



**УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“ – БИТОЛА
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ – БИТОЛА**



Студиска програма: Машинство

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН МОДЕЛ ЗА ИСПИТУВАЊЕ НА ТОЧНОСТА НА
ОПТИЧКИ РОТАЦИОНЕН ЕНКОДЕР И ПРОЦЕНКА НА ГРЕШКАТА НА
МЕРЕЊЕ ПОД ДЕЈСТВО НА ВИБРАЦИИ**

докторски проект

**Кандидат:
Виолета Крчева
Број на досие: 40**

**Професор:
Проф. д-р Стојанче Нусев**

Битола, февруари 2025

СОДРЖИНА

1. Вовед.....	4
1.1. Оптички ротационен енкодер.....	4
2. Преглед на литературата.....	7
3. Методи и материјали.....	10
3.1. Дизајн на експериментот.....	10
3.1.1. Технички спецификации на составните елементи на експериментот.....	10
3.1.2. Структура на експериментот.....	14
3.2. Реализација на експериментот.....	15
3.2.1. Фази на реализација на експериментот.....	15
3.2.2. Начин на реализација на експериментот.....	16
4. Анализа, резултати и дискусија.....	18
4.1. Резултати и дискусија.....	19
5. Заклучок.....	24
Користена литература.....	25

Апстракт

Во современото машинство, прецизното мерење и следење на позицијата се од суштинско значење за обезбедување на висококвалитетна обработка на работните предмети произведени со компјутерски управуваните (CNC) металорезачки машини. Оптичките ротациони енкодери претставуваат клучни уреди за контрола на положбата и брзината на подвижните елементи на машините, но нивната точност може да биде нарушена од влијанието на механичките вибрации. Во таа насока, преку ова истражување се врши систематска проценка на точноста на мерењето кај овие енкодери и се анализираат грешките кои се јавуваат за време на нивното функционирање.

Применет е експериментален пристап преку кој се тестираат три комерцијални оптички ротациони енкодери под различни нивоа на вибрации. Тестирањата се реализираат во контролирани лабораториски услови при што се применуваат вибрации со различни фреквенции. Податоците се анализирани преку споредба со референтни мерења со цел да се утврдат грешките во мерењата добиени од енкодерите и да се процени сензитивноста на енкодерите на динамички услови на работа.

Според добиените резултати, забележани се значајни варијации во прецизноста на мерењето во зависност од типот на енкодерот, а тоа ги потврдува разликите во нивните перформанси. Дополнително, анализата потврдува дека грешките во мерењата на енкодерите (кои се јавуваат за време на функционирањето на CNC металорезачките машини) не произлегуваат исклучиво на недостатоците во механичката структура на машините, како што традиционално се смета, туку и од карактеристиките и ограничувањата на самите сензори. Овие резултати овозможуваат подобро разбирање на однесувањето на оптичките ротациони енкодери во индустриски услови и ја потенцираат важноста на релевантната проценка на нивната точност и стабилност во различни динамички контексти.

Клучни зборови: CNC металорезачки машини, екперимент, точност, прецизност.

1. Вовед

Подемот на дигиталната ера и информатичката технологија овозможува прецизна контрола на мерењата и следење на позицијата во различни инженерски и индустриски апликации. Во современото машинство, особено кај компјутерски управуваните (CNC) металорезачки машини прецизноста е од клучно значење за обезбедување висококвалитетна обработка и зголемена продуктивност. Во овој контекст, оптичките енкодери, независно дали се линеарни или ротациони, имаат централна улога во прецизното управување и следење на движењата на подвижните елементи на овие машини.

Кај CNC машините, оптичките енкодери се користат за контрола на положбата и брзината на подвижните оски, како и за следење на ротацијата на главните вретена. Тие обезбедуваат висок степен на точност и повторливост што е од суштинско значење во современите процеси на обработка со режење. Поради нивната компатибилност за обезбедување на точни податоци за позиционирањето, овие сензори овозможуваат оптимизација на производните процеси, намалување на трошоците за материјали и минимизација на отпадот кој се создава во процесите на обработка со режење.

Точноста и сигурноста на оптичките енкодери директно влијаат врз крајниот квалитет на работните предмети. Високопрецизните мерења што ги обезбедуваат овие уреди овозможуваат CNC машините да работат со минимални толеранции, а тоа е критично при изработка на производи за автомобилската, аеронаутичката и медицинската индустрија. Со цел да се валидира нивната ефикасност во реални производствени услови, неопходно е темелно да се анализираат стабилноста во динамични услови на функционирање и отпорноста на надворешните фактори како што се механичките вибрации.

Механичките вибрации претставуваат значаен предизвик во процесите на обработка со режење кои се реализираат на современите CNC машини бидејќи можат да предизвикаат грешки во мерењата и неправилности во обработката. Токму затоа, во ова истражување е поставен експериментален модел за испитување на точноста на оптичките ротациони енкодери и проценка на грешката на мерење под дејство на вибрации. Тестирани се три комерцијални оптички ротациони енкодери под различни нивоа на вибрации. Тестирањата се изведуваат во контролирани услови, со симулација на вибрации со различни фреквенции, а резултатите се споредуваат со референтни мерења за да се утврди стабилноста на енкодерите.

Разбирањето на овие аспекти е од суштинско значење за подобрување на стабилноста и сигурноста на CNC системите во кои се имплементирани оптичките ротациони енкодери. Дополнително, деталната анализа на добиените резултати придонесува за подлабоко согледување на влијанието на вибрациите врз точноста на мерењата што овозможува подобро предвидување на нивното однесување во реални индустриски услови. Овие сознанија се од особена важност за понатамошни истражувања во областа на CNC машините, автоматизацијата и модерните производни технологии.

1.1. Оптички ротационен енкодер

Оптичкиот ротационен енкодер (Сл. 1) претставува високо-прецизен уред дизајниран за мерење на аголна позиција, брзина или правец на ротација на механички компоненти. Неговата примарна функција се состои во трансформација на механичките

движења во електрични сигнали кои понатаму се обработуваат за следење и контрола на позицијата и брзината на ротација. Ваквата способност го истакнува оптичкиот ротационен енкодер како клучен дел од современите автоматизирани, роботизирани и компјутеризирани системи. Особено е значаен во компјутерски управуваните (CNC) металорезачки машини каде што високата прецизност е неопходна за извршување на сложени производни операции.



Слика 1: Оптички ротационен енкодер [12]

Figure 1: Optical rotary encoder [12]

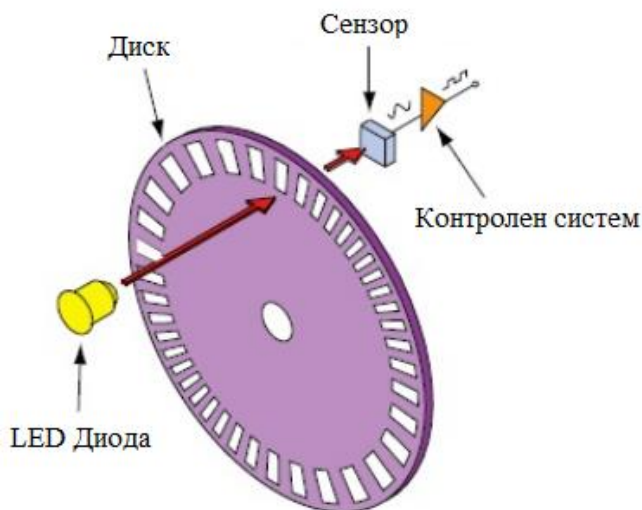
На пример, кај CNC металорезачките машини оптичкиот ротационен енкодер се користи за следење и контрола на ротацијата на главното работно вретено, како механичка компонента која има мошне значајна улога при обработка на металите со режење. Главното работно вретено го пренесува вртежниот момент на работниот предмет (или на алатите за режење во зависност од типот на CNC металорезачката машина), а неговата брзина и точна позиција директно влијаат на квалитетот на обработката. Во тој систем оптичкиот ротационен енкодер ја обезбедува потребната повратна врска за системот за контрола со што се осигурува дека главното работно вретено ротира со прецизно дефинираната брзина и дека обработката се извршува во согласност со зададените параметри.

