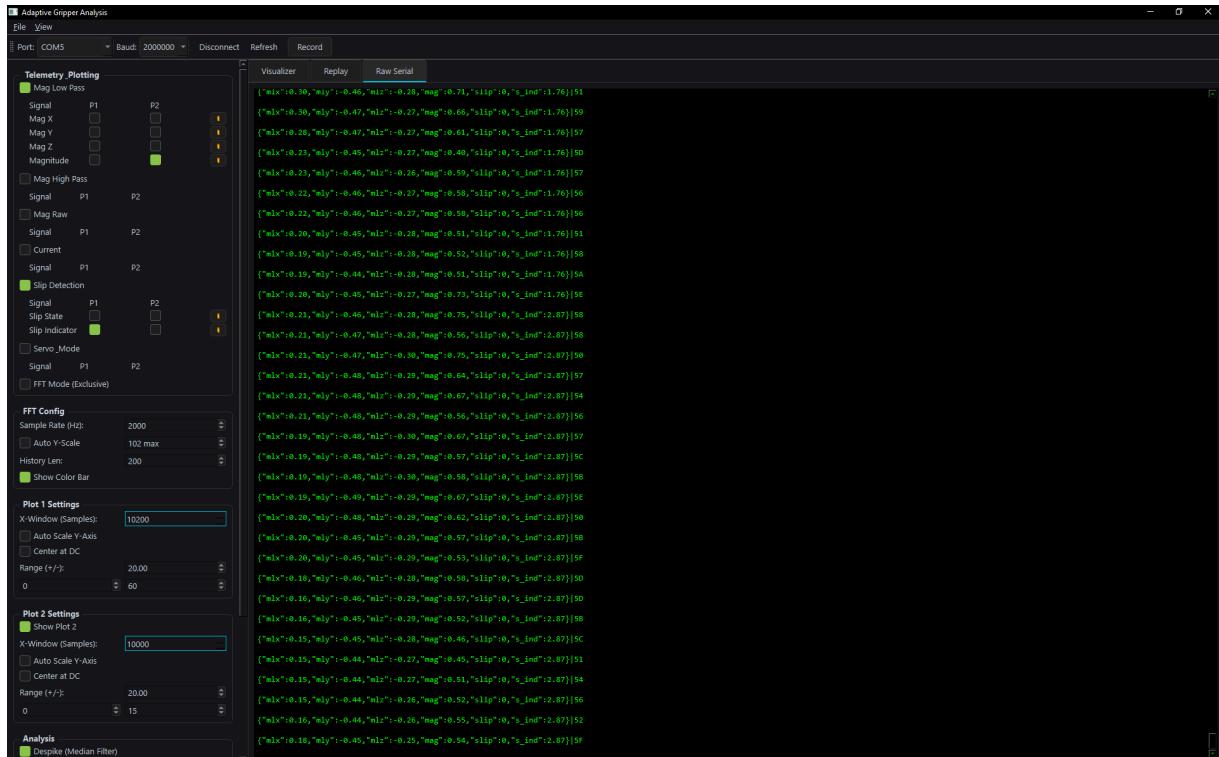
Слика 4.6

Слика 4.7 приказује могућност за учитавање сачуваних мерења и даље анализирање.



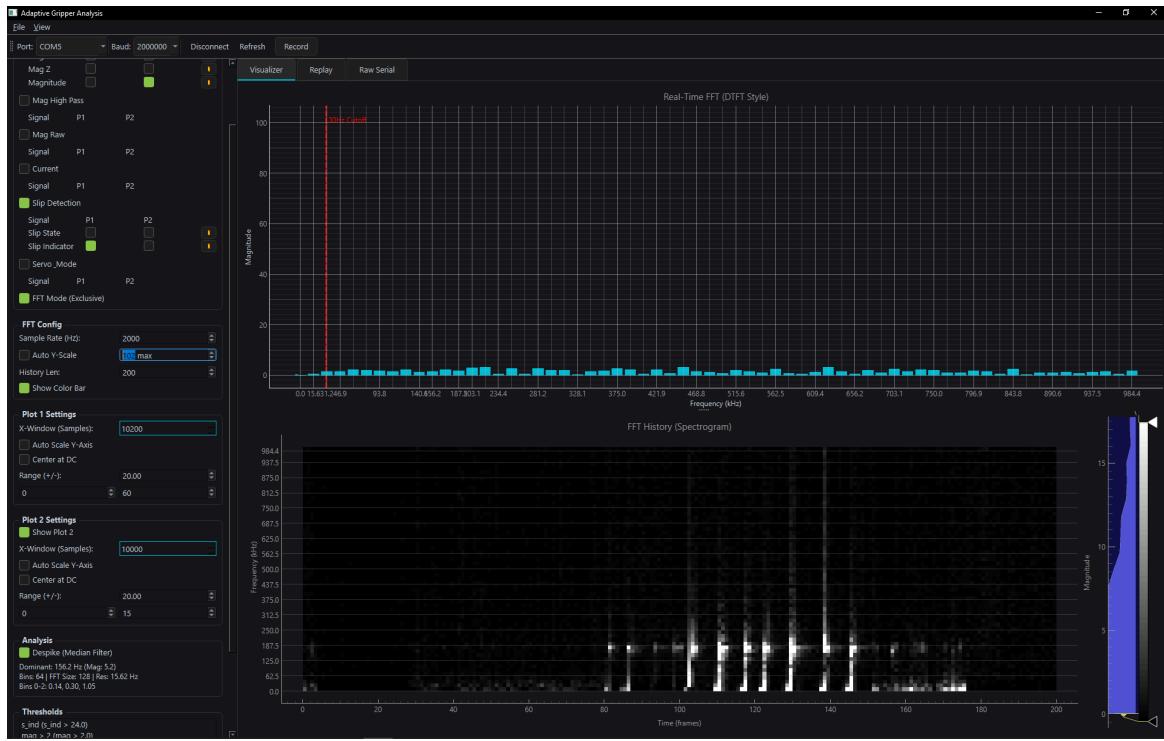
Слика 4.7

Слика 4.8 приказује терминал, користи се за дијагностику.



Слика 4.8

Слика 4.9 приказује део за анализу FFT сигнала. Горе може да се види тренутни одзив док доле може да се види хистограм са подесивим опсегом интензитета, Корисно за анализу брзих сигнална и филтрирање шума.



Слика 4.9

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ОПТИМИЗАЦИЈА И РЕЗУЛТАТИ

Након постављања теоријских основа и пројектовање хардвера, ово поглавље описује процес прелазак пројекта у функционални прототип. Услед механичких специфичности FDM штампе, посебан акценат стављен је на итеративно усклађивање механике и управљачког софтвера.

Први део поглавља приказује еволуцију сензорског модула кроз десет развојних итерација, са циљем постизања идеалан баланса између крутости и природне фреквенције. Након тога, дефинисана је методологија софтверске калибрације, којом су одређени прецизни прагови за детекцију сile и клизања, неопходни за разликовање корисног сигнала од шума мотора.

Коначно, систем је подвргнут серији тестова ради потврде робусности. Кроз експерименте са крутим, меким и геометријски неправилним објектима,

демонстрираћемо способност алгоритма да у реалном времену детектује почетно клизање и стабилизује хват.

5.1. Итеративни развој сензорског модула

Као што је дискутовано у теоријским основама, ако се природна фреквенција сензорског елемента поклапа са фреквенцијама клизања, долази ће до лажних детекција услед спољних вибрација.

Током истраживања, пројектовано је и тестирано преко 10 различитих итерација еластичног механизма, као што видимо на слици 5.1. Циљ је био пронаћи оптимум између крутости и осетљивости.



Слика 5.1

Након првог прототипа који је био од ТРУ пластике (слика 5.1, горе лево), одлучено је да је лакше управљање природном фреквенцијом и коефицијентом еластичности на комплементарном механизму израђеним од лако доступне пластике. Наредна два прототипа су тестирали концепт опруге и доказали већ раније написану чињеницу да природна еластичност зависи од крутости. Даље итерације су примениле принцип геометријске оптимизације осетљивости сензора описане у поглављу 2.6. Даље итерације су се фокусирале на оптимизацију дебљине и висине опруге, алгоритам за побољшање је описан у поглављу 3.2.2, слика 3.6.

Сви прототипи са планарном опругом могу да се сврстају у три категорије:

1. Превише крут механизам (Висока природна фреквенција > 250 Hz):

Постоје две велике предности преносна карактеристка која има појачање 1 у опсегу од интереса и избегавање природне учестаности у опсегу од интереса, постоји огромна мана. Према хуковом закону повећавањем крутости смањујемо промену дужине ако сматрамо да је сила константна.

Хуков закон:

$$F = -k * x$$

F - сила

k - коефицијент еластичности

x - промена дужине

Последица: Ова промена захтева да софтверски праг буде низак. Мана овог приступа је да ће се дешавати лажне детекције клизања.

2. Превише еластичан механизам (Ниска природна фреквенција < 40 Hz):

Предност овог механизма је да је већи померај при истој сили, у поређењу са механизмом веће крутости, омогућавајући нам веће искоришћење опсега сензора.

