



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LABORI BALANSSEERIMISSEADME MODERNISEERIMINE

BALANCING LAB TEST RIG MODERNIZATION

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Ants-Martti Helinurm

Üliõpilaskood: 120811

Juhendaja: Leo Teder

Tallinn, 2019

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.

“.....” 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Ants-Martti Helinurm

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Labori balansseerimisseadme moderniseerimine

Kuupäev: 21.05.2019

38 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Leo Teder

Töö konsultant (konsultandid): Mart Tamre

Sisu kirjeldus:

Lõputöö põhieesmärk on laboris kasutatava balansseerimisseadme moderniseerimine, täiustamine ja võimalusel ka lihtsustamine. Töö käigus leitakse seadme nõrgad küljed ja võimalikud täiustused, mille muutmisel oleks reaalne kasu labori läbiviimisel.

Märksõnad: balansseerimisseade, moderniseerimine, rootor, labor, andurid

ABSTRACT

<i>Author:</i> Ants-Martti Helinurm	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Balancing lab test rig modernization	
<i>Date:</i> 21.05.2019	<i>38 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Leo Teder	
<i>Consultant(s):</i> Mart Tamre	
<i>Abstract:</i> The main goal of the thesis is to modernize the balancing lab test rig, improve it and also to simplify it if possible. Weak spots and improvements, which are relevant to the successful execution of the lab, are presented and analyzed.	
<i>Keywords:</i> rotor, balancing, modernization, lab, rig, sensors	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Labori balansseerimiseadme moderniseerimine
Lõputöö teema inglise keeles:	Balancing lab test rig modernization
Üliõpilane:	Ants-Martti Helinurm, 120811MAHB
Eriala:	mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Leo Teder
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	21.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Lõputöö põhieesmärk on laboris kasutatava balansseerimiseadme moderniseerimine, täiustamine ja võimalusel ka lihtsustamine. Töö käigus leitakse seadme nõrgad küljed ja võimalikud täiustused, mille muutmisel oleks reaalne kasu labori läbiviimisel. Labori sooritamiseks on enamuse sisendväärtusi ette antud, mis tähendab, et neid ma muuta ei saa. Peaksin sellest lähtuvalt tegelema punktidega, mis ei mõjutaks labori tulemusi.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on labori läbiviimisel kasutatav balansseerimiseadme muuta tänapäevasemaks, mis omakorda aitab kaasa labori sooritamise tõhususele, mõõtetulemuste täpsusele ning seadme turvalisusele.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Seadme esmasel ülevaatamisel koos juhendajaga tekkisid mõned ideed, millesse võiks süveneda. Üks neist on viis, kuidas mootori abil saadakse rootor pöörlema. Uurin töö käigus alternatiive, kuidas seda saavutada. Teine punkt oleks seadme praeguse trafo uuendamine. Hetkel puudub seadmel võimalus arvuliselt väljendada sooritatud labori teoreetilise osa arvutuste täpsust ja õigsust. Vastavate andurite lisamine seadmele ja nende andmete kuvamine aitaks kaasa labori

soorituse hindamisele. Töö käigus tooks välja erinevate komponentide plussid ja miinused, mille põhjal teen valiku sobivaimast.

4. Lähteandmed

Kuna olen ise antud labori sooritanud, siis saan omajagu teoreetilisest osast oma märkmetest ja arvutustest. Lõputöö juhendaja on ka juba omalt poolt saatnud labori sooritamiseks vajalikud materjalid koos jooniste ja valemitega, mis on töö sooritamiseks asjakohased. Andurite ja komponentide, mida töö jooksul jooksul võiks kasutada, andmed on üldiselt tootja poolt internetis kättesaadavad.

5. Uurimismeetodid

Töö erinevate osade jaoks on mõistlik kasutada erinevaid viise, kuidas valikuid teha. Mootori ülekande paremaks visualiseerimiseks on sobilik kasutada 3D modelleerimist. Andurite võrdluse puhul alustaks nende lihtsamast analüüsist, millele järgneb võimalusel nende katsetamine balansseerimisseadmel. Selle saavutamiseks on otstarbekas kasutada tabelarvutusprogramme.

6. Graafiline osa

Andmete graafiline väljendamine mudelite ja tabelite näol on kogu töö jooksul oluline osa, mistõttu on seda ka töö põhiosas üsna palju.

7. Töö struktuur

- Labori teoreetilised alused
- Balansseerimisseadme praeguse olukorra hindamine
- Mootori ülekande võimaluste analüüs ja sobiliku valiku tegemine
- Trafo analüüs
- Andurite analüüs ja sobiliku valiku tegemine
- Majandusliku kulu analüüs

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kasutan labori läbiviimiseks tööjuhendit, mis on koostatud kooli poolt. Enamus andmeid ja näitajaid tuleb analüüsivate toodete ja komponentide tootjate kodulehtedelt.

9. Lõputöö konsultandid

Konsulteerin Mart Tamrega, et teha kindlaks, millised võimalused on andurite osas hetkel koolis olemas.

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine, lähteandmete kogumine	(18.03.2019)
Teoreetilise osa kirjutamine	(01.04.2019)
Arvutuste ja modelleerimiste teostamine	(08.04.2019)
Uuringu tulemuste kirjeldamine, järelduste kirjutamine	(15.04.2019)
Töö esimene versioon valmis, juhendajale läbilugemiseks saatmine	(22.04.2019)
Paranduste sisseviimine	(29.04.2019)
Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	(06.05.2019)
Töö lõplik versioon valmis	(13.05.2019)

SISUKORD

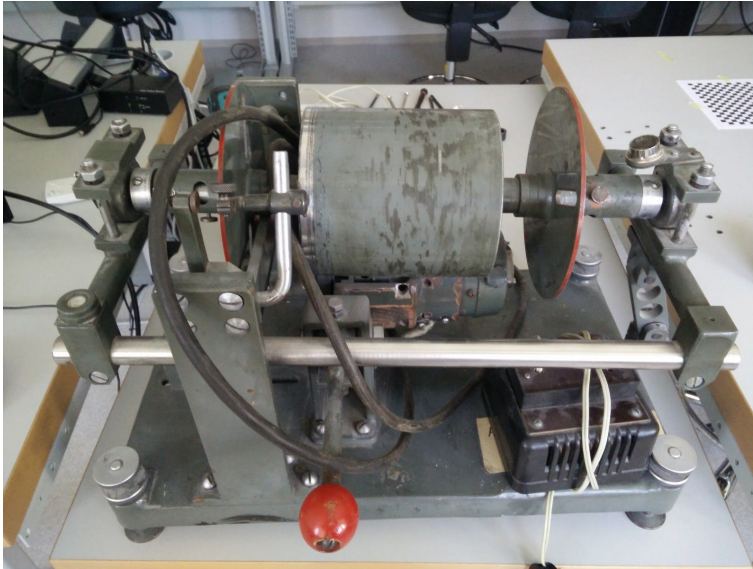
EESSÕNA	9
SISSEJUHATUS	10
1. TEOREETILISED ALUSED	11
2. BALANSSEERIMISSEADE	13
2.1 Balansseerimisseadme ehitus ja selle osad	13
2.2 Seadme seisukord	13
2.3 Mootor ja selle juhtimine	15
2.4 Jõuülekanne	18
3. ANDURID	20
3.1 Vibratsiooni mõõtmine	20
3.2 Kiiruse mõõtmine	22
4. JUHTPULT	24
4.1 Mikrokontroller	24
4.2 Lülitid ja pesad	26
4.3 Ekraan	28
5. MAJANDUSLIK KULU	29
KOKKUVÕTE	30
SUMMARY	31
KASUTATUD KIRJANDUS	32
LISAD	35
Lisa 1 Kood Arduinole tahhometri jaoks	36
Lisa 2 Juhtpuldi visuaal	38

EESSÖNA

Antud bakalaureusetöö teema on elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt pakutud. Valisin just selle teema, sest olen ise seda laboratoorset tööd sooritanud, kuid teise seadmega.

