

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

ATV80LT

Rait Udumäe

**ELEKTROONIKA TRÜKKPLAATIDE
ELEKTROMAGNETLÄHIVÄLJADE
SKANEERIMISSEADE**

Magistritöö

Instituudi direktor	prof. Ivo Palu
Juhendaja	teadur Heigo Mölder
Konsultant	nooremteadur Marek Jakovoi
Lõpetaja	Rait Udumäe

Tallinn 2017

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Rait Udumäe, 121775AAAM
Õppekava, peeriala: AAAM02/09 - Elektriajamid ja jõuelektroonika
Juhendaja: teadur, Heigo Mölder
Konsultandid: nooremteadur, Marek Jarkovoi

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Elektroonika trükkplaatide elektromagnetlähiväljade skaneerimisseade
(inglise keeles) Electromagnetic near field scanner for printed circuit boards

Lõputöö põhieesmärgid ja lahendatavad ülesanded ning töö koostamise kava:

Eesmärk: Uurimistöö eesmärgiks on töötada välja kontsepsioon ristkordinaatteljestiku x,y,z põhimõttel oleva programmjuhtimisega seadme (CNC) jaoks, mis võimaldab mõõta elektroonika trükkplaatide elektromagnetvälja kahe - ja kolmemõõtmeliselt. Tegemist oleks CNC põhimõttel töötava seadmega, millele on paigaldatud lähiväljaproovik, mis võimaldab kuvada arvuti ekraanil kahe - ja kolmemõõtmelise väljatugevuse pildi trükkplaadist.

1. Seadme vajadus, põhjendus
2. Patendiotsing (<http://worldwide.espacenet.com/>)
3. Tarkvarade ülevaade
4. Ülevaade EMÜ standardi nõuetest
5. Projekteerimine, arvutuslik osa
6. Katsetamine
7. Kokkuvõtte
8. Kasutatud kirjandus

Täiendav info ja nõuded: Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilase ühilduvuse labor .

Töö keel: eesti

Üliõpilane: Rait Udumäe “.....“201....a
/allkiri/

Juhendaja: Heigo Mölder “.....“201....a
/allkiri/

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 25.05.2017.a.

..... Rait Udumäe

ATV80LT

Elektroonika trükkplaatide elektromagnetlähiväljade skaneerimisseade

Rait Udumäe, üliõpilaskood 121775AAAM, mai 2017. – 65 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituud

Töö juhendaja: teadur Heigo Mölder

Töö konsultant: nooremteadur Marek Jarkovoi

Võtmesõnad: elektromagnetiline ühilduvus, programmjuhtimine, elektromagnet lähivälja mõõtmine

Referaat:

Lõputöö on 65 lehel, sisaldab 17 tabelit ja 31 joonist.

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada elektromagnet lähivälja automaatne mõõteseade.

Elektromagnetiline ühilduvus on elektriseadme või -paigaldise võime toimida rahuldavalt elektromagnetilises keskkonnas, tekitamata vastuvõetamatuid elektromagnetilisi häireid teistele selles keskkonnas asuvatele seadmetele. Selleks, et erinevate ettevõtete poolt valmistatavad/arendatavad seadmed toimiksid rahuldavalt, on kehtestatud terve rida elektromagnetilase ühilduvuse standardeid.

Juhul kui mõne elektroonika trükkplaadi poolt tekitatav emissiooni piirnorm on ületatud, on vaja hakata trükkplaadi komponente detailsemalt uurima, et mis piirkond või milline element täpsemalt on probleemi allikas.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse laboris ilmnes vajadus elektromagnet lähivälja mõõteseadme järele. Kuna olemasolev GTEM 750 ristlainejuhtkamber ei võimalda tuvastada täpset häiringu asukohta. Uurimistöö eesmärgiks on töötada välja kontseptsioon ristkoordinaatteljestiku x, y, z põhimõttel oleva programmjuhtimisega seadme (edaspidi nimetatud CNC) jaoks, mis võimaldab mõõta elektroonika trükkplaatide elektromagnetvälja kahe - ja kolmemõõtmeliselt. Tegemist oleks CNC põhimõttel töötava seadmega, millele on paigaldatud lähiväljaproovik, mis võimaldab kuvada arvutiekraanil kahe - ja kolmemõõtmelise väljatugevuse pildi trükkplaadist.

ATV80LT

Устройство сканирования электромагнитных полей электронных печатных плат

Райт Удумяэ, студенческий код 121775АААМ, май 2017 г. – 65 стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт электроэнергетики и мехатроники

Руководитель работы: научный сотрудник Хейго Мёльдер

Консультант работы: младший научный сотрудник Марек Ярковой

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, программное управление, измерение ближнего электромагнитного поля

Реферат: В заключительной работе 65 лист, работа содержит 17 таблиц и 31 чертёж.

Целью заключительной работы является разработка автоматического измерительного устройства ближнего электромагнитного поля.

Электромагнитная совместимость – это способность электрического устройства или установки функционировать удовлетворительно в электромагнитной среде, не создавая неприемлемых электромагнитных помех другим находящимся в данной среде устройствам. Для того чтобы изготавливаемые/разрабатываемые другими предприятиями устройства работали удовлетворительно, установлен целый ряд стандартов электромагнитной совместимости.

В случае если предельная норма создаваемой некой электронной печатной платой эмиссии превышена, необходимо начать более детальное исследование компонентов печатной платы, чтобы точнее определить, какой участок или какой элемент является источником проблемы. В лаборатории электромагнитной совместимости института электроэнергетики и мехатроники Таллиннского технического университета возникла необходимость в измерителе ближнего электромагнитного поля, поскольку существующая камера поперечной электромагнитной волны GTEM 750 не позволяет точно установить место нахождения помехи. Цель исследовательской работы – выработать концепцию для работающего на принципе сетки прямоугольных координат x , y , z устройства с программным управлением (в дальнейшем именуемого ЧПУ), которое позволит измерять электромагнитные поля электронных печатных плат в двух и трёх измерениях. Речь идёт о работающем на принципе ЧПУ устройстве, на которое установлен датчик ближнего поля, позволяющий отобразить на экране компьютера картинку двух- и трёхмерной силы поля печатной платы.

ATV80LT

Electromagnetic Near Field Scanner for Printed Circuit Boards

Rait Udumäe, student code 121775AAAM, May 2017. – 65 lk.

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institute of Electroenergetics and Mechatronics

Supervisor: Heigo Mölder

Consultant: Marek Jarkovoi

Key words: electromagnetical compatibility, program-operating, measurement of the electromagnetical near field

Summary:

Thesis has 65 pages, includes 17 charts and 31 diagrams.

The aim of the thesis is to develop an automated measurement device (scanner) for the electromagnetical near field.

Electromagnetic compatibility is the ability of an electrical device or an electrical installation

to work satisfactorily in an electromagnetical environment without causing electromagnetical disturbances to other devices which are in the same environment. A lot of electromagnetical compatibility standards have been stated for that purpose.

If a circuit board has crossed its electronical emission limit, there is a need to inspect the details of the circuit board to clarify which area or element is the source of the problem.

There was a need for an electromagnetical near field measuring device in the electroenergetic and mechatronical institute of Tallinn University of Technology, because the GTEM 750 magnetical field analyze chamber could not identify the exact location of the problem.

The aim of the thesis is to develop a concept for a program-operated device (hereafter referred to as CNC) which would work on a principle of x, y, z axis and that would measure the electromagnetical fields of the circuit boards two- and three-dimensionally. It would be a device working on CNC principles, that has a near field probe and that could display a two- and three-dimensional field intensity picture of the circuit board to the computer screen.

SISUKORD

Eessõna.....	9
Sissejuhatus	10
1. Elektromagnetilise lähivälja mõtteseadmete vajadus ja ülevaade.....	11
1.1. Ettevõtte Peritec.....	13
1.2. Nanyangi Tehnikaülikool	14
1.3. Ettevõtte Speag	15
1.4. Seadmete võrdluse kokkuvõte	16
2. Patendiotsing	17
2.1 Otsingusõnad ja tulemite hulk.....	17
2.2 Patent 1	17
2.3 Patent 2.....	18
3. Ülevaade elektromagnetilise ühilduvuse standardi nõuetest.....	20
4. Prooviku tööpõhimõtte ja katseprooviku kirjeldus	22
4.1 Prooviku tööpõhimõtte	22
4.2 Katseprooviku kirjeldus	23
4.3 Mõõtepooli elektromagnetilise induktsiooni tööpõhimõtte kirjeldus	26
5. Elektromagnetväljade arvutuste põhivõrrandid	27
6. Lõplike elementide meetod	28
7. Kolmemõõtmelised väljaarvutused lõplike elementide meetodil	29
8. Modelleerimine COMSOL Multiphysics tarkvaras	31
9. CNC masina konstruktsioon ja komponendid.....	39
10. Prototüüpseadme juhttarkvara kirjeldus.....	41
11. Elektromagnetilise lähivälja mõõtmiskatsed laboritingimustes	45
12.1. Elektromagnetlähivälja katsemõõtmiste kirjeldus	45
12.2. Katses kasutatud seadmed:	45

12.3. Elektromagnetilise lähivälja mõõtmiskatsed laboris.....	48
12. Tuleviku Arendustegevused.....	57
Kokkuvõte	62
Kasutatud kirjanduse loetelu	64

EESSÕNA

Lõputöö ülesande pakkus välja juhendaja Heigo Mõlder. Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse laboris ilmnes vajadus elektromagnet lähivälja mõõteseadme järele. Laboris on olemas GTEM 750 ristlainejuhtkamber, mis on mõeldud väiksemate objektide standardi IEC/EN 61000-4-20 kohaseks elektromagnetväljade mõõtmiseks, kuid puudub mõõteseade edasiseks täpseks analüüsiks tuvastamaks häiringuallikaid. Lõputöö eesmärgiks oli elektromagnetilise lähivälja mõõteseadme kontseptsiooni loomine elektromagnetilise ühilduvuse labori tarbeks.

Autor soovib tänada juhendajat Heigo Mõlderit ja Marek Jarkovoi abi eest töö valmimisel.

SISSEJUHATUS

Elektromagnetiline ühilduvus on elektriseadme või -paigaldise võime toimida rahuldavalt elektromagnetilises keskkonnas, tekitamata vastuvõetamatuid elektromagnetilisi häireid teistele selles keskkonnas asuvatele seadmetele. Selleks, et erinevate ettevõtete poolt valmistatavad/arendatavad seadmed toimiksid rahuldavalt, on kehtestatud terve rida elektromagnetilase ühilduvuse standardeid.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse laboris on olemas GTEM 750 ristlainejuhtkamber, mis on mõeldud väiksemate objektide standardi IEC/EN 61000-4-20 kohaseks elektromagnetväljade mõõtmiseks. Antud kamber lubab seadme poolt tekitatavaid elektromagnetvälju uurida küll standardis kehtestatud piirnormidest tulenevalt, ent ei võimalda detailsemat analüüsi juhul, kui mõni piirnorm on ületatud.

Juhul kui mõne elektroonika trükkplaadi poolt tekitatav emissiooni piirnorm on ületatud, on vaja hakata probleemi allikat täpsustama, uurides detailsemalt trükkplaadi komponente. Selleks kasutatakse enamasti lähiväljaproovikuid, mida hoitakse mõõtmishetkel käes ja mis seetõttu annavad suhteliselt ebamäärase tulemuse. Sellise käeshoitava väljaproovikuga ebamäärane mõõtmine ei võimalda fikseerida prooviku ja trükkplaadi vahelist kaugust, mistõttu muutub ka mõõdetava väljatugevuse suurus. Probleemse piirkonna/komponendi leidmine on ajamahukas ning tülikas ja peale paranduste tegemist ei ole lihtne aru saada, kas midagi muutus. Hetkel kasutuses olev lahendus püsib elektroonika trükkplaatide parandamist ja arendamist elektromagnetilise ühilduvuse seisukohast lähtuvalt.

Uurimistöö eesmärgiks on töötada välja kontseptsioon ristkoordinaatteljestiku x , y , z põhimõttel oleva programmjuhtimisega seadme (edaspidi nimetatud CNC) jaoks, mis võimaldab mõõta elektroonika trükkplaatide elektromagnetvälja kahe - ja kolmemõõtmeliselt. Tegemist oleks CNC põhimõttel töötava seadmega, millele on paigaldatud lähiväljaproovik, mis võimaldab kuvada arvutiekraanil kahe - ja kolmemõõtmelise väljatugevuse pildi trükkplaadist.

1. ELEKTROMAGNETILISE LÄHIVÄLJA MÕÖTESEADMETE VAJADUS JA ÜLEVAADE

More-Moore¹ ja More-than-Moore² koostamistehnoloogiad "tarkade" madalavõimsuslike süsteemide juures muudavad komponente pidevalt väiksemaks, hõlmates sealjuures laiemat valikut eritüübilisi funktsioone lühemate lülitusaegadega ja seega ka väiksema voolutarbega. Samaaegselt väheneb ka müra-signaali suhe, mis teeb iga uue põlvkonna seadmed tundlikumaks. Elektroonikaseadmete arendajatele tähendab see probleemide suurenemist elektromagnetmüra haldamisel.

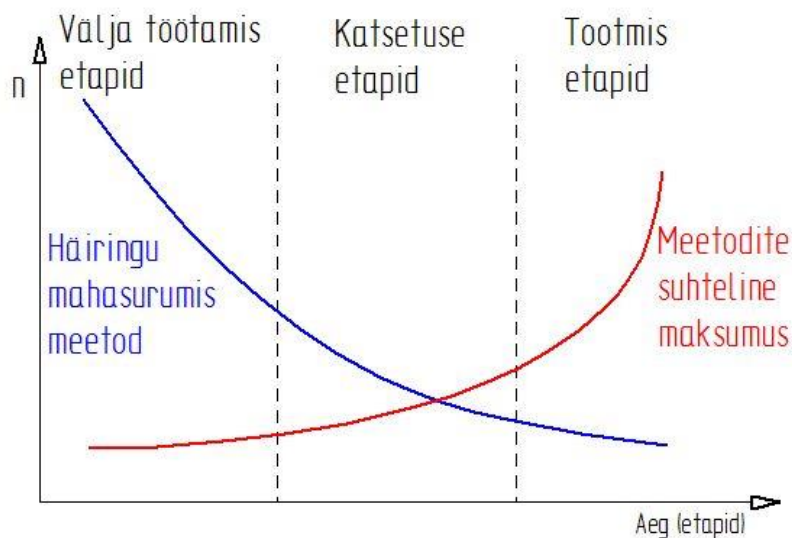
Kaitset müra eest ei vaja mitte vaid arendatav seade üldiselt, vaid tuleb võtta arvesse kõigi trükkplaadil olevate komponentide nõudmisi. Need piiripealsed tingimused sunnivad pöörama tähelepanu parasiitmõjudele kogu süsteemi väljatöötamise juures, et tagada töökindel disain. Kasutades sobivaid EDA (*electronics design automation*) tööriistu ja simulaatoreid, on võimalik analüüsida paljusid kiirgust mõjutavaid parameetreid juba disainifaasis. Paraku ei taga see piisavat kindlust, kuna mõõtude suhe suurimate suuruste (trükkplaat) ja väiksemate komponentide (kiibisiseseid ühendustraadid) vahel võivad erineda mitme suurusjärgu võrra, mis omakorda teeb 3D-joonised ja seega ka simulatsioonid väga keerukaks. Hoolimata sellest, et kiirguskarakteristikud on otseselt seotud kiibisiseste lülituste ning geomeetrilise struktuuriga, ei ole signaalide tugevus ja täpsed omadused alati teada ning seega tuleb teha simulatsioonide tegemisel eeldusi.