Основниот принцип на работа на оптичкиот ротационен енкодер е базиран на користење на светлосен зрак кој се прекинува или пропушта низ диск со решеткаста структура (Сл. 2). Дискот кој механички е поврзан со ротационата оска на машината е обележан со транспарентни и нетранспарентни зони или со рефлективни и нерелективни површини. При ротација на дискот, светлосниот зрак, емитиран од LED диода се прекинува или пропушта низ зоните. Фотодетекторите ги регистрираат овие промени како серии на импулси кои потоа се интерпретираат од страна на контролниот систем. На овој начин енкодерот генерира податоци за аголната позиција, правецот и брзината на ротација.

Покрај основниот принцип, оптичките ротациони енкодери често користат повеќе светлосни зраци и сложени дизајни на дисковите за постигнување на повисока резолуција. Резолуцијата е директно поврзана со бројот на сегменти на дискот и може да достигне илјадници импулси по ротација овозможувајќи мерење на аголните позиции со извонредна точност. Оваа карактеристика ги прави оптичките ротациони енкодери идеални за апликации во CNC машините каде што минималните девијации можат значително да влијаат врз квалитетот на финалниот производ.

Интеграцијата на оптичките ротациони енкодери во CNC системите се реализира преку дигитални интерфејси кои овозможуваат брз и ефикасен пренос на податоци.

Податоците добиени од енкодерот се користат за динамичка регулација на брзината и позицијата на главното работно вретено. Овој аспект не само што овозможува одржување на константна брзина при различни оптоварувања, туку обезбедува и синхронизација на ротацијата со движењето на оските на машината. На пример, при обработка на сложени геометрии или спирални траектории кај CNC струговите ротацијата на главното работно вретено мора да биде строго координирана со линеарното движење на алатот за режење. Прецизноста на оптичкиот енкодер го овозможува ова ниво на координација, а со тоа значително се подобруваат и ефикасноста и квалитетот на обработката.



Слика 2: Принцип на работа на оптички ротационен енкодер [14]
 Figure 2: Principle of operation of an optical rotary encoder [14]

Затоа, карактеристиките како висока резолуција, чувствителност и брз одговор ги издвојуваат оптичките ротациони енкодери како незаменливи и интегрални компоненти во CNC металорезачките машини. Нивната способност за брзо и прецизно реагирање на промените во ротацијата е од суштинско значење за динамични апликации каде што брзината и насоката на ротација често се менуваат. Во овој контекст, стабилноста и сигурноста на овие уреди претставуваат критичен предизвик за нивното правилно функционирање во индустриски услови, особено поради надворешните фактори како што се вибрациите, температурните варијации и присуството на честички од метал или масло.

Со цел да се обезбеди висока прецизност, стабилност и прилагодливост во различни оперативни услови, основната цел на експериментот, кој е предмет на оваа проектна задача, е детално да се испита точноста на комерцијален оптички ротационен енкодер. Во контекст на ова, преку експериментот може да се оцени точноста на енкодерот во услови на динамички фактори, како што се вибрациите, кои претставуваат значителен предизвик за современите мерни технологии.

Во рамки на ова истражување, внимателно е изграден експериментален модел кој ги опфаќа сите релевантни аспекти на дизајнот и изведбата. Моделот вклучува детално опишување на составните елементи, нивните технички карактеристики и функционални својства. Притоа е презентираан начинот на кој овие компоненти се меѓусебно поврзани и интегрирани во експерименталниот систем, како и методологијата што го води процесот на реализација на експериментот.

2. Преглед на литературата

Анализата на перформансите и проценката на грешките во мерењата на оптичките енкодери претставуваат суштински аспект на истражувањата во области каде што точноста и прецизноста имаат клучно значење. Поради нивната способност да обезбедат високо прецизни и сигурни информации за аголна или линеарна позиција, оптичките енкодери се сметаат за примарни компоненти во системите за мерење и контрола на позиција и брзина. Нивната широка примена во индустриски, научни и технолошки контексти ја нагласува нивната значајност како интегрални елементи на современите автоматизирани системи.

Особено истакната е нивната улога во современите CNC металорезачки машини, каде се користат за мерење на релативно поместување и прецизно позиционирање на подвижните елементи (Алехандре и Артеc – *Alejandre & Artés, 2004a*). Овие сензори овозможуваат автоматска корекција и минимизација на грешките во процесот на обработка, а тоа е неопходно за производство на компоненти со сложени геометрии и високи стандарди за квалитет.

Нивните својства за прецизност и сигурност овозможуваат примена и во многу други области, а тоа ја потенцира важноста на перформансите на оптичките енкодери како критични аспекти на нивната функционалност. Истражувањата на оваа тематика ја нагласуваат потребата од анализа на факторите кои влијаат на точноста. Според Алехандре и Артеc (*Alejandre & Artés, 2007*) најголемо влијание на перформансите на оптичките енкодери имаат деформациите, температурните промени и вибрациите во системите во кои се интегрирани.

Од аспект на деформациите и температурните промени, Делбресин и сор. (*Delbressine et al., 2006*) поставуваат метод за мерење и моделирање на термички индуцирани деформации кои предизвикуваат позиционирачки грешки кај металорезачките машини со повеќе оски. Во ова истражување се предложува модел за редукација на грешките во мерењето на енкодерот преку анализа на температурната дистрибуција и кинематиката на крутото тело.

Дополнително, Алехандре и Артеc (*Alejandre & Artés, 2004b*) истражуваат како термоеластичните деформации (предизвикани од различни термички извори) и промените на амбиенталната температура влијаат на точноста на оптичките линеарни енкодери. Тие разработуваат и експериментален модел за геометриска и термичка компензација на грешките кај оптичките линеарни енкодери во реално време, кој, со примена на FPGA платформата овозможува значително намалување на грешките до 98%. Во своето истражување Ким и сор. (*Kim et al., 2004*) испитуваат како термичките деформации предизвикани од генерираната топлина во системите со линеарни електромотори влијаат врз точноста на енкодерите и структурата на металорезачките машини. Истражувањето ги идентификува главните извори на термичките грешки и резултантните деформации т.е. термичкото проширување, поместувањето на линеарната скала и деформацијата на машинските елементи.

Иако значително внимание е посветено на ефектите од деформациите и температурните промени, релативно малку истражувања се фокусираат на анализа на однесувањето и перформансите на енкодерите под влијание на вибрации. Во оваа контекстуална рамка која претставува недоволно истражена научна област, Алехандре и Артеc (*Alejandre & Artés, 2004a*) спровеле истражување во кое, покрај анализата на грешките во мерењата на оптичките линеарни енкодери предизвикани од деформации и

температурни промени, го истражуваат и влијанието на вибрациите врз нивната функционалност. Истражувачкиот пристап е насочен кон идентификација, класификација и квантитативна проценка на вибрациите со цел да се обезбеди подобро разбирање на ограничувањата и можностите поврзани со употребата на овие компоненти во различни технички и индустриски контексти.

Сегментот на анализа на грешките во мерењата на енкодерите кои се јавуваат за време на функционирањето на CNC металорезачките машини, особено во контекст на прецизноста во синхронизирањето на движењата на подвижните елементи и нивното точно позиционирање, традиционално се фокусира на структурата на самите машини. Овој пристап опфаќа проучување на недостатоците во конструкцијата на машината, слабостите на нејзиниот механички дизајн, ефектите од амортизацијата, како и влијанието на зјајот (празнините) во составните механички елементи, преносните механизми и останатите составни компоненти.

Александра и Артес (Alejandro & Artés, 2007) во своето истражување ја потврдуваат тезата дека енкодерите се сметаат за уреди со висок степен на прецизност, дури и при изложеност на вибрации, а евентуалните неточности во мерењето најчесто се припишуваат на CNC металорезачките машини, на нивните составни елементи, запчестите и ремените преносници и други механички фактори. Меѓутоа, тие нагласуваат дека оваа претпоставка не е секогаш оправдана и истакнуваат потреба од развој на метод за проценка на точноста и перформансите на оптичките енкодери во услови на вибрации со цел да се обезбеди нивна оптимална функционалност во различни оперативни услови. Во оваа насока, тие презентираат иновативен метод за евалуација на перформансите на оптичките енкодери под влијание на вибрации. Овој метод се разликува од класичните пристапи бидејќи не се фокусира само на идентификување на фреквенциите на резонанца и забрзување на сигналот, туку се воведува и концепт на „грешка на мерење за даден фреквентен опсег“. Ваквиот пристап овозможува подобра проценка на перформансите и илустрира дека во реални работни услови забрзувањето има помала релевантност во споредба со генерираната грешка на мерење на оптичките енкодери под влијание на вибрации. Методот претставува значаен напредок во оваа област на истражување бидејќи зема предвид два клучни аспекта: прво, големината на грешката на мерење на енкодерот при резонанца и второ, големината на грешката на мерење на енкодерот во фреквентни опсези без резонанца. Успешната имплементација на овој метод зависи од неколку суштински фактори како што се изборот на тип на сигнал, анализата на нелинеарните промени во сигналот, спецификацијата на фреквенцијата на семплирање, како и составот на сигналот. Овие аспекти се од фундаментално значење за точната проценка на перформансите на оптичките енкодери и нивната функционалност во различни услови на работа.

Во истражувањето на Лопес и сор. (López et al., 2011) е направена детална анализа на грешки во мерења на оптички линеарни енкодери под влијание на вибрации при различни услови на монтирање. Тестирани се три комерцијални енкодери од различни производители со цел да се добијат општи и репрезентативни резултати. Предложената експерименталната методологија е насочена кон оценување на загубата на точност под дејство на вибрации и утврдување на нејзината зависност од различните услови на монтирање. Резултатите се претставени преку дијаграми кои ги прикажуваат грешките во мерењата на оптичките линеарни енкодери во зависност од фреквенцијата на вибрациите. Преку спроведената анализа е утврдено дека грешките во мерењето на енкодерите

предизвикани од вибрации произлегуваат од релативното движење помеѓу двете решетки што го создаваат интерференцискиот образец – основниот механизам на системот за мерење. Резултатите од истражувањето покажале дека динамичките карактеристики на оптичките линеарни енкодери значително варираат во зависност од насоката на вибрациите. Утврдено е дека грешките на одредени позиции можат да ги надминат номиналните вредности за точност, дури и при нивоа на забрзување за кои не се препорачува употреба на дополнителни заштитни елементи против вибрации.

Сумирајќи ги досегашните истражувања се потврдува значајната улога на оптичките енкодери како клучни компоненти во современите системи за мерење, позиционирање и контрола. Нивната функција се истакнува како клучна во широк спектар на индустриски и технички апликации при што високата прецизност и доверливоста претставуваат неопходни предуслови за оптимално функционирање на комплексните системи. Истражувањата конзистентно укажуваат дека перформансите на оптичките енкодери, како и нивната способност за постигнување на висок степен на точност се чувствителни на влијанието на надворешните фактори, особено на вибрациите, кои претставуваат еден од најчестите предизвици во динамички работни услови.

Сепак, прегледот на достапната литература открива значителна празнина во однос на систематската анализа на перформансите на оптичките ротациони енкодери под влијание на вибрациите. Иако нивната примена е се поширока, особено во области како што се CNC металорезачки машини, прецизните производствени процеси, автоматизацијата и роботиката, нивната осетливост на вибрации е недоволно истражена. Овој факт ја истакнува потребата за развој на нови методологии за анализа на грешките и тестирање на перформансите на оптичките ротациони енкодери во динамички услови на работа. Во тој контекст, посебно важно е да се обезбеди сеопфатна и систематска анализа која ќе ги опфати не само квантитативните аспекти на нивната точност и повторливост, туку и квалитативното разбирање на нивното однесување во динамички сценарија.

Ваквите празнини во научната литература ја поставуваат основата за истражувањето презентирани во овој докторски проект. Главниот фокус на истражувањето е насочен кон детално испитување на влијанието на вибрациите врз перформансите на оптичките ротациони енкодери со акцент на нивната стабилност и точност во динамички услови на работа. Од аспект на брзиот технолошки напредок и сè пошироката примена на овие уреди во различни индустриски апликации, тенденцијата за нивно оптимално функционирање се наметнува како клучен предизвик и приоритетна цел. Затоа истражувањето ќе се фокусира на идентификација на критичните фактори кои придонесуваат за грешки и нестабилност, како и предлог на стратегии за нивно минимизирање.

Целта на ова истражување е да се развие систематски пристап за тестирање и евалуација на перформансите на оптичките ротациони енкодери кој ќе ги адресира механичките оштетувања, губењето на сигналот и неточностите при мерењето што произлегуваат од влијанието на вибрациите. Преку развој на иновативни методологии за тестирање и анализа, истражувањето има за цел да придонесе за долгорочно подобрување на стабилноста и прецизноста на оптичките ротациони енкодери овозможувајќи им да функционираат сигурно и ефикасно како во статички, така и во динамички средини. На тој начин, овој докторски проект има потенцијал да оствари значаен придонес за подобрување и унапредување на современите системи за мерење и контрола.

3. Методи и материјали

Истражувањето во рамки на овој докторски проект се однесува на поставување и имплементација на модел на лабораториски експеримент конципиран за испитување на точноста во работењето на оптичките ротациони енкодери и проценка на грешките на нивните мерења во услови на вибрации. Во контекст на ова истражување се посветува внимание на критичните аспекти на прецизноста и стабилноста на мерењата на три комерцијални оптички ротациони енкодери со цел да се утврдат потенцијалните грешки и нарушувањата на перформансите во нивното функционирање при изложеност на вибрации.

3.1. Дизајн на експериментот

За успешно и прецизно спроведување на експериментот од суштинско значење е неговото внимателно и детално планирање. Прецизното дефинирање на методологијата, како и оптималното поставување на експерименталниот концепт претставуваат основни предуслови за обезбедување валидни и релевантни резултати. Во оваа насока експериментот е дизајниран со цел да се направи квантитативно-квалитативно истражување преку кое се симулираат реални работни услови на енкодерите во динамички услови на функционирање.

Во процесот на дизајнирањето на експериментот детално се испланирани сите негови составни делови, а нивната интеграција е систематски организирана. Последователно, експериментот е концептуализиран како интегриран систем кој ги вклучува следниве компоненти: оптички ротационен енкодер, машина за генерирање вибрации, електромотор, контролер за електромотор, USB мултифункционален I/O уред, еластична спојница, две крути спојници и лаптоп.

3.1.1. Технички спецификации на составните елементи на експериментот

За реализација на експериментот, кој се изведува три пати, користени се три комерцијални **оптички линеарни енкодери** со идентичен модел. Разликата помеѓу енкодерите се состои во нивната резолуција каде првиот енкодер има резолуција од 100 [ppr], вториот од 360 [ppr], а третиот од 1000 [ppr].

Избраниот модел на оптички линеарни енкодери (Сл. 3) нуди можност за детекција со резолуции од 100, 360 и 1000 [ppr], а тоа го прави особено погоден за апликации каде што е потребна умерена до висока прецизност. Уредот функционира со влезен напон кој варира од 5 до 24 [V], а тоа придонесува за флексибилност за интеграција во различни електрични системи. Покрај тоа, енкодерот е базиран на NPN логика која е вообичаена за многу индустриски контролни системи.



Слика 3: Комерцијален оптички ротационен енкодер [9]
Figure 3: Commercial optical rotary encoder [9]

Од механички аспект, уредот има дијаметар на осовината од 6 [mm], додека неговиот надворешен дијаметар изнесува 38 [mm]. Овие димензии го прават компактен и лесен за инсталација овозможувајќи лесно монтирање на различни ротирачки елементи.

Максималната механичка брзина што овој енкодер може да ја поддржи изнесува 5000 [rpm] што значи дека може да функционира сигурно и стабилно дури и при високи брзини на ротација. Дополнително, неговата оперативна фреквенција достигнува до 30 [kHz] и тоа е показател за неговата способност да генерира сигнали со висока брзина и фреквенција.

Машината за генерирање вибрации, модел L1024M-PA115, е произведена од компанијата SENTEK EUROPE S.R.L. (Сл. 4). Оваа машина претставува високо квалитетен и специјализиран систем наменет за тестирање на мали електронски компоненти, конектори, рачни уреди и мали механички склопови. Системот се карактеризира со воздушно ладење и овозможува континуирано поместување до 51 [mm]. Работниот фреквентен опсег се движи од 5 [Hz] до 3500 [Hz], а максималното статичко оптоварување изнесува 200 [kg].



Слика 4: Машина за генерирање вибрации [7]

Figure 4: Vibration Generating Machine [7]

Системот овозможува различни опции за прилагодување вклучувајќи специјализирани шаблони и навојни отвори на основата, плочи за лизгање со различни димензии и конфигурации, како и изолациски елементи кои овозможуваат елиминација на потребата од изолациска платформа. Дополнително, достапни се термички бариери за изведување тестирања во комори за симулација на различни средини, како и далечински панели за управување кои овозможуваат поголема флексибилност во работењето.

Перформансите на системот вклучуваат сила со синусни осцилации до 9810 [N], рандом сила со интензитет до 9810 [N] и сила со ударно дејство со интензитет до 19620 [N]. Максималната брзина на осцилирање изнесува 2 [m/s], додека максималното забрзување достигнува 980 [m/s²].

Основата има дијаметар од 240 [mm] и ефективна маса од 10 [kg]. Конструкцијата овозможува максимално статичко оптоварување до 200 [kg], со природна фреквенција на оската за потисок под 5 [Hz]. Компактниот дизајн на машината ја прави лесна за интеграција, со вкупна тежина од 1150 [kg].

Засилувачот PA115 е специјално проектиран со три модули и обезбедува номинална излезна моќност од 15 [kVA]. Системот функционира со напон од 90 [V] и струја од 140 [A] при што се карактеризира со висока енергетска ефикасност.

Целокупниот дизајн на системот е наменет да обезбеди висока издржливост, стабилност и прецизност при изведување на експерименти кои вклучуваат влијание на вибрации.

Електромоторот ClearPath-SCSK (Сл. 5) претставува напредно и иновативно решение за прецизна серво контрола на позицијата и брзината, овозможено преку софтверски API интерфејс. Овој интерфејс е специјално развиен за програмски јазици како C++ на платформите Windows и Linux, како и за .NET јазици вклучувајќи C# на Windows. Дополнително, електромоторот поддржува управување преку класични „чекор и насока“ команди или преку квадратни A/B сигнални команди генерирани од надворешни контролери за движење. Со користење на софтверскиот API корисниците можат да конфигурираат различни параметри, како што се ограничувањата на вртежниот момент и да следат статусни информации вклучувајќи ја и позицијата на енкодерот.



Слика 5: Електромотор [10]

Figure 5: Electric motor [10]

Моделот ClearPath-SCSK се карактеризира со врвни перформанси кои вклучуваат максимален вртежен момент од 0,8 [Nm] и континуиран вртежен момент од 0,2 [Nm]. Овие параметри овозможуваат стабилна работа при различни оптоварувања. Максималната брзина на моторот изнесува 4000 [rpm], додека неговата максимална моќност достигнува 100 [W], а континуираната моќност изнесува 66 [W]. Овие карактеристики го издвојуваат електромоторот како идеален избор за апликации кои бараат висока прецизност во контролата на позицијата и брзината, оптимизирани перформанси и енергетска ефикасност.

Контролерот за електромотор (Сл. 6) е произведен од TEKNIC и има модел Clear Core CLCR-4-13. Овој контролер овозможува прецизна контрола и управување со електромоторот, како и безбедност, флексибилност и стабилност на системот. Контролерот е дизајниран за управување со максимум четири различни типови на електромотори со високи брзини користејќи го методот „step & direction“ за прецизно движење.

Системот располага со 13 влезно-излезни (I/O) точки кои можат да се конфигурираат преку софтвер што овозможува значителна адаптивност за различни апликации. Во неговата основа се наоѓа моќен 32-битен процесор ARM Cortex-M4F кој работи на фреквенција од 120 [MHz] и е опремен со 512 [kB] FLASH меморија и 192 [kB] RAM. Процесорот поддржува инструкции за дигитална обработка на сигнали (DSP) и флуидна аритметика, а тоа го прави погоден за обработка на комплексни задачи.



Слика 6: Контролер за електромотор [11]
Figure 6: Electric motor controller [11]

USB мултифункционалниот I/O уред, модел USB-6363 (Сл. 7), произведен од компанијата NI во рамките на групацијата EMERSON претставува софистицирано технолошко решение кое нуди висока резолуција и прецизност. Овој уред е дизајниран за да ги исполни барањата на модерните технички и научни апликации со широк спектар на аналогни, дигитални и времески функции.

Основната функционалност на уредот вклучува 32 аналогни влезни канали со резолуција од 16 бита. Овие влезови можат да се користат како едноканални или како 16 диференцијални канали. Уредот обезбедува максимална стапка на примероци од 2 [MS/s] за единечен канал, додека во мултиканален режим агрегатната стапка е 1 [MS/s]. Аналогните влезови поддржуваат различни напонски опсези, како ± 0.1 [V], ± 0.2 [V], ± 0.5 [V], ± 1 [V], ± 2 [V], ± 5 [V] и ± 10 [V] со максимален работен напон од ± 11 [V] во однос на заедничката референтна точка. Прецизноста на мерењата е обезбедена преку апсолутната точност на аналогниот влез од 1660 [μ V] и висок сооднос на одбивање на заеднички мод (CMRR) од 100 [dB] за фреквенции до 60 [Hz].



Слика 7: USB мултифункционален I/O уред [13]
Figure 7: USB multifunctional I/O device [13]

Еластичната спојница (Сл. 8а) претставува техничко решение за ефикасен пренос на вртежниот момент од електромоторот до оптичкиот ротационен енкодер. Со должина од 30 [cm], оваа спојница функционира како поврзувачки елемент кој има за задача да апсорбира и да компензира потенцијални осцилации, минимални непорамнувања на осовините, како и да ги ублажува динамичките сили што можат да се појават за време на преносот на вртежниот момент. Способноста на еластичната спојница да издржи вртежен момент до 226 [Nm] ја прави погодна за примена во широк спектар на индустриски и технолошки апликации притоа обезбедувајќи значителна стабилност и издржливост на интеграционите системи.



Слика 8: а) Еластична спојница [8], б) Крута спојница
 Figure 8: а) Flexible screwdriver extension [8], б) Rigid coupling

Крутите спојници (Сл. 8б) како составни елементи во системот овозможуваат сигурна и стабилна врска помеѓу еластичната спојница и електромоторот (од една страна) со оптичкиот ротационен енкодер (од друга страна). Овие спојници, изработени со 3D-принтирање обезбедуваат прецизен пренос на вртежниот момент и енергијата од електромоторот кон оптичкиот ротационен енкодер преку еластичната спојница. Ваквата стабилност е од суштинско значење за функционирањето на системот бидејќи секое непосакувано поместување или осцилација може сериозно да влијае врз прецизноста на ротацијата и контролните параметри.

Покрај тоа што овозможуваат ефикасен пренос на вртежниот момент и енергијата, крутите спојници имаат значајна улога и во стабилизирањето на целокупната работа на системот. Нивната отпорност на еластична деформација придонесува за ефикасност и оптимална функционалност на механизмот. Врската која ја создаваат овие спојници е од критична важност за континуитетот на работата на системот кој треба да функционира со висока прецизност за да ги исполни техничките и функционалните барања на експериментот.