SISSEJUHATUS

Töös uuritav seade on rootori balansseerimisseade, mida on kasutatud varasemalt laborite läbiviimiseks õppetöö käigus. Hetkel seadet ei kasutata. Eesmärgiks on hinnata hetkeseisu, leida puuduvad osad ning leida viise, kuidas saaks seadme uuesti töökorda.



Sele 0.1 Rootori balansseerimisseade. Foto autori poolt tehtud.

Et mõista, mis on puudu või vajab uuendamist, peame aru saama seadme tööpõhimõttest ning selles mõjuvad jõud.

Seadme rootor pöörleb konstantse nurkkiirusega ümber oma telje. Rootori küljes on mass, mis tekitab disbalansi ning see väljendub vibratsiooni või võngete näol. Labori eesmärgiks on disbalansi tasakaalustamine korrektsioonimassidega, et süsteemi tsentraalne inertsipeatelg ühtiks pöörlemisteljega. Sellisel juhul kaob ära vibratsioon ja võib lugeda labori õnnestunuks, sest tehtud arvutused seoses korrektsioonimassidega on õiged. Enamasti säilib väikesel määral tasakaalustamatust.

1. TEOREETILISED ALUSED

Vaatleme süsteemi, kus rootor massiga m_0 pöörleb konstantse nurkkiirusega ω ümber x-telje. Igale pöörlemisteljest kaugusel e_i paiknevale elementaarmassile m_i mõjub tsentrifugaalne inertsjõud F_i . Elementaarinertsjõudude süsteemi võib asendada rootori S tasandis (tasand y-z) paikneva ekvivalentse süsteemiga, mis koosneb inertsjõudude peavektorist

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

kus \overline{e}_s on rootori massikeskme ekstsentrilisus

ja inertsjõudude peamomendist

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

kus \overline{J}_{el} on rootori massi tsentrifugaalinertsmoment pöörlemistelje ja raskuskeskme tasandi suhtes.

Rootoriga pöörlevad eelnimetatud vektorid \overline{F} ja \overline{M} tekitavad vaadeldavas sihis perioodiliselt muutuvaid dünaamilisi toereaktsioone, mille mõjul tekivad rootoris vibratsioonid ja võnked. Rootorit nimetatakse tasakaalustamatuks, kui toereaktsioonid tulenevad rootori massijaotusest (s.o. $\overline{F} \neq 0$ ja $\overline{M} \neq 0$).

Tasakaalustamatusel lähtutakse inertsjõu peavektori ja peamomendiga proportsionaalsetest suurustest, mida nimetatakse vastavalt disbalansside peavektoriks \overline{D}_S , kus

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

ja disbalansside peamomendiks \overline{M}_D , kus

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

Vektor, mille määrab tasakaalustamata massi korrutis tema ekstsentrilisusega, on disbalanss.

Kusjuures, tasakaalustamatusel on tulenevalt võrranditest (1.1) ja (1.2) erinevad liigid. Staatiline tasakaalustamatus on juhul, kui rootori pöörlemistelg ja tsentraalne inertsipeatelg on paralleelsed ning tasakaalustamatuse määrab täielikult disbalansside peavektor \overline{D}_S . Momendist tulenev tasakaalustamatus on juhul, kui rootori pöörlemistelg ja tsentraalne inertsipeatelg lõikuvad massikeskmes S ning vektor \overline{M}_D väljendab tasakaalustamatust. Dünaamiline tasakaalustamatus

on juhul, kui rootori pöörlemistelg ja tsentraalne inertsipeatelg ei lõiku masskeskmes S või nad on kiivsirged. Tasakaalustamatust väljendavad vektorid \overline{M}_D ja \overline{D}_S .

Dünaamilist tasakaalustamatust võib väljendada ka teisiti. Valime kaks pöörlemisteljega rist paiknevat tasapinda ning lahtuma disbalansside peavektori \overline{D}_S ja peamomendi \overline{M}_D neisse tasapindadesse vastavalt komponend disbalanssideks \overline{D}_{S1} ja \overline{D}_{S2} ning disbalansside \overline{D}_{M1} ja \overline{D}_{M2} paariks. Liites mõlemas tasapinnas esinevad disbalansid saame vastavaid tasapindades disbalansid \overline{D}_1 ja \overline{D}_2 . Need vektorid üldjuhul erinevad moodulilt ja on mitteparalleelsed, moodustades nn. disbalansside risti. Seega võime vaadelda dünaamilist tasakaalustamatust kui disbalansside risti toimet mootorile.

Eelnevast ilmneb, et jäiga rootori disbalansside vähendamiseks tuleb rootorile kas lisada või eemaldada kaks massi, mida nimetame korrektsioonimassideks. Korrektsioonimassid paigutatakse samadesse tasapindadesse, kuhu eelnevalt redutseeriti tasakaalustamatust põhjustavaid disbalansse. Pöörlemistelje tasapindu, kus asetseb korrektsioonimassikese, nimetatakse korrektsioonipindadeks.

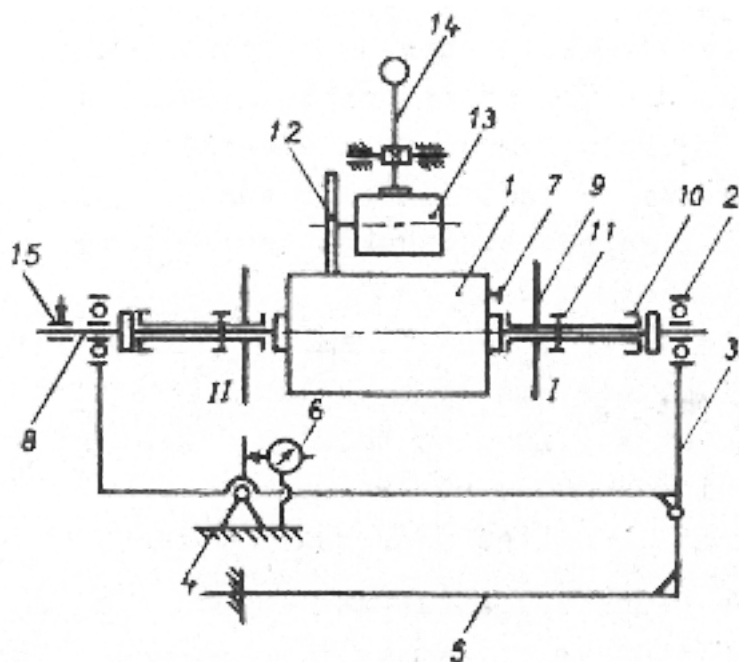
Korrektsioonipindades esinevate disbalansside ja nende nurkade määramist ning disbalansside vähendamist rootori massi korrektsiooni teel nimetatakse rootori balansseerimiseks. Vastavatele tasakaalustamatuste liikidele vastab ka moodus, kuidas rootorit balansseerida: staatiline balansseerimine, momendiga balansseerimine, dünaamiline balansseerimine.

Täielikult balansseeritud rootoril vektorid $\overline{M}_D = 0$ ja $\overline{D}_S = 0$, mis tähendab, et tsentraalne inertsipeatelg ühtib rootori pöörlemisteljega. Balansseeritud rootoril esineb siiski n.ö jääv disbalanss, mis tuleneb rootori telje risttasapinna disbalansist. Kui jääv disbalanss on väiksem lubatud disbalansist vaadeldavas ristpinnas, siis võib lugeda balansseerimise tulemuse rahuldavaks. [1, pp. 44-47]

2. BALANSSEERIMISSEADE

2.1 Balansseerimisseadme ehitus ja selle osad

Labori juhendis on lihtsustatud skeem balansseerimisseadmest, kus on välja toodud kõik olulised mehaanilised osad.



