



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## MAGNETLEVITATSIOONI ÕPPEMAKETT

MAGNETIC LEVITATION STUDY MODEL

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andres Tambla  
/nimi/

Üliõpilaskood: 153420AAAM

Juhendaja: Heigo Mölder, Insener  
/nimi, amet/

Kaasjuhendaja: Kaija Haabel, Elektrilevi OÜ  
/nimi, amet/

Tallinn, 2020

## 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.

“.....” ..... 202.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaasjuhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Andres Tambla

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Magnetlevitatsiooni õppemakett

*Kuupäev:* 02.01.2019

*75 lk(lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* insener Heigo Mölder, PhD, Kaija Haabel, MSc (Elektrilevi OÜ)

*Töö konsultant (konsultandid):* -

## *Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärgiks oli luua magnetlevitatsiooni õppemakett kasutades ülikooli poolt antud elektromagnetit ning erinevaid objekte, millega hõljutamist proovida. Täiendavalt sai seatud eesmärgiks ülesanne lahendada kasutades Halli tajurit.

Sai uuritud kuidas oleks võimalik levitatsiooni teoreetiliselt teostada ning kuidas lahendada süsteemi elektriline osa. Sai kavandatud kandekonstruktsioon ja elektroonikaseade.

Leitud lahenduses levitatsiooni teostamiseks mõõdab Halli tajur muutuvat magnetvoo tihedust elektromagneti ja leviteeritava objekti vahel. Mõõtetulemusele tuginedes juhitakse pulsilaiusmodulatsiooniga elektromagneti mähise pinget. Dünaamilise süsteemi stabiliseerib PID-kontroller.

Tööde käigus sai kasutatud erinevaid raalprojekteerimise programme, analüütilist tarkvara ning integreeritud programmeerimiskeskonda mikrokontrolleri programmeerimiseks.

Reaalne makett sai koostatud nii nagu kavandatud. Levitatsiooni oli võimalik demonstreerida. Täiendavalt teostati erinevaid mõõtmisi reaalse maketiga ning võrreldi tegelikku seadet kavandatuga.

*Märksõnad:* magnet, levitatsioon, magnetvoo tihedus, lõplike elementide meetod, elektroonika, pulsilaiusmodulatsioon, automaatjuhtimine, olekuruum, kontroller, mikrokontroller, õppemakett.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Andres Tambla	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Magnetic levitation study model	
<i>Date:</i> 02.01.2019	<i>75 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> engineer Heigo Mõlder, Kaija Haabel, MsC (Elektrilevi OÜ)	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>The goal was to create a magnetic levitation study model using an electromagnet and several objects (to attempt levitation with) which the university had provided. Additionally the secondary goal of solving the problem using a Hall effect sensor was set.</p> <p>The possibility of levitation and solutions for the electrical part of the system were studied in theory. Designs for the bearing structure and electronics were created.</p> <p>In the derived solution for levitation, a Hall effect sensor measures the changing magnetic flux density between the electromagnet and the levitated object. Based on the measurement the voltage across the coil of the electromagnet is steered using pulse-width modulation. The dynamic system is stabilised by a PID-controller.</p> <p>Several different computer aided design programs and analytical programs were used during the design. The microcontroller was programmed using an integrated development environment.</p> <p>The real study model was constructed as designed. It was possible to demonstrate levitation. Additionally, several measurements were taken from the real study model and the real device was compared to the design.</p>	
<i>Keywords:</i> magnet, levitation, magnetic flux density, finite element method, electronics, pulse-width modulation, automation, state-space, controller, microcontroller, study model.	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Magnetlevitatsiooni õppemakett</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Magnetic levitation study model</b>
Üliõpilane:	<b>Andres Tambla, 153420AAAM</b>
Eriala:	<b>Elektriamid ja jõuelektronika</b>
Lõputöö liik:	<b>magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Heigo Mõlder</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>2019-2020</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>03.01.2020</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Õppemakett omab praktilist väärtust väljateooria, automaatjuhtimise ja muude sarnaste elektrivaldkonna alade selgitamisel ning teooria rakenduse illustreerimisel. See konkreetne õppemakett leiaks rakendust Tallinna Tehnikaülikooli kasutuses erinevate ürituste raames elektrerialade tutvustamisel ja selgitamisel.

Kuigi magnetlevitatsiooni on ohtralt uuritud ning sarnaseid katseseadmeid on ka varem loodud, leiab see lõputöö omale unikaalsust kasutades digitaalse mudeli uurimist süsteemi kavandamisel.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on modelleerida, kavandada ja valmistada magnetlevitatsiooni demonstreeriv makett.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Kuidas käitub magnetvoo tihedus süsteemis?
- 2) Kuidas tagada toide maketi kõikidele osadele?
- 3) Kuidas juhtida elektromagneti toidet katsekeha levitatsiooni saavutamiseks?
- 4) Kuidas lisada maketile vajalikud kasutajaliidesed?

#### **4. Lähteandmed**

Lähteandmetena plaanin kasutada seadmete parameetreid ning juhendaja ja teiste tudengite poolt varem tehtud arvutusi ja mudeleid samal teema. Lähteandmed saan mõõtmiste tulemusena ning juhendajalt.

#### **5. Uurimismeetodid**

Magnetvälja modelleerimiseks kasutan tarkvara COMSOL Multiphysics. Modellerimistulemuste analüüsiks kasutan tarkvara MATLAB. Süsteemi täiendavaks analüüsiks kasutan kirjandusest teadaolevaid meetodeid.

#### **6. Graafiline osa**

Graafiline osa saab olema peamiselt töö põhiosas. Graafilises osas kujuneb ilmselt olulisimaks:

- 1) Joonised modelleerimistulemuste kohta.
- 2) Joonised elektriliste skeemide kohta.
- 3) Joonised kandekonstruktsioonist.
- 4) Joonised kirjeldamiseks juhtsüsteemi loogikat.

#### **7. Töö struktuur**

\*Kõik mis vormistuses nõutud (tiitelleht, autorideklaratsioon, referaadid, magistritöö ülesanne) + eessõna ning lühendite ja tähistete loetelu

\*Sissejuhatus

1. Lähteandmed ja teoreetilised alused
2. Kolmemõõtmeline joonis ja kandekonstruktsioon
3. Elektriskeem ja elektroonika
4. Füüsikalise süsteemi modelleerimine ja analüüs
5. Süsteemi stabiliseerimine ja juhtprogramm
6. Simulatsiooni tulemite ja reaalse seadme võrdlus

\*Kokkuvõtted

\*Kasutatud kirjandus

\*Lisad

#### **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Kasutan eelkõike teadusväljaandeid ja aruandeid. Näiteks:

- 1) Nathan Ida, *Engineering Electromagnetics Third Edition*
- 2) Robert S. Elliott, *Electromagnetics: History, Theory, and Applications*

3) Willian G. Hurley, Werner H. Wölfle, „*Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System*”

4) T. H. Wong, „*Design of a Magnetic Levitation Control System – An Undergraduate Project*”

### **9. Lõputöö konsultandid**

Kaija Haabel (kaasjuhendaja)

### **10. Töö etapid ja ajakava**

1) Teooria läbitöötamine (01.10.2019)

2) Modelleerimine ning maketi põhiliste osade (toiteplokk, juhtmoodul ja kandekonstruktsioon) kavandid (01.11.2019)

3) Õppemaketi ehitamine (01.12.2019)

4) Lõputöö esitamine (02.01.2020)

## SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT .....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	11
SISSEJUHATUS .....	13
1. LÄHTEANDMED JA TEOREETILISED ALUSED .....	15
1.1 Kokkuvõtte magnetismi käsitlemise teoreetilistest alustest .....	16
1.2 Kokkuvõtte magnetiliste materjalide teoreetilistest alustest.....	20
1.3 Lõplike elementide meetodi üldine kirjeldus .....	21
1.4 Kokkuvõtte automaatjuhtimise teoreetilistest alustest.....	22
1.4.1 Kontrollerid .....	23
1.4.2 Modernne automaatjuhtimine .....	24
2. KOLMEMÕÕTMELINE JOONIS JA KANDEKONSTRUKTSIOON.....	26
3. ELEKTRISKEEM JA ELEKTROONIKA .....	28
4. FÜÜSIKALISE SÜSTEEMI MODELLEERIMINE JA ANALÜÜS.....	33
4.1 Modelleerimise tulemuste analüüs .....	41
4.2 Täiendav analüüs valminud maketi tarbeks .....	43
5. SÜSTEEMI STABILISEERIMINE JA JUHTPROGRAMM .....	45
5.1 Süsteemi stabiliseerimine MATLAB Simulink keskkonnas .....	47
5.2 Mikrokontrolleri tööprogramm .....	49
6. SIMULATSIOONI TULEMITE JA REAALSE SEADME VÕRDLUS .....	53
KOKKUVÕTE .....	60
SUMMARY .....	62
KASUTATUD KIRJANDUS .....	64



LISAD .....	65
Lisa 1 Elektroonikaseadme ette nähtud komponentide spetsifikatsioon .....	66
Lisa 2 Mikrokontrolleri tööprogramm .....	67

## EESSÕNA

Lõputöö teema sõnastati insener Heigo Mõlderil algatusel. Algandmed kogusid insener Heigo Mõlder ja Kaija Haabel (Elektrilevi OÜ). Kõik algandmed koguti Tallina Tehnikaülikooli ruumides. Kõik konsultatsioonid viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli ruumides. Maketi kavandamisega ja valmistamisega seotud ülesanded said läbiviidud autori elamispinnal.

Autor tänab kõiki, kes lõputöö valmistamisel toeks olid.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

B	magnetvoo tihedus
$B_n$	magnetvoo tiheduse projektsioon pinnaelemendi normaalile
E	elektrivälja tugevus
e	määratud viga
F	jõud
$F_e$	elektrilaengust tingitud jõud
$F_{kogu}$	summaarselt mõjuv jõud
$F_m$	magnetiline jõud
FEM	lõpplike elementide meetod ( <i>Finite Element Method</i> )
g	gravitatsioonist tulenev kiirendus
H	magnetvälja tugevus
I	elektrivool
ICSP	ahelasisene jadaprogrammeerimine ( <i>In-Circuit Serial Programming</i> )
J	voolutihedus
$K_p$	proportsionaalne võimendustegur
$K_i$	integraalne võimendustegur
$K_d$	diferentsiaalne võimendustegur
L	induktiivsus
L	joon
LQR	lineaarne-kvadraatne regulaator ( <i>Linear-Quadratic Regulator</i> )
C	suletud kontuur
M	mageetuvus
m	mass
MOSFET	Isoleeritud paisuga väljatransistor ( <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> )
PID	proportsionaalne, integraalne, diferentsiaalne ( <i>proportional, integral, differential</i> )
q	elektriline laeng
R	positsioonivektori pikkus
R	aktiivtakistus
S	pindala
$T_i$	integraali aeg
$T_d$	diferentsiaali aeg
u	kontrolleri väljund

$U_E$	pinge efektiivväärus
$u_M$	pinge hetkväärtus elektromagneti mähisel
$u_p$	pinge amplituudväärtus
$t$	aeg
$v$	kiirus
$\mu$	magnetiline läbitavus
$\mu_0$	vaba ruumi magnetiline läbitavus
$\mu_k$	keskkonnale omane suhteline magnetiline läbitavus
$\Phi$	magnetvoog
$\psi$	nurk

## SISSEJUHATUS

Käesolev lõputöö on ajendatud Tallinna Tehnikaülikooli soovist kasutada õppetegevuses ja teaduse teemalistel üritustel magnetlevitatsiooni õppemaketti.

Koolil oli olemas elektromagnet ja erinevate mõõtmetega, erinevatest materjalidest metallkuulid. Tervikliku maketi loomiseks tuli lahendada süsteemi elektritoide, kasutajaliides, kandekonstruktsioon elektromagnetile ning magnet-kuul süsteemi stabiliseerimine.

Ülesande lahendamiseks vajalikud alusteadmised moodustasid eelkõige magnetismi teoreetilised alused [1], magnetiliste materjalide teoreetilised alused [2] ja automaatjuhtimise teoreetilised alused [3].

Käsitletav elektromagnetist ja kuulist koosnev süsteem on modelleeritav FEM (*Finite Element Method*)-tarkvaraga, mis on Inseneriteaduskonnas kasutusel – COMSOL Multiphysics (versioon 5.2). Varem teostatud uurimistöödest (näiteks [4] [5]) on teada, et käsitletav dünaamiline süsteem on loomult ebastabiilne. Süsteemi stabiliseerimiseks on tarvis esmalt leida võimalus saada süsteemi väljundist tagasisidet. Sellest tulenevalt nägi lõputöö juhendaja Heigo Mölder huvitavat lahendust – modelleerida kuuli liikumisest tingitud magnetvoo tiheduse muutus elektromagneti ja kuuli vahel ning kasutada Halli tajurit muutuse mõõtmiseks reaalses süsteemis. Selliselt on võimalik lahendada dünaamilise süsteemi stabiliseerimine esmalt digitaalse mudeli põhjal ning seejärel katsetada lahendust reaalsel seadmel. Tulemusena on võimalik hinnata modellerimise praktilist kasutatavust sarnaste probleemide lahendamisel.

Seda ülesannet on varasemalt käsitletud ka käesoleva töö kaasjuhendaja Kaija Haabel. Kaasjuhendaja oli varasemalt käsitletud laiaulatuslikult magnet levitatsiooni teoreetilisi aluseid ning kasutanud arvutiprogrammi COMSOL Multiphysics, et modelleerida ja simuleerida elektromagnetist ja kuulist koosnevat süsteemi. Simuleerimisel oli uuritud kuidas muutub magnetvoo tihedus ette nähtud anduri asukohas sõltuvalt kuuli kaugusest elektromagneti suhtes ning kuidas muutub kuulile mõjuv jõud sõltuvalt kuuli kaugusest elektromagneti suhtes.

Käesolevas töös sai loodud uus mudel ning sai tehtud uued simulatsioonid. Lisaks kaasjuhendaja poolt käsitletud sõltuvustele sai uuritud ka sõltuvust magnetvoo tiheduse muutuse (anduri ette nähtud asukohas) ja elektromagneti mähise voolu muutuse vahel ning ka kuulile mõjuva magnetjõu muutuse ja elektromagneti mähise voolu muutuse vahel.

Töös käsitletud maketiga sarnased kavandid on leidnud tähelepanu juba 1930. aastatest [4]. On mitmeid teadustöid (näiteks [4] ja [5]), kus on loodud samalaadne õppemakett. Sarnaseim lahendus, mis taustauuringute käigus leitud, oli väljatöötatud Ameerika Ühendriikide (Michigan)

põhise ettevõtte Zeltom [6] poolt. Selle ettevõtte loodud toode põhineb samuti Halli tajuril. Teised lahendused ([4] ja [5]), mis taustauuringute käigus leitud, kasutasid tajureid (üldjuhul valguspõhiseid) kuuli ja magneti vahelise kauguse otseseks määramiseks. Nimelt ei ole võimalik Halli tajuriga kaugust otseselt määrata - tuleb arvestada, et ka iga muutusega elektromagneti mähise voolus kaasneb anduri väljundpinge muutus (magnetvoo tihedus magneti ja kuuli vahel on matemaatiliselt kirjeldatav kahemuutuja funktsioonina).

Käesoleva töö põhiline omapära tuleneb tõsiasiast, et käsitletava dünaamilise süsteemi uurimisel kasutati digitaalset mudelit. Taustauuringute käigus leitud lahendused ([4] [5] [6]) kirjeldasid süsteemi matemaatiliselt ainult fundamentaalsetele füüsikalistele seostele tuginedes. Käesolevas töös kasutatakse matemaatiline kirjelduse loomisel ka lihtsustatud valemeid, mis on numbriliselt lähendatud digitaalse mudeliga tehtud simulatsiooni tulemustele. Taustauuringute käigus leitud tööde suhtes saab eripäraseks pidada ka elektroonikaseadme loomist, mis lahendab nii elektritoite, kasutajaliidese kui ka juhtmooduli funktsioonid.

Töö teostamisel on kasutatud erinevaid arvutiprogramme: AutoCAD [7], LibreCAD [8], COMSOL Multiphysics [9], EAGLE [7], MATLAB [10], Excel [11], MPLAB X IDE [12]. Arvutiprogrammiga AutoCAD on loodud elektromagnetist, kuulist ja kandekonstruktsioonist kolmemõõtmelised joonised. Tarkvara LibreCAD on kasutatud elektriskeemi loomiseks ning ka teiste skeemide ja piltide täiendamiseks. Arvutiprogrammiga COMSOL Multiphysics on modelleeritud elektromagnetit ja kuuli kui füüsikalist süsteemi. Arvutiprogrammiga MATLAB on uuritud modelleerimistulemusi ning süsteemi stabiliseerimist. Arvutiprogrammiga Excel on töödeldud mõõtetulemusi nende graafiliseks esitamiseks. Arvutiprogrammiga EAGLE on loodud vajalik trükkplaadi kavand. Arvutiprogrammiga MPLAB X IDE on loodud juhtprogramm ja programmeeritud mikrokontroller.

Järgnevas magistritöö põhiosas antakse esmalt ülevaade lähteandmetest ja olulistest teoreetilistest alustest. Seejärel kajastatakse kolmemõõtmelise joonise loomist ning kandekonstruktsiooni kavandamist. Edasi käsitletakse maketi elektriskeemi ning elektritoite, kasutajaliidese ja juhtmooduli ülesandeid täitva elektroonikaseadme kavandamist. Kajastatakse füüsikalise mudeliga tehtavaid simulatsioone ning nende tulemite analüüsi. Käsitletakse elektromagneti ja kuuli kui dünaamilise süsteemi stabiliseerimist ning elektroonikaseadme juhtprogrammi. Viimaks võrreldakse reaalselt valminud maketti kavandatuga.

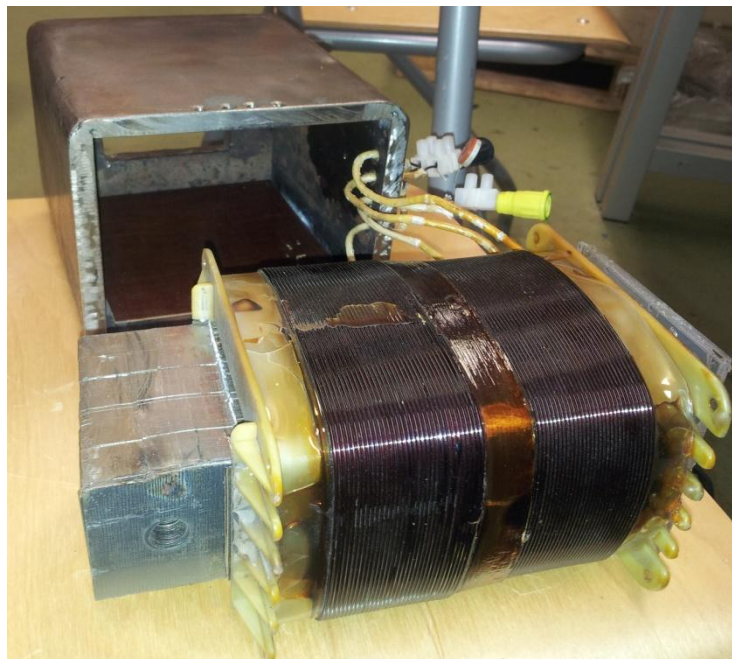
## 1. LÄHTEANDMED JA TEOREETILISED ALUSED

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt võimaldati kasutada olemasolevat elektromagnetit ning erinevaid metallist kuule. Lähteandmetena sai kasutatud kaasjuhendaja Kaija Haabeli poolt varasemalt leitud parameetreid ning teostati ka uusi mõõtmisi.

Leviteerimise kavandamiseks valiti kuul läbimõõduga 11 mm ja kaaluga 0,044 kg.

Käsitlev elektromagnet on saadud defektse väiketrafo ümbertöötlemise tulemusel. Saeti välja sammastüüpi kolmefaasilise trafo üks sammastest ning primaar ja sekundaarmähis ühendati omavahel nii, et neid läbiv vool indutseerib magnetvälja sama suunaga. Elektromagnet koosneb erinevatest detailidest: elektrotehnilisest lehtterasest südamik, vasktraadist mähis, plastikust detailid mähise kohal ning all, rauast kest ümber magneti, südamikku läbiv rauast polt magneti ülalosas. Täiendavalt on lisatud poldi külge montaažilint elektromagneti fikseerimiseks kandekonstruktsioonile. Mähise väljuvate otste isolatsioon uuendati. Elektromagneti olulisemad mõõtmised said uuesti mõõdetud. Tulemid on toodud tabelis 1.1. Käsitletud magnet on näidatud joonisel 1.1.

Kusjuures rauast kest ümber magneti on lisatud magnetvälja ühtlustamiseks elektromagneti all. Seeläbi on parandatud levitatsiooniks tarvilikke tingimusi.



Joonis 1.1 Pilt käsitletud elektromagnetist ja selle kestast

Tabel 1.1 Elektromagneti mõõtmed

Geomeetriline mõõde	Väärtus
Südamiku laius	70 mm
Südamiku kõrgus	190 mm
Südamiku sügavus	45 mm
Mähise laius	105 mm
Mähise kõrgus	130 mm
Mähise sügavus	80 mm
Kesta laius	150 mm
Kesta kõrgus	160 mm
Kesta sügavus	110 mm

Geomeetristest mõõtmetest aga käsitletava süsteemi kirjeldamiseks ei piisa. Täiendavalt on tarvis teada erinevaid parameetreid, mis iseloomustavad elektromagneti omadusi. Need oli analüütiliselt ja kirjandusele toetuvalt määranud kaasjuhendaja Kaija Haabel varasemalt ning on koondatud tabelisse 1.2.

Tabel 1.2 Täiendavad elektromagnetit iseloomustavad parameetrid

Parameeter	Väärtus
Mähise keerdude arv, $N$	990
Mähise takistus, $R_M$	3,9 $\Omega$
Mähisetraadi läbimõõt, $d_{mt}$	1,3 mm
Mähisetraadi ristlõikepindala, $S_{mt}$	1,33 mm <sup>2</sup>
Maksimaalne mähisevool (püsitalitus), $I_N$	3 A
Maksimaalne mähisevool (lühiajaline), $I_M$	5 A
Vase eritakistus (temperatuuril 20°C), $\rho$	16,78 · 10 <sup>-9</sup> $\Omega$ m
Kesta ja kuulide materjali suhteline magnetiline läbitavus, $\mu_{kest}$	220
Südamiku materjali suhteline magnetiline läbitavus, $\mu_{süda}$	4000

## 1.1 Kokkuvõtte magnetismi käsitlemise teoreetilistest alustest

Kasutades käepärast magnetit ning kompassi, on võimalik empiiriliselt tuletada järgnevad omadused: [1]

- esineb ruumi läbiv väli;



- välja tugevus suureneb magnetile lähenemisel;
- magneti kaks poolt käituvad erinevalt (magneti lõuna poolus tõmbab ligi kompassi põhja poolust ning magneti põhja poolus tõmbab ligi kompassi lõuna poolust);
- asetades kompassi magneti ümbruses erinevatesse kohtadesse, on võimalik kaardistada magnetvälja jõujooned.

Magneetiline jõud  $F_m$  avaldub elektriline laengu  $q$ , laengu liikumiskiiruse  $v$  ning magnetvoo tiheduse  $B$  kaudu järgnevalt: [1]

$$F_m = q \cdot v \times B \quad (1.1)$$

kus  $F_m$  – magnetiline jõud, N,  
 $q$  – elektriline laeng, C,  
 $v$  – laengu liikumise kiirus, m/s,  
 $B$  – magnetvoo tihedus, T.

Seda valemit tuntakse kui Lorentz' jõu seadust liikuvale laengule magnetväljas. Seda valmit saab vaadelda ka magnetvoo tiheduse defineeriva võrrandina, kuna kõik teised komponendid on mõõdetavad. [1]

Lisaks magnetvoo tihedusele kasutatakse ka suurust magnetvälja tugevus  $H$ , mis avaldub vaba ruumi magnetilise läbitavuse  $\mu_0$ , magnetvoo tiheduse  $B$  ning materjalile omase magneetuvuse  $M$  kaudu järgnevalt: [1]

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (1.2)$$

kus  $H$  – magnetvälja tugevus, A/m,  
 $\mu_0$  – ruumi magnetiline läbitavus,  
 $B$  – magnetvoo tihedus, T,  
 $M$  – magneetuvus, A/m.

Enamikel juhtudel on magneetuvus  $M$  proportsionaalses sõltuvuses magnetvälja tugevusega  $H$ . Sellisel juhul avaldub  $H$  magnetvoo tiheduse  $B$  ja magnetilise läbitavuse  $\mu$  suhtena: [1]

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1.3)$$

kus  $H$  – magnetvälja tugevus, A/m,  
 $\mu$  – magnetiline läbitavus.

Kusjuures magnetiline läbitavus on defineeritud, kui vaba ruumi magnetilise läbitavuse  $\mu_0$  ja keskkonnale, mida väli läbib, omase suhtelise magnetilise läbitavuse  $\mu_k$  korrutis: [1]

$$\mu = \mu_0 \mu_k \quad (1.4)$$

kus  $\mu$  – magnetiline läbitavus,  
 $\mu_0$  – vaba ruumi magnetiline läbitavus,  
 $\mu_k$  – keskkonnale omane suhteline magnetiline läbitavus.

Nii magnetvoo tihedus, kui ka magnetvälja tugevus on mõõdetav teslades (T). Kohati esitatakse magnetvoo tihedus ka mõõtühikuga veeberit ruutmeetritele ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) rõhutamaks, et tegemist on voo tihedusega. [1]

Magnetvoog  $\Phi$  ise on defineeritud, kui magnetvoo tiheduse B koguhulk läbi pinna S ning avaldub järgnevalt: [1]

$$\Phi = \iint_S B_n dS \quad (1.5)$$

kus  $\Phi$  – magnetvoog, Wb,  
S – pindala,  $\text{m}^2$ ,  
dS – pinnaelement,  $\text{m}^2$ ,  
 $B_n$  – magnetvoo tiheduse projektsioon pinnaelemendi dS normaalile, T.

Kui laengut mõjutab väli, mis sisaldab nii magnetilist, kui ka elektrilist komponenti, siis avaldub laengule mõjuv kogu jõud  $F_{\text{kogu}}$  Lorentz' jõu ja Coulomb'jõu summana: [1]

$$F_{\text{kogu}} = F_e + F_m = qE + qv \times B \quad (1.6)$$

kus  $F_{\text{kogu}}$  – laengule mõjuv kogu jõud, N,  
 $F_e$  – välja elektrilisest komponendist tingitud jõud, N,  
 $F_m$  – välja magnetilisest komponendist tingitud jõud, N,  
q – elektriline laend, C,  
E – elektrivälja tugevus, N/C,  
v – elektrilaengu kiirus, m/s,  
B – magnetvoo tihedus, T.

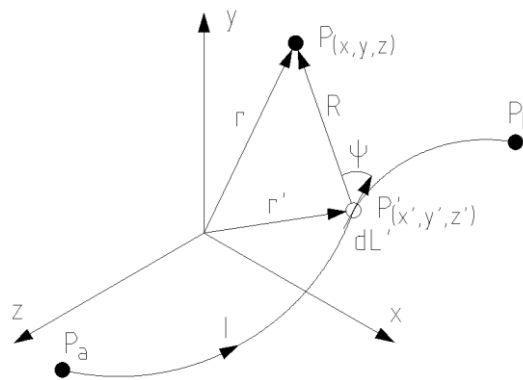
Seda valemit tuntakse kui Lorentz-Coulomb'jõu seadust (kohati nimetatud vaid Lorentz' jõu valemiks). [1]

Voolust I tingitud magnetvälja tugevuse H leidmisel mingis ruumipunktis on aluseks Biot' ja Savart' seadus. See seadus väidab, et ruumipunktis  $P'(x', y', z')$  paikneva vooluelemendi  $IdL$  poolt tekitatud magnetvälja tugevuse element  $dH$  ruumipunktis  $P(x, y, z)$  on võrdeline selle

voolelemendi, jooneelemendi  $dL$  ja positsioonivektori  $R=r-r'$  vahelise nurgaga  $\psi$  ning pöördvõrdeline positsioonivektori  $R$  pikkuse ruuduga (illustreeritud joonisel 1.2):

$$dH(x, y, z) = \frac{I(x', y', z') dL'(x', y', z') \sin \psi}{4\pi R^2} \quad (1.7)$$

kus  $dH(x, y, z)$  – magnetvälja tugevuse element ruumipunktis  $P(x, y, z)$ , A/m,  
 $I(x', y', z')$ - elektrivool joonelemendis  $dL$ , A,  
 $dL$  – jooneelement ruumipunktis  $P'(x', y', z')$ , m,  
 $\psi$  – nurk jooneelemendi ja positsioonivektori vahel, °,  
 $R$  – positsioonivektori pikkus, m.



Joonis 1.2 Joonis kirjeldamaks voolust tingitud magnetvälja tugevuse leidmist mingis ruumipunktis. [1]

Biot´ja Savart´ seadus on defineeritud joonintegraalile, kuid superpositsioneerides selliste joonte väljad on võimalik leida ka pinnas või ruumalas kulgeva voolu poolt tekitatud magnetvälja tugevus mingis ruumipunktis. [1]

Magnetvälja postulaadid: [1]

- magnetväli ei ole konservatiivne; magnetvälja tugevuse suletud kontuuri integraal on võrdne vooluga selles kontuuris;

$$\oint_C H \cdot dL = I_{suletud} \quad (1.8)$$

kus  $C$  – suletud kontuur, m,  
 $H$  – magnetvälja tugevus, A/m,  
 $dL$  – suletudkontuuri element, m,  
 $I_{suletud}$  – vool suletud kontuuris, A.

- magnetväli on roteeruv; magnetvälja tugevuse  $H$  rootor on võrdne voolutihedusega  $J$ ;

$$\nabla \times H = J \quad (1.9)$$

kus  $\nabla$  – matemaatiline rootor operaator,

H – magnetvälja tugevus, A/m,

J – voolutihedus, A/m<sup>2</sup>.

- magnetväli on solenoidne; magnetvoo tiheduse divergents on väärtusega null;

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.10)$$

kus  $\nabla$  – matemaatiline rootor operaator,

B – magnetvoo tihedus, T.

- magnetvoog on konservatiivne; kogu magnetvoog läbi iga suletud kontuuriga pinna S on väärtusega null.

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (1.11)$$

kus B – magnetvoo tihedus, T,

dS – pinnaelement, m<sup>2</sup>.

## 1.2 Kokkuvõtte magnetiliste materjalide teoreetilistest alustest

Materjale saab jagada vastavalt nende magnetilisele käitumisele erinevatesse kategooriatesse: diamagneetikud, paramagneetikud, ferromagneetikud, antiferromagneetikud ja ferrimagneetikud. Lühidalt öeldes, tulenevad materjalide magnetilised omadused nende elektronide orbitaalsest liikumisest, elektronide spinnist ja tuuma spinnist. Kõik need kolm omadust on kirjeldatavad ekvivalentsete, ringselt voolavate, aatomi vooludena. Need voolud on seostatavad vaid individuaalse molekuliga ning on põhjuseks magnetväljade tekkele. Konkreetse materjali proovis võivad üksikute molekulide magnetväljad koostoimes tekitada olulise magnetvälja kogu proovile. [3]

Ekvivalentset aatomi voolu saab kirjeldada kasutades selle magnetilist momenti m. Diamagneetikute puhul on välise magnetivälja mõjuta summaarne magnetiline moment iga molekuli kohta võrdne nulliga. Väline magnetväli indutseerib diamagneetiku molekulides aga suhteliselt väikse magnetilise momendi. Seetõttu on diamagneetikute suhteline magnetiline läbitavus mõnevõrra väiksem kui üks. [3]

Paramagneetikute puhul on molekulide magnetiline moment suunatud juhuslikult. Välise magnetvälja mõjul tekib osaline magnetiliste momentide joondumine, kuid see on parasjagu samaväärne soojusliikumisest tekitatud molekulide joondumisega. Tavaliselt sellistes materjalides kõrvutised molekulid üksteist magnetiliselt oluliselt ei mõjuta ning paramagneetikute suhteline magnetiline läbitavus on vaid veidi üle ühe. [3]

Ferromagneetikute molekulidel on võrdse tugevusega magnetilised momendid. Kõrvutiste molekulide omavaheline mõju on nii tugev, et üksiku domeeni ulatuses joonduvad kõik magnetilised momendid isegi siis, kui puudub väline magnetväli. Nende materjalide suhteline magnetiline läbitavus on väga suur (tihti suurusjärgus  $10^4$  kuni  $10^6$ ). [3]

Antiferromagneetikute puhul, erinevalt ferromagneetikutest, on kõrvutiste molekulide magnetiline moment küll võrdne, kuid nende joondumine on vastassuunaline. Ferrimagneetikute puhul ei ole kõrvutiste molekulide magnetilised momendid võrdsed ning nende joondumine on vastassuunaline. [3]

Kui aine ruumalaühiku kohta on piisavalt palju molekulide magnetilisi momente suunatud sarnaselt, siis tekitavad need summaarselt ruumalaühiku kohta olulise suurusega magnetvälja. Kui see magnetväli püsib ka ilma välise stimulatsioonita, siis on tegemist püsimagneetiga. Püsimagneeteid võib esineda looduslikult ning neid saab ka metallurgiliste protsesside kaudu luua. Mõned materjalid omandavad püsimagneeti omaduse, kui nad satuvad välisesse magnetvälja. [3]

Aine molekulide magnetiliste momentide hulka ruumala ühiku kohta väljendatakse neid kirjeldavate vektorite vektorsummana. Seda vektorsummat kutsutakse ka materjali magneetumuseks  $M$ . Materjali proovis indutseeritud magneetumust saab väljendada kasutades aine magnetilist vastuvõtlikust  $\chi$ , suhtelist magnetilist läbitavust  $\mu_r$  ja absoluutset magnetilist läbitavust  $\mu$ . [3]

Materjali magnetilise vastuvõtlikuse mõõtmisel valitakse meetod vastavalt selle, kui lähedal on materjali suhteline magnetiline läbitavus ühele. Diamagneetikute ja paramagneetikute puhul tuletatakse see tavaliselt ebaühtlase välja poolt materjali proovile avaldunud jõu läbi. See jõud avaldub kõige lihtsamalt läbi materjali proovis oleva magnetilise energia tuletise. [3]

Suure suhtelise magnetilise läbitavusega materjalide puhul ei mõõdeta magnetilist vastuvõtlikust üldiselt otse. Pigem leitakse magnetvoo tiheduse  $B$  ja magnetvälja tugevuse  $H$  sõltuvust kirjeldav graafik – hüstereesisilmus. [3]

### **1.3 Lõplike elementide meetodi üldine kirjeldus**

Lõplike elementide meetod (inglise keeles *Finite Element Method*; edaspidi FEM) on võrdlemisi uus; see loodi 1950. aastail, kuid on juba arenenud väga kõrgetasemeliseks ja kasulikuks meetodiks hulgaliste insenertehniliste probleemide lahendamiseks ning seda mitmel erineval valdkonnal. [1]

See meetod põhineb lahendatava domeeni jagamisel alamdomeenideks, mida nimetatakse lõplikeks elementideks (inglise keeles *finite elements*). Need lõplikud elemendid on ruumilised domeenid lõpliku pikkuse, pindala või ruumalaga. Iga element on defineeritud kindla arvu äärtega, mis määravad elemendi poolt hõivatud ala. Äärte ristumispunkti nimetatakse sõlmeks. Elementide kogu moodustab võrgu (inglise keeles *mesh*), mis peab alluma kindlatele reeglitele. Nendest oluliseim on nõue, et lõplikud elemendid hõlmaksid ilmtingimata lõplikut ruumi. Teine nõue on, et elemendid oleksid omavahel sobituvad. [1]

Lõplikud elemendid võivad lahendatava domeeni ulatuses olla erineva suurusega. See võimaldab suurendada alamdomeenide hulka piirkondades, kus on eeldatud välja suuremat varieerumist ning vähendada seal kus välja varieerumine on vähene. Iga lõplik element võib esindada erinevat materjali; seetõttu, peab kahe erineva materjali liitumispiir ühtima mõne lõplike elementide äärte poolt moodustatud kontuuriga. [1]

## 1.4 Kokkuvõtte automaatjuhtimise teoreetilistest alustest

Automaatjuhtimise teooriad, mis tänapäeval tihti kasutust leiavad, jagunevad klassikaliseks automaatjuhtimise teooriaks, modernseks automaatjuhtimise teooriaks ja robustseks automaatjuhtimise teooriaks. [2]

Automaatjuhtimine on hädavajalik kõigis insenerivaldkondades ja teadustes. Automaatjuhtimine on oluline ja integraalne osa kosmosesõidukite süsteemides, robotilistes süsteemides, kaasaegsetes tootmissüsteemides ja igas teises tööstustegevuses, kus kasutatakse temperatuuri, surve, niiskuse, voolu, jms juhtimist. [2]

Automaatjuhtimise teooria rakendamiseks on tarvis modelleerida dünaamilisi süsteeme matemaatiliselt ning analüüsida nende dünaamilist karakteristikut. Matemaatiline mudel dünaamilisest süsteemist on defineeritav võrrandisüsteemina, mis esindab käsitletava süsteemi dünaamikat täpselt või vähemalt vastuvõetavalt lähedaselt. Kusjuures ükski matemaatiline mudel ei ole unikaalselt seotud ette antud süsteemiga. Dünaamilist süsteemi saab kirjeldada mitmeti ning seetõttu, olenevalt mudeli looja vaatenurgast, saab luua erinevaid matemaatilisi mudeleid. [2]

Matemaatilised mudelid võivad esineda väga erinevates kujudes. Olenevalt käsitletavast süsteemist ja esinevatest tingimustest võib üks matemaatiline mudel olla teistega võrreldes eelistatud. Näiteks optimaalse juhtimise tarbeks oleks eelistatud kasutada olekuruumi põhise modelleerimist. Siirde- ja sageduskarakteristikute analüüsiks ühe sisendi ja ühe väljundiga lineaarsetes ajaliselt muutumatutes süsteemides on aga eelistatud ülekandefunktsiooni põhine

analüüs. Kui matemaatiline mudel süsteemi kujutlemiseks on loodud, siis on võimalik kasutada erinevaid analüütilisi meetodeid ning arvutiprogramme, et sünteesida otstarve. [2]

Matemaatiliste mudelite loomisel tuleb leida kompromiss analüüsitulemuste täpsuse ja matemaatilise mudeli lihtsuse vahel. Üldiselt on mõistlik alustuseks luua lihtsustatud matemaatiline mudel, et lahendite kohta esmane arusaam kujundada. Seejärel võib luua täiendatud mudeli ning seda kasutada täpsemaks analüüsiks. Tuleb ka meelespidada, et tehtud lihtsustused olenevad süsteemi töötingimustest. Näiteks vedru mass võib olla madalasagedusliku töö puhul eiratav, kuid muutuda oluliseks kui töö muutub kõrgsageduslikuks. Olukorras kus kasutatud matemaatiline mudel sisaldab arvestataval määral viga, on soovitatav kaaluda robustse automaatjuhtimise teooria rakendamist. [2]

Automaatjuhtimissüsteem võib koosneda mitmest osast. Et näidata millist ülesannet üksik süsteemi osa täidab, kasutatakse üldjuhul plokkdiagrammi. [2]

Süsteemile vastav blokkdiagramm on piltlik esindus süsteemi komponentide poolt täidetud ülesannetest ning signaalide ülekandumisest. Selline diagramm kujutab vastastikuseid seoseid erinevate komponentide vahel. Võrreldes abstraktse puhtalt matemaatilise kujutusega, on plokkdiagrammi eeliseks näidata realistlikumalt signaalide ülekandumist tegelikus süsteemis. [2]

Plokkdiagrammis on kõik süsteemi muutujad ühendatud üksteisega läbi funktsiooni plokkide. Funktsiooni plokk (edaspidi plokk) on sümbol tähistamaks matemaatilist tehet, mis teostatakse plokki sisendsignaali, et tekitada plokki väljundsignaal. Ülekandefunktsioonid sisestatakse üldjuhul vastavatesse plokkidesse ning plokkid ühendatakse nooltega näitamaks signaalide ülekandumise suunda. [2]

Automaatika kontrollid võrdleb süsteemi mõõdetud väljundit ette nähtud väljundi väärtusega, määrab kõrvalekalde ette nähtud väärtusest ning tekitab juhtsignaali, mis määratud kõrvalekalde vähendaks. Kõrvalekalle ette nähtud väärtusest muutub seeläbi olematuks või jääb vastuvõetavalt väikeseks väärtuseks. [2]

### **1.4.1 Kontrollid**

Enamike tööstuslike kontrollereid saab klassifitseerida vastavalt nende juhttoimele järgnevalt: [2]

- Kahe positsioonilised (sees või väljas) kontrollid,
- proportsionaalsed kontrollid,
- integraalsed kontrollid
- proportsionaal-integraal kontrollid
- proportsionaal-diferentsiaal kontrollid
- proportsionaal-integraal-diferentsiaal kontrollid.

Proportsionaalse juhttoime korral on suhe kontrolleri väljundi ja veasignaali vahel poportsionaalne. Seda kirjeldab järgnev valem: [2]

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1.12)$$

kus  $u(t)$  – kontrolleri väljund ajahetkel  $t$ ,  
 $K_p$  – proportsionaalne võimendustegur,  
 $e(t)$  – määratud viga ajahetkel  $t$ .

Olenemata sellest milline on tegelik mehhanism ja milline on toimiv võimsus, proportsionaalne kontroller töötab sisuliselt ikkagi nagu võimendi millel on muudetav võimendustegur. [2]

Integraalse juhttoimega kontrolleris summeeritakse määratud erinevused juhitava süsteemi ette nähtud väljundi ja mõõdetud väljundi vahel. Kontrolleri juhttoime on proportsionaalne erinevuste summaga. Seda kirjeldab järgnev valem: [2]

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (1.13)$$

kus  $u(t)$  – kontrolleri väljund ajahetkel  $t$ ,  
 $K_i$  – kohandatav konstant,  
 $e(t)$  – määratud viga ajahetkel  $t$ ,  
 $dt$  – aja element,  $s$ .

Proportsionaal-integraal-diferentsiaal kontroller kasutab igat juhttoimet, mis selle nimes sisaldub (proportsionaalset, integraalset ja diferentsiaalset juhttoimet). Matemaatiliselt väljendub sellise kontrolleri juhttoime järgneva summana: [2]

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.14)$$

kus  $u(t)$  – kontrolleri väljund ajahetkel  $t$ ,  
 $K_p$  – proportsionaalne võimendustegur,  
 $e(t)$  – määratud viga ajahetkel  $t$ ,  
 $de(t)$  – määratud vea element ajahetkel  $t$ ,  
 $dt$  – aja element,  $s$ ,  
 $T_i$  – integraali aeg,  $s$ ,  
 $T_d$  – diferentsiaali aeg,  $s$ .

### 1.4.2 Modernne automaatjuhtimine

Kaasaegne trend süsteemide kavandamises on suunatud suurema kompleksuse poole. See on tingitud eelkõige vajadusest täita kompleksseid ülesandeid ja saavutada hea täpsus. Sellistel



kompleksetel süsteemidel võib olla mitmeid erinevaid sisendeid ja väljundeid. Selline süsteem võib olla ka ajas muutuv. Sellest tulenevalt on ka automaatjuhtsüsteemidele esitatud nõuded muutunud aina rangemaks. Et täita järjest karmimaid nõudeid automaatjuhtimissüsteemide tööle, juhtida järjest komplekssemaid süsteeme ning kasutada ära arvutite järjest parenevat võimekust (riistvaralist), on arendatud modernset automaatjuhtimise teooriat. See uus lähenemine automaatjuhtimisele põhineb oleku kontseptsioonil. Oleku kontseptsioon iseenesest väga uudne ei ole – see on pikka aega olnud kasutusel klassikalise dünaamika valdkonnas ja ka teistes valdkondades. [2]

Dünaamilise süsteemi olek on väikseim võimalik muutujate (nimetatud üldjuhul olekumuutujateks) hulk, kui teave nende muutujate kohta ajahetkel  $t=t_0$  koos teabega süsteemi sisendi kohta ajal hiljem kui  $t_0$  täielikult määrab süsteemi käitumise ajal hiljem kui  $t_0$ . [2]

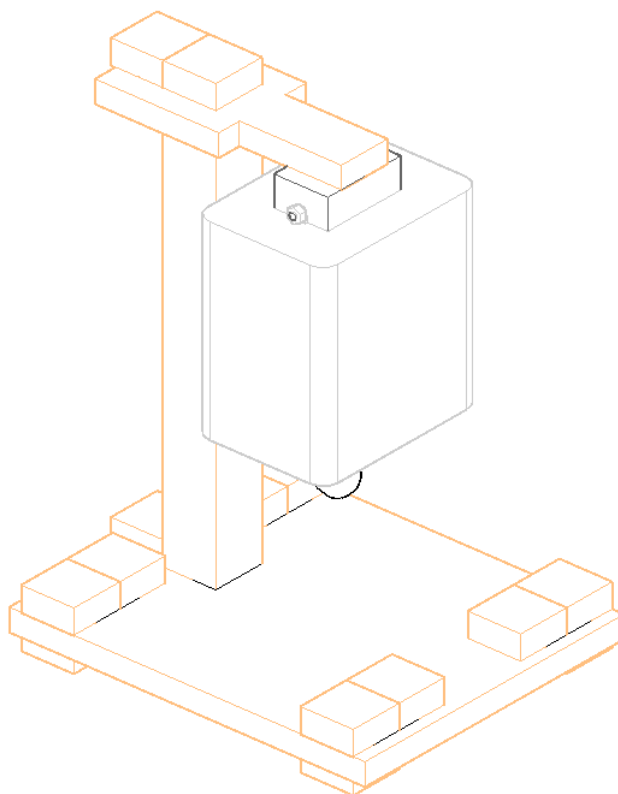
Olekumuutujad ei pea olema füüsiliselt mõõdetavad ega vaadeldavad - muutujad, mis ei kirjelda füüsikalisi koguseid ja muutujad, mis ei ole mõõdetavad ega vaadeldavad sobivad ikkagi olekumuutujate valikusse. Selline vabadus muutujate valikus on modernse automaatjuhtimise teooria üks olulisi eeliseid. Praktikas on aga eelistatav valida ikkagi hõlpsasti mõõdetavaid väärtusi olekumuutujateks – optimaalse automaatjuhtimise leidmisel on tarvis tagasisidet iga valitud olekumuutuja kohta. [2]

## 2. KOLMEMÕÕTMELINE JOONIS JA KANDEKONSTRUKTSIOON

Töö teostamise esimeseks sammuks sai kolmemõõtmelise joonise loomine, mis kajastab kõiki maketi detaile füüsilise süsteemi modelleerimiseks ja kandekonstruktsiooni ehitamiseks vajaliku täpsusega.

Selleks sai kasutatud arvutiprogrammi AutoCAD. Selle tarkvara on arendanud Ameerika Ühendriikide ettevõtte Autodesk [7]. AutoCAD on leidnud inseneri valdkondades laialdast kasutust. See tarkvara võimaldab salvestada kolmemõõtmelise joonise faili, mida suudab kasutada ka käes olevas töös hiljem kajastatud arvutiprogramm COMSOL Multiphysics.

Kolmemõõtmelise joonise loomiseks AutoCAD keskkonnas sai valitud 3D tööala. Vajalikud kujundid loodi tahkistena kasutades esmaseid käsklusi ja modifitseerimismeetodeid. Detailid said modelleeritud üks ühele mõõtmistulemustega. Lisaks lähteandmetes esiletoodud mõõdetele sai mõõdetud ja modelleeritud ka vähemtähtsad detailid nagu näiteks polt, mis kinnitab südamiku ning kesta magnetit kandva montaažilindi külge. Vastavalt elektromagneti ja kuuli kavandile sai loodud kandekonstruktsiooni. Loodud kolmemõõtmeline joonis on kujutatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Kolmemõõtmeline joonis magnetlevitatsiooni õppemaketist

Kandekonstruksioon sai kavandatud täies mahus liimpuidust (kuusk). Materjalina sai valitud puit, sest selle magnetiline läbitavus on lähedane õhu magnetilisele läbitavusele, mis tõttu on välistatud, et kandekonstruksioon moonutab reaalset magnetvälja võrreldes modelleeritavaga. Puit on ka piisava mehaanilise tugevusega kandmaks elektromagnetit.

Kandekonstruksiooni lahendamisel sai kaalutletud erinevaid kavandeid. Valituks osutus tappidel põhinev lahendus. Selle kavandi puhul on ette nähtud risküliku kujuga alus (pikem külj pikkusega 300 mm, lühem külj pikkusega 250 mm), milles on viis ruudu kujuga auku (külje pikkusega 44 mm). Neli neist paiknevad aluse nurkade lähedal (20 mm kaugusel kummastki nurga moodustavast servast). Viies paikneb aluse ühe lühema külje keskpunkti lähedal (30 mm servast). Nurkades paiknevatesse aukudesse kinnitatakse kandejalad koos fikseerivate tappidega. Viiendasse kinnitatakse elektromagneti kõrguse määrav detail koos fikseeriva tapiga. Selle detaili ülaosas (20 mm kaugusel ülaosast) on tehtud lõige. See lõige võimaldab kinnitada elektromagnetit kandva detaili ning selle fikseerimise järjekordse tapiga.

### 3. ELEKTRISKEEM JA ELEKTROONIKA

Järgnevalt sai loodud süsteemi kirjeldav elektriskeem ning sai kavandatud elektroonikaseade, mis lahendab toiteploki, kasutajaliidese ja juhtsüsteemi funktsioonid.

Elektriskeemi joonestamisel sai rakendatud arvutiprogrammi LibreCAD – kahedimensionaalsete jooniste tegemiseks sobilik vabavara [8]. Elektroonikaseadme tarbeks vajatud trükkplaadi kavandamiseks kasutati arvutiprogrammi EAGLE, mis on nüüdseks omandatud ja edasiarendatud ettevõtte Autodesk poolt [7].

Sai ette nähtud, et kavandatav elektroonikaseade oleks võimeline täitma kolme erinevat funktsiooni: võrgupinge muundamist ülejäänud süsteemi osadele kasutatavaks, elektromagneti toitepinge juhtimist, maketi mugava käsitlemise võimaldamist kasutajale. Kahe viimase funktsiooni lahendamiseks sai otsustatud seadmes programmeeritava mikrokontrolleri kasutamise kasuks.

Toitepinge muundamisel sai eesmärgiks seatud 230 V võrgupinge muundamine 12 V alalispingeks ning 3,3 A alalisvoolu võimaldamine seadme tavatalitusel. Selleks sai ette nähtud kasutada trafot, dioodsilda ja kondensaatoreid.

Trafo vähendab võrgupinge väärtust (230 V) soovitud tasemele (12 V). Siinkohal on aga tähtis märkida, et trafo sekundaarpinge on arvestatud efektiivväärtusena. Trafo sekundaarpinge amplituudväärtus on efektiivväärtusest suurem vastavalt valemile 3.1.

$$u_p = \sqrt{2} \cdot U_E \quad (3.1)$$

kus  $u_p$  - trafo sekundaarpinge amplituudväärtus, V,

$U_E$  - trafo sekundaarpinge efektiivväärtus, V.

See tõsiasi on oluline, sest olukorras kus elektromagnet ei ole pingestatud (koormuseks on vaid Halli tajur, mikrokontroller ja valgusdiოდid), laaduvad toitepinge silumiseks ette nähtud kondensaatorid trafo väljundpinge amplituudväärtuseni. Kui elektromagnet on pingestatud, siis laaduvad need kondensaatorid trafo väljundpinge efektiivväärtuseni.

Kuigi trafo sekundaarmähise pinge on efektiivväärtusega 12 V, on tegemist siiski matemaatiliselt siinusfunktsioonina muutuva pingega – vahelduvpingega. Et takistada pinge suuna muutus ajas, sai ette nähtud kasutatud dioodsilda.

Diodsild takistab küll pinge suuna muutuse ajas, kuid pinge väärtus jääb siiski ajas muutuvaks. Et pinge väärtuse muutust takistada ja seeläbi alalispinge väärtuse ühtlasemaks siluda sai ette nähtud kasutatud kondensaatoreid. Kondensaatoreite mõju pingele tuleneb tõsiasjast, et pinge

kondensaatoritel ei saa muutuda hüppeliselt. Valides piisavalt suure mahtuvusega kondensaatorid ning ühendades need paralleelselt alalispinge kõrgema ja madalama potentsiaali vahele, saab vähendada alalispinge väärtuse muutumise kiirust.

Täiendavalt sai ette nähtud lisada toitepinge muundamisega seotud elektroonikaseadme osale kaks diodi, mis välistavad koormusest või muust asjaolust tingitud voolude suundumise elektroonikaseadme pingesilumise kondensaatoritesse. Ette nähtud said ka juhtmekinnitused trafo ning koormuse ühendamiseks.

Elektroonikaseadme juhttoimeid võimaldavaks komponendiks sai mikrokontroller (PIC18F45K20). Konkreetse mudeli valikul lähtuti nii vajalikust seadme võimekusest, varasemast kasutuskogemusest ning komponendi kättesaadavusest. Mikrokontrollerit kasutatakse lülite asendi kontrollimiseks, potentsiomeetri takistuse kontrollimiseks, valgusdioodide juhtimiseks, Halli tajuri väljundi töötlemiseks ning PWM (*Pulse Width Modulation*) –tehnoloogial tuginevalt N-tüüpi MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) lülitamiseks.

Valitud mikrokontrolleri puhul on tegemist 8-bitise mikrokontrolleriga. See tähendab, et mikrokontroller kasutab registreid suurusega 1 bait.

Kasutatud mikrokontroller toetab ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) –tehnoloogiat, mis võimaldab programmeerimist ka pärast elektroonikaseadme komplekteerimist. Selle rakendamiseks on tarvis vaid tagada programmaatorile ühendusvõimaluse nõutud tihvtideni.

Mikrokontrollerile sai lisatud kvartskristall võimaldamaks 16 MHz taktsagedust. Kvartskristalli ühendamiseks oli vastavalt toote andmelehele tarvis ka täiendavaid kondensaatoreid mahtuvusega 12 pF. Kusjuures mikrokontrolleril on sisseehitatud võimekus taktsagedust veel neli korda kiirendada – saab kasutada taktsagedust 64 Mhz.

Mikrokontrolleri elektritoide ei saanud võetud mitte otse pingesilumise kondensaatoritelt, vaid läbi pingeregulaatori. Valitud pingeregulaatori maksimaalne sisendpinge vastavalt andmelehele on 20 V ning väljundpinge 3,3 V. Maksimaalne lubatud vool läbi pingeregulaatori on 1 A. Pingeregulaatori ühendamiseks oli tarvis ka täiendavaid kondensaatoreid mahtuvusega 10 µF.

Kasutajaliidese kavandamisel seati järgnevad eesmärgid:

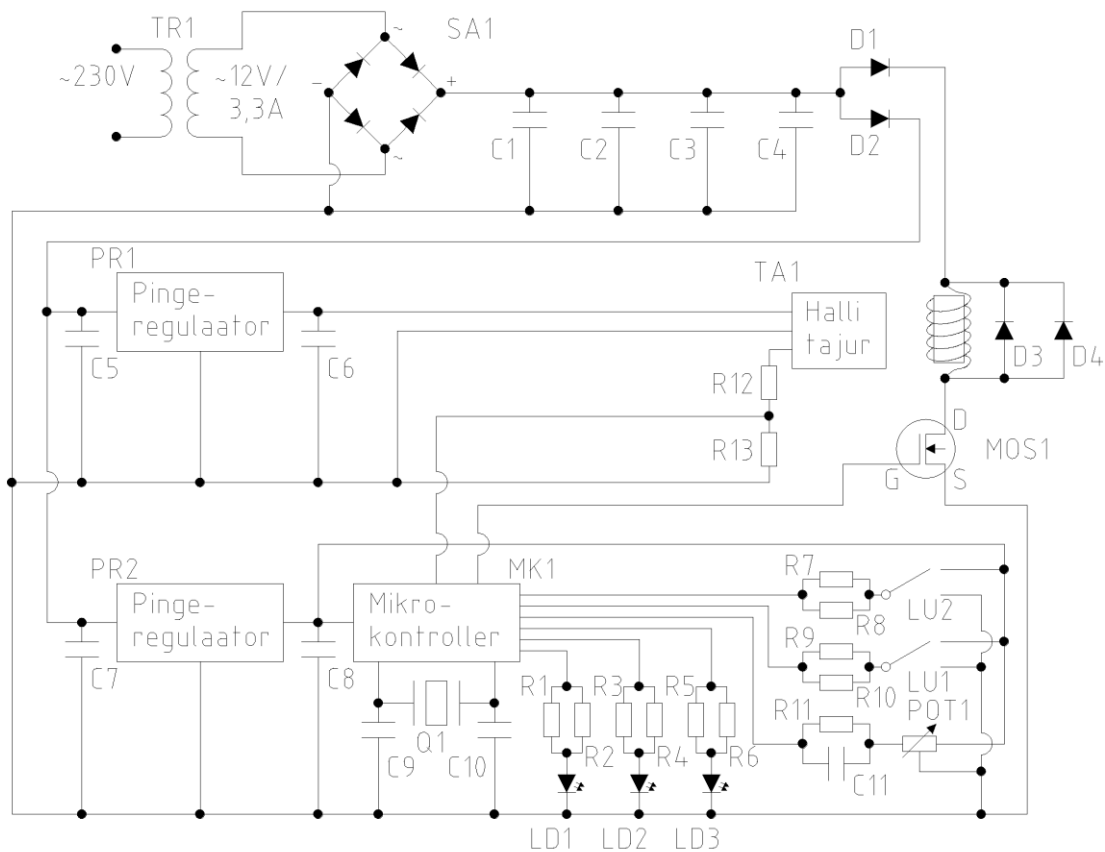
- võimalus vahetada töörežiime,
- võimalus muuta parameetreid,
- võimalus juhtida kasutaja tähelepanu,
- võimalus seadet ka peale komplekteerimist ümberprogrammeerida.

Seatud eesmärkide täitmiseks sai valitud kahe tumblerlüüti, ühe potentsiomeetri, kolme valgusdiodi ning ühe pistikühenduse (kuue tihvtiga) lisamine. Tumblerlüütid võimaldavad vajadusel muuta maketi töörežiime. Potentsiomeeter võimaldab muuta tarkvaras kasutatud parameetrite väärtust ilma ümberprogrammeerimiseta. Kuue tihvtiga pistikühendus sai lisatud seadme programmeeritavuse tagamiseks ka peale komplekteerimist, tuginedes ICSP (*In-Circuit Serial Programming*)-tehnoloogiale. Valgusdiodid võimaldavad juhtida kasutaja tähelepanu ning näidata milline töörežiim on kasutusel.

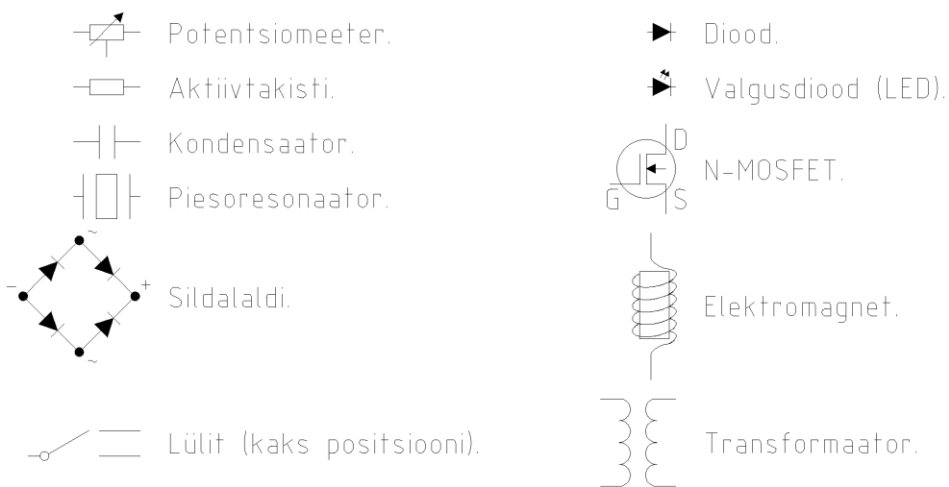
Kasutajaliidesena teenivate komponentide ühendamisel mikrokontrolleriga said lisatud ka täiendavad aktiivtakistid ning potentsiomeetri puhul ka kondensaator. Need komponendid pakuvad kaitset liigpingete ja -voolude vastu. Potentsiomeetri puhul lisatud kondensaator teenib analoogsignaali silumist.

Täiendavalt kasutati ka kahte diodi elektromagneti mähises indutseeritud voolu suunamiseks olukorras, kus pinge mähisel väljalülitatakse.

Ette nähtud elektriskeem on kajastatud joonisel 3.1. Ette nähtud elektroonika komponendid on täpsustatud lisa 1.



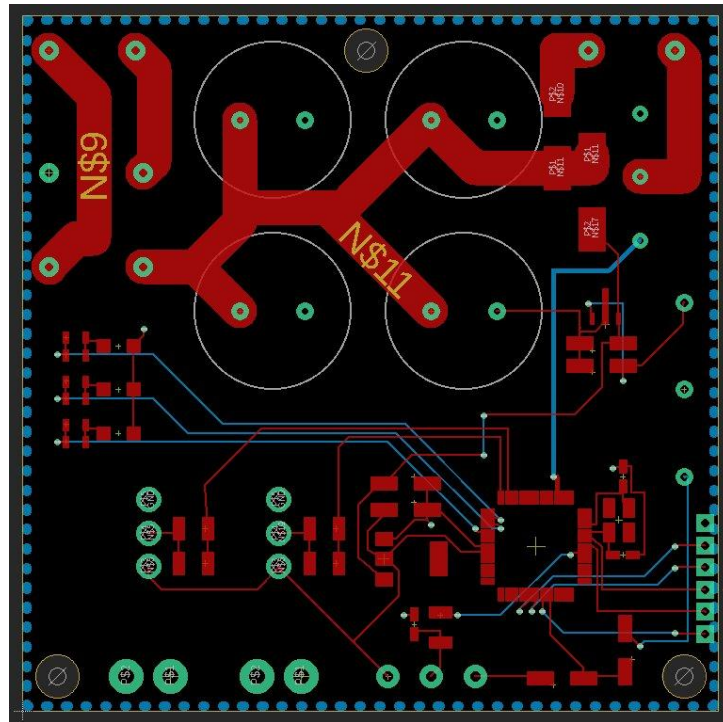
TINGMÄRGID:



Joonis 3.1 Ette nähtud elektriskeem magnetlevitatsiooni õppemaketile (komponendid täpsustatud lisas 1)

Vastavalt kavandatud elektriskeemile oli võimalik kavandada elektroonikaseadme trükkplaat. Kasutatud tarkvara (EAGLE) võimaldab trükkplaadi kavandamist kolmes etapis. Esmalt tuleb luua teek kasutatavatest komponentidest. Võimalik on ka kasutada tarkvaraga vaikimisi pakutud teeke. Järgnevalt tuleb teegist valitud komponentidest moodustada elektriskeem, kus on defineeritud komponentide omavaheline ühendus ning ühendused alalispinge madalama potentsiaaliga. Pärast elektriskeemi koostamist on võimalik see konverteerida trükkplaadi kavandiks, mis kajastab reaalselt trükkplaati. Seda kavandit saab töödelda ning salvestada failina. Tulemina saadud faili

alusel on vastavat teenust pakkuvad ettevõtted võimelised looma reaalse trükkplaadi. Kavandatud trükkplaat on näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Trükkplaadi kavand (kahe poolne, punasega pealmine kiht, sinisega alumine kiht)



## 4. FÜÜSIKALISE SÜSTEEMI MODELLEERIMINE JA ANALÜÜS

Järgnevas sammus sai maketi modelleerimine füüsilise süsteemina ning mudelipõhiste mõõtmistulemite analüüs.

Füüsilise süsteemi modelleerimiseks sai rakendatud arvutiprogrammi COMSOL Multiphysics. Mudelipõhiste mõõtmistulemite analüüsiks sai rakendatud arvutiprogrammi MATLAB.

COMSOL Multiphysics on arendatud korporatsiooni COMSOL poolt. See on tarkvara, mis võimaldab simuleerida laiaulatuslikult erinevaid protsesse insenerivaldkondades, tootmisvaldkondades ja teadusvaldkondades [12].

MATLAB on arendatud ettevõtte MathWorks poolt. See on tarkvara, mis pakub programmeerimiskeskonda algorütmide arendamiseks, andmete analüüsiks, visualiseerimiseks ja numbriliseks arvutuseks [10].

Modelleerimiseks tarkvaraga COMSOL Multiphysics, sai tehtud järgnevat:

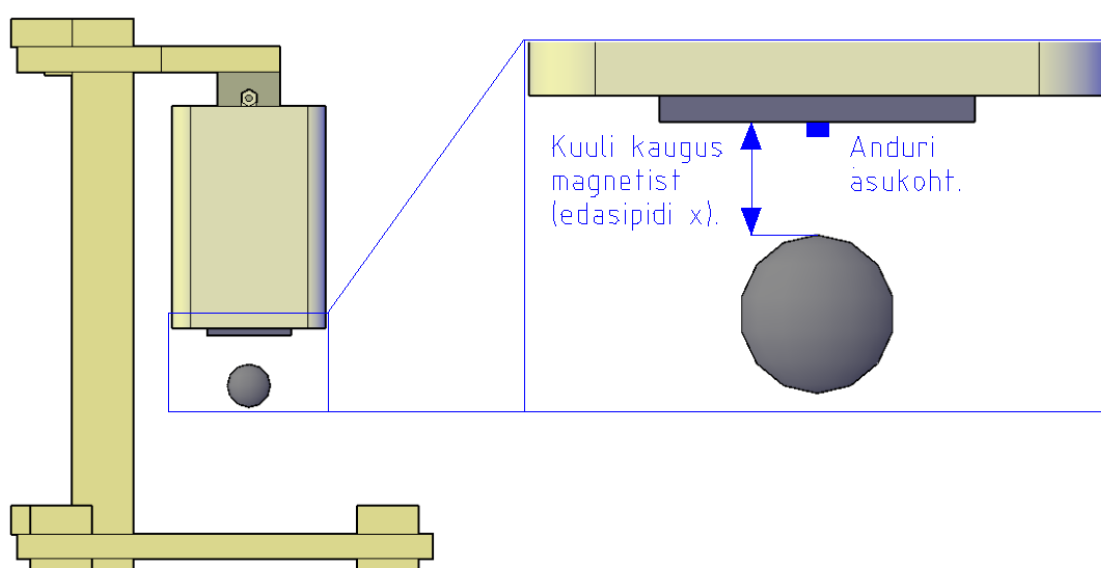
1. Sai valitud kolmemõõtmeline modelleerimiskeskond, magnetväljade modelleerimise moodul, pooli geomeetria uuring ning stacionaarne uuring;
2. Sai määratud lähteparameetrid;
3. Sai defineeritud uuritav geomeetria ning seda ümbritsev õhk;
4. Sai defineeritud materjalid;
5. Sai defineeritud elektromagneti mähis uuritava poolina ning kuul objektina, millele mõjub jõud;
6. Sai loodud võrk lõplike elementide meetodi tarbeks ning käivitatud simulatsioon;
7. Sai visualiseeritud magnetvoo tiheduse simulatsiooni tulemused, märgitud magnetvoo tiheduse väärtus anduri eeldatavas asukohas, märgitud kuulile mõjuv jõud ning leitud mähise induktiivsus.

Geomeetria defineerimisel sai kasutatud peatükis 2 kirjeldatud kolmemõõtmelist joonist mõningate lihtsustustega. Mudelilt said eemaldatud mõned vähemolulised detailid (polt, plastikdetailid) ning kandekonstruktsioon. Põhjenduseks on tõsiasi, et need detailid simulatsioonitulemusi oluliselt ei mõjuta, kuid pikendavad simulatsioonile kuluvat aega. Samuti ei leidnud kasutust juba modelleeritud raudkuul – see sai loodud COMSOL Multiphysics keskkonnas uuesti. Põhjenduseks oli võimalus kiiremini magneti ja kuuli vahelist kaugust muuta.

Lähteandmed, mis said simulatsiooniks eraldi defineeritud on näidatud tabelis 4.1. Joonisel 4.1 on illustreeritud Halli tajuri eeldatavat asukohta ning arvestatavat kuuli ja magneti vahelist kaugust.

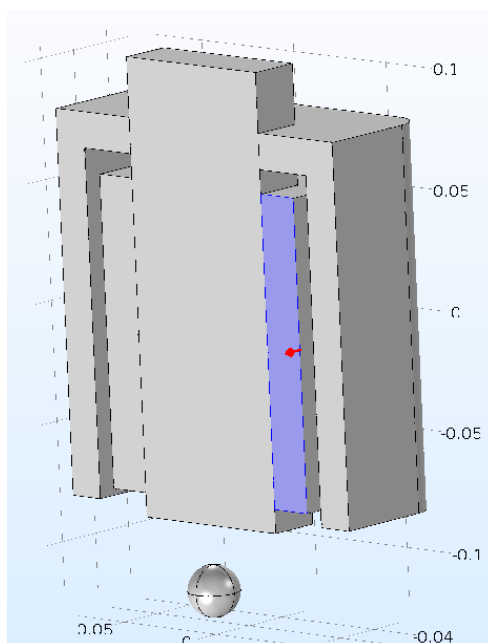
Tabel 4.1 Simulatsiooniks määratud lähteandmed

Parameeter	Väärtus (ühik)
Voolutugevuse hetkväärtus mähises	$I$ (A)
Mähise keerdude arv (trafo samba sekundaar- ja primaarmähiste keerud kokku)	990
Mähise takistus	3,9 ( $\Omega$ )
Mähise traadi läbimõõt	1,3 (mm)
Mähise traadi ristlõige	$1,33 \cdot 10^{-6}$ ( $m^2$ )
Kuuli ja elektromagneti vaheline kaugus	$x$ (m)



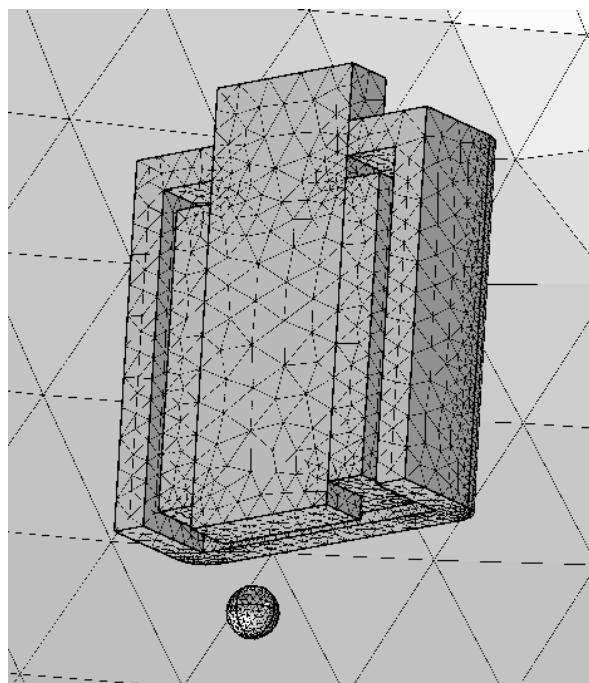
Joonis 4.1 Illustratsioon kirjeldamaks kuuli ja magneti vahelist kaugust  $x$  ning Halli tajuri asukohta. Simulatsiooniks sai defineeritud neli materjali: ümbritsev õhk, elektrotehnilisest terasest südamik, vasest mähis ning rauast kest ja kuul. Kesta, kuuli ja südamiku magnetilised läbitavused said aga ümber defineeritud vastavalt lähteandmetele (südamik 4000 ning kuul ja kest 220).

Eraldi sai määratud, milline kasutatud geomeetristest objektidest on mähis. Mähise määramisel oli oluline ka defineerida voolu suund mähises. Lõige mudelist, kus on näha ka defineeritud voolu suund on esitatud joonisel 4.2.



Joonis 4.2 Lõige mudeli defineeritud geometriast ja määratud mähise voolu suund (vool on suunatud pildist välja, tähistatud punase noolega)

Võrgu moodustamisel FEM põhiseks simulatsiooniks, sai valitud eriti peen võrk (*extra fine*). See valik kogu süsteemi jaoks mõnevõrra aeglustab simulatsiooni kestvust, kuid parandab üleüldist tulemust. Kasutatud võrku illustreerib joonis 4.3 ning selle täpsustus on toodud tabelis 4.2.



Joonis 4.3 FEM põhiseks simulatsiooniks kasutatud võrk

Tabel 4.2 FEM põhiseks simulatsiooniks kasutatud võrgu täpsustus

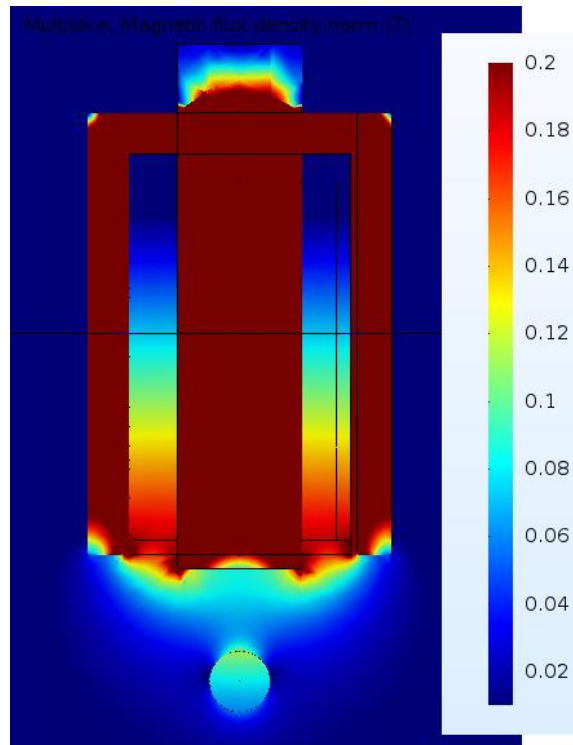
Parameeter	Väärtus
Tetraeeder element	353016 (tk)
Prisma element	25400 (tk)
Kolmnurkne element	26413 (tk)
Nelinurkne element	1200 (tk)
Ääre element	2228 (tk)
Tipu element	106 (tk)

Simulatsioonid sai teostatud autori isiklikul arvutil. Arvuti tootjaks oli Acer ja mudeliks Aspire E5-572G. Täpsem arvuti iseloomustus on toodu tabelis 4.3. Simulatsiooni arvutuste kestvus jäi vahemikku 8 kuni 12 minutit.

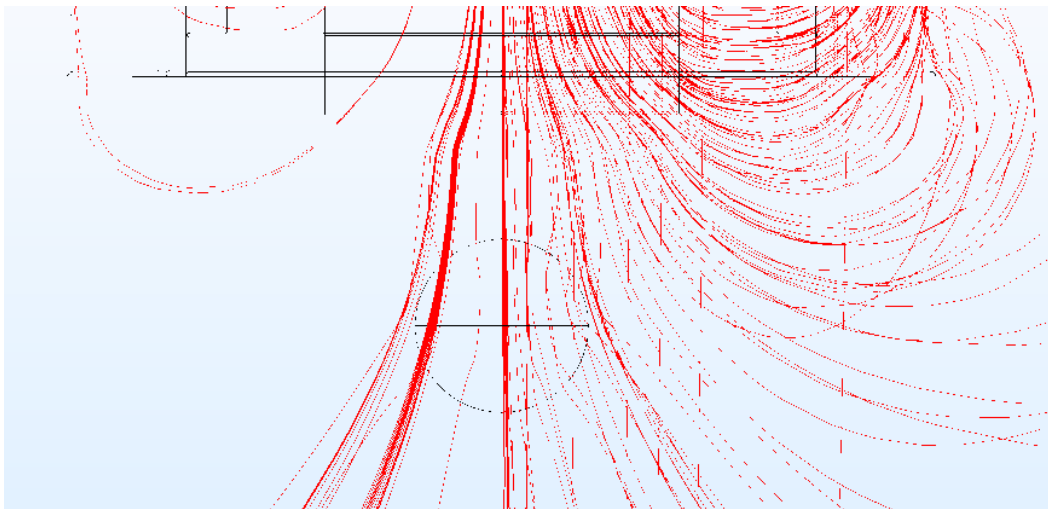
Tabel 4.3 Simulatsiooniks kasutatud arvuti parameetrite täpsustus

Arvutit iseloomustava parameetri tähistus	Parameetri väärtus
Operatsioonisüsteem	Microsoft Windows 10 Pro
Süsteemi tüüp	x64-põhine arvuti
Paigaldatud füüsiline mälu	8,0 GB
Protsessor	<i>Intel(R) Core(TM) i5-4210M CPU @ 2.60 GHz, 2601 MHz, 2 Core(s), 4 Logical Processor(s)</i>

Simulatsiooni tulemuste visualiseerimiseks on joonisel 4.4 kujutatud magnetvoo tihedus külgvaates ning joonisel 4.5 kujutatud magnetvälja jõujooned külgvaates.



Joonis 4.4 Magnetvoo tihedus kuuli kaugusel 30mm ja voolutugevusel 3A (skaalal on ühikuks tesla (T))



Joonis 4.5 Magnetvälja jõujooned moonutatult elektromagneti all oleva metallist kuuli poolt

Simulatsioonid sai läbiviidud erinevatel kuuli kaugustel ning erinevate voolutugevustega. Selleks hoiti esmalt ühte muutujat konstantsena (kuuli kaugust) ning muudeti teist muutujat (voolu väärtust). Tulemitena märgiti magnetvoo tihedus 1 mm kaugusel elektromagneti südamiku kuulipoolse pinna keskpunktist (ette nähtud punkt anduri asukohale) ning kuulile mõjuv jõud (arvestades vaid elektromagneti mõju). Simulatsioonidest saadud tulemid on kajastatud tabelites 4.4 ja 4.5.

Tabel 4.4 Magnetvoo tihedus Halli tajuri ette nähtud asukohas erinevatel kuuli kaugustel ja erinevate voolude korral

		I (A)				
	B (T)	1	1,5	2	2,5	3
x (mm)	2	0,134	0,2	0,267	0,334	0,4
	4	0,076	0,114	0,152	0,19	0,228
	6	0,055	0,083	0,11	0,138	0,166
	8	0,044	0,066	0,088	0,111	0,133
	10	0,039	0,059	0,079	0,099	0,119
	12	0,036	0,054	0,072	0,09	0,108
	14	0,034	0,05	0,067	0,083	0,101
	16	0,032	0,048	0,064	0,08	0,096
	18	0,031	0,047	0,062	0,078	0,093
	20	0,03	0,045	0,061	0,076	0,09
	22	0,029	0,045	0,06	0,075	0,09
	24	0,029	0,044	0,059	0,074	0,088
	26	0,029	0,044	0,058	0,073	0,087
	28	0,028	0,042	0,057	0,071	0,085
	30	0,028	0,043	0,057	0,072	0,086

Tabel 4.5 Elektromagneti poolt kuulile avaldatud jõud erinevatel kuuli kaugustel ja erinevate voolude korral

		I (A)				
	F (N)	1	1,5	2	2,5	3
x (mm)	2	0,49	1,10	1,96	3,06	4,41
	4	0,29	0,66	1,18	1,84	2,65
	6	0,23	0,51	0,91	1,42	2,05
	8	0,19	0,43	0,76	1,19	1,72
	10	0,17	0,37	0,66	1,03	1,48
	12	0,14	0,32	0,57	0,89	1,29
	14	0,13	0,28	0,5	0,78	1,13
	16	0,11	0,25	0,44	0,68	0,98
	18	0,09	0,21	0,38	0,59	0,85
	20	0,08	0,19	0,33	0,52	0,74
	22	0,07	0,16	0,29	0,45	0,64
	24	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56

	26	0,05	0,12	0,22	0,34	0,48
	28	0,05	0,1	0,18	0,29	0,42
	30	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36

Vaadeldes saadud tulemusi on näha, et nii kuulile mõjuv jõud  $F$  kui ka magnetvoo tihedus  $B$  anduri ette nähtud asukohas on tõepoolest ühtaegu sõltuvad kuuli ja magneti vahelisest kauguses  $x$  ning elektromagneti mähise voolust  $I$ . Ilmekalt väljenduvad need sõltuvused joonistel 4.6, 4.7, 4.8 ja 4.9 kus on hoitud vaheldumisi ühte muutujat konstantsena ning kajastatud sõltuvust teisest parameetrist.

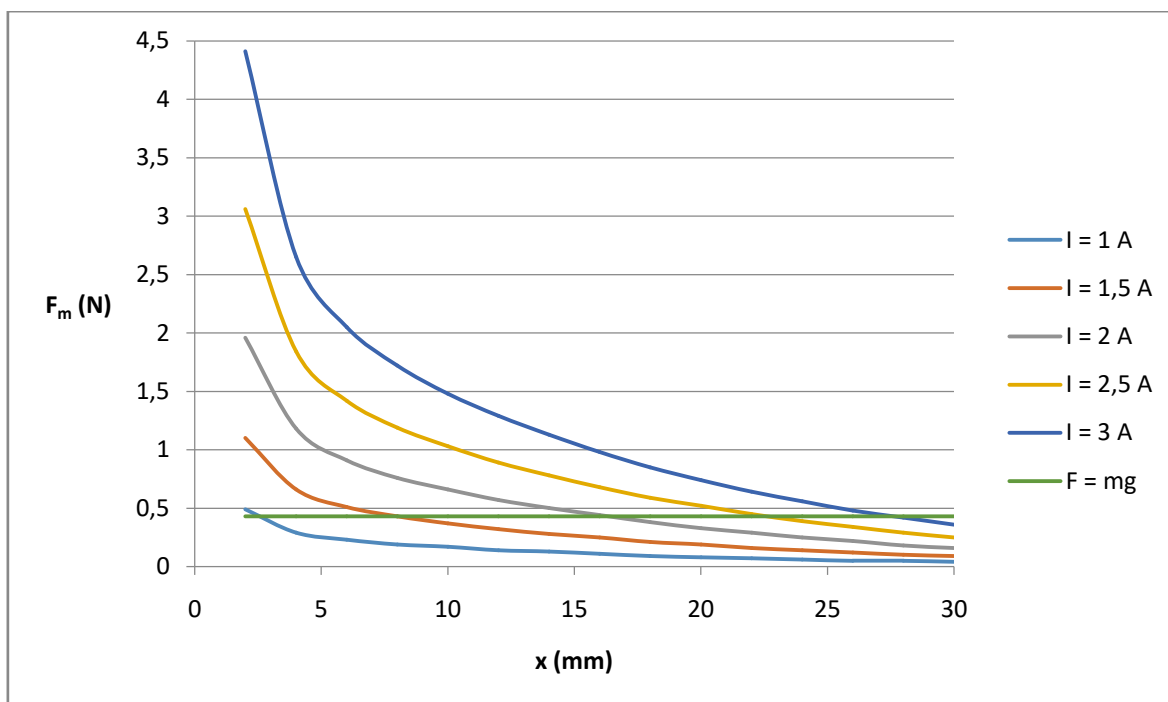
Jõudu kajastavatel joonistel 4.6 ja 4.7 on täiendavalt näidatud ka kuulile mõjuv jõud tulenevalt gravitatsioonist. Kohtades, kus kuulile mõjuvat jõudu tulenevalt elektromagnetist kajastavad jooned lõikuvad kuulile mõjuvat jõudu tulenevalt gravitatsioonist kajastava joonega, on kuulile mõjuv kogujõud võrdne nulliga – kajastuvad levitatsiooniks sobilikud punktid. Jõud nendes punktides on kirjeldatavad võrrandiga 4.1.

$$F_M = m \cdot g \quad (4.1)$$

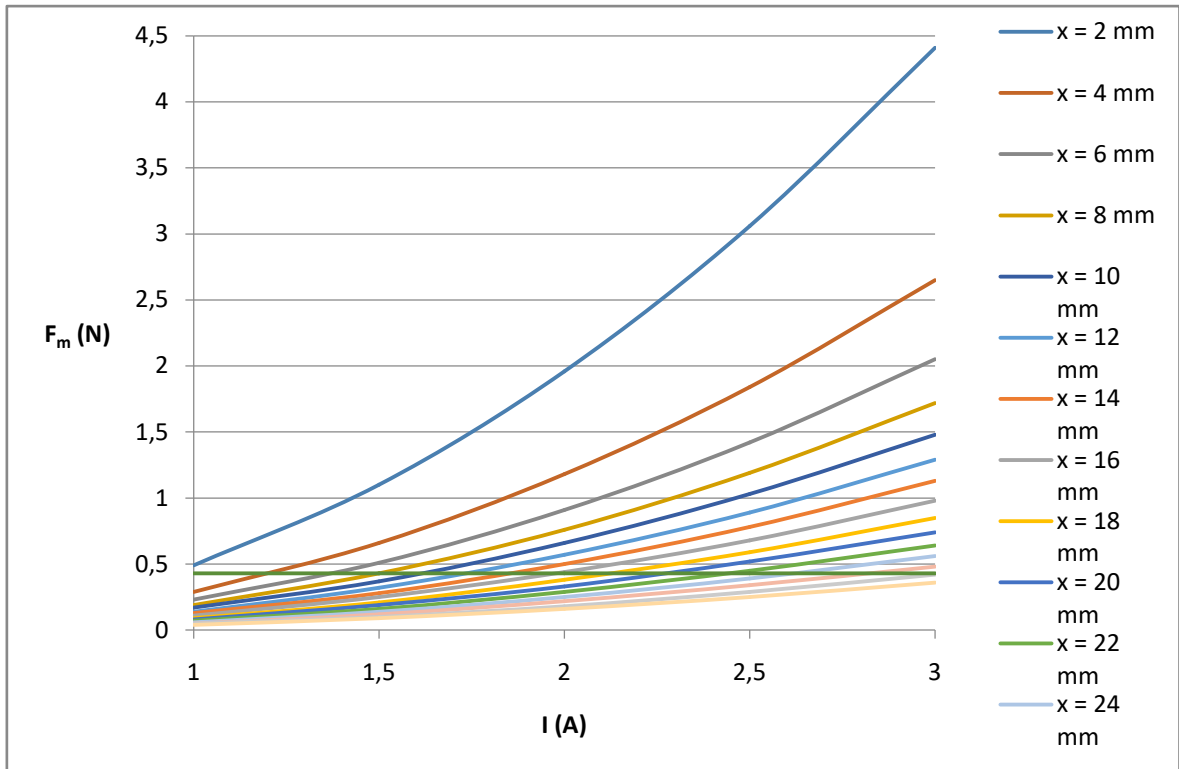
kus  $F_M$  – kuulile mõjuv jõud tulenevalt elektromagnetist, N,

$m$  – kuuli mass, kg,

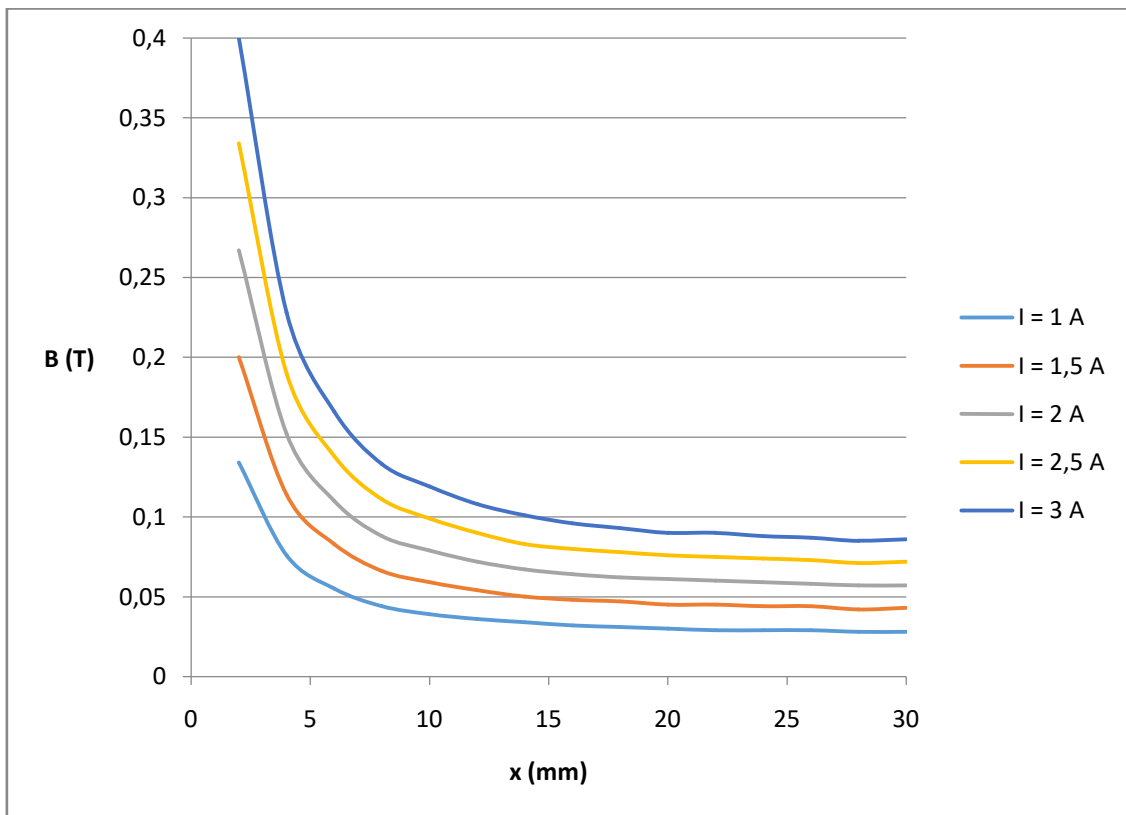
$g$  – gravitatsioonist tulenev kiirendus,  $m/s^2$ .



Joonis 4.6 Elektromagneti poolt kuulile avaldatud jõu  $F$  sõltuvus kuuli ja elektromagneti vahelisest kaugusest  $x$  erinevate elektromagneti mähise voolutugevuste  $I$  korral

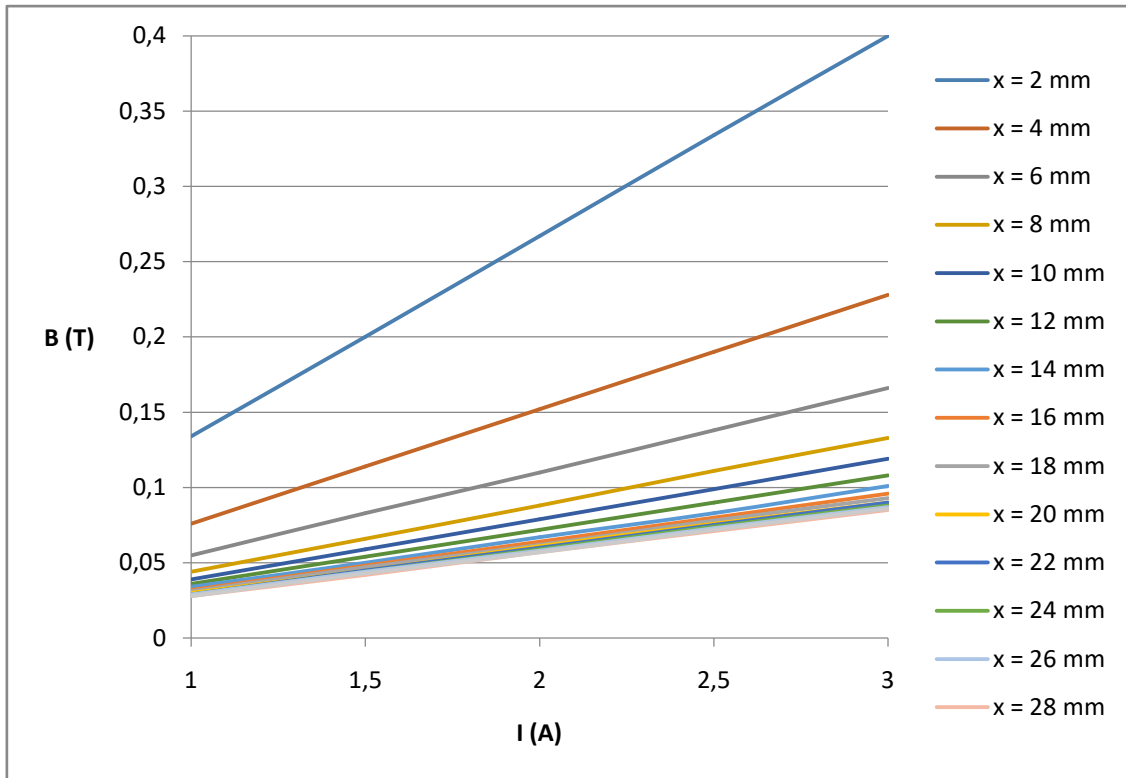


Joonis 4.7 Elektromagneti poolt kuulile avaldatud jõu  $F$  sõltuvus elektromagneti mähise voolugevusest  $I$  erinevate kuuli ja elektromagneti vaheliste kauguste  $x$  korral



Joonis 4.8 Magnetvoo tiheduse  $B$  sõltuvus kuuli ja elektromagneti vahelisest kaugusest  $x$  erinevate elektromagneti mähise voolugevuste  $I$  korral anduri ette nähtud asukohas





Joonis 4.9 Magnetvoo tiheduse B sõltuvus elektromagneti mähise voolugevusest I erinevate kuuli ja elektromagneti vaheliste kauguste x korral anduri ette nähtud asukohas

#### 4.1 Modelleerimise tulemuste analüüs

Saadud modelleerimistulemuste põhjal sai numbriliselt lähendatud (kasutades tarkvara MATLAB) lihtsustatud funktsiooni kuulile elektromagneti poolt avaldatud jõule kujul:

$$F_m = f(x, I) = a \cdot x + b \cdot I \quad (4.2)$$

- kus  $F_M$  – kuulile mõjuv jõud tulenevalt elektromagnetist, N,
- $f$  – funktsiooni üldtähis,
- $a$  – numbriliselt leitav kordaja,
- $x$  – kuuli kaugus elektromagnetist, mm,
- $b$  – numbriliselt leitav kordaja,
- $I$  – elektromagneti mähise voolu hetkväärtus, A.

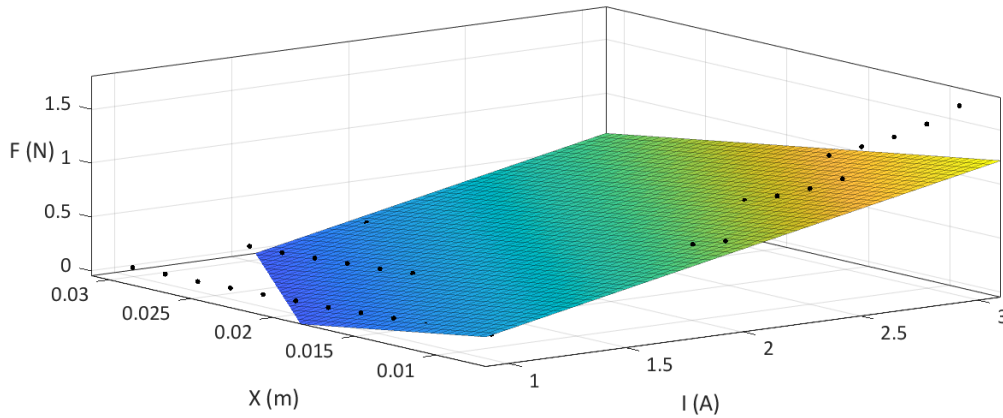
Numbrilise lähenduse tarbeks kasutati tulemusi alates kaugusest  $x = 8$  mm. Numbrilise lähenduse tulemusena sai võrrand 4.2 kujul:

$$F_m = f(x, I) = -24,49 \cdot x + 0,4479 \cdot I \quad (4.3)$$

- kus  $F_M$  – kuulile mõjuv jõud tulenevalt elektromagnetist, N,
- $f$  – funktsiooni üldtähis,,
- $x$  – kuuli kaugus elektromagnetist, mm,

$I$  – elektromagneti mähise voolu hetkväärtus, A.

Leitud võrrandi 4.3 kattuvust mõõtetulemustega on illustreeritud joonisel 4.8.



Joonis 4.10 Numbrilise lähenduse tulemina saadud võrrandi 4.3 kattuvus mõõtetulemustega Järgnevalt sai numbriliselt lähendatud (kasutades tarkvara MATLAB) lihtsustatud funktsioon magnetvoo tihedusele anduri ette nähtud asukohas:

$$B_s = f(x, I) = c \cdot x + d \cdot I \quad (4.4)$$

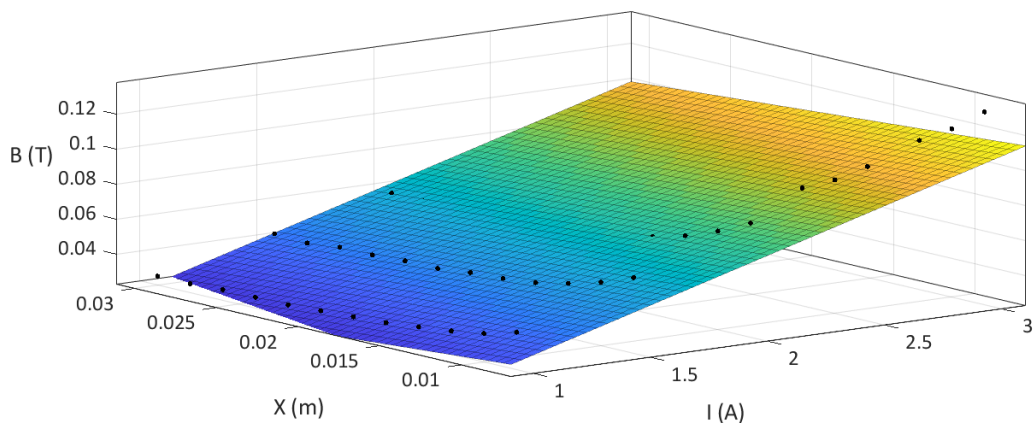
- kus  $B_s$  – magnetvoo tihedus anduri ette nähtud asukohas, T,  
 $f$  – funktsiooni üldtähis,  
 $c$  – numbriliselt leitav kordaja,  
 $x$  – kuuli kaugus elektromagnetist, mm,  
 $d$  – numbriliselt leitav kordaja,  
 $I$  – elektromagneti mähise voolu hetkväärtus, A.

Numbrilise lähenduse tarbeks kasutati tulemusi alates kaugusest  $x = 8$  mm. Numbrilise lähenduse tulemusena sai võrrand 4.4 kuju:

$$B_s = f(x, I) = -0,6695 \cdot x + 0,0383 \cdot I \quad (4.5)$$

- kus  $B_s$  – magnetvoo tihedus anduri ette nähtud asukohas, T,  
 $f$  – funktsiooni üldtähis,  
 $x$  – kuuli kaugus elektromagnetist, mm,  
 $I$  – elektromagneti mähise voolu hetkväärtus, A.

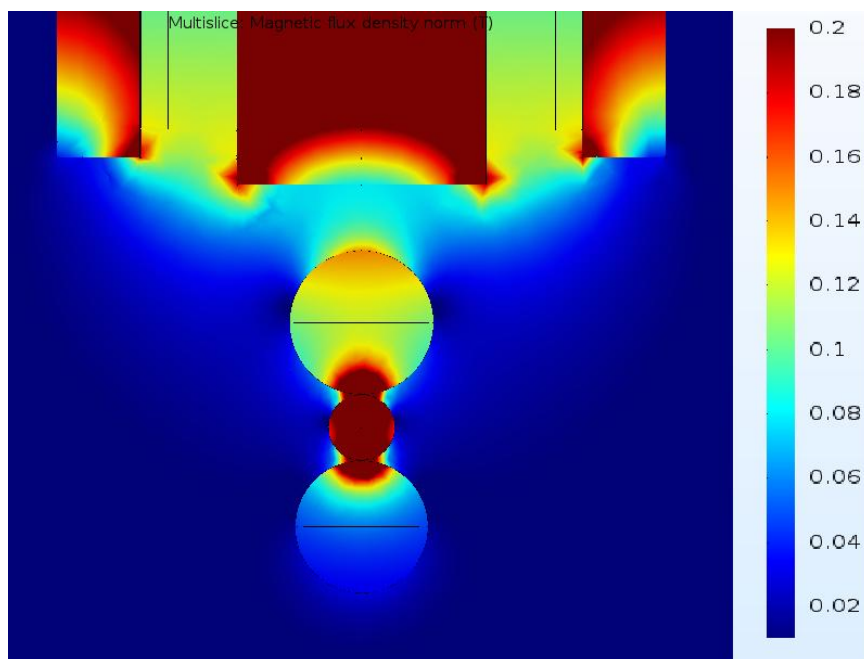
Leitud võrrandi 4.5 kattuvust mõõtetulemustega on illustreeritud joonisel 4.9.



Joonis 4.11 Numbrilise lähenduse tulemina saadud võrrandi 4.5 kattuvus mõõtetulemustega

## 4.2 Täiendav analüüs valminud maketi tarbeks

Maketi ehitamisel üksiku kuuli levitatsiooni ei olnud paraku võimalik teostada – kuul kaldus magneti keskpunkti alt. Et takistada kuuli kõrvalekaldumist sai levitatsiooni jaoks kasutatud kolme kuuli korraga. Sellise lähenemise jaoks sai ka eraldi simulatsioonid tehtud, kuid mitte nii hulgaliselt kui ühe kuuli puhul. Lihtsustatud matemaatilisi võrrandeid selle lähenemise tarbeks ei leitud, kuna süsteem jäi esialgsele mudelile piisavalt sarnaseks ning töö valmimisele seatud ajalisel piirangul ja prioriteedid seda ei võimaldanud. Joonisel 4.10 on illustreeritud magnetvoo tihedus sellise lähenemise puhul.



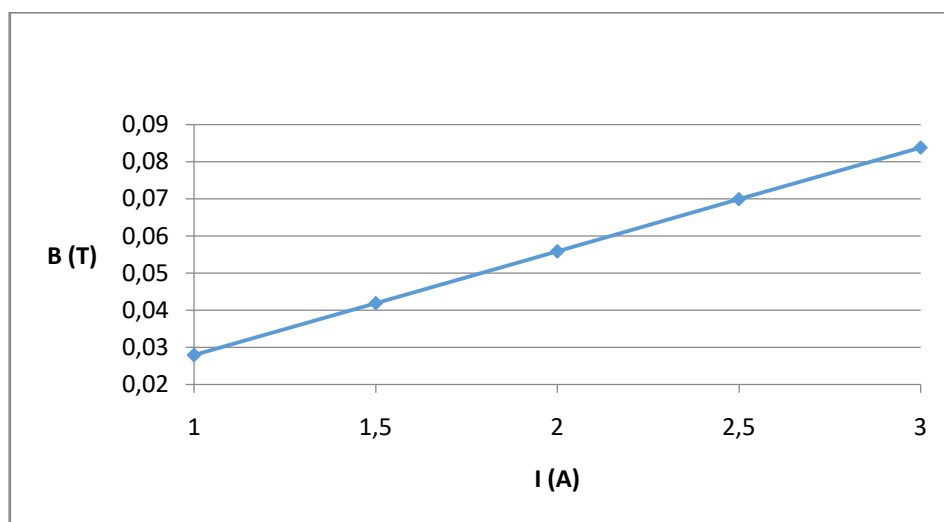
Joonis 4.12 Magnetvoo tihedus kasutades kolme kuuli korraga (skaalal ühikuks tesla (T))

Kolme kuuliga leviteerimise saavutamisel oli ülemise kuuli läbimõõt 26 mm ja kaal 0,066 kg. Keskmise kuuli läbimõõt oli 12 mm ja kaal 0,008 kg. Alumise kuuli läbimõõt oli 24 mm ja kaal oli 0,055 kg.

Et võrrelda valminud maketi tööd simulatsioonidega, sai teostatud ka simulatsioon ilma kuulita. Sellel juhul sai muudetud vaid elektromagneti mähise voolu hetkväärtust ning märgitud magnetvoo tiheduse väärtus anduri ette nähtud asukohas. Tulemid on kajastatud tabelis 4.6 ja joonisel 4.11.

Tabel 4.6 Magnetvoo tiheduse väärtus anduri ette nähtud asukohas kuuli puudumisel

<b>Mähise vool I (A)</b>	1	1,5	2	2,5	3
<b>Magnetvoo tihedus B (T)</b>	0,0279	0,0419	0,0558	0,0699	0,0838



Joonis 4.13 Magnetvoo tihedus väärtus anduri ette nähtud asukohas kuuli puudumisel

## 5. SÜSTEEMI STABILISEERIMINE JA JUHTPROGRAMM

Vaadeldes elektromagnetist ja kuulist koosnevat süsteemi dünaamilise süsteemina, sai tähendatud kaks energiat salvestavat elementi: elektromagneti mähis ning metallkuul. Elektromagneti mähises ei saa vool muutuda hüppeliselt tulenevalt elektromagnetilisest induksioonist. Metallkuul ei saa muuta kiirust hüppeliselt tulenevalt mehaanilisest inertsist. Sellest lähtuvalt on valitud olekuruumi kirjeldavad muutujad järgnevalt (lähudes [2] teooriast):

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ I \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

kus  $x_1, x_2, x_3$  – olekumuutujate tähised,  
 $x$  – elektromagneti ja leviteeritava objekti vaheline väikseim kaugus, m,  
 $\dot{x}$  – kuuli liikumiskiirus elektromagneti suhtes ( $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ ), m/s,  
 $I$  – voolu hetkväärtus elektromagneti mähises, A.

$$[u] = [u_M] \quad (5.2)$$

kus  $u$  – süsteemi sisendi tähis,  
 $u_M$  – pinge hetkväärtus elektromagneti mähisel, V.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ B \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

kus  $y_1, y_2$  – süsteemi väljundite tähised,  
 $I$  – voolu hetkväärtus elektromagneti mähises, A,  
 $B$  – magnetvoo tihedus, T.

Kusjuures esimest järku tuletis on tähistatud punktiga muutujua kohal ning teist järku tuletis kahe kõrvutise punktiga muutuja kohal.

Kuuli kiirendus sai avaldatud järgnevalt:

$$m \cdot \ddot{x} = F_M \quad (5.4)$$

$$\ddot{x} = \frac{F_M}{m} \quad (5.5)$$

kus  $m$  – kuuli mass, kg,  
 $\ddot{x}$  – kuuli kiirendus elektromagneti suhtes ( $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ ), m/s<sup>2</sup>,  
 $F_M$  – elektromagneti poolt kuulile avaldatud jõud, N.

Voolu muutuse kiirus elektromagneti mähises sai avaldatud järgnevalt:

$$u_M = R \cdot I + L \cdot \dot{I} \quad (5.6)$$

$$\dot{I} = \frac{u_M - R \cdot I}{L} \quad (5.7)$$

- kus  $\dot{I}$  – elektromagneti mähise voolu muutuse kiirus ( $\dot{I} = \frac{dI}{dt}$ ), A/s,  
 $I$  – elektromagneti mähise voolu hetkväärtus, A,  
 $u_M$  – pinge hetkväärtus elektromagneti mähisel, V,  
 $R$  – elektromagneti mähise aktiivtakistus,  $\Omega$ ,  
 $L$  – elektromagneti mähise induktiivsus, H.

Kasutades täiendavalt numbrilise lähenduse abil leitud lihtsustatud funktsioone elektromagneti poolt kuulile avaldatud jõule (4.3) ning magnetvootihedusele anduri ette nähtud asukohas (4.5), sai kirjutatud järgnevad olekuvõrrandid:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -556,6 & 0 & 10,18 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot u \quad (5.8)$$

- kus  $x_1, x_2, x_3$  – olekumuutujate tähised,  
 $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$  – olekumuutujate esimest järku tuletised,  
 $u$  – süsteemi sisendi tähis,  
 $R$  – elektromagneti mähise aktiivtakistus,  $\Omega$ ,  
 $L$  – elektromagneti mähise induktiivsus, H.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -0,6695 & 0 & 0,0383 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

- kus  $x_1, x_2, x_3$  – olekumuutujate tähised,  
 $y_1, y_2$  – süsteemi väljundite tähised.

Arvväärtustega avalduvad saadud olekuvõrrandid järgnevalt:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -556,6 & 0 & 10,18 \\ 0 & 0 & -3,955 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1,014 \end{bmatrix} \cdot u \quad (5.10)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -0,6695 & 0 & 0,0383 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

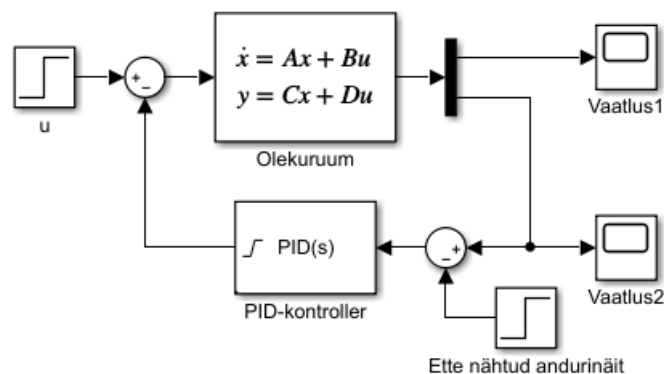
Saadud olekuvõrrandid ei arvesta aga gravitatsiooni mõju otseselt. Kui lahendada süsteemi stabiliseerimise ülesanne mõõtes igat olekuruumi kirjeldavat muutujat üksikult, siis tuleks gravitatsiooni mõju arvestada kui konstantset viga kuuli kiirendusele tagasiside ahelas.

## 5.1 Süsteemi stabiliseerimine MATLAB Simulink keskkonnas

Neid olekuvõrrandeid sai kasutatud MATLAB keskkonnas, et uurida võimalust süsteemi stabiliseerida kasutades PID kontrolleri. Selleks said esmalt tarkvaras loodud vastavad maatriksid ning nendest moodustatud süsteem.

Koheselt oli võimalik kontrollida süsteemi stabiilsust ning juhitavust. Selleks sai kasutatud käsklusi ISSTABLE ja CTFRB.

Edasi sai loodud plokskeem Simulink keskkonnas. Selleks sai valitud sobivad plokid: samm-sisendid, olekuruum, summeerimispunktid, signaali jagaja, PID-kontrolleri plokk ning vaatlusplokid. Olekuruumi plokk sai seadistatud kasutama sisestatud maatrikseid. Plokid said omavahel ühendatud vastavalt signaalide liikumisele reaalses süsteemis. Saadud plokskeem on näidatud joonisel 5.1.



Joonis 5.1 MATLAB Simulink keskkonnas loodud plokskeem

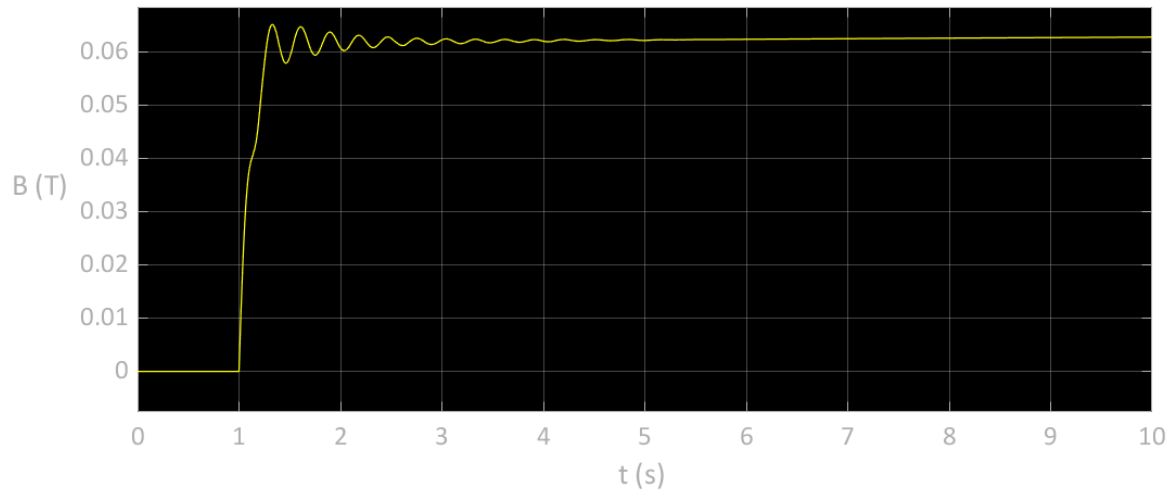
Samm-sisendeid sai kasutatud elektromagneti ette antava toitepinge näitamiseks ning ette nähtud anduri näidu sisestamiseks. Ette antava toitepinge tarbeks lülitab esimene samm-sisend süsteemi sisendi 1 sekund pärast simulatsiooni algus väärtusele 7,8 volti. Ette nähtud anduri näidu tarbeks lülitab teine samm-sisend 1 sekund pärast simulatsiooni algust oma väljundi väärtusele 0,065 teslat. Teise samm-sisendi väljundi väärtus lahutatakse tagasisideahelas mõõdetud magnetvootiheduse väärtusest. Ette antud väärtuse lahutamine mõõdetud väärtusest on vajalik, sest PID-kontrolleri plokk kasutab erinevust null väärtusest, et arvutada oma väljund.

Signaali jagamise plokki oli tarvis kasutada, et näha olekuruumi väljundeid eraldi. Ilma selle plokitä väljastatakse väärtused ühes signaalis.

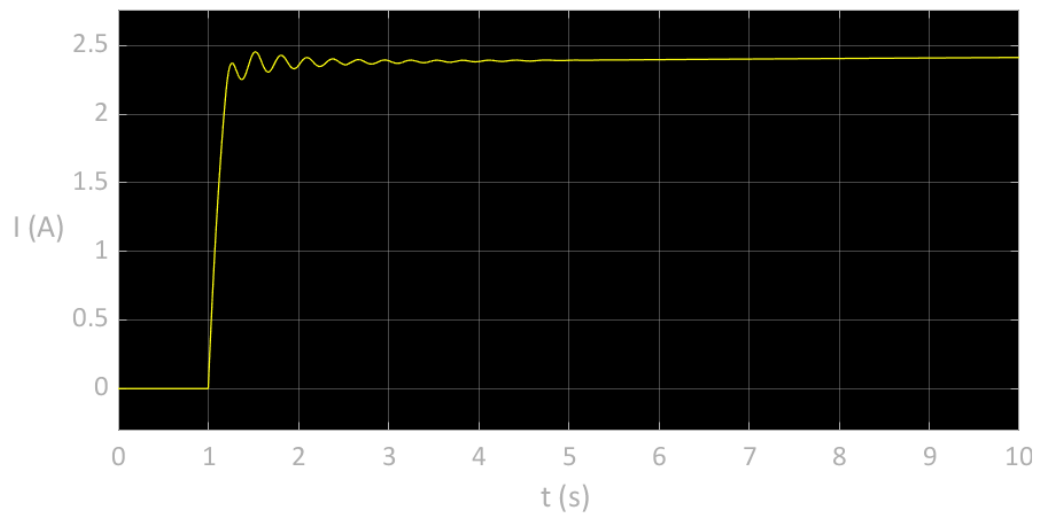
PID-kontrolleri erinevate osade kordajaid reguleeriti manuaalselt. On küll erinevaid meetodeid [2], kuidas süsteemi stabiliseerimisele analüütiliselt läheneda, kuid maketi töövõime demonstreerimiseks piisas empiirilise seadistusest. Kordajaid said valitud 500

(proportsionaalne), 50 (integraalne) ja 5 (diferentsiaalne). PID-kontrolleri minimaalseks ja maksimaalseks väljundiks said määratud vastavalt -7,8 volti ja 4,2 volti.

Vaatlusplokkide sai kasutatud, et vaadelda olekuruumi väljundeid. Vaatlusplokkidel nähtuv on kajastatud joonistel 5.2 ja 5.3.



Joonis 5.2 Mõõdetava magnetvoo tiheduse stabiliseerumine (joonisel 5.1 plokk „Vaatlus2”)

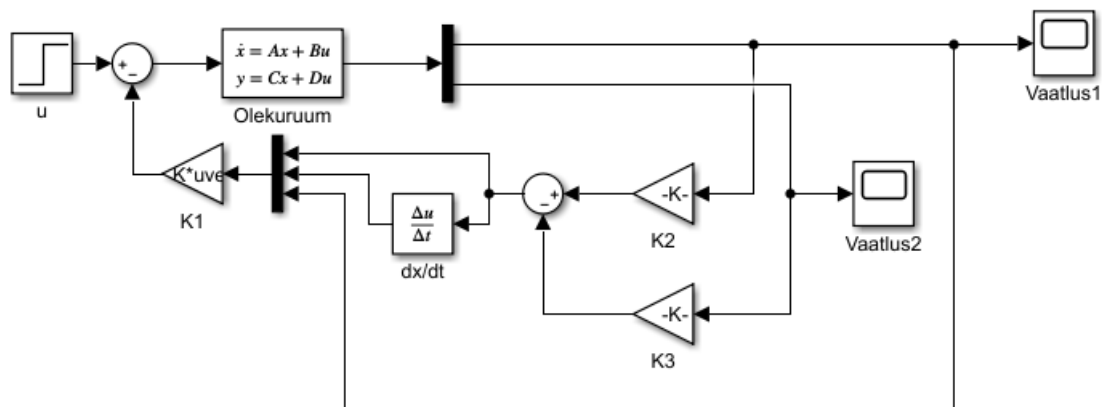


Joonis 5.3 Mähise voolu stabiliseerumine (joonisel 5.1 plokk „Vaatlus1”)

Alternatiivselt PID-kontrolleri rakendamisele sai kaalutletud süsteemi stabiliseerimist tagasisidega, kus kõik olekumuutujad on eraldi leitud. Selleks tuleks mõõdetavate olekumuutujate põhjal arvutada olekumuutujad mis otseselt mõõdetavad ei ole. Otseselt mõõdetud ja arvutatud olekumuutujate tagasisidestamisel piisab kui iga muutuja jaoks on proportsionaalne kordaja. Sobivad väärtused proportsionaalsetele kordajatele saaks leida kasutades LQR (*Linear-Quadratic Regulator*)-kontrolleri arvutust. MATLAB keskkonnas saab seda teha väga hõlpsasti. [2]



Üks lahendus, kuidas tagasisidet, kus kõik olekumuutujad on eraldi leitud, saaks rakendada, on kujutatud plokkskeemina joonisel 5.4.



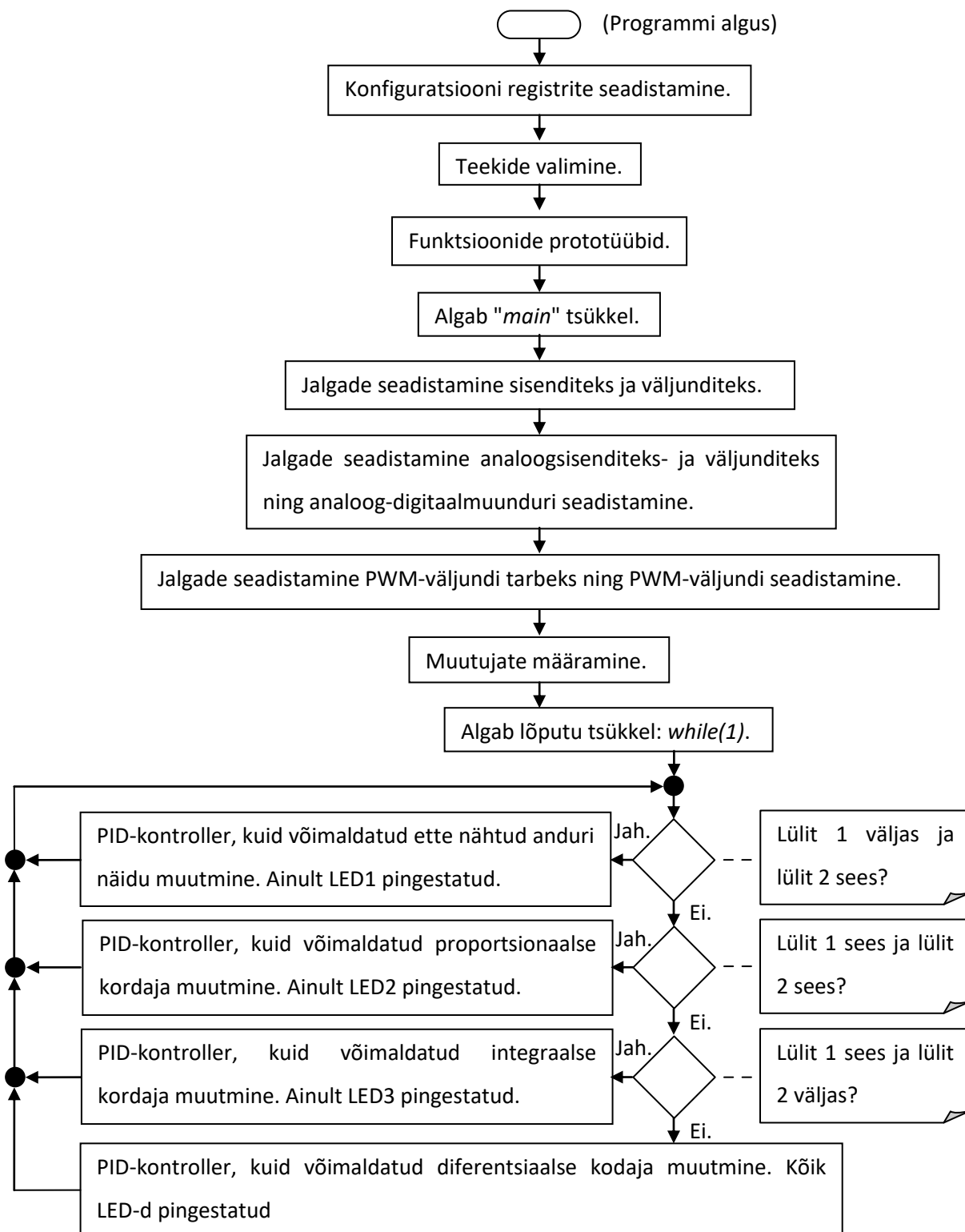
Joonis 5.4 Plokkskeem tagasisidele, kus kõik olekumuutujad on eraldi leitud

Jooniselt 5.4 nähtub, et tagasiside lahendamise sellise lähenemise puhul on mõnevõrra kompleksem. Samm-sisendit kasutatakse sisendpinge tarbeks - 1 sekund pärast simulatsiooni algust lülitatakse plokki väljund väärtusele 7,8. Proportsionaalsed kordajad K2 ja K3 väärtused on saadud valemist 4.3 x väärtuse avaladmisega. Proportsionaalse kordaja K1 väärtused on saadud LQR-käsklust kasutades.

Otsus kasutada maketi tööviime demonstreerimiseks esmalt PID-kontrollerit tulenes kahest asjaolust. Esmalt ei ole PID-regulaatoriga seotud arvutatud väärtusi. Kõiki olekumuutujaid arvestava tagasiside tarbeks teostatavad arvutused oleksid võrreldes reaalse väärtustega küllaltki ebatäpsed. Teisalt on PID-regulaatori kirjutamine programmina lihtsam.

## 5.2 Mikrokontrolleri tööprogramm

Mikrokontrolleri programmeerimiseks sai kasutatud selle tootja poolt arendatud integreeritud programmeerimiskeskonda MPLAB X IDE. See tarkvara on sobilik ka kasutatud programmeerimiskeskonnaga PICkit 3. Mikrokontrolleri töö määrav tarkvara sai loodud vastavalt joonisel 5.5 toodud algoritmile. Valminud programm on esitatud lisas 2. PID-kontrolleri kavandamisel sai lähtutud taustuuringute käigus leitud lahendusest [13].



Joonis 5.5 Mikrokontrolleri töö määrava programmi algoritm (kirjutatud programm on lisa 2)

Lõputu „while” tsükli täitmisele kuluv ajakulu sai mõõdetud kasutades ostsilloskoopi. Tsükli algusesse sai lisatud LED pingestamine ja lõppu sai lisatud LED pinge väljalülitus. Lisaks sai tsükli lõppu lisatud ka 1 ms kestev viide. Ostsilloskoobiga sai mõõdetud LED pingestatust. Tulemusena nähtus, et põhitsüklile kulub ligikaudu 200 µs.

Analoogselt sai mõõdetud ka aeg mis kuluks 100 andurinäidu sisselugemiseks ja keskväärtuse leidmiseks. Saja andurinäidu sisselugemiseks ja ja nende keskväärtuse leidmiseks kulus ligikaudu 4,9 ms.

Juhtprogramm sai kirjutatud nii, et see esmalt seadistab mikrokontrolleri ning seejärel jääb täitma lõputut tsüklit.

Mikrokontrolleri seadistamisel sai lähtunud andmelehes ette nähtud juhistest.

Lõputus tsüklis programm kontrollib lülitate asendeid. Kui on sisse lülitatud vaid lüliti 2, siis saab potentsiomeetriga muuta ette nähtud anduri näidu väärtust. Kui on sisse lülitatud mõlemad lülitid, siis saab potentsiomeetriga muuta PID-kontrolleri proportsionaalse osa kordaja väärtust. Kui on sisse lülitatud vaid lüliti 1, siis saab potentsiomeetriga muuta PID-kontrolleri integraalse osa kordaja väärtust. Kui on sisse lülitatud mõlemad lülitid, siis saab potentsiomeetriga muuta PID-kontrolleri diferentsiaalse osa kordaja väärtust.

Võrreldes PID-kontrolleri teoreetilise kirjeldusega ([2]) sai ette nähtud lahendus veidi erinev. Nii proportsionaalse, integraalse kui ka diferentsiaalsele osale sai ette nähtud eraldi muudetav kordaja, mis teistest osadest ei sõltu.

PID-kontrolleri tarkvarasel teostusel antakse ette lähteväärtus mähise pingele ning ette nähtud anduri sisendväärtus. Programm esmalt leiab erinevuse anduri sisseloetud väärtuse ja ette nähtud väärtuse vahel - vea. Seejärel täiendatakse jooksvat leitud vigade summat – korrutatakse leitud viga tsükli täitmiseks kulunud ajaga ning liidetakse jooksvale summale. Edasi leitakse erinevus viimase määratud vea suhtes – eelmisest määratud vea väärtusest lahutatakse uue määratud vea väärtus. Järgnevalt korrutatakse viga proportsionaalse osa kordajaga, jooksev vigade summa integraalse osa kordajaga ning erinevus viimase määratud vea suhtes diferentsiaalse osa kordajaga. Saadud väärtused liidetakse – saadakse tagasiside väärtus. Nii jooksva vea summa kui ka tagasiside väärtus on piiritletud ette antud vähimvõimalike ja suurimvõimalike väärtustega. Tagasiside väärtus lahutatakse ette antud pinge väärtusest ning saadud tulemuse põhjal seadistatakse uus PWM väljund.

PID-kontrolleri loomisel sai proportsionaalse, integraalse ja diferentsiaalse osa kordajateks määratud vastavalt 100, 1 ja 10. Potentsiomeetriga seadistamisel on võimalik proportsionaalse osa kordaja väärtust muuta vahemikus 0 kuni 3069 sammu suurusega 3. Integraalse osa kordaja väärtust on võimalik muuta vahemikus 0 kuni 10,23 sammu suurusega 0,01. Diferentsiaalse osa suurust on võimalik muuta vahemikus 0 kuni 100,3 sammu suurusega 0,1.

Juhtprogrammi sai kirjutatud ka erinevaid funktsioone, et täita korduvaid tegevusi põhifunktsioonis.

Analoogväärtuste sisselugemiseks sai kirjutatud funktsioon nimega „analoog”. See funktsioon vajab sisendväärtust, et määrata millise analoogsisendi väärtust kontrollitakse. Mõõdetud analoogväärtused on salvestatud kahes eraldi registris (8 bitti ühes ja 2 bitti teises) ning seetõttu ei saa kasutada mõõtetulemust otse ilma mõõtetulemuse täpsust vähendamata. See funktsioon suudab väärtused kahest registrist kombineerida üheks väärtuseks suurusega 10 bitti ning selle väärtuse ka tagastada.

PWM väljundi juhtimiseks sai kirjutatud funktsioon „PWMuus”. See funktsioon võtab kuni 10 bitti suure sisendväärtuse ning muudab selle kohaselt PWM töötsükli määravad registrid (8 bitti ühes ja 2 bitti teises).

Sai ka kirjutatud funktsioon, mis parendab anduri mõõtetulemust. Selle funktsiooni nimeks on „keskmoot” ning see summeerib määratud arvu mõõtmisi ning arvutab seejärel mõõtmiste keskvaartuse. Leitud keskvaartus tagastatakse.

Tasakaalupunktis sobiva andurinäidu otsimiseks sai kirjutatud funktsioon „uusEq”. See funktsioon võimaldab muuta ette nähtud anduri näitu vahemikus  $\pm 40$  ühikut (anduri näit jääb vahemikku 0 kuni 1023 ühikut).

## 6. SIMULATSIOONI TULEMITE JA REAALSE SEADME VÕRDLOS

Reaalne seade sai valmistatud täiel määral kavandatust lähtudes.

Esimese erinevusena selgus aga, et levitatsiooniks esialgselt valitud kuul ei püsinud iseseisvalt ette nähtud asukohas magneti all – see kippus kalduma Halli tajuri alt horisontaalselt eemale. Levitatsiooni teostamiseks pidi seda kõrvalt toetama, mis ei olnud rahuldav. Üheks põhjuseks oli kindlasti anduri kaabelduse mõju magnetväljale anduri lähedal – kuul kippus tõmbuma vastu kaablit

Olukorra parendamiseks sai ette nähtud kuuli raskuskese viia madalamale. Jäiga füüsikalise keha liigutamisel on määravaks jõud mis mõjub selle raskuskeskmele. Viies leviteeritava objekti raskuskeskme kaugemale elektromagnetist väheneb häiringute mõju objektile elektromagneti pinna lähedal – objekti liikumist määrava jõu nurk vertikaaltelje suhtes on väiksem. Kõige lihtsam viis seda teostada oli kasutada rohkem kuule. Et makett oli programmeeritud võimalusega anduri ette nähtud näitu ja PID-regulaatori kordajaid jooksvalt muuta oli ka lihtne uuendada levitatsiooniks ette nähtud muutujad. Selline lahendus toimis väga hästi - levitatsioon oli võimalik teostada. Tulem on kujutatud joonisel 6.1.

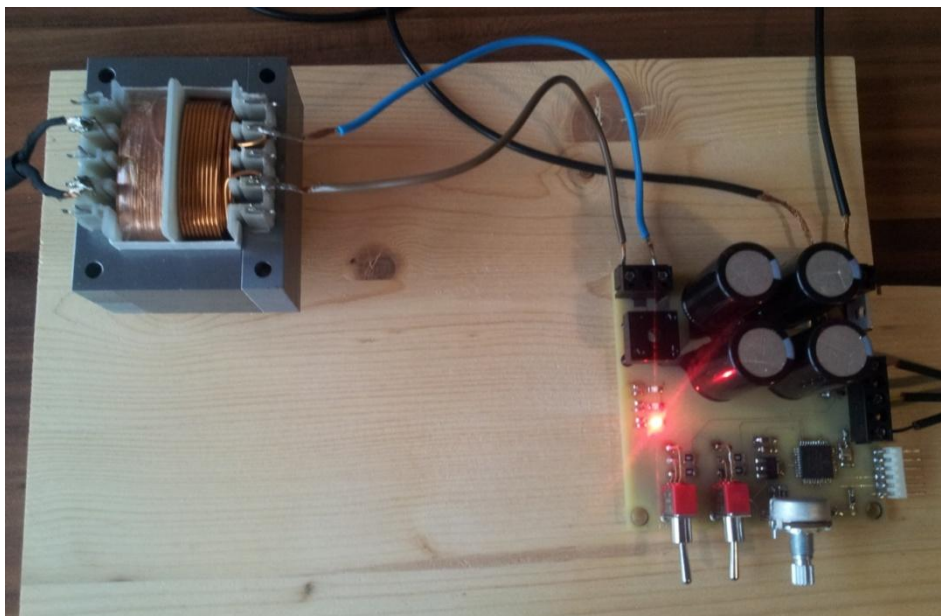


Joonis 6.1 Valminud õppemaketi kandekonstruktsioon, elektromagnet ja leviteeritavad metallkuulid. Koostatud elektroonikaseade töötab nii nagu ette nähtud. Koostatud trükkplaadi kavandi põhjal sai tellitud reaalne trükkplaat millel juhid ei ole kaetud. Juhtide katmata jätmise sai valitud tulenevalt

nende kuumenemisest toiteplokinä toimiva seadme osa poolele ning ka seetõttu, et kõik ühendused oleks selgelt näha ja seadme tööpõhimõtte oleks hõlpsasti kirjeldatav. Reaalselt valminud trükkplaat on kujutatud joonisel 6.2.

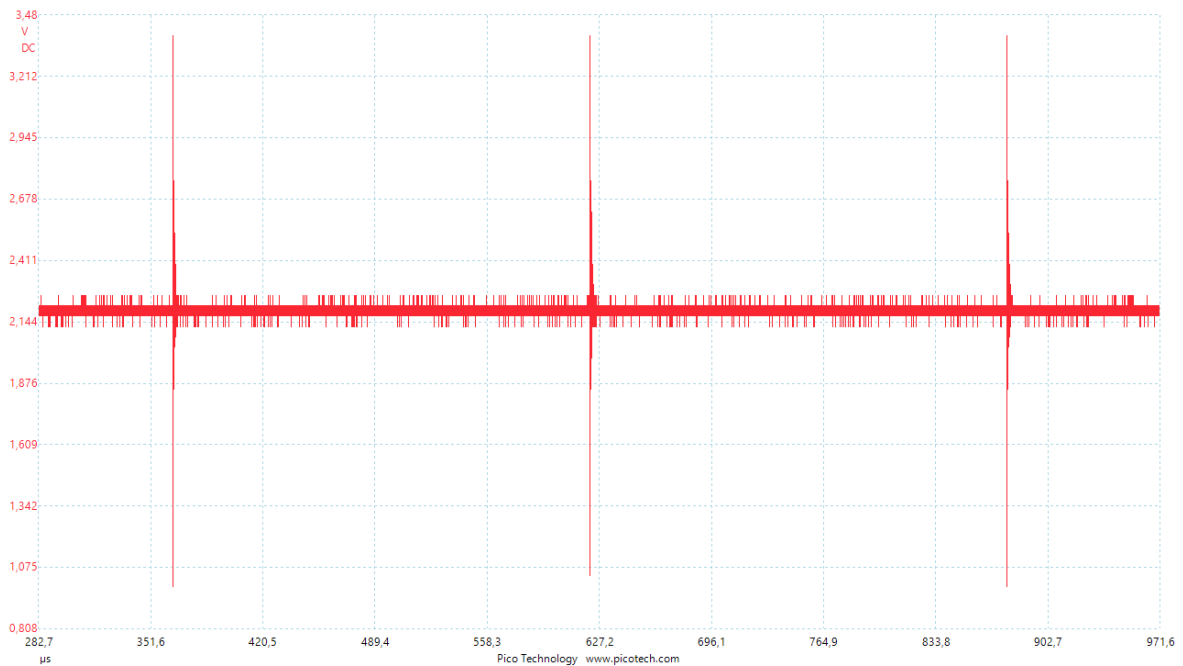


Joonis 6.2 Valminud õppemaketi elektroonikaseade  
Elektroonikaseade sai ühendatud ette nähtud trafoga (12 V / 3,3 A). Toide toimis nagu ette nähtud. Trafo ühendus elektroonikaseadmega on näidatud joonisel 6.3.

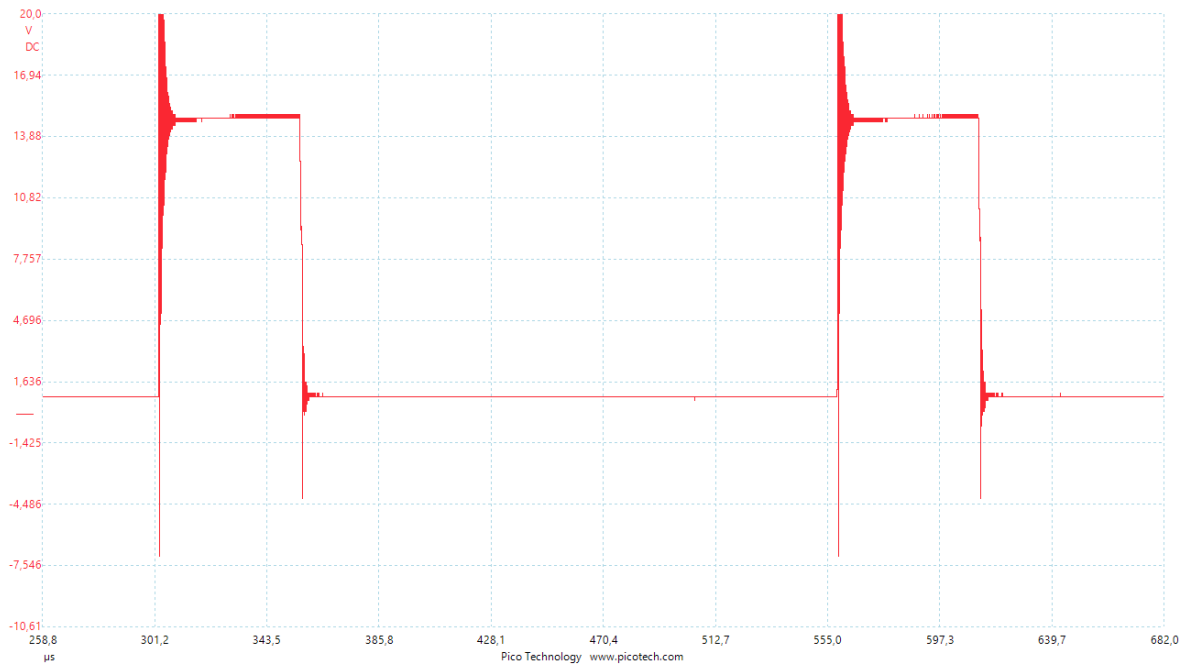


Joonis 6.3 Trafo ühendus elektroonikaseadmega  
Et ostsilloskoobiga (Pico technology, PicoScope 2206BMSO) mõõta kui hästi elektroonikaseade toimib, sai see esmalt ümberprogrammeeritud nii, et PWM töötükk on potentsiomeetriga lineaarselt muudetav vahemikus 0% kuni 100%.

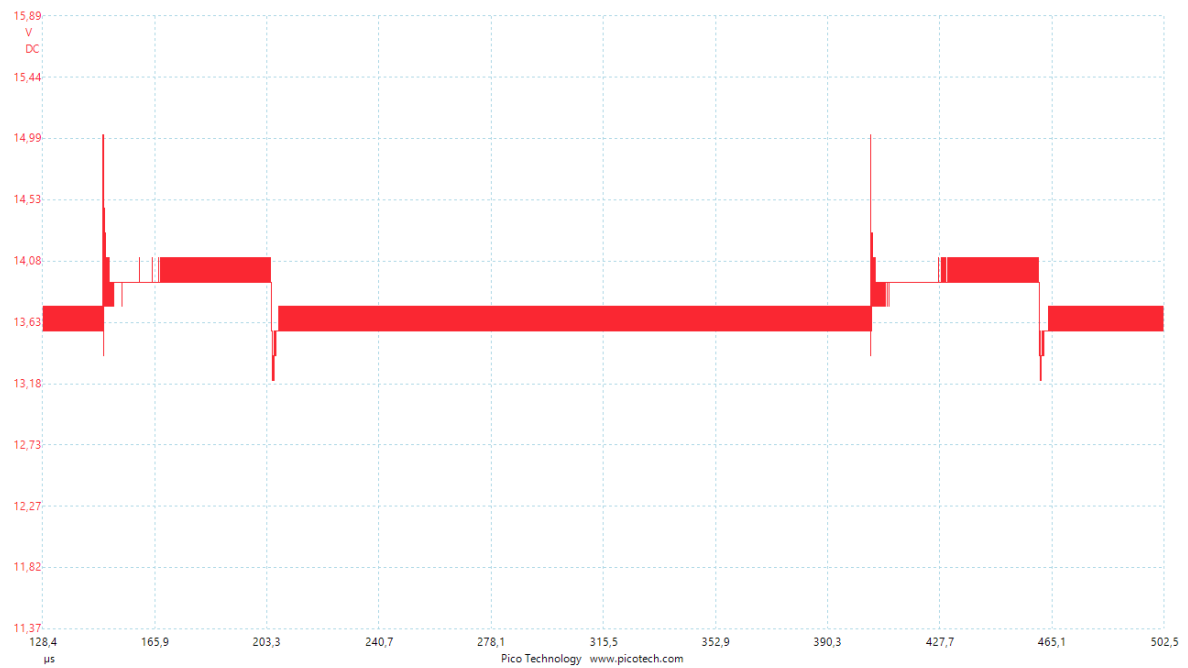
Ostilloskoobiga sai esmalt mõõdetud anduriväljundpinget enne pinge jagurit (kaks korda suurem tulem kui mikrokontrolleri poolt kasutatud). Tulem on näidatud joonisel 6.4. Nähtub, et anduri väljund on küllaltki suure signaalimüraga. Eriti problemaatilised on korduvad suure amplituudiga kuid kiiresti sumbuvad ostsillatsioonid. Ostsillatsioonid puuduvad, kui PWM-töötusüksel on kas 0% või 100% väärtusega – ilmselt tulenevad need MOSFET lülitustest. Mida suurem on voolutugevus mähises seada, seda suurem ka ostsillatsioonide maksimaalne amplituud – ilmselt on need seotud elektromagneti mähise siirdeprotsessiga.



Joonis 6.4 Halli tajuri väljundsignaal enne pingejagurit (elektromagneti mähise vool oli väärtusega 2A)  
Ostilloskoobiga sai mõõdetud ka pinge alalispinge madalama potentsiaali ning mähise kummalgil otsal oleva potentsiaali vahel. Tulem on näidatud joonistel 6.5 ja 6.6.



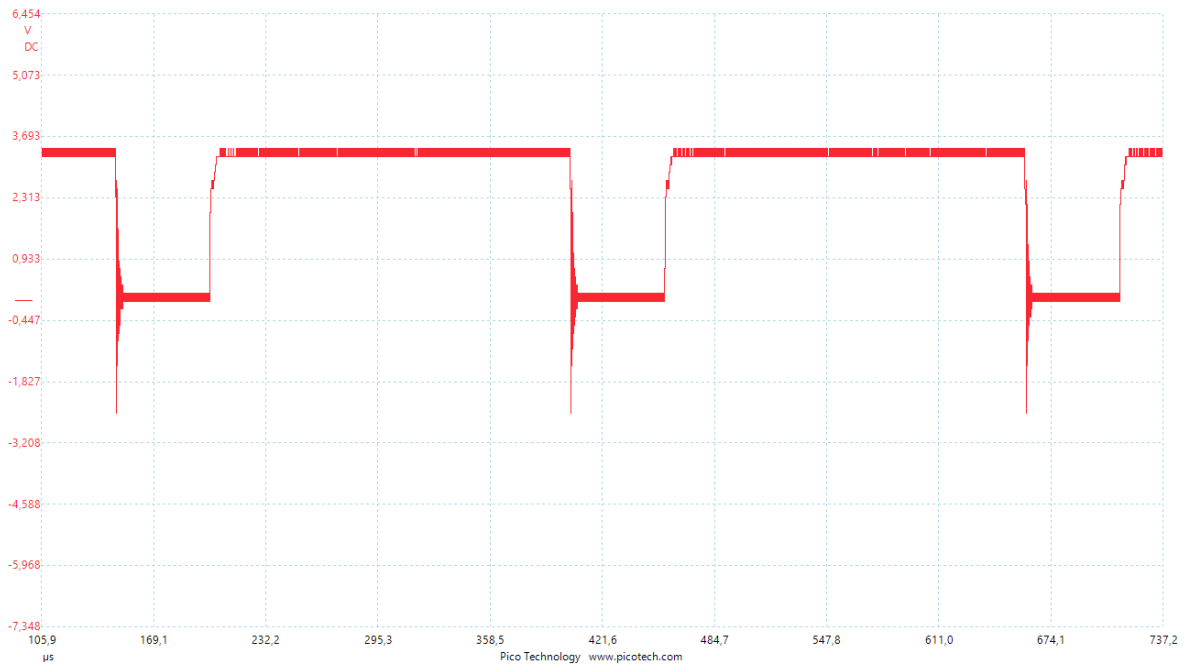
Joonis 6.5 Pingemuutus elektromagneti mähise madalama potentsiaaliga otsal (elektromagneti mähise vool oli väärtusega 2A)



Joonis 6.6 Pingemuutus elektromagneti mähise kõrgema potentsiaaliga otsal (elektromagneti mähise vool oli väärtusega 2A)

Eraldi sai mõõdetud ka pinget MOSFET paisul. Tulem on näidatud joonisel 6.7.





Joonis 6.7 Pinge MOSFET paisul (elektromagneti mähise vool oli väärtusega 2A)

Linearse pinge muutmisega sai mõõdetud ka anduri väljundpinge väärtused erinevate mähise voolude korral. Anduri andmelehe kohaselt sai mõõtetulemused teisendatud voltidest tesladesse. Teisenduse algoritm on näidatud valemiga 6.1. Mähise vool sai määratud kasutades multimeetrit (Velleman DVM1500), anduri väljundpinge sai määratud kasutades ostsilloskoopi. Tulemid on kujutatud tabelis 6.1. Saadud tulemusi on võrreldud COMSOL simulatsiooniga joonisel 6.8.

$$B = \frac{(U_{a0} - U_a)}{14} \quad (6.1)$$

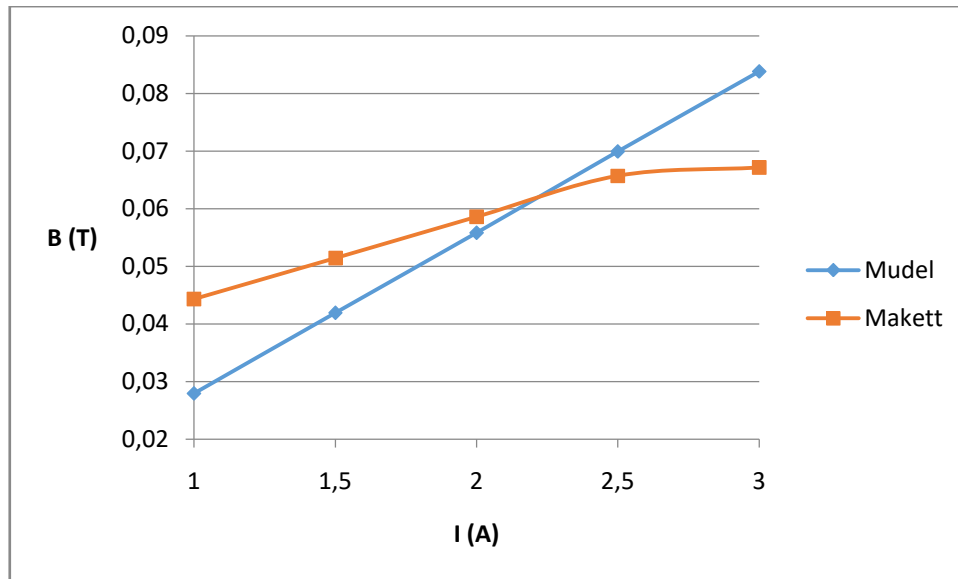
kus  $B$  – magnetvoo tihedus, T,

$U_{a0}$  – Anduri väljundpinge, kui magnetvoo tihedus puudub, V,

$U_a$  – Anduri väljundpinge, V.

Tabel 6.1 Anduri näidud erinevate voolu väärtuste korral

<b>Mähise vool I (A)</b>	1	1,5	2	2,5	3
<b>Mõõdetud anduri väljundpinge <math>U_a</math> (V)</b>	2,35	2,25	2,15	2,05	2,03
<b>Magnetvoo tihedus B (T)</b>	0,0443	0,0514	0,0586	0,0657	0,0671

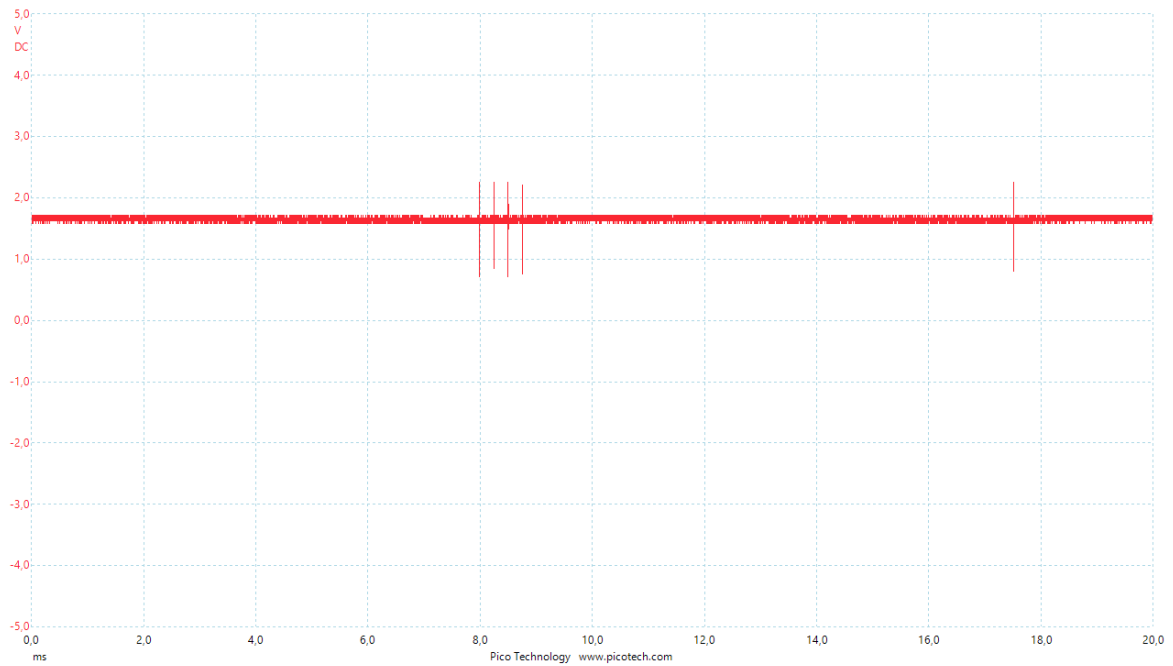


Joonis 6.8 Mõõtetulemuste võrdlus simulatsiooni tulemustega

Valemis 6.1 on näit magnetvälja olemasolul lahutatud näidust magnetvälja puudumisel, sest pinge suurenemisel anduri väljundpinge väheneb. Kui andur pöörata ümber horisontaalse telje  $180^\circ$ , siis muudaksid näidud valemis järjekorda. Konstant millega näitude vahet jagatakse on vastav seadme andmelehele tüüpilisele anduri väljundpingele arvestatuna voltides tesla kohta.

Jooniselt 6.8 nähtub kaks tõsiasja. Esmalt see, et läbi viidud tarkvaralise süsteemi simulatsiooni tulem on järsema tõusuga. See on tingitud ebatäpsustest simulatsiooni puhul. Ilmselt avaldas tulemustele suurimat mõju materjalide ja nende omaduste määramine. Teisalt on nähtav, et kasutatud anduri väljundpinge ei ole alates magnetvoo tihedusest 0,065 teslat enam lineaarselt kasvav. See on tingitud kasutatud andurist. Vastavalt kasutatud Halli tajuri andmelehele suudab see mõõta väljatugevust vähemalt vahemikus  $\pm 0,065$  teslat ning parimal juhul vahemikus  $\pm 0,1$  teslat – lineaarsus kaob kuna anduri mõõtepiirkond ei ületa ette nähtud miinimum vahemikku.

Programmeerides elektroonikaseadme uuesti ümber magnetlevitatsiooni teostamiseks sai uuesti mõõdetud anduri väljundpinget (kasutades ostsilloskoopi) ning mähise voolu (kasutades multimeetrit). Anduri väljundpinge mõõtmise tulem on näidatud joonisel 6.6. Nähtub, et kontrolleri tööpoolest hoiab ette nähtud anduri näitu. Kolme kuuli leviteerimisel on stabiilse levitatsiooni korral voolu suurus 2,5 A (mõõdetud multimeetriga).



Joonis 6.9 Anduri väljundpinge kolme magnetkuuli leviteerimisel

Stabiilset magnetlevitatsiooni on võimalik maketiga hoida ligikaudu 15 min. Seejärel kaotab süsteem stabiilsuse ning kuulid kukuvad maha. Ilmselt on selline seadme käitumine tingitud kuulide magneetumisest välise magnetvälja tõttu - magneetunud kuulidega jõudude tasakaalu punkt muutub ning seadistus sellega ei kohane.

## KOKKUVÕTE

Tööjärgu esimeseks tulemuseks oli tarkvarga AutoCAD loodud kolmemõõtmeline joonis maketi kandekonstruksioonist, elektromagnetist ja kuulist. Joonisest sai tehtud ka lihtsustatud versioon, milles jäeti kajastamata kandekonstruksioon, elektromagneti väheolulised detailid ja ka leviteeritav kuul.

Järgnevalt sai kavandatud õppemaketi elektriskeem. Sai kirjeldatud erinevate osade otstarvet ning sai määratud vajalikud parameetrid seadme püsitalituseks.

Elektriskeemile ja nõutud parameetritele vastavalt sai komplekteeritud elektroonikakomponendid ning kavandatud trükkplaat. Trükkplaat kavandati tarkvaraga Eagle.

Loodud kolmemõõtmelist lihtsustatud joonist sai kasutatud tarkvaras COMSOL Multiphysics. Joonise erinevatele osadele said omistatud materjalid. Said sisestatud vajalikud lähteandmed ja teostatud muud vajalikud seadistused, et läbiviia simulatsioonid erinevate kuuli kaugustega ning erinevate mähiste vooludega. Tulemused said esitatud tabelitena ning joonistena.

Simulatsioonide tulemusi sai täiendavalt analüüsitud tarkvaraga MATLAB. See tarkvara võimaldas numbriliselt lähendada lihtsustatud matemaatilised funktsioonid reaalsele mõõtetulemustele. Tulemiks oli lihtsustatud matemaatiline funktsioon kirjeldamiseks magnetvoo tihedust anduri ette nähtud asukohas ning lihtsustatud matemaatiline funktsioon kirjeldamiseks kuulile mõjuvat jõudu.

Kuna katsetused valminud õppemaketiga näitasid, et üksiku kuuliga stabiilse levitatsiooni saavutamine ei olnud teostatav, sai ka läbi viidud simulatsioon kolme rauast kuuli kasutamisega. Sai kajastatud tulemusi levitatsiooniks sobivate väärtustega. Lihtsustatud matemaatilisi funktsioone sellise lähenemise tarbeks ei leitud, kuna süsteem jäi esialgsele mudelile piisavalt sarnaseks ning töö valmimisele seatud ajalised piirangud ja prioriteedid seda ei võimaldanud.

Üksiku kuuliga tehtud simulatsioonidest saadud valemeid kasutades sai koostatud käsitletavat dünaamilist süsteemi iseloomustav matemaatiline võrrandisüsteem. Selle võrrandisüsteemi põhjal sai leitud olekuruumi põhine süsteemi esitus.

Koostatud olekuruumi põhise esituse alusel sai loodud tarkvara MATLAB Simulink keskkonnas plokkiskeem. Plokkiskeemi sai kasutatud, et kaalutleda erinevaid lahendusi stabiilse levitatsiooni saavutamiseks. Eelkõige lihtsa tarkvaralise implementeerimise ning hõlpsa manuaalse seadistuse huvides sai langetatud otsus PID-kontrolleri kasuks.

Maketi kavandamise viimaseks osaks sai tarkvara planeerimine. Ette nähtud programm seadistab mikrokontrolleri tööks vajalikult ning võimaldab reguleerida ette nähtud anduri näitu ja PID-

kontrolleri erinevate osade kordajaid. Millist seadistust seade parasjagu võimaldab näitab tarkvara valgusdiodidega.

Reaalne makett sai koostatud nii nagu kavandatud.

Esimese tulemusena selgus, et üksiku kuuliga ei saa stabiilset levitatsiooni demonstreerida – see kaldub horisontaalselt anduri alt. Et demonstreerida magnetlevitatsiooni üksiku kuuliga oleks pidanud seda kõrvalt toetama ning see ei olnud vastuvõetav. Olukorra lahendamiseks oli tarvilik viia kuuli raskuskeset madalamale, seda oli kõige hõlpsam teha kasutades täiendavaid kuule. Kasutades kolme kuuli ning manuaalselt seadistades ette nähtud anduri näitu ja PID-kontrolleri kordajaid sai stabiilne magnetlevitatsioon saavutatud – maketi töövõime oli tõestatud.

Stabiilset levitatsiooni suudab makett hoida ligikaudu 15 min. Pärast seda kaotab süsteem stabiilsuse ning kuulid kukuvad maha või tõmbuvad vastu magnetit. Seda tingib ilmselt kuulide magneetumine välise magnetvälja mõjul, mis muudab stabiilseks levitatsiooniks sobilikku anduri näitu ette antud mähise pinge kohta.

Viimaks teostati erinevaid mõõtmisi ning võrreldi reaalselt maketti kavandatuga.

## SUMMARY

The first result achieved was a three dimensional drawing created with the computer program Autocad. It depicted the bearing structure, the electromagnet and the levitated ball. A simplified version of the drawing was created as well. The simplified version did not include the bearing structure, less important details of the electromagnet and the levitated ball.

Following the completion of the drawing was the design of the electrical schematic for the study model. The purposes of different parts were discussed and necessary parameters for permanent operation were determined.

In accordance with the electrical schematic and determined parameters electronic components were selected and the design of the printed circuit board was created. The printed circuit board was designed with the computer program Eagle.

The simplified three dimensional drawing was used in the computer program COMSOL Multiphysics. Different materials were associated with different parts of the drawing. Various initial conditions were input and settings adjusted in order to perform simulations with different distances between the electromagnet and levitated ball as well as with different values for the current in the coil of the electromagnet. The results were shown using tables and graphs.

The results of the simulations were additionally analyzed using the computer program MATLAB. This software allowed to numerically approximate simplified mathematical functions to the measurements taken in the simulations. The results of this approach were simplified mathematical functions to describe the magnetic flux density at the intended place for the Hall effect sensor and for the electromagnetic force acting on the ball.

Since tests with the completed study model showed that levitating a single steel ball was not possible, additional simulations using three iron balls were done as well. The results were shown only for the case suited for levitation. Simplified mathematical functions were not approximated for this approach due to the similarity of the new system to the old and due to time constraints and priorities set to complete the work.

Using the approximated mathematical functions derived from the simulations with the single steel ball, a set of mathematical equations was created to describe the dynamics of the system at hand. Using this set of equations the system was described with state-space representation.

Using the created state-space representation in the MATLAB Simulink software, a block diagram was created. The block diagram was used to consider various solutions for achieving stable

levitation. Mainly due to simple software implementation and ease of manual tuning it was decided to use a PID-controller.

The last part by the design of the study model was the planning of the software. The intended program configures the initial settings of the microcontroller and allows to change the desired sensor input and the different multipliers of the PID-controller. The current mode of operation is shown with LED-s.

The real study model was constructed completely as designed.

As a first result, it became clear, that stable levitation could not be demonstrated when using a single steel ball – it would move horizontally away from the intended position underneath the Hall effect sensor. To demonstrate magnetic levitation with a single steel ball, it would have been necessary to unblock the sideways movement of the ball using some form of obstacle – this was not acceptable. In order to better the situation, it appeared necessary to lower the center of gravity for the levitated object. The handiest way of doing this was using three iron balls. Using three iron balls and manually tuning the desired sensor input and the multipliers of the PID-controller stable magnetic levitation was achieved – the study model was proven to be working.

The study model can sustain stable levitation for about 15 minutes. After that, the system loses stability and the iron balls drop down or get pulled against the magnet. This is probably due to the iron balls being magnetized by the external magnetic field – the magnetization changes the desired sensor input with respect to the desired voltage on the coil of the electromagnet.

Finally different measurements were conducted and the real study model was compared to the design.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Nathan Ida, *Engineering Electromagnetics Third Edition*, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [2] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, Pearson Education USA, 2009.
- [3] Robert S. Elliott, *Electromagnetics: History, Theory, and Applications*, Wiley-IEEE Press, 1993.
- [4] Willian G. Hurley, Werner H. Wölfle, „*Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System*”, *IEEE Transaction on education*, Vol. 40, No.2, mai 1997.
- [5] T. H. Wong, „*Design of a Magnetic Levitation Control System – An Undergraduate Project*”, *IEEE Transaction on education*, Vol. E-29, No. 4, november 1986.
- [6] Seltom, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.zeltom.com](http://www.zeltom.com). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [7] Autodesk, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.autodesk.eu](http://www.autodesk.eu). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [8] LibreCAD, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.librecad.org](http://www.librecad.org). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [9] Comsol, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.comsol.com](http://www.comsol.com). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [10] Mathworks, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [11] Microsoft, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.microsoft.com](http://www.microsoft.com). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [12] Microchip, koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.microchip.com](http://www.microchip.com). [Kasutatud 29. 12 .2019].
- [13] Academia, „*How To Write PID control algorithm using C language TipsWell (1)*” [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
[https://www.academia.edu/22900396/How\\_To\\_Write\\_PID\\_control\\_algorithm\\_using\\_C\\_language\\_TipsWell\\_1\\_](https://www.academia.edu/22900396/How_To_Write_PID_control_algorithm_using_C_language_TipsWell_1_). [Kasutatud 29.12.2019]



**LISAD**

### Lisa 1 Elektroonikaseadme ette nähtud komponentide spetsifikatsioon

Tähis joonisel	Nimetus; kirjeldus; tootjapoolne tootekood	Kogus (tk)
TR1	Transformaator; võrgupinge madaldamiseks, 230/12V, 3,3A; TS 40/023.	1
	Kaabliühendus; trafo ja elektromagneti mähise ühendamiseks trükkplaadiga; RND 205-00023.	2
SA1	Sildalaldi; vahelduvpinge alaldamiseks, 6A; KBPC610W.	1
C1, C2, C3, C4	Kondensaator; toitepinge silumiseks, 10mF, 25V; EEUHD1E103.	4
C5, C6	Kondensaator; pingeregulaatori (PR1) sisend- ja väljundpinge silumiseks, 1µF, 25V; RND 1501206B105K250N3.	2
C7, C8	Kondensaatori; pingeregulaatori (PR2) sisend- ja väljundpinge silumiseks, 10µF, 25V; RND 1501206X106K250N2.	2
	Kaabliühendus; halli tajuri ühendamiseks; RND 205-00024.	1
PR1	Pingeregulaator; Halli tajuri toitepingeks, maksimaalne sisendpinge 20V, väljundpinge 6,2V; UA78L06.	1
TA1	Halli tajur; toitepinge 2,7 kuni 6,7V, lineaarne; SS39ET.	1
R12, R13	Aktiivtakistid; sensori väljundpinge vähendamiseks, 2kΩ; RND 1551206S4F2001T5E.	2
PR2	Pingeregulaator; mikrokontrolleri toitepingeks, maksimaalne sisendpinge 20V, väljundpinge 3,3V; NCP1117ST33T3G.	1
MK1	Mikrokontroller; PIC18F45K20.	1
Q1	Kvartskristall; 16,0 MHz; KX-7T.	1
C9, C10	Kondensaator; kvartskristallile, 12 pF; GQM1885C1H120JB01D.	2
	Pistikühendus; 6 pin; BTWMH6.	1
LU1, LU2	Tumblerlülit; 100-SP1-T100B4M7GE.	2
POT1	Potentsiomeeter; 10kΩ; P160KN-0QC15B10K.	1
R7, R8, R9, R10, R11	Aktiivtakisti; Mikrokontrolleri sisendite kaitseks, 1kΩ; ERJP14F1001U.	5
C11	Kondensaator; potentsiomeetri väljundi ühenduseks, 680nF; RND 1500603B684K100NT.	1
MOS1	N-MOSFET; transistor elektromagneti pingele lülitamiseks; IRFU3704ZPBF.	1
D1, D2	Diiod; ahela kaitseks, maksimaalne vool 5A; S5J.	2
D3, D4	Diiod; elektromagneti pingele lülitusele järgnevale siirdeprotsessile; 1N5822.	2
LD1, LD2, LD3	Valgusdiiod; valgussignaali andmiseks, punane; 156120RS82500.	3
R1, R2, R3, R4, R5, R6	Aktiivtakisti; pingelangu vähendamiseks valgusdiiodil; CRS0603AFX-1000ELF.	6

## Lisa 2 Mikrokontrolleri tööprogramm

```
/*
 * File: LT_2.c
 * Author: andres
 *
 * Created on December 4, 2019, 7:14 PM
 */

// PIC18F45K20 Configuration Bit Settings

// 'C' source line config statements

// CONFIG1H
#pragma config FOSC = HSPLL // Oscillator Selection bits (HS oscillator, PLL enabled (Clock Frequency = 4 x FOSC1))
#pragma config FCMEN = OFF // Fail-Safe Clock Monitor Enable bit (Fail-Safe Clock Monitor disabled)
#pragma config IESO = OFF // Internal/External Oscillator Switchover bit (Oscillator Switchover mode disabled)

// CONFIG2L
#pragma config PWRT = OFF // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
#pragma config BOREN = SBORDIS // Brown-out Reset Enable bits (Brown-out Reset enabled in hardware only (SBOREN is disabled))
#pragma config BORV = 22 // Brown Out Reset Voltage bits (VBOR set to 2.2 V nominal)

// CONFIG2H
#pragma config WDTEN = OFF // Watchdog Timer Enable bit (WDT is controlled by SWDTEN bit of the WDTCON register)
#pragma config WDTPS = 32768 // Watchdog Timer Postscale Select bits (1:32768)

// CONFIG3H
#pragma config CCP2MX = PORTBE // CCP2 MUX bit (CCP2 input/output is multiplexed with RB3)
#pragma config PBADEN = OFF // PORTB A/D Enable bit (PORTB<4:0> pins are configured as digital I/O on Reset)
#pragma config LPT1OSC = OFF // Low-Power Timer1 Oscillator Enable bit (Timer1 configured for higher power operation)
#pragma config HFOFST = OFF // HFINTOSC Fast Start-up (The system clock is held off until the HFINTOSC is stable.)
#pragma config MCLRE = OFF // MCLR Pin Enable bit (RE3 input pin enabled; MCLR disabled)

// CONFIG4L
#pragma config STVREN = OFF // Stack Full/Underflow Reset Enable bit (Stack full/underflow will not cause Reset)
#pragma config LVP = OFF // Single-Supply ICSP Enable bit (Single-Supply ICSP disabled)
#pragma config XINST = ON // Extended Instruction Set Enable bit (Instruction set extension and Indexed Addressing mode enabled)
#pragma config XINST = OFF // Extended Instruction Set Enable bit (Instruction set extension and Indexed Addressing mode disabled (Legacy mode))

// CONFIG5L
#pragma config CP0 = OFF // Code Protection Block 0 (Block 0 (000800-001FFFh) not code-protected)
#pragma config CP1 = OFF // Code Protection Block 1 (Block 1 (002000-003FFFh) not code-protected)
#pragma config CP2 = OFF // Code Protection Block 2 (Block 2 (004000-005FFFh) not code-protected)
#pragma config CP3 = OFF // Code Protection Block 3 (Block 3 (006000-007FFFh) not code-protected)
```

```

// CONFIG5H
#pragma config CPB = OFF    // Boot Block Code Protection bit (Boot block (000000-0007FFh) not code-
protected)
#pragma config CPD = OFF    // Data EEPROM Code Protection bit (Data EEPROM not code-protected)

// CONFIG6L
#pragma config WRT0 = OFF    // Write Protection Block 0 (Block 0 (000800-001FFFh) not write-protected)
#pragma config WRT1 = OFF    // Write Protection Block 1 (Block 1 (002000-003FFFh) not write-protected)
#pragma config WRT2 = OFF    // Write Protection Block 2 (Block 2 (004000-005FFFh) not write-protected)
#pragma config WRT3 = OFF    // Write Protection Block 3 (Block 3 (006000-007FFFh) not write-protected)

// CONFIG6H
#pragma config WRTC = OFF    // Configuration Register Write Protection bit (Configuration registers
(300000-3000FFh) not write-protected)
#pragma config WRTB = OFF    // Boot Block Write Protection bit (Boot Block (000000-0007FFh) not write-
protected)
#pragma config WRTD = OFF    // Data EEPROM Write Protection bit (Data EEPROM not write-protected)

// CONFIG7L
#pragma config EBTR0 = OFF    // Table Read Protection Block 0 (Block 0 (000800-001FFFh) not protected
from table reads executed in other blocks)
#pragma config EBTR1 = OFF    // Table Read Protection Block 1 (Block 1 (002000-003FFFh) not protected
from table reads executed in other blocks)
#pragma config EBTR2 = OFF    // Table Read Protection Block 2 (Block 2 (004000-005FFFh) not protected
from table reads executed in other blocks)
#pragma config EBTR3 = OFF    // Table Read Protection Block 3 (Block 3 (006000-007FFFh) not protected
from table reads executed in other blocks)

// CONFIG7H
#pragma config EBTRB = OFF    // Boot Block Table Read Protection bit (Boot Block (000000-0007FFh) not
protected from table reads executed in other blocks)

// #pragma config statements should precede project file includes.
// Use project enums instead of #define for ON and OFF.

#include <xc.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

// #pragma config statements should precede project file includes.
// Use project enums instead of #define for ON and OFF.

unsigned int analoog (unsigned int analoog_register);
void PWMuus (unsigned int UusPWM);
double kesk moot (void);
double uusEq (double);

void main()
{
    //Jalgade seadistamine sisenditeks ja väljunditeks.
    TRISA = 0b11111111;
    TRISB = 0b00000000;
    TRISC = 0b11111011;
    TRISD = 0b00000000;
    TRISE = 0b00000111;

```

```

//Jalgade seadistamine analoog sisenditeks ja väljunditeks.
ANSEL = 0b10000001;
ANSELH = 0b00000000;

//Analoog-digitaalmuunduri seadistamine.
ADCON0 = 0b00011101;
ADCON1 = 0b00000000;
ADCON2 = 0b00001001;

//Jalgade seadistamine PWM-väljundi tarbeks.
PSTRCON = 0b00010001;

//PWM-väljundi seadistamine.
PR2 = 0b11111111;
CCP1CON = 0b00001100;
CCPR1L = 0b00000000;

PIR1bits.TMR2IF = 0;
T2CON = 0b00000111;
while(PIR1bits.TMR2IF == 0);

//Muutujad PID kontrolleri jaoks.
double Kp = 500; //Proportsionaalse osa kordaja (konstantne).
double Ki = 50; //Integraalse osa kordaja (konstantne).
double Kd = 5; //Diferentsiaalse osa kordaja (konstantne).

double Integraal = 0; //Muutuja integraali töötlemiseks.
double dt = 0.00114; //Muutuja programmi ühekordsele läbimisele kuluva aja esitamiseks.

double Diferentsiaal = 0; //Muutuja määratud vea ja eelmise määratud vea vahe salvestamiseks.

double PID; //Muutuja PID-kontrolleri tagasiside salvestamiseks.

//Muutujad anduri näidu töötlemiseks.
double Sens; //Muutuja anduri näidu salvestamiseks.
double Viga; //Muutuja anduri näidu ja soovitud näidu vahe salvestamiseks.
double VigaEel = 0; //Muutuja eelmise määratud anduri näidu ja soovitud näidu vahe salvestamiseks.
double Soov = 312; //Soovitud anduri näit (1V ((1/3,28)*1023)).
double Soov2 = 0; //Muutuja soovitud anduri näidu muutmiseks.

//Muutujad pinget käsitlemiseks.
unsigned int Uuus; //Muutuja uue pinget valimiseks.
double Utaga; //Muutuja tagasiside arvestamiseks.
double Ual = 666; //Lähtepinge ((7.8/12)*1023).

//Lõputu tsükkel.
while(1)
{
//Lülit 1 väljas; lülit 2 sees: põhi programm.
if(PORTCbits.RC5 == 0 && PORTCbits.RC6 == 1)
{
LATD = 0b00010000; //LED sisse.

//Sensori sisendi salvestamine ja vea leidmine.
Sens = keskmoot();
Soov2 = uusEq(Soov);
Viga = Soov2 - Sens;
}
}

```

```

//Integraali määramine.
if(Integraal <= -100 && Viga < 0)
{
    Integraal = -100;
}
else if(Integraal >= 100 && Viga > 0)
{
    Integraal = 100;
}
else if (Viga < 200 && Viga > -200)
{
    Integraal = Integraal;
}
else
{
    Integraal = Integraal + Viga*dt;
}

//Diferentsiaali määramine ja salvestatud vea uuendamine
Diferentsiaal = (Viga - VigaEel)/dt;
if(Diferentsiaal < 12500 && Diferentsiaal > -12500)
{
    Diferentsiaal = 0;
}
else if(Diferentsiaal > 50000)
{
    Diferentsiaal = 0;
}
else if(Diferentsiaal < -50000)
{
    Diferentsiaal = 0;
}

VigaEel = Viga;

//PID tagasiside arvutamine.
PID = Viga*Kp + Integraal*Ki + Diferentsiaal*Kd;

//Tagasiside arvestamine.
if(Ual - PID < 0)
{
    Utaga = 0;
}
else if(Ual - PID > 1023)
{
    Utaga = 1023;
}
else
{
    Utaga = Ual - PID;
}

//Uue väljundpinge seadistamine.
Uuus = (unsigned int)Utaga;
PWMMuus(Uuus);
}

```

```

//Lülit 1 sees; lülit 2 sees: võimaldatud proportsionaalse kordaja muutmine.
else if(PORTCbits.RC5 == 1 && PORTCbits.RC6 == 1)
{
    LATD = 0b00100000; //LED sisse.

    //Sensori sisendi salvestamine ja vea leidmine.
    Sens = keskmoot();
    Viga = Soov2 - Sens;

    //Kordaja Kpp määramine.
    Kp = analoog(0b00011101);
    Kp = 5*Kp;

    //Integraali määramine.
    if(Integraal <= -100 && Viga < 0)
    {
        Integraal = -100;
    }
    else if(Integraal >= 100 && Viga > 0)
    {
        Integraal = 100;
    }
    else if (Viga < 200 && Viga > -200)
    {
        Integraal = Integraal;
    }
    else
    {
        Integraal = Integraal + Viga*dt;
    }

    //Diferentsiaali määramine ja salvestatud vea uuendamine
    Diferentsiaal = (Viga - VigaEel)/dt;
    if(Diferentsiaal < 12500 && Diferentsiaal > -12500)
    {
        Diferentsiaal = 0;
    }
    else if(Diferentsiaal > 50000)
    {
        Diferentsiaal = 0;
    }
    else if(Diferentsiaal < -50000)
    {
        Diferentsiaal = 0;
    }
    VigaEel = Viga;

    //PID tagasiside arvutamine.
    PID = Viga*Kp + Integraal*Ki + Diferentsiaal*Kd;

    //Tagasiside arvestamine.
    if(Ual - PID < 0)
    {
        Utaga = 0;
    }
    else if(Ual - PID > 1023)
    {

```

```

    Utaga = 1023;
}
else
{
    Utaga = Ual - PID;
}

//Uue väljundpinge seadistamine.
Uuus = (unsigned int)Utaga;
PWMMuus(Uuus);
}
//Lülit 1 sees; lülit 2 väljas: võimaldatud integraalse kordaja muutmine (kasutusse jääb muudetud
proportsionaalne kordaja).
else if(PORTCbits.RC5 == 1 && PORTCbits.RC6 == 0)
{
    LATD = 0b01000000; //LED sisse.

    //Kordaja Kii määramine.
    Ki = analoog(0b00011101);
    Ki = 0.01*Ki;

    //Sensori sisendi salvestamine ja vea leidmine.
    Sens = keskmoot();
    Viga = Soov2 - Sens;

    //Integraali määramine.
    if(Integraal <= -100 && Viga < 0)
    {
        Integraal = -100;
    }
    else if(Integraal >= 100 && Viga > 0)
    {
        Integraal = 100;
    }
    else if (Viga < 200 && Viga > -200)
    {
        Integraal = Integraal;
    }
    else
    {
        Integraal = Integraal + Viga*dt;
    }

    //Diferentsiaali määramine ja salvestatud vea uuendamine
    Diferentsiaal = (Viga - VigaEel)/dt;
    if(Diferentsiaal < 12500 && Diferentsiaal > -12500)
    {
        Diferentsiaal = 0;
    }
    else if(Diferentsiaal > 50000)
    {
        Diferentsiaal = 0;
    }
    else if(Diferentsiaal < -50000)
    {
        Diferentsiaal = 0;
    }
}

```



```

VigaEel = Viga;

//PID tagasiside arvutamine.
PID = Viga*Kp + Integraal*Ki + Diferentsiaal*Kd;

//Tagasiside arvestamine.
if(Ual - PID < 0)
{
    Utaga = 0;
}
else if(Ual - PID > 1023)
{
    Utaga = 1023;
}
else
{
    Utaga = Ual - PID;
}

//Uue väljundpinge seadistamine.
Uuus = (unsigned int)Utaga;
PWMMuus(Uuus);
}
else
{
    //Lülit 1 väljas; lülit 2 väljas: võimaldatud diferentsiaalse kordaja muutmine (kasutusse jäävad
    muudetud proportsionaalne ja integraalne kordaja).
    LATD = 0b01110000; //LED sisse.

    //Kordaja Kdd määramine.
    Kd = analoog(0b00011101);
    Kd = 0.01*Kd;

    //Sensori sisendi salvestamine ja vea leidmine.
    Sens = keskmoot();
    Viga = Soov2 - Sens;

    //Integraali määramine.
    if(Integraal <= -100 && Viga < 0)
    {
        Integraal = -100;
    }
    else if(Integraal >= 100 && Viga > 0)
    {
        Integraal = 100;
    }
    else if (Viga < 200 && Viga > -200)
    {
        Integraal = Integraal;
    }
    else
    {
        Integraal = Integraal + Viga*dt;
    }

    //Diferentsiaali määramine ja salvestatud vea uuendamine
    Diferentsiaal = (Viga - VigaEel)/dt;

```

```

if(Diferentsiaal < 12500 && Diferentsiaal > -12500)
{
    Diferentsiaal = 0;
}
else if(Diferentsiaal > 50000)
{
    Diferentsiaal = 0;
}
else if(Diferentsiaal < -50000)
{
    Diferentsiaal = 0;
}
VigaEel = Viga;

//PID tagasiside arvutamine.
PID = Viga*Kp + Integraal*Ki + Diferentsiaal*Kd;

//Tagasiside arvestamine.
if(Ual - PID < 0)
{
    Utaga = 0;
}
else if(Ual - PID > 1023)
{
    Utaga = 1023;
}
else
{
    Utaga = Ual - PID;
}

//Uue väljundpinge seadistamine.
Uuus = (unsigned int)Utaga;
PWMuus(Uuus);
}
}
}

unsigned int analoog (unsigned int analoog_register)
{
    //Analoogsisendi lugemine 10bit.
    unsigned int a;
    unsigned int b;
    unsigned int analoog_sisend;

    ADCON0 = analoog_register;
    ADON = 1;
    GO = 1;
    while(GO);
    a = ADRESH;
    b = ADRESL;
    ADON = 0;
    analoog_sisend = (a << 2) | (b >> 6);

    return analoog_sisend;
}

```

```

void PWMuus (unsigned int UusPWM)
{
    //Muudab PWM tööperioodi väärtuse.
    unsigned int a;

    a = UusPWM & 0b1;
    CCP1CONbits.DC1B0 = a;
    a = (UusPWM & 0b10) >> 1;
    CCP1CONbits.DC1B1 = a;
    a = UusPWM >> 2;
    CCPR1L = a;

    return;
}

double keskmoot (void)
{
    //keskmise mõõtetulemuse leidmine 100 mõõtmise kohta.
    unsigned int i;
    double a = 0;
    double b = 0;
    double keskmine;

    for(i = 0; i <= 20; i++)
    {
        a = analoog(0b00000001);
        if(a < 468) //Piiratud 1,5 V näiduga - kõrgem pinget tähendab valet pidi pinget mähise lülitusel.
        {
            b = b + a;
        }
        else
        {
            i = i + 1;
        }
    }
    keskmine = b / 20;

    return keskmine;
}

double uusEq (double Soov)
{
    //uue tasakaalu punkti leidmine.
    double moot;
    double Eq;

    moot = analoog(0b00011101);

    Eq = Soov - 40 + 0.08*moot;

    return Eq;
}

```