



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Labori balansseerimiseseadme moderniseerimine

BAKALAUREUSETÖÖ

MEHHATROONIKA ÕPPEKAVA

Üliõpilane	Erko Pettai
Üliõpilaskood	121135
Juhendaja	Leo Teder
Lõputöö kood	EE40LT

Tallinn, 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Lõputöös kasutatud kõik teiste autorite tööd ja seisukohad ning materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Leo Tederi juhendamisel

“.....” 2017 a.

Töö autor:

/allkiri/

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 2017 a.

Juhendaja:

/allkiri/

Lubatud kaitsmisele

“.....” 2017 a.

.....

/allkiri/

BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2017. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Erko Pettai, 121135

Õppekava: MAHB

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: Leo Teder, assistent

Konsultandid:

LÕPUTÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Labori balansseerimisseadme moderniseerimine

(inglise keeles) Modernization of Balancing Lab Test Rig

Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Pingi seisukorra hindamine	31.03.
2.	Liikuvate osade moderniseerimise analüüs	14.04.
3.	Mõõteseadmete moderniseerimise analüüs	28.04.
4.	Ühtse juhtsüsteemi analüüs	12.05.

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Analüüs TTÜ laboris oleva balansseerimisseadme töökorda viimiseks

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: eesti keel

Kaitsemistaotlus esitada hiljemalt **Töö esitamise tähtaeg** 25 mai 2017 a.

Üliõpilane Erko Pettai /allkiri/..... kuupäev

Juhendaja Leo Teder /allkiri/..... kuupäev

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. TEOREETILISED ALUSED	8
2. BALANSSEERIMISPINK	10
2.1 Balansseerimispingi ehitus	10
2.2 Balansseerimispingi hetkeolukord	10
3. JÕUÜLEKANNE	12
3.1 Jõuülekannde moderniseerimine	12
3.1.1 Ajami ja rootori ülekanne	12
3.1.2 Ajamite tüübid	13
3.1.3 Ajami valik	15
3.2 Pidurdussüsteem	17
3.2.1 Rootori pidurdamine	17
3.3 Disbalansi muutmine	17
4. ANDURID	19
4.1 Võnkeamplituudi mõõtmine	19
4.1.1 Andurite liigid	19
4.1.2 Asendianduri valimine	20
4.2 Rootori pöörlemiskiiruse mõõtmine	21
4.2.1 Pöörlemiskiiruse mõõtmine	21
4.2.2 Tahhomeetri anduri valik	22
4.2.3 Tahhomeetri ehitus	22
5. JUHTSÜSTEEM	24
5.1 Juhtsüsteemi kontrollid	24
5.1.1 Vajalikud liidesed	24
5.1.2 Kontrolleri valik	25
5.2 Mootori kontrollimine	25
5.2.1 Kiiruse reguleerimine	25
5.2.2 Mootori pidurdamine	26
5.3 Rootori kiiruse mõõtmine	26
5.3.1 Kontrolloriga liidestamine	26
5.3.2 Kiiruse lugemine	27
5.4 Võnkeamplituudi mõõtmine	27
5.4.1 Kontrolloriga liidestamine	27
5.4.2 Võnkeamplituudi lugemine	27
5.5 Ühtne juhtmoodul	28
5.5.1 Ekraani liidestamine	28
5.5.2 Juhtmooduli disain	29

6.	MAJANDUSLIK ANALÜÜS.....	30
6.1	Moderniseerimise maksumus	30
	KOKKUVÕTE	31
	SUMMARY	32
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	33
	LISAD	36
	Lisa 1 Tahhomeetri koodi näide.....	37
	Lisa 2 Võnkeamplituudi koodi näide	38

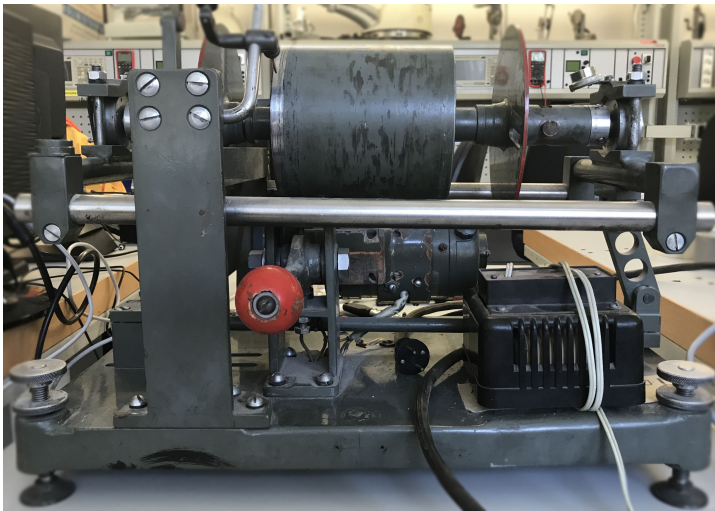
EESSÖNA

Käesoleva bakalaureusetöö näol on tegemist elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt pakutud lõputöö teema ning selle uurimisega.

SISSEJUHATUS

Pöörd- või sellekujulisel kehal peaks pöörlemiselg ühtima tsentraalse inertsipeateljega. Tegelikult võib pöördkehadel siiski esineda teatav tasakaalustamatus. Juhul kui tasakaalustamatust põhjustava disbalansi mass ja asukoht ei ole teada, tuleb pöördkehale eksperimentaalses korras leida vastavad korrigeerimisväärtused. See on võimalik spetsiaalsel seadmel, mida nimetatakse balansseerimispingiks.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis asub üks taoline seade. See oli varasemalt mõeldud laboratoorsete tööde ja praktikumide läbiviimiseks, kuid on täielikult amortiseerunud ning pole enam töökorras. Töö eesmärgiks on pakkuda insenertehniline lahendus, kuidas antud seade moderniseerida.



Sele 0.1 Balansseerimisping. Autori foto

Antud balansseerimisping pole enam täielikult komplektne, seega on töö eesmärk esialgu hinnata selle seisukorda. Seejärel vastavalt seadme lülide seisukorrale analüüsida nende seatud eesmärke, tuua välja võimalikud lahendusvariandid ning valida neist sobivaimad.

Töös olen jaotanud balansseerimispingi lülide moderniseerimise kolmeks: jõuülekanne, kus ma käsitlen rootori käitamiseks vajalikke seadmeid, andurid, kus ma analüüsin balansseerimispingilt infot mõõtvaid komponente ning juhtsüsteem, milles keskendun pingi juhtimiseks mõeldud ühtsele seadmele.

1. TEOREETILISED ALUSED

Vaatleme rootorit massiga m_0 , mis pöörleb konstantse nurkkiirusega ω ümber \mathbf{x} -telje. Sel juhul mõjub igale pöörlemisteljest kaugusel e_i paiknevale elementaarmassile m_i tsentrifugaalne inertsjõud F_i . Asendame elementaarinertsjõudude süsteemi rootori massikeskme S tasandis (tasand y - z) paikneva ekvivalentse süsteemiga, mis koosneb inertsjõudude peavektorist

$$\bar{F} = \omega^2 \sum m_i \bar{e}_i = \omega^2 m \bar{e}_s \quad (1.1)$$

kus \bar{e}_s – rootori massikeskme ekstsentrilisus

ja inertsjõudude peamomendist

$$\bar{M} = \omega^2 \sum m_i \bar{e}_i \bar{l}_i = \omega^2 \bar{J}_{el} \quad (1.2)$$

kus \bar{J}_{el} – rootori massi tsentrifugaalinertsmoment pöörlemistelje ja raskuskeskme tasandi suhtes

Rootoriga koos pöörlevad vektorid \bar{F} ja \bar{M} tekitavad vaadeldavas sihis perioodiliselt muutuvaid dünaamilisi toereaktsioone, mille tulemusel rootor hakkab võnkuma. Juhul kui taoline olukord tuleneb rootori massijaotusest, (st $\bar{F} \neq 0$ ja $\bar{M} \neq 0$), siis sellist rootorit nimetatakse tasakaalustamatuks.

Tasakaalustamatuse käsitluseks lähtutakse inertsjõu peavektori ja peamomendiga proportsionaalsetest suurustest, mida nimetatakse vastavalt disbalansside peavektoriks \bar{D}_S , kus

$$\bar{D}_S = \frac{F}{\omega^2} \quad (1.3)$$

ja disbalansside peamomendiks \bar{M}_D , kus

$$\bar{M}_D = \frac{M}{\omega^2} \quad (1.4)$$

Disbalansi all on mõeldud vektorit, mille määrab tasakaalustamata massi korrutis tema ekstsentrilisusega. [1, pp. 44-45]

Eristatakse järgnevaid tasakaalustamatuse liike:

Staatilise tasakaalustamatuse puhul on täidetud ainult esimene tasakaalustamatuse tingimus ehk tasakaalustamatuse määratleb täielikult \bar{D}_S . Sel juhul on rootori pöörlemistelg ja tsentraalne inertsipeatelg paralleelsed.

Momendist tuleneva tasakaalustamatuse puhul määratleb tasakaalustamatuse täielikult \bar{M}_D . Sel juhul, lõikuvad rootori pöörlemistelg ja tsentraalne inertsipeatelg rootori masskeskmes S.

Dünaamilise tasakaalustamatuse puhul on täidetud mõlemad tasakaalustamatuse tingimused \bar{D}_S ja \bar{M}_D . Rotori pöörlemistelg ja tsentraalne inertsipeatelg ei lõiku masskeskmes või nad on kiivsirged. [2, pp. 378-379]

Dünaamilist tasakaalustamatust saab väljendada ka teisiti. Valime kaks pöörlemisteljega risti paiknevat tasapinda ning lahutame disbalansside peavektori \bar{D}_S ja peamomendi \bar{M}_D neisse tasapindadesse komponentideks vastavalt \bar{D}_{S1} ja \bar{D}_{S2} ning \bar{D}_{M1} ja \bar{D}_{M2} . Liites mõlemas tasapinnas esinevad disbalansid saame vastavais tasapindades disbalansid \bar{D}_1 ja \bar{D}_2 . Need vektorid on üldjuhul moodulilt erinevad ja mitteparalleelsed, moodustades disbalansside risti.

Eelneva põhjal saab väita, et jäiga rootori disbalansside vähendamiseks on tarvis rootorile lisada (või eraldada) kaks korrektsoonimassi. Korrektsoonimassid paigutatakse samadesse tasapindadesse, kuhu eelnevalt redutseeriti tasakaalustamatust põhjustavad disbalansid \bar{D}_S ja \bar{M}_D . Pöörlemistelje tasapindu, kus asetseb korrektsoonimassikese, nimetatakse korrektsoonipindadeks.

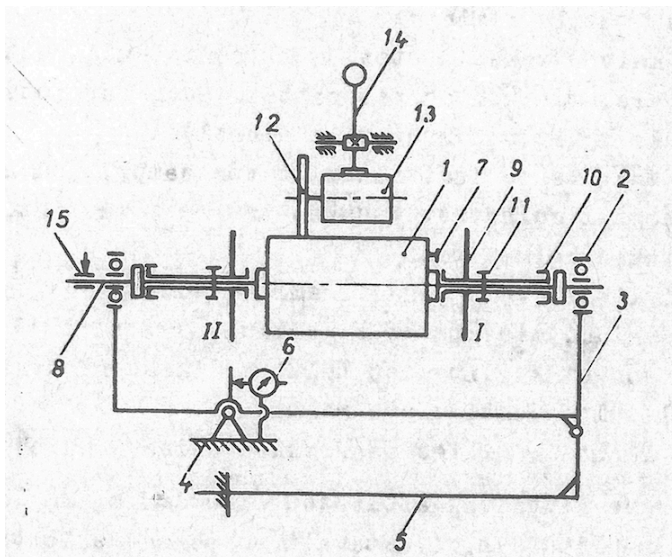
Korrektsioonipindades esinevate disbalansside ja nende nurkade määramist ning disbalansside vähendamist rootori massi korrektsooni teel nimetatakse rootori balansseerimiseks. Vastavalt tasakaalustamatuse liikidele on balansseerimise mooduseid kolm: staatiline, momendiga ja dünaamiline balansseerimine.

Täielikult balansseeritud rootoril puhul kehtivad $\bar{D}_S = 0$ ja $\bar{M}_D = 0$ ehk tsentraalne inertsipeatelg ühtib rootori pöörlemisteljega. Tegelikuses esineb balansseeritud rootoril ikkagi teatav tasakaalustamatus, mida väljendab vastavas rootori telje risttasapinnas esinev jääv disbalanss. Balansseerimise tulemus on rahuldav, kui jääv disbalanss osutub väiksemaks lubatavast disbalansist vaadeldavas ristpinnas. [1, pp. 46-47]

2. BALANSSEERIMISPINK

2.1 Balansseerimispingi ehitus

Balansseerimisping koosneb järgnevatest lülitest: balansseeritav rootor (1), mis toetub veerelaagrite (2) kaudu pendelraamile (3). Raami vasakpoolne ots ühendub šarniirselt kinnislüluga (4), parempoolne ots toetub elastsele vardale (5). Indikaator (6) võimaldab määrata võnkeamplituudi. Rootori otspinda kinnitatud poldiga (7) tekitatakse tasakaalustamatus. Rootori teljel asuvad kaks radiaalset väljalõigetega ketast (9). Ketaste pöördenurki mõõdetakse skaalalt (10) ja nende asend fikseeritakse kruviga (11). Rotor pannakse pöörlema elektrimootori (13) võllil asuva hõõrdrattaga (12). Kangi (14) alla vajutamisega käivitatakse mootor ja viiakse hõõrdratas rootoriga kontakti. Rootori seiskamiseks on telje vasakpoolsel otsal pidur (15). Lisaks on laboratoorse töö läbiviimiseks vajalikud lisamassid ning korrigeerimisliikmed. [1, pp. 56-57]



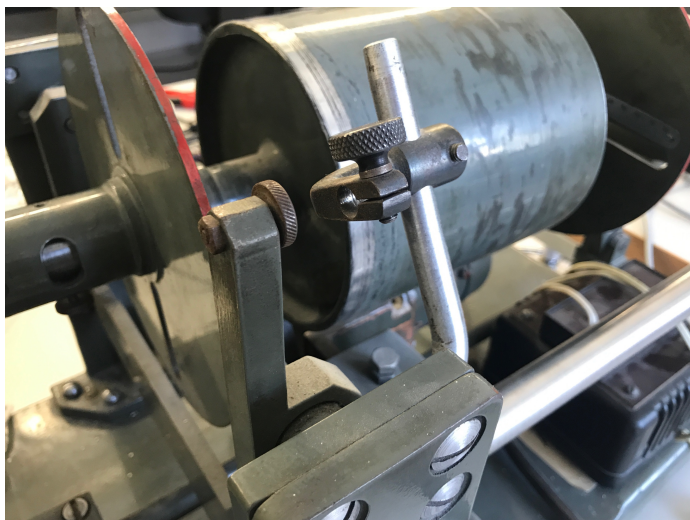
Sele 2.1 Kompleksne balansseerimisping [1, p. 57]

2.2 Balansseerimispingi hetkeolukord

Visuaalse analüüsi tulemusena on balansseerimispingil olemas järgnevad komponendid: veerelaagrite kaudu pendelraamile toetuv balansseeritav rootor, mis on omakorda šarniirse kinnislüli ja elastse varda abil ühenduses kinnislüluga. Rootori otspinda on fikseeritud tasakaalustamatust tekitav polt. Rootori teljel on mõlemad lisa- ja balansseerimismasside kinnitamiseks mõeldud radiaalsete väljalõigetega kettad kompleksed koos ketaste pöördenurkade mõõtmise skaalade ja kinnituskruvidega. Olemas on ka rootori pöörlema panemiseks mõeldud elektrimootor koos

ülekaneks kasutatava hõõdratta ning mootori käivitamiseks ning rootoriga kontakti viimiseks kasutatava kangiga.

Pingilt on puudu võnkeamplituudi määramiseks mõeldud indikaator, alles on indikaatori kinnitamiseks mõeldud haarats. Samuti on puudu rootori seiskamiseks mõeldud pidur.



Sele 2.2 Indikaatori haarats. Autori foto

3. JÕUÜLEKANNE

3.1 Jõuülekannde moderniseerimine

Rootori liikuma panekuks tuleb lahendada 2 suuremat ülesannet, milleks on ajam ning jõuülekanne. Lisaks tuleks lahendada ohutuse tagamiseks ka mootori ja rootori seiskamise ehk pidurdamise vajadus.

3.1.1 Ajami ja rootori ülekanne

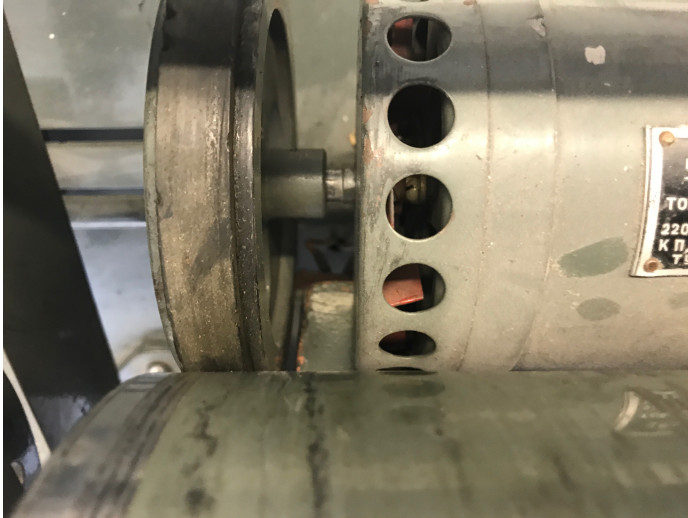
Originaalis on rootori ja ajami ülekanne lahendatud lihtsa hõõrdülekandega, kus jõu abil surutakse elektrimootori võlli otsa kinnitatud kummist kattega ülekandeketas vastu rootori keret, pannes selle seeläbi liikuma. Mootori uuendamisel võib kaaluda ka uut ülekandeüsteemi. Järgnevas on võrdlus hõõdratta, hammasülekannde ning rihmülekannde eeliste ning puuduste vahel balansseerimismasina ülekandeajamina.