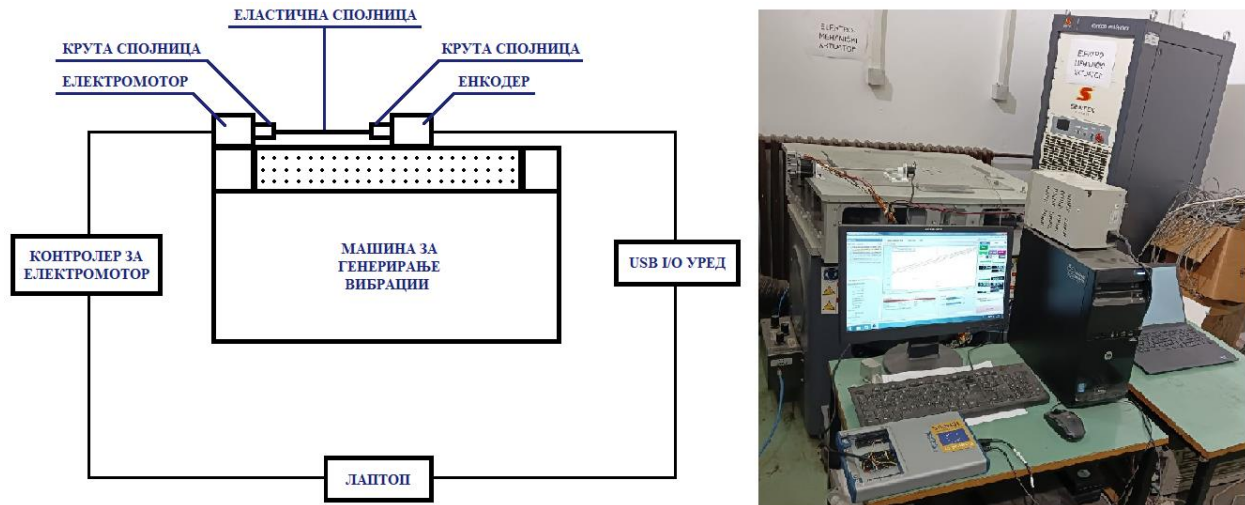
Последниот составен елемент во системот е **лаптопот**. Неговата примарна функција е да служи како централна единица за управување, обработка и складирање на податоци. Како централна компонента, лаптопот обезбедува координација на сите активности во рамки на системот овозможувајќи ефикасна интеракција помеѓу останатите елементи. Покрај тоа, тој функционира како главен складиштен медиум кој обезбедува сигурност и достапност на информациите за понатамошна обработка и анализа. Поради неговите напредни процесорски капацитети и можноста за поврзување со други уреди, лаптопот претставува елемент кој ги интегрира сите компоненти од системот во единствена, функционална структура на експериментот.

3.1.2. Структура на експериментот

Сите елементи (кои претходно се детално објаснети) се меѓусебно поврзани и заедно формираат интегриран систем чија целосна структура е прикажана на Слика 9. Оваа визуелизација обезбедува јасен и систематски приказ кој значително го олеснува разбирањето на меѓусебната поврзаност, како и функционалноста на составните елементи на експериментот.

Секој од овие елементи може да се разгледува како независен сегмент, но истовремено неговата улога може да се анализира и во контекст на структурата на целокупниот систем. Од таков аспект, во продолжение е објаснета структурата на експериментот, како и начинот на меѓусебна поврзаност, функционирање и зависност на составните елементи на истиот.

Енкодерот како главен објект на испитувањето е цврсто фиксиран на машината за генерирање вибрации. За фиксирање е користен механизам за стегање кој обезбедува стабилност и овозможува висок степен на прецизност при мерењата.



Слика 9: Структура на експериментот
Figure 9: Structure of the experiment

Механичката поврзаност на енкодерот со електромоторот е реализирана преку една еластична и две крути спојници кои го пренесуваат вртежниот момент до енкодерот. Еластичната спојница е внимателно избрана заради нејзината способност да амортизира динамички оптоварувања, додека крутите спојници обезбедуваат стабилност и точност при преносот на вртежниот момент.

Електромоторот е управуван со контролерот, кој е поврзан со лаптопот. Управувањето се изведува со помош на компјутерска програма развиен во софтверот LabVIEW преку која се овозможува флексибилност во поставувањето и управувањето со параметрите на електромоторот.

Понатаму, енкодерот е директно поврзан со USB мултифункционалниот I/O уред кој служи како интерфејс за снимање и пренос на податоците од експериментот. Овој уред е исто така поврзан со лаптопот каде што податоците се обработуваат, анализираат и зачувуваат за понатамошна обработка и анализа.

3.2. Реализација на експериментот

3.2.1. Фази на реализација на експериментот

Експериментот е реализиран континуирано, без прекини, со цел да се обезбеди интегритет и конзистентност на резултатите. За полесно разбирање и следење на процесот експерименталната постапка е поделена на неколку фази кои се меѓусебно зависни и логички поврзани. Во продолжение се објаснети клучните фази на реализација:

1. Активирање на машината за генерирање вибрации

Првата фаза на експериментот започнува со активирање на машината за генерирање вибрации. Оваа машина создава осцилации со претходно дефинирани параметри кои вклучуваат амплитуда и фреквенција на осцилациите. Параметрите за осцилациите се поставуваат во согласност со целите на експериментот и спецификациите

на системот. Осцилациите се пренесуваат до енкодерот преку механизмот за фиксирање со кој се обезбедува негово сигурно и стабилно поставување на машината. Оваа фаза е основа за понатамошниот тек на експериментот бидејќи обезбедува почетни услови за останатите активности.

2. Подесување на брзината на електромоторот

Во втората фаза се врши прецизно подесување на брзината на електромоторот, како клучен фактор за генерирање на вртежниот момент потребен за енкодерот. Контролата на брзината се остварува преку контролерот кој служи како посредник помеѓу програмскиот софтвер (од лаптопот) и електромоторот. Контролерот е програмиран со помош на компјутерска програма (претходно) развиена во софтверот LabVIEW која овозможува задавање на параметри за ротација на електромоторот изразени во RPM (вртежи во минута). По внесувањето на параметрите, електромоторот започнува со ротација создавајќи вртежен момент кој понатаму се пренесува кон енкодерот.

3. Пренос на вртежниот момент од електромоторот кон енкодерот

Во третата фаза се врши пренос на вртежниот момент од електромоторот кон енкодерот преку механизмот на спојници. Имено, вртежниот момент генериран од електромоторот се пренесува преку едната еластична и двете крути спојници до енкодерот. Еластичната спојница овозможува амортизација на евентуални нерамномерности во преносот на вртежниот момент, додека крутите спојници обезбедуваат стабилност и пренос на вртежниот момент без загуби. Оваа конфигурација овозможува континуиран пренос на вртежниот момент симулирајќи реални работни услови. Континуираниот пренос на вртежниот момент резултира со аголни поместувања на енкодерот кои се од клучно значење за мерењето и анализата во следните фази.

4. Пренос и обработка на излезните податоци

Последната фаза од експериментот се однесува на преносот на излезните податоци од енкодерот до лаптопот за понатамошна обработка и анализа. Аголните поместувања како мерена величина се пренесуваат во реално време преку USB мултифункционалниот I/O уред, кој служи како интерфејс меѓу енкодерот и компјутерскиот систем. Добиените податоци се конвертираат во формат погоден за обработка и се меморираат на компјутерот за понатамошна анализа и визуализација. Евидентирањето на податоците овозможува создавање дигитална архива за споредба, организација и идни апликации. Оваа фаза е клучна за детална анализа на резултатите, утврдување на евентуални грешки и проценка на перформансите на енкодерот под дејство на вибрации.

3.2.2. Начин на реализација на експериментот

Експериментот е дизајниран и реализиран согласно прецизно утврдена методологија, која обезбедува релевантни и објективни резултати во рамките на поставените елементи на системот и дефинираните фази на реализација. Начинот на реализација на експериментот и начинот на определување на грешката во работата на енкодерот под дејство на вибрации се објаснети во продолжение.

На почетокот од експериментот машината за генерирање вибрации започнува со создавање на вибрации согласно зададените параметри за фреквенција и амплитуда. Електромоторот, кој е статички поставен на изолираната рамка на машината почнува да работи во стабилни услови, а тоа го елиминира влијанието на вибрациите врз неговото

функционирање. Брзината на електромоторот се контролира преку лаптопот и е строго регулирана, со што се обезбедува негово прецизно ротационо движење изразено во број на вртежи во минута (RPM). Преносот на вртежниот момент од електромоторот се реализира преку механизмот од еластичната и крутите спојници до енкодерот, кој е предмет на испитување.

