



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

KUUL-RENNIL TASAKAALUSTEND

BAKALAUREUSETÖÖ

MEHHATROONIKA ÕPPEKAVA

Üliõpilane: Martin Lahtein

Üliõpilaskood: 134433MAHB

Juhendajad: Maido Hiiemaa
Andres Rähni

Tallinn, 2017.a.

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Martin Lahtein, 134433MAHB

Õppekava, peeriala: MAHB02/13 - Mehhatroonika

Juhendajad: Teadur Mairo Hiiemaa

Lektor Andres Rähni

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kuul-rennil tasakaalustend

(inglise keeles) Ball and Beam Balancing System

Lõputöö põhieesmärgid, lahendatavad ülesanded ning töö koostamise kava:

1. Juhtimisobjekti modelleerimine (13.03)
2. Süsteemi komponentide valik (27.03)
3. Juhtimisalgoritmi disain MATLABis (17.04)

Täiendav info ja nõuded:

Töö keel: Eesti keel

Üliõpilane: Martin Lahtein ”....”2017 a

/allkiri/

Juhendajad: Mairo Hiiemaa ”....”2017 a

Andres Rähni ”....”2017 a

/allkiri/

SISUKORD

SISUKORD	4
EESSÕNA	6
JOONISTE LOETELU	7
TABELITE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	9
1 ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST LAHENDUSTEST	11
1.1 Massachusettsi Tehnoloogiainstituut	11
1.2 Lakehead Ülikool	11
1.3 Adelaide Ülikool	12
2 SÜSTEEMI MODELLEERIMINE	13
2.1 Kuuli mudel	13
2.2 Alalisvoolumootori mudel	14
2.3 Jõumomentide tasakaal	16
2.4 Süsteemi lineariseerimine	18
2.5 Olekumudel	18
3 STENDI KOMPONENTIDE VALIK	20
3.1 Mootor	20
3.2 Mootori draiver	21
3.3 Raam	23
3.4 Mikrokontroller	25
3.5 Tala nurga andur	25
3.6 Kuuli positsiooni andur	27
4 SÜSTEEMI PARAMETRISEERIMINE	29
4.1 Mootori parameetrite määramine	29
4.2 Arvutatud olekumudel	32

5	SÜSTEEMI JUHTIMINE	33
5.1	Paralleelse PI kontrolleri simulatsioon	33
6	EDASISED ARENDAMISVÕIMALUSED	35
6.1	Mehaaniline nurgapiiraja	35
6.2	PI algoritmi eksperiment.....	35
	KOKKUVÕTE.....	36
	SUMMARY	37
	KASUTATUD KIRJANDUS	38
	LISAD	40
	Lisa 1 Micromotors E192-seeria alalisvoolumootori karakteristikud	41
	Lisa 2 Valmis stendi fotod.....	42

EESSÕNA

Töö autor soovib tänada juhendajaid kannatlikkuse, abivalmiduse ja sujuva koostöö eest, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonikainstituuti töökoja ning elektroonikalabori kasutamise võimaluse eest. Lisaks avaldab autor tänu ettevõttele Custom Metal OÜ, kes varustas laserpingis lõigatud terasplaatidega, mida kasutatakse stendi raamina.

JOONISTE LOETELU

Sele 2.1 Kuulile mõjuvate jõudude diagramm.....	13
Sele 2.2 Kuuli paiknemine rennil a) külgvaates, b) eestvaates.....	13
Sele 2.3 Alalisvoolumootori skeem	15
Sele 3.1 H-silla elektroonikaskeem.....	23
Sele 3.2 Raami plaat millele kinnitub potentsiomeeter.....	23
Sele 3.3 Raami plaat millele kinnitub mootor	24
Sele 3.4 Võll millele kinnitub tala.....	24
Sele 3.5 Diferentsvõimendi skeem	26
Sele 3.6 Kuuli positsiooni anduri skeem	27
Sele 3.7 Pingeregulaatori skeem	28
Sele 4.1 Vastu-elektromotoorjõud mootori seismajäämisel.....	31
Sele 5.1 Simulatsiooni siirded.....	34
Sele 5.2 Paralleel PI juhtimise simulatsiooniskeem	34

TABELITE LOETELU

Tabel 3.1 Draiveri väljundpinge polaarsus.....	22
Tabel 4.1 Staatilise hõõrdemomendi määramine	30
Tabel 4.2 Süsteemi parameetrite suurused ja määramise viisid	32

SISSEJUHATUS

Kuul-rennil tasakaalustend on laialtlevinud labori- ja õppevahend, mille võib leida peaaegu igast juhtimissüsteemidega tegelevast ülikoolist. Stend koosneb mootori võllile keskkohast kinnitatud talast / rennist, millele asetatud kuul saab tala suhtes ühedimensiooniliselt vabalt edasi-tagasi veereda. Stendi eesmärgiks on sobiva tagasiside kaudu kontrollida mootori võlli ning sellega omakorda tala nurka maapinna suhtes, et stabiliseerida kuul renni mistahes punktis.

Antud süsteemi teeb oluliseks üks tähtis omadus: ebastabiilsus tagasisidestamata juhtimisel. Ebastabiilsete süsteemide valesti juhtimisel võivad tagajärjed olla katastroofilised ning eksperimentide tegemine reaalse süsteemidega on laboris tihtipeale võimatu. Mõned näited ebastabiilsetest süsteemidest:

1) Kanderaketide juhtimist seostatakse eelkõige teise populaarse laborivahendi: pöördpendliga[1], mis kujutab endast horisontaalselt liigutatavat pendlit, mille raskuskese on pöörlemisteljest kõrgemal. Raketi hoidmiseks õigel trajektoorigil tuleb teda pidevalt juhtida ristsihis mõjuvate jõududega.

2) Aeronautikas öeldakse, et õhusõiduk on positiivse stabiilsusega, kui peale lennukõrguse valimist, hoiab ta seda ka ilma välise juhtimiseta. Häiringu esinemisel taastab sõiduk valitud kõrguse harmoonilise sumbuva võnkumisega. Tavaliselt on õppelennukid positiivse stabiilsusega. Tänapäevased peitetehnoloogiaga varustatud militaarlennukid on oma ebatavalise kuju tõttu ebastabiilsed. Häiringute esinemisel võngub sõiduk soovitud kõrguse ümbruses kasvava amplituudiga. Selliste lennukite stabiilseks lendamiseks on vajalik pidev juhtimine.

Süsteemi lihtsasti mõistetavus ja võimalus juhtimisel rakendada paljusid klassikalisi ning modernseid juhtimisalgoritme teeb kuul-rennil stendist väga olulise õppevahendi.

Kuul-rennil tasakaalustend on populaarne diplomi- ning uurimistööde teema. Täpsem ülevaade koos nende tööde eeliste ja puudustega on tehtud põhiosa esimeses peatükis.

Käesoleva töö eesmärgiks on projekteerida ja konstrueerida tasakaalustend, millel saaks erinevate juhtimisalgoritmidega eksperimenteerida.

Töö põhiosa on jaotatud kuueks peatükiks:

1. peatükis tehakse ülevaade varasemalt teostatud olemasolevatest lahendustest, tuuakse välja nende eelised ja puudused.

2. peatükis pannakse kirja süsteemi matemaatiline mudel. Selleks vaadeldakse süsteemi osade vahelisi seoseid kolmes osas: kuuli dünaamika, mootori dünaamika ning jõumomendi tasakaal. Teostatakse süsteemi lineariseerimine ja koostatakse olekumudel.
3. peatükis valitakse stendi ehitamiseks sobivad komponendid: raam, tala, mootor, draiver, mikrokontroller, andurid kuuli positsiooni ja tala nurga määramiseks.
4. peatükis määratakse süsteemi olulised parameetrid ja leitakse lõplik olekumudel.
5. peatükis simuleeritakse Simulinkis näidisalgoritm süsteemi mudeli juhitavuse kontrollimiseks.
6. peatükis pakutakse välja arendamisvõimalusi loodud stendile.

1 ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST LAHENDUSTEST

1.1 Massachusettsi Tehnoloogiainstituut

Massachusettsi Tehnoloogiainstituudi (Edaspidi MIT) mehaanikateaduskonna BSc diplomitööna valmistatud[2] ning hiljem BSc diplomitööna täiendatud[3] õppekomplektide eesmärk oli luua juhtimissüsteemide sissejuhatavate kursuste tarbeks mõistliku hinnaga standid, millel õpilased saaks ise juhtimisalgoritme katsetada.

Algne stend koosnes kahest paralleelselt paigutatud plastraamist, mida ühendas võll, millele omakorda oli kinnitatud pärnapuust renn. Ühele raamile kinnitus alalisvoolumootor, mille pöörlamine edastati võllile hammasratasülekanega. Tala nurka mõõdeti mootori võllile kinnitatud enkooderiga. Kuuli asendit mõõdeti takistustraadist tehtud lineaarse potentsiomeetriga. Juhtimine oli teostatud analoogelektronikaga.

Algse töö autor tõi välja järgmised probleemid: Müra kuuli positsioonianduris ning hammasratasülekande ebapiisav jäikus. Kasutatud mootori pöörlamisulatus oli vaid 115° , mis omakorda piiras võimalikku ülekannet.

Need probleemid lahendas Ito enda diplomitöös. Ta ühendas sisseehitatud ülekanega mootori otse võllile, lahendades sellega robustsest ülekandest põhjustatud probleemid. Nurga andur asendati potentsiomeeriga, mis samuti ühendati otse võllile. Kuuli positsiooni mõõdeti lineaarse potentsiomeetriga, mis seekord koosnes plastist keermelatile keritud nikroom traadist. Traadi pikkusega võrdeliselt kasvab ka takistus, mis oluliselt vähendas tarbimist. Traadi kerimisega keermelatile jäid keerdude vahelised kaugustd ühtlaseks ja säilitati positsiooni ning pinge lineaarne suhe. Täiustamist vajava kohana mainib autor vaid elektroonikakomponentide arvu vähendamist juhtskeemis.

