

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



Akvizicija i digitalna obrada signala za eksperimentalnu analizu dinamike sistema spregnutih klatana

Master rad

Mentor:

Dr Vladimir Rajović,  
vanredni profesor

Kandidat:

David Milovanović, 2022/3205

Beograd, Septembar 2023.

# Sadržaj

1	Teorijski uvod . . . . .	2
1.1	Oscilacije . . . . .	2
1.2	Oscilatori . . . . .	3
1.3	Klatno . . . . .	3
1.3.1	Tipovi klatna . . . . .	3
1.3.2	Spregnuta klatna . . . . .	5
1.4	Rotacioni enkoder . . . . .	10
1.4.1	Princip funkcionisanja . . . . .	10
1.5	Akvizicija podataka . . . . .	11
2	Karakteristike korišćenih komponenti sistema . . . . .	11
2.1	Karakteristike klatna . . . . .	11
2.2	Karakteristike rotacionog enkodera . . . . .	12
2.3	Eksterno napajanje . . . . .	13
2.4	Portabilno eksterno napajanje . . . . .	14
2.5	Karakteristike Arduina . . . . .	15
3	Rezultati i diskusija . . . . .	16
3.1	Inicijalna postavka . . . . .	16
3.2	Prva postavka . . . . .	17
3.3	Druga postavka . . . . .	18
3.4	Citation . . . . .	19

4	Zaključak	20
---	-----------	----

# Spisak slika

1	Primer različitih tipova oscilacija.	2
2	Dva nespregnuta oscilatora.	3
3	Dva spregnuta oscilatora.	3
4	Model matematičkog klatna.	4
5	Aproksimacija $\sin(\theta) \approx \theta$ .	4
6	Normalni mod simetrije.	5
7	Normalni mod antisimetrije.	5
8	Aproksimacija $\cos(\theta) \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$	6
9	Očekivano kretanje spregnutih matematičkih klatna.	8
10	Očekivano kretanje spregnutih matematičkih klatna (odvojeno).	8
11	Simulacija kretanja usled normalnog moda simetrije.	9
12	Simulacija kretanja usled normalnog moda antisimetrije.	9
13	Enkoder.	10
14	Model sistema za akviziciju podataka o položaju klatna.	11
15	Eksperimentalna postavka spregnutih klatana.	12
16	HN3806-AB-1000N rotacioni enkoder.	13
17	Eksterno napajanja PeakTech 6225A.	14
18	Arduino Mega 2560.	15
19	Rezultati merenja oscilacija jednog klatna u inicijalnoj postavci.	17
20	Rezultati merenja oscilacija spregnutih klatna.	18
21	Rezultati merenja oscilacija spregnutih klatna.	19

## **Zahvalnica**

Zahvaljujem se svima koji su doprineli izradi ovog diplomskog rada, a posebno svom mentoru Dr Vladimiru Rajoviću, vanrednom profesoru koji je omogućio izradu teme ovog master rada, Dr Jasni Crnjanski, vanrednom profesoru koja je pratila izradu rada i davala sugestije i predloge za unapređenje rada, i Ms Danilu Đokiću, asistentu koji je omogućio podršku tokom izrade ovog rada.

Najveću zahvalnost za bezgraničnu podršku tokom studiranja i izrade master rada, dugujem svom ocu Zoranu Milovanoviću.

Iskreno vam hvala.

David Milovanović

## Sažetak

Akvizicija signala je veoma zastubljena u sferama gde postoji bilo kakva potreba za merenjem nekog mehaničkog procesa i nakon toga digitalno očitavanje dobijenih rezultata ili njihova dalja digitalna obrada. U ovom radu će biti uvedeni i objašnjeni neki od principa akvizicije signala. Za potrebe akvizicije biće isprojektovana eksperimentalna postavka, odrađena sva merenja i potrebna obrada. Konačno, biće izvršeno poređenje izmerenih rezultata dobijenih akvizicijom sa očekivanim teorijskim rezultatima.

Rad je organizovan u tri odeljka. U teorijskom uvodu su uvedeni opšti pojmovi koji predstavljaju delove sistema koji se projektuje. Dodatno, u ovom delu su date i teorijske predikcije ponašanja sistema. U odeljku „Karakteristike korišćenih komponenti“ su opisane karakteristike korišćenih delova sistema i date detaljne specifikacije koje su značajne za dalje modifikacije sistema. U odeljku „Rezultati i diskusija“ su navedeni rezultati celog sistema kao i ocena njihovog preklapanja sa očekivanim teorijskim rezultatima koji su dobijeni ranije.

Cilj rada je pokazivanje značaja savremenog hardvera za akviziciju signala koji daje veoma precizna merenja, gde će samo mehanika postavke skoro u potpunosti uticati na grešku merenja. U radu je pokazano da se uz pomoć teorije mogu dobiti grafici očekivanog ponašanja spregnutih klatana, koji se takođe dobijaju i eksperimentalnim merenjem uz određenu grešku.

This work is licensed under a Creative Commons  
“Attribution-ShareAlike 4.0 International” license.

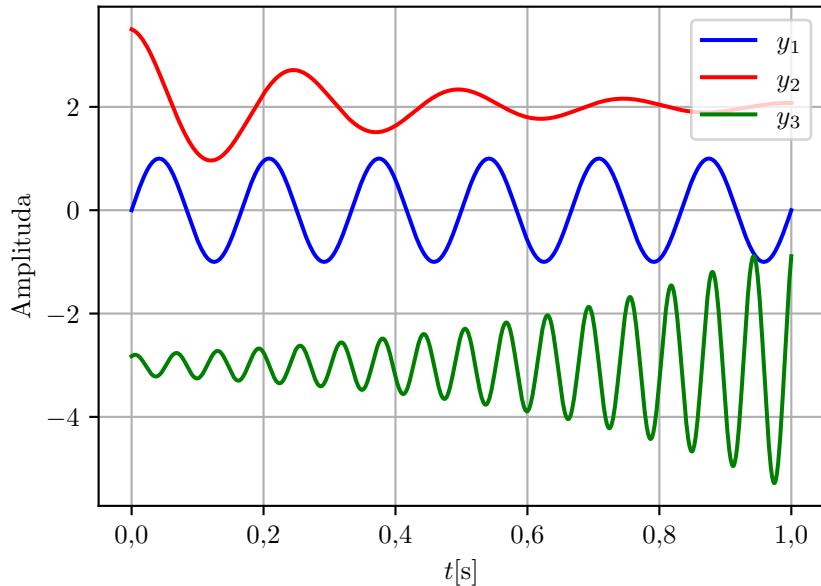


Online repozitorijum sa izvornim kodovima dostupan je na <https://github.com/dejvi997>.

# 1 Teorijski uvod

## 1.1 Oscilacije

Oscilacije prestavljaju periodično ponavljanje pokreta oko određene tačke ili ravnotežnog položaja. To je tipično kretanje u kojem objekt ili sistem sledi putanju koja se ponavlja u redovitim intervalima, krećući se između maksimalnih i minimalnih tačaka amplitude. Oscilacije su prisutne u mnogim aspektima prirode i svakodnevnog života. Primeri uključuju kretanje ljuljaške, zvučne talase, vibracije žica instrumenata, periodične promene električnog napona u naizmeničnoj struji i mnoge druge. U mnogim slučajevima, oscilacije se opisuju kao sinusoidne funkcije vremena, čime se mogu analizirati parametri poput amplitude (maksimalne udaljenosti od ravnotežne tačke), frekvencije (broj oscilacija u jedinici vremena) i faze (početna pozicija oscilacije). Nekoliko različitih oscilacija je prikazano na slici 1.



Slika 1: Primer različitih tipova oscilacija.

Na slici 1 su prikazana tri signala oblika  $y_i = O_i + A_i \sin(2\pi f_i t - \theta_i) e^{-a_i t}$ . Gde za  $y_1$  važi da su  $O_1 = 0, A_1 = 1, f_1 = 6, a_1 = 0$ , za  $y_2$  važi da su  $O_2 = 2, A_2 = 1.5, f_2 = 4, a_2 = 3$ , i za  $y_3$  važi da su  $O_3 = -3, A_3 = 0.3, f_3 = 16, a_3 = -2.5$ . Ovi signali mogu biti kao što je prethodno napomenuto, napon, struja, dužina, jačina zvuka, itd., zato su vrednosti date kao bezdimenziione radi ilustracije promene oblika signala u odnosu na promenu

parametara. Na ovom jednostavnom primeru se može videti da postoji veliki broj načina oscilovanja nekog sistema. Dodatno, na slici 1 su prikazane jednostavnije oscilacije u kojima nema izbijanja ili prenošenja energije sa jednog tela koje osciluje na drugo. Može se vrlo lako zaključiti da naizgled jednostavne, oscilacije mogu veoma lako da postanu komplikovane. Oscilacije su ključne u mnogim područjima fizike, inženjeringu i nauke, te su ključne za razumijevanje različitih fenomena u prirodi i tehnologiji. U ovom radu ćemo se fokusirati na oscilacije u fizici.

## 1.2 Oscilatori

Oscilatori su uređaju ili sistemi koji generišu oscilacije, odnosno periodične promene u vremenu. Postoji više vrsta oscilatora ali po spredi se oni mogu podeliti na oscilatore koji su izolovani ili spregnuti, i njihova šema se može videti na slikama 2 i 3, respektivno.



Slika 2: Dva nespregnuta oscilatora.



Slika 3: Dva spregnuta oscilatora.

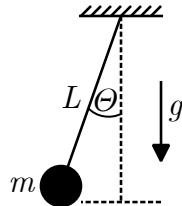
Na slici 2. dva tela mogu da osciluju nezavisno jedno od drugog, dok na slici 3. oscilacija jednog tela utiče na oscilacije drugog tako što se energija prenosi preko sprege, i ovaj način oscilovanja je komplikovaniji od slučaja kada tela osciluju nezavisno. Postoji više načina sprege oscilatora, na slici 3. je ilustrativno prikazan jedan način, ali je suština ista i za druge slučajeve.

## 1.3 Klatno

### 1.3.1 Tipovi klatna

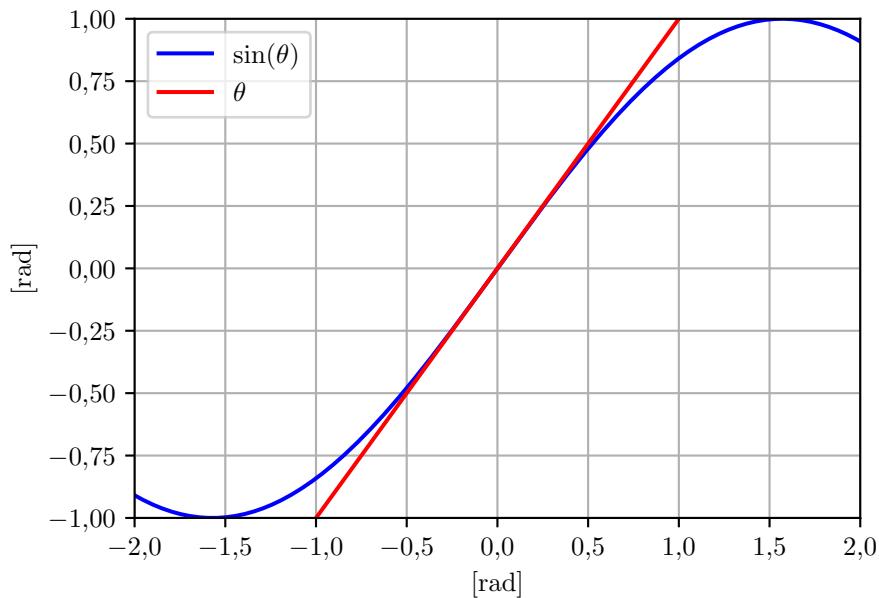
Klatno predstavlja jedan oscilator koji osciluje oko ravnotežnog položaja. Postoje više tipova klatna: matematičko, fizičko, torziono itd. U ovom radu ćemo se fokusirati na matematičko klatno. Matematičko klatno predstavlja svako klatno koje ima masivno telo koje je pričvršćeno za neelastičnu šipku (konopac ili štap) koja se može rotirati oko tačke pričvršćivanja. Radi izučavanja pojava kod matematičkog klatna potrebno je napraviti model koji zanemaruje sve sile (otporne sile) sem gravitacije. Klasično matematičko klatno

se sastoji od tačkaste mase  $m$  pričvršćene na idealno neelastičnu šipku dužine  $L$ . Ugao između šipke i vertikalne ravni se označava sa  $\theta$ . Model matematičkog klatna je dat na slici 4.



Slika 4: Model matematičkog klatna.

Za modelovanje klatna potrebno je izvesti jednačinu kretanja koja se izvodi iz drugog Njutnovog zakona za rotaciju  $\tau = I\alpha$ , gde je  $\tau$  moment sile (moment gravitacione sile  $mg$  oko tačke pričvršćivanja),  $I$  trenutni moment inercije (za tačkastu masu  $m$  i idealno neelastičnu šipku  $L$ ,  $I = mL^2$ ),  $\alpha$  je ubrzanje rotacije (drugi izvod ugla  $\theta$  po vremenu). Moment sile jednak je proizvodu momenta inercije i ubrzanja rotacije:  $mgL\sin(\theta) = mL^2 \frac{d^2\theta}{dt^2}$ . Nakon matematičkog sređivanja jednačine i aproksimacije  $\sin(\theta) \approx \theta$  u intervalu ugla od -0.5rad do 0.5rad, što se prevodi u uglove od -30° do 30°, i grafici ove dve funkcije se poklapaju na datom intervalu što se može i videti na slici 5.



Slika 5: Aproksimacija  $\sin(\theta) \approx \theta$ .

Uzimajući u obzir pomenutu aproksimaciju malog ugla dobija se diferencijalna jednačina

kretanja  $\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L}\theta = 0$ . Rešenja ove jednačine su sinusne funkcije koje predstavljaju periodične oscilacije sa kružnom učestanošću  $\omega$  koja je data formulom (1).

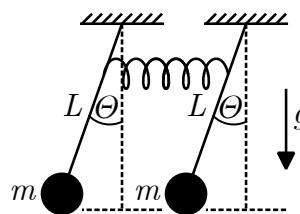
$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (1)$$

Iz datog izvođenja se može zaključiti da učestanost oscilacija ne zavisi od mase tela koje je zakačeno za neelastičnu šipku, nego samo od dužine šipke i gravitacione sile, što znači da za telo bilo koje mase, ako je dužina neelastične šipke  $L$ , period oscilacija će biti isti.

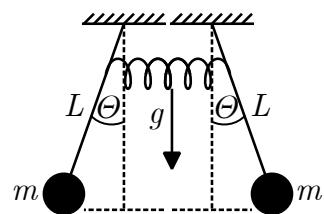
### 1.3.2 Spregnuta klatna

U konkretnom eksperimentu su korišćena fizička klatna koja mogu da se aproksimiraju matematičkim klatnom jer im je neelastična šipka male mase, a velike dužine, dok je teg relativno mali sa velikom masom. Radi lakšeg objašnjavanja principa rada, u daljem tekstu će se koristiti termin matematičko klatno za opisivanje procesa koji se događaju.

Spregnuta matematička klatna je sistem od dva ili više matematička klatna povezana elastičnom oprugom ili nekim drugim vidom sprege (u ovom radu će se posmatrati samo slučaj za dva spregnuta matematička klatna). Osnovna ideja sprezanja klatna je da se klatna ne ponašaju nezavisno već da utiču jedno na drugo, odnosno, da se dešava transfer energije između njih. Samo kretanje spregnutih klatna je složeno, ali postoje dva tipa kretanja koja se drugačije nazivaju normalni modovi, i oni se javljaju kada jedno klatno osciluje frekvencijom bliskom prirodnoj frekvenciji drugog klatna, i tada dolazi do sinhronizacije oscilacija. Primer normalnih modova je dat na slici 6 i 7.



Slika 6: Normalni mod simetrije.

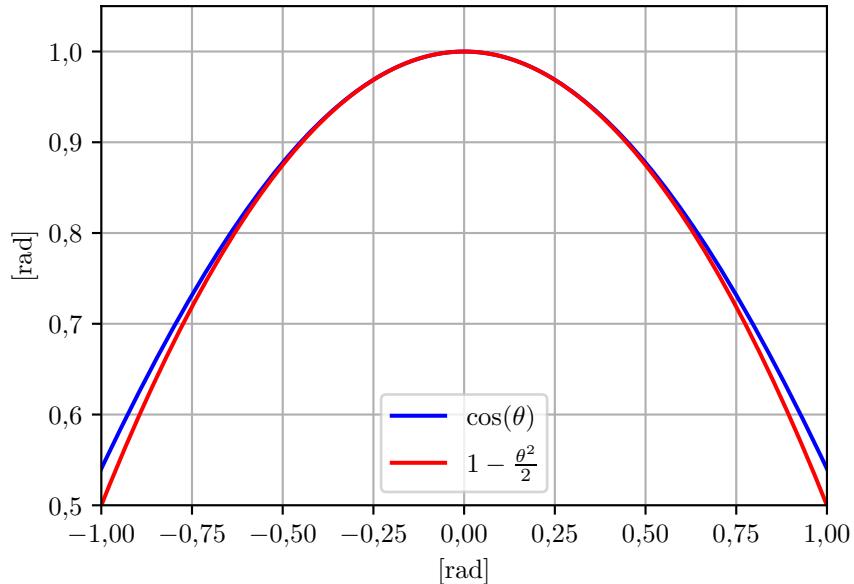


Slika 7: Normalni mod antisimetrije.

Kao što se može primetiti, spregnuta matematička klatna mogu da osciluju periodično bez promene u načinu oscilovanja, i to simetrično ili antisimetrično. Svaki drugi način oscilovanja je dosta složeniji jer se dešava transfer energije sa jednog klatna na drugo i to

utiče na način oscilovanja klatna. U realnom eksperimentu, veoma je teško podešiti početne pozicije spregnutih klatna da bi ona oscilovala u nekom od pomenutih normalnih modova, već je više verovatno da će se oscilacije biti sa prenosom energije. Ali opet nije nemoguće proceniti kretanje uz pomoć diferencijalnih jednačina. Krećući od jednačine za kinetičku energiju  $E_k = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}m(l\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2}m(l\dot{\theta}_2)^2$ , gde je  $v = l\dot{\theta}$ , i potencijalu eknergiju  $E_p = -mgl\cos(\theta_1) - mgl\cos(\theta_2) + \frac{1}{2}k(l\sin(\theta_2) - l\sin(\theta_1))^2$ , gde je referentna tačka nultog potencijala mesto vešanja neelastične šipke, dok je  $k$  koeficijent sprege opruge, a razlika sinusa u trećem članu u jednačini predstavlja ukupno istezanje sistema. Korišćenjem Lagranžijana,  $L = E_k - E_p$ , i aproksimaciju:  $\sin(\theta) \approx \theta$ , za male uglove  $\theta$  objašnjenu u delu 1.3.1 i prikazanu na slici 5., kao i aproksimaciju:  $\cos(\theta) \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$ , što je prikazano na slici 8. dobija se:

$$L = \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}_2^2 - \frac{1}{2}mgl\theta_1^2 - \frac{1}{2}mgl\theta_2^2 - \frac{1}{2}kl^2(\theta_2 - \theta_1)^2 + 2mgl \quad (2)$$



Slika 8: Aproksimacija  $\cos(\theta) \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$ .

Kako bi se došlo do izraza za  $\theta(t)$  potrebno je rešiti Ojlerove diferencijalne jednačine:  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0$ , i  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0$ . Korišćenjem ovih izraza i jednačine (2), lako se dolazi do diferencijalnih jednačina kretanja za oba klatna:

$$\ddot{\theta}_1 + \frac{g}{l}\theta_1 - \frac{k}{m}(\theta_2 - \theta_1) = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}_2 + \frac{g}{l}\theta_2 + \frac{k}{m}(\theta_2 - \theta_1) = 0 \quad (4)$$

Rešavanjem diferencijalnih jednačina kretanja (3) i (4), uz korišćenje matričnog zapisa diferencijalne jednačine, lako se dolazi do rešenja, odnosno jednačine kretanja za oba klatna i one su date kao:

$$\theta_1(t) = C_1 \cos(\omega_1 t) + C_2 \cos(\omega_2 t) \quad (5)$$

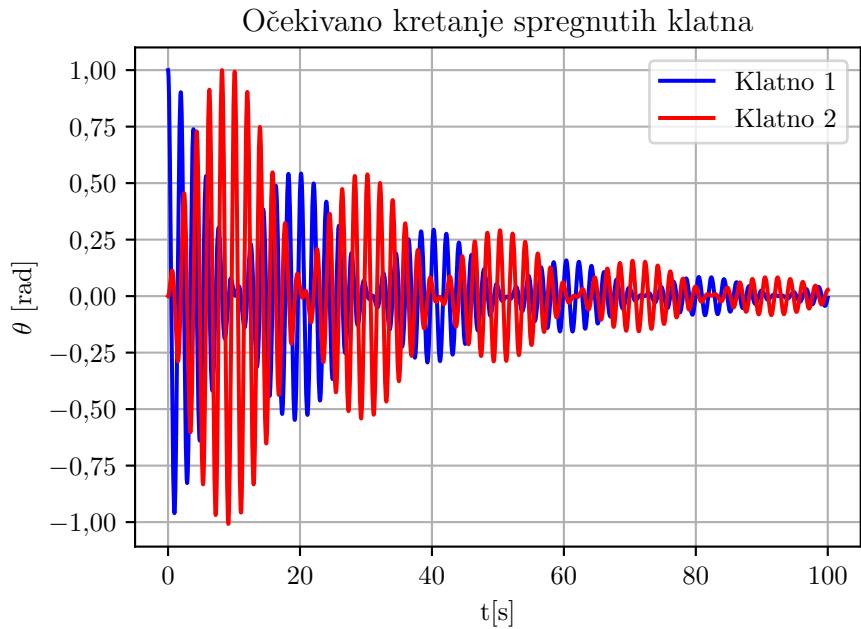
$$\theta_2(t) = C_1 \cos(\omega_1 t) - C_2 \cos(\omega_2 t) \quad (6)$$

, gde su  $C_1$  i  $C_2$  koeficijenti koji zavise od početnih uslova sistema, dok  $\omega_1$  i  $\omega_2$  predstavljaju sopstvene kružne učestanosti sistema prikazanog na slikama 6. i 7., i lako se pokazuje iz jednačine (2) da važi:  $\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{l}}$  i  $\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{2k}{m}}$ .