Енкодерот е изложен на динамички услови на работа предизвикани од вибрациите кои ги генерира машината. Оваа поставеност овозможува да се анализира способноста на енкодерот за прецизно мерење на ротационата положба во услови кои симулираат реални индустриски сценарија. Основниот принцип на експериментот се заснова на споредбата помеѓу ротационата положба на енкодерот што се тестира и референтната положба на електромоторот кој функционира како стандарден елемент за споредба. Во самиот електромотор е вграден енкодер со висока прецизност кој функционира независно. Овој вграден енкодер овозможува обезбедување на референтни вредности со висока прецизност кои се користат за проценка на точноста на енкодерот кој се тестира. Со ваквата споредба се утврдува степенот на грешка која се јавува кај енкодерот под влијание на вибрациите.

Конкретно, со користење на податоците добиени од вградениот енкодер на електромоторот се врши прецизна проценка на точноста на енкодерот кој е предмет на испитување. Споредбата на двете вредности овозможува утврдување на степенот на грешка во неговата работа и проценка на неговите перформанси во динамички услови. Ваквата конфигурација на системот обезбедува интегрирано функционирање на сите негови компоненти, каде што електромоторот работи во изолирани услови, додека енкодерот е изложен на вибрации што овозможува прецизна и објективна анализа на влијанието на вибрациите врз неговата точност.

Затворениот систем (Сл. 11) во кој сите елементи се меѓусебно поврзани обезбедува стабилност на експерименталните услови и елиминирање на влијанието на надворешни фактори. На овој начин се овозможува изведување на објективни мерења кои се основа за понатамошна анализа.



Слика 10: Реализација на експериментот
Figure 10: Implementation of the experiment

4. Анализа, резултати и дискусија

Во ова поглавје се прикажани резултатите од тестирањето кое е спроведено врз трите комерцијални оптички ротациони енкодери со различни резолуции. Најпрвин е тестиран енкодерот со резолуција од 100 [ppr], потоа оној со 360 [ppr], а на крајот е тестиран енкодерот со 1000 [ppr]. За секој од овие енкодери е изведена поединечна серија на мерења и затоа се направени три серии на мерења.

Секоја серија содржи дванаесет мерења при што специфичните параметри за секое мерење се прикажани во Табела 1. Во првата колона на табелата мерењата се означени со соодветен реден број. Втората колона ја претставува фреквенцијата на осцилациите во секое мерење, изразена во [Hz]. Третата колона го прикажува бројот на вртежи на електромоторот при што генерираниот вртежен момент се пренесува на секој од тестираните оптички ротациони енкодери. Амплитудата и времетраењето на сите дванаесет мерења се константни, а нивните вредности се наведени во четвртата и петтата колона, соодветно. Во шестата колона е прикажана резолуцијата на секој оптички ротационен енкодер, додека седмата колона ја означува серијата на мерење на која припаѓаат податоците.

Реден број	Фреквенција [Hz]	Број на вртежи [RPM]	Амплитуда [mm]	Време [s]	PPR	Серија на мерења
1	0	50	0.3	10	100	1
2	0	100	0.3	10	100	1
3	0	150	0.3	10	100	1
4	50	50	0.3	10	100	1
5	50	100	0.3	10	100	1
6	50	150	0.3	10	100	1
7	100	50	0.3	10	100	1
8	100	100	0.3	10	100	1
9	100	150	0.3	10	100	1
10	150	50	0.3	10	100	1
11	150	100	0.3	10	100	1
12	150	150	0.3	10	100	1
13	0	50	0.3	10	360	2
14	0	100	0.3	10	360	2
15	0	150	0.3	10	360	2
16	50	50	0.3	10	360	2
17	50	100	0.3	10	360	2
18	50	150	0.3	10	360	2
19	100	50	0.3	10	360	2
20	100	100	0.3	10	360	2
21	100	150	0.3	10	360	2
22	150	50	0.3	10	360	2
23	150	100	0.3	10	360	2
24	150	150	0.3	10	360	2

25	0	50	0.3	10	1000	3
26	0	100	0.3	10	1000	3
27	0	150	0.3	10	1000	3
28	50	50	0.3	10	1000	3
29	50	100	0.3	10	1000	3
30	50	150	0.3	10	1000	3
31	100	50	0.3	10	1000	3
32	100	100	0.3	10	1000	3
33	100	150	0.3	10	1000	3
34	150	50	0.3	10	1000	3
35	150	100	0.3	10	1000	3
36	150	150	0.3	10	1000	3

Табела 1: Параметри на мерење
Table 1: Measurement parameters

За секое мерење се користени различни комбинации на фреквенцијата на осцилациите и бројот на вртежи на електромоторот, а нивните вредности се избрани врз основа на реално дозволиви и можни параметри за индустриски услови на работа. Овие комбинации овозможуваат детален увид во точноста на мерењата на енкодерите, како и во степенот на грешките кои можат да се појават при различни динамички услови. Врз основа на овие податоци е направена анализа на однесувањето на енкодерите под влијание на вибрациите со цел да се утврди нивната доверливост и прецизност во такви услови на функционирање. Резултатите од експерименталната анализа се претставени во продолжение при што е направена квантитативна и квалитативна проценка на грешките кои се јавиле за време на мерењата.

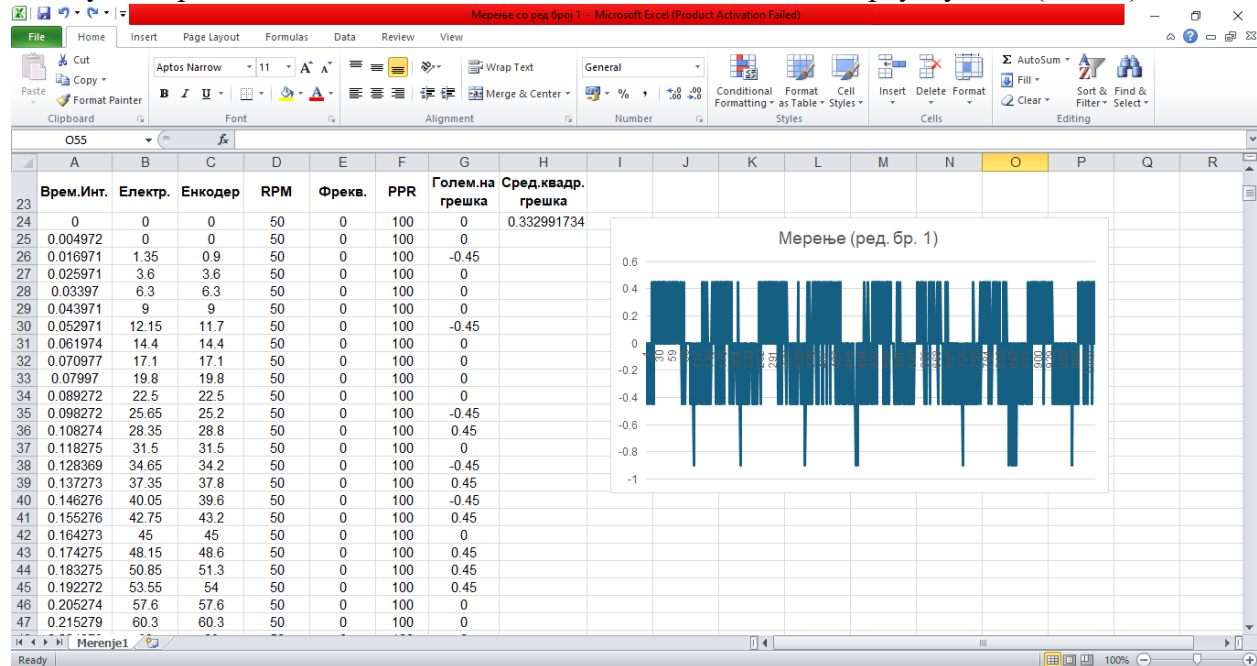
4.1. Резултати и дискусија

Резултатите добиени од експерименталното тестирање на оптичките ротациони енкодери претставуваат клучен индикатор за точноста и прецизноста на мерењето на овие сензори. Во суштина, анализата на податоците ја одредува големината на грешката што се јавува при мерењето на секој енкодер за секој од спроведените експериментални тестови. Бидејќи оптичките ротациони енкодери се сензори кои мерат аголна ротација нивната грешка е изразена како разлика помеѓу измерената вредност на енкодерот и референтната вредност добиена од енкодерот вграден во самиот електромотор. Поради ова, грешката е квантифицирана во аголни степени [°].