1.2 Lakehead Ülikool

Lakeheadi ülikooli elektrotehnika teaduskonna kursusetööna[4] valminud kuul-rennil tasakaalustend sarnanes disainilt MIT õppekomplektidele. Erinevusena saab välja tuua materjalivaliku: nii raam kui ka renn olid tehtud alumiiniumist, tala mass oli suhteliselt suur, umbes 500 grammi. Anduritena oli samuti kasutatud pöördpotentsiomeetrit tala nurga määramiseks ja lineaarset takistustraadist potentsiomeetrit kuuli positsiooni määramiseks.

Mootorina kasutati DFS-106-05 laserprinterites kasutatud servomootorit, millel oli 25:1 hammasratasülekanne. Süsteemi juhtimiseks kasutati analoogelektronikaskeemi.

Probleemidena toodi välja kuuli positsioonianduri müra, lõtk mootori ülekandes ning hõõrdumine mootoris.

1.3 Adelaide Ülikool

Adelaide ülikooli masinaehituse teaduskonnas MSc lõputööna valminud[5] kuul-rennil stendi loomisel on arvesse võetud varasemalt mainitud töid. Raam ja renn on tehtud alumiiniumist, viimasele on omakorda lisatud plastist renn, et elektriliselt isoleerida takistustraadist tehtud positsiooniandur. Erinevalt varasematest töödest oli renni toetav võll kinnitatud vaid ühest otsast, mis tekitab painutava koormuse mootori võllile. Mootorina kasutati RH-11D-3001-E100-AO Harmonic drive DC mootorit, millel oli 100:1 hammasratasülekanne ning optiline enkooder. Süsteemi digitaalseks juhtimiseks kasutati Quanser Q4 andmehõive- ja juhtimisplaati.

Ainsa arendust vajava probleemina toob autor välja takistustraadi ning kuuli vahelise hõõrdumise mittearvestamist. Väikeste tala nurkade korral on hõõrdumine piisavalt suur, et takistada kuuli veeremist.

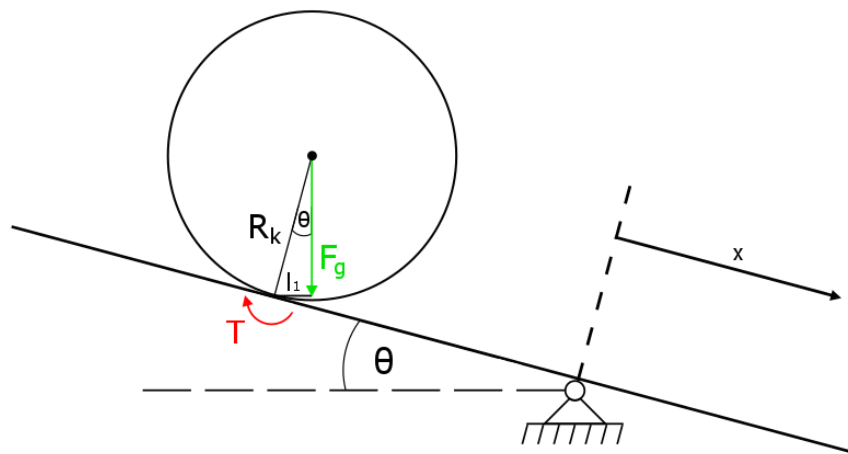
2 SÜSTEEMI MODELLEERIMINE

2.1 Kuuli mudel

Kuuli dünaamika modelleerimisel lähtutakse jõudude tasakaalust staatilises olukorras ning Newtoni 2. seaduse analoogiast pöördliikumise kohta.

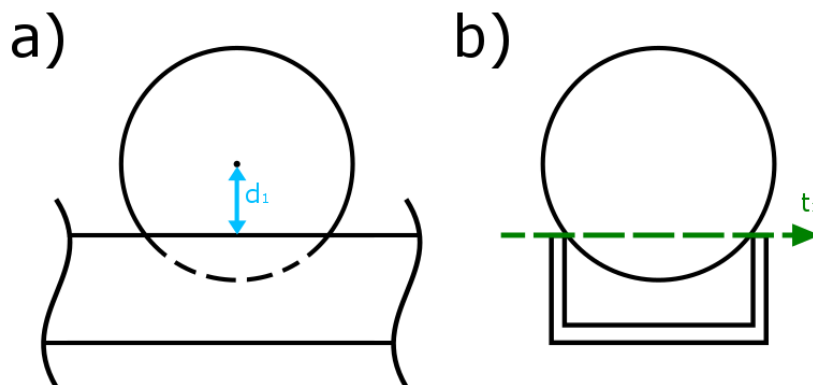
Eeldused:

- 1) Kuuli veeremine toimub libisemata.
- 2) Pindade deformeerumisest tulenevad energiakaod on tühiselt väikesed.



Sele 2.1 Kuulile mõjuvate jõudude diagramm

Kuna kuul paikneb osaliselt rennis sees, tuleb inertsi- ja jõumomendi arvutamisel arvestada masskeskme ning puutepunkti kõrguste vahet d_1 tegeliku pöörlemisraadiusena.



Sele 2.2 Kuuli paiknemine rennil a) külgsaates, b) eestvaates

Pöörlemist vaadeldakse ümber puutepunkti läbiva telje t_1 . (vt Sele 2.2)

Pöörlemist põhjustab masskeset läbiv gravitatsioonijõud F_g , mis tekitab õlaga l_1 jõumomendi T .

Jõu õlaks l_1 on puutepunkti horisontaalne kaugus masskeskmest.

$$l_1 = d_1 \sin \theta \quad (2.1)$$

Gravitatsioonijõu $F_g = mg$, kus m on kuuli mass ja g on raskuskiirendus, ja õla l_1 korrutisest avaldub jõumoment T .

$$T = F_g l_1 = mgl_1 = mgd_1 \sin \theta \quad (2.2)$$

Kuuli inertsimoment J_{kuul} telje t_1 suhtes arvutatakse Huygens-Steineri paralleelsete telgede teoreemi kaudu. Esimene liidetav on kuuli inertsimoment oma masskeskme suhtes ning teine liidetav võtab arvesse pöörlemistelje nihet masskeskme suhtes.

$$J_{kuul} = \frac{2}{5}mR_k^2 + md_1^2 \quad (2.3)$$

Kus R_k on kuuli raadius.

Nurkkiirendus α ümber telje t_1 avaldub momendi T ning inertsimomendi J_{kuul} kaudu.

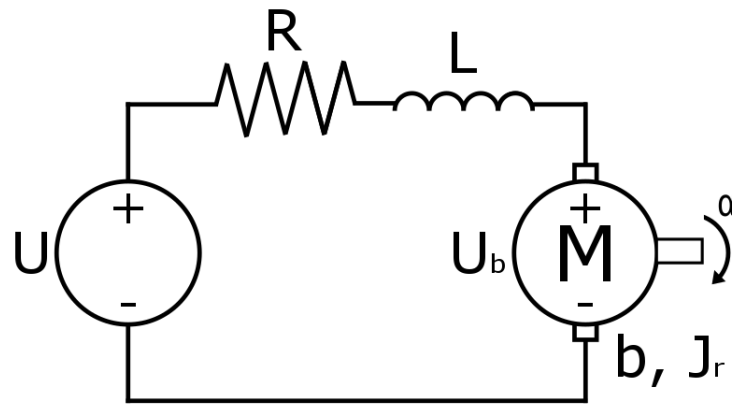
$$\alpha = \frac{T}{J_{kuul}} = \frac{mg d_1 \sin \theta}{\frac{2}{5}mR_k^2 + md_1^2} = \frac{5g \sin \theta}{2R_k^2 + 5d_1^2} \quad (2.4)$$

Eeldades libisemata veeremist avaldub masskeskme kiirendus \ddot{x} nurkkiirenduse α ja pöörlemisraadiuse d_1 kaudu.

$$\ddot{x} = \alpha d_1 = \frac{5g d_1^2 \sin \theta}{2R_k^2 + 5d_1^2} \quad (2.5)$$

2.2 Alalisvoolumootori mudel

Käesoleva ülesande lahendamiseks on süsteemi täituriks valitud püsimagnetitega ja harjadega alalisvoolumootor, eelkõige lihtsa modelleeritavuse ning juhtimisloogika tõttu.



Sele 2.3 Alalisvoolumootori skeem

Mootori väljastatav moment T_l avaldub seosest:

$$T_1 = K_T I \quad (2.6)$$

Kus mootori momendikonstant K_T näitab kui suure jõumomendi väljastab mootor, kui mähist läbib vool I .

Võttes arvesse rootori inertsimomenti J_m , mis mõjutab kogumomenti Newtoni 2. seaduse analoogia pöörliikumise kohta järgi ning viskoosse hõõrdumise tegurit b , mille mõju momendile sõltub rootori pöörlemiskiirusest, saab mootori võlli kogumomendile T_m järgmise seose:

$$T_m = K_T I - J_m \ddot{\alpha} - b \dot{\alpha} \quad (2.7)$$

Kus $\dot{\alpha}$ ja $\ddot{\alpha}$ on vastavalt rootori nurga muutumise kiirus ning kiirendus.

Mootori vastu-elektromotoorjõud U_B avaldub seosest:

$$U_B = K_B \dot{\alpha} \quad (2.8)$$

Konstant K_B näitab kui suurt vastu-elektromotoorjõudu tekitab mootor pöörlemiskiiruse $\dot{\alpha}$ juures. Selline vastu-elektromotoorjõu teke on põhjustatud mähise pöörlemisest magnetväljas, mida selgitavad Faraday seadus ja Lenzi reegel.

Alalisvoolumootori vooluringi Kirchoffi vooluseaduse põhjal analüüsides saab seose:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + K_B \dot{\alpha} \quad (2.9)$$

Kus U on mootorile antav sisendpinge, R on mähise takistus ja IR pingelang mähisel. $L \frac{dI}{dt}$ on mähise induktiivsusest L ning $K_B \dot{\alpha}$ on mähise magnetväljas pöörlemisest tulenev vastuelektromotoorjõu komponent.

Kuna mootori mähise induktiivsus L on väga väike, umbes mõni mH, siis võib selle komponendi arvestamata jätta. Valem (2.9) võtab kuju:

$$U = IR + K_B \dot{\alpha} \quad (2.10)$$

Valemist (2.10) saab avaldada voolutugevuse I püsitöörežiimis:

$$I = \frac{U - K_B \dot{\alpha}}{R} \quad (2.10a)$$

2.3 Jõumomentide tasakaal

Kuuli massist põhjustatud momendi T_k saab avaldada seosega:

$$T_k = xmg \cos \theta \quad (2.11)$$

Kus

x – kuuli kaugus tala keskpunktist

m – kuuli mass

g – raskuskiirendus

θ – tala kaldenurk

Talale mõjub mootori, peale reduktorit, väljastatav ning kuuli massist põhjustatud momentide summa.

$$T_t = T_r + T_k \quad (2.12)$$

Tala jõumoment T_t avaldub tala inertsimomendi J_t ning tala nurkkiirenduse $\ddot{\theta}$ kaudu.

$$T_t = J_t \ddot{\theta} \quad (2.13)$$

Tala kaldenurk θ on võrdne reduktori võlli nurgaga.

Mootori väljastatav moment võimendub reduktoris $K_r * \eta$ korda, kus K_r on ülekandetegur ja η reduktori efektiivsus. Valem (2.12) võtab kuju:

$$T_t = K_r \eta T_m + T_k \quad (2.14)$$

Viimane valem kehtib eeldusel, et alati $\frac{T_t - T_k}{K_r \eta} < T_m$, see tähendab, et tala ja kuuli liikumisest tulenev moment pole kunagi piisavalt suur, et mootori võlli iseseisvalt liigutada.

Valemitest (2.7), (2.11), (2.13) ja (2.14) saab välja kirjutada seose:

$$J_t \ddot{\theta} = K_r \eta (K_T I - J_m \ddot{\alpha} - b \dot{\alpha}) + x m g \cos \theta \quad (2.15)$$

Mootori ja reduktori võllide kiirused sõltuvad üksteisest proportsionaalselt ülekandeteguriga K_r :

$$\dot{\alpha} = K_r \dot{\theta} \quad (2.16)$$

Asendades viimase seose valemisse (2.15) ja tulemust korrastades, saab avaldada tala nurkkiirenduse $\ddot{\theta}$:

$$\ddot{\theta} = \frac{K_r \eta (K_T I - b K_r \dot{\theta}) + x m g \cos \theta}{J_t + K_r^2 \eta J_m} \quad (2.17)$$

Valemitest (2.10a), (2.16) ja (2.17) saab välja kirjutada seose, mis kirjeldab tala nurkkiirendust:

$$\ddot{\theta} = \frac{K_r \eta (K_T \frac{U - K_B K_r \dot{\theta}}{R} - b K_r \dot{\theta}) + x m g \cos \theta}{J_t + K_r^2 \eta J_m} = \frac{\frac{K_r \eta K_T}{R} U - \left(\frac{K_T K_B K_r^2 \eta}{R} + b K_r^2 \eta \right) \dot{\theta} + x m g \cos \theta}{J_t + K_r^2 \eta J_m} \quad (2.18)$$

2.4 Süsteemi lineariseerimine

Süsteemi olekute sõltumine funktsioonidest $\sin\theta$ ja $\cos\theta$ teeb selle mitte-lineaarseks. Lineaarsete, statsionaarsete (LTI) süsteemidele loodud juhtimisalgoritmide kasutamiseks tuleb teostada lineariseerimine tasakaaluasenduses $\theta = 0$ ümbruses.

Väikeste nurkade ($-\frac{\pi}{18} < \theta < \frac{\pi}{18}$) korral on lihtsustustest $\sin\theta \approx \theta$ ja $\cos\theta \approx 1$ tulenev maksimaalne viga 1.5%.

Valemid (2.5) ja (2.18) võtavad kuju:

$$\ddot{x} = \frac{5gd_1^2\theta}{2R_k^2 + 5d_1^2} \quad (2.5a)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\frac{K_r\eta K_T U}{R} - \left(\frac{K_T K_B}{R} + b\right) K_r^2 \eta \dot{\theta} + xmg}{J_t + K_r^2 \eta J_m} \quad (2.18a)$$

2.5 Olekumudel

Lineaarse pidevaja süsteemi olekumudel on esitatav järgmisel kujul:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (2.19)$$

Kus

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

on olekute vektor, milles

x ja \dot{x} on kuuli positsioon ning kiirus.

θ ja $\dot{\theta}$ on tala nurk ning nurkkiirendus.

\dot{X} on olekute esimesed tuletised aja järgi ja Y on väljundite vektor.

A on 4x4 süsteemimaatriks, mis näitab kuidas hetkeolekud mõjutavad olekute muutust \dot{X} .

B on 4x1 sisendmaatriks, mis näitab kuidas sisend mõjutab süsteemi olekute muutust \dot{X} .

C on 2x4 väljundmaatriks, mis väljendab olekute ja väljundi vahelist suhet.

D maatriks näitab sisendi otsest mõju väljundile.

Valemist (2.5a) ja (2.18a) saab välja kirjutada süsteemimaatriksi A.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5gd_1^2}{2R_k^2+5d_1^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{mg}{J_t+K_r^2\eta J_m} & 0 & 0 & -\frac{K_r^2\eta(K_T K_B+Rb)}{R(J_t+K_r^2\eta J_m)} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Valemist (2.18a) saab välja kirjutada maatriksi B.

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_r\eta K_T}{R(J_t+K_r^2\eta J_m)} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Käesoleva ülesande lahenduses on mõõdetavad kaks süsteemi olekut: kuuli asukoht x ja tala kaldenurk θ , seetõttu võtab maatriks C järgmise kuju:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sisend U ei mõjuta otseselt kuuli asendit x , seetõttu on D nullmaatriks.

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

See olekumudel on aluseks ülejäämis peatükis disainitavale juhtalgoritmile.

3 STENDI KOMPONENTIDE VALIK

Käesolevas peatükis valitakse või disainitakse stendi koostamiseks vajalikud komponendid: mootor, raam, kontrollid, andurid ja draiver. Eeldusena on arvestatud tala pikkuseks $L = 0,7$ m, kuuli massiks $m = 0,259$ kg, raadiuseks $R = 20 \cdot 10^{-3}$ m ja tala inertsimomendiks kinnituskoha suhtes $J_t = 13,4 \cdot 10^{-3}$ kg · m². Süsteemi olulised parameetrid ja nende määramise viisid on esitatud Tabel 4.2.

3.1 Mootor

Antud ülesande lahendamiseks sobivad täiturid on samm-mootor, servoajam või lisatud tagasisidega harjadega või harjadeta alalisvoolumootor.

Lihtsa mudeli ja juhtimisloogika tõttu on süsteemi täituriks valitud harjadega alalisvoolumootor. Peamised mootorile esitatud nõuded on sisendpinge suurus, maksimaalne väljastatav moment ning pöörlemiskiirus. Viimased kaks tuleb kooskõlastada mootori reduktoriga.

Sisendpingeks sobib 12V, kuna selliste mootorite valik on suur ja võimsus piisav.

Mootori momendi leidmiseks tuleb vaadelda tala pöörlemist juhul, kui kuul paikneb maksimaalsel kaugusel tala kinnituskohast.

Maksimaalne vajalik moment avaldub:

$$T_{m,max} = K(T_{k,max} + (J_t + J_{k,max})\ddot{\theta}) \quad (3.1)$$

kus K on varutegur, $T_{m,max}$ on mootori moment peale reduktorit, $T_{k,max}$ on kuuli asendi tõttu tekkiv moment, J_t on tala inertsimoment, $J_{k,max}$ on kuuli maksimaalne inertsimoment telje t_1 (Vt. Sele 2.2) suhtes ja $\ddot{\theta}$ on reduktori võlli ning ühtlasi ka tala nurkkiirendus.

$T_{k,max}$ avaldub valemist (2.11) kui kuuli positsioon on võrdne poole tala pikkusega $x = \frac{L}{2}$ ja tala nurk $\theta = 0^\circ$.

$$T_{k,max} = \frac{L}{2}mg\cos 0 = 0,35 \cdot 0,259 \cdot 9,81 \cdot 1 = 0,889 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Kuuli maksimaalne inertsimoment avaldub Huygens-Steineri paralleelsete telgede teoreemi kaudu:

$$J_{k,max} = \frac{2}{5}mR^2 + m\left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$J_{k,max} = \frac{2}{5} \cdot 0,259 \cdot 0,02^2 + 0,259 \cdot \left(\frac{0,7}{2}\right)^2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Vaadeldes tala pööramise nurkkiirendust konstantsena ja määrates $\frac{\pi}{18}$ kraadi pööramise ajaks, koos kiirendamise ja pidurdamisega, $t = 0,5 \text{ s}$, on võimalik ühtlaselt muutuva pöördliikumise võrrandist leida vajalik nurkkiirendus.

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta(0) + \dot{\theta}(0)t + \frac{\ddot{\theta}(t)t^2}{2} \\ \ddot{\theta}(t) = \text{const} \end{cases} \quad (3.3)$$

Liikumist alustatakse paigalseisust ning algpositsioonist, järelikult $\theta(0) = 0$ ja $\dot{\theta} = 0$, neid lihtsustusi arvesse võttes saab valemist (3.3) avaldada nurkkiirenduse $\ddot{\theta}$:

$$\ddot{\theta} = \frac{2\theta}{t^2} \quad (3.4)$$

Asendades suurused $\theta = \frac{\pi}{18}$ ja $t = 0,5 \text{ s}$ valemisse (3.4), saame:

$$\ddot{\theta} = \frac{2 \cdot \frac{\pi}{18}}{0,5^2} = 1,4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

Asendades leitud suurused valemisse (3.1) ja võttes varuteguriks $K = 3$ saame:

$$T_{m,max} = 3 \cdot (0,889 + (13,4 \cdot 10^{-3} + 32 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,4) = 2,86 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Esitatud tingimusi rahuldab MicroMotors E192 seeria 12V alalisvoolumootor, millele on lisatud 125:1 planetaarülekanne. Täpsemad mootori andmed on esitatud Tabel 4.2.

3.2 Mootori draiver

Antud süsteemi juhtimiseks on vajalik varieerida mootori sisendpinget, mille kaudu määratakse mootori pöörlemis-suund ja moment. See on teostatav PWM ehk pulsilaiusmodulatsiooniga juhitava H-sillaga. Transistoride erinevate lülitamiskombinatsioonidega on võimalik muuta pinge polaarsust ja PWM töötükliga keskmist pinget.

Populaarsemad juhtmikroskeemid väikestele mootoritele (Kuni 3A pidev ja 6A ajutine vool) on L298 ning LDM18200t. Esimese puhul on tegemist bipolaarseid transistore kasutava skeemiga, mis tekitab ~2V pingelangu ja seetõttu antud lahendus ei sobi.

National Instrumentsi LMD18200t skeemis kasutatakse MOSFET ehk isoleeritud paisuga väljatransistore, mis lülitatud olekus käituvad nagu väga väikese takistusega takistid ja seetõttu on raisku minev energia väike.

Kolmanda variandina saab eraldiseisvatest komponentidest ise disainida H-silla, sel juhul ei teki väikeste mootorite korral piiranguid voolutarbimisele: näiteks IRFZ44N N-kanaliga MOSFETi lubatud pidev vool toatemperatuuril on 49 A.

Käesolevas ülesandes on kasutatud just viimast varianti. Elektriskeem on saadud Lewis Loflini kodulehelt[6] ja on esitatud koos valitud komponentidega alapeatüki lõpus. (Vt. Sele 3.1)

Skeem koosneb kahest N-kanaliga ja kahest P-kanaliga MOSFETist, mida omakorda lülitatakse NPN bipolaarsete transistoridega. Pinge polaarsus on muudetav järgneva kahe lülitamiskombinatsiooniga:

Tabel 3.1 Draiveri väljundpinge polaarsus

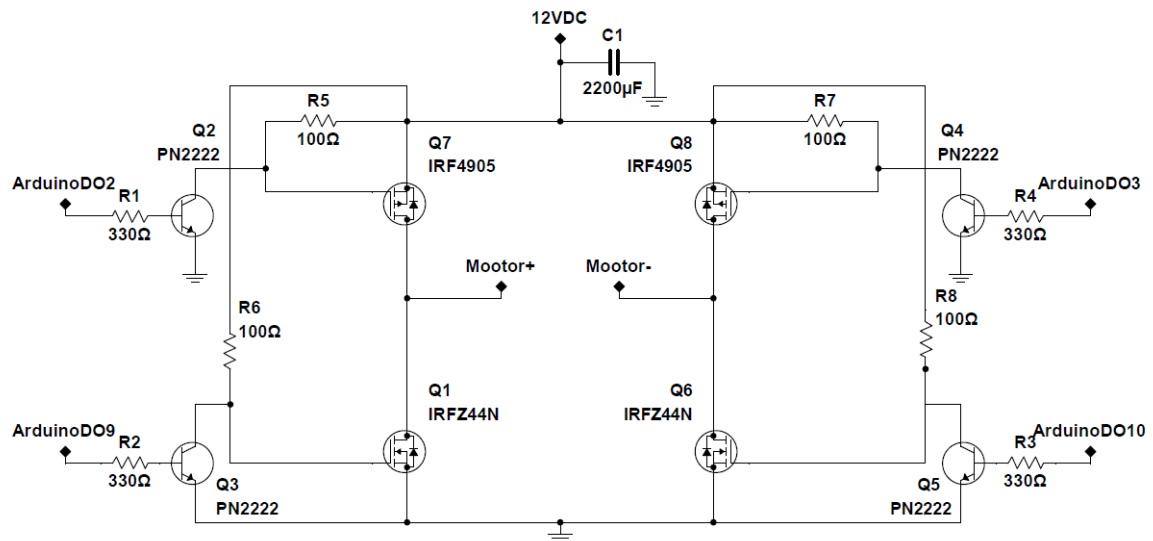
Mootor+	Mootor-	DO3	DO4	DO9	DO10
+VDC	0 V	1	0	1	1(PWM)
0 V	+VDC	0	1	1(PWM)	1

P- ja N-kanaliga väljatransistorideks on valitud vastavalt IRF4905 ja IRFZ44N, mõlema puhul on tegemist laialt levinud ja lihtsalt kättesaadavate komponentidega. MOSFETide lülitamiseks kasutatakse *pull-up* takisteid R5-R8 koos PN2222 bipolaarsete NPN transistoridega. PWM-iga juhitakse N-kanaliga väljatransistore, sest nende *gate* mahtuvus on väiksem: IRFZ44N sisselülitamisviide on $t_{d(on),N} = 12 \text{ ns}$ ja väljalülitamisviide $t_{d(off),N} = 44 \text{ ns}$ [7]. Seevastu IRF4905 on viited vastavalt $t_{d(on),P} = 18 \text{ ns}$ ja $t_{d(off),P} = 61 \text{ ns}$ [8]. Järelikult lülitub IRFZ44N kiiremini ja saavutatav PWM on puhtam.

Arduino Mega2560 sisend-väljundklemmide maksimaalne pidev vool on $I_{max} = 20 \text{ mA}$, valin NPN transistori baasi vooluks $I_B = 15 \text{ mA}$ ja saan takistite R1-R4 väärtusteks $R1 = R2 = R3 = R4 = \frac{U_{5V}}{I_B} = \frac{5}{0,015} \approx 330 \Omega$. PN2222 baasi voolu $I_B = 15 \text{ mA}$ juures on

kollektori ja emitteri vaheline maksimaalne vool $I_{CE} = 150 \text{ mA}$ [9], järelikult peavad *pull-up* takistite R5-R8 väärtused olema $R5 = R6 = R7 = R8 > \frac{U_{12V}}{I_{CE}} = \frac{12}{0,15} = 80 \Omega \approx 100 \Omega$.

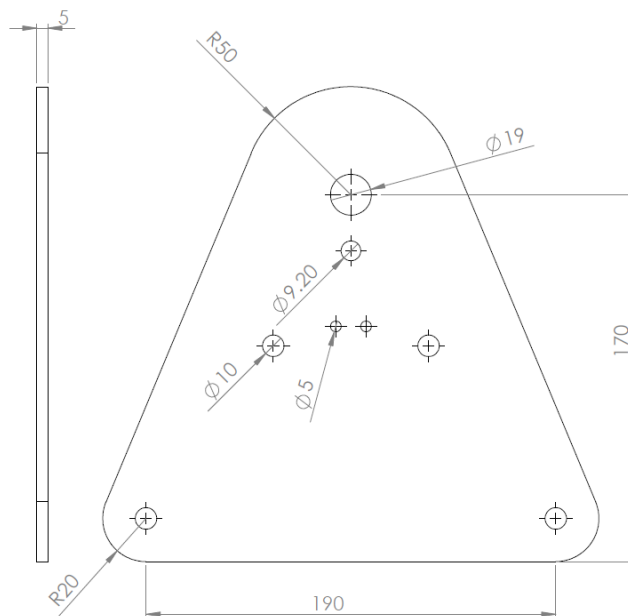
Takistitel R5-R8 eralduv soojus: $P_{R,pull-up} = U_{12V} \cdot I_{Pull-up} = 12 \cdot 0,12 = 1,44 \text{ W} \approx 2 \text{ W}$.



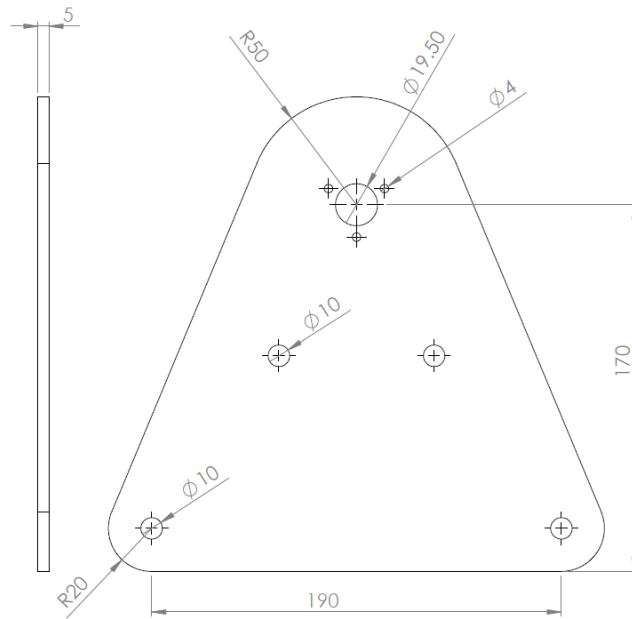
Sele 3.1 H-silla elektroonikaskeem

3.3 Raam

Varasemalt vaadeldud töodes on kasutatud kahte erinevat raami disaini: tala toestava võlli kinnitamine ühest[5] või mõlemast[2] otsast. Raami projekteerimisel on lähtutud MIT õppekomplektide lahendusest, kus tala on paigutatud kahe paralleelse plaadi vahele. Ühele plaadile on kinnitatud mootor ning teisele potentsiomeeter koos hammasratasülekandega. Plaadid on valmistatud 5 mm lehtterasest ja välja lõigatud laserpingis.

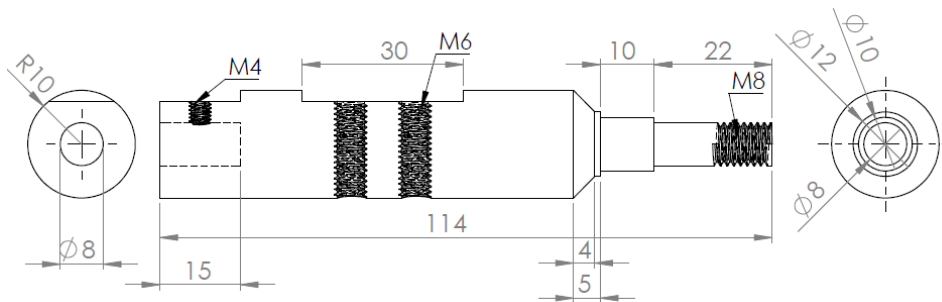


Sele 3.2 Raami plaat millele kinnitub potentsiomeeter



Sele 3.3 Raami plaat millele kinnitub mootor

Mootori ja potentsiomeetri ülekande ühendamiseks on treitud sobiv alumiiniumist võll, millele on tala lihtsasti kinnitatav.



Sele 3.4 Võll millele kinnitub tala

3.4 Mikrokontroller

Käesoleva töö eesmärgiks on luua kasutajasõbralik õppetend, millel saaks eksperimenteerida erinevate juhtimisalgoritmidega. Selleks sobib hästi MATLAB-Simulink keskkond, millele on sisse ehitatud tuhandeid matemaatilisi funktsiooniplokke, mille abil saab koostada ülesande lahendamiseks vajalikke algoritme.

MATLAB-i tarkvarale on võimalik paigaldada Arduino kontrollereid toetav teek, mis lisab Simulinki funktsiooniplokid, millega saab pöörduda arduino sisendite- ja väljundite poole, et lugeda sensorite väärtusi ja juhtida süsteemi täitureid.

Simulinki mudeli saab kontrollerile laadida kahel erineval viisil:

- Eraldiseisvaks opereerimiseks luuakse Simulinki mudeli põhjal kontrollerile kood, mis ei vaja pidevat ühendust arvutiga.
- *External mode* režiimi valimisel säilitatakse ühendus arvutiga ning kasutajale jääb võimalus reaajas jälgida andurite andmeid ning muuta mudeli parameetreid.

Väline režiim on väga hea abivahend mudeli parameetrite häälestamiseks, et jõuda sobiva soorituseni. Viimase kasutamine on võimalik järgmistel arendusplaatidel: Arduino Uno (Alates MATLAB 2017a versioonist), Arduino Leonardo, Arduino Mega2560 ja Arduino MegaADK.

Sellest valikust on otsustatud Mega 2560 kasuks. Tegemist on Atmel AVR ATmega2560 mikrokontrolleri baasil töötava plaadiga, mille suuremad mälad võimaldavad rakendada nõudlikumaid algoritme.

3.5 Tala nurga andur

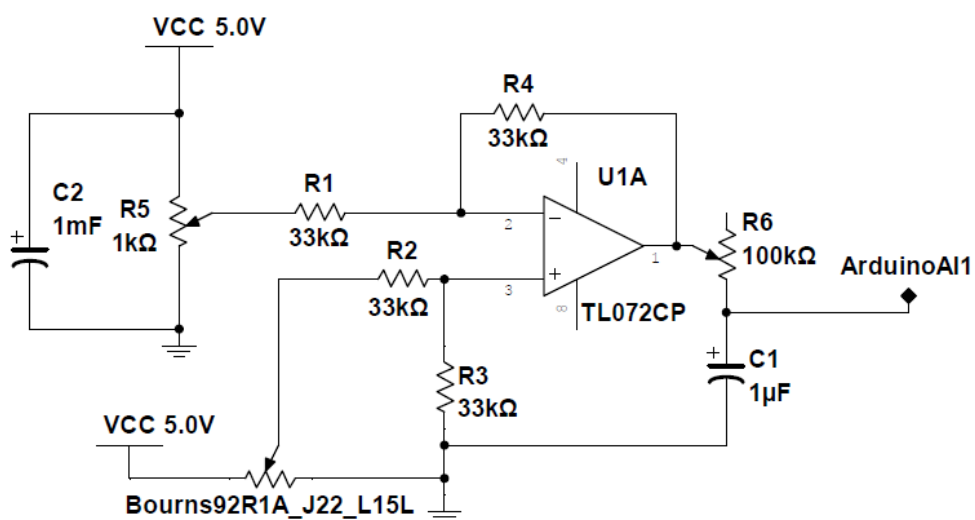
Nurga mõõtmiseks on kaks arvestatavat varianti: mootori võllile, enne reduktorit, kinnitatud enkooder või reduktori võlli pikendusele kinnitatud potentsiomeeter. MicroMotors E192-seeria mootorile ei ole toodetud spetsiaalselt sobivat enkooderit ja universaalsete enkooderite kinnitamine on tülikas. Lisaks tekib enkooderiga probleem pöörlemise nullkoha määramisega.

Sobiva lahendusena kasutatakse juhtiva plastikuga töötavat lineaarset potentsiomeetrit. Viimane võimaldab suuremat täpsust ja pikemat eluiga võrreldes süsinik, metallkeraamika või traatkeeret kasutavate pingejaguritega[10].

Bourns 92R1A-J22-L15L 10 kΩ lineaarse potentsiomeetri pöörlemisulatus on 300°. Kasutades toitepingena 5V ja võttes viitepingeks 1,2 V, on vaja potentsiomeetrit pöörata 24% ulatuses ehk $300^\circ * 0,24 = 72^\circ$. Võttes tala pöörlemisulatuseks 20° saame vajalikuks ülekandeguriks 1:3,6. Antud lahenduses on kasutatud 1:3,3 ülekannet, mis suurendab tala mõõdetavat pöörlemisulatust 2° võrra.

Arduino Mega2560 analoogsisendis on 10-bitine analoog-digitaalmuundur, mis jagab loetud pinge 1024 erinevaks väärtuseks. Sellise lahenduse puhul on ideaalolukorras võimalik tala nurka määrata $\frac{22^\circ}{1024} \approx 0,022^\circ$ täpsusega.

Selleks, et vältida potentsiomeetri purunemist juhul, kui tala nurk saavutab väärtuse $< -10^\circ$, tuleb vajalik pingelang 0 - 1,2 V tekitada pingejaguri keskosas. Potentsiomeetri liuguri klemmidele järgneb ühese võimendusteguriga diferentsvõimendi, mis võimaldab pinget lineaarselt nihutada. Ühene võimendustegur saadakse juhul kui takistid R1-R4 on võrdse väärtusega. Võimendi väljundisse on lisatud RC-madalpääsfilter, et saada puhtam signaal.



Sele 3.5 Diferentsvõimendi skeem

3.6 Kuuli positsiooni andur

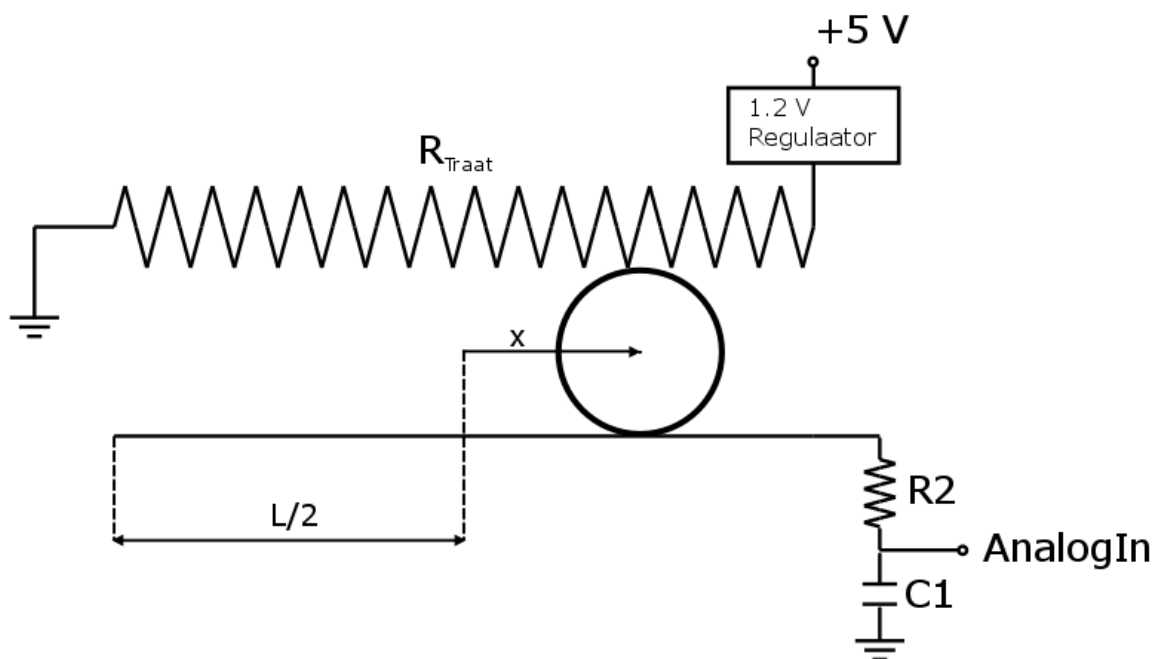
Positsiooni määramiseks on mitmeid võimalusi: ultraheli- või infrapuna kaugusandur, masinnägemine, takistustraadist tehtud lineaarne potentsiomeeter.

Ultrahelianduri kasutamisel tekib probleem, kus fikseeritakse ka kuuli ümbritsevad objektid, näiteks raam ja tala[2].

Infrapunaanduri nõrkusteks on piiratud ulatus: liiga lähedal olevaid objekte ei fikseerita ning kaugemal asuvate objektide kaugus määratakse suure veaga[3].

Masinnägemise kasutamine on kallis ja selle realiseerimine vajab suurt pingutust[5].