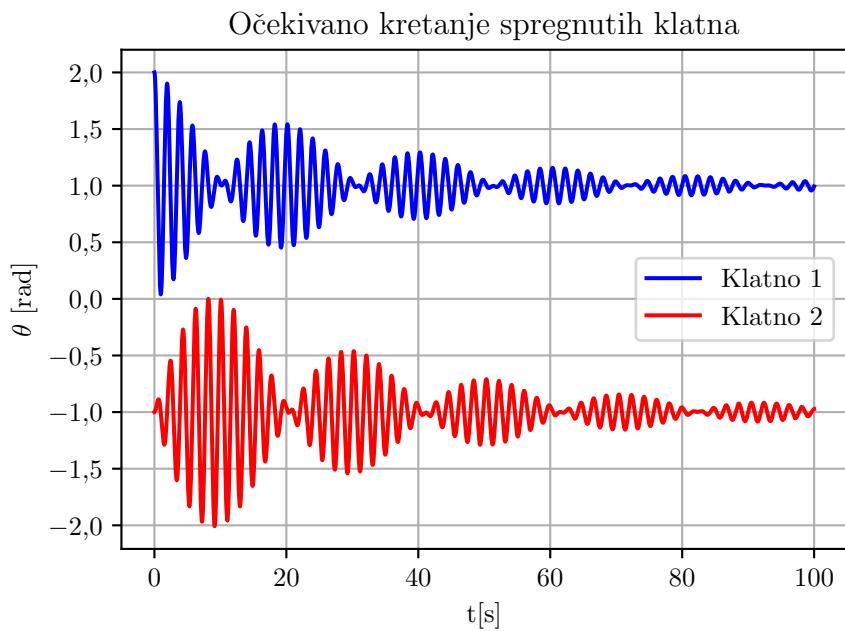
Ove jednačine su veoma bitne jer je moguće simulirati eksperiment i videti koji su očekivani rezultati merenja. Za potrebe simulacije je napisana Python skripta koja uzima u obzir i gubitke energije oscilacija usled trenja o tačku vešanja kao i otpora vazduha. Za parametre simulacije su uzete pokazne vrednosti, jer je akcenat dat na pokazivanje prirode kretanja. Rezultati simulacije kretanja spregnutog matematičkog klatna  $\theta_1(t)$  i  $\theta_2(t)$  su prikazani na slici 9.

Na slici 9 su prikazane funkcije kretanja  $\theta_1(t)$  i  $\theta_2(t)$  prekloppljeni jedna preko druge, dok su radi lakšeg razumevanja one odvojene na slici 10

Na slici 10 se jasnije može videti da amplituda oscilacija oba klatna variraju i da dolazi i do zaustavljanja oscilacija jednog klatna kada je drugo klatno u lokalnom maksimumu. Ovo je primer kada je jedno klatno izvedeno iz ravnotežnog položaja i pušteno da osciluje dok je drugo sedelo u ravnotežni položaj. Zato se ovo rešenje može smatrati opštim rešenjem kretanja, dok, da bi se dobila dva specifična načina kretanja, odnosno normalni modovi,

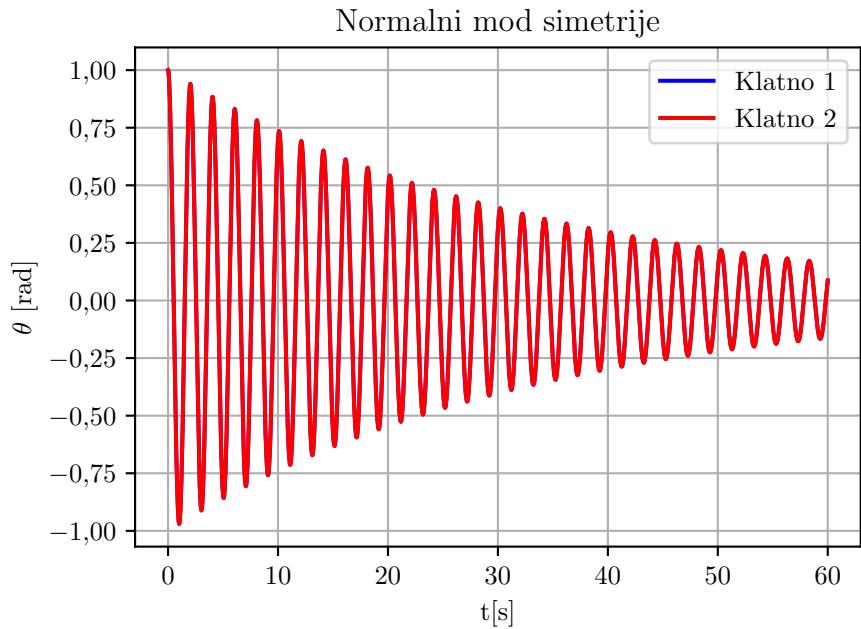


Slika 9: Očekivano kretanje spregnutih matematičkih klatna.

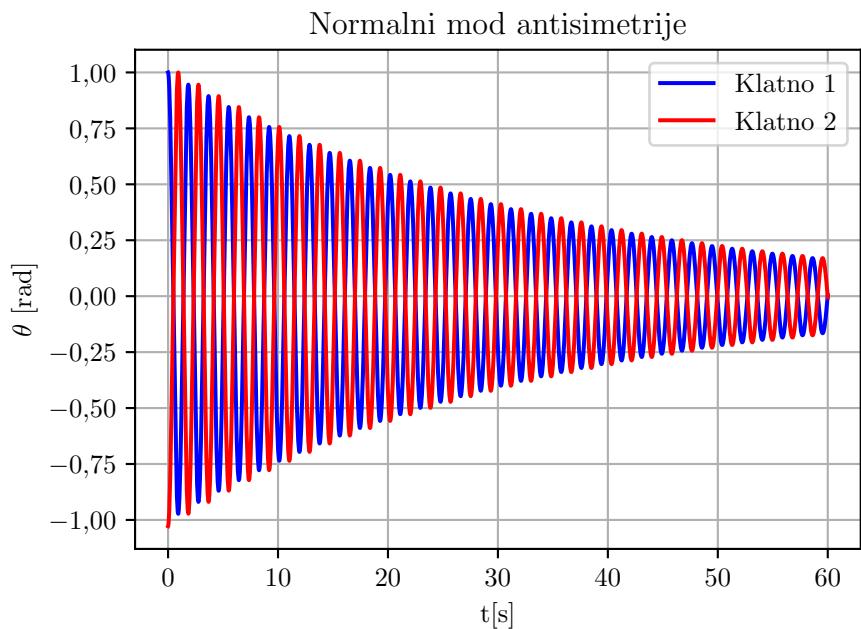


Slika 10: Očekivano kretanje spregnutih matematičkih klatna (odvojeno).

potrebno je da početni uslovi budu takvi da su oba klatna pomerena za početni ugao  $\theta_0$  od ravnotežnog položaja, ili da je jedno klatno pomereno za  $+\theta_0$ , a drugo za  $-\theta_0$ , i time se dobijaju normalni mod simetrije prikazan na slici 6, i normalni mod antisimetrije prikazan na slici 7, respektivno. Rezultati simulacije za normalne modove su prikazane na slikama 11 i 12.