Sele 2.1 Rootori balansseerimisseadme osad [1, p. 57]

Komplektse ja täielikult toimiva balansseerimisseadme jaoks vajalikud osad on järgnevad: balansseeritav rootor (1) peaks toetuma veerelaagrite (2) kaudu pendelraamile (3). Raami vasakpoolne ots ühendub šarniirselt kinnislüluga (4), kuna parempoolne ots toetub elastsele vardale (5). Indikaator (6) võimaldab resonantsolukorras esinevat võnkeamplituudi. Rootori otspinda kinnitatud poldiga (7) tekitatakse tasakaalustamatus. Teljel (8) peaks asuma 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 peaks seiskama telje vasakpoolsel otsal asuv pidur (15). [1, pp. 56-57]

2.2 Seadme seisukord

Nagu eelnevalt mainitud, siis seade ei ole hetkel kasutuses laborite läbiviimisel. Balansseerimispinki on võimalik käsitsi liigutada, mis tähendab, et kõik põhilised liikuvad osad on

toimivad. Rootori pöörlemisel tekivad silmanähtavad vertikaalsed võnked, mis tuleneb balanseerimata rootorist. On olemas ka väljalõigetega kettad, millele kinnitatakse korrektsioonimassid. Kogu seadme parempoolne ots tundub olevat komplektne ning skaala ketaste pöördenurkade mõõtmiseks on selgelt loetav (sele 2.2).



Sele 2.2 Balanseerimisseadme parempoolne ots. Foto autori poolt tehtud.

Küll on puudu aga pidur ning indikaator, millega saaks võnkeamplituuti määrata. Indikaatori haarats on nähtav selil 2.3.



Sele 2.3 Balanseerimisseadme vasakpoolne ots. Foto autori poolt tehtud.

2.3 Mootor ja selle juhtimine

Olemasoleva mootori vahetus uue vastu oleks mitmes mõttes soovituslik. Uued mootorid on tõhusamad, kompaktsemad ja kergemad. Kui vaadata vana mootori andmeid (sele 2.4), siis uus peaks ideaalis vastama praeguse mootori pööretele, et labori tulemused sellest ei muutuks.



Sele 2.4 Mootori andmed. Foto autori poolt tehtud.

Kui uus mootor valida kas sünkroon- või asünkroonmootor, siis tuleks silmas pidada, et sagedusel on otsene seos pöörlemiskiirusega. Et selleni jõuda, tuleb alustada mootori pöörlemissagedusest:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}, \quad (2.1)$$

kus f on sagedus,

p on pooluspaaride arv.

Selle vastuse ühik on radiaani sekundis (rad/s), kuid meid huvitab pöörlemiskiirus, mille ühik on pöört minutis (p/min või rpm). Teisendamine toimub järgmise valemi järgi:

$$n = \frac{60}{2\pi} * \omega = \frac{60f}{p} \quad (2.2)$$

Võttes sageduseks 50 Hz ning eeldame, et mootoril on üks pooluspaar, siis kasutades valemeid 2.1 ja 2.2, saame arvutada pöörlemiskiiruse.

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi * 50}{1} = 100\pi = 314 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 3000 \text{ p/min}$$

Kui mootoril oleks kaks pooluspaari, siis tuleb vastuseks 1500 p/min, mis on vähem, kui vanal mootoril. Sellest tulenevalt tuleks valikusse võtta ühe pooluspaariga mootorid. Kui teha selline

valik, siis tuleb ka valida sobiv sagedusmuundur, sest kiiruse muutmine toimub selle abil. [8, pp. 115-119]

Võimalus on kasutada ka alalisvoolumootorit. Sellisel juhul toimub pöörlemiskiiruse reguleerimine läbi pinge muutmise. [8, p 122]

Tuleb arvestada ka sellega, et mootor peab suutma panna balansseeritava rootori pöörlema piisavalt kiirelt. Selleks tuleb leida praeguse mootori jõumoment, et uuel mootoril oleks vähemalt sama suur näitaja. Kasutades allpool valemit 2.3, saame alalisvoolul toimiva mootori momendi:

$$T = \frac{P}{\omega}, \quad (2.3)$$

kus P on võimsus (W),

ω on mootori nurkkiirus (rad/s).

Kuna mootori nimeplaadil on antud pöörded minutis, siis tuleb teisendada see nurkkiiruseks:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}, \quad (2.4)$$

kus n on pöörete arv minutis (min^{-1} või rpm).

Asendades valemi 2.4 valemisse 2.3, saame arvutada välja mootori võlli momendi:

$$T = \frac{100 \cdot 60}{2200 \cdot 2 \cdot \pi} \approx 0,43 \text{ Nm}$$

[16, p 72]

Autor tuvastas mõned mootorid, mis oleksid sobilikud praeguse asemele. Andmeid on mootorite infolehtedel palju, kuid välja toodud on tabelis 2.1 vaid need, mis on määravad antud rakenduses. Kuna enamus ettevõtteid ei too hindasid välja oma kodulehtedel, siis küsitud sai hinnapakumisi sobivate näitajatega mootoritele. Kuuest saadetud päringust tegi sobiva pakkumise üks ettevõtte. Valikusse sai võetud kaks vahelduvvoolumootorit ja üks alalisvoolumootor, et oleks võrdlus laiema haardega.

Tabel 2.1 Sobilikud mootorid vana asendamiseks [11][12][13]

Mudel	Võimsus (kW)	Pöörlemiskiirus (p/min)	Väändemoment (Nm)	Hind (€)
MS 563-2	0,18	2750	0,62	76,8
VEM K21R 63K2	0,18	3000	0,57	99,73
QBL5704-116-04-42	0,134	4000	0,42	188,76

Võrdlusest ilmneb, et alalisvoolumootor on märksa kallim, väiksema väändemomendiga ja pöörded on isegi liiga palju. Vahelduvvoolumootorite puhul on näitajad sarnased, kuid üks paistab rohkem silma tänu madalamale hinnale ning suuremale väändemomendile. Selle valguses valib autor uueks mootoriks MS 563-2, mis on pisut kiirem ja võimsam võrreldes praegusega ning on samas kõige odavam antud valimis.

Valituks osutunud mootor avastati tänu Felandia OÜ hinnapakkumisele ning lisaks mootorile soovitati ka kohe sobilikku sagedusmuundurit. Tegemist on Invertek poolt toodetava mudeliga ODE-3-120023-1F12. Kindluse mõttes võrreldakse tabelis 2.2 soovitatud sagedusmuundurit samasse klassi kuuluva tootega.

Tabel 2.2 Sobilikud sagedusmuundurid valitud mootorile [18] [19] [20]

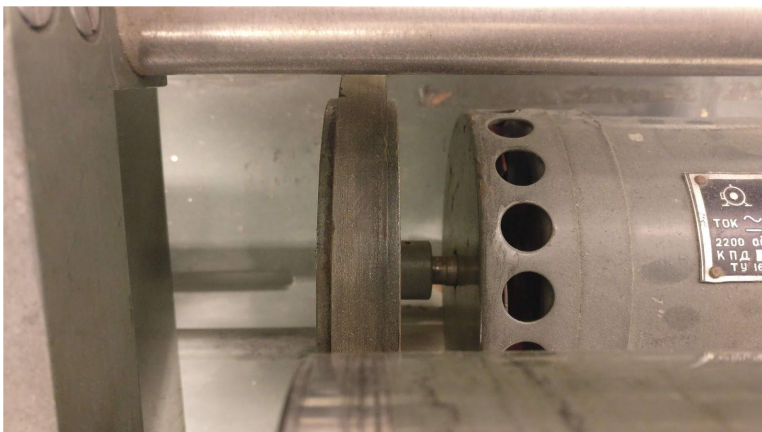
Mudel	Maksimaalne võimsus (kW)	Hind (€)
ODE-3-120023-1F12	0,37	175,2
MC LTE-B0004-2B1-1-00	0,37	175,44

Näitajate poolest on tegemist sisuliselt samade toodetega, seega on neid omavahel raske võrrelda. Ainus, mis silma hakkab, on nende visuaalne erinevus. Felandia OÜ poolt hinnapakkumises soovitatud Invertek ODE-3-120023-1F12 sai valituks üksnes tänu sellele, et sobivus mootoriga oleks kindel.