¹ More-Moore – tehnoloogia, mis käib kaasas Moore'i seadusega. Pooljuhtide väiksemaks ja efektiivsemaks muutumisega luuakse ka võrdeliselt keerukamaid seadmeid.

² More-than-Moore – lisaks üldisele pooljuhtide suuruse ja energiatarbe vähenemisest tulenevale arengule kasutatakse ka muid tehnoloogiauuendusi nii digitaal- kui ka analoogelektroonikas uute ja rohkemate funktsioonidega seadmete loomisel.

Lähivälja mõõtmise tehnoloogiad aitavad nõrga elektri- ja magnetvälja kõrgel resolutsioonil (kuni 10 μm) kaardistamisega seda probleemi vähendada. Mõõtmistulemused aitavad eristada ja tuvastada erinevaid potentsiaalseid elektromagnetilisi häireid (*electromagnetic interference* edaspidi nimetatud EMI) ja allikaid töötavas süsteemis. Lähivälja mõõtmine lubab lisaks müraallika positsiooni määramisele uurida ka müraspektrit. Mitmekülgsus, mida see mõõtmine pakub, aitab juba disaini varajastes järkudes tuvastada ning parandada põhimõttelisi vigu. Just nende vigade parandamine ja vältimine varajases väljatöötamis etapis säästab väga palju aega ja raha, sest vigade parandamine enne tootmis tsükli algust võib kujuneda pea võimatuks või väga kulukaks protsessiks. Graafiline selgitus joonisel 1.

Lisaks elektromagnetilise sobivuse analüüsimisele lubab lähivälja laiaulatuslikkus ning tundlikkus teha mõõtmisi ka kõrgete turvanõuetega valdkondades, näiteks kiipkaartide arenduses. See on uus ja paljutöötav valdkond, mis vajab just sellist mõõtesüsteemi. Lähivälja mõõtmised aitavad leida nõrkusi turvasüsteemides ning ka meetmeid nende ärakasutamise vastu. [1]



Joonis 1. Häiringute likvideerimismaksumus tootmisprotsessi järkudes [2]

Alljärgnevalt on toodud välja mõned lähivälja mõõtesedmed omas valdkonnas tunnustatud ettevõtetelt ja ülikoolidelt.

1.1. Ettevõtte Peritec

Jaapani ettevõtte Peritec on loonud lähivälja mõteseadme EMI Tester EMV-100. Seadme spetsifikatsiooni alusel võib järeldada, et seade on suuteline kuvama korrektset kõrgresolutsioonilist ja kvaliteetset lähiväljapilti. Seade on mõeldud mõõtma magnetlähivälja ja selleks kasutatakse lähiväljaproovikut W07/F97. Seadme raam on projekteeritud Hiwini juhikutele ja kuulkruvi kuile, mis tagavad võimalikult väiksed vead mehaanikasüsteemis, võimaldades mõõtetäpsust ± 0.05 mm. Kvaliteetsed mehaanikakomponendid ja kasutatav „Rohde and Schwarz“ spektroanalüsaator muudavad seadme hinna kalliks. Seadme hind ilma „Rohde and Schwarz“ spektroanalüsaatorita on 42500 eurot, lisaks impordiga seonduvad maksud.



Joonis 2. Jaapani ettevõtte PERITEC seade EMI Tester EMV-100

Seadme EMI Tester EMV-100, vt Joonis 2, spetsifikatsioon [3]:

- mõõteala x-170 mm y-170 mm z-100 mm;
- telgede täpsus ± 0.05 mm;
- tarkvara Firma siseselt loodud programm EMVm1;
- lähivälja proovik W07/F97;
- komplektis olev eelvõimendi AFS4-00100600-13-10P-4 (100 MHz~6 GHz, NF=2.5 dB, GAIN=36 dB);
- masin on suuteline looma nii 2D kui ka 3D graafikuid magnetväljast. [3]

1.2. Nanyangi Tehnikaülikool

Singapuris asuvas Nanyangi Tehnikaülikooli elektromagnetilise ühilduvuse laboratooriumis *Electromagnetic Effects Research Laboratory* on loodud ainuükselmaarilise lähivälja mõõteseadade Langer IC Scanner Fs 103, vt Joonis 3. [4]

Seade loodi vajadusest teostada detailsemat analüüsi uuritavaile seadmetele juhul kui on ületatud mõni standardis kehtestatud elektromagnetvälja piirnormidest.



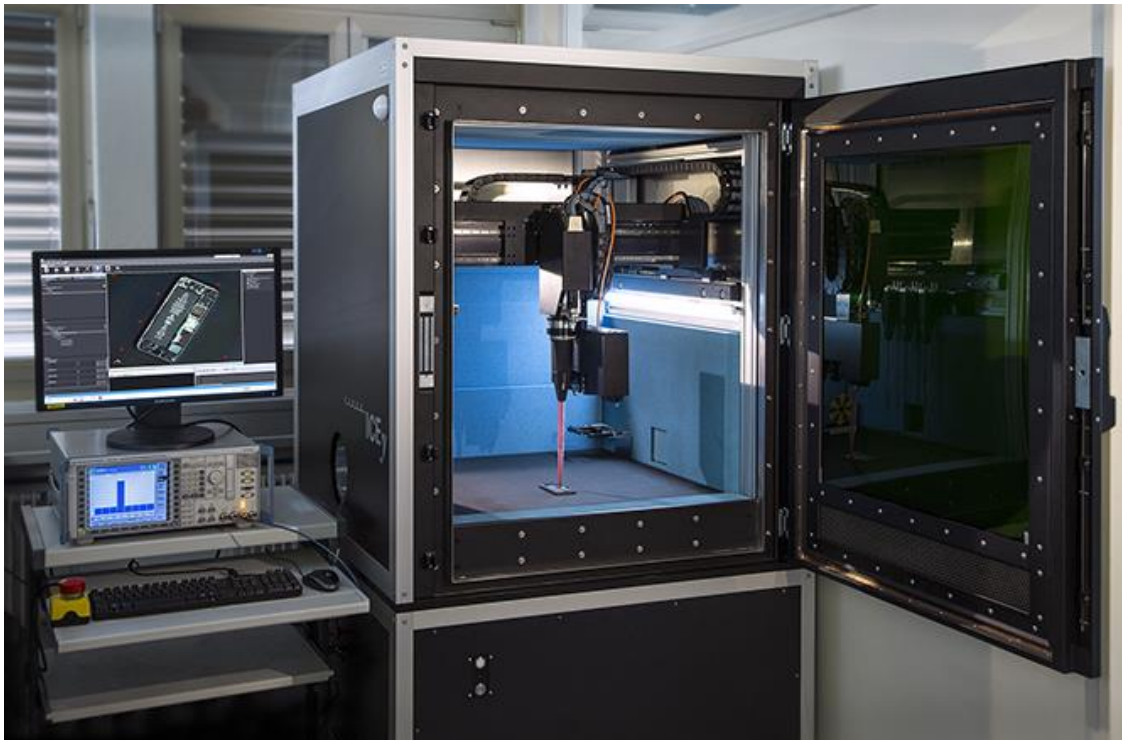
Joonis 3. Nanyang Technological University loodud mõõteseadade Langer IC Scanner Fs 103

Mõõteseadme Langer IC Scanner Fs 103, vt Joonis 2, spetsifikatsioon [4] :

- mõõteala: x-300 mm, y-300 mm, z-300 mm, z pöörlemine $\pm 180^\circ$;
- mõõta saab elektrivälja ja magnetvälja sagedusalas 10 MHz kuni 3 GHz;
- seade vastab IEC 61697-3 standardi nõuetele;
- juhtprogrammiks on *ChipScan*, programm võimaldab luua mõõtetulemustest kolmemõõtmelise magnetvälja pildi ja vajadusel on võimalik andmed väljastada ka *excel* tabeli kujul.

1.3. Ettevõtte Speag

Šveitsi ettevõtte Speag toodab kõige kvaliteetsemat ja kõrgtehnoloogilisemat lähimagnetvälja ja elektrivälja mõõteseadet ICEy - *Interference & Compatibility Evaluation System*. ICEy mõõtemasin on üks võimekamaid seadmeid omas valdkonnas mõõtmaks magnetvälja ja elektrivälja. Seadmekamber on täielikult varjestatud ja summutab efektiivselt ümbritsevad häireid tekitavad väljad (vt. Joonis 4). ICEy seadme erinevusena võrreldes konkurentidega võib välja tuua mõõteotsikute automaatse vahetamise. Mõõdetavast objektist teeb seade ka 3D mudeli kasutades foto- ja lasermõõte instrumente.



Joonis 4. Šveitsi ettevõtte Speag loodud mõõteseadete ICEy

Mõõteseadme ICEy, vt Joonis 4, spetsifikatsioon [5] :

- mõõteala 450 x 450 x 115 mm;
- mõõtmistäpsus $\pm 25 \mu\text{m}$;
- fotosilma resolutsioon $0.07 \times 0.07 \text{ mm}^2/\text{px}$;
- seade kasutab magnetvälja mõõtmiseks proovikut mõõtevahemikus 10 MHz – 6 GHz.

1.4. Seadmete võrdluse kokkuvõte

Turul olemasolevate seadmete lühivõrdlusest võib järeldada, et nõudlus lähivälja mõõtemasinate järgi on olemas. Nõudluse tingib kiire elektroonikatööstuse areng, kus soovitakse järjest väiksemale trükkplaatide alale mahutada järjest rohkem elektroonikakomponente. See soov seab elektroonikainsenerid raskesse olukorda, kus on vaja tegeleda häiringute vältimise ja nende tuvastamisega. Häiringute tuvastusprotsessis saabki abiks olla antud töös väljatöötatav mõõteseade.

Turul olevate mõõteseadmete võrdlusest kahjuks ei õnnestu kõikide seadmete hindu välja selgitada, kuna tegemist on seadmetega, mida modifitseeritakse väga suures ulatuses vastavalt ostja soovile. Seetõttu tuleb hinna väljaselgitamiseks valmistajaga põhjalikke läbirääkimisi pidada. Õnnestus saada Jaapani tootja Peritc seadme Tester EMV-100 baashind, millest saime kinnitust, et tegu on kallite mõõteseadmetega. Mõõteseadmete hind oleneb paljudest aspektidest:

- mõõteseadme täpsusklass
- erinevate mõõtmiste teostusvõimekus
- lisavarustus aste (3d skanner, foto tuvastus jne.)
- spektroanalüsaatori hinnaklass (valmistaja)
- seadme mehaanika komponentide kvaliteet

Võrreldes turul olevate mõõteseadmetega planeerime mõõteseadme valmistada standardsena, mõõtmaks ainult elektromagnetilist lähivälja ning selle tootmine on kordades soodsam. Seadme sihtrühmaks oleksid ettevõtted ja ülikoolid, kes tegelevad pideva riistvara arendusega ning kus eksisteerib pidev vajadus antud seadme järele.

2. PATENDIOTSING

Elektromagnetilise lähivälja mõõteseadme patendiotsing viidi läbi andmebaasis ee.espacenet.com. Espacnet andmebaasini jõuti Eesti Patendiameti kodulehelt epa.ee kaudu. Espacenet sisaldab patendiandmeid kogu maailmast, sealhulgas ka Eestist. [6] [7]

2.1 Otsingusõnad ja tulemite hulk

Magnetic near field- leiti 25 vastet, neist ükski ei olnud lähivälja mõõteseadme.

Near field scanner- leiti 184 vastet, neist 4 olid laadsed lähivälja mõõteseadmele.

Electromagnetic interference scanner- leiti 24 vastet, neist ükski ei olnud lähivälja mõõteseadme.

Magnetic near field scanner- leiti 22 vastet, neist ükski ei olnud lähivälja mõõteseadme.

Pcb near field scanner- 1 vastet leiti, ei olnud lähivälja mõõteseadme.

EMI scanner- 105 vastet leiti, neist ükski ei olnud lähivälja mõõteseadme.

Patendiotsingu tulemusena vaadati läbi 361 erinevat patenti. Neist neli olid sarnase lähivälja mõõteseadme kirjeldused. Tuuakse välja kaks seadet, mis olid tehnilise lahenduse poolest kõige sarnasemad meie planeeritavale lähivälja mõõteseadmele.

2.2 Patent 1

Patendi nimi: Antenna Near-Field Probe Station Scanner [8]

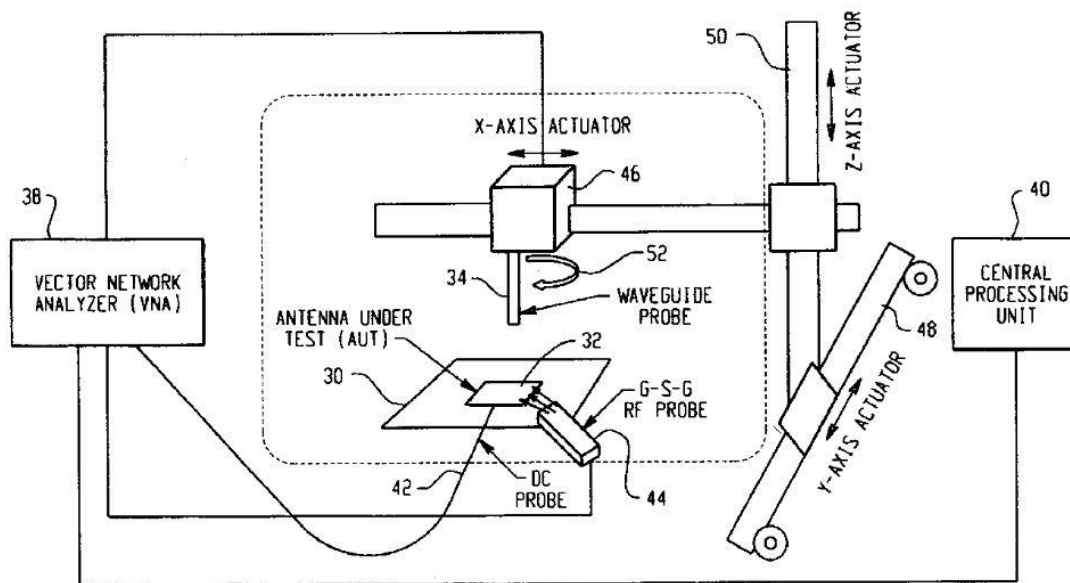
Patendi number: US2011032253 (A1)

Patent on taotletud: Ameerika Ühendriigid 2011.02.10.

Patendi taotlejateks ja leiutajateks: Zama Afros; Lee Richard; Darby William; Barr Philip; Lambert Kevin; Miranda Felix.