Мана је у томе да ће нам фреквенције од интереса бити механички филтриране, поново захтевајући да нам праг буде низак, мада ниског прага су већ наведене.

3. Оптималан дизајн (Итерација бр. 10):

Финална верзија (описана у поглављу 3) постигла је природну фреквенцију од ~180 Hz. Физички појачавајући корисни сигнал пре дигитализације. Мана овог механизма је да узрокује лажну детекцију клизања приликом екстерих поремећаја, али предност је да су микровибрације појачане. Овај проблем неће бити заступљен уколико се материјал сензорског елемента промени, као што је показано у раду са силиконским сензорским елементом [2].

5.1.1 Методологија подешавања параметара сензорског елемента

Коришћењем софтверског алата и методе импулсног одзива (детаљно описане у поглављу 3.2.2), извршена је карактеризација сваке итерације механичког дизајна.

Процес оптимизације се одвијао у следећим корацима:

- Мерење иницијалног стања:** прототипови са дебљим зидом опруге, имали су природну фреквенцију преко 250 Hz. Методом описаном у поглављу 3, утврђено је да је амплитуда корисних вибрација премала.
- Корекција геометрије:** На основу очитавања из апликације, дебљина зида опруге је смањивана за 0.2mm, минимална дебљина дозвољена процесом израде, по итерацији.
- Финална верификација:** Финална итерација је показала пик на жељених 180 Hz, чиме је потврђено да је метод подешавања описан у поглављу 3 успешно примењен за добијање оптималних параметара.

5.2. Методологија подешавања параметара (System Tuning)

Након механичке оптимизације, приступљено је софтверској калибрацији. У коду (датотека `Config.h`) дефинисани су кључни параметри чије су вредности одређене следећом методологијом.

5.2.1. Дефинисање минималне сile хватања (F_{min})

Циљ је да хваталька држи предмет најмањом могућом силом довољном за успостављање контакта, чиме се систем поставља у стање "на ивици клизања" (најтежи сценарио за детекцију).

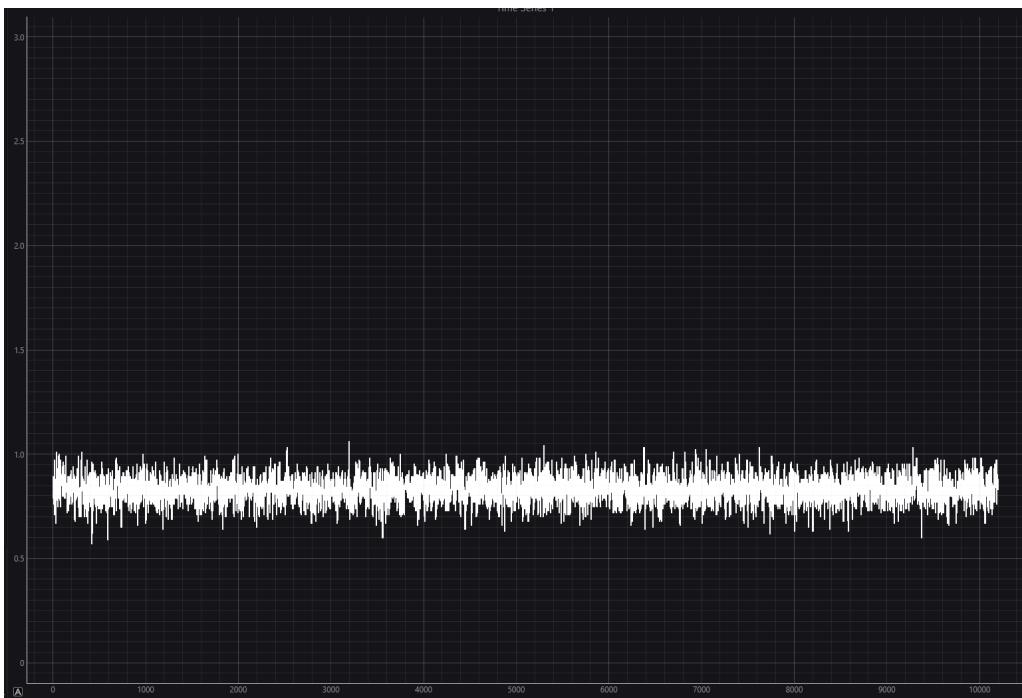
Коришћена је промена магнитуде магнетног вектора (ΔMag) као мера деформације сензора:

$$Mag = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Експериментално је утврђено да при додиру прста са објектом долази до значајне деформације која изазива промену магнитуде већу од 1.5 mT, такође шум сензора је не прелази праг 1.2 mT, слика 5.2 узимајући ова два закључка у обзир, због прага сигурности како би систем био отпорнији на шум усвојен је праг:

`GRIP_MAGNITUDE_THRESHOLD = 2.0` (релативна промена).