Slika 11: Simulacija kretanja usled normalnog moda simetrije.



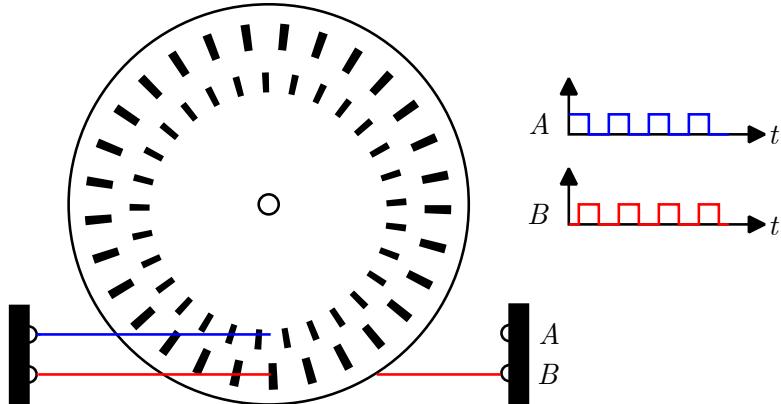
Slika 12: Simulacija kretanja usled normalnog moda antisimetrije.

Usled normalnog moda simetrije, kretanje je identično i važi relacija  $\theta_1(t) = \theta_2(t)$ , što je prikazano na slici 11. Usled normalnog moda antisimetrije, kretanje je suprotno i važi relacija  $\theta_1(t) = -\theta_2(t)$ , što je prikazano na slici 12.

## 1.4 Rotacioni enkoder

### 1.4.1 Princip funkcionisanja

Uloga enkodera je da obezbeđuje informaciju o trenutnom položaju, odnosno smeru okretanja osovine. Enkoder je sačinjen iz diska priključenog za osovinu rotora, i na sebi ima proreze kroz koje može da prođe svetlost. S jedne strane je optički uređaj koji emituje svetlosne zrake dok je s druge strane optički uređaj koji ih prima. Ako se taj svetlosni signal prevede u električni, imaće oblik povorke pravougaonih impulsa. Dodatno, ako enkoder ima opciju da daje informaciju o smeru, jedna od implementacija je da se ispod postojećih proreza nalazi još jedan set proreza koji je celokupno pomeren u jednu stranu u odnosu na proreze iznad. Na taj način se dobijaju dva signala, signal „u fazi“ i signal „u kvadraturi“, od kojih je jedan fazno pomeren u vremenu. U odnosu na to koji od signala prednjači, može se jednoznačno imati informacija o smeru kretanja. Na slici 16 je ilustrativno pokazan princip rada enkodera.

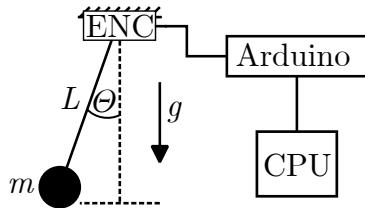


Slika 13: Enkoder.

Konačno, ako se zna broj proreza na enkoderu može se odrediti i ugaona brzina motora  $\omega_m$  uz minimalnu grešku koja se svodi na preciznost merenja. U ovom radu je korišćen motor stalne struje sa ugrađenim enkoderom koji radi na ovom principu. Radi jednostavnosti, u ovom radu razmatra se upravljanje brzine motora bez promene smera okretanja, na osnovu čega se koristi samo jedan signal.

## 1.5 Akvizicija podataka

Nakon računanja na papiru gde se uzimaju u obzir idealni uslovi, potrebno je fizički napraviti eksperiment i izmeriti dobijene rezultate. Merenje se može odraditi na više načina, ali najpreciznije i najbrže je uz korišćenje računara. U konkretnom slučaju potrebno je meriti kretanje spregnutih matematičkih klatna uz pomoć računara. Najjednostavniji način je da se iskoristi enkoder na mestu vešanja klatna, arduino, i računar. Skica sistema se može videti na slici 14.



Slika 14: Model sistema za akviziciju podataka o položaju klatna.

Osnovni princip akvizicije signala je postavljanje adekvatnog senzora (rotacioni enkoder), zatim pojačavači, filtri, multiplekseri, prati-pamti kolo, i AD konvertor (Arduino), i na kraju CPU, odnosno računar.

## 2 Karakteristike korišćenih komponenti sistema

U ovom poglavlju, akcenat će biti na opisivanje komponenti sistema korišćenih za dobijena merenja.

### 2.1 Karakteristike klatna

U teoriji, matematičko klatno predstavlja sistem od neelastične šipke zanemarljive mase koja teži nuli, i tačkaste mase okačene na kraj te šipke. U realnom eksperimentu šipka ima svoju masu, dok telo okačeno na kraj šipke nije tačkasto nego ima konačne dimenzije. Realno klatno se može aproksimirati teorijskim matematičkim klatnom ako je masa šipke zanemarljiva u odnosu na masu tela okačenog na njen kraj, i ako su dimenzije tela okačenog na šipku zanemarljive u odnosu na dimenzije šipke. Finalna postavka relnog klatna koje je korišćeno za merenja je prikazano na slici 15.



Slika 15: Eksperimentalna postavka spregnutih klatana.

## 2.2 Karakteristike rotacionog enkodera

Model rotacionog enkodera koji je korišćen je HN3806-AB-1000N. HN3806 Fotoelektrični inkrementalni dvofazni (AB) NPN rotacioni enkoder [5V-24V] koji se koristi za detekciju i merenje položaja ili brzine rotacije objekta prema položaju ugla kretanja. Rotacioni enkoder, poznat i kao osovinski enkoder, elektromehanički je pretvarač koji konvertuje položaj ugla ili kretanje, u električni signal (digitalni ili analogni signal). Ovaj pretvarač koristi optičku senzorsku tehnologiju koja pruža najtačnije rezultate sa visokom rezolucijom. Ovaj inkrementalni enkoder konvertuje položaj ugla svog rotora u povorku pravougaonih impulsa (AB dvofazni) koristeći rotirajući rešetkasti disk i optokapler. Ovaj enkoder HN3806 može se koristiti za detekciju i merenje ugla, brzine, dužine i ubrzanja željenih objekata, što je korisno za pametno upravljanje bilo kojim pomeranjem i fiksacijom.

snom dužinom u CNC mašinama, povratnoj informaciji motora i bilo kojim sistemima zatvorenih petlji. Ovaj enkoder je baziran na metalnoj konstrukciji, pa je robustan i čvrst, što je idealno za zahtevne industrijske uslove kao što su bušenje na naftnim bušotinama, industrijska kontrola mašina, automatizacija poljoprivrede, kontrola procesa na kanapu, robotika, liftovi, građevinska oprema, kranovi, i tako dalje. Korišćeni enkoder je prikazan na slici 16.