Во рамките на експерименталното испитување беа спроведени три серии мерења, при што за секоја од нив беа изведени по дванаесет мерења. За секое мерење беа генерирани посебни фајлови со резултатите во кои големината на грешката е прикажана како функција од времето во текот на траењето на тестирањето, односно во временски интервал од 10 секунди [s]. Добиените податоци кои произлегуваат од експерименталниот процес имаат нумерички карактер и се визуелизирани преку дијаграми со цел појасно прикажување на варијациите на грешката во текот на мерењата (Сл. 11).

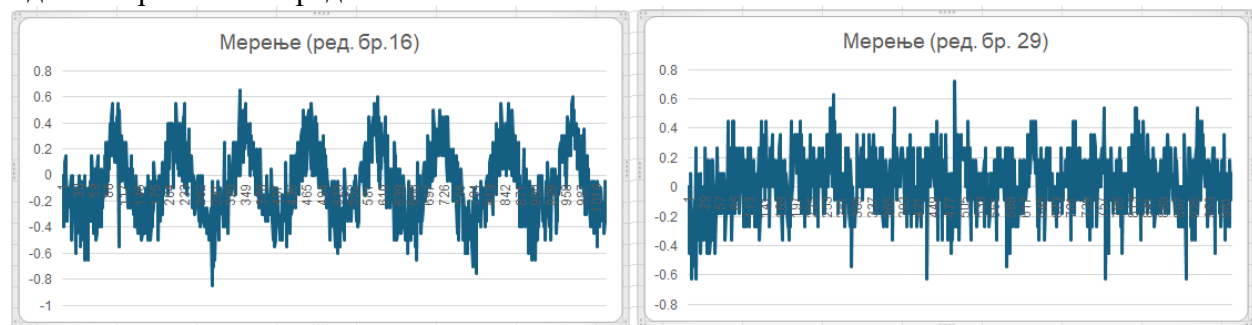
Според податоците прикажани во Табела 1, за секое од дванаесетте мерења во секоја од трите серии, за трите тестирани оптички ротациони енкодери, се добиени вкупно триесет и шест комбинации на мерења. Од анализата на дијаграмите произлегува дека во

одредени случаи големината на грешката значително варира во зависност од временскиот интервал на мерењето (Сл. 12), додека во други случаи, иако е присутна, грешката останува со релативно константен интензитет без значителни флукуации (Сл. 11).



Слика 11: Резултати на мерењето (реден број 1)
Figure 11: Measurement results (ordinal number 1)

Овие набљудувања укажуваат на важен заклучок – и покрај тоа што оптичките ротациони енкодери припаѓаат на ист модел и се произведени од ист производител, нивните перформанси можат да покажат одредени разлики кога се изложени на динамички услови на работа. Овие разлики можат да бидат резултат на производствени толеранции, разлики во калибрацијата или различни нивоа на осетливост на енкодерите во однос на работната средина.



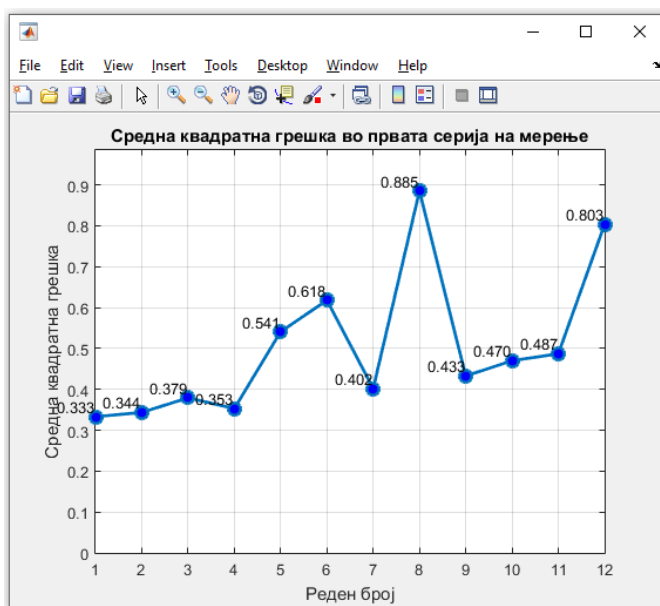
Слика 12: Резултати на мерењето (реден број 16 и 29)
Figure 12: Measurement results (ordinal number 16 and 29)

По добивањето на нумеричките резултати за грешките на трите тестирани оптички ротациони енкодери и нивното графичко претставување, дополнително беше извршена пресметка на средната квадратна грешка (анг. *Root Mean Square Error* или скратено *RMSE*). Оваа мерка претставува релевантен индикатор за вкупната прецизност на

енкодерите бидејќи ги интегрира и систематската грешка и варијацијата во мерењата обезбедувајќи подлабока анализа на нивните перформанси.

Добиените вредности за средната квадратна грешка во анализата беа пресметани со користење на соодветни Matlab програми, а резултатите беа визуелизирани преку графички дијаграми генерирани во Matlab. Пресметките покажаа значителни разлики помеѓу енкодерите со различни резолуции, а тоа придонесе за подобро разбирање на нивната точност во различните динамички услови.

Кај оптичкиот ротационен енкодер со резолуција од 100 [ppr] анализата покажа дека пониските вредности на средната квадратна грешка корелираат со попрецизни мерења, додека повисоките вредности сугерираат поголеми отстапувања (Сл. 13). Вредностите на средната квадратна грешка варираа во опсег од 0.332992 до 0.884757286, а тоа ја истакнува флукуацијата во мерењата и го потврдува влијанието на вибрациите врз точноста.

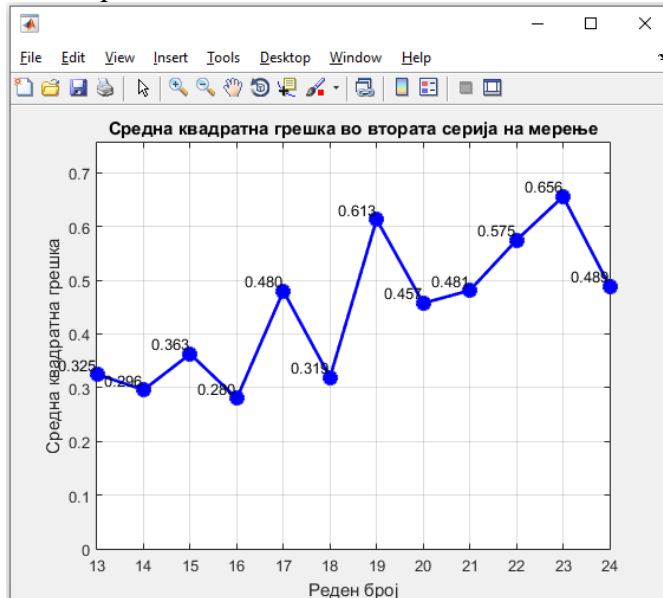


Слика 13: Средна квадратна грешка во првата серија на мерење
Figure 13: Root mean square error in the first measurement series

Во втората серија мерења каде што беше тестирана точноста на енкодерот со резолуција од 360 [ppr], добиените вредности на средната квадратна грешка се движат од 0.280043732 до 0.655835857 (Сл. 14). Овие податоци укажуваат на умерена варијација во мерењата, а генерално, резултатите сугерираат дека овој енкодер покажува подобра точност во споредба со енкодерот со 100 [ppr]. Најниските вредности укажуваат на висока стабилност, додека најголемите вредности потврдуваат дека во одредени мерења се јавуваат значителни отстапувања поради динамичките услови во кои се одвиваа тестирањата.