Patendi lühikirjeldus:

Skanner suudab mõõta elektromagnetilist lähivälja. Mõõtmise ajal liigub skanner lineaarselt piki x, y ja z-telje, mõõteantenni suudab seade pöörata 90°. Mõõteandmed salvestatakse ning töödeldakse, määramaks mõõdetava süsteemi lähiväljaomadusi, et optimeerida süsteemi. Skaneerimise lõpus töötleb programm (kasutajaliides) kogutud andmed ja kuvab neist kolmemõõtmelise väljapildi. Süsteem võimaldab koos kasutajaliidesega ulatuslikku lähiväljaanalüüsi ja andmetöötlust. Seadme skeem joonisel 5.



Joonis 5. Lähivälja mõõtemasin patendi numbriga US2011032253 (A1) [8]

2.3 Patent 2

Patendi nimi: Scanning Mechanism of Electromagnetic Compatible Scanner

Patendi number: CN203535124 (U)

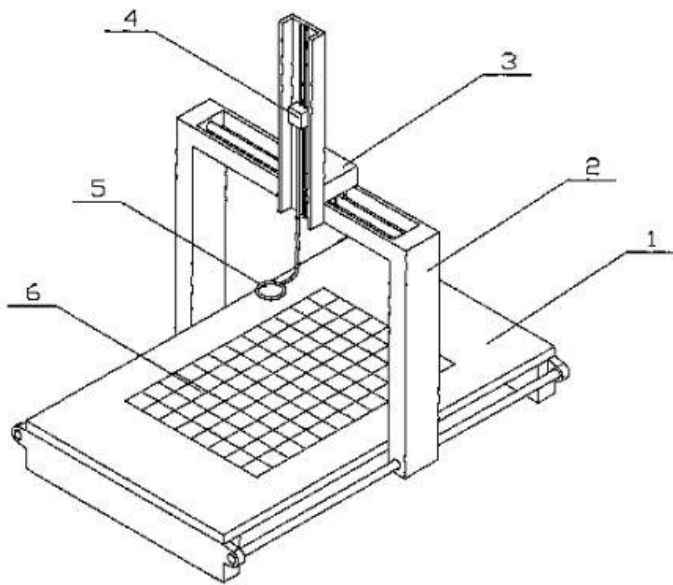
Patent on taotletud: Hiinas 2014.04.09

Patendi taotlejaks : Zhejiang ülikool.

Leiutajad: Y. Yongxiang, Y. Kun, S. Pingping, C. Hong ja Z. Fan [9]

Patendi lühikirjeldus:

Skaneerimisseade on loodud elektromagnetiliste lähiväljade uurimiseks. Seadmel on kolm telge x, y ja z. Seadme mehaaniline osa tagab kvaliteetse mõõtetäpsuse. Mõõteproovikut liigutatakse koordinaatteljestikus juhtprogrammi alusel. Saadud andmed koondatakse juhtprogrammi ja nende alusel on võimalik juhtprogrammis läbi viia lähivälja analüüsi.



Joonis 6. Lähivälja mõõtemasin patendinumbriga CN203535124 (U) [9]

Patendi otsingutulemustest ja uuritud patentidest võib järeldada, et lähivälja mõõteseadmeid on välja töötatud vähe ja seadmete konstruktsioonid on projekteeritud metallist, mis häirib lähivälja mõõtmisprotsessi. Patendiotsing kinnitas, et sellist lähivälja mõõteseadet nagu plaanis luua, ei ole enne maailmas valmistatud.

3. ÜLEVAADE ELEKTOMAGNETILISE ÜHILDUVUSE STANDARDI NÕUETEST

Elektrienergia kasutamine igapäevaelus kasvab pidevalt ja see toob endaga kaasa järjest suurema elektromagnetilise reostuse tekke. Elektromagnetiliste häiringute kõrge nivoo ühises elektromagnetilises keskkonnas võib segada elektroonikaseadmete laitmatut talitlust. Selle vältimiseks peavad kõik elektriseadmed olema välja töötatud elektromagnetiliselt ühilduvatena. See tähendab, et iga üksik seade peab suutma taluda teiste sama keskkonna seadmete elektromagnetilist mõju ja ka iga üksiku seadme mõju kõigile seadmetele selles keskkonnas peab olema aksepteeritav. Ühilduvuse tagamiseks on välja töötatud suhteliselt uus teadusharu - elektromagnetiline ühilduvus (edaspidi nimetatud EMÜ). EMÜ on elektrotehnikaharu, mis uurib, analüüsib ja lahendab vastastikuse elektromagnetilise mõjutamise probleeme. [2]

Elektri- ja elektroonikalülituste laialdane levik on tekitanud olukorra, kus palju erinevaid seadmeid talitleb ühises keskkonnas üksteise vahetus läheduses ja nende negatiivne mõju üksteisele kasvab. Kui elektrotehniline seade on laboritingimustes kasutuskõlblikuks viimistletud, on väga oluline, et ta talitleks laitmatult ka reaalsetes oludes, kus tema vahetus läheduses töötab teisi seadmeid. Elektrotehnilised seadmed peavad olema tundetud väliste häiringute suhtes ja ei tohi olla ka ise häiringute tekitajateks. Konstruktorite ülesandeks on tagada, et väljatöötatud seade ei ole häiringute allikaks ja et tema kasutuselevõtt ei risustaks ümbritsevat keskkonda elektromagnetiliselt. Häiringud ja elektromagnetiline häirumine on muutunud elektriseadmete väljatöötajatele ja tootjatele üheks peamiseks lahendamist vajavaks uurimisülesandeks, kuna elektroonikaseadmed muutuvad üha kompaktsemaks. See tähendab, et rohkem elektroonikakomponente peab mahtuma ühte ruumiühikusse trükkplaadil. Seoses komponentide tihedama paiknemisega trükkplaadil kasvab elementide vastastikune negatiivne mõju. [2]

Lähivälja mõõtmiseks ja määramiseks on välja töötatud standard:

MEASUREMENT OF ELECTROMAGNETIC EMISSION IEC 61697 [10], mille alusel on võimalik teostada korduvaid laboratoorseid mõõtmiskatseid ja tulemustest lähtudes viia sisse muudatusi elektroonikaseadmete disainis. Standard on mõeldud elektromagnetilise lähivälja mõõtmiseks vahemikus 1 MHz - 1 GHz. Ühtse standardi koostas rahvusvaheline organisatsioon IEC (International Electrotechnical Commission) lähtudes kolmest väljatöötatud kogumist, mis reguleerisid lähivälja mõõtmist enne IEC standartit: IBIS (*Input/Output Buffer Information Specification*), IMIC Jaapanis (*Interface Module for Integrated Circuits*) ja ICEM Prantsusmaal (*Integrated Circuit Emission Model*). IEC loodi juba 1906. aastal, IEC on juhtiv organisatsioon maailmas publitseerimaks kõiki elektroonikaga ja sellega seotud standardeid. IEC on loonud platvormi, kus riigid ja suurtööstused üle maailma saavad paika panna standardid, millest lähtuvalt loovad ja toodavad elektroonikaseadmeid. [10] [11]

4. PROOVIKU TÖÖPÕHIMÕTE JA KATSEPROOVIKU KIRJELDUS

4.1 Prooviku tööpõhimõte

Magnetvälja tugevust H saab mõõta raamantenniga (Joonis 7) . Raami tasapinnaga risti oleva vahelduvmagnetvälja (Joonisel 8) komponendi toimel tekib elektromotoorjõud, mis on võrdeline tuletisega dH/dt ja raami pindalaga S_A . Koormusel tekib mitmesugune pinge olenevalt takistuse R_H ja induktiivtakistuse ωL_A suhtest, kus ω on mõõdetava häire sagedus, ning induktiivsus on määratud avaldisega (1) [2]:

$$L_A = \mu_0 r \left(\ln \left(\frac{8r}{a} \right) - 2 \right), \quad (1)$$

kus L_A -induktiivsus

μ_0 - keskkonna magnetiline läbitavus

r - raami raadius

a -mähise traadi läbimõõt

kui $R_H \gg \omega L_A$, siis pinge u_H oleneb sagedusest (2) [2]:

$$u_H = \mu_0 S_A \frac{dH}{dt}, \quad (2)$$

kus u_H -pinge

S_A - raami pindala

dH - magnetvälja tugevuse muutus ajas

dt - aja muutus

ja H määramiseks tuleb arvestada seda sõltuvust või kasutada mõõteseadmes integraatorit.

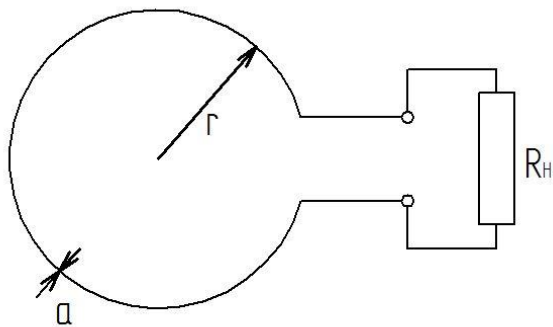
Kui $R_H \ll \omega L_A$, siis pinge on (3) [2]

$$u_H = \frac{R_H}{L_A} \mu_0 S_A H, \quad (3)$$

kus R_H - takistus

H - magnetväljatugevus

ja pinge mõõtmine võimaldab otse määrata H . [2]



Joonis 7. Raamantenni väliskuju [2]

4.2 Katseprooviku kirjeldus

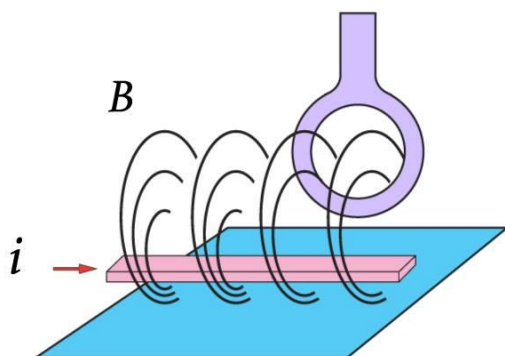
Võimalik on kasutada aktiivproovikuid ja passiivproovikuid. Testmõõtmised on tehtud passiivproovikuga. Passiivprooviku peamiseks eelisteks on märgatavalt lihtsam ehitus ja suurem töökindlus erinevatel tingimustel. Antud seadmes koosneb passiivproovik kolmest koondtsentrilisest solenoidmähisest, mis on paigutatud 90-kraadiste nurkade all kolmele ristuvale tasandile. Mähised on varjestatud, et vältida elektrivälja mõju mõõtmistele. Kuna passiivproovikul mõõdetakse otse proovikust tulevat signaali, peab piisavalt tugeva signaali saavutamiseks kasutama suuri mähiseid: sisediameeter alates 5 mm ja keerdude arv > 10 . Analoogset mähiste kombinatsiooni kasutab ka tuntud mõõteseade Aaronia Spectran (vt Joonis 10). Aaronia Spectrani mõõtemähisest ei leidu ühtegi gabariitmõõtu, tegu on ilmselt mitteavaliku informatsiooniga. Katse prooviku keha mõõtmeid vaata jooniselt 9. Prooviku keha 3D printitud materjaliks on plastik PE (polüetüleen). Tulenevalt mähiste suuremast induktiivsusest on raskendatud kõrgete sageduste mõõtmine.

Prooviku kõik kolm mähist on eri mõõtudega (vt. Tabel 1) ja sellega seoses ka muud omadused on erinevad. Ühtlaste mõõtetulemuste saamiseks on vaja kalibreerida eraldi kõik kolm mähist vastavalt sagedusvahemikkudele. Prooviku kalibreerimisel määratakse prooviku parasiitmahtuvused ja induktiivsused. Täppiskalibreering toimub tarkvaraliselt.

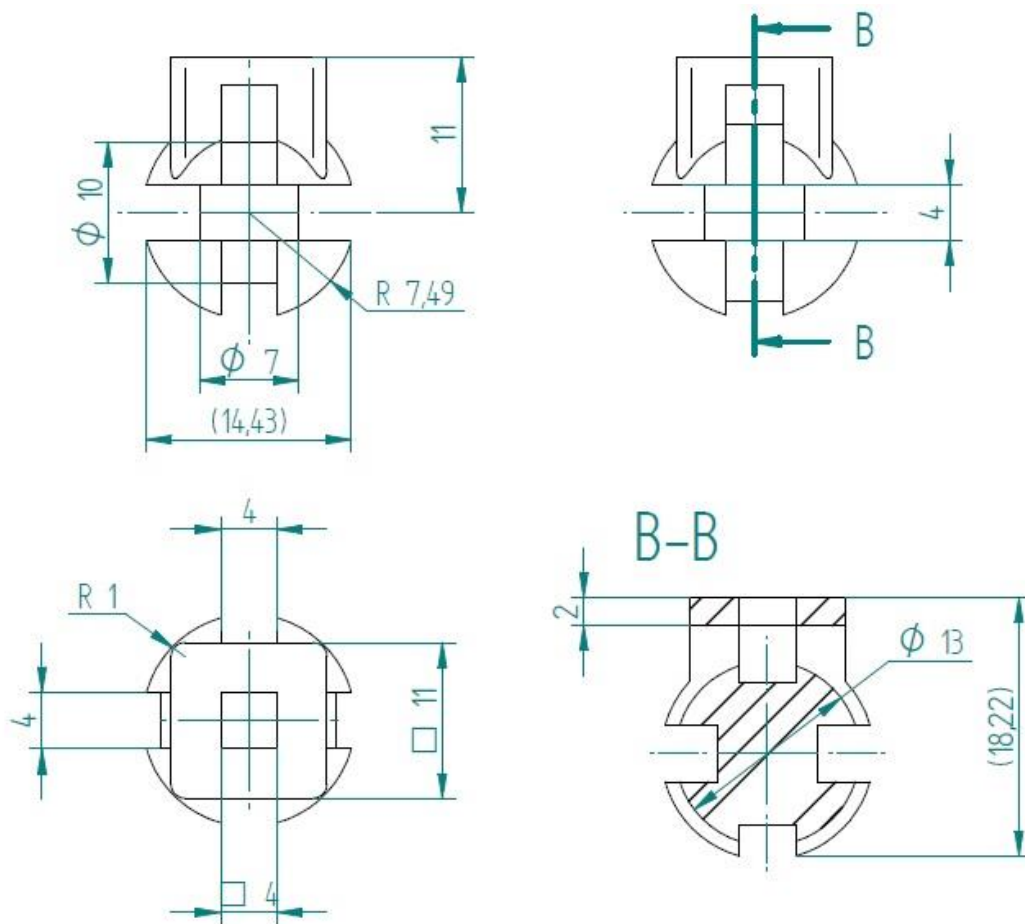
Tabel 1. Katse prooviku parameetrid

	Mähistraadi läbimõõt	Mähise keerdude arv	Mähise gabariitmõõtmed
Mähis 1	0,12 mm	50	Välis läbimõõt: 15 mm Sise läbimõõt: 13 mm Mähise kõrgus: 4 mm
Mähis 2	0,12 mm	50	Välis läbimõõt: 12 mm Sise läbimõõt: 10 mm Mähise kõrgus: 4 mm
Mähis 3	0,12 mm	50	Välis läbimõõt: 9 mm Sise läbimõõt: 7 mm Mähise kõrgus: 4 mm

Aktiivprooviku erinevuseks passiivproovikuga võrreldes on prooviku sisse ehitatud võimendi. Võimendus peab olema mõõtepunktile piisavalt lähedal, et vältida müra signaalis, samas ei tohi mõõdetav objekt segada võimendit ning võimendi töö ei tohi segada mõõtmist. Aktiivprooviku ülesehitus lubab kasutada väiksemaid vastuvõtumähiseid ja ka mõõta suuremaid sagedusvahemikke. Aktiivproovikuga saab sooritada palju kõrgema resulatsiooniga mõõtmisi. Samas on aktiivproovik tundlikum keskkonna mõjudele, nagu temperatuuri muutused või toiteallikast tulev müra. Sellepärast on aktiivproovikuga mõõtes seadmetele ümber ehitatud varjestuskambriid vähendamaks keskkonnast tulevaid häiringuid.