Логика хватања затвара хватальку све док: магнитуда поља не пређе праг 2.0 (фина детекција деформације).

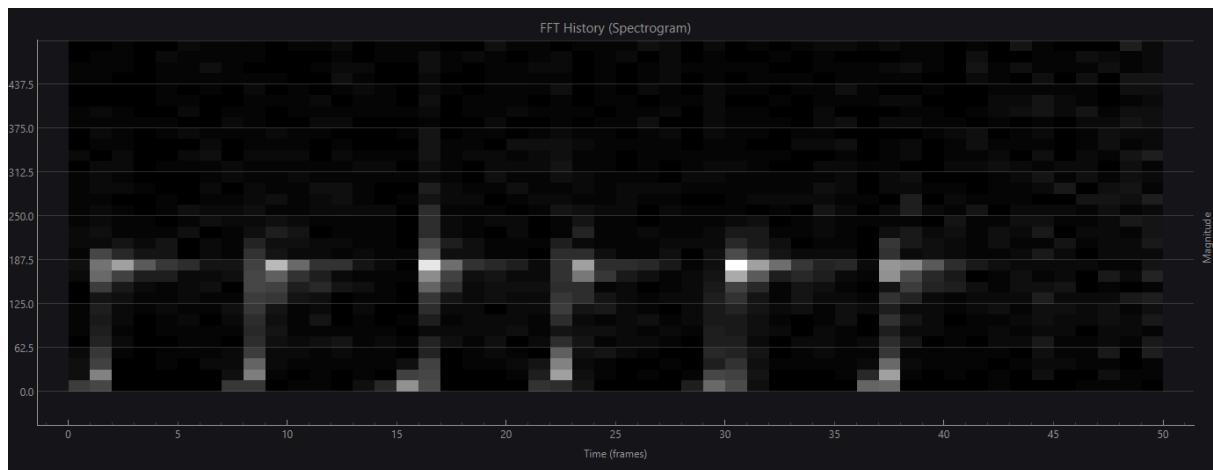


Слика 5.2

5.2.2. Одређивање опсега фреквенција од интереса за алгоритам клизања.

Из извора [2][4][5] смо закључили да клизање које нас интересује можемо да очекујемо у опсегу од 40Hz до 350Hz. Коришћењем десктоп апликације и визуализацијом резултата фуријеове трансформације у реалном времену, спроведена је спектрална анализа рада система. Симулирањем клизања и посматрањем резултата, фреквенцијски спектар може да се подели на три карактеристичне зоне:

- Зона ниских фреквенција (0 – 40 Hz):** У овом спектру се налазе ниске фреквенције, које имају назив макро-клизање, будући да се не користи прозорска функција, разлози су наведени у поглављу 4.4
- Зона корисног сигнала (40 – 120 Hz):** Ово је идентификован радни опсег сензора. У њему се издавају пикови изазвани *stick-slip* ефектом и минимално цурење фреквенција.
- Зона појачања(> 120 Hz):** Изнад ове границе, у случају изабраног сензорског елемента, детектује се природна фреквенција, која се може сматрати као шум. Будући да је однос сигнала према шуму низак, поуздана детекција у овом опсегу није могућа. Доказ овој тврђњи, поред теоријских основа у поглављу 2, могу да се уоче и у спектограму фуријеове трансформације настале побуђивањем система дираковим импулсом, на слици 5.2, на којој јасно видимо најсјајније врхове (највећи интензитет фреквенције) у близини 187.5 Hz (природна фреквенција). Са доње стране видимо око 0 Hz и његових суседних сегмената (енгл. bins) цурење спектра који високопропусни филтар првог реда није успео доволјно агресивно да филтрира.



Слика 5.2

Сходно томе, иако теоријски опсег иде до 350 Hz и постоји могућност за анализу до 1000 Hz, алгоритам је конфигурисан да посматра ужи појас:

$$f_{start} = 40\text{Hz}, f_{end} = 125\text{Hz}$$

Ова калибрација је од изузетног значаја и мора се поновити за сваку нову итерацију сензорског елемента јер промена карактеристика сензорског

елемента значајно утиче на резонантну фреквенцију и самим тим спектрални одзив.

5.2.3. Одређивање прага детекције клизања (T_{slip})

Ово је најкритичнији параметар. Алгоритам израчунава индикатор клизања као производ снаге и фреквенције најјаче компоненте у спектру:

$$S_{ind} = P_{max} \cdot f_{peak}$$

Овај приступ (енгл. Weighted Power Spectrum) даје већи значај високофреквентним вибрацијама које су карактеристичне за клизање.

Поступак одређивања прага је био да се утврди да се вредност шума не повећава док серво и корачни мотор раде.

Након тога сниман је базни шум док се предмет налази у хватачу. Разлог за овакав приступ је јер се повећани шум јавља уколико је сензорски елемент непригашен, опонашајући функционалност микрофона.

Коришћењем функционалности десктоп апликације, без потребе за репорограмирањем микроконтролера, подешаван је праг и аларм за праг како би осигурали да шум не изазива лажну детекцију клизања.

Избор прага: Да би се избегле лажне детекције током транспорта предмета, праг је постављен изнад нивоа проузрокаваним сензорским склопом са урачунатом сигурносном маргином од 20% :

SLIP_THRESHOLD = 40.0

5.3. Валидација алгоритма (Основни сценарио)

Циљ овог експеримента је верификација способности система да детектује почетно клизање (енгл. incipient slip) и стабилизује хват пре него што дође до губитка објекта. Тестирање је извршено у контролисаним лабораторијским условима коришћењем аутоматизоване платформе .

5.3.1. Поставка експеримента

За основни сценарио валидације одабрани су следећи параметри како би се симлирала детекција клизања.:

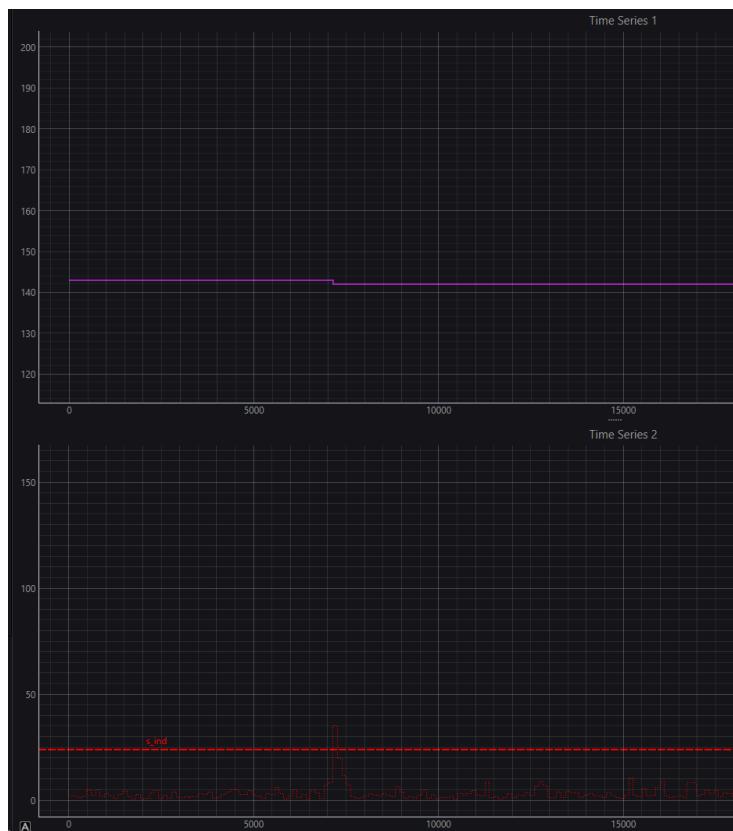
- **Тестни објекат:** Крута PETG кутија (базна маса 11.53 g) са додатним тегом од 200.17 g
- **Иницијална сила:** Хваталька је затворена до тачке контакта (критеријум магнетне магнитуде > 2), без додатног стезања. Ово осигурува да је објекат "на ивици клизања".
- **Динамика побуде:** Платформа за подизање конфигурисана је за линеарно кретање брзином од $v = 2mm/s$
- Ова брзина је довољна да изазове клизање, али довољно мала да омогући детаљну анализу прелазних појава.

5.3.2. Ток експеримента и временски одзив

На слици 5.3 приказан је временски запис кључних варијабли система током једног циклуса подизања:

Индикатор клизања: Израчунат на основу ФФТ спектра (љубичаста линија).

Управљачки сигнал : Позиција серво мотора, пропорционална сили стиска (црвена линија).



Слика 5.3

Како што видимо на слици имамо 4 фазе:

Фаза I: Стабилност у мировању, систем држи објекат минималном силом, индикатор клизања варира у опсегу 10-20 јединица, ово одговара нивоу измереног шума. Како је вредност испод прага, црвена испрекидана линија, машина стања остаје у режиму холдинг.

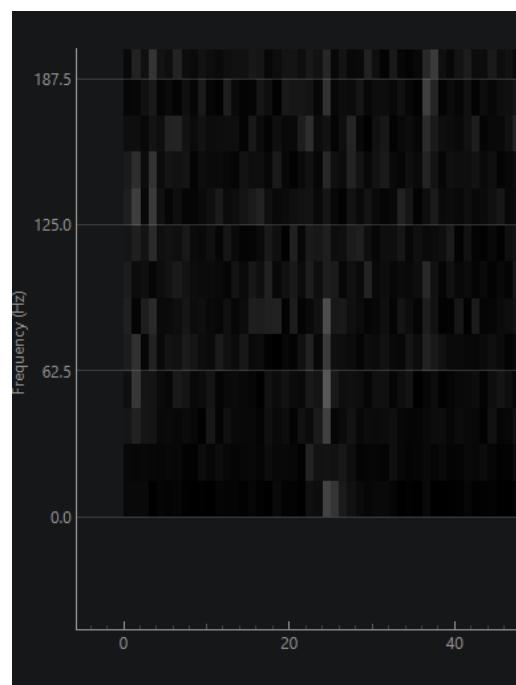
Фаза II: У тренутку када инерцијална сила и сила гравитације надмаше силу трења мировања, долази до микроскопског помеања, сензорски елемент услед цепања и састављања веза улази у осцилације

Фаза III: Систем детектује прелазак прага у тренутном scan циклусу. машина стања прелази у режим затварања хватача. У тренутном циклусу мотор добија команду за затварање. Пропорционално индикатору систем одлучује да затвара више или мање хватач.

Фаза IV: Повећавањем нормалне силе, клизање престаје. Индикатор клизања се налази на нивоу шима и систем се враћа у стање чекања реакције са новом и већом силом стиска

5.3.3. Спектрална анализа сигнала

Да би се потврдило да је детектовани догађај проузрокован клизањем, анализиран је спектрални садржај.



Слика 5.4

Као што се види на слици 5.4 пре клизања можемо да уочимо шум, током клизања се види виши интензитет на фреквенцији 0 Hz, онда од 40 Hz до 120 Hz (фреквенције клизања) као и јачи интензитет на 187.5 Hz око природне фреквенције.

5.3.4. Анализа кашњења

Кључни параметар за успех методе је брзина реакције. Уколико је кашњење превелико, објекат ће испasti пре реакције система.

Укупно кашњење система се састоји од три процеса.

1. Време акумулације бафера: За 128 узорака на 2 kHz, потребно је 64 ms ово је доминантно кашњење.
2. Време обраде: измерено је да време обраде FFT прорачуна и логика трају мање од 0.5 ms. У комуникационом протоколу постоји аларм који враћа грешку уколико циклус скенирања траје дуже. Даља мерења нису рађена будући да је трајање циклуса вишеструко мање од времена прикупљања узорака.
3. Механичко кашњење мотора, због типа комуникације (PWM са фреквенцијом од 50 Hz) реакција мотора проузроковано комуникацијом је 20 ms.

Ово нам говори да је укупно кашњење система у најбољем случају око 90 ms. Иако није познато тачно време кашњења у овом случају може да допринесе демонстрацији робусности алгорима.

5.3.4. Закључак валидације

Основни сценарио је успешно потврдио хипотезу рада, систем је показао способност да јасно разликује стање мировања од стања почетног клизања, генерише управљачки сигнал и изврши корекцију у реалном времену, спречавајући губитак објекта.

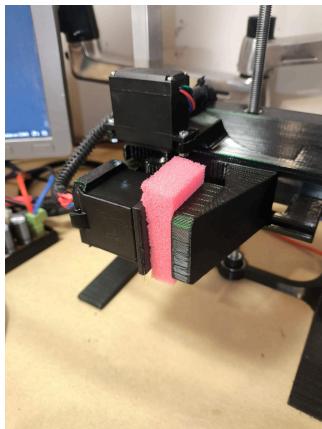
5.4. Испитивање робусности и адаптивности система

Након валидације на идеалном објекту, спроведена је серија експеримената са циљем испитивања граница перформанси система.

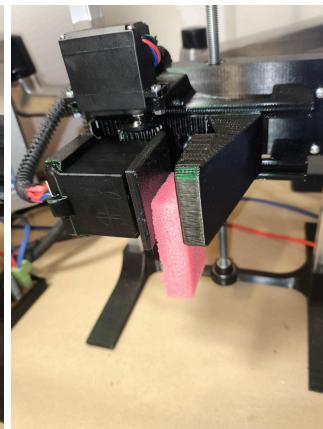
5.4.1. Тестирање са вискоеластичним материјалима (Сунђер)

Будући да је потребно да адаптивни хватач валидан и на флексибилним и меканим објектима, извршен је низ валидација и експеримената.

