

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



Akvizicija i digitalna obrada podataka 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	Karakteristike Arduina	13
3	Rezultati i diskusija	14
3.1	Obrada rezultata merenja	14
3.2	Nelinearna ograničenja sistema	15

4	Zaključak	16
---	-----------	----

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	HN3806-AB-1000N rotacioni enkoder.	12
16	Arduino Mega 2560.	14
17	Rezultati merenja oscilacija spregnutih klatna.	14
18	Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.	15

Zahvalnica

Zahvaljujem se svima koji su doprineli izradi ovog diplomskog rada, a posebno svom mentoru Dr Radivoju Đuriću, vanrednom profesoru koji je omogućio izradu teme ovog diplomskog rada i Ms Danilu Đokiću, asistentu koji je omogućio konstantnu podršku tokom izrade ovog rada.

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

Iskreno vam hvala.

David Milovanović

Sažetak

Jednosmerni motor je veoma zastupljen u sferama gde postoji neka vrsta upravljanja sistema. U ovom radu će biti uvedeni i objašnjeni osnovni principi funkcionisanja analognog sistema upravljanja motora jednosmerne struje. Takođe, biće isprojektovan sistem i izvršena sva potrebna merenja i njihova obrada, i izvršiće se poređenje izmerenih rezultata 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 data su merenja njihovih osobina koja su značajna 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 da moguće isprojektovati analogni sistem upravljanja koji će davati relativno iste rezultate kao i teorijski model sistema. U radu je pokazano da se uz pomoć teorije mogu dobiti parametri kontrolera sistema koji će i praktično davati iste rezultate kao i teorijski.

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

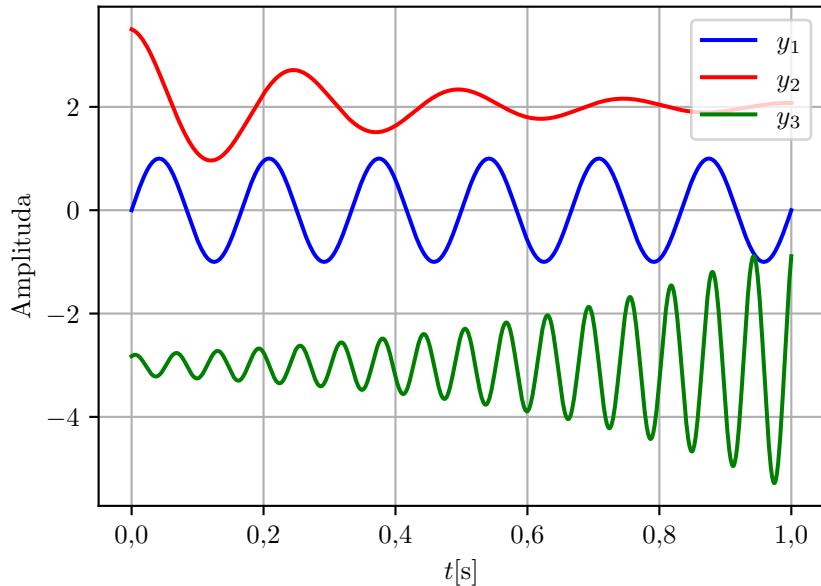


Online repozitorijum sa izvornim kodovima dostupan je na <https://github.com/dejvi997>.

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.

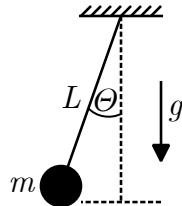
Na slici 2. dva tela mogu da osciluju nezavisno jedno od drugog, dok na slici 3. oscilacija jednog tela utiče na oscilacije drugog tako što se energija prenosi preko sprege, i ovaj način oscilovanja je komplikovaniji od slučaja kada tela osciluju nezavisno. Postoji više načina sprege oscilatora, na slici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