Slika 16: HN3806-AB-1000N rotacioni enkoder.

Ovaj enkoder ima 1000 impulsa na  $360^\circ$ , odnosno preciznost od  $0.36^\circ$ , što može delovati kao dobra preciznost ali nije dovoljna jer je teško detektovati da li taj impuls potiče od šuma ili pomeraja kada su u pitanju male oscilacije. Kao što se može zaključiti iz specifikacije enkodera, on pored svoje preciznosti, nije namenjen za fina merenja pa je potrebno napraviti odgovarajući prenos uz pomoć zubčanika kako bi se još povećala preciznost pri malim promenama ugla. Dodatno, priključci koje ima ovaj rotacioni enkoder su Pozitivan kraj napajanja (crvena žica), masa (crna žica), signal A (zelena žica) i signal B (bela žica).

### 2.3 Eksterno napajanje

Eksterna napajanja se koriste kako bi sistemima dala potrebnu snagu za rad. U datoj postavci jedina komponenta koja daje napajanje je Arduino koji daje 3.3V ili 5V jedno-smernog napona koji može potencijalno da osciluje oko te vrednosti. Dok je za napajanje enkoreda potreban minimalan napon od 5V. Može doći do problema jer to nije dovoljan

napon za ispravan rad enkodera. Iako su na papiru potrebne specifikacije napajanja zadovljene, to ne mora da znači da će biti omogućen ispravan rad zbog greški u proizvodnji enkodera. Siguran način da se obezbedi ispravan rad je da se ne radi sa naponima napajanja koji su blizu graničnih vrednosti 5V ili 24V, već da se koriste naponi napajanja unutar granica, bliži sredini opsega. Zato je iskorišćeno eksterno podesivo napajanje uz pomoć kojeg su dobijeni legitimni rezultati. Konkretno, korišćeno je napajanje PeakTech 6225A čiji se izlazni napon napajanja može podešavati od 0V do 30V u koracima od 1V, a izlazna struja od 0A do 5A u koracima od 100mA. PeakTech 6225A koristi mrežno napajanje od 200V do 240V najmeničnog napona sa učestanostju od 50Hz ili 60Hz. Prednosti ovog napajanja su mogućnost pružanja velike izlazne snage, dok su mane dimenzije, kao i potreba za mrežnim naponom. Slika PeakTech 6225A napajanja je prikazana na slici 17.



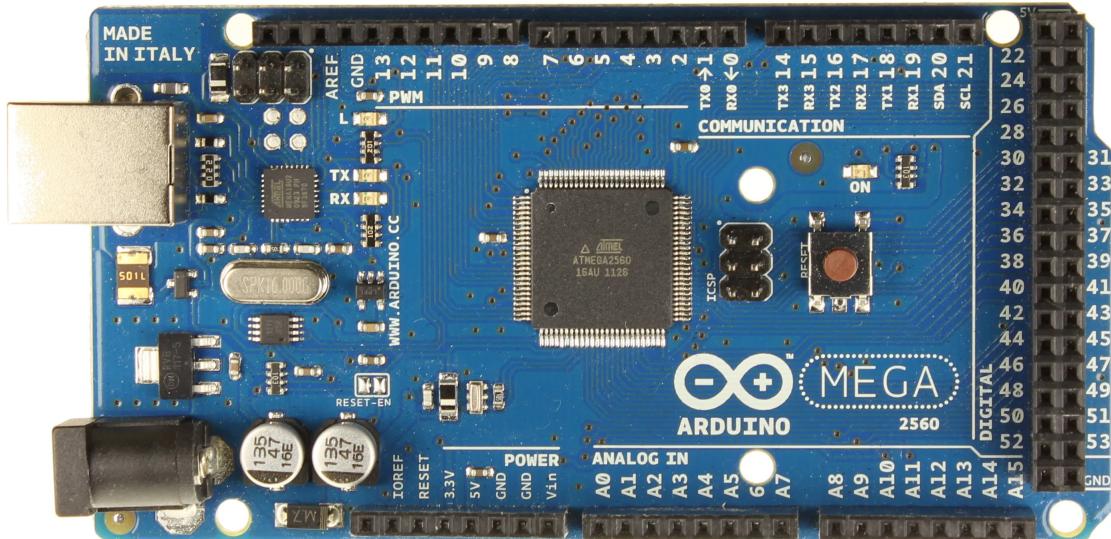
Slika 17: Eksterno napajanje PeakTech 6225A.

## 2.4 Portabilno eksterno napajanje

BATERIJE??? Mora da se testira

## 2.5 Karakteristike Arduina

U ovom radu je korišćen Arduino Mega 2560 mikrokontroler za prenos signala sa enkodera na računar. Arduino Mega 2560 je mikrokontroler razvijen od strane Arduino kompanije. Ovaj model se ističe većim brojem digitalnih i analognih ulaza/izlaza, više memorije i većim brojem GPIO pinova u odnosu na osnovni Arduino Uno model. Arduino Mega 2560 koristi ATmega2560 mikrokontroler sa 8-bitnom arhitekturom, koji radi na 16MHz. Poseduje 54 digitalnih ulaza/izlaza (od kojih 15 PWM izlaza) i 16 analognih ulaza. Arduino Mega 2560 ima 256KB fleš memorije za skladištenje koda, 8KB SRAM memorije za promenljive i podatke, i 4KB EEPROM memorije za trajno skladištenje podataka. Komunikacioni interfejsi koje podržava su UART, SPI, I2C za povezivanje sa drugim uređajima kao što su senzori, displeji, moduli za bežičnu komunikaciju itd., dok za komunikaciju sa računaram koristi USB interfejs. Napajanje je takođe preko USB porta, a može biti i eksterno ili preko DC konektora, radni napon je 5V. Arduino Mega 2560 je kompatibilan sa Arduino razvojnim okruženjem (IDE) što omogućava jednostavno pisanje, kompajliranje i postavljanje koda na uređaj. Takođe, kompatibilan je i sa Matlab okruženjem što omogućava lakše programiranje vizuelnih prikaza rezultata. Način na koji je povezan Arduino je preko USB porta na računar, a s druge strane, izlazi enkodera su priključeni na PWM ulaze Arduina kako bi se tumačili kao prekidi i na taj način može da se dobije informacija o poziciji klatna. Korišćeni Arduino je prikazan na slici 18.



Slika 18: Arduino Mega 2560.

Za precizniju akviziciju su iskorišćeni pinovi za prekide (*interrupt*) 2,3,18,19 na kojima su dovedeni signali A i B sa oba enkodera. U Arduino IDE softverskom okruženju je onda isписан kod koji broji prekide i uzima u obzir u kom smeru se kreće klatno. Uz pomoć ta dva podatka moguće je konvertovati kretanje klatna u cele brojeve koji su direktno povezani sa uglom pod kojim se nalazi klatno. Naime, ako se klatno udaljava od ravnotežnog položaja, broj prekida se povećava, dok se čitanje odvija u toku tog kretanja i može se videti inkrementiranje signala koji predstavlja skaliran ugao. U slučaju suprotnog kretanja koristi se smer kretanja sa enkodera i dodaje se predznak minus na rezultat, ali je u sustini čitanje i tumačenje pozicije identična za oba slučaja. Ovo je jedan od načina implementacije akvizicije signala rotacionog enkodera uz pomoć Arduino Mega 2560 hardvera.

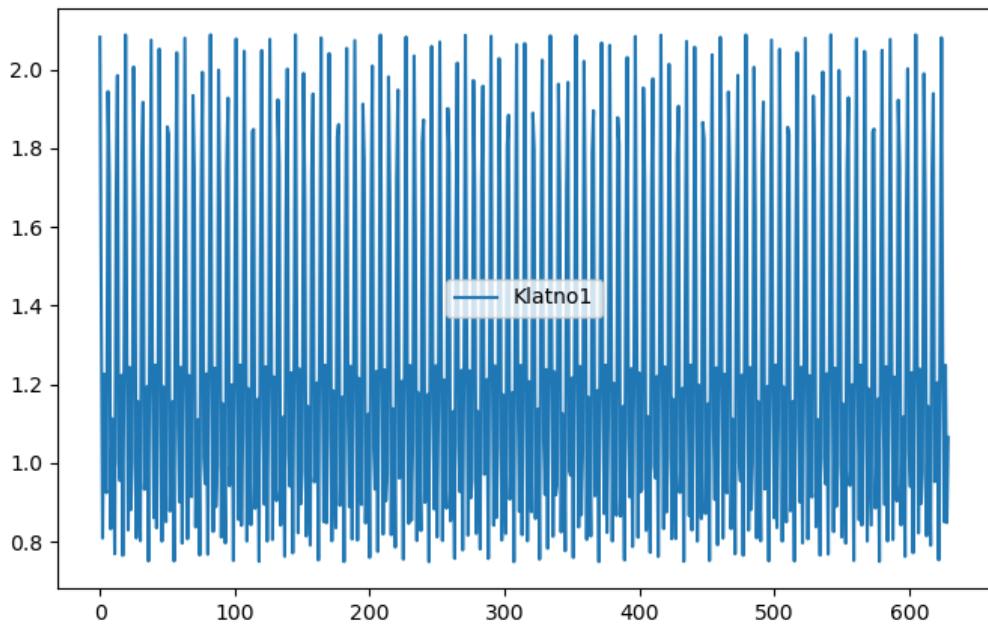
## 3 Rezultati i diskusija

U ovom poglavlju će biti reči o postavkama, rezultatima i diskusiji dobijenih rezultata i uticaja izmena postavki eksperimenta.

### 3.1 Inicijalna postavka

U inicijalnoj postavci je korišćen Arduino UNO koji nije imao mogućnosti akvizicije signala sa oba enkodera istovremeno, a i podaci dobijeni tom akvizicijom su morali biti obrađivani u nekom od softverskih alata kako bi se dobio grafik koji je citljiv. Dodatno, u inicijalnoj postavci nije korišćen prenos, tako da su dobijeni rezultati bili skoro pa nečitljivi, i nakon toga je odlučeno da se iskoristi Arduino Mega 2560 koji ima mnogo više mogućnosti i bolje opcije za akviziciju signala, kao i dodavanje prenosa kako bi se povećala preciznost. Grafik dobijenih rezultata inicijalne postavke je prikazan na slici 19. radi pokazivanja uticaja izbora odgovarajućeg, odnosno neodgovarajućeg hardvera za akviziciju signala.

Kao što se može videti uz odabiranje neadekvatnog hardvera za akviziciju signala, rezultati su neupotrebljivi. U oba slučaja je korišćen isti enkoder. U narednim postavkama je

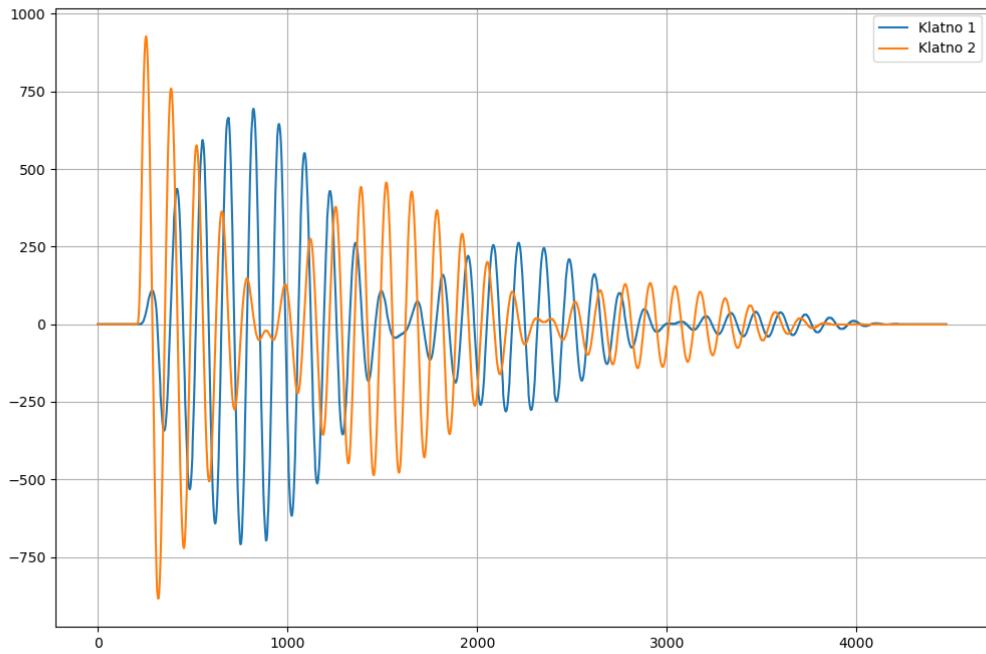


Slika 19: Rezultati merenja oscilacija jednog klatna u inicijalnoj postavci.

korišćen Arduino Mega 2560 koji pruža bolje mogućnosti za akviziciju signala.

### 3.2 Prva postavka

Uz pomoć jednačina (3) i (4), i Python skripte je dobijeno teorijsko očekivanje oscilacija spregnutih klatana prikazano na slici 9. Zatim se uz pomoć komponenti pomenutih u odeljku 2, i Python softverskog alata dobio rezultat kretanja dva spregnuta klatna koji je prikazan na slici 20. Za preciznost prikazanog grafika su zaduženi savremeni hardver za akviziciju signala kao i napravljeni prenosni odnos koji značajno povećava preciznost. Kao što se može jasno primetiti, oblik grafika sa slike 20 se podudara sa teorijskim očekivanjima, odnosno grafikom dobijenim simulacijom prikazanog na slici 9. Dodatno, grafici se i razlikuju po brzini opadanja amplitude. Za to je zadužen otpor koji se javlja u sistemu, a koji su zanemareni u simulaciji. Otpor u tački vešanja klatna i otpor vazduha imaju najveći doprinos za opadanje amplitute oscilacija. Greška pri merenju je smanjena korišćenjem adekvatnog savremenog hardvera za akviziciju podataka, što smanjuje grešku u oblasti elektronike. Najveći uticaj na neidealnost oscilacija ima sama mehanika i otpori

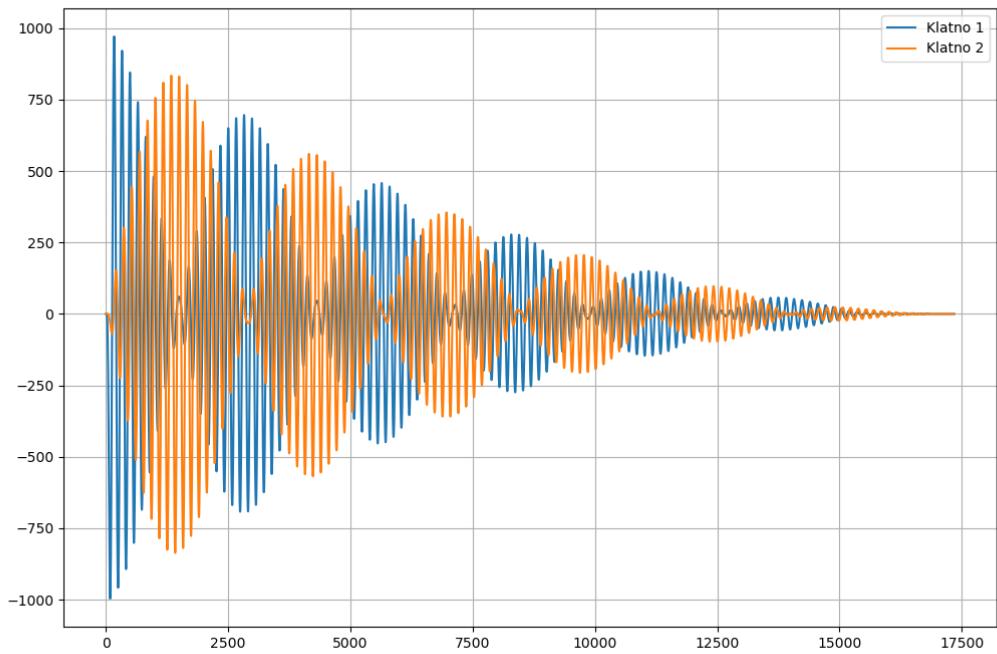


Slika 20: Rezultati merenja oscilacija spregnutih klatna.

koji se javljaju.

### 3.3 Druga postavka

Prethodni rezultat je imao preveliko prigušenje i nije se moglo dobiti više od nekoliko izbijanja čak i sa velikim početnim uglovima. Pošto su kako je već napomenuto iskorišćeni najoptimalniji hardver kao i softver za akviziciju podataka, nije bilo moguće dalje unapređenje po pitanju hardvera i softvera. Jedino što je ostalo je unapređenje mehaničke prirode. Dodati su bolji ležajevi, prenos je poboljšan, dužine neelastičnih šipki je povećana, i mase tegova su povećane, sve u cilju smanjenja uticaja otpora na rezultat. Rezultat dobijen nakom mehaničkih poboljšanja je prikazan na slici 21.



Slika 21: Rezultati merenja oscilacija spregnutih klatna.

### 3.4 Citation

Recenica na koju je stavljen citat. [2] [6]

## 4 Zaključak

U ovom radu je izložen postupak projektovanja eksperimentalne postavke spregnutih klatana radi akvizicije signala, i mogući prikaz i obrada podataka dobijenih akvizicijom. Ideja je bila da se uz pomoć rotacionog enkodera i Arduina odradi precizna akvizicija signala koji će se proslediti računaru na dalju softversku obradu i prikaz. Eksperimentalna postavka je sačinjanje od spregnutih klatana, rotacionog enkodera, Arduina, napajanja i računara sa odgovarajućim softverom. Dobijanje boljih rezultata je postignuta modifikacijama sistema, prvenstveno korišćenjem adekvatnog savremenog hardvera za akviziciju signala kao i dodavanje adekvatnog prenosa radi povećanja preciznosti pri merenju. Odrđena su sva potrebna merenja i ustanovljeno je da sistem daje teorijski očekivane rezultate što je i pokazano u delu 3, na slici 21.

Moguća optimizacija ovog rada je zamena prenosnog mehanizma sa osovinama i stavljanje klizećih ležajeva koji bi pružili još manji otpor i samim tim omogućili duže oscilacije sa manjim prigušenjem. Ideje za dalji rad na projektu je dodavanje jednosmernog motora na osovini koji bi uz korišćenje Arduina i ispisivanje adekvatnog softvera mogao da inicijalno pokretanje oscilacija spregnutih klatana automatizuje tako da čovek nema dodirnih tačaka sa eksperimentalnom postavkom koja bi mogla da bude apsolutno izolovana. Takođe, uz dodavanje prenosa na motor i osovinu, mogao bi se i zadati tačan početni ugao od koga bi oscilacije krenule, za oba klatna. Dodatno, jednosmerni motori bi se mogli koristiti i da vrate klatna u početne položaje odnosno da zaustave oscilacije. U ovom slučaju bi se javio dodatni otpor jer je na osovinu prikačen jednosmerni motor, ali jedna od ideja za rešenje tog problema je dodavanje još jednog jednosmernog motora koji bi služio za prikačivanje i otkačivanje motora na osovinu, za koje bi takođe bilo potrebno napisati odgovarajući kod u adekvatnom softveru, i u tom slučaju bi cela postavka bila apsolutno automatizovana.

Isprojektovana eksperimentalna postavka i upotreba adekvatnog savremenog hardvera za akviziciju signala pokazuje da se teorijska rešenja podudaraju sa dobijenim izmerenim rezultatima. Dodatno, isprojektovani sistem je podložan modifikacijama, kao i upotrebi u drugim eksperimentima uz minimalne izmene.

## Literatura

- [1] Vladimir Rajović, Predavanja iz predmeta Elektronski merni sistemi, dostupno na <http://tnt.etf.rs/~oe4ems/Predavanja.html>, poslednji put pristupljeno 3. septembar 2023.
- [2] Microchip Arduino Mega 2560, Datasheet, dostupno na <https://content.arduino.cc/assets/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>, poslednji put pristupljeno 3. septembar 2023.
- [3] Vladimir Petrović, Digitalna Obrada Signala, dostupno na [http://tnt.etf.rs/~oe3dos/materijali/vezbe/2020/07\\_Prenosne\\_funkcije/html/prenosneFunkcije.html](http://tnt.etf.rs/~oe3dos/materijali/vezbe/2020/07_Prenosne_funkcije/html/prenosneFunkcije.html), poslednji put pristupljeno 3. septembar 2023.
- [4] Radivoje Đurić, materijali za predmet Osnovi Elektronike, dostupno na <http://oe2oe.etf.bg.ac.rs/>, poslednji put pristupljeno 3. septembar 2023.
- [5] Članak na temu "*How rotary encoder works and interface it with Arduino*", dostupno na <https://lastminuteengineers.com/rotary-encoder-arduino-tutorial/>, poslednji put pristupljeno 3. septembar 2023.
- [6] Dokumentacija za softver "*CoolTerm*", dostupno na [https://freeware.the-meiers.org/CoolTerm\\_ReadMe.txt.html](https://freeware.the-meiers.org/CoolTerm_ReadMe.txt.html), poslednji put pristupljeno 3. septembar 2023.