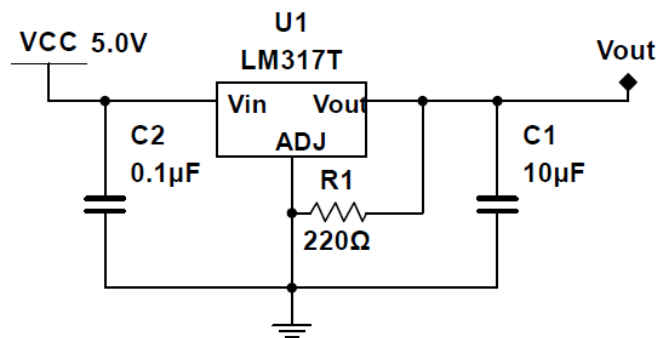
Kõik tööd, millest esimeses peatükis ülevaade on tehtud, kasutavad kuuli positsiooni määramiseks takistustraadist tehtud lineaarset potentsiomeetrit. See kujutab endast kahe paralleelse traadi kinnitamist renni servadele, mille peal saab kuul vabalt veereda. Üks pingestatakse ning teise traadi pealt mõõdetakse pingelangu, mis on lineaarselt proportsionaalne kuuli asendiga.



Sele 3.6 Kuuli positsiooni anduri skeem

Takistustraadina on kasutatud läbimõõduga $d = 0,5 \text{ mm}$ nikkel-kroom traati, mille takistus on $\frac{R}{m} = 6,88 \frac{\Omega}{m}$. Tala pikkus on $L = 0,7 \text{ m}$, ehk traadi takistus on $R_{traat} = 0,7 \cdot 6,88 = 4,8 \Omega$.

Peale 5V toitepinget on lisatud 1.2 V pingeregulaator, et vähendada anduri tarbitavat energiat. Sama pinget kasutatakse ka Arduino Mega2560 analoogsisendite viitepingena.



Sele 3.7 Pingeregulaatori skeem

LM317T on väljundpingega $V_{out} = 1,2 - 37 \text{ V}$ ja tarbija vooluga $I_{Load} = 1,5 \text{ A}$ pingeregulaator[11]. Väljundpinge on muudetav ADJ klemmi läbiva voolu reguleerimisega. Antud juhul on ADJ klemm ühendatud otse groundi, mis juhul on väljundpinge minimaalne, $V_{out} = 1,2 \text{ V}$.

Positsiooni signaal on filtreeritud passiivse RC-madalpääsfiltriga. Filtri kondensaatori C1 suurus on valitud $C1 = 4,7 \mu\text{F}$ ja takistina R2 on kasutatud $100 \text{ k}\Omega$ trimmer potentsiomeetrit. Filter on ostsilloskoobil signaale võrreldes sobiva tulemuseni häälestatud: Kondensaator on valitud piisavalt suur, et välja filtreerida olukorrad, kus kuuli ja traadi vahel kaob kontakt, kuid piisavalt väike, et reaalse ja filtreeritud signaali vahel ei tekiks suurt ajanihet.

4 SÜSTEEMI PARAMETRISEERIMINE

4.1 Mootori parameetrite määramine

Alalisvoolumootori mudeli täielikuks kirjeldamiseks on vaja määrata järgmised suurused: R – mootori mähise takistus, L – mootori mähise induktiivsus, b – viskoosse hõõrdumise konstant, K_T – mootori momendikonstant, K_B – vastu-elektromotoorjõu konstant ja J_r – rootori inertsimoment.

K_T , K_B ja R väärtused saab tootja poolt väljastatud karakteristikute dokumendist, mis on esitatud lisas 1.

$$K_T = 27,232 \frac{\text{mNm}}{\text{A}}$$

$$K_B = 27,232 \frac{\text{mVrad}}{\text{s}}$$

$$R = 2,15 \Omega$$

Induktiivsus on määratud multimeetriga: $L = 2,2 \text{ mH}$.

Viskoosse hõõrdumise teguri b saab arvutada valemist (2.7) kasutades karakteristikute dokumendist saadud infot mootori koormuseta vabajooksul. Sel juhul on mootori väljastatav moment $T_m = 0$ ja nurkkiirendus $\ddot{\theta} = 0$, ehk mähist läbiva voolu tekitatav moment peab kompenseerima vaid viskoosse hõõrdumise. Valem (2.7) lihtsustub kujule:

$$K_T I = b \dot{\theta} \quad (4.1)$$

Koormuseta vabajooksul on mähist läbiv vool $I = 0,207 \text{ A}$ ja nurkkiirus $\dot{\theta} = 4008 \text{ rpm} = 419,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Valemist (4.1) saab arvutada viskoosse hõõrdumise teguri:

$$b = \frac{K_T I}{\dot{\theta}} = \frac{0,027232 * 0,207}{419,7} = 1,3 * 10^{-5} \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$$

Rootori inertsimomendi J_m määramiseks elektriliste mõõtmistega on läbi viidud katse, mida on kirjeldatud artiklis „Determination of DC micro-motor characteristics by electrical measurements“ [12].

Mootori staatilise hõõrdemomendi määramiseks mõõdetakse mootori mähist läbivat voolu ja suurendakse sisendpinget seni kuni mootor liikuma hakkab. Sel hetkel on mähist läbiva voolu põhjustatud moment on võrdne hõõrdemomendiga:

$$M_F = K_T I \quad (4.2)$$

kus K_T on mootori momendikonstant, I on mähist läbiv vool ja M_F staatiline hõõrdemoment.

Voolu määramiseks teostati 4 katset, mille tulemused on esitatud järgnevas tabelis:

Tabel 4.1 Staatilise hõõrdemomendi määramine

Jrk nr	Vool I [A]	Staatiline hõõrdemoment M_F [mNm]
1	0,325	8,8
2	0,331	9,0
3	0,342	9,3
4	0,345	9,4
Keskmine	0,336	9,1

Rootori inertsimomendi J_m määramiseks vaadeldakse mootori käitumist vabajooksust peatumiseni. Peatumise lähedal ei tule arvestada viskoosset hõõrdumist, mis on võrdeline rootori pöörlemiskiirusega ning kehtib seos:

$$J_m \ddot{\theta} = -M_F \quad (4.3)$$

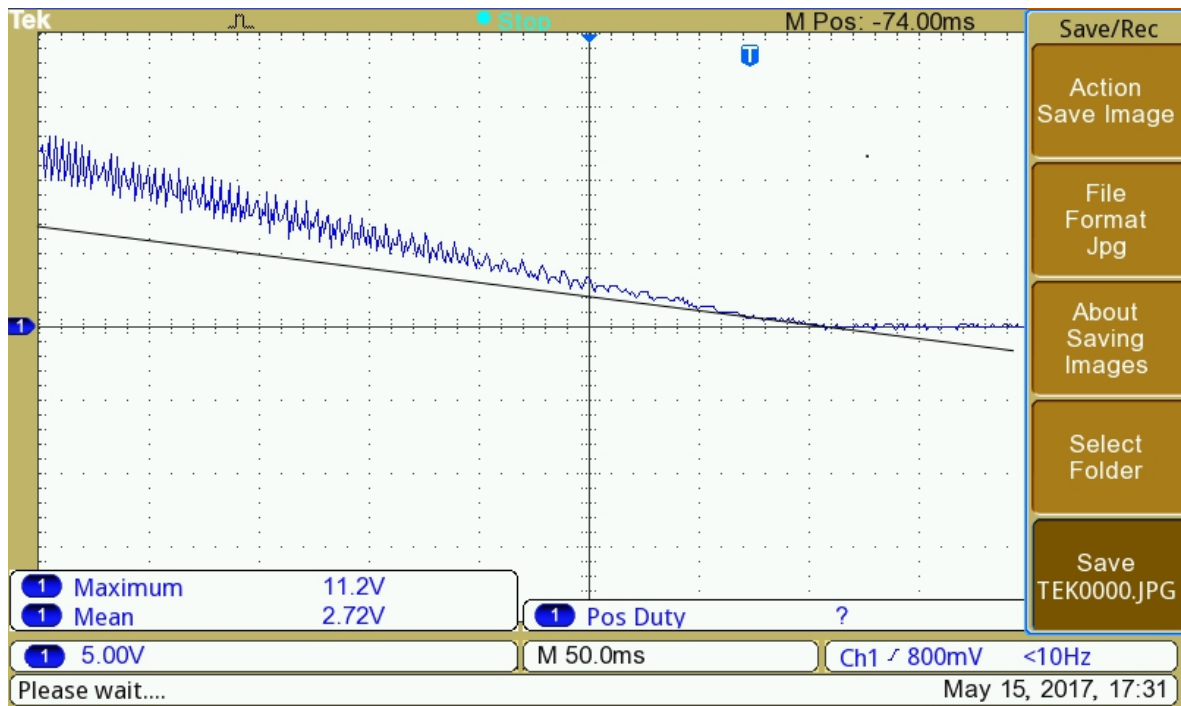
Rootori nurkkiirenduse määramiseks katkestatakse vabajooksus oleva mootori sisendpinge, mootor töötab edasi generaatorina ja tekitatud vastu-elektromotoorjõud on jälgitav ostsilloskoobiga. Peatumise lähedal saab $\dot{\theta}$ graafikule tõmmata puutuja, mille tõus on võrdne rootori kiirendusega sellel hetkel. Kui pikendada puutujat lõikumiseni U-teljega, saab tõusu leida valemist:

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \frac{-U}{K_B dt} \quad (4.4)$$

Valemitest (4.3) ja (4.4) saab leida rootori inertsimomendi J_m :

$$J_m = \frac{(-M_F) K_B dt}{-U} \quad (4.5)$$

Suurused $dt = t_{stop}$ ja U saab lugeda ostsilloskoobi mõõtetulemusest:



Sele 4.1 Vastu-elektromotoorjõud mootori seismajäämisel

Asendades suurused $M_F = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$, $K_B = 27,232 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$, $dt = t_{stop} = 350 \text{ ms} = 0,35 \text{ s}$ ja $U = 6,9 \text{ V}$ valemisse (4.5), saab leida rootori inertsimomendi J_m .

$$J_m = \frac{(-9,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 27,232 \cdot 10^{-3} \cdot 0,35}{-6,9} = 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.2 Arvutatud olekumudel

Tabel 4.2 Süsteemi parameetrite suurused ja määramise viisid

Jrk nr	Parameeter	Tähis	Suurus	Ühik	Määramise viis
1	raskuskiirendus	g	9,81	$m \cdot s^{-2}$	tuntud suurus
2	kuuli tegelik pöörlemisraadius	d_1	$14,4 \cdot 10^{-3}$	m	arvutatud
3	kuuli raadius	R_k	0,02	m	tootja määratud
4	kuuli mass	m	0,259	kg	kaal
5	tala inertsimoment	J_t	$13,4 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot m^2$	arvutatud
6	mootori momendikonstant	K_T	27,232	$mNm \cdot A^{-1}$	tootja määratud (vt. lisa 1)
7	mootori vastu-elektromotoorjõu konstant	K_B	27,232	$mV \cdot s \cdot rad^{-1}$	tootja määratud (vt. lisa 1)
8	rootori inertsimoment	J_m	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$kg \cdot m^2$	Eksperiment (vt. peatükk 4.1)
9	viskoosse hõõrdumise tegur	b	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$Nm \cdot s \cdot rad^{-1}$	arvutatud
10	mähise takistus	R	2,15	Ω	tootja määratud
11	mähise induktiivsus	L	2,2	mH	Multimeeter
12	Reduktiori ülekandetegur	K_r	125	-	tootja määratud
13	Reduktiori efektiivsus	η	0,48	-	tootja määratud

Tabel 4.2 esitatud suuruste asendamisel valemitesse (2.21) ja (2.22) saab leida süsteemi lõpliku olekumudeli:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5,5374 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 23,5476 & 0 & 0 & -24,8787 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 7,0432 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

5 SÜSTEEMI JUHTIMINE

Käesolevas peatükis disainitakse varasemates peatükkides kirjeldatud süsteemi õigsuse kontrollimiseks tagasisidestatud juhtimisalgoritm. PID algoritm on üks lihtsamaid tagasisidestatud juhtimisloogikaid, mis leiab rakendust paljudes erinevates tööstusharudes[13]. See kujutab endast seadesuuruse ja reaalse oleku erinevuse, ehk vea, dünaamilistest omaduste kaudu juhttoime leidmist. Juhttoime väärtus saadakse vea proportsionaalse, integraalse ja tuletusliku komponendi kaudu. Lihtsam, ainult proportsionaalse ja integraalse teguriga, variant saavutab küll seadesuurusega määratud olekud, kuid tuletusliku komponendi puudumine, mis ennustab vea käitumist lähitulevikus, suurendab siirdeaega[14].

5.1 Paralleelse PI kontrolleri simulatsioon

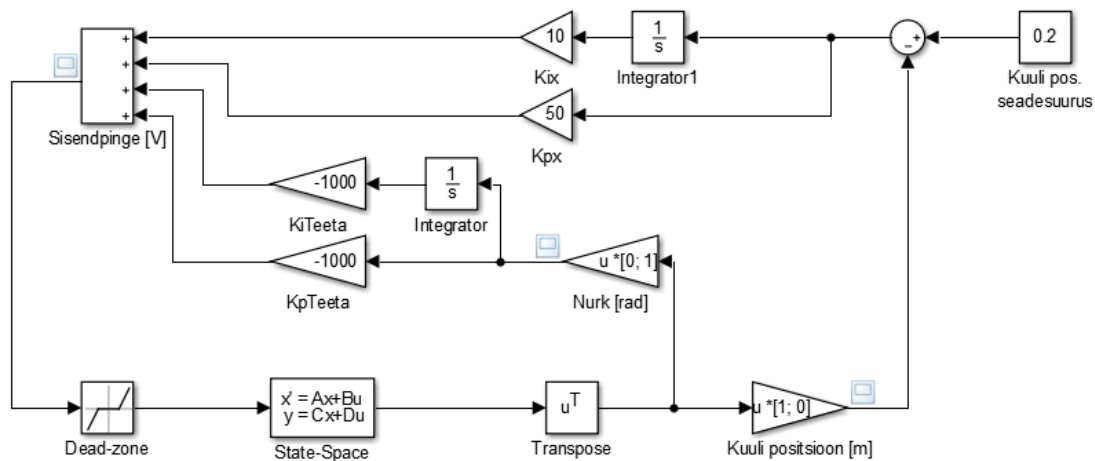
Juhtivuseks nimetatakse süsteemi välise sisendi omadust viia süsteem lõpliku aja jooksul mistahes algolekust arbitraarsesse lõppolekusse. Jälgitavuseks nimetatakse omadust määrata kõik süsteemi olekud mõõdetavate väljundite kaudu.

Süsteem on juhitav kui maatriksi $[B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$ astak on võrdne olekute arvuga.

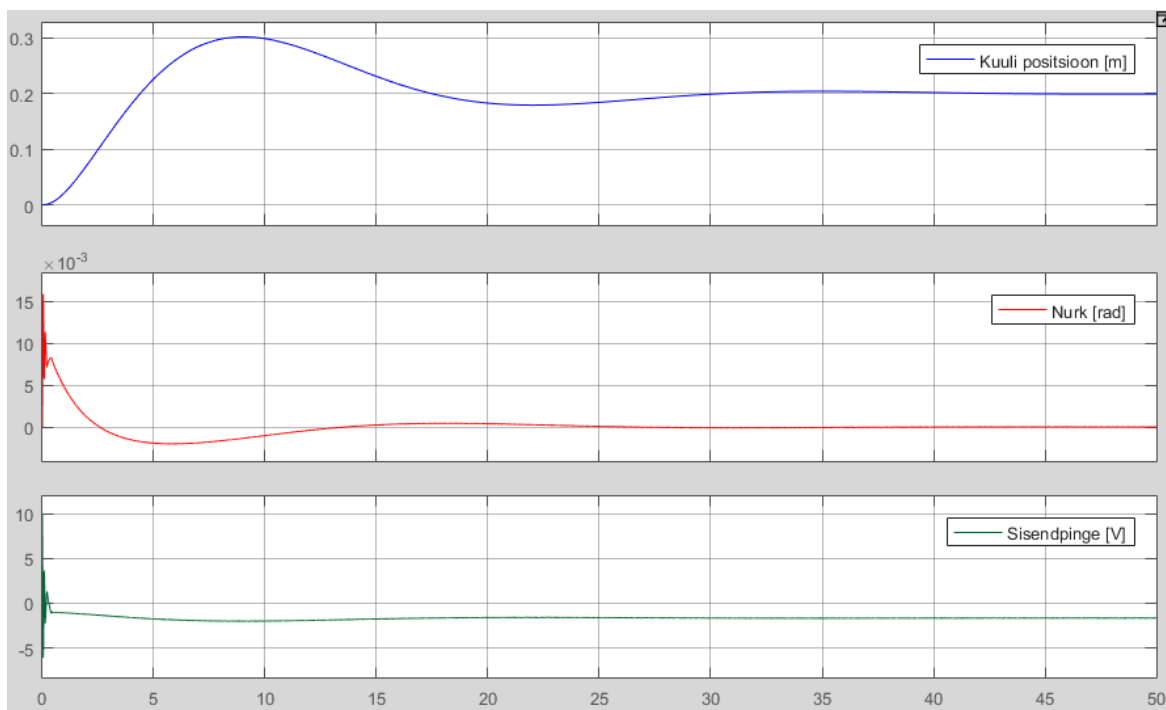
Süsteem on jälgitav kui maatriksi $\begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$ astak on võrdne olekute arvuga.

Alapeatükis 4.2 arvatud olekumudeli maatriksite korral kehtivad mõlemad tingimused.

Pall-rennil süsteemi stabiliseerimiseks on vaja kuuli positsioon viia soovitud seadesuurusele ning tala hoida paralleelsena maaga, ehk $\theta = 0^\circ$. Mõlema oleku juhtimiseks on vajalik rakendada kahte PI algoritmi paralleelselt, summeerides nende juhttoimed. Kuna varasemalt leitud mudelis pole arvestatud mootori staatilist hõõrdemomenti, mis takistab tala pöörama hakkamist väikeste sisendpingete $-1\text{ V} < U < 1\text{ V}$ juures, on simulatsiooniskeemi lisatud *Dead Zone* funktsioon, mis teisendab eelmainitud vahemikku jäävad pinged nulliks.



Sele 5.2 Paralleel PI juhtimise simulatsiooniskeem



Sele 5.1 Simulatsiooni siirded

Viimasel seel on näha, et kuul saavutab soovitud seadesuuruse 40 sekundiga. Samuti on kõik suurused lubatud piirides:

$$|x_{max}| = 0,3 \text{ m} < 0,35 \text{ m}$$

$$|\theta_{max}| = 15 \cdot 10^{-3} \text{ rad} < \frac{\pi}{18} \text{ rad}$$

$$|U| = 9 \text{ V} < 12 \text{ V}$$

6 EDASISED ARENDAMISVÕIMALUSED

6.1 Mehaaniline nurgapiiraja

Õppeprotsessi käigus on tavaline olukord, kus disainitud algoritmis esineb vigu ning süsteem ei käitu ootustele vastavalt. Antud stendi puhul on ohukohaks situatsioonid, kus tala pöördnurk läheb liiga suureks ja põhjustab kokkupõrke aluspinnaga. Vältimaks selliste olukordade teket, tuleks mootori ühe klemmi toitejuhtme vahele lisada jadamisi kaks normaalselt-suletud lülitit, mille kontaktid katkestab tala sattumine liiga kaugemale alguspunktist.

6.2 PI algoritmi eksperiment

Mudeli reaalsusele vastavuse kontrollimiseks tuleb 5. peatükis disainitud PI algoritmi kohandada tegeliku süsteemi juhtimisega. Selleks tuleb kalibreerida andurid ja luua draiveri loogika, mis ümberlülitamisel ei tekitaks lühist. Kasutusel oleva H-sillaga mootori suuna vahetamisel ei tohi tekkida olukorda, kus korraga on lülitatud MOSFETid Q1 ja Q7 või Q6 ja Q8.

Tulevaste algoritmidega eksperimenteerimiseks tuleks täiendada olekumudelit hõõrdemomentide arvestamisega.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli projekteerida ja konstrueerida tasakaalustend, millel saaks eksperimenteerida mitmete erinevate juhtimisalgoritmidega.

Esimeses peatükis on teostatud ülevaade varasemalt tehtud projektidest, toodud välja nende puudused ja eelised, mida on võimalik arvestada stendi loomisel.

Teises peatükis modelleeriti süsteem matemaatiliselt, tehes mõned lihtsustused. Näiteks ei ole arvestatud hõõrdemomentidega, mis on liikumisel ja seismisel on erineva väärtusega. Lisaks lineariseeriti süsteem, et saaks kasutada lihtsamaid juhtimisalgoritme.

Kolmandas peatükis projekteeriti ja valmistati stendi mehaanikalised ja elektroonikalised komponendid. Mootori reduktori võlli ja tala ühendamiseks on töödeldud TTÜ 5. korpuse töökojas sobiv võll. Anduritena on kasutatud nurga mõõtmiseks potentsiomeetrit ja kuuli positsiooni määramiseks takistustraadist tehtud potentsiomeetrit. Juhtimise realiseerimiseks kasutatakse Atmel AVR ATmega2560 baasil töötavat Arduino Mega2560 arendusplaati. Viimane on valitud eesmärgiga kasutada ära Simulinki Arduino kontrollereid toetav laiendus, mis võimaldab reaalajas jälgida ja häälestada juhtimisalgoritmi.

Neljandas peatükis määrati süsteemi kirjeldamiseks vajalikud parameetrid. Enamus mootori andmeid on saadavad andmelehel, kuid eraldi katse tuli teha rootori inertsimomendi määramiseks. Määratud parameetrite põhjal arvutati välja lõplik olekumudel.

Viiendas peatükis simuleeriti koostatud olekumudeli põhjal juhtimisalgoritm, millega kontrolliti süsteemi käitumist tagasisidestatud juhtimisel. Lihtsuse huvides kasutati esialgu tala nurga ja kuuli positsiooni juhtimiseks paralleelset PI algoritmi.

Lõputöö ei sisalda reaalse eksperimendi teostamist, milleks tuleb kalibreerida andurid ja koostada sobiv draiveri juhtimisloogika algoritm. Edasiste arendustena tuleks stendile lisada mehaanilised nurgapiirajad ning täiustada mudelit hõõrdemomentide arvestamisega.

Hästi loodud mudeli ja täpselt määratud parameetrite korral on tegemist võimeka õppevahendiga, millel saab rakendada paljusid klassikalisi ja modernseid juhtimisalgoritme.

SUMMARY

The goal of this thesis was to build a balancing system on which one could implement many different control strategies.

In first chapter the author provides an overview of previous projects, their pros and cons, which were taken into consideration in building the new device.

In second chapter the system was modelled mathematically, with couple simplifications. For example the model does not consider the effect of static and kinetic friction. The value of friction moment would be different if the system is stationary or in motion. Additionally the system was linearized for the opportunity to implement simpler control strategies.

In third chapter device's mechanical and electrical parts were designed and built. A shaft to connect gearbox with the beam was machined in the workshop of TUT 5th unit. The beam angle is measured with a rotary potentiometer and the position of ball on the is determined with a linear potentiometer built with resistive wire. Atmel AVR ATmega2560 based Arduino development board is used to control the system. The latter was chosen to make use of the Simulink Arduino toolbox add-on.

In fourth chapter real system parameters were determined. Most of the motor parameters are available in datasheet, but a separate experiment was carried out to determine the rotor moment of inertia. A final state-space model was calculated.

In fifth chapter a control algorithm was implemented on the calculated state-space model to check system response to feedback control. For simplicity's sake a parallel PI algorithm was used to control the angle of the beam and position of the ball.

Real experiment with the device was not included in this thesis. The sensors have to be calibrated and a control logic made for the driver in order to test the real system. Future development should include adding mechanical restrictions to the beam angle and improving the mathematical model with static and kinetic frictions.

Well derived model and accurately determined parameters make this a powerful learning device on which many classic and modern control algorithms can be implemented.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Bugeja, M. (2003). Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System. Msida. Malta Ülikool
2. Rosales, E. (2004). A Ball-on-Beam Project Kit: Bakalaureusetöö. Massachusettsi Tehnoloogiainstituut: Cambridge.
3. Ito, B. (2004). Stabilizing the Ball on Beam system with Analog Feedback: Bakalaureusetöö. Massachusettsi Tehnoloogiainstituut: Cambridge.
4. Ambalavanar, S., Moinuddin, H., Malyshev, A. (2006) Ball and Beam Balancer: Kursusetöö. Lakehead Ülikool: Ontario.
5. Wang, W. (2007) Control of a Ball and Beam System: Magistritöö Adelaide Ülikool: Adelaide.
6. Loflin, L. H-Bridge Motor Control with Power MOSFETs, [WWW]
http://www.bristolwatch.com/ele/h_bridge.htm (03.05.2017)
7. Infineon. IRFZ44N HEXFET Power MOSFET, [WWW]
<http://www.infineon.com/dgdl/irfz44n.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b3575220b>
(03.05.2017)
8. Infineon. IRF4905 HEXFET Power MOSFET, [WWW]
<http://www.infineon.com/dgdl/irf4905pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e329b1197e>
(03.05.2017)
9. Onsemi. General Purpose Transistors NPN Silicon, [WWW]
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/PN2222-D.PDF> (03.05.2017)
10. Louis, A. (1968) Potentiometer resistance device employing conductive plastic and a parallel resistance. USA patent US3393390A.
11. Onsemi. 3-Terminal Positive Adjustable Regulator, [WWW]
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM317T.pdf>

12. Horvath, P., Nagy, A. (2007) Determination of DC micro-motor characteristics by electrical measurements. Springer: Berlin.
13. Aaström, K. J., Hägglund, T. (2006) Advanced PID control. Lunds Universitet: Lund.
14. Rao, K. S., Mishra, R. (2014) Comparative study of P, PI and PID controller for speed control of VSI-fed induction motor. Shri Shankaracharya Technical Campus: Bhilai.

LISAD

Lisa 1 Micromotors E192-seeria alalisvoolumootori karakteristikud



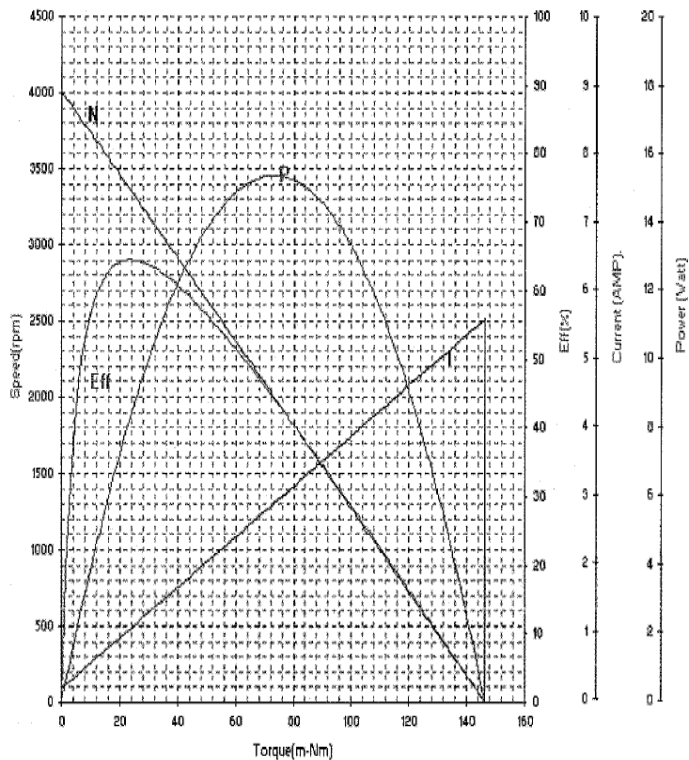
JOHNSON ELECTRIC INDUSTRIAL MANUFACTORY LTD.

Jahoren Building 4-22, Dal Shun Street, Tai Po, Hong Kong.

Excellence in Micromotors Since 1959

Date: 2008/02/21

Project No. HCS85L-1060232
Winding: 0.32 - 65



Simulation at 25 C

Motor tested rapidly to prevent significant temperature rise.

At a constant voltage of 12.00 Volts
With a circuit resistance 0.000 Ohms

At No Load

Speed: 4008 Rpm
Current: 0.207 Amp

At stall (Extrapolated)

Torque: 148.367 m-Nm
Current: 5.582 Amp

At maximum efficiency

Efficiency: 64.45 %
Torque: 23.660 m-Nm
Speed: 3360 Rpm
Current: 1.076 Amp
Output: 8.325 Watts

At maximum power

Torque: 73.183 m-Nm
Speed: 2003 Rpm
Current: 2.895 Amp
Output: 15.357 Watts

Characteristics

Torque Constant: 27.232 m-Nm/Amp
EMF Constant: 27.232 mV/rad/sec
Dy. Resistance: 2.160 Ohms
Motor Regulation: 27.392 Rpm/m-Nm

At Torque Level:

Torque: m-Nm

COMPUTER PRINT-OUT MICROMOTOR CURVES

Performance and characteristics are measured under limited level by CATD Simulation

Lisa 2 Valmis stendi fotod