1.3 Klatno

1.3.1 Tipovi klatna

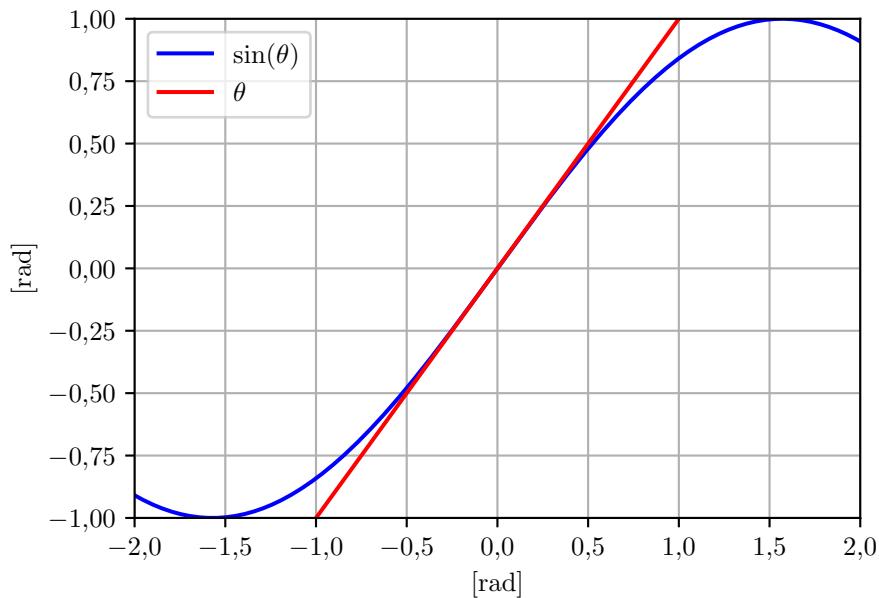
Klatno predstavlja jedan oscilator koji osciluje oko ravnotežnog položaja. Postoje više tipova klatna: matematičko, fizičko, torziono itd. U ovom radu ćemo se fokusirati na matematičko klatno. Matematičko klatno predstavlja svako klatno koje ima masivno telo koje je pričvršćeno za neelastičnu šipku (konopac 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 θ . 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 τ moment sile (moment gravitacione sile mg oko tačke pričvršćivanja), I trenutni moment inercije (za tačkastu masu m i idealno neelastičnu šipku L , $I = mL^2$), α je ubrzanje rotacije (drugi izvod ugla θ 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 ω koja je data formulom (1).

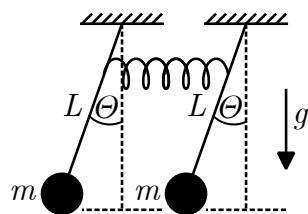
$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (1)$$

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.

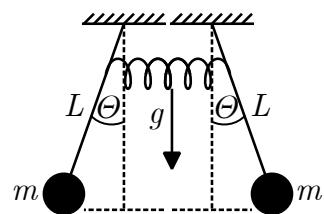
1.3.2 Spregnuta klatna

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.

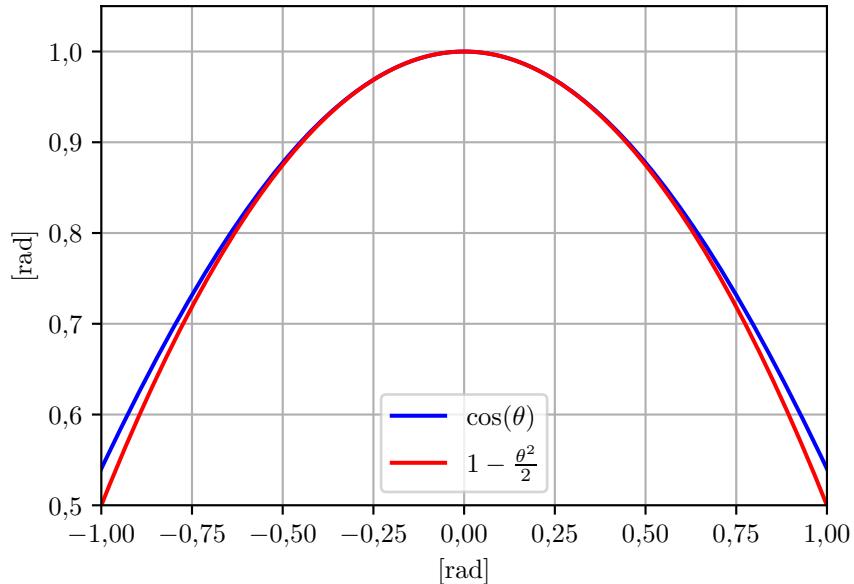


Slika 7: Normalni mod antisimetrije.