Tabel 3.1 Rootori ülekannete võrdlus

Ülekannde tüüp	Eelised	Puudused
Hõõdratas	Lihtne ühendada ning lahutada jõu rakendamisel Tasakaalustamatusest tuleneva võnkumise puhul ei vaja rootori fikseerimist	Eeldab jõu rakendamist ühendamiseks ÜlekanDEL suuremad kaod
Rihmülekanne	Väiksemad kaod kui hõõdrattal Rootori fikseerimisel ei oleks vaja ülekannde ajal jõudu rakendada	Eeldaks rootori raami fikseerimist ülekannde ajaks Ei ole võimalik täielikult lahutada, võib mõjuda rihma kahjustavalt
Hammasülekanne	Kõige väiksemad kaod ülekanndmisel Rootori fikseerimisel ei oleks vaja ülekannde ajal jõudu rakendada	Lahutamine keerulisem kui hõõdrattal Eeldaks rootori raami fikseerimist ülekannde ajaks Hambumisega võivad tekkida probleemid

Tabelist lähtuvalt on hammasülekannde ja rihmülekannde eelised ja puudused suhteliselt sarnased. Hammasülekannde puhul võivad lisanduda hambumisest tulenevad tõrked samas kui rihmülekannde puhul ei ole ülekannde täielikult lahutamine võimalik, mis võib tekitada täiendavat rihma kulumist.

Lähtuvalt eelnevast infost jätan ülekandesüsteemiks endiselt hõõdratta. Kuna rootori mass ei ole suur, ei mängi ülekande kaod suurt rolli. Samuti ei ole sel juhul vaja ülekandesüsteemi ümber ehitada. Alles jääb vajadus kasutada mootori ning rootori ühendamiseks jõudu, kuid see lisab ka omakorda turvalisuselemendi, kus vaikeolekus on mootor ning rootor lahutatud.



Sele 3.1 Hõõdratas. Autori foto

3.1.2 Ajamite tüübid

Hetkel on balansseerimispingi küljes amortiseerunud elektrimootor, mis oma seisukorda ja vanust arvestades vajab väljavahetamist või põhjalikku uuenduskuuri. Parameetrid, mida mootori valikul arvestama peaks, on pöörlemiskiirus, mootori juhitavus ning neist tulenevalt mootori tüüp. Balansseerimispingi vana ajami andmeplaadilt saab kätte mootori nominaalkiiruse, milleks on 2200 p/min. Kuna on toodud nii alalis- kui ka vahelduvvooluga opereerimine, võib järeldada, et tegemist on universaalmootoriga, mis töötab nii alalis- kui vahelduvvooluga.



Sele 3.2 Elektrimootori andmeplaat. Autori foto

Kui teha valik asünkroon- või sünkroonmootori kasuks, saab lähtuda järgnevast kiiruse valemist [3, p. 89]

$$\omega = \frac{2 * \pi * f}{N} \quad (3.1)$$

Kus f – sagedus, Hz
 N – pooluspaaride arv

ning võttes sageduseks võrgusageduse 50 Hz, saame 1 pooluspaariga mootori sünkroonkiiruseks 314 rad/s ehk 3000 p/min. Lähtudes valemist (3.1) väheneb 2 pooluspaariga mootori sünkroonkiirus 2 korda, sünkroonkiiruseks jääb sel juhul 1500 p/min. Kuna sünkroonkiirus 2 pooluspaariga mootori puhul jääb alla vana mootori nimesildil toodud kiirusele, on mõistlik asünkroon- või sünkroonmootori kasuks otsustamisel eelistada 1 pooluspaariga mootorit. Tuginedes faktile, et praeguses seisus pole balansseerimispink opereeritav ning pole teada tasakaalustamata rootori resonantskiirus, on mõistlik valida suurema sünkroonkiirusega mootor, eeldusel, et kasutusse jääb vana ülekanne. Laboratoorse töö läbiviimise üheks eelduseks on tasakaalustamata rootori resonantskiiruse ületamine. Kuigi võib eeldada, et see ei toimu mootori nominaalkiirusel, ei ole välistatud, et 2 pooluspaariga mootori puhul jääb vajalik kiirus saavutamata. Kui kasutada sagedusmuundurit ning võrgusagedusest kõrgema maksimaalse lubatava sagedusega mootorit, saab kasutada ka suurema poolipaaride arvuga mootoreid.

Harikommutaatoriga alalisvoolumootori puhul ei ole kiirus sõltuvuses poolipaaride arvust ning kiiruse reguleerimine ei käi mitte sageduse, vaid pinge muutmise. [4]

$$\omega \approx \frac{2 * \pi * E_s}{Z * \Phi} \quad (3.2)$$

Kus E_s – ankrumähise pinge, V
 Z – ankru harude arv
 Φ – magnetvoog, Wb
 ω – mootori nurkkiirus, $\frac{rad}{s}$

Ka harikommutaatoriga mootori puhul tuleks teha valik nominaalkiiruse põhjal, vaadates et see oleks sama, või ületaks vana mootori nominaalkiirust. Kuna harikommutaatoriga mootori kiirus on sõltuv pingest, toimub mootori juhtimine erinevalt sagedusmuundurist, mis on asünkroon- ja sünkroonmootorite puhul kasutusel, läbi pingemuunduri.

3.1.3 Ajami valik

Arvutame vana mootori momendi. Lähtudes nimeplaadi andmetest, kus kiirus ei vasta vahelduvvoolumootorite standardkiirustele ning mootor töötab nii alalis- kui vahelduvvooluga eeldan, et tegemist on alalisvoolumootoriga. Alalisvoolumootori momendi saab leida järgnevalt [3, p. 68]

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3.3)$$

Kus T – mootori moment, Nm
 P – mootori võimsus, W
 ω – mootori nurkkiirus, rad/s

Võttes mootori nimeplaadilt mootori pöörlemiskiiruse 2200 p/min ning võimsuse $P = 100\text{W}$, saame mootori momendiks valemi (3.3) põhjal

$$T = \frac{100 * 60}{2200 * 2 * \pi} = 0,4\text{Nm}$$

Elektrimootori valikul, lähtudes eeltoodud kriteeriumitest kiirus ≥ 2200 p/min ja moment $\geq 0,4$ Nm, olen välja toonud järgnevad võimalikud alternatiivid uueks ajamiseks.

Tabel 3.2 Elektrimootorite võrdlus [5] [6] [7] [8]

Mudel	Tüüp	Pöörlemis-sagedus, p/min	Voolutugevus, A	Moment, Nm	Võimsus, kW	Hind, €
Cemer MS 56 2-2	AC	2700	0,98	0,43	0,12	84
AC Motoren ABS 63 A-2	AC	2800	1,48	0,6	0,18	88,8
Oriental motor BMU5120CP-10-3	DC	3000	2,0	0,38	0,12	530

Valikusse olen toonud 1 alalis- ja 2 vahelduvvoolumootorit. Elektrimootori puhul on tähtis ka selle juhtimine, seega olen lisanud valiku võimalikest kontrolleritest antud mootoritele. Toodud tabelis on ainult vahelduvvoolu sagedusmuundurid, kuna eelnevalt toodud alalisvoolumootoriga tuleb kontrolleri kaasa.

Tabel 3.3 Mootori kontrolleri võrdlus [8] [9] [10] [11]

Mudel	Tüüp	Nimivool, A	Nimivõimsus, kW	Hind, €
Mitsubishi FR-D720S-008SC-EC	AC	0,8	0,1	114
Siemens Sinamics G110 6SL3211-0AB11-2UA1	AC	0,9	0,12	143,4
Hitachi NE-S1-002SBE	AC	1,4	0,25	153,3

Valin toodud mootorite ja juhtimismoodulite seast Cemeri alalisvoolumootori. Antud mootor vastab püstitatud nõuetele ning samuti on tegemist majanduslikult kõige mõistlikuma valikuga. Leian, et kuigi Mitsubishi sagedusmuunduri nimivõimsus ja nimivool jäävad alla antud mootori omadele, võiks see siiski olla sobiv kooslus. Alalisvoolumootoris on võimsus ja voolutugevus otseselt omavahel seotud järgneva lihtsustatud võimsuse valemiga [3, p. 93]:

$$P = m * I_r^2 * R_r * \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (3.4)$$

Kus P – mootori mehaaniline võimsus, W
 m – staatormähise faaside arv
 I_r – rootormähise voolutugevus, A
 R_r – rootormähise aktiivtakistus, Ω
 s – mootori libistus staatorivälja suhtes

Seejuures lähtudes valemist (3.3), saab teha eeldusel, et kiirus on konstantne, järgneva teisenduse mille põhjal saab arvutada voolutugevuse muutusega kaasneva ligikaudse momendilanguse.

$$T_2 \approx \frac{I_{r2}^2}{I_{r1}^2} * T_1 \quad (3.5)$$

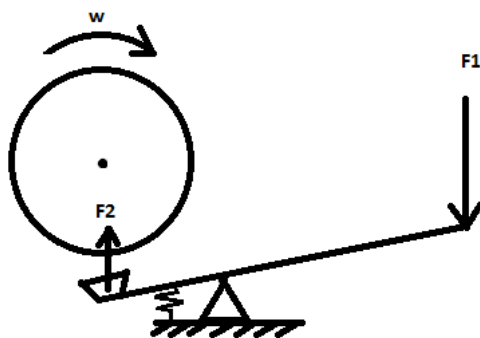
Võttes voolutugevuseks I_{r1} mootori nimivoolu 0,98 A ning voolutugevuseks I_{r2} Mitsubishi sagedusmuunduri nimivoolu 0,8 A saame ligikaudseks momendiks T_2 0,28 Nm. Valides Siemensi sagedusmuunduri saame ligikaudseks momendiks T_2 0,36 Nm. Eeldan, et esialgne mootor on mõningal määral üledimensioneeritud ning langetan valiku Siemensi sagedusmuunduri kasuks.

3.2 Pidurdussüsteem

Selleks, et tagada ohutus balansseerimispingi kasutamisel peab olema võimalik selle liikuvaid komponente vajadusel kiiresti seisata. Kuna rootori ja mootori ülekanne on normaalolekus lahutatud, on vaja tagada mõlema komponendi eraldiseisev seiskamine. Tulenevalt asjaolust, et elektrimootori kontrollimine käib läbi sagedusmuunduri, kirjeldan selle peatamist kiiruse kontrollimise ühe osana.

3.2.1 Rootori pidurdamine

Balansseerimispingi rootori mass on küllaltki väike ja sellest tulenevalt ei ole ka pöörleva rootori peatamiseks vaja tohutut jõudu rakendada. Rootori seiskamiseks piisab ühest piduriklotsist, mis viiakse rootoriga kontakti. Piduri mehhanism ise võiks olla sarnane elektrimootori ühendamise mehhanismiga, st kangiga, millele vajutamine viib piduriklotsi rootoriga kontakti ning peatab selle.



Sele 3.3 Rootori pidurdamine. Autori joonis

3.3 Disbalansi muutmine

Hetkel on balansseerimispingil 1 fikseeritud disbalanss, mis on kõigil läbiviidavatel laboratoorsetel töödel sama. Kui see asendada muudetava disbalansiga, teeb see laboratoorsetel tööde tulemuste amplituuda palju laiemaks. Mina näen disbalansi muutmiseks kahte viisi.

Esimene viis oleks praegune polt eemaldada ning asendada see keermestatud avaga. Sel juhul saaks sinna erineva massiga polte disbalansiks kinnitada. Kui on soov, et rootoril esineks ilma disbalansita tasakaalus olek, tuleks samasse tasapinda teisele poole telge kinnitada keermega sama massiga korrigeerimismass.



Sele 3.4 Rootori disbalanss. Autori foto

Teine viis oleks poldina kasutatav disbalanss eemaldada ning kasutada disbalanssidenä magnetid, mis kinnituvad rootori otspindadele. Sel juhul saaks kasutada soovi korral ka mitut eri asukohtades paiknevat disbalanssi. See lahendus eeldab peale pingi töökorda seadmist vastavaid katseid magnetitega, et näha kas need püsivad rootori pöörlemise ajal paigal või nihkuvad tsentrifugaaljõu mõjul paigast.

4. ANDURID

4.1 Võnkeamplituudi mõõtmine

Originaalseisukorras mõõtis rootori võnkeamplituuti mehaaniline indikaator. Indikaatori tööpõhimõte oli lihtne – kui rootor oli tasakaalust väljas, nihutas see indikaatori paigast, kuhu ta siis pidama jäi ning peale mida sai lugeda skaalalt näidu.

4.1.1 Andurite liigid

Asendianduri valikul on määravaks teguriks anduri mõõtepiirkond ja täpsus. Suure ulatusega ning väikese positsioonimistäpsusega ajamites kasutatakse piirlüliteid, väikeste siirete mõõtmisel sobivad nii potentsimeetrilise kui induktiivtajuriga pidevatoimelised andurid. Positsiooni on võimalik mõõta ka fototajuriga impulssandurite ning koodanduritega. Samuti on võimalik dünaamilisi parameetreid, nagu amplituud, kiirus, kiirendus – mõõta piesoelektrilise muunduriga. [12, pp. 43, 45, 46] [13, p. 75]

Induktiivandurid koosnevad induktiivpoolist, mis on paigutatud õhupiluga magnetsüdamikule. Sisendi mõjul muutuvad õhupilu parameetrid, kas selle pikkus või pindala, mille tagajärjel muutub õhupilu ja kogu pooli magnetahela takistus. [13, p. 52]

Potentsiomeeter on takisti konstantse takistusega, millel libiseb liugur, mis moodustab elektrilise kontakti. Liugur on mehaaniliselt ühendatud uuritava objektiga, mille liikumist tuleb üle kanda. Liuguri asendi ja potentsiomeetri takistuse vahel on proportsionaalne sõltuvus, mille järgi saab määrata uuritava objekti asendi. [13, p. 46]

Fototajuriga impulssandur, või optiline inkrementaalenkooder, koosneb valgusvoo allikast, modulatsioonikettast ning fototajurist. Modulatsiooniketas kujutab endast optiliselt läbipaistvate piludega ketast, mis pöörlemisel sulgeb perioodiliselt valgusvoo pääsu fototajurile ning tekitab selles perioodiliselt muutuva voolu. Impulsside sagedus on võrdeline ketta pöörlemiskiirusega, impulsside arv pöördenurgaga. Liikumissuuna määramiseks tehakse impulssandurid kahekanalistena, nii et need annavad teineteise suhtes neljandikperioodi võrra nihutatud impulsse. Liikumissuuna määrab vastav loogikalülitus kahe impulssijada võrdlemisel. [12, p. 45]

Koodandurid, või absoluutenkoodrid, on ehituselt impulssandurite sarnased, kuid nendega on lisaks võimalik määrata absoluutasendit. Koodandur väljastab signaali kahendkoodis, kus igale koodile vastab kindel anduri asend. [12, p. 46]

Piesoelektriline muundur on sensor, mis kasutab piesoelektrilist efekti. Piesoelektriline efekt on efekt, kus energia muundatakse mehaanilisest elektriliseks. Kui polariseeritud kristallile avaldada rõhku

(*piezo* on kreeka keeles rõhk), siis tekkinud mehaanilise moonutuse tagajärjel tekib elektriline laeng. [14, p. 3]

4.1.2 Asendianduri valimine

Järgnevalt on andurite tüübid koondatud tabelisse ning on välja toodud nende balansseerimiseseadmel kasutamise eelised ja puudused.

Tabel 4.1 Asendiandurite võrdlus [15] [16, pp. 383-384]

Andur	Eelised	Puudused
Induktiivandur (RVDT)	Kontaktivaba, töötingimused väga laiad, täpne, lõpmatu eraldusvõime	potentsiomeetrist kallim, lineaarne väga kitsas vahemikus (+/- 40 kraadi)
Potentsiomeeter	Odav, laialdaselt levinud, küllaltki lihtne kasutada, lõpmatu eraldusvõime, võimalik teha täpseks	Vibratsioon võib märkimisväärselt eluiga vähendada ning mõjutada mõõtetulemusi, mehaaniline kulumine, lineaarsus anduri ulatuses võib erineda
Inkrementaalenkooder	Kontaktivaba, täpsed, võimalik kõrge resolutsioon, laialdaselt saadaval	Vajab pidevat kalibreerimist, kallid, täpsus jääb absoluutenkoodritele alla, ei talu lööke, kergesti tekkivad hälbed
Absoluutenkooder	Väljundina asukoha kood, kontaktivaba, täpne, võimalik kõrge resolutsioon, inkrementaalenkoodrist usaldusväärsem	Süsteemina küllaltki keerukas, teistest kallim
Piesoelektriline muundur	Puuduvad liikuvad osad	Puudub laialdane kasutus asendiandurina, vajaks kasutamiseks erilahendust

Analüüsi põhjal valin võnkeamplituudi mõõtmiseks inkrementaalenkoodri. See pakub antud ülesandepüstituse jaoks piisava täpsuse ning resolutsiooni. Laboratoorse töö käigus pole probleemiks enne iga mõõtekorra alustamist seadme kalibreerimine. Järgnevalt olen välja toonud mõned inkrementaalenkoodrid, mis sobiksid võnkeamplituudi mõõtmiseks. Anduritel olen võrdluses välja toonud eraldusvõime, pulsside sageduse, hinna ning muu, mis hõlmab vajadusel teisi eriomadusi.

Tabel 4.2 Inkrementaalenkoodri valik [17] [18]

Toode	Eraldusvõime	Sagedus, kHz	Hind, €	Muu
Wachendorff WDG40A-1024- ABN-H05-K2	1024	200	179	Eluiga 100 000 h
Kübler 8.KIS40.1362.2048	2048	250	113,3	-
Anaheim Automation ENC-A4DI-1250- 250-H-G	1250	300	72,3 ¹ (80\$)	Eeldab kasutaja poolset kokkupanekut, ilma võllita,

Toodud tabeli põhjal valin balansseerimispingi võnkeamplituudi asendi mõõtmiseks Kübleri optilise enkoodri, kuna see pakub parimat hinna-kvaliteedi suhet. Kuigi Anaheim Automationi andur on odavam, eeldab see kasutajapoolset kokkupanekut ja tarnet välisriigist. Samuti pakub Kübleri andur kõige suuremat eraldusvõimet, mis tähendab, et sellega saab kõige täpsemalt võnkeamplituuti mõõta.

4.2 Rootori pöörlemiskiiruse mõõtmine

Üks lisa, mida originaalseades balansseerimispingil polnud, on rootori pöörlemis- või nurkkiiruse mõõtmine. Kuigi see ei lisa väärtust esialgse laboratoorse töö seisukohast, avab see võimaluse viia läbi teistsuguseid laboratoorseid töid.

4.2.1 Pöörlemiskiiruse mõõtmine

Võlli pöörlemiskiiruse mõõtmiseks kasutatakse tahhomeetreid. Eelnevalt toodud asendiandureid nagu induktiivandureid, enkoodreid kui ka potentsiomeetreid saab kasutada tahhomeetritena. Samuti kasutatakse elektriaramites kiiruse mõõtmiseks tahhogeneatoreid. [12, p. 49] [19]

Tahhogeneaator on väikese võimsusega mikroelektrimasin, mille väljundpinge on võrdeline mootori nurkkiirusega. Tahhogeneaatori töö põhineb elektromagnetilisel induksioonil. Kuna pinge on

¹ Kasutatud 16.05.17 Euroopa Keskpanga EUR/USD kurssi 1,1059 (12)

otseselt sõltuv kiirusest, on tegemist vahetu kiiruse mõõtmisega. Kui kiirus leitakse läbitud teepikkuse ja ajavahemiku suhtena, nagu impulssandurites, siis on tegemist kaudse mõõtmisega. [12, p. 49]

Kuna impulssanduriga töötav tahhomeeter on oma ehituselt küllaltki lihtne, otsustan ise sobiva süsteemi konstrueerida. Tahhomeetril piisab ühest impulsist iga pöörde kohta, et arvutada välja võlli pöörlemiskiirus.

4.2.2 Tahhomeetri anduri valik

Võlli pöörlemiskiiruse mõõtmiseks otsustan kasutada Halli tajurit. Halli tajurit kasutatakse magnet- ja elektriväljade tugevuse mõõtmisel. Selle töö põhineb Halli efektil ehk elektrivälja tekkimises magnetväljas asetsevas vooluga juhis. [12, pp. 27-28]

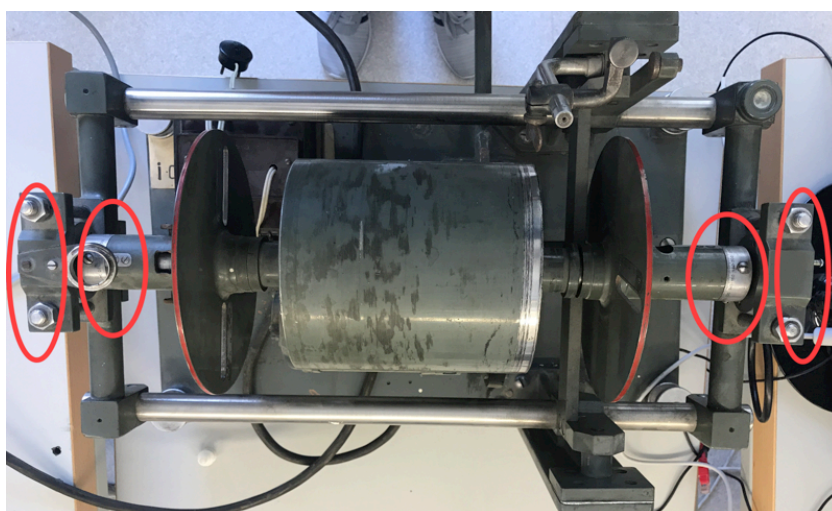
Tabel 4.3 Halli anduri valik [20]

Mudel	Max lülituse aeg, μs	Tüüp	Magnetvoo lävi 25°C juures, mT	Hind, €
Honeywell SS411A	1,5	Bipolaarne	6	3,25

Valin pöörlemiskiiruse mõõtmiseks Honeywell SS411A anduri. Anduril on küllaltki madal magnetvoo lävi, mis tähendab et saab kasutada suhteliselt nõrku magneteid ning andur on bipolaarset tüüpi, mis tähendab et see reageerib nii magneti lõuna- kui põhjapoolusele.

4.2.3 Tahhomeetri ehitus

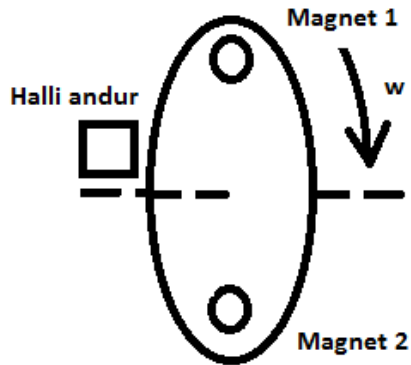
Kiiruse mõõtmiseks kasutatavate magnetite kinnitamiseks rootorile on neli loogilist kohta: pöördenurga skaalad või kumbki rootori ots.



Sele 4.1 Tahhomeetri kinnituskohad. Autori joonis

Mõistlik oleks valida üks kahest rootori otsast, sest sel juhul ei sega tahhomeeter ketaste pöördenurkade seadmist.

Selleks et lugeda rootori pöörlemiskiirust, on vaja konstrueerida tahhomeetrile enkooderketas, kus paikneb rootori kiiruse mõõtmiseks kasutatav magnet.



Sele 4.2 Tahhomeeter. Autori joonis

Selel 4.2 toodud tahhomeetri enkooderkettale olen pannud kaks magnetit kettal üksteise vastu. Kuigi magneti kaal on iseenesest väike ning ta ei pea rootori teljest väga kaugel paiknema, võib enkooderketas siiski väikese disbalansi tekitada, mida saab teise magneti lisamisega vähendada. Kuna enkooderketas ja magnetid rootori sihis ei liigu, siis saab Halli anduri enkooderkettale väga lähedale viia, mis võimaldab nõrgemaid ning väiksema massiga magneteid kasutada.

5. JUHTSÜSTEEM

Selleks et balansseerimispink saaks sihtotstarbeliselt kasutada, on vaja kõiki välja valitud andureid ja seadmeid juhtida ning lugeda. Balansseerimiseseadmega töötamiseks peavad olema võimaldatud järgmised tegevused: mootori kiiruse reguleerimine, võnkeamplituudi mõõtmine, rootori pöörlemiskiiruse mõõtmine.

5.1 Juhtsüsteemi kontrollid

Lähtudes toodud kriteeriumidest, on andmete kogumiseks, töötlemiseks, logimiseks, samuti pingi juhtimiseks mõistlik kasutada programmeeritava mikrokontrolleriga arendusplaati. Need võimaldavad lihtsat liidestamist, samuti on taolistel arendusplaatidel tihti olemas spetsiaalne tarkvaraline arenduskeskkond. Kuna need üldiselt toetavad kõrgkeeles koodi, hõlbustab see vajalike programmide kirjutamist. [21]

5.1.1 Vajalikud liidesed

Selleks et valida sobiv kontrollid, on esmalt vaja defineerida, milliseid liideseid vaja on. Eelnevalt tõin ma välja tegevused, mida on vaja läbi viia. Need on mootori kiiruse reguleerimine, võnkeamplituudi mõõtmine ja rootori pöörlemiskiiruse mõõtmine.

Siemensi sagedusmuunduri liidestamiseks kontrolliga on kõige mugavam kasutada RS232 protokoll, mida sagedusmuundur toetab. [22, p. 15] Kübleri inkrementaalenkoodri ühendamiseks kontrolliga on vajalik RS422 liides. [18] Tahhomeetri ühendamiseks on vajalik ühe analoogsisendi olemasolu. Samuti on vaja ühendusi juhtnuppude ning LCD ekraani jaoks, kuhu kõik vajalikud andmed kuvada.

5.1.2 Kontrolleri valik

Olen välja toonud valiku mikrokontrolleritest, mida võiks juhtsüsteemi jaoks kaaluda.

Tabel 5.1 Mikrokontrolleri valik [23] [24] [25]

Mudel	Töötakt, MHz	Muutmälu, KB	Mälu, KB	Hind, €
Arduino Uno Rev3	16	2	32	26
STMicroelectronics STM32F3 Discovery	72	48	256	20
Texas Instruments TM4C123G Launchpad	80	32	256	26

Olen valikusse toonud kolm mikrokontrollerit, milleks on vastavalt Arduino Uno Rev3, STMicroelectronics'i STM32F3 Discovery ja Texas Instruments'i TM4C123G Launchpad. Riistvaraliselt on STMicroelectronics'i ja Texas Instruments'i kontrollid suhteliselt sarnased, ST kontrollil on rohkem muutmälu, TI kontrollil on see-eest veidi kõrgem töötakt. Puhtalt näitajate poolest on Arduino plaat kõigist kolmest kõige nõrgem. Samas pakub see kõige suuremat *know-how* kogukonda, mis oma laialdase toega hõlbustab tarkvara kirjutamist. Lisaks kasutavad mitmed erialased ained TTÜs Arduino kontrollereid, mis tähendab ka paremat ülikoolipoolset tuge. Liidestamiseks on kõigil kolmel olemas suur hulk analoog- ja digitaalsisendid/väljundeid, mida on võimalik ka hõlpsasti laiendada. Leian, et hoolimata kehvematest riistvaralistest näitajatest on, arvestades sellele saadaolevat tuge, kõige mõistlikum kasutada Arduino mikrokontrollerit. Riistvaraliselt ei tohiks mõistliku koodi puhul ühtegi pudelikaela tekkida.

5.2 Mootori kontrollimine

5.2.1 Kiiruse reguleerimine

Nagu eelnevalt mainitud, on kontrolleri liidestamiseks Siemensi sagedusmuunduril RS232 liides. Kuna Arduino ei toeta otse RS232 jadakommunikatsiooni, on selleks vaja spetsiaalset lisamoodulit, mis muundaks RS232 protokollit TTL protokollis. [26]

Tabel 5.2 RS232 moodul [27]

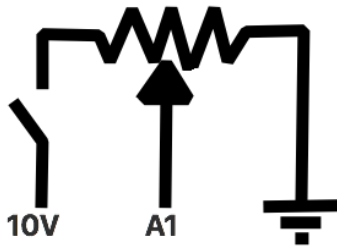
Moodul	Hind, €
RS232 TTL konverter MAX3232 3,3-5,5V	4

Lähtudes sagedusmuunduri dokumentatsioonist, on võimalik mootori kiirust kontrollida ka lihtsa analoogskeemiga, kasutades selleks potentsiomeetrit, mille takistus on $\geq 4,7 \text{ k}\Omega$ [22, p. 36] Kuna

puudub otsene vajadus kontrollida mootori kiirust läbi mikrokontrolleri, otsustan lihtsama analoogskeemi kasuks, mis täidab etteantud nõuet saada mootori kiirust reguleerida.

5.2.2 Mootori pidurdamine

Kuna mootori sageduse ja seeläbi kiiruse reguleerimiseks kasutan potentsiomeetrit, saan läbi selle ka mootorit pidurdada. Kui potentsiomeetrit läbiv pinge on 0 V, on sagedusmuunduri väljundsagedus ja seeläbi mootori kiirus null. Kui panna potentsiomeetri ja sagedusmuunduri pingeklemmi vahele lüliti, saab sellega lülitada mootori kiiruse nulli ja sellega mootori peatada.

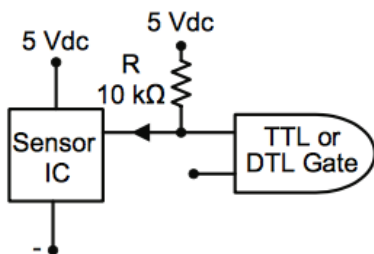


Sele 5.1 Sagedusmuunduri kiiruse reguleerimine ja pidurdamine. Autori joonis

5.3 Rootori kiiruse mõõtmine

5.3.1 Kontrolleriga liidestamine

Tahhomeeter tuleb kontrolleriga liidestada nii, et oleks võimalik tema oleku muutust lugeda. Selleks piisab Halli sensori väljundklemmi ühendamisest Arduino digitaalsisendisse. Samuti tuleks lisada sensori pingeklemmi ja toite vahele 10 k Ω *pull-up* takisti, mis tagab magnetvälja puudumisel, et signaal on kontrolleris *TRUE*.



Sele 5.2 Halli sensori ühendamise skeem [28, p. 6]

5.3.2 Kiiruse lugemine

Selleks et lugeda tahhomeetriga kiirust, tuleb koodiga lugeda, millal möödub Halli sensorist magnet. Seda saab teha näiteks serva tuvastamisega. See on selle hetke, kui signaal läheb ühest olekust teise, tuvastamine. Kuna magneti möödumisega muutub signaali olek kaks korda, tuleb mõõtmiseks kasutada ainult tõusvat või langevat serva. [29]

Tahhomeetri kasutamiseks tuleb kasutada mikrokontrollerisse sisse ehitatud kella taimerina, mille järgi saab magneti Halli sensorist möödumiseks kulunud aja kaudu arvutada pöörlemiskiiruse. Kuna meie tahhomeetri kettal on kaks magnetit, siis saab juba poole pöörde põhjal, kui mõlemad magnetid on sensorist möödunud, leida rootori pöörlemiskiiruse. Korrutades kulunud aja kahega läbi ning jagades sellega 60-t, saame rootori kiiruse pööretes minutis. Täpsuse huvides saaks mõõta näiteks 5 möödumise vahele jäänud aja, kui rootor on teinud 2 täispööret ning leida pöörlemiskiiruse selle põhjal. See võtab küll kauem aega, kuid on siiski piisavalt kiire, et tulemust paar korda sekundi jooksul uuendada, mis balansseerimispingi puhul on täiesti piisav. Kiiruse lugemine pseudokoodis on kirjeldatud lisas 1.

5.4 Vönkeamplituudi mõõtmine

5.4.1 Kontrolleriga liidestamine

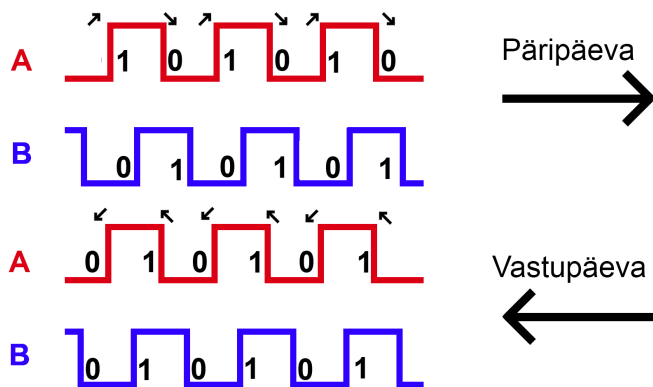
Valitud Kübleri optilise inkrementaalkoodri liidestamine käib läbi RS422 protokoll. RS422 protokoll ning TTL protokoll, mida Arduino mikrokontroller kasutab on väga sarnased ning töötavad sama pinge peal ning iseenesest oleks ka otse ühendamine võimalik, kuid siiski oleks mõistlik kasutada vahemoodulit. [30, p. 1]

Tabel 5.3 RS485 moodul [31]

Moodul	Hind, €
TTL RS-485 moodul MAX485 5V	4

5.4.2 Vönkeamplituudi lugemine

Inkrementaalkoodrite väljund on kahe kanali, A ja B, impulss-signaal. A ja B koodiketta pilud ja sellest tulenevalt väljundimpulsid on teineteise suhtes 90° võrra nihkes. Kui ühe impulsssignaaliga saab mõõta pöörlemise kiirust, kiirendust ja distantsi, siis kahe signaaliga saab ka pöörlemise suunda määrata. Ühe kanali oleku muutumisel on teise kanali olek sõltuvalt pöörlemise suunast, päri- või vastupäeva, erinev. [32]



Sele 5.3 Inkrementaalenkoodri signaal. Autori joonis

Vaatame lihtsuse huvides joonisel ainult signaali peale A kanali oleku muutust. Seelt 5.3 on näha, et päripäeva ja vastupäeva liikudes on väljundsignaal erinev, päripäeva on kahendkood 10, 01, 10 jne, vastupäeva 11, 00, 11. Selle järgi saab tuvastada, mis suunas enkooder pöörleb.

Selleks et leida balansseerimispingi võnkeamplituud, saaks enne alustamist kalibreerida enkoodri nullasendi ning siis sealt lugeda võnkumise puhul pulsse, kuni suund muutub, seejärel sama palju pulsse tagasi, fikseerida nullkoht ning korrata seda teises suunas. See meetod on aga ressursimahukas, kuna see eeldab pidevat logimist. Teine, mõistlikum meetod oleks oodata kuni suunamuutuseni, seejärel loendur nullida ja lugeda pulsse järgmise suunamuutuseni. Saadud tulemus jagatud kahega olekski võnkeamplituud pulssides. Jagades selle 2048-ga (Kübleri enkoodri eraldusvõime) ning korrutades 360°ga, saame siirdenurga. See lähenemine ei nõua pidevat anduri logimist, mis tähendab, et vajadusel saab kogu mikroprotsessori ressursi vahepeal muu jaoks kasutada. Võnkeamplituudi pseudokood on kirjeldatud lisis 2.

5.5 Ühtne juhtmoodul

Selleks et kõiki balansseerimispingi mõõtmisi ja toiminguid mugavalt teha, tuleks kõik toimingud koondada ühtsesse hõlpsasti kasutatavasse juhtmoodulisse.

5.5.1 Ekraani liidestamine

Selleks et mõõdetud andmeid välja kuvada, tuleks juhtmoodulile lisada ekraan. Kuna mõõdetavaid väärtusi on kaks, rootori pöörlemiskiirus ja võnkeamplituud, piisab kaherealisest vedelkristallekraanist.

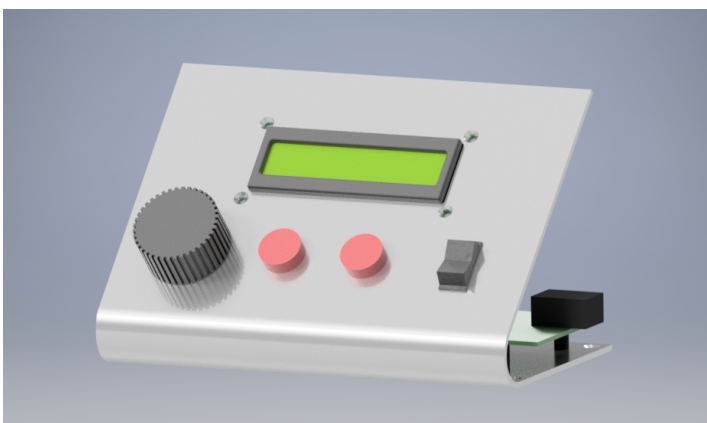
Tabel 5.4 LCD ekraan [33]

Mudel	Hind, €
LCD ekraan 2*16 LCD16X2ZN	8,5

Valisin 2 reaga ekraani, kus mõlemale reale mahub 16 tähemärki. Nii mahuvad ekraanile lisaks mõõdetavale väärtusele ka näiteks ühikud või väärtuste kirjeldused.

5.5.2 Juhtmooduli disain

Lisaks ekraanile, kuhu andmed kuvatakse, peab juhtimismoodul ka võimaldama mootori kiiruse reguleerimist. Kuna see on lahendatud potentsiomeetriga, saab selle tuua koos ekraaniga mooduli esipaneelile. Kuna balansseerimispingi andmete logimine käib pidevalt, oleks vaja ka need kuidagi salvestada, kas läbi nupuvajutuse ekraaninäidu peatamise, et selle saaks kirja panna, või siis selle vahemällu salvestamise, kust selle peale katse läbiviimist saaks välja võtta ning ekraanile kuvada või, kasutades Arduino USB liidest, ka otse arvutisse saata. Järgnevalt olen toonud ühe võimaliku viisi, kuidas juhtmoodul võiks välja näha.



Sele 5.4 Juhtmooduli disaini *mockup*. Autori joonis

Selel 5.4 on toodud ühest alumiiniumlehest painutatud moodul, mille saaks kinnitada balansseerimispingi külge. Moodulile on toodud kaherealine LCD ekraan, potentsiomeeter suure läbimõõduga nupuga, mida oleks lihtne käsitseda, 2 nuppu, millega oleks võimalik tulemuste jäädvustamine ekraanil, vahemällu salvestamine või mõni funktsioon, näiteks mootori seiskamine, ning lüliti mooduli sisse ja välja lülitamiseks. Samuti võiks mootori kiiruse kontrollimiseks kasutada *push-push* potentsiomeetrit, millele vajutamise saaks mootori seisata ja uuesti käivitada.

6. MAJANDUSLIK ANALÜÜS

6.1 Moderniseerimise maksumus

Kogukulu moderniseerimisele on näha alltoodud tabelis.

Tabel 6.1 Moderniseerimise maksumus

Detail	Hind, €
Cemer MS 56 2-2 elektrimootor	84
Siemens Sinamics G110 6SL3211-0AB11-2UA1 sagedusmuundur	143,4
Kübler 8.KIS40.1362.2048 enkooder	113,3
Honeywell SS411A Halli sensor	3,25
Arduino Uno Rev3 mikrokontroller	26
TTL RS-485 moodul MAX485 5V	4
LCD ekraan 2*16 LCD16X2ZN	8,5
Muud kulud	30
Kokku	412,45

Tabelis olen toonud välja eraldi kõikide komponentide maksumused ning olen lisanud ühe osana juurde muud kulud, mis hõlmab nuppe, juhtmeid, jm. mida ma eraldi välja pole toonud. Moderniseerimise kogumaksumus valitud komponentidega tuleb 412,45 €, millest kõige suuremad kulukomponendid on mootori sagedusmuunduriga ning optiline enkooder, moodustades kokku 83% kogukulust.

Järgnevalt tuleks otsustada, kas sellises summas balansseerimispingi moderniseerimine on otstarbekas. Kuna kõigi eelduste korral maksaks uus taoline pink palju rohkem, leiab autor, et moderniseerimine oleks põhjendatud. Samas tuleks enne lisaks hinnata ka balansseerimispingi kasu õppetöös.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö käigus on üle vaadatud ning hinnatud elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis asuva balansseerimispingi hetkeolukord ning moderniseerimist vajavad detailid. Vastavatele lülidele on välja pakutud võimalikud alternatiivid ning neist valitud välja autori hinnangul kõige sobilikumad neile määratud parameetrite ning ülesannete põhjal.

Jõuülekanne osas oli peamine moderniseerimist vajav detail balansseerimispingi ajam ning selle toiteplokk, kumbagi neist polnud enam otstarbekas ega ka ohutu kasutada. Ajami osas langes valik vahelduvvoolumootori kasuks, mille toitmiseks on vastav sagedusmuundur. Samuti sai hinnatud ajami ning rootori ülekannet, mille puhul jäi otsus jätta see endiseks. Tõdeti pidurdussüsteemi puudumist ning selle olulisust ohutuse seisukohast, pakuti sellele lahendus. Toodi välja võimalikud meetodid disbalansside muutmiseks, kui peaks selleks tekkima tulevikus vajadus.

Andurite puhul hinnati võimalikke asendiandureid balansseerimispingi võnkeamplituudi ja rootori pöörlemiskiiruse mõõtmiseks. Amplituudi täpseks mõõtmiseks sai valitud optilisel inkrementaalenkoodril põhinev lahendus. Pöörlemiskiiruse mõõtmise lahenduseks sai valitud Halli enkoodriga töötav tahhomeeter. Kuna vastav seade on ehituselt küllaltki lihtne, on mõistlik see ise sobilikest komponentidest valmis konstrueerida.

Juhtsüsteemi juures sai valitud välja balansseerimispingi juhtimiseks sobiv mikrokontroller ning toodud välja, kuidas varasemalt valitud seadmed sellega liidestuvad. Samuti sai välja pakutud juhtmooduli disain, millega saaks vajalikke tegevusi läbi viia.

Järgmised sammud moderniseerimise juures oleks leida, kas antud balansseerimispingi moderniseerimine kogumaksumuses 412,45 € on majanduslikult otstarbekas ning vastavalt sellele moderniseerimisega edasi liikuda. Autori hinnangul on.

SUMMARY

This bachelor's thesis resulted in reviewing the current situation of the balancing lab test rig and the details in need of modernizing in the Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics. Respectively every part has been proposed possible alternatives and the most fitting ones have been selected by the author based on their parameters.

Regarding the drive system, the part most in need of modernizing were the motor of the balancing rig and its power supply. Both of them weren't reasonable nor safe to operate any more. An AC motor was chosen to drive the rig with an appropriate frequency converter chosen to supply it. The transmission was also reviewed and left as is. Lack of a braking system was addressed and possible solutions proposed. Feasible options to change the disbalances were proposed, if there should arise such need in the future.

Regarding the sensors, possible options to measure the oscillating amplitude and the rotational speed of the rotor were considered. To measure the oscillation a solution based on an optical incremental encoder was chosen. For measuring the rotational speed a tachometer using a Hall sensor was chosen. Since the tachometer is quite simple in design it is reasonable to construct one yourself from suitable components.

For the control system, a suitable microcontroller was chosen to operate it. The ways to connect all depending details to the microcontroller were brought out. A design mockup for the control module was created with ease of use in mind.

The next step regarding modernizing the balancing rig is evaluating whether the project in total cost of 412,45 € is economically feasible and if the project should be continued or not. The authors opinion favours going ahead with the project.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. Riives, Mehhanismide ja masinate teooria. Laboratoorsed tööd, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1991.
- [2] H. Lepikson, Masinaehitaja käsiraamat, Tallinn: Valgus, 1968.
- [3] T. Lehtla, Elektriaramid, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [4] T. Wildi, „DC Motor Calculations, part 1,“ National Instruments, 2006. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/14921/en/>.
- [5] Elektrimootorid OÜ, „Cemer MS 56 2-2 elektrimootor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://elektrimootorid.ee/images/56.pdf>. [Kasutatud 16 05 2017].
- [6] Tulekel OÜ, „ABS 63 A-2 AC elektrimootor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elektrimootor.ee/toode/abs-63-2/>. [Kasutatud 16 05 2017].
- [7] Elfa Distrelec, „Oriental motor BMU5120CP-10-3 DC mootor,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elfadistrelec.ee/et/dc-motor-brushless-nm-oriental-motor-bmu5120cp-10/p/30016865?q=*&sort=Price:desc&filter_Buyable=1&filter_Category3=Vahelduvvoolu-+ja+kolmefaasilised+mootorid&page=4&origPos=18&origPageSize=10&simi=97.8. [Kasutatud 17 05 2017].
- [8] Elektrimootorid OÜ, *Cemer 56 elektrimootori hinnapakumine*, 2017.
- [9] Mitsubishi, „Mitsubishi FR-D700 sagedusmuundurid,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://electrobit.ee/sagedusmuundurid.fr-d700.tab_spetsifikatsioonid. [Kasutatud 17 05 2017].
- [10] Elfa Distrelec, „Siemens Sinamics G110 6SL3211-0AB11-2UA1 sagedusmuundur,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elfadistrelec.ee/et/sinamics-g110-converter-without-filter-sinamics-g110-12-kw-200-240-vac-single-phase-siemens-6sl3211-0ab11-2ua1/p/13766024?q=*&sort=Price:asc&filter_Category3=Frequency+Converters&filter_Buyable=1&page=61&origPos=140&origPageSize=10&simi=98.3. [Kasutatud 17 05 2017].
- [11] Elfa Distrelec, „Hitachi NE-S1-002SBE sagedusmuundur,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elfadistrelec.ee/et/frequency-converter-ne-s1-25-kw-200-240-vac-phase-hitachines1-002sbe/p/30015997?q=*&sort=Price:asc&filter_Category3=Frequency+Converters&filter_Buyable=1&page=65&origPos=124&origPageSize=10&simi=98.8. [Kasutatud 17 05 2017].
- [12] T. Lehtla, Andurid, Tallinn: TTÜ Trükikoda, 1996.
- [13] Z. Nenova, S. Ivanov ja T. Nenov, Andurid tööstusautomaatikas, Tallinn: Gabrovo, 2011.
- [14] W. Putnam ja R. B. Knapp, Data Acquisition System Design for Human Computer Interfacing, 1996.

- [15] W. Storr, „Position Sensor and Linear Positional Sensors,“ 15 08 2013. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_2.html. [Kasutatud 13 05 2017].
- [16] J. S. Wilson, Sensor Technology Handbook, Newnes, 2005.
- [17] Elfa Distrelec, „Wachendorff WDG40A-1024-ABN-H05-K2 optiline enkooder,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elfadistrelec.ee/et/rotary-encoder-incremental-75-vdc-1024-wachendorff-wdg40a-1024-abn-h05-k2/p/13759706?q=*&sort=Price:asc&filter_Category3=Pöörlevad+koodrid&filter_Buyable=1&page=52&origPos=25&origPageSize=10&simi=98.8. [Kasutatud 16 05 2017].
- [18] Elfa Distrelec, „Kübler 8.KIS40.1362.2048 enkooder,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elfadistrelec.ee/et/rotary-encoder-incremental-vdc-pulses-2048-rs-422-kuebler-kis40-1362-2048/p/30048391?q=*&sort=Price:asc&filter_Category3=Pöörlevad+koodrid&filter_Buyable=1&page=27&origPos=56&origPageSize=10&simi=98.8. [Kasutatud 16 05 2017].
- [19] AZoSensors, „What is a Tachometer?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=310>. [Kasutatud 17 05 2017].
- [20] Elfa Distrelec, „Honeywell SS441A Halli sensor,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elfadistrelec.ee/et/digital-hall-effect-sensor-to-92-honeywell-ss441a/p/17349046?q=*&filter_Category3=Andurite+integraallülitused&filter_Category4=Hall+i+efekti+andurid&filter_Buyable=1&page=14&origPos=14&origPageSize=10&simi=98.8. [Kasutatud 20 05 2017].
- [21] R. Sell, „Mikrokontrollerid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://home.roboticlub.eu/et/microcontrollers>. [Kasutatud 19 05 2017].
- [22] Siemens AG, „Sinamics G110 Operating Instructions,“ 2005.
- [23] Oomipood, „Arduino Uno Rev3 mikrokontroller,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/a000066_arduino_uno_rev3. [Kasutatud 19 05 2017].
- [24] Oomipood, „STM32F3 Discovery mikrokontroller,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/2215108_stm32f3discovery_arendusplaat_cortex_m4. [Kasutatud 19 05 2017].
- [25] Oomipood, „Texas Instruments TM4C123G mikrokontroller,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/2314937_tm4c123g_tiva_c_launchpad_texas_instruments. [Kasutatud 20 05 2017].
- [26] Arduino, „Arduino jadaliidestamise viited,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arduino.cc/en/reference/serial>. [Kasutatud 20 05 2017].
- [27] Oomipood, „RS232 TTL konverter,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/conv_rs232_ttl_serial_rs232_ttl_konverter_3_3_5_5v_max_3232.
- [28] Honeywell, „Bipolar, Latching, or Unipolar Digital Hall-effect Sensor ICs: SS400 Series, SS500 Series,“ Honeywell, 2016.

- [29] Arduino, „State Change Detection (Edge Detection) for pushbuttons,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/StateChangeDetection>. [Kasutatud 20 05 2017].
- [30] Maxim Integrated, „MAX481/MAX483/MAX485/MAX487-MAX491/MAX1487 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers,“ Maxim Integrated, 2014.
- [31] Oomipood, „TTL RS485 moodul,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/ttl_rs485_ttl_rs_485_moodul_max485_5v?q=max485. [Kasutatud 20 05 2017].
- [32] National Instruments, „Encoder Measurements: How-To Guide,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/7109/en/>. [Kasutatud 21 05 2017].
- [33] Oomipood, „LCD ekraan 2*16,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/lcd16x2zn_lcd_displei_2_16_sinine_taustvalgus_80_36m. [Kasutatud 21 05 2017].
- [34] European Central Bank, „EUR/USD valuutakursid päeva kaupa,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html. [Kasutatud 17 05 2017].

LISAD

Lisa 1 Tahhomeetri koodi näide

Järgnevalt olen toonud pseudokoodis näite, kuidas kasutada Halli sensorit tahhomeetrina.

```
{
    count = 0
    taimer1 = 0
    taimer2 = 0
    IF *tuvastab langeva serva* AND count =0
        {
            taimer1 = *praegune ajahetk*
            count = 1
        }
    IF *tuvastab langeva serva* AND count =1
        {
            taimer2 = *praegune ajahetk*
            count = 2
        }
    rpm = (1/(2*(taimer2 - taimer1)))*60 //leian pöörded sekundis ja siis minutis
    nurkkiirus = 2*pi/(taimer2 - taimer1)
    lcdrida1 = rpm
}
```

Lisa 2 Võnkeamplituudi koodi näide

Järgnevalt olen toonud pseudokoodis näite, kuidas kasutada inkrementaalenkoodrit võnkeamplituudi mõõtmiseks enkoodri suunamuutuse tuvastamisega.

```
{
  IF *tuvastab suunamuutuse*
  {
    count =0
    While != *tuvastab suunamuutuse*
    {
      IF *positsioon muutub*
      count++
    }
    degree = (count/2)/2048*360 //leian ühe suuna amplituudi ja siis nurga
    lcdrida2 = degree
  }
}
```