Joonis 8. Raamantenni pinnaga risti olevad magnetvootihedus jõujooned



Joonis 9. Katseseadmel kasutatav passiivprooviku keha

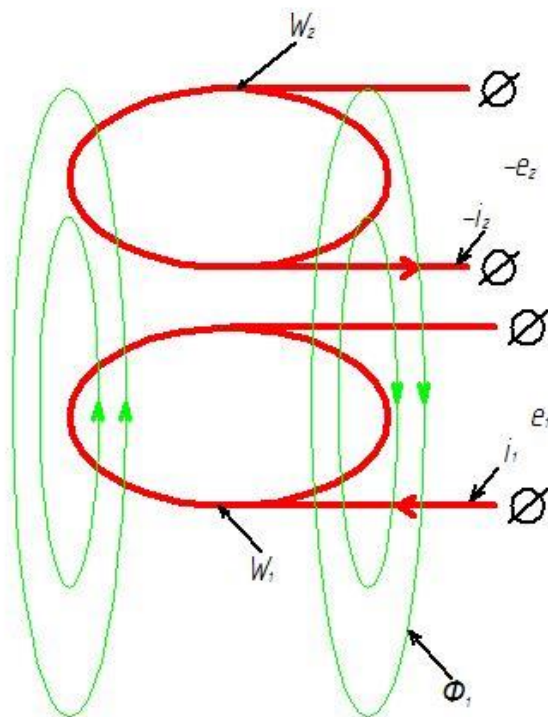


Joonis 10. Mõõtemähis, mida kasutatakse Aaronia Spectran seadmes [12]

4.3 MÕÖTEPOOLI ELEKTROMAGNETILISE INDUKTSIOONI TÖÖPÕHIMÖTTE KIRJELDUS

Kui Mähisele 1 (väljaallikas) rakendada e_1 (ajas muutuv elektromotoorjõud), siis sellega kaasneb Mähises 1 vool i_1 . Mähise 1 keerud on W_1 . Voolu ja mähise keerdude korrutisena ($i_1 \cdot W_1$) saame magnetvoo ϕ_1 . Magnetvoole lisandub ülekanalategur K , mis on väiksem kui 1. Mähises 2 (mõõtemähises) keerdude arv W_2 . W_2 korrutatakse $\frac{K\phi_1}{dt}$ see võrdub $-e_2$ ja $-e_2$ mähises 2 vool $-i_2$ (4). (vt Joonis 11)

$$e_1 \rightarrow i_1 \rightarrow (i_1 \cdot W_1) \rightarrow \phi_1 \rightarrow K\phi_1 \rightarrow W_2 \rightarrow \frac{K\phi_1}{dt} \rightarrow -e_2 \rightarrow -i_2 \quad (4)$$



Joonis 11. Elektromagnetilise induksiooni tööpõhimõte

5. ELEKTROMAGNETVÄLJADE ARVUTUSTE PÕHIVÖRRANDID

Magnetväljade arvutamiseks on kasutatud COMSOL Multiphysics 5.2 tarkvara, selle tarkvara lähtealuseks on Maxwelli seadused.

Elektromagnetvälja jaotust iseloomustab Maxwelli I seadus (koguvoolu seadus), mis kirjeldab voolutihedust J , A/m^2 , sõltuvust magnetvälja tugevusest H , A/m (5) [13]:

$$\nabla * \vec{H} = \vec{J}, \quad (5)$$

kus ∇ - nabla ehk Hamiltoni operaator

\vec{H} - magnetvälja tugevuse vektor

\vec{J} - voolutihedus tugevus vektor

Lähtudes Maxwelli II seadusest (elektromagnetilise induksiooni seadus, mille olemuse avastas esimesena Faraday, kuid mille matemaatiliselt formuleeris Maxwell), on elektrivälja tugevus E , V/m , sõltuvuses magnetvoo tiheduse B , T , muutumise kiirusega (6) [13].

$$\nabla * E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (6)$$

kus E - elektrivälja tugevus

B - magnetvoo tihedus

∂ -suuruse muutus ajas

Magnetvälja tugevuse H ja magnetvoo tihedus B vahelist sõltuvust võib kirjeldada seosega, kus μ on materjali ehk keskkonna magnetiline läbitavus, H/m (7) [13]:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (7)$$

kus μ - materjali magnetiline läbitavus.

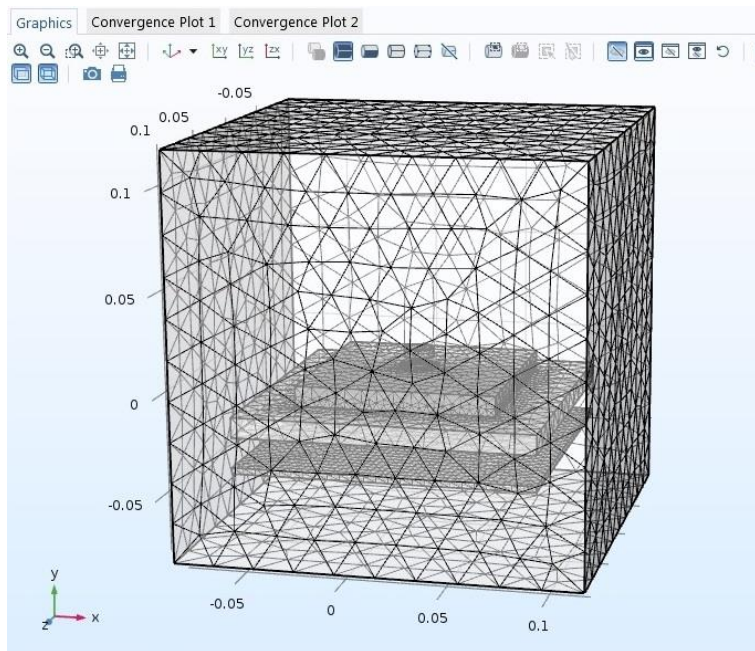
6. LÕPLIKE ELEMENTIDE MEETOD

Lõplike elementide meetod (*finite element method*) ehk LEM (edaspidi nimetatud FEM) on numbriline arvutusmeetod insener-tehniliste ja füüsikaliste ülesannete lahendamiseks. Meetod hõlmab üldiste diferentsiaalvõrrandite ja/või nende süsteemi lähendamist üle mingi pideva piirkonna (nt tasand), mis jaotatakse väiksemateks lõplikeks elementideks. Numbriline lahend kogu piirkonna jaoks saadakse lõplike elementide summeerimisega mingi eeskirja järgi. [14]

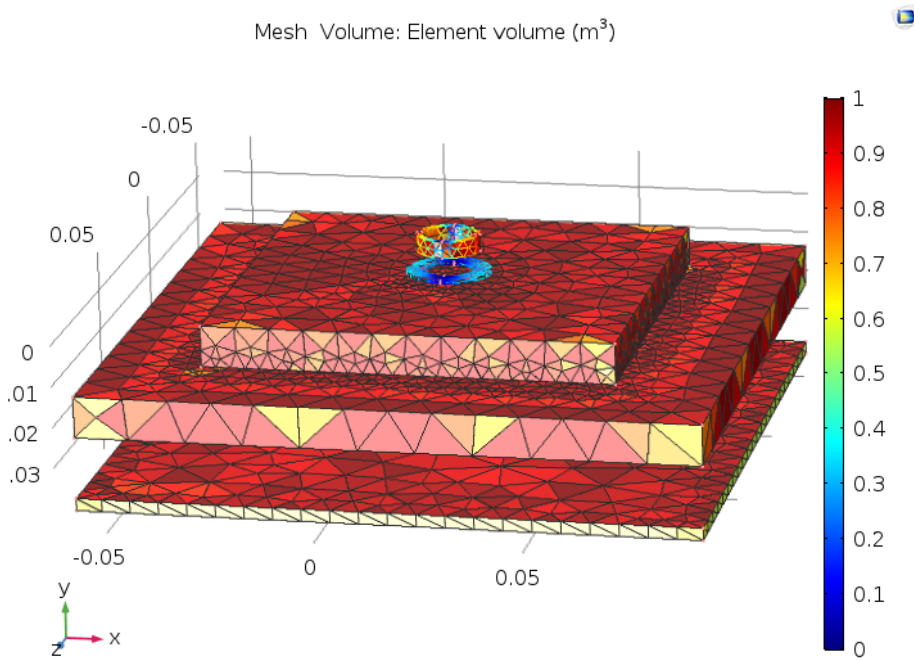
Lõplike vahede meetodit ehk võrgumeetodit võeti kasutusele 2D süsteemis staatiliste elektromagnetväljade määramiseks 1960ndatel. 1960-1961 aastaiks oli antud teemal publitseeritud juba ca 15 artiklit. Sealt edasi 1970ndatel, jõuti FEM meetodini, millest 1980ndate alguseks oli välja arenenud juba lihtsamate objektide aegsõltuvuste pöörivoolude ja sekundaarväljade arvutamine. 1990ndatel oli kahemõõtmeliste elektromagnetväljade arvutamine juba igapäevane tööriist paljudes valdkondades. Kahetuhandetail aastail hakati arendama kolmemõõtmelisi väljaarvutustarkvarasid ning praeguseks hetkeks on areng antud valdkonnas jõudnud insener-tehniliste ja füüsikaliste tarkvaradeni nagu: Comsol, Ansys, Infolytic. Tänapäevaks on publitseeritud ligi 30 tuhat (hulk kasvab pidevalt) teadusartiklit antud meetodi rakenduseks. FEM meetodi kiire areng on toimunud peamiselt seetõttu, et see võimaldab lahendada väga paljusid ülimalt keerukaid tööstusrakendustes tekkivaid elektromagnetväljade, mehaanilise elastsuse ja hüdrodünaamikaga seotud probleeme. Kasutades Comsol tarkvara, mis põhineb lõplike elementide meetodil, viiakse läbi virtuaalsed katsed saamaks kinnitust antud uuringus läbiviidud tulemustele laboris. [13]

7. KOLMEMÕÖTMELISED VÄLJAARVUTUSED LÕPLIKE ELEMENTIDE MEETODIL

Magnetvootiheduste ja tekkivate magnetiliste jõutiheduste täpsemaks uurimiseks/vaatlemiseks teostatakse arvutused läbi lõplike elementide FEM-meetodil. FEM-meetod tähendab, et uuritav objekt jaotatakse lõplikeks alamobjektideks ning arvutatakse iga alamobjekti väärtused vastavalt diferentsiaal- või integraalmeetodile. Seejärel liidetakse üksikute alamobjektide jaoks saadud tulemused üheks tervikuks. Arvutuste läbiviimiseks on valitud programm *Comsol Multiphysic 5.2*. *Comsol Multiphysics 5.2* on mitmeotstarbeline tarkvaraplatvorm füüsika-põhiste probleemide simuleerimiseks. Lõplike elementide arvutuse teostab arvutiprogramm, seepärast on esimeseks ülesandeks võimalikult täpselt programmile ette anda poolide mõõtmed ja asendid teineteise suhtes. Teiseks tuleb kirjeldada täpselt poolide materjalid, sisendpinge ja sagedused. Sammuti tuleb määrata soovitud mõõtetäpsus ehk elementide arv. Mida suurem on elementide arv, seda suurem on ka arvutusmaht. Programmis *Comsol Multiphysics 5.2* jaotatakse FEM-mudel (vt Joonis 12) arvutusvõrgustikuks, millest nelinurkseid elemente on 11242, nn tetraelemente 75074 ja tipuelemente 776 (vt Joonis 13). Mida tihedam arvutusvõrgustik on, seda täpsem on tulemus, aga siin tuleb arvestada olemasoleva arvutusvõimsusega. Modelleerimise läbiviimiseks antud töös kasutatakse arvutit järgmiste parameetritega: protsessor IntelCore i7, 2.80 GHz; muutmälu (RAM) 12 GB; operatsioonisüsteem 64 bitti. Sellisel arvutil võtab ülesande lahendamine aega 1 m 22 s. [13]



Joonis 12. Arvutusvõrgustik FEM-meetodi rakendamiseks



Joonis 13. Arvutusvõrgustik, elementide suurused

8. MODELLEERIMINE COMSOL MULTIPHYSICS TARKVARAS

Comsolis [15] (litsents Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudil) saame modelleerida elektromagnetilisi lähiväljakatseid ideaaltingimustes. Mõlemad katsed nii *Comsol Multiphysicsis* 5.5 kui ka laboris viiakse läbi samade algparameetrite põhjal. Mõõtmaks lähivälja kasutatakse magnetvälja allikana mähist, kuna mähise genereeritud magnetvälja on võimalik täpselt kirjeldada programmis *Comsol Multiphysicsis* 5.2. Trükkplaadil tööolukorras genereeritavate magnetväljade kirjeldamine oleks palju komplitseeritum, kui mitte isegi võimatu. Seepärast on kasutatud mähist, mille algparameetrid on teada (mähise parameetrid toodud Tabeli 8). Kuna katseseade CNC konstruktsioon on valmistatud roostevaba terasest ja töölaud on alumiiniumist, on mõõtmiskatsed *Comsolis* teostatud nii metallist alusplaatidega kui ka ilma, nägemaks, kas metallplaadid muudavad mõõtetulemusi ja kui muudavad, siis mis ulatuses.

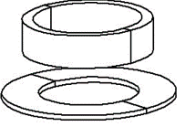
Esimese etapina mõõtmisprotsessis kirjeldamiseks mähiseid ja mähiste paiknemist teineteise suhtes modelleeriti mähiste CAD (*computer-aided designmudelid*) mudelid programmis *SolidEdge Student* (CAD tarkvara). Pannes paika mähiste paiknemise teineteise suhtes ja ka kaugused, sisestati kõik CAD mudelid ükshaaval *Comsolisse*, märkides mähiste parameetrid:

- mähistraadi läbimõõdud
- mähiste keerdude arvud
- sisendpinge
- sagedused
- voolusuunad

Passiivproovik antud seadmes koosneb kolmest koondtsentrilisest solenoidmähisest, mis on paigutatud 90-kraadiste nurkade all kolmele ristuvale tasandile. Mähiste parameetrid on toodud tabelis 1. Iga mähisega teostati kolm mõõtmist, muutes väljaallika ja mõõtemähise vahekaugust. Mähiste vahekaugusi muudame sammuga 5 mm. Mähiste vahekaugused on

vastavalt 5 mm, 10 mm ja 15 mm. Katsete tulemused on toodud tabelites 2, 3 ja 4. Tabelitest on võimalik välja lugeda sisendpinge U_1 väärtus väljaallikale ja indutseeritud väljundpinge U_2 mõõtemähises.