Mootori käivitus toimub sagedusmuunduri pealt, mis tähendab, et algne plaan mootori käivitus siduda juhtpuldiga ei ole enam mõistlik. Sagedusmuundur on aga varustatud korraliku juhtpaneeliga, mis muudab lülituse mugavaks ja turvaliseks.

2.4 Jõuülekanne

Mootor asub otse rootori all ning hetkel on jõuülekanne kasutusel hõõrdratas (sele 2.4), mis viiakse kangi abil rootoriga otsesesse kontakti.



Sele 2.5 Hõõrdratas mootori küljes. Foto autori poolt tehtud.

Lahendus on robustne, kuid antud puhul toimib hästi. Lisaks oma lihtsusele lahendab see mitmeid probleeme, millest üks on näiteks turvalisus. Oma asukoha tõttu ei ole mootori liikuvad osad kergesti ligipääsetavad, mis vähendab riski võõrkehade takerdumiseks selle töötamise ajal. Samuti seisab rootor paigal, kui keegi füüsiliselt ei suru mootori hõõrdratast vastu balansseerimisseadme rootorit.

Momendi ülekandmise seisukohast ei ole hõõrdratas ideaalne lahendus, sest kahe pinna vahel tekib libisemine. Selle vältimiseks võiks alternatiividena kasutusele võtta muud ülekande liigid.

Tabelis 2.3 on võimalikud variandid ning nende vastavad eelised ja puudused.

Tabel 2.3 Alternatiivsed ülekande liigid mootori ja rootori vahel [4, pp. 60-61]

Ülekande liik	Eelised	Puudused
Hammasrihm	libiseb minimaalselt;	ei ole võimalik lahutada; avaldab koormust võllile ja laagritele; venib välja; kulub
Kett	ei libise üldse; vajab vähe eelpingutamist;	ei ole võimalik lahutada; kett ise veidi võngub, mis võib mõjutada mõõtmisel tulemust; venib välja; vajab hooldust ja määrimist
Hõõrdratas	normaalasendis lahutatud; ei vaja hooldamist; ei vaja täiesti paralleelseid võlle	libiseb enim; kaod ülekandmisel;

Võrdlusest võib järeldada, et hetkel kasutusel olev hõõrdratas on parim lahendus selle otstarbe jaoks. Ühtlasi labori tulemus ei sõltu olulisel määral rootori pöörlemise kiirusest, mistõttu tekkivad kaod on igati aktsepteeritavad.

Selles veendumiseks vaatame üle valemid 1.1, 1.2, 1.3 ja 1.4. Peame silmas ka asjaolu, et balanseeritud rootoril vektor $\overline{M}_D = 0$ ja $\overline{D}_S = 0$. Kui kiirus pole piisav, siis vibratsiooni sagedus on nii väike, et see ei pruugi avalduda. Kiiruse suurenedes suureneb ka sagedus ning tekib vibratsioon. Valemitest näeme, et nurkkiirus ω on ruudus, mis annab aimu, et kiiruse suurenedes disbalans suureneb eksponentsiaalselt. Lihtsustatuna võib öelda, et kui rootoril on õigesti määratud korrektsioonimasside suurused ja asukohad, kiirus on piisav ning võllid on omavahel täiesti paralleelsed, siis on rootor balansis.

3. ANDURID

3.1 Vibratsiooni mõõtmine

Esmases järjekorras oleks vaja selgusele jõuda, milliseid andureid oleks mõistlik balansseerimisseadme juures kasutada. Nagu nimigi viitab, siis labori eesmärgiks on rootori balansseerimine ehk vibratsiooni eemaldamine lisamasside lisamisel. Autor näeb vajadust mõõta rootori disbalanssi, et laboratoorse töö tulemust kontrollida ning hinnata. Reaalsuses ei ole oluline teada täpselt ja arvuliselt vibratsiooni sagedust. Piisab sellest, kui määrata amplituudi vahemikud, et hinnata töö tulemust. Tabelis 3.1 on esitatud võimalused, kuidas on võimalik amplituudi määrata.

Tabel 3.1 Amplituudi mõõtmise meetodid

Meetod	Eelised	Puudused
aktseleromeeter	kolmes suunas mõõtmisvõimalus; näitab terves ulatuses vibratsioone;	kõige keerulisem konstrueerimine;
piirlüliti	väike;	näitab ainult amplituudi tippväärtust;
mehaaniline indikaator	ehituselt töökindel;	vajab iga kord kalibreerimist; väike tööpiirkond;

Balansseerimisseadme ehituse tõttu avaldub rootori disbalanss vaid vertikaalses suunas. Piirlüliti aga annab signaali, kui uuritav liikuv objekt saavutab kindlaksmääratud positsiooni. See ei sobi aga eesmärgiga kokku, mis oleks pidev amplituudi mõõtmine, et määrata vibratsioonil vahemikud. Probleem mehaanilise indikaatori kasutamisel on väike tööpiirkond. Seetõttu tuleks kasutada aktseleromeetrit ehk kiirendusandurit. See on elektromehaaniline muundur, mis genereerib objekti raputamisel või vibratsiooni korral elektromotoorjõudu. Antud andureid kasutatakse sageli seismilistel uuringutel ja erinevate pöörlevate masinate ning tööriistade vibratsiooni mõõtmiseks. [3, pp. 65-66]

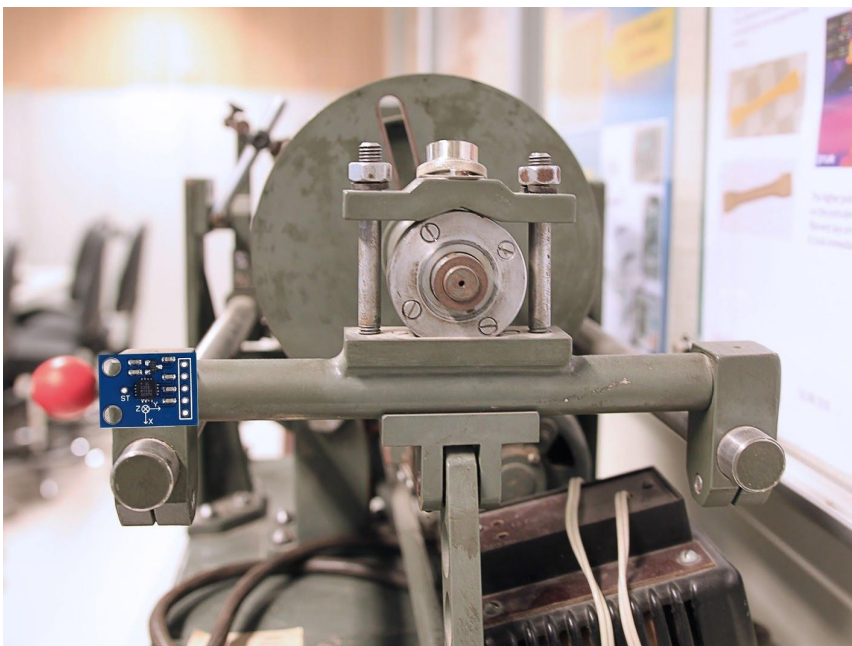
Allpool tabelis 3.2 on kaks enamlevinud aktseleromeetritega moodulit oma eeliste ja puudustega.

Tabel 3.2 Moodulite võrdlus. [6, pp. 3-4] [7]

Moodul	Eelised	Puudused	Hind (€)
ADXL335	väga väike; lihtsalt ühilduv Arduinoga; kolmes suunas aktseleromeeterid	väljund on analoog;	10
MPU6050	väike; kolmes suunas aktseleromeeterid	keerulisem ühendada;	26,7

Kuigi MPU6050 tundub olevat võimekas ja mingites oludes õige valik, siis valituks osutus seekord ADXL335 kiirendusandur. Valikut põhjendatakse parema ühilduvusega ning ligi kolm korda odavama hinnaga. Puuduseks on küll kiibi analoogne väljund iga telje suhtes aga seda saab siiski edukalt kasutada, kui ühendada need nt. Arduinol analoogsisendi pesadesse.