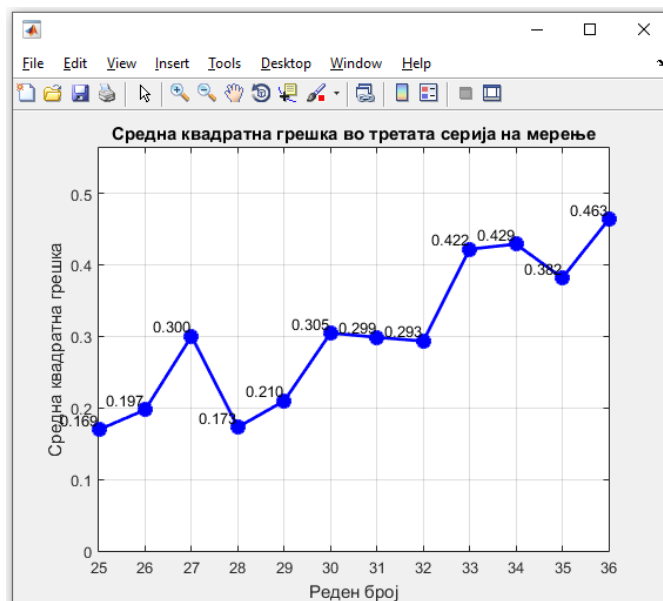
Во третата серија мерења при тестирање на оптички ротационен енкодер со резолуција од 1000 [ppr] добиените вредности на средната квадратна грешка се движат во интервал од 0.169426 до 0.463377432 (Сл. 15). Овие резултати јасно покажуваат дека енкодерот со највисока резолуција демонстрира најголема прецизност, бидејќи отстапувањата во мерењата се значително помали во споредба со претходните две серии. Сепак, иако варијацијата на грешките е намалена, присуството на одредени поголеми

вредности укажува на тоа дека и кај овој енкодер динамичките услови можат да имаат влијание врз точноста на мерењата.



Слика 14: Средна квадратна грешка во втората серија на мерење
Figure 14: Root mean square error in the second measurement series

Добиените резултати ја потврдуваат значајноста на анализата на перформансите на енкодерите во динамички услови на работа. Анализата покажува дека енкодерот со резолуција од 1000 [ppr] останува најпрецизен дури и при присуство на вибрации. Во споредба со него енкодерот со резолуција од 360 [ppr] покажува умерена прецизност, додека енкодерот со 100 [ppr] е најподложен на грешки и има најголеми отстапувања при мерењата.



Слика 15: Средна квадратна грешка во третата серија на мерење
Figure 15: Root mean square error in the third measurement series

Дополнително, истражувањето укажува на директна корелација помеѓу зголемувањето на фреквенцијата на осцилациите кои ги создава машината за генерирање вибрации и порастот на грешката во мерењето. Овој заклучок ја потврдува осетливоста на енкодерите како сензори за мерење во реални динамички услови и ја нагласува потребата од верификација на нивната точност при имплементација во индустриски апликации каде има присуство на вибрации.

Од тој аспект анализата на грешката во мерењето на енкодерите и методологијата на проценка на нивната точност го валидизираат овој експериментален модел како успешно дизајниран, структуриран и целосно соодветен за испитување на точноста на оптичките ротациони енкодери. Овие наоди овозможуваат понатамошна анализа и подобрување на методите за испитување на точноста на оптичките ротациони енкодери и проценка на нивната точност под дејство на вибрации што е од значење за нивната примена во сложени инженерски и индустриски системи.

5. Заклучок

Истражувањето спроведено во рамките на овој докторски проект претставува значаен придонес во областа на анализата на перформансите на оптичките ротациони енкодери во динамички услови на работа. Прегледот на достапната литература укажува на недостаток од систематски истражувања во однос на осетливоста на овие уреди на вибрации што ја потенцира важноста на ова истражување. Преку детално дефинирање на методолошки пристапи за проценка на грешките во мерењата и стабилноста на енкодерите, со истражувањето се обезбедува суштински информации кои се од големо значење за нивната примена во индустриски и инженерски системи.

Главниот придонес на ова истражување се состои во развојот на систематски пристап за тестирање и евалуација на перформансите на оптичките ротациони енкодери, кој овозможува анализа на влијанието на вибрациите врз нивната точност и стабилност. Применетата експериментална методологија е дизајнирана да симулира реални работни услови при што внимателно се испитани три комерцијални модели на енкодери со различна резолуција (100 [ppr], 360 [ppr] и 1000 [ppr]). Добиените резултати ја потврдуваат директната поврзаност помеѓу резолуцијата на енкодерот и неговата осетливост на вибрации при што енкодерите со повисока резолуција покажуваат поголема стабилност и точност во динамички услови на функционирање.

Резултатите од експерименталното истражување евидентно укажуваат дека енкодерите со повисока резолуција (1000 [ppr]) задржуваат високо ниво на прецизност дури и во присуство на вибрации, додека енкодерите со пониска резолуција (100 [ppr]) се најподложни на грешки и флукуации во мерењата. Овие наоди ја потврдуваат потребата од внимателен избор на енкодери во зависност од индустриската апликација во која ќе бидат имплементирани особено кога се работи за средини со високо ниво на механички осцилации.

Дополнително, истражувањето покажа дека зголемувањето на фреквенцијата на вибрациите создадени од машината за генерирање вибрации доведува до зголемување на грешката во мерењата на енкодерите, а тоа нагласува нивната осетливост и подложност на грешка во динамички средини.

Методолошки, експериментот е внимателно планиран и дизајниран со цел да обезбеди валидни и релевантни резултати кои ја потврдуваат неговата научна и инженерска релевантност. Валидизацијата на експерименталниот модел и неговите резултати ја валидизираат неговата применливост во понатамошни истражувања, како и во индустриските процеси каде што се користат оптички ротациони енкодери.

Како краен заклучок, ова истражување овозможува значаен придонес кон подобрување на знаењето за однесувањето на оптичките ротациони енкодери во услови на вибрации. Преку систематска анализа и развој на нови методологии за тестирање, истражувањето отвора нови можности за унапредување на нивната стабилност и прецизност. Ова е особено важно во контекст на современите инженерски и индустриски апликации каде точноста на мерењето претставува критичен фактор за успешно функционирање на автоматизирани и роботизирани системи. Истражувањето поставува цврста основа за идни истражувања во кои ќе биде применет овој принцип за испитување на точноста на оптички ротационени енкодери и проценка на грешката на мерење во динамички услови на функционирање.

Користена литература

1. Alejandro, I., & Artés, M. (2004a). Machine tool errors caused by optical linear encoders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(1), 113–122. <https://doi.org/10.1243/095440504772830255>
2. Alejandro, I., & Artés, M. (2004b). Real thermal coefficient in optical linear encoders. *Experimental Techniques*, 28(4), 18–22. <https://doi.org/10.1111/J.1747-1567.2004.TB00172.X>
3. Alejandro, I., & Artés, M. (2007). Method for the evaluation of optical encoders' performance under vibration. *Precision Engineering: Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 31(2), 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.03.004>
4. Delbressine, F., Florussen, G. H. J., Schijvenaars, L. A., & Schellekens, P. H. J. (2006). Modelling thermomechanical behaviour of multi-axis machine tools. *Precision Engineering*, 30(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.05.005>
5. Kim, J.-J., & Jeong, Y. H. (2004). Thermal behavior of a machine tool equipped with linear motors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(7–8), 749–758. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.006>
6. Lopez, J., Artés, M., & Alejandro, I. (2011). Analysis of optical linear encoders' errors under vibration at different mounting conditions. *Measurement*, 44(8), 1367–1380. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.05.004>
7. http://www.sentekdynamics.eu/layout/L1024_VIBRATION_SYS_SENTEK.pdf
8. <https://alatzasve.rs/proizvod/savitljivi-produzetk>
9. <https://mehatron.rs/rotacioni-ekoder>
10. https://teknik.com/model-info/CPM-SCSK-2310P-RLNA/?model_voltage=75
11. <https://teknik.com/products/io-motion-controller/>
12. <https://www.indiamart.com/proddetail/absolute-rotary-encoder-2854198813388.html>
13. <https://www.ni.com/en-rs/shop/model/usb-6363.html?srsId=AfmBOooIDvbpaPuPX7OZjBmSTNslzGgukizV7JuWNysDF3GKyX1PM1wq>
14. <https://www.sensortips.com/featured/what-are-rotary-optical-rotary-encoders/>