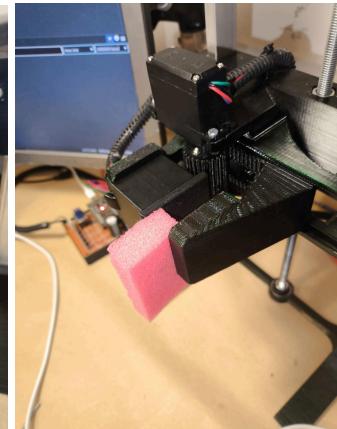
1. **Сунђер:** хватач успешно хвата и држи сунђер деформишући га за 5%. Детекција клизања сунђера је била успешна. Сунђер је хватан са пуном површином хватача, на ћошку и на крају, као што може да се види на сликама 5.6, 5.7 и 5.8



Слика 5.6

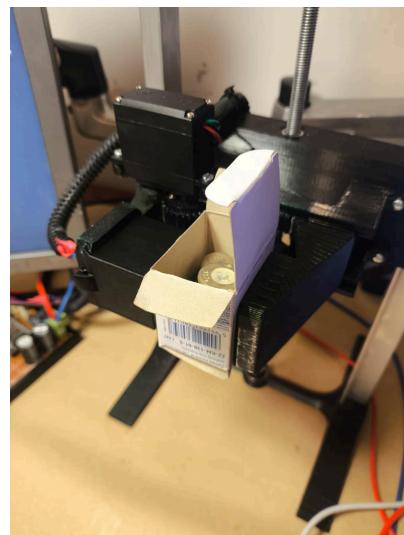


Слика 5.7



Слика 5.8

2. **Кутија:** Хватач је успешно ухватио танку картонску кутију са тежином од 155 грама без значајних деформација, овим експериментом демонстрирамо да је кутија ухваћена са оптималном силом. Као што је приказано на слици 5.9 уочава се одсуство деформација зидова кутије.



Слика 5.9

5.4.2. Тестирање са објектима различитих димензија и облика

Класичне паралелне хватальке су оптимизоване за хватање објекта са равним, паралелним површинама. При хватању објекта неправилне геометрије (вальци, призме), долази до проблема смањења контактне површине и појаве нестабилних сила.

Циљ овог експеримента је валидација способности система да се прилагоди геометрији објекта, уз очување функције детекције клизања.

1. Ваљкасти објекат: Код оваквих објеката контакт није више по површини, већ по линији. Објекат је тежине 220 грама, Као што видимо на слици 5.10 хватање је стабилно и објекат је проклизао 10мм приликом прелазног режима, из држања са полазне тачке у дизање.



Слика 5.10

6. ЗАКЉУЧАК

Овај дипломски рад је посвећен пројектовању, развоју и имплементацији новог приступа адаптивном управљању силом хватања, где је конвенционални систем заснован на тензиометрима замењен бесконтактним 3D магнетним сензором. Циљ истраживања био је развој економичног и робусног решења способног да детектује почетно клизање (енгл. *incipient slip*) анализом микро-вибрација, чиме је омогућена превенција испадања објекта уз примену минималне неопходне сile стиска.

Кроз теоријску анализу феномена трења и *stick-slip* ефекта, постављени су темељи за развој хардверског и софтверског дела система. Реализован је оригиналан сензорски елемент са еластичном везом, чија је геометрија оптимизована кроз више итерација како би се микроскопски помаци магнета превели у мерљиве промене магнетног поља, уз подешавање природне фреквенције система изнад опсега од интереса. Хардверска реализација

обухватила је и пројектовање наменске хватальке методом адитивне производње, као и израду аутоматизоване тестне платформе која је осигурала поновљивост експеримената и елиминацију субјективног фактора.

Са софтверске стране, успешно је имплементиран систем за рад у реалном времену на ESP32 платформи. Коришћењем двојезгарне архитектуре и FreeRTOS оперативног система, постигнута је детерминистичка комуникација са сензором, неопходна за прецизну спектралну анализу. Применом Брзе Фуријеове трансформације (ФФТ) и дигиталних филтара, алгоритам је успешно изоловао високофрејквентни сигнал клизања од механичког шума и нискофрејквентних промена притиска.