Vibratsiooni mõõtmisel on oluline selgeks teha, kuhu oleks mõistlik andur paigaldada. ADXL335 moodulil on väljund iga telje jaoks eraldi, mis tähendab, et asend masina suhtes ei ole niivõrd oluline. Tuleks jälgida vaid, et selle kiip oleks masina ning iga telje suhtes n.ö loodis ja moodul oleks tugevalt seadme küljes kinni. Loeb lõpuks see, milliste väljundite andmeid otsustatakse kasutada. Mooduli potentsiaalselt sobiv asukoht masinal on näidatud seel 3.1. Tegemist on rootori n.ö lahtise otsaga, mis on kõige suurema vertikaalse liikuvusega. See annab mõõtmisel kõige suurema ulatuse. Kas andurile antud asukoht on siiski sobilik selgub alles siis, kui kõik on ühendatud ja esimesed testid on tehtud. [21, pp. 14-16]



Sele 3.1 Mooduli ADXL335 planeeritud asukoht seadme küljes. Foto ja visuaal autori poolt teostatud.

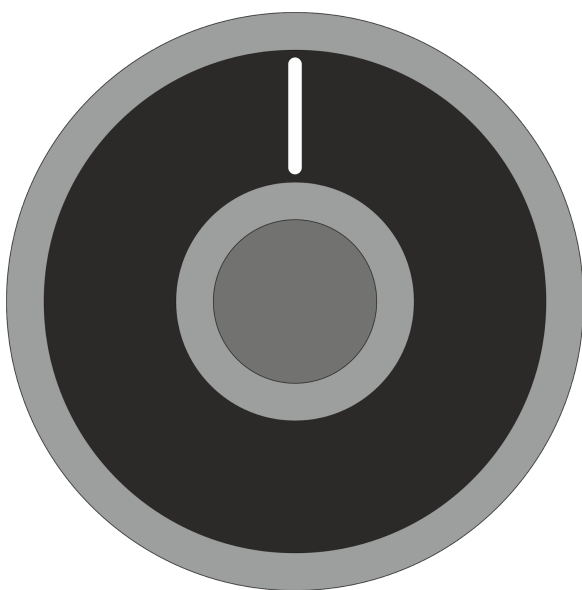
Lähtudes ADXL335 kiibi andmelehest, siis on mõned iseärasused, mis antud rakenduses on määrava tähtsusega. Et teha edaspidi korrektseid arvutusi, siis peab täheldama liikumatu mooduli väljundpinget, mis on ligikaudu pool sisendpingest. Samuti on kõikide telgede tundlikkus seotud otseselt sisendpingega. [6, p 3]

Kui valitud mooduliga lahendus siiski ei toimi vastavalt vajadusele ning mooduli asukoha muutmine ei paranda ka olukorda, siis soovitab autor taastada originaalilähedane seisund või kasutada mehaanilist indikaatorit.

3.2 Kiiruse mõõtmine

Eelnevalt selgus, et nurkkiirus peab olema piisav, et disbalanss avalduks. Kuna mootori hõõdrattast tulevad ka teatud kaod, siis oleks mõistlik lisada võimalus lugeda pöörlemiskiirust. Selleks on vaja tahhomeetrit ehk pöördeleendurit, mis mõõdab pöörlevate osade nurkkiirust. Sobilik andur tahhomeetri ehituseks on näiteks Halli tajur, mille töö põhineb elektrivälja tekkimises magnetväljas asetseva vooluga juhis, mida nimetatakse ka Halli efektiks. Efekti põhjustab laengukandjate kõrvalekalle magnetvälja mõju, kuid antud seadme puhul ei kasutata selleks vooluga juhti vaid magnetit. Kinnitades ühe magneti rootori enda külge saame tuvastada hetke, mil rootori asend on kohakuti anduriga. Iga ringi peale on üks selline hetk, mis võimaldab tuletada pöörlemiskiiruse, kui pisut teisendada. Läbiv sõna lõputöös on balansseerimine ning selle valguses oleks ehk paslik kasutada kahte magnetit, et rootoril säiliks balanss. Olgugi, et magnetite mass on väike, siis see võib lõpuks osutuda mõjutavaks teguriks. [3, pp. 27-28]

Veel oleks võimalik kasutada fototajurit, mis on üsna populaarne valik. Optiline infoedastus koosneb valgusvoo allikast, optilisest ülekandekanalist ning valgusvoo vastuvõtjast. Allikateks on valgusdiodid ja infrapunakiirguse valgusdiodid ning vastuvõtjaks on fototakisti ja/või fotoelement. Seda tajurit kasutatakse laialdaselt n.ö joonejärgijates, mis tähendaks, et rootorile tuleks tekitada äratuntav joon, mille peale reageeriks vastuvõtja (sele 3.2).



Sele 3.2 Rootor otsa pealt vaadatuna. Autori poolt koostatud visuaal.

Kui rootor teha mustaks ja matiks, siis sellelt ei peegeldu infrapunakiir tagasi fotoelemendile. Valge joon sellel aga peegeldab valgusallikast tulevat kiirt nii, et see jõuaks vastuvõtjani. Kuna optiline ülekandekanal on lihtsalt õhk saatja ja vastuvõtja vahel, siis tulemus on kergesti mõjutatav ruumis oleva valguse mõjul. [3, pp. 29-30]

Töökindlam ja kergem variant tundub olevat Halli tajurit kasutada. Tahhomeetri konstrueerimisel tuleks ka silmas pidada, et Halli andur ei pruugi toimida magneti mõlema poolusega, mistõttu tuleks enne lõplikku paigaldust katsetada kumba pidi andur või magnet asetada. Arduinole sobilik Halli anduri moodul on Oomipoes saadaval ning hind 3€ ei ole eriti kallid selleks otstarbeks. [10]

4. JUHTPULT

4.1 Mikrokontroller

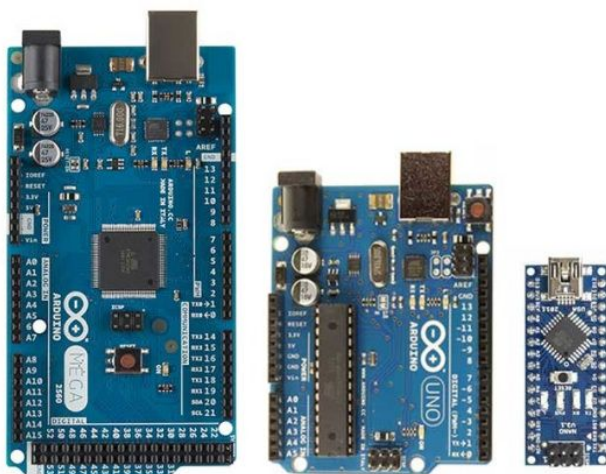
Juhtpuldi südameks oleks mõistlik kasutada mõnda mikrokontrollerit või arendusplaati. Kuna varasemalt on igal sammul analüüsi käiku läbinud sõna “Arduino”, siis on igati loogiline seda kasutada. Tegemist on suurepärase arendusplaatide tootjaga, mida kasutavad nii kooliõpilased, tudengid, kunstnikud, programmeerijad ja mitmete valdkondade spetsialistid. Neil on kasutusel oma programmeerimiskeel, mis sarnaneb C/C++ keelele ning on väga lihtsalt õpitav. Neil on tasuta kättesaadaval suur hulk infomaterjale ning kasutajad on väga aktiivsed, mis muudub probleemide lahendamise lihtsaks. Arduino toodab erinevaid arendusplaatide, millel on omad tugevused ja nõrkused. Et mõista, milline sobib eelnevalt valitud anduritega, siis toon välja tabelis 4.1 asjakohased näitajad. [24]

Tabel 4.1 Arduino arendusplaatide võrdlus [2, pp. 1-2][25][26][27]

Mudel	Analoog-sisendite arv	Digitaalsete sisendite-väljundite arv	Eelised	Puudused	Hind (€)
UNO Rev3	6	14	väike;		34
Nano 3.1	8	14	füüsiliselt väikseim;	puuduvad kõik pesad;	27
Mega2560 Rev3	16	54	väga palju pesasid;	füüsiliselt suurim;	47

Analoogsisendite arvu põhjal on kõik sobilikud, sest vajadus on ainult 3-4 sisendi järgi. Digitaalseid sisendeid-väljundeid vajab ainult LCD ning selleks kulub 6 pesa, seega jällegi kõik on sobilikud. Mega2560 Rev3 on isegi liiga võimas ja pesaderohke, mistõttu osutub valituks UNO Rev3. Nano 3.1 oleks ka igati sobilik, kuid kuna sellel puuduvad igasugused pesad, siis tuleks teha palju jootmist. Hinnaerinevus on küll ligi 20% kuid see ei ole piisav õigustus autori arvamusele.

Füüsilise suuruse ja pesade arvu erinevuse illustreerimiseks on seel 4.1 pandud kõrvuti kõik kolm valikus olnud Arduino arendusplaat [28].



Sele 4.1 Arduino arendusplaadid, vasakult Mega, UNO ja Nano. Foto Internetist.

Analoogsisendite puhul on piirangud, mis vajavad täpsustamist. Nimelt on maksimaalne sisendpinge neis pesades vaiksuse 5V ning neid kuvatakse 10-bitilises süsteemis ehk 0-st 1023-ni. Tagastatud väärtus on 0, kui sisendpinge on 0V, ning 1023, kui pinge on 5V. See teadmine võimaldab leida mooduli väljundpinge, kui 5V jagada 1023-ga ning korrutada selle vastus tagastatud arvuga. Tabelis 4.2 on mõned näidisarvutused erinevate sisendepingete korral ning nende vastused. [30][2]

Tabel 4.2 Arduino tagastatud arvude näidistõlgendused

Tagastatud arv	Arvutuskäik	Mooduli väljundpinge 5V (V)	Mooduli väljundpinge 3.3V (V)
1023	$V/1023*1023$	5	3,3
307	$V/1023*307$	1,500	0,990
700	$V/1023*700$	3,299	2,258
100	$V/1023*100$	0,489	0,323

Eelnevalt on täheldatud aga ADXL335 mooduli seost sisendpinge ja väljundpinge vahel. Antud rakenduses on sisendpingeks 3.3V, mis teeb puhkeasendis väljundpingeks umbes 1,65V ning maksimaalselt 3.3V. See aga tähendab, et Arduino poolt tagastatud väärtus ei ületa kunagi 700, kui kasutada ülevalpool toodud seost, ning ligikaudu 30% mõõtevahemikust jääb kasutamata.

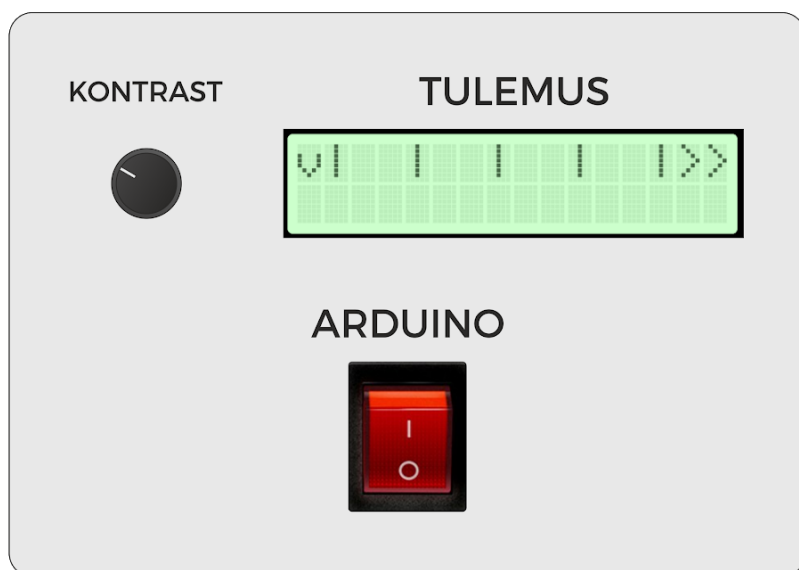
Arduino tootja on selle probleemi lahendamiseks lisanud pesa, mis on märgistatud nimega AREF. Sinna pesasse söödeta pinget kirjutab üle vaiksuse 5V maksimumi. Peab aga jälgima, et AREF pesa pinget jääks 0-5V vahemikku, vastasel juhul võib Arduino saada pöördumatult kahjustusi. Antud

juhul 3.3V on maksimaalne pinge ADXL335 moodulilt, mis vastab kriteeriumile AREF pesa kasutamiseks. Stabiilse 3.3V pinge saab Arduinolt endalt ning selle rakendamiseks tuleks ühendada 3.3V pesa otse AREF pessa. Koodis tuleb ka vastav viide sellele teha kasutades käsklust "analogReference (EXTERNAL);". Nüüd on võimalik ära kasutada kogu skaalat vibratsiooni mõõtmiseks ning tulemused on potentsiaalselt 30% ulatuses täpsemad. [31]

4.2 Lülitid ja pesad

Juhtpuldil peaks olema Arduino jaoks eraldi lüliti, mis on ühendatud jadamisi toitejuhtme vahele. Toitejuhtme jaoks on Arduinole projektikarbi tagumisel küljel pesa, mis on nähtav seel 4.2. Arduino vajab 7-12VDC, seega tavaline 2.5/5.5mm alalisvoolu toitepesa on selleks sobilik. Kuna nii ADXL335 kui ka Halli anduri moodul vajavad vastavalt 3-5VDC ja 4.5-24VDC tööpinget, siis saab kasutada Arduinolt tulevat 3.3V väljundit ning Halli anduri jaoks saab toite võtta rööbiti 7-12VDC Arduino lülitilt.

Tänu madalatele tööpingetele otsustas autor kasutada andurite jaoks USB (*Universal Serial Bus*) juhtmeid ja pesasid, mis antud töös poleks kasutusel selle tavapärasel viisil. Toide ja maandus on samad nagu USB-l tavaliselt, kuid teised kaks juhet kasutaks ära andurite signaalide edastamiseks. Seetõttu saab ADXL335 moodulilt kasutada andmeid ainult kahelt teljelt korraga, sest USB juhtmes on neli juhet. Kolmanda telje kasutamine valikuliselt on teoreetiliselt võimalik, kui kasutada ON-ON tüüpi lüliti kahe telje vahel, kuid otsene vajadus selleks puudub.

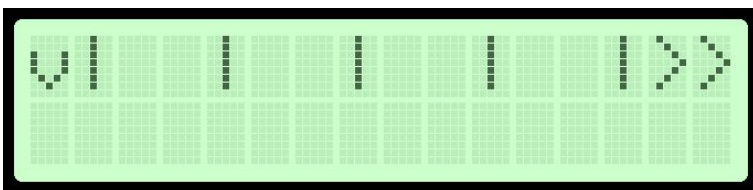


Sele 4.2 Juhtpuldi ideelise visuaali pealtvaade ja tagantvaade. Autori poolt koostatud visuaal.

Kuna USB pesad on mittestandardset kasutatud ning ei ole universaalsed, siis on oluline märgistada selgelt kumb pesa on kumma anduri jaoks. Vastasel juhul võivad moodulid saada pöördumatult kahjustada, sest üks neist kasutab tunduvalt kõrgemat sisendpinget.

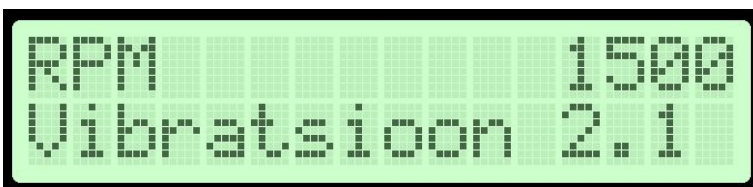
4.3 Ekraan

Kõige levinum ja lihtsam viis on kasutada tavalist kaherealist LCD (vedelkristall) kuvarit. Et kuvada vibratsiooni taset LCD-l piisavalt arusaadavalt, siis lihtne skaala esimesel real on piisav (sele 4.3). Teisele reale ilmub reaajas andurist tulev tõlgendatud info. Esimene veerg "v" all on n.ö kontrollveerg, mis näitab kas rootor pöörleb piisaval kiirusel või mitte. Järgnevad veerud teises reas väljendavad vibratsiooni taset. Õigesti sooritatud töö puhul peaks näit jääma esimese püstkriipsu alla, sest siis on vibratsioon minimaalne. Iga püstkriips vasakult paremale on vastav hindele 5-st 1-ni. Kui näit läheb üle viimase püstkriipsu ja sümbolite ">>" alla, siis vibratsioon on juba liiga suur ja laboratoorset tööd ei saa lugeda sooritatuks.



Sele 4.3 LCD ekraanil skaala.

Kui skaala kuvamine osutub keeruliseks või ei ole võimalik kalibreerida andureid piisavalt täpselt, siis saab ka läheneda probleemile lihtsamalt. Nimelt kõik andmed on arvuliselt teada ning ainult nende kuvamine on ka väga sobilik lahendus. Sellisel juhul tuleks välja tuua nii pöörlemiskiirus kui ka vibratsiooni numbriliselt (sele 4.4). Koodis muudatused oleks minimaalsed ning ainult kuvatavad muutujad oleks vaja ümber muuta.



Sele 4.4 LCD ekraanil tulemused arvuliselt.

LCD-l on ka ettenähtud *pin*-id kontrasti muutmiseks $10k\Omega$ potentsiomeetri abil. See on odav ja kasulik lisa, sest erinevate valguste käes ja üldiselt aja jooksul võib muutuda ekraan halvasti loetavaks. [9]

5. MAJANDUSLIK KULU

Autor toob tabelis 5.1 välja kõik lõputöö koostamise hetkel kehtivad hinnad koos käibemaksuga komponentidele, mis on tarvilikud antud töös käsitletud punktides balansseerimisseadme moderniseerimiseks.

Tabel 5.1 Majanduslik kulu balansseerimisseadme moderniseerimisel

Komponent	Hind (€)
Arduino UNO Rev3	34
Alumiinium projektikarp	29
Mootor MS 563-2	76,8
Sagedusmuundur ODE-3-120023-1F12	175,2
Aktseleromeeter ADXL335	10
Halli anduri moodul	3
LCD 16x2	8,5
LCD kontrasti potentsiomeeter	1
Klahvlüliti	2
Toiteadapter Arduinole	13
Juhtmed, nupud ja pesad (ligikaudu)	20

Kogu summa on ligikaudu 372,5€.

Balansseerimisseadme moderniseerimine oleks autori arvamusel otstarbekas, kui on piisavalt inimesi, kes seda kasutaksid. Kui võtta arvesse, et antud seade ei ole ainus sellise labori läbiviimiseks, siis tuleks esialgu hinnata, kas on piisavalt nõudlust mitme balansseerimisseadme järele.

KOKKUVÕTE

Lõputöö koostamisel on üle vaadatud balansseerimisseadme seisukord ning tehtud selgeks, mis on vajalikud uuendused, et see uuesti tööle saada ja laboreid edukalt sooritada.

Mehaaniliselt on suurim probleem amortiseerunud mootor ja selle trafo. Nende asemele on leitud sobilikud asendused uue vahelduvvoolumootori ja sagedusmuunduri näol. Momendi ülekanne mootori võlliit rootorile hõõrdrattaga on sobilik antud rakenduses, kuna tekkivad kaod on aktsepteeritavad.

Lisadena on välja toodud kahe anduri kasutuse võimalus labori tulemuse täpsemaks hindamiseks. Üks on Halli anduri baasil töötav tahhomeeter, mis annab teada, kas rootori pöörlemiskiirus on piisav, et vibratsioon avalduks korralikult, ning teine on kiirendusanduri kasutamine, et määrata seadme vibratsiooni, mis tekib ebakorrektselt paigutatud korrektsioonimasside tagajärjel.

Ülal mainitud lisad ühenduvad ühtsesse juhtpulti, mis on varustatud LCD ekraaniga, et kuvada anduritest tulevaid andmeid. Kogu juhtpulti keskmes on Arduino UNO, mis teeb vajalikud töötused andmetega ning genereerib ekraanile vajaliku info. Koostatud on ka kõiki neid toiminguid kirjeldav programm Arduino jaoks ja visuaal, mis näitab juhtpulti ideelist konstruktsiooni.

Majanduslik kulu analüüsi põhjal tehtud otsuste elluviimiseks on 372,5€. Autori otsus kulu mõistlikkusest ning moderniseerimise otstarbekusest sõltub sellest, kui suur on nõudlus seadme järgi.

SUMMARY

This thesis has reviewed the current state of the lab balancing rig and has pointed out the weak spots and also determined necessary upgrades to restore it to functioning order.

Biggest problems mechanically are the amortisation of the motor and its power supply. Suitable replacements have been suggested in the form of a new AC motor and a compatible frequency inverter. Current method of transmission is acceptable and the author has decided to leave it unchanged despite the possible loss in torque.

Additional features to improve the balancing rig have been suggested. One feature is a tachometer based on a Hall effect sensor to check if the rotor is spinning fast enough for the vibrations to be noticeable. Another feature would be to mount an accelerometer to the rig, which would measure the vibrations caused by improperly added correctional masses.

The sensors would connect to a controller with an LCD screen, which would display the data coming from them. The core of the controller is an Arduino UNO and it translates the raw data from the sensors into usable data. A basic program for the rig has been written and commented accordingly. Also, a visual representation has been drafted by the author to better describe the potential construction of the controller.

Economic impact to modernize the balancing rig in the way this analysis has recommended would be 372,5€. The author's decision on whether to go ahead with the modernization depends on the demand of the test rig.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] E. Riives, Mehhanismide ja masinate teooria. Laboratoorsed tööd, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1991.
- [2] Adam Hjort, M^oans Holmberg, "Measuring mechanical vibrations using an Arduino as a slave I/O to an EPICS control system", [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:839696/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud 16.04.2019]
- [3] T. Lehtla, "Andurid", [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/Andurid.pdf>. [Kasutatud 16.04.2019]
- [4] I. Kleis, H. Arumäe, "Rakendusmehaanika", [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.ene.ttu.ee/leonardo/rak_meh/Rakendusmehaanika.pdf. [Kasutatud 16.04.2019]
- [5] Oomipood, "ADXL335 Kiirendusmoodul analoog 3 telge 3-5V", [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/gy_61_adxl335_kiirendusmoodul_analoog_3_telge_3_5v?q=adxl335. [Kasutatud 18.04.2019]
- [6] Analog Devices, "Small, Low Power, 3-Axis ± 3 g Accelerometer ADXL335", [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf>. [Kasutatud 18.04.2019]
- [7] Maker Pro, "How to Interface Arduino and the MPU 6050 Sensor", [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://maker.pro/arduino/tutorial/how-to-interface-arduino-and-the-mpu-6050-sensor>. [Kasutatud 19.04.2019]
- [8] R.Lahtmets, "Elektrimasinad", [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/8Elektrimasinad.pdf. [Kasutatud 20.04.2019]
- [9] Arduino, "Hello World!", [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HelloWorld?from=Tutorial.LiquidCrystal>. [Kasutatud 21.04.2019]
- [10] Oomipood, "Halli anduri moodul", [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/hm_d598_halli_anduri_moodul?q=Halli. [Kasutatud 29.04.2019]
- [11] Felandia OÜ, hinnapakumine, 2019.
- [12] Alas-Kuul AS, "ELEKTRIMOOTOR 0,18KW; 230/400V; 3000 1/MIN; B3; IP55; F; S1", [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.alas-kuul.ee/elektrimootor-0-18kw-230-400v-3000-1-min-b3-ip55-f-s1-vem-k21r-63k2-0-18-3000-b3>. [Kasutatud 29.04.2019]

- [13] Elfa Distrelec, "QBL5704-116-04-42 - Brushless DC Motors, Trinamic", [Võrgumaterjal].
Saadaval:
https://www.elfadistrelec.ee/et/brushless-dc-motors-trinamic-qbl5704-116-04-42/p/15422193?pos=7&origPos=7&origPageSize=10&p=cat-L1D_379516~cat-L2D_379617~cat-L3D_525512~cat-DNAV_PL_12100401&q=&prodprice=157.3&isProductFamily=false&campaign=&track=true. [Kasutatud 29.04.2019]
- [14] The Engineering Toolbox, "Electric Motors - Power and Torque vs. Speed", [Võrgumaterjal].
Saadaval:
https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motors-hp-torque-rpm-d_1503.html.
[Kasutatud 30.04.2019]
- [15] Oomipood, "Alumiiniumkarp vee. 55*121*171mm", [Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://www.oomipood.ee/product/box_g120_alumiiniumkarp_vee_55_121_171mm.
[Kasutatud 05.05.2019]
- [16] T. Lehtla, "ELEKTRIAJAMID, 3. ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE JA ELEKTRIMASINATE OMADUSED", [Võrgumaterjal]. Saadaval:
http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/SKK0070/031Elektromehaaniline_energiamuundus.pdf. [Kasutatud 06.05.2019]
- [17] H-construction, "Kolmefaasiline mootori ühendus", [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://et.hanneganconstruction.com/3-faznyj-dvigatel.php>. [Kasutatud 07.05.2019]
- [18] Invertek, "E3 IP20 0.37kW, 1 Ph. Input, 3 Ph. Output, 200-240V, Internal EMC Filter", [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://www.invertek.com.au/e3-ip20-0.37kw-1-ph.-input-3-ph.-output-200-240v-i~64474>.
[Kasutatud 08.05.2019]
- [19] Alas-Kuul AS, "SAGEDUSMUUNDUR 0,37 KW 1X230 V IP20 (18261728)", [Võrgumaterjal].
Saadaval:
<https://www.alas-kuul.ee/sagedusmuundur-0-37-kw-1x230-v-ip20-18261728-mc-lte-b0004-2b1-1-00>. [Kasutatud 09.05.2019]
- [20] PCS Supply, "SEW Eurodrive Movitrac LTE-B Series MC LTE-B0004-2B1-1-00", [Võrgumaterjal].
Saadaval:
<https://www.pcssupply.com/sew-eurodrive-movitrac-lte-b-series-mc-lte-b0004-2b1-1-00-ac-drive/>. [Kasutatud 09.05.2019]
- [21] Brüel & Kjær, "Measuring Vibration", [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>. [Kasutatud 10.05.2019]
- [22] Oomipood, "Display: LCD; alphanumeric; STN Positive; 16x2; LED; Char: 5.55mm", [Võrgumaterjal]. Saadaval:

- <https://www.oomipood.ee/kataloog/tme/toode?sku=TIBDMTYwMkxSUy1HV0EtSw%3D%3D&t=lcd%2016x2>. [Kasutatud 10.05.2019]
- [23] Oomipood, "10k lin pote 6mm völl, 16mm korpus, 5mm samm", [Vörgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/r16148_1a_2_b10k_10k_lin_pote_6mm_voll_16mm_korpus_5mm_samm. [Kasutatud 10.05.2019]
- [24] Arduino, "Introduction", [Vörgumaterjal]. Saadaval: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [Kasutatud 10.05.2019]
- [25] Oomipood, "Arduino Nano 3.1", [Vörgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/a000005_arduino_nano_3_1?q=arduino%20nano. [Kasutatud 10.05.2019]
- [26] Oomipood, "Arduino Mega2560 Rev3", [Vörgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/a000067_arduino_mega2560_rev3?q=arduino&page=2. [Kasutatud 10.05.2019]
- [27] Oomipood, "Arduino Uno Rev3", [Vörgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/a000066_arduino_uno_rev3?q=uno%20rev3. [Kasutatud 10.02.2019]
- [28] Techie Blog, "The use of ARDUINO in the IoT, Wearable and other handy devices has been increased.", [Vörgumaterjal]. Saadaval: <https://blog.techiehunter.org/the-use-of-arduino-in-the-iot-wearable-and-other-handy-devices-has-been-increased/>. [Kasutatud 10.05.2019]
- [29] Oomipood, "Klahvlüliti 2*ON-OFF 15A punane indikaatoriga PRK0008B", [Vörgumaterjal]. Saadaval: https://www.oomipood.ee/product/irs201_1c3r_klahvluliti_2_on_off_15a_punane_indikaatoriga?q=l%C3%BCliti&page=6. [Kasutatud 10.05.2019]
- [30] Sparkfun, "Scaling of Arduino Analog Input Readings", [Vörgumaterjal]. Saadaval: https://cdn.sparkfun.com/assets/resources/4/4/Input_scaling_for_Arduino_analog_readings.pdf. [Kasutatud 14.05.2019]
- [31] Arduino, "analogReference()", [Vörgumaterjal]. Saadaval: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogreference/>. [Kasutatud 14.05.2019]

LISAD

Lisa 1 Kood Arduino jaoks

Koodi sisse on lisatud ka tahhomeetri ja aktseleeromeetri ühe telje jaoks vajalikud arvutused. Kõik olulisemad read on vastavalt kommenteeritud. Koodis tuleb teha kalibreerimiseks muudatusi.

```
#include <LiquidCrystal.h>      //kasutab sisseehitatud LCD teeki
LiquidCrystal lcd(12,11,6,5,4,3); // määrab LCD pesad Arduinol
const int sensorPin = 6; // Halli anduri pesa
const unsigned long sampleTime = 1000;
int rpmNominal = 1499;        //vajalik pöörlemiskiirus rpm
int vibratsioon = 0;
int Va = analogRead(A2);
const int maxVa = 3300;      //maksimaalne väljundpinge ADXL335 moodulilt millivoltides
                               //kalibreerimisel kirjutada siia vibratsioon

void setup() {
  pinMode(sensorPin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
  analogReference (EXTERNAL);
  lcd.print("v | | | |>");      //kuvab ekraanile skaala
}

void loop() {
  delay(100);
  int rpm = getRPM();
  if (rpm > rpmNominal) {      //kui pöördekiirused on üle 1500
    lcd.write(1023);          //kuvab täis kasti
  }
  displayBar(vibratsioon);
}

int getRPM() {                //see osa loendab pöördeid ja arvutab pöörlemiskiiruse
  int count = 0;
  boolean countFlag = LOW;
  unsigned long currentTime = 0;
```

```

unsigned long startTime = millis();
while (currentTime <= sampleTime)
{
  if (digitalRead(sensorPin) == HIGH)
  {
    countFlag = HIGH;
  }
  if (digitalRead(sensorPin) == LOW && countFlag == HIGH)
  {
    count++;
    countFlag=LOW;
  }
  currentTime = millis() - startTime;
}
int countRpm = int(60000/float(sampleTime))*count;
return countRpm;
}

void displayBar(int vibratsioon)           //see osa kuvab vibratsiooni skaala
{
  int numOfBars=map(Va,A2,maxVa,0,15);    // pesast A2 tulev väärtus jagatakse võrdset 15
  osaks
  lcd.setCursor(1,1);
  if (Va!=0)
  {
    for (int i=0; i<=numOfBars; i++)
    {
      lcd.setCursor(i,1);
      lcd.write(1023);                    //kuvab täis kasti
    }
  }
}

```

Lisa 2 Juhtpuldi visuaal

Välja on toodud lisaks alumiiniumist projektikarbi mõõtudele ka Arduino UNO mõõdud. Tänu sellele on näha, et Arduino UNO mahub karpi igat pidi ning ruumi jääb ka juhtmestiku jaoks piisavalt.