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 θ 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:

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

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

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:

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

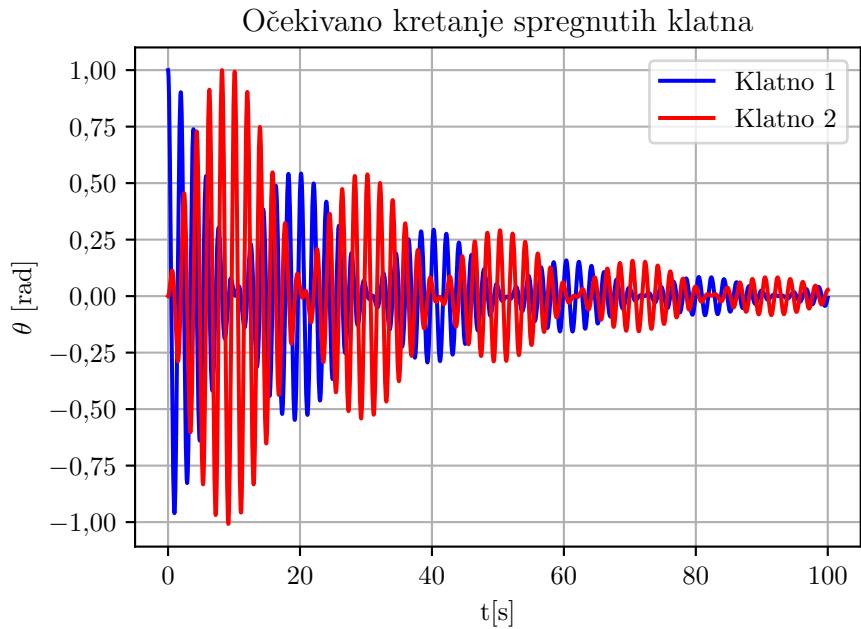
$$\theta_2(t) = C_1 \cos(\omega_1 t) - C_2 \cos(\omega_2 t) \quad (6)$$

, gde su C_1 i C_2 koeficijenti koji zavise od početnih uslova sistema, dok ω_1 i ω_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 $\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{2k}{m}}$.

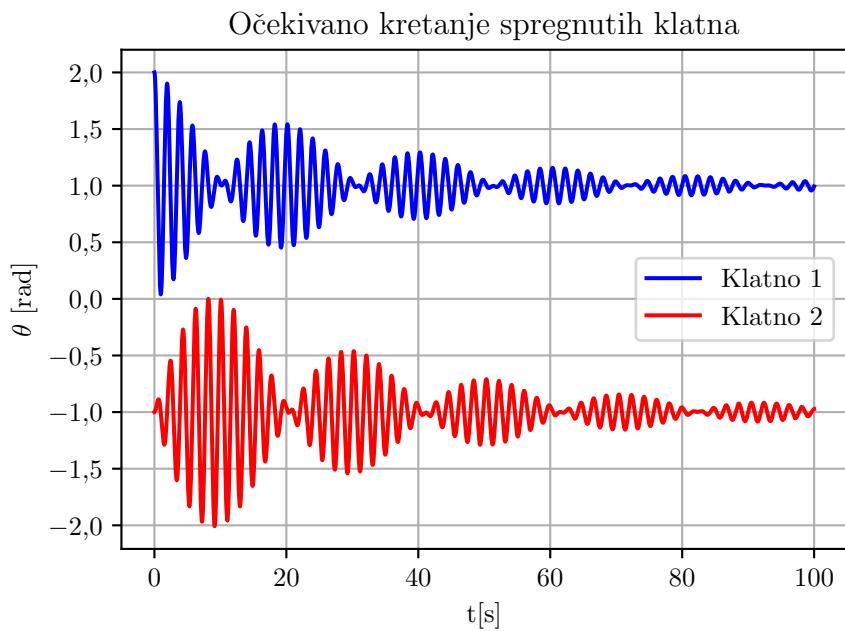
Ove jednačine su veoma bitne jer je moguće simulirati eksperiment i videti koji su očekivani rezultati merenja. Za potrebe simulacije je napisana Python skripta koja uzima u obzir i gubitke energije oscilacija usled trenja o tačku vešanja kao i otpora vazduha. Za parametre simulacije su uzete pokazne 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,

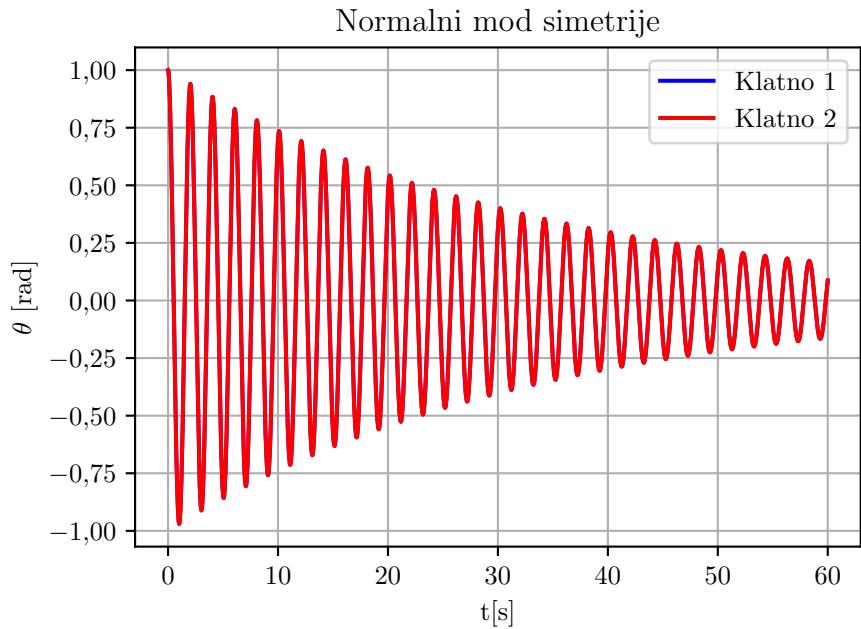


Slika 9: Očekivano kretanje spregnutih matematičkih klatna.

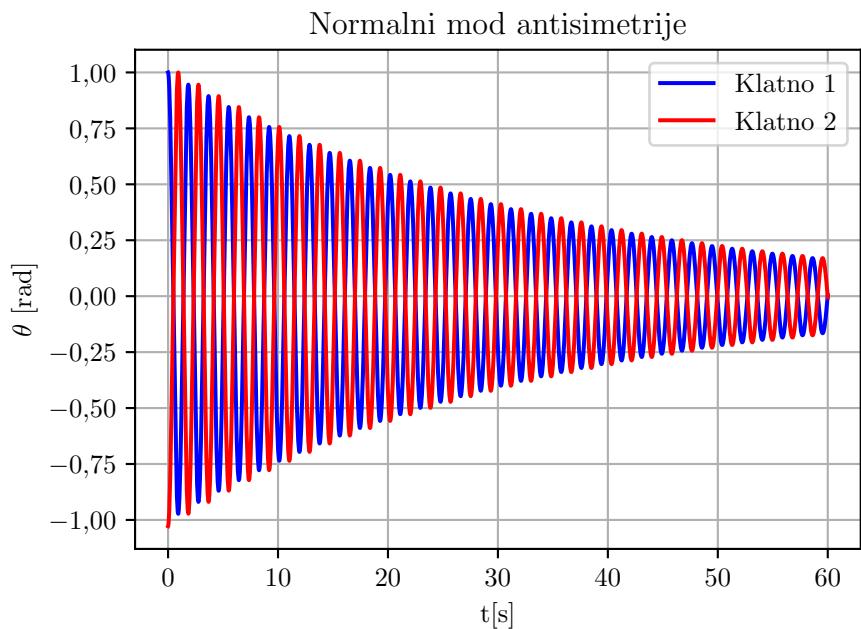


Slika 10: Očekivano kretanje spregnutih matematičkih klatna (odvojeno).

potrebno je da početni uslovi budu takvi da su oba klatna pomerena za početni ugao θ_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.



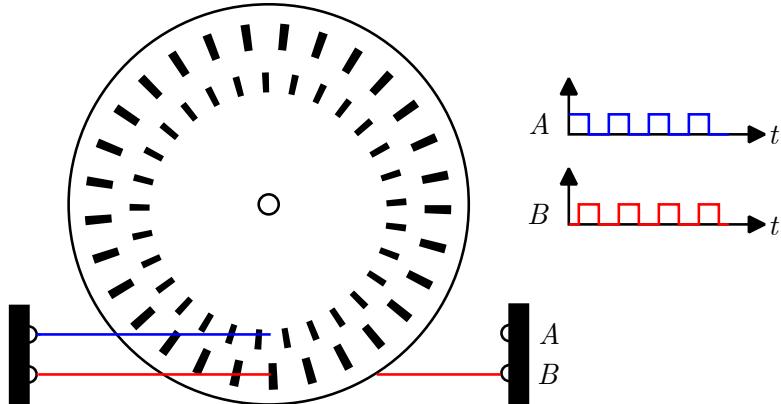
Slika 12: Simulacija kretanja usled normalnog moda antisimetrije.

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 15 je ilustrativno pokazan princip rada enkodera.

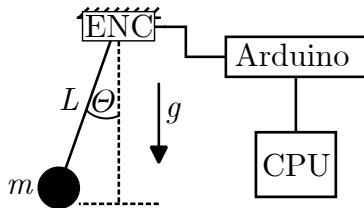


Slika 13: Enkoder.

Konačno, ako se zna broj proreza na enkoderu može se odrediti i ugaona brzina motora ω_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, multiplekser, 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. Relno klatno koje je

korišćeno je prikazano na slici **OVDE SLIKA KLATNA, KAD GA SASTAVIMO OPET**

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 fiksnom 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 15.

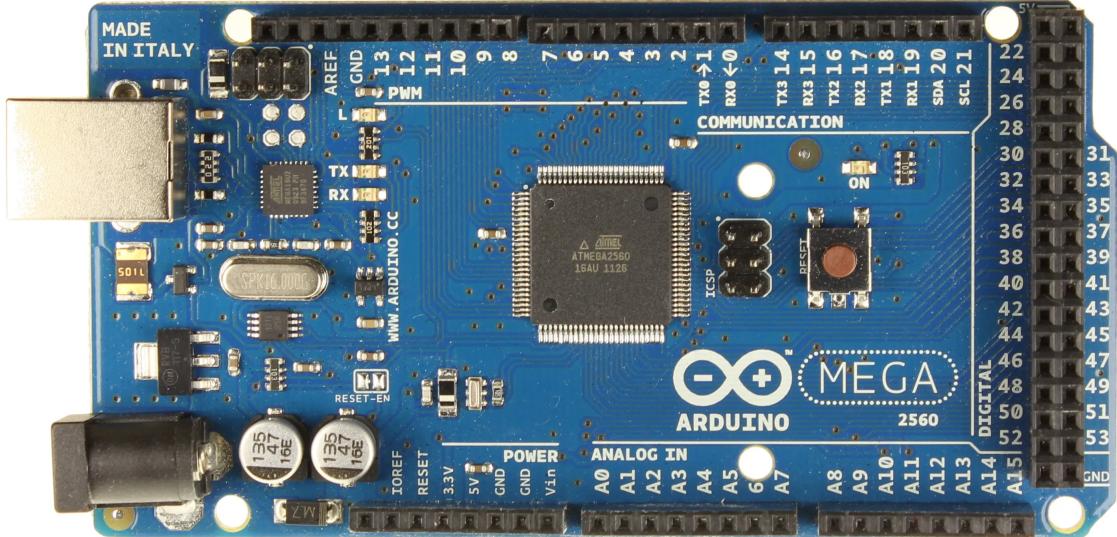


Slika 15: HN3806-AB-1000N rotacioni enkoder.

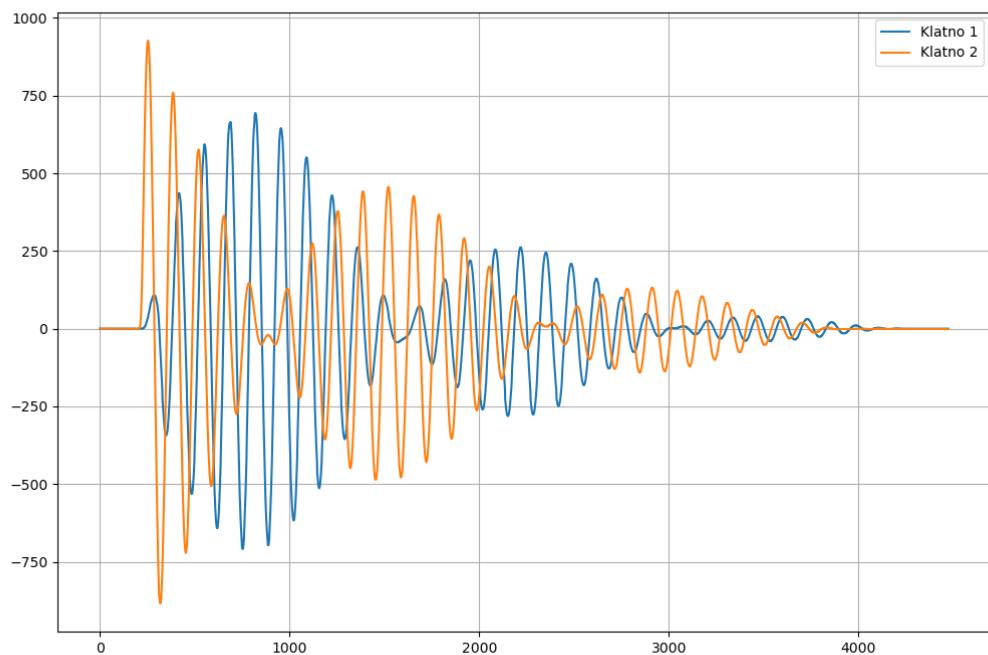
Ovaj enkoder ima 1000 impulsa na 360° , odnosno preciznost od 0.36° , što može delovati kao dobra preciznost ali nije dovoljna jer je teško detektovati da li taj impuls potiče od šuma ili pomeraja kada su u pitanju male oscilacije. Kao što se može zaključiti iz specifikacije enkodera, on pored svoje 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.

2.3 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 16.



Slika 16: Arduino Mega 2560.



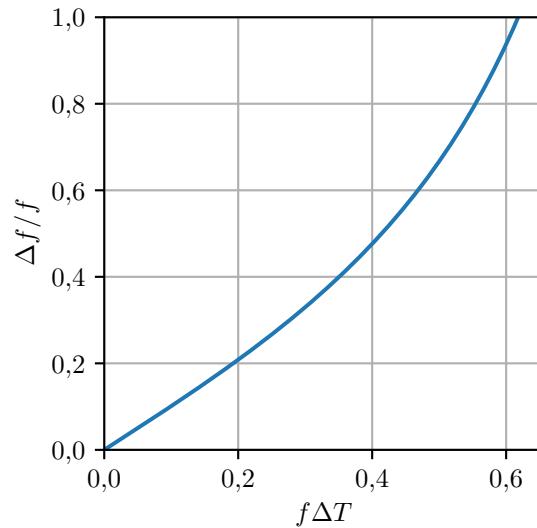
Slika 17: Rezultati merenja oscilacija spregnutih klatna.

3 Rezultati i diskusija

3.1 Obrada rezultata merenja

Od signala sa slike ?? su dobijeni ostali već pomenuti signali pomoću Python skripte koja radi na sledeći način. Pošto su podaci koji stižu binarni, ili 5 V ili 0 V obrada signala je

podrazumevala brojanje perioda koje je bilo realizovano tako što su se brojali podaci koji su 5 V počevši od prvog, zatim svi naredni podaci koji su nule sve do prvog sledećeg koji je opet 5 V. Na taj način imamo broj odbiraka signala u jednoj periodi, postupak se ponavlja za svaku narednu periodu. Učestanost jedne periode se računa kao $f_{\text{periode}} = \frac{1}{(n-1)T_s}$. Dobijeni broj predstavlja učestanost



Slika 18: Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.

3.2 Nelinearna ograničenja sistema

Šum je jedan od najvećih problema u sistemu. [3] [4] [5] [10]

4 Zaključak

U ovom radu je izložen postupak projektovanja analognog sistema automatskog upravljanja motora jednosmerne struje. Ideja je bila da se uz pomoć analognog signala na ulazu sistema kontroliše brzina motora jednosmerne struje uz minimalnu grešku i što brži odziv sistema. Isprojektovan je hardver koji je sačinjen od pojačavača snage, motora jednosmerne struje i konvertora učestanosti u napon. Dobijanje boljih rezultata je postignuto modifikacijama sistema, prvenstveno filtriranjem. Odrađena su sva potrebna merenja i ustanovljeno je da sistem daje teorijski očekivane rezultate što je i pokazano u delu ??, na slikama ?? i ??.

Moguća optimizacija ovog rada je zamena motora motorom koji ima bolju dinamiku i uz povećanje napona napajanja, i dodavanjem hlađenja na tranzistorima, radi postizanja većih brzina. Ideja za dalji rad na projektu je uzimanje u obzir smer okretanja osovine motora koji se može realizovati uz korišćenje dve diode kao što je prikazano na slici 15. Prate se pojavljivanja uzlaznih ivica signala A i B, i u zavisnosti od toga koji se prvi pojavio se jednoznačno može odrediti smer okretanja osovine motora. Još jedna ideja je da se za ulazni signal koriste prijemnik i predajnik i na taj način je moguće omogućiti kontrolu brzine motora na daljinu.

Isprojektovani analogni sistem automatskog upravljanja pokazuje da se teorijska rešenja podudaraju sa dobijenim izmerenim rezultatima. Dodatno, isprojektovan je sistem za kontrolu brzine motora koji ima dosta mogućnosti za modifikacije i dalje olakšavanje upravljanjem.

Literatura

- [1] Željko Đurović, Aleksandra Krstić, Predavanja iz predmeta Sistemi Automatskog Upravljanja, dostupno na https://automatika.etf.bg.ac.rs/images/FAJLOVI_srpski/predmeti/izborni_kursevi_ostali/0E_0T/0E3_0T3_SAU/materijali/sau_predavanje_1.pdf, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [2] Željko Đurović, Aleksandra Krstić, Predavanja iz predmeta Sistemi Automatskog Upravljanja, dostupno na https://automatika.etf.bg.ac.rs/images/FAJLOVI_srpski/predmeti/izborni_kursevi_ostali/0E_0T/0E3_0T3_SAU/materijali/Podesavanje_parametara_PID_regulatora.pdf, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [3] Tektronix, Programmer manual, dostupno na <https://download.tek.com/manual/TBS1000-B-EDU-TDS2000-B-C-TDS1000-B-C-EDU-TDS200-TPS2000-Programmer.pdf>, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [4] Agilen technologies, Programmer manual, dostupno na http://ecelabs.njit.edu/student_resources/33220_user_guide.pdf, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [5] Microchip Arduino Mega 2560, Datasheet, dostupno na <https://content.arduino.cc/assets/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [6] Vladimir Petrović, Digitalna Obrada Signala, dostupno na http://tnt.etf.rs/~oe3dos/materijali/vezbe/2020/07_Prenosne_funkcije/html/prenosneFunkcije.html, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [7] Radivoje Đurić, materijali za predmet Osnovi Elektronike, dostupno na <http://oe2oe.etf.bg.ac.rs/>, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.

- [8] Članak na temu ”*How rotary encoder works and interface it with Arduino*”, dostupno na <https://lastminuteengineers.com/rotary-encoder-arduino-tutorial/>, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [9] Dokumentacija za softver ”*GNU Octave*”, dostupno na <https://docs.octave.org/octave.pdf>, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [10] Dokumentacija za softver ”*CoolTerm*”, dostupno na https://freeware.the-meiers.org/CoolTerm_ReadMe.txt.html, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.
- [11] Dokumentacija za ”*Python*” funkciju `scipy.optimize.curve_fit` dostupno na https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html, poslednji put pristupljeno 30. avgust 2023.