Експериментална валидација потврдила је функционалност и применљивост предложеног решења. Систем је демонстрирао способност да аутономно детектује тренутак губитка контакта и адекватно реагује повећањем сile, како на крутим објектима, тако и на деформабилним материјалима попут сунђера и објектима неправилне геометрије. Тиме је показано да се употребом јефтиних 3D магнетних сензора могу постићи резултати упоредиви са знатно скупљим комерцијалним решењима, уз одговарајућу обраду сигнала.

Упркос успешним резултатима, уочени су одређени недостаци који отварају простор за даља истраживања и унапређења система:

- **Оптимизација материјала сензора:** Примарни правац даљег развоја подразумева замену PETG пластике материјалима са бољим еластичним својствима и мањом хистерезом, као што је опружни челик. Ово би елиминисало ефекте пузња материјала и повећало дугорочну стабилност мерења.
- **Унапређење актуатора:** Замена постојећег серво мотора актуатором са директном контролом момента или серво мотором без механичког зазора значајно би побољшала прецизност регулације сile и скратила време одзива система.
- **Напредни управљачки алгоритми:** Уместо тренутне логике базиране на праговима и инкременталној корекцији, имплементација ПИД регулатора у затвореној петљи омогућила би финије дозирање сile и глаткију реакцију на поремећаје.

- **Машинско учење:** Сакупљени подаци о спектралним потписима различитих материјала могли би се искористити за тренирање модела машинског учења, који би поред детекције клизања омогућио и класификацију типа материјала који се хвата.
-

ЛИТЕРАТУРА

1. **Holweg, E. G. M., et al.** "Slip detection by tactile sensors: algorithms and experimental results." *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1996. (Дефинише "Catch and snap back", фреквенције око 65Hz и опсег 50-250Hz).
2. **Le Signor, Théo, et al.** "Mass-manufacturable 3D magnetic force sensor for robotic grasping and slip detection." *Sensors* 23.6 (2023): 3031. (Дискутује incipient slip и partial slip код магнетних сензора).
3. **Howe, Robert D., and Mark R. Cutkosky.** "Sensing skin acceleration for slip and texture perception." *Proceedings. 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1989. (Основни извор за опсег 50-250Hz и људску перцепцију).
4. **Xydas, N., and I. Kao.** "Modeling of contact mechanics and friction limit surfaces for soft fingers in robotics, with experimental results." *The International Journal of Robotics Research* 18.9 (1999): 941-950. (Извор за геометрију контакта и ивично клизање код меких прстију).
5. **Fernández, Raúl, et al.** "Micro-vibration-based slip detection in tactile force sensors." *Sensors* 14.1 (2014): 709-730. (Извор за FFT анализу вибрација и stick-slip феномене код флексибилних сензора).
6. **Johansson, R. S., and G. Westling.** "Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip." *Experimental Brain Research* 66.1 (1987): 141-154. (Физиолошки основ за микровибрације).
7. **Arzi, J.** "Tutorial on a very simple yet useful filter: the first order IIR filter." *TSD Conseil*, 2016. [Online]. Available: <http://www.tsdconseil.fr/tutos/index-en.html>.
8. **Ma, Raymond R., and Aaron M. Dollar.** "Yale OpenHand Project: Optimizing Open-Source Hand Designs for Ease of Fabrication and Adoption." IEEE

Robotics & Automation Magazine 24.1 (2017): 32-40. (Представља Yale OpenHand пројекат – open-source библиотеку дизајна за комплементарне роботских хватача које су јефтине и лаке за израду)

9. **Infineon Technologies.** "3D Magnetic Sensor: How to Make a Magnetic Design for Joysticks." Application Note Rev. 1.0. Infineon Technologies AG, 2016. (Техничко упутство за дизајн џојстикса коришћењем 3D Холових сензора, са анализом геометрије магнета и прорачунима сферних координата).
10. **AnnaW21.** "Robot-manipulator." GitHub, 2021. [Online]. Available: <https://github.com/AnnaW21/Robot-manipulator>. (Репозиторијум који садржи 3D моделе и програмски код за роботски манипулатор, чији је механички дизајн хватальке коришћен у овом раду).
11. **Prusa Research.** "RepRap Calculator - Steps per millimeter." *Prusa3D Blog*. [Online]. Available: https://blog.prusa3d.com/calculator_3416/. (Онлајн алат за прорачун резолуције кретања [steps/mm] за системе са навојним вretenом, коришћен за параметризације драјвера корачног мотора).
12. **Grković, D.** "Adaptive Gripper with Micro-Vibration Based Slip Detection - Project Repository". GitHub, 2025. Available:: <https://github.com/Grkila/Adaptive-Gripper-with-Micro-Vibration-Based-Slip-Detection>