Tabel 2. Laborikatse elektromagnetlähivälja mõõtmine Katse 1 Mähis 1


Katse 1 Mähis 1			
Mähiste asendi skeem teineteise suhtes	Mähiste omavaheline kaugus	Sisendparameetrid väljaallikale	Indutseeritud väljundparameetrid mõõtemähises
	5 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=47,5$ mV Väljundsagedus 1 MHz
	5mm ilma metallplaatideta	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisend signaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=49$ mV Väljundsagedus 1 MHz
	10 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=14,6$ mV Väljundsagedus 1 MHz
	15 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=9,3$ mV Väljundsagedus 1 MHz

Järeldus (Tabel 2):

Katse 1. Tabeli 2 mõõtetulemustest võib järeldada, et väljaallika ja mõõtemähise vahelise õhupilu suurenemisel väheneb indutseeritav väljundpinge U_2 . Mõõtemähise väljundpinge U_2 väheneb, kuna kaugenedes väljaallikast nõrgeneb väljaallika poolt tekitatav magnetväli ja seega ei indutseerita mõõtemähises enam nii suurt pinget U_2 . Võrreldes mõõtemähise ja väljaallika vahekaugusi selgub, et mõõtemähise väljundpinge U_2 muutus on kõige suurem 5 mm ja 10 mm vahe puhul. Mõõtemähise liigutamisel 10 mm-lt 15 mm-le toimunud mõõtemähise väljundpinge muutus on oluliselt väiksem võrreldes mähiste omavahelise kauguse muutusega 5 mm-lt 10 mm-le.

Tabelist selgub, et mõõtmiskeskkonnas asuv metallplaat mõjutab mõõtetulemust. Metallplaadiga teostatud katse mõõtemähise väljundpinge U_2 on madalam kui ilma metallplaadita tulemus. Magnetiliste jõujoonte muutust metallplaadi olemasolul mõõtekeskkonnas on võimalik võrrelda ka joonistel 18 ja 19. Metallplaadi olemasolul mõõtekeskkonnas tekib suhteliselt kõrge sageduse tõttu 1 MHz metallplaadil pinnaefekt, kus magnetjõujoontel on lihtsam liikuda metallplaadi pinnal kui õhus.


Tabel 3. Laborikatse elektromagnetlähivälja mõõtmine Katse 2 Mähis 2

Katse 2 Mähis 2			
Mähiste asendi skeem teineteise suhtes	Mähiste omavaheline kaugus	Sisendparameetrid väljaallikale	Indutseeritud väljundparameetrid mõõtemähises
	5 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=321,36 \mu V$ Väljundsagedus 1 MHz
	10 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=73,36 \mu V$ Väljundsagedus 1 MHz
	15 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=66,36 \mu V$ Väljundsagedus 1 MHz

Järeldus (Tabel 3)

Katse 2. Tabelis 3 on samuti näha sõltuvus väljaallika ja mõõtemähise vahekaugusest. Mida suurem on vahekaugus, seda vähem väljundpinget U_2 indutseeritakse mõõtemähises. Tabeli 2 ja Tabeli 3 võrdlusest võib järeldada, et mõõtemähise asendist väljaallika suhtes sõltub kui palju väljundpinget U_2 indutseeritakse mõõtemähisesse.

Tabel 4. Laborikatse elektromagnetlähivälja mõõtmine Katse 3 Mähis 3

Katse 3 Mähis 3			
Mähiste asendi skeem teineteise suhtes	Mähiste omavaheline kaugus	Sisendparameetrid väljaallikale	Indutseeritud väljundparameetrid mõõtemähises
	5 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=76,2 \mu V$ Väljundsagedus 1 MHz
	10 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=74,6 \mu V$ Väljundsagedus 1 MHz
	15 mm	Sisendpinge $U_1=5V_{pp}$ Sisendsignaali sagedus 1 MHz	Indutseeritud väljundpinge efektiivväärtus $U_2=56,68 \mu V$ Väljundsagedus 1 MHz

Järeldus (Tabel 4):

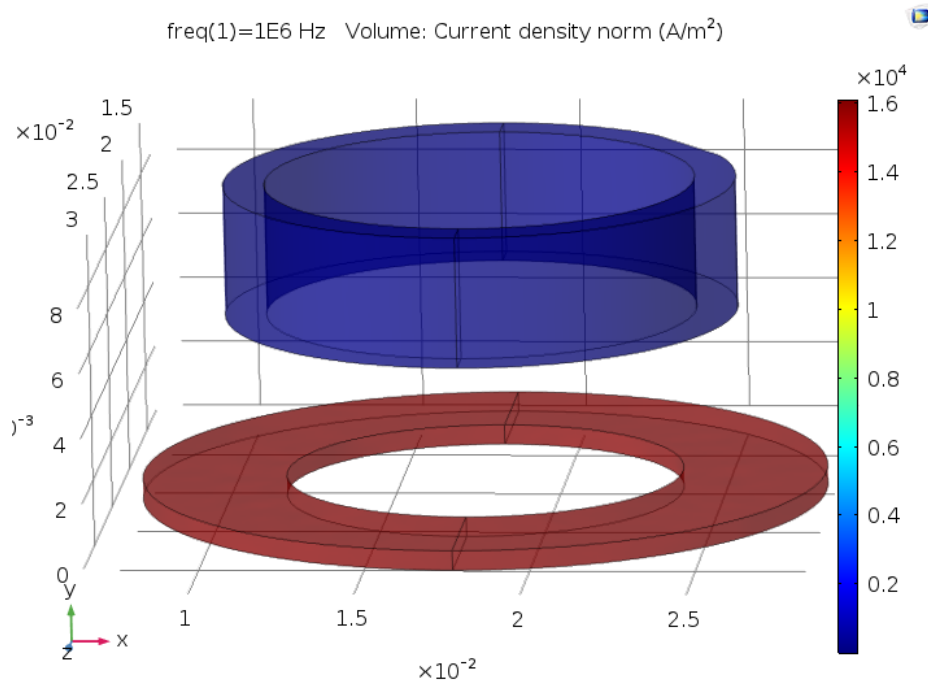
Katse 3. Tabelist 4 võib järeldada, et mõõtemähise liigutamisel väljaallika suhtes muutub indutseeritav väljundpinge nagu eelnevatelgi katsetel. Katse 3 mõõtemähis on mõõtetelt kõige väiksem ja Tabelis 4 toodud väljundpingete võrdlusest võib väita, et mõõtemähisel 3 on kõige väiksem väljundpingete kõikumise vahe, muutes mõõtemähise ja väljaallika vahekaugust.

Modelleerimis katse visuaal näited Comsol Multiphysicsist 5.2:

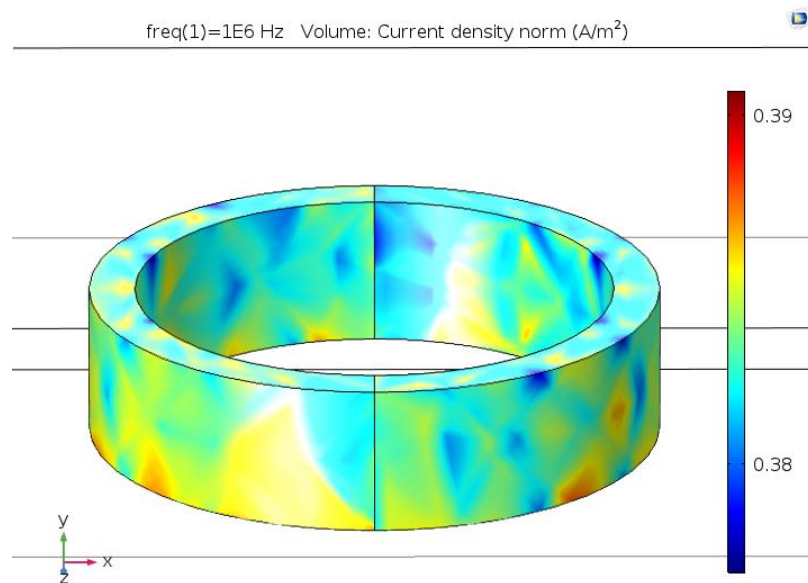
Comsol Multiphysics 5.2 modelleerimistarkvaras on võimalik lisaks tabeliandmete võrdlusele luua ka visuaalseid võrdlusmaterjale. Järgnevalt vaadeldakse joonisel 14 olevaid mähiseid. Ülemine mähis on mõõtemähis ja alumine mähis on väljaallikas. Joonis pärineb Katsest 1 ja mähiste omavaheline kaugus on 5 mm. Joonisel on näha väljaallika voolutihedus. Sisendpinge väljaallikale on 5 Vpp ja sagedus on 1 MHz. Jooniselt 14 on näha, et voolujaotus on mähises ühtlane.

Joonisel 15 on toodud mõõtemähis 1 katsest 1. Mõõtemähise ja väljaallika vahe 5 mm. Joonisel 15 on kuvatud indutseeritud voolutihedus mõõtemähises. Mõõtepildi järgi võib järeldada, et

joonisel kuvatava mähise struktuuri värvierinevus on küll suur ja ebäühtlane, kuid vaadates joonise kõrval olevat skaalat, on näha, et pinge kõikumine on väike. Joonisel on võimalik näha, et mõõtemähise alumist osa läbib palju rohkem magnetjõujooni, seega on ka all servas näha punakamaid laiike. Värvide ebäühtlane jaotus on ka osaliselt tingitud programmis valitud mõõtevõrgustiku tihedusest modelleerimisel. Kui valida tihedam mõõtevõrgustik, on küll võimalik saada ühtlasem tulemus, kuid mõõtevõrgustiku tihedamaks muutmisega kaasneb ka kordades pikem arvutusaeg.

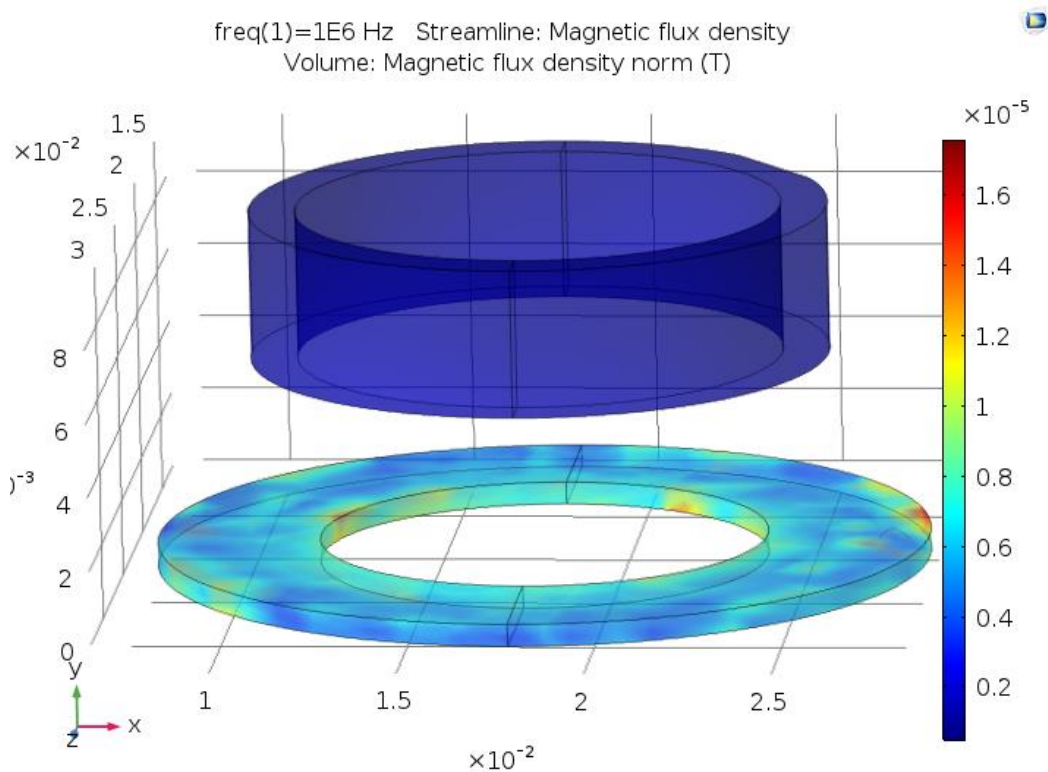


Joonis 14. Katse 1 Mähis 1 Mähiste vahe 5 mm, voolutihedus toitemähises

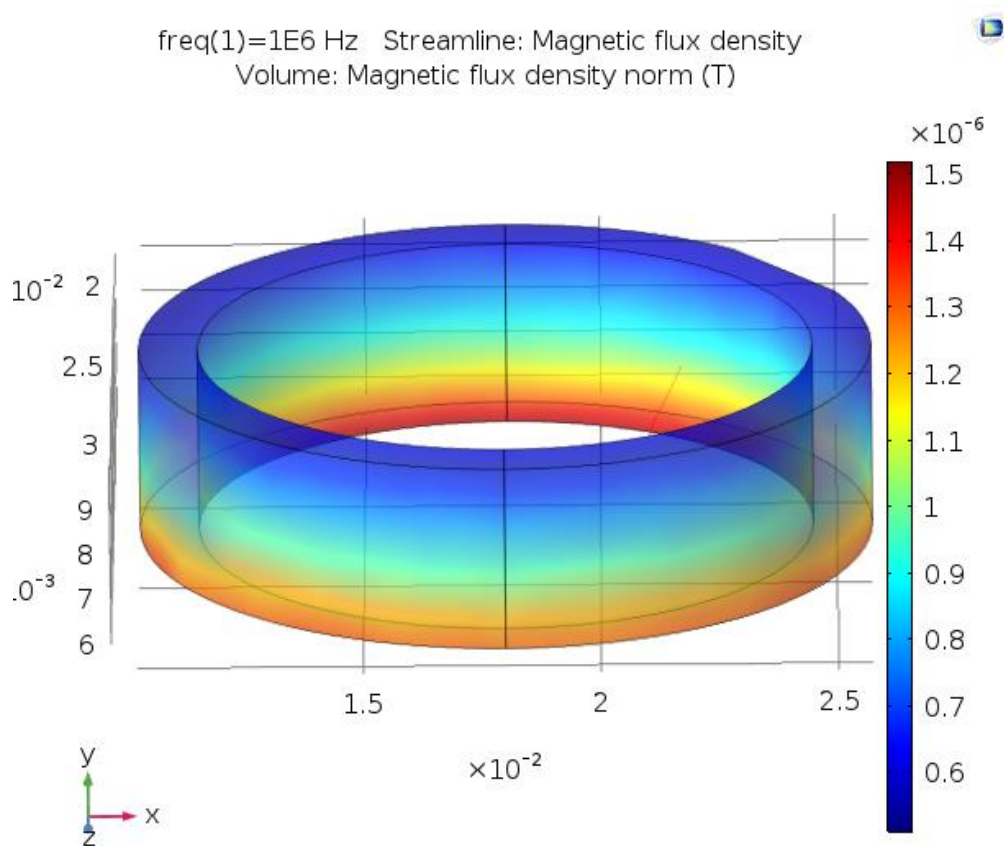


Joonis 15. Katse 1 Mähis 1 Mähiste vahe 5 mm, indutseeritud voolutihedus mõõtemähises

Joonisel 16 on näha indutseeritud magnetvootihedus mõõtemähises. Joonise skaala vaatlemisel võib järeldada, et magnetvootihedus on ühtlane terves mähises. Mõnes kohas on näha veidi koondunud magnetvootihedust, kuid kui vaadata joonise kõrval olevat skaalat, siis on selgelt näha, et magnetvootiheduse kõikumised toitemähises on väga väikesed. Seda iseloomustab ka toitemähise poolt indutseeritud magnetväljatihedus joonisel 17 näha olevas mõõtemähises. Jooniselt 17 on võimalik järeldada, et tekkinud magnetväli on tugevam mähise alaservas, kuna alaservast suundub läbi rohkem väljaallika poolt tekitatud magnetjõujooni. Samas jällegi kui vaadata joonise kõrval olevat skaalat, siis arvuliselt erineb magnetväljatihedus mähises väga vähe.



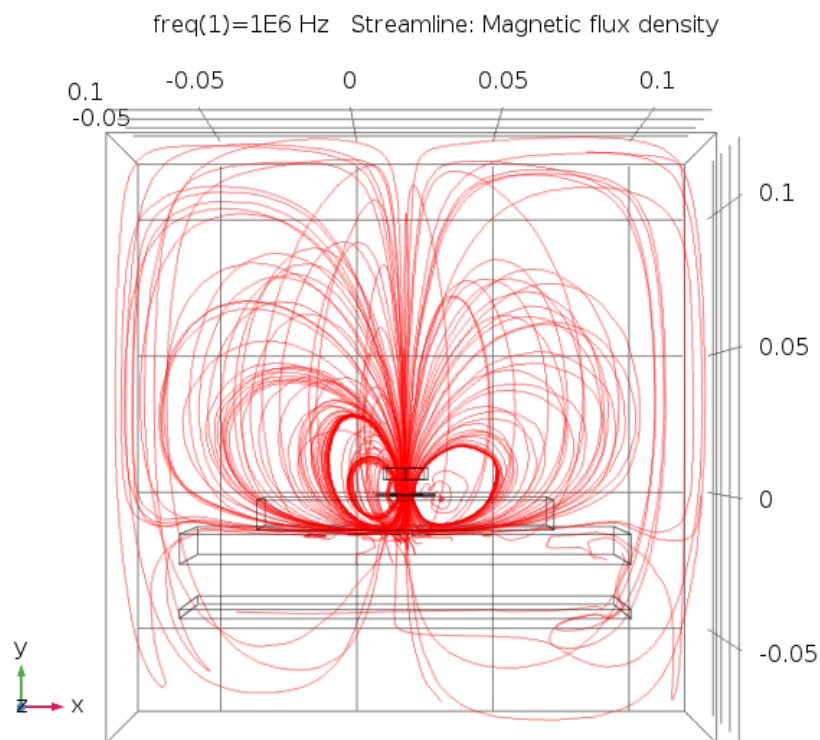
Joonis 16. Katse 1 Mähis 1 Mähiste vahe 5 mm, indutseeritud magnetvootihedus mõõtemähises



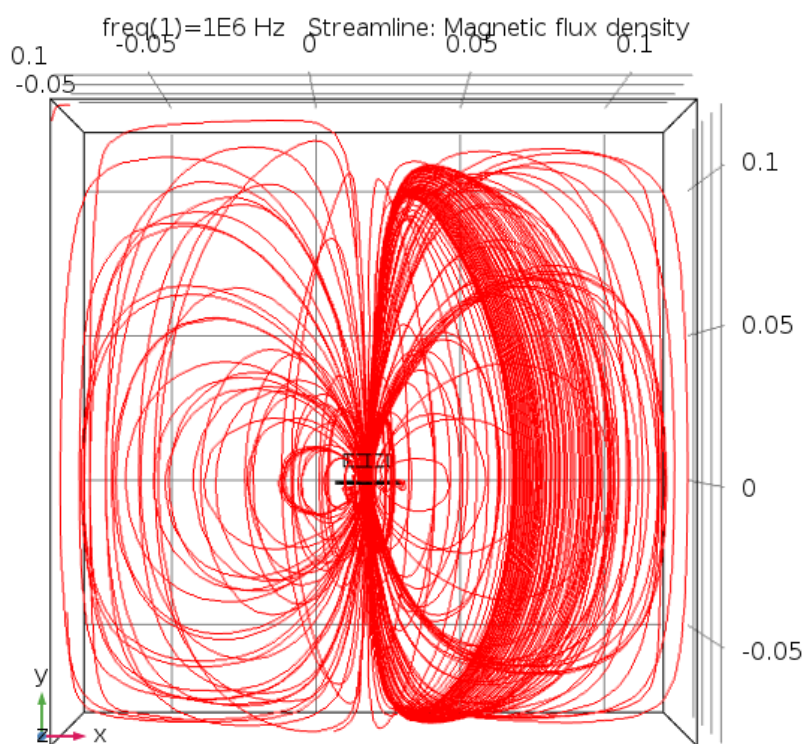
Joonis 17. Katse 1 Mähis 1 Mähiste vahe 5 mm Magnetvälja tihedus mõõtemähises

Joonisel 18. on näha magnetvälja tiheduse jõujooned. Jõujoonte paiknemine joonisel on suhteliselt ühtlane. Joonisel 18 on näha, kuidas metallplaat muudab jõujoonte kulgemist. Metallplaadile lähenedes kulgevad magnetvälja jõujooned metallplaadi pinnal, kuna magnetvälja jõujoontel on lihtsam liikuda läbi metalli kui läbi õhu. Järgmisel joonisel 19, kus metallplaati ei ole, on näha magnetvälja jõujoonte kulgemine metallivabas keskkonnas.

Sellest katsete võrdlusest lähtuvalt projekteeritakse antud töös lähivälja mõõteseade vältides ferromagnetilisi materjale mõõtealale lähemal kui 150 mm.



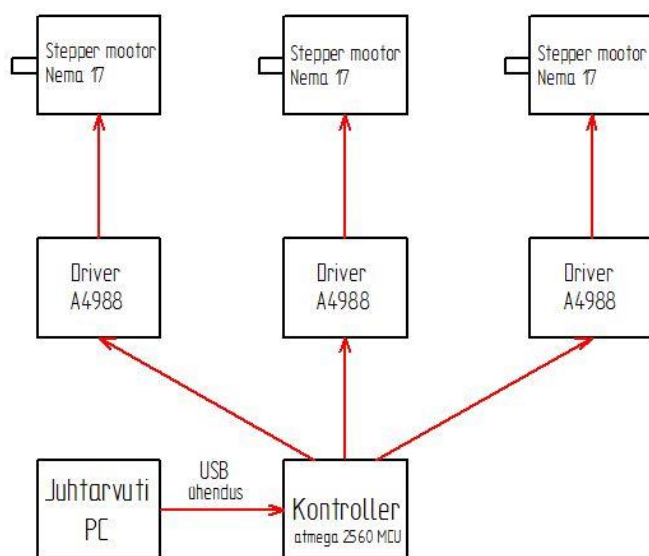
Joonis 18. Katse 1 Mähis 1 Mähiste vahe 5 mm Magnetvälja tiheduse jõujooned metallalusplaatidega



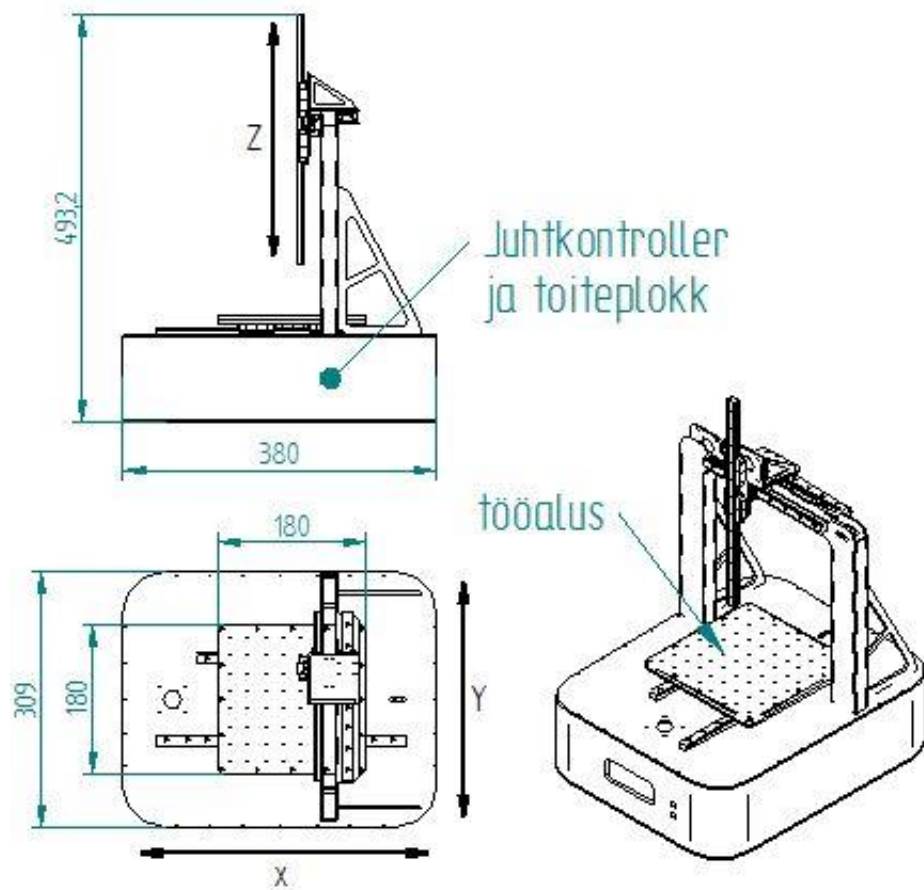
Joonis 19. Katse 1 Mähis 1 Mähiste vahe 5 mm Magnetvälja tiheduse jõujooned ilma alusmetallplaatideta

9. CNC MASINA KONSTRUKTSIOON JA KOMPONENDID

Esmakatsetuste jaoks kasutati olemasolevat kolmes teljes liikuvat CNC platvormi, mis liigub vajalikult kolmes teljes x, y ja z. CNC masina raam on valmistatud roostevabast terases. Masina liikuva tööaluse materjaliks on 6000 seeria alumiinium ja tööaluse mõõtmed on 180 mm x 180 mm. Kuuljuhikud Hiwin 9 tagavad CNC masina täpsusklassi ± 0.05 mm. Masinat liigutatakse stepper mootoriga Nema 17 (mudel 42SHD0404-22). Mootorite positsioneerimisjõud on 52 N/cm, mis on piisav teostamiseks kiirliikumisi mõõteprotsessis. Mootoreid juhitakse Arduino Mega platvormiga, millel on kontrolleri Atmega2560 MCU. Mootori driverid on A4988. Graafiline seadme juhtskeem on joonisel 20. Arduino Mega on kontrolleriplatvorm, mida kasutatakse paljude prototüüpseadmete juhtimiseks soodsa hinna ja lihtsuse tõttu. Seadme telgede liikumisulatus on X150, Y150, Z150 mm, mis on katsete läbiviimiseks piisav. Seadme gabariitmõõtmed on toodud joonisel 21. Lisaks projekteeriti seadmele vastav kinnitusdetail mõõtemähise kinnitamiseks.



Joonis 20. CNC masina juhtskeem



Joonis 21. Mõõtemasina CNC konstruktsioon

10. PROTOTÜÜPSEADME JUHTTARKVARA KIRJELDUS

Juhttarkvara on kirjutatud Pythonis [16]. Python on programmeerimisplatvorm, kus on võimalik luua vähese ajakuluga katseteks vajalik programm. Pythonis programmi loomisel on abiks suur hulk eelnevalt kasutajaskonna poolt loodud programmimoduleid, mis on korrektselt dokumenteeritud. Probleemide ja küsimuste tekkimisel programmi kirjutamisprotsessi käigus on võimalik abi saada teistelt Pythoni kasutajatelt. Pythoni miinuspoolena võib välja tuua selle mitesobivuse ajakriitilisteks protsesside haldamiseks, kuna ta on interpreteeriv programmeerimiskeel (instruktsioonid tõlgendatakse eelnevalt kompileeritud alamosadeks, tõlkimata koodi masinkoodiks).

Seadmete võrdluses välja toodud Singapuri ülikoolis väljatöötatud laboriseade kasutab vabavarana saadaval olevat programmi ChipScan. Algselt kaalutleti antud töös ka ChipScani kasutamist, kuid selgus, et programm on loodud ainult mikrokiipide lähivälja skaneerimiseks.

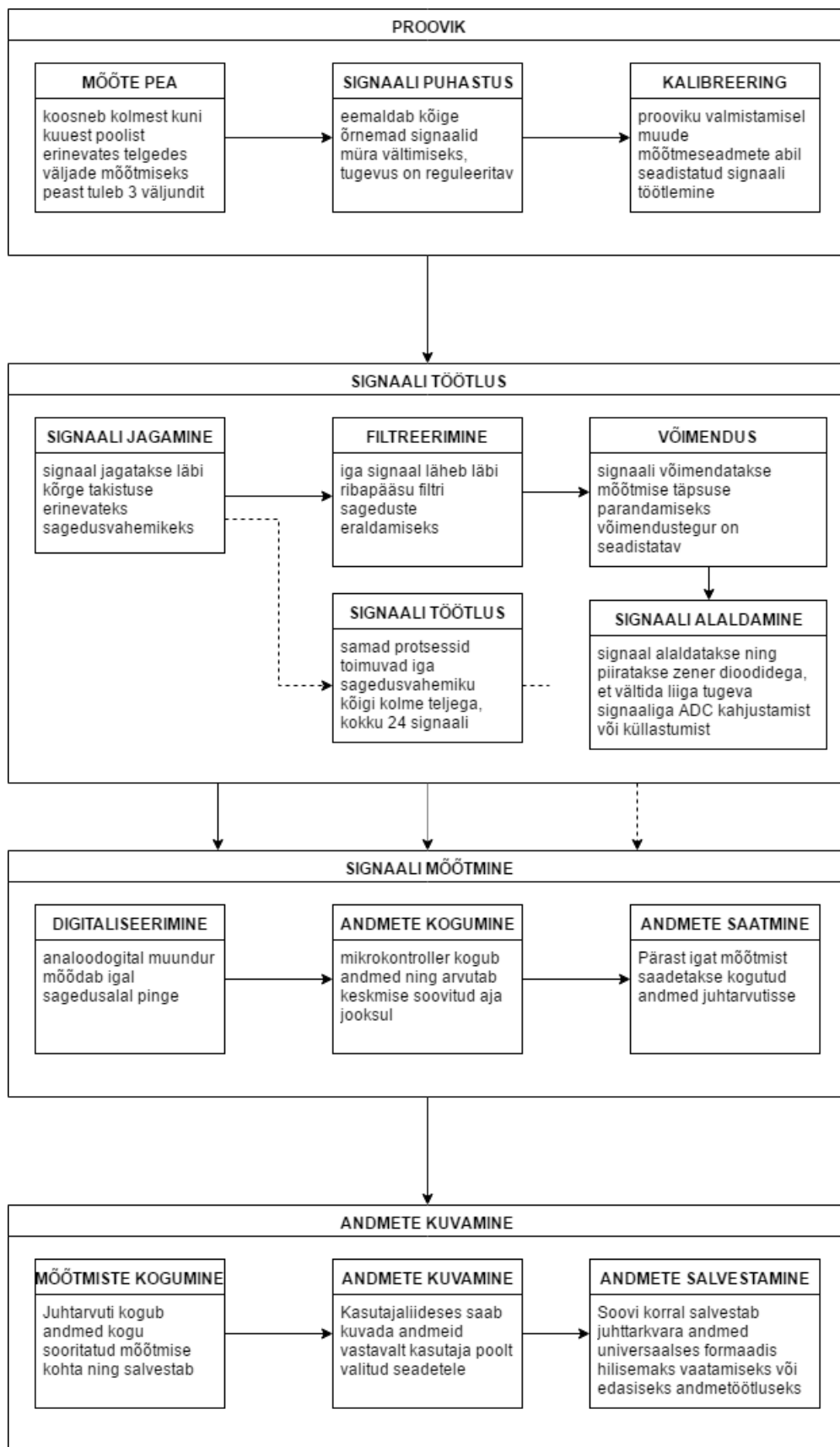
Eesmärgiks sai seatud võimalikult lihtsalt adapteeritava programmi loomine, mida saaks vajadusel ka muuta töötamaks uute või teist tüüpi seadmetega. Pigem on esikohal mõõtetulemuste saamine ja salvestamine. Juhttarkvara saadab mõõteseadme arvutile ainult koordinaatteljestiku parameetrid ja mõõtetingimuste andmed ja vastu võtab vaid veateateid ja mõõtetulemusi salvestamiseks ja visualiseerimiseks (kuvamiseks kasutajale). Esialgseks ülesande lihtsustamiseks ei ole hetkel vaadeldud mõõtetulemuste töötlemise tarkvarasid, pigem kasutame selleks vastavalt soovile/vajadusele tabelarvutustarkvara, kuna andmed salvestatakse csv formaadis, mida suudavad lugeda kõik peamised andmetöötlustarkvarad.

Katse sooritamisetapid :

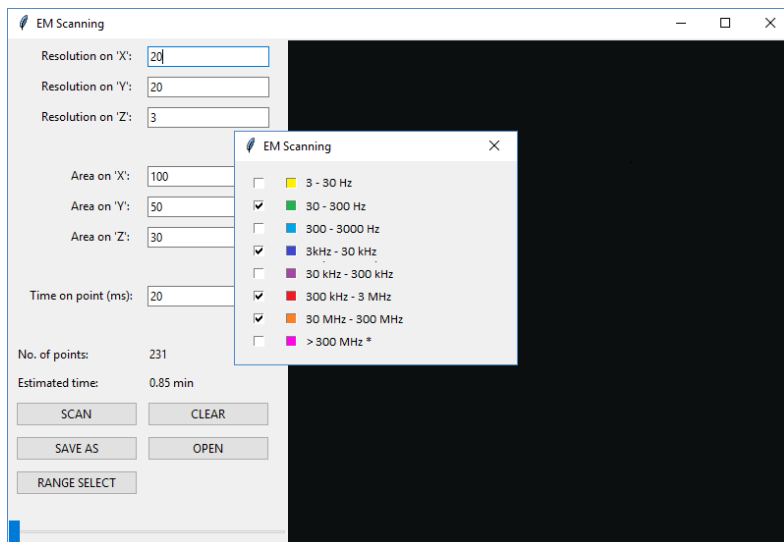
- I. Mõõdetav objekt (trükkplaat) paigutatakse mõõtmisseade tööalasse.
- II. Seadme juhtimiseks loodud programmis määratakse mõõteala suurus ning lugemite arv: pikkuses, laiuses ja kõrguses.
- III. Juhtprogrammist valitakse ühe mõõtmise ajaline pikkus, ajaliselt pikem mõõtmine annab täpsema tulemuse, kuid pikendab mõõtmisprotsessi koguaega.
- IV. Katse mõõtmine käivitatakse seadme arvutile alustuskäsu saatmisega ning edasi sooritab seade mõõtmised autonoomselt, tuginedes juhtprogrammis kasutaja poolt etteantud parameetritel.
- V. Mõõtmisprotsessi lõppedes andmed salvestuvad.

Pärast mõõtmiste lõppu saab andmed salvestada. Võimalus on ka vaadata mõõtetulemusi otse programmist. Selleks tuleb valida huvipakkuvad sagedusvahemikud ning kõrgus. Andmeid näidatakse kasutajaliideses vastavalt legendile värvides, mis vastavad eri väljatugevustele (Joonis 23 ja Joonis 24). Tarkvara suhtleb mõõteseadmega USB ühendusel virtuaalse COM-port teel.

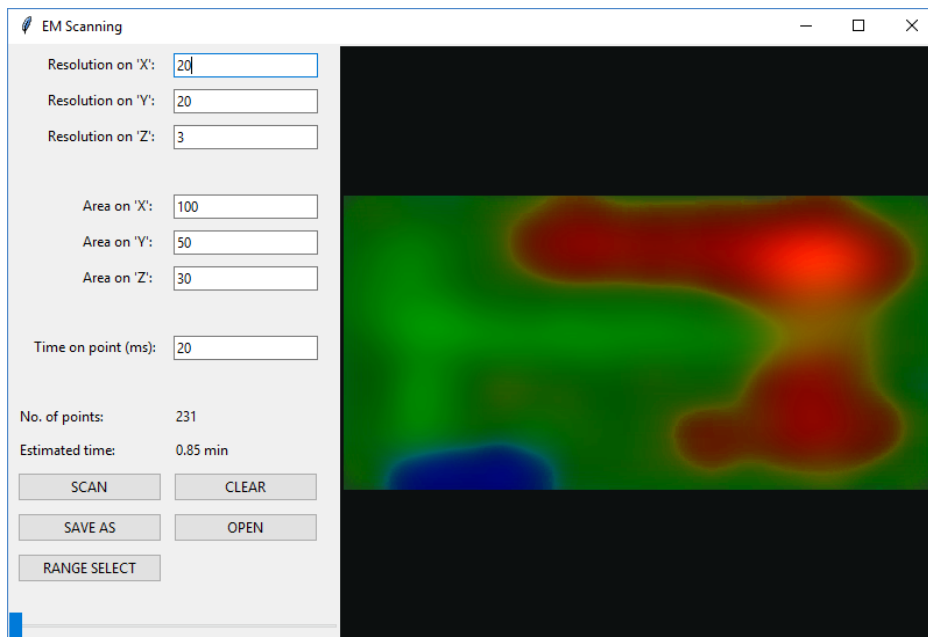
Plokkskeemis Joonisel 22 on välja toodud mõõteahela toimimisjärjestus alates proovikust kuni andmete kuvamiseni. Prototüüpseadme proovik koosneb kolmest mõõtemähisest, mille signaalid töödeldakse, seejärel mõõdetakse saadud väärtused ja salvestatakse programmi. Signaalitöötlus hõlmab endas signaali jagamist läbi kõrge takistuse erinevateks signaalivahemikeks, seejärel liigub signaal läbi ribapääsufiltri sageduste eraldamiseks. Signaali võimendatakse mõõtmistäpsuse suurendamiseks ja võimendustegur on seadistatav vastavalt vajadusele. Seejärel signaali alandatakse ja piiratakse zener-diodiga, et vältida liiga tugeva signaaliga ADC kahjustamist või küllastumist. Saadud signaali mõõdab analoog-digital muundur, misjärel mikrokontroller kogub andmed ja arvutab keskmise väärtuse. Pärast igat mõõtmist saadetakse saadud tulemus juhtarvutisse. Juhtarvutis olevas kasutajaliideses on võimalik andmeid vaadelda või siis andmeid väljastada töötluks mõne teise andmetöötlusprogrammi tarbeks.



Joonis 22. Prototüüpseadme mõõteahela loogikaskeem



Joonis 23. Sagedusvahemike seos kuvatava pildi (mõõtetulemuse) värvidega juhtarvuti kasutajaliideses



Joonis 24. Mõõtetulemuse kuvamine programmis vastavalt magnetvälja tugevusele

11. ELEKTROMAGNETILISE LÄHIVÄLJA MÕÕTMISKATSED LABORITINGIMUSTES

12.1. Elektromagnetlähivälja katsemõõtmiste kirjeldus

Katsemõõtmiste teostamiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse laboris olemasolevaid katseseadmeid. Katseseadmete tehnilised parameetrid sobisid ja olid piisavad katsete läbiviimiseks. Programmeeritav lainekuju/funktsioonigeneraator oli Rigol DG5252, EMI test-ressiiver Rohde & Schwarz ESL6 ja Tektronix proovik 3Z80. Seadmete tehnilised parameetrid on ära toodud tabelites 5, 6 ja 7.

12.2. Katses kasutatud seadmed:

Tabel 5. Programmeeritav lainekuju/funktsioonigeneraator [17]


Programmeeritav lainekuju/funktsioonigeneraator Rigol DG5252



Joonis 25. Programmeeritav lainekuju/funktsioonigeneraator Rigol DG5252

Tehnilised parameetrid:	Lainekujud:
<ul style="list-style-type: none"> • Kanalite arv 2 • Sagedus < 150 MHz • Diskreetimissagedus 1 GSa/s • Eraldusvõime 1 μHz • Amplituud 5 mV ... 10 V (50 Ω) 10 mV ... 20 V (tühijooks) • Resolutsioon 14 bit 	<ul style="list-style-type: none"> • Siinus • Kandiline • Tõusev • Impulss • Müra • Sinc • EkspONENT • ECG • Gauss • HaverSine • Lorentz • Dual-Tone • DC

Tabel 6. EMI test-ressiiver [18]

EMI test-ressiiver Rohde & Schwarz ESL6	
	
<p>Joonis 26. EMI test-ressiiver Rohde & Schwarz ESL6</p>	
<p>Tehnilised parameetrid:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Impedants 50 Ω • Pistikutüüp N-emane • Sagedusvahemik 9 kHz ... 3 GHz • Resolutsioon 1 Hz • Sagedusulatus 0 Hz, 10 Hz ... 6 GHz 	
<p>Ülesvõtuaeg:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 μs (0 Hz) • 2.5 ms (10 Hz ... 1.5 GHz) • 5 ms (1.5 ... 3 GHz) • 10 ms (>3 GHz) 	
<p>Filtrid:</p>	

<ul style="list-style-type: none"> • IF 3 db filtrid 10 Hz ... 10 MHz (1/3 sammuga) • EMI 6 db filtrid 200 Hz, 9 kHz, 1 MHz • FFT filtrid 1 Hz ... 30 kHz (1/3 sammuga)
<p>Detektorid:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Max. tippväärtus • Min. tippväärtus • RMS • Keskmine • CISPR-Keskmine (EMI) • CISPR-RMS (EMI) • Kvaasitippväärtus (EMI)
<p>Funktsioonid:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puhas/Otse • Max. hoid • Keskmine • Min. hoid
Mõõtepunkte: 125 ... 210001
Max. alalispinge: 50 V
Max. RF võimsus: 30 dBm (1 W)
Max. RF tippvõimsus: 36 dBm (4 W, <3 s)

Tabel 7. Tektronix proovik 3Z80

Tektronix proovik 3Z80 :	
Tehnilised parameetrid:	
Proovikut on võimalik kasutada kahes eri režiimis korrutatud arvuga 10 või 1	
X1	X10
200 MHz	6 MHz
10 MΩ	1 MΩ

Katses kasutatud Tektronix prooviku kalibreerimine

- Signaaligeneraatori väljund oli 50 Ω
- ESL6 sisend oli 50 Ω
- Juhe 50 Ω
- Prooviku takistus 1 MΩ

Kalibreerimise KATSE 1 (ideaalse juhtmega 50 Ω)

- Signaali väljund 100 mV P-P, amplituud 50 mV
- Mõõdeti keskmist väljundit, tulemus 31,93 mV - peaaegu ideaalse juhtmega

Kalibreerimise KATSE 2 (proovik)

- Signaali väljund 100 mV P-P, amplituud 50 mV
- Mõõdeti keskmist väärtust 8,72 mV

Tektronix prooviku sumbuvus K on arvatud valemis (8).

$$K = \frac{31,93 \text{ mV}}{8,72 \text{ mV}} = 3,662 \quad (8)$$

12.3. Elektromagnetilise lähivälja mõõtmiskatsed laboris

Elektromagnetilise lähivälja mõõtmiskatses laboritingimustel kasutati ülalmainitud laboriseadmeid: programmeeritav lainekuju/funktsioonigeneraator Rigol DG5252, EMI test-ressiiver Rohde & Schwarz ESL6 ja Tektronix proovik 3Z80. Katsekehad olid kinnitatud kolmeteljelise CNC masina külge, tänu millele õnnestus mõõteproovikut vastavalt soovile ja vajadusele liigutada.

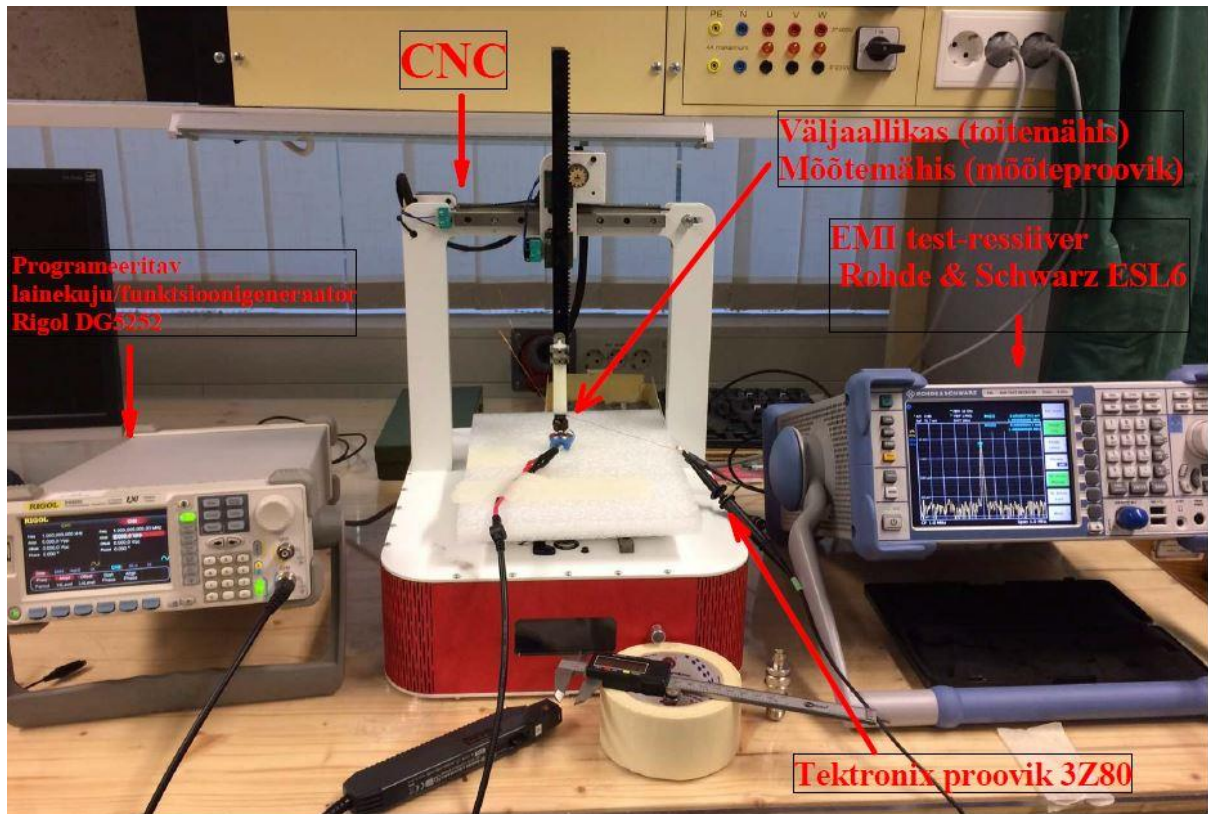
Mõõtmaks lähivälja kasutati magnetvälja allikana mähist. Mähise kasuks otsustati, kuna mähise genereeritud magnetvälja on võimalik täpselt kirjeldada programmis *Comsol Multiphysics*. Trükkplaadil genereeritavate magnetväljade kirjeldamine oleks palju komplitseeritum, kui mitte isegi võimatu. Seetõttu otsustasime kasutada mähist, mille algparameetrid olid teada (mähise parameetrid toodud Tabelis 8).

Tabel 8. Magnetvälja genereeriva mähise parameetrid

	Välis diameeter	Sise diameeter	Mähise kõrgus	Keerdude arv	Traadi läbimõõt	Traadi materjal
Katse mähis	20,7 mm	12 mm	0,6 mm	470	0,063 mm	Vask

CNC masina töölauale aetasime katseks mähise (väljaallika), mille sisendklemmidele pandi peale toitepinge 5 Vpp sagedusega 1 MHz signaaligeneraatorist Rigol DG5252.

Lähiväljamõõteproovik ühendasti Rohde & Schwarz ESL6 spektrianalüsaatoriga, kasutades selleks Tektronixs proovikut 3Z80. Katseseadmete ühendusskeemi on toodud joonisel 27.



Joonis 27. Mõõteseadme paiknemisskeem laboris

Katsed viidi läbi kõigi kolme mõõtemähisega, liigutades mõõtemähiseid 5mm sammuga väljaallika suhtes. Mõõtemähis asetati väljaallika tsesentrisse. Mõõtmist alustati Mähisest 1. Mähise 1 ja väljaallika kaugus teineteisest oli 5 mm. Järgnevalt teostati mõõtetulemuste salvestamine ja liigutati mõõtemähis 10 mm kaugusele väljaallikast. Jällegi teostati mõõtmine ja mõõtetulemuste salvestamine, liigutades mõõtemähise 15 mm kaugusele väljaallikast. Samasugused protseduurid ja andmete salvestamine viidi läbi ka järgi jäänud kahe teise mõõtemähisega.

Võrdlemaks *Comsol Multiphysics* 5.2 ja laboris saadud mõõtetulemusi tuleb arvesse võtta laboris kasutatud ühendusjuhtme (prooviku) sumbuvustegurit K, mille väärtuse saime teada ühendusjuhtme kalibreerimisega Tallinna Tehnikaülikooli

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse laboratooriumis. K väärtus on $K=3,662$.

See tähendab, et kõik laboris mõõdetud tulemused tuleb läbi korrutada 3,662-ga, et saaks võrrelda tulemusi *Comsol Multiphysics 5.2* saadutega.

Tabel 9. Mähis 1 Katse 1

Mähis 1 Katse 1		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaal: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1=5\text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaal</p> <p>Väljundsignaal: Väljundpinge $U_2=9,67\text{ mV}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 5 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p>

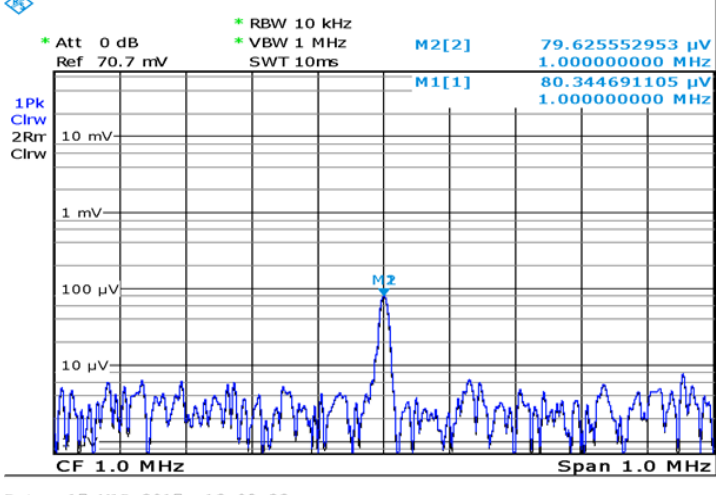

Tabel 10. Mähis 1 Katse 2

Mähis 1 Katse 2		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaal: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaal</p> <p>Väljundsignaal: Väljundpinge $U_2 = 3,62 \text{ mV}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 10 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p>

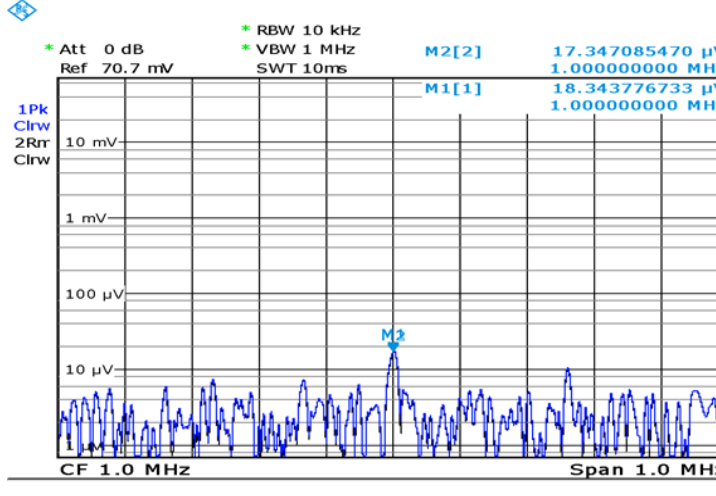

Tabel 11. Mähis 1 Katse 3

Mähis 1 Katse 3		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaal: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaal</p> <p>Väljundsignaal: Väljundpinge $U_2 = 2,36 \text{ mV}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 15 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p>

Tabel 12. Mähis 2 Katse 1

Mähis 2 Katse 1		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaali: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaali</p> <p>Väljundsignaali: Väljundpinge $U_2 = 80,34 \mu\text{V} - \text{RMS}$ Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 5 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p> 

Tabel 13. Mähis 2 Katse 2

Mähis 2 Katse 2		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaali: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaali</p> <p>Väljundsignaali: Väljundpinge $U_2 = 18,34 \mu\text{V} - \text{RMS}$ Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 10 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p> 

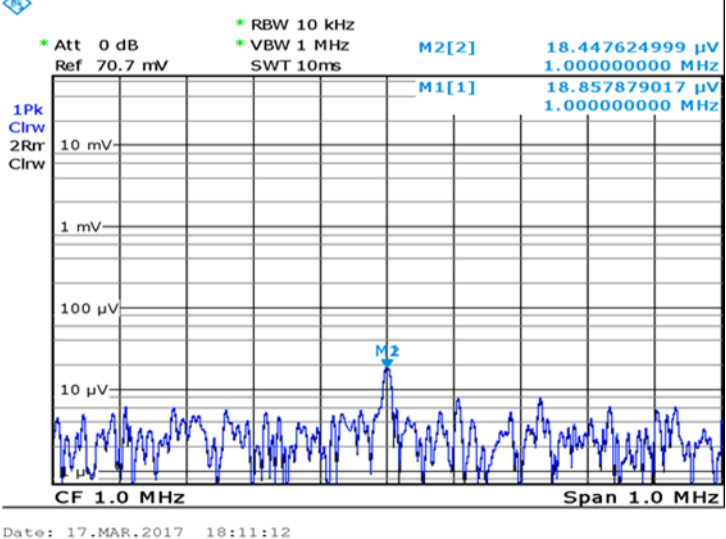

Tabel 14. Mähis 2 Katse 3

Mähis 2 Katse 3		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaali: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaali</p> <p>Väljundsignaali: Väljundpinge $U_2 = 16,83 \mu\text{V}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 15 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p>

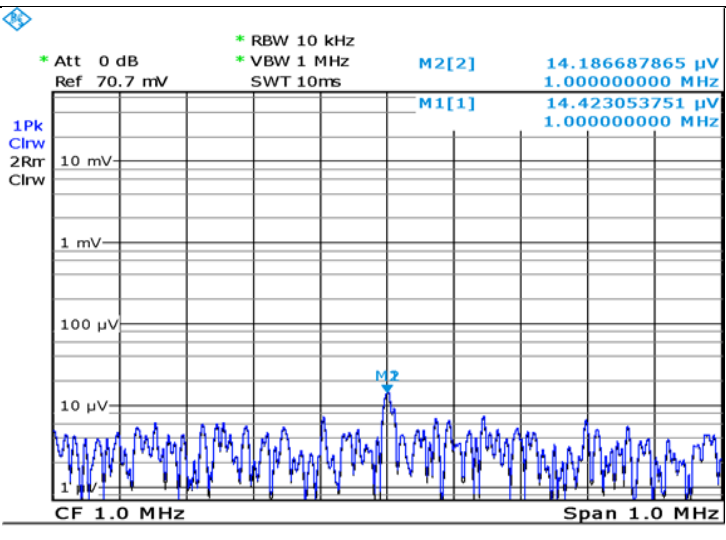
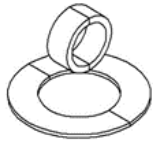
Tabel 15. Mähis 3 Katse 1

Mähis 3 Katse 1		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaali: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaali</p> <p>Väljundsignaali: Väljundpinge $U_2 = 19,87 \mu\text{V}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>		<p>Kahe mähise vahe 5 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p>

Tabel 16. Mähis 3 Katse 2

Mähis 3 Katse 2		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaali: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaali</p> <p>Väljundsignaali: Väljundpinge $U_2 = 18,85 \mu\text{V}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>	 <p>CF 1.0 MHz Span 1.0 MHz Date: 17.MAR.2017 18:11:12</p>	<p>Kahe mähise vahe 10 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p> 

Tabel 17. Mähis 3 Katse 3

Mähis 3 Katse 3		
Andmed	Graafik mõõteseadme ekraanilt	Mähiste asendi skeem teineteise suhtes
<p>Sisendsignaali: Sagedus 1 MHz Sisendpinge $U_1 = 5 \text{ Vpp}$ Amplituut 2,5 Siinussignaali</p> <p>Väljundsignaali: Väljundpinge $U_2 = 14,42 \mu\text{V}$ – RMS Sagedus 1 MHz</p>	 <p>CF 1.0 MHz Span 1.0 MHz Date: 17.MAR.2017 18:12:41</p>	<p>Kahe mähise vahe 15 mm. Ülemine mähis on mõõtemähis. Alumine mähis on toitemähis.</p> 

Järeldus:

Esimeses katsevoorus Mähisega 1 tehtud Katse 1 (tabelid nr 9, 10 ja 11) tulemustest võib järeldada, et mõõtemähises indutseeritav väljundpinge on otseses sõltuvuses väljaallika ja mõõtemähise vahekaugusest. Sama selgus ka *Comsol Multiphysics* programmiga katset modelleerides. Mida suuremaks muutub vahekaugus, seda vähem indutseeritakse väljundpinget U₂. Tabeli 9 ja Tabeli 10 võrdlemisel on näha, kuidas mõõtemähise ja väljaallika vahe suurenemisel 5 mm võrra väheneb väljundpinge U₂ peaaegu kolm korda. Katses 2 (tabelid 12, 13 ja 14) on samuti näha, et mõõtemähise ja väljaallika omavahelisest kaugusest sõltub indutseeritav väljapinge. Mähist 1 ja Mähist 2 võrreldes on näha, et väljaallika ja mõõtemähise vahekauguste muutusel tekkis suur langus väljundpinges U₂ Mähisel 2.

Kui võrrelda tabelitest Mähist 2 ja Mähist 3, on näha, et gabariitmõõtmetelt väiksemas Mähises 3 ei teki mõõtemähise ja väljaallika vahekauguse muutudes enam nii suurt väljundpinge langemist.

Korrutades labori mõõtetulemused prooviku (Tektronix proovik 3Z80) sumbuusteguriga K= 3,662, saame võrrelda tulemusi programmis *Comsol Multiphysics* 5.2 läbiviidutega.

Comsol Multiphysics 5.2 teostatud katsete modelleerimistulemuste võrdlemisel laboritingimustes tehtud katsetega selgub, et mõõtetulemuste omavaheline viga on 25,3% .

Vea arvutamine (9) (10) (11):

(9)

$$\frac{a \cdot 100\%}{b} = x$$

kus a-Labori mõõtetulemus korrutatud sumbuusteguriga K

b-*Comsol Multiphysics* mõõtetulemus

x- protsendiline kahe mõõtetulemuse erinevus

(Andmed võetud Mähis 1 Katse 1 mõlemast mõõtmis katsest nii *Comsol Multiphysics* 5.2 kui ka laborikatsest)

$$a = 9,67 \cdot 3,662 = 35,5 \quad (10)$$

$$x = \frac{35,5 \cdot 100\%}{47,5} = 25,3\% \quad (11)$$

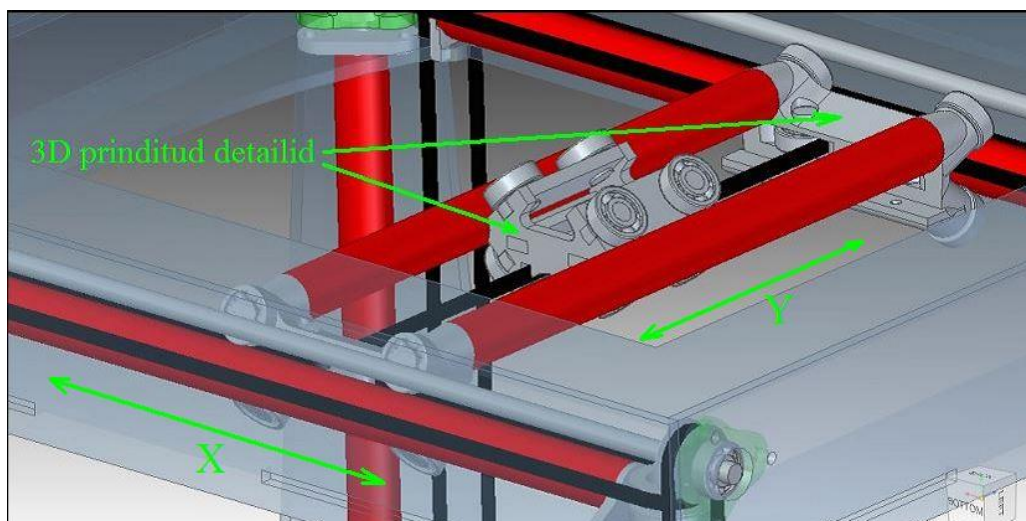
Mõõtetulemuste omavahelise vea suuruse 25,3% võivad põhjustada mitmed tegurid:

- halb kontakt mõõtemähise ja EMI test-ressiiver vahelise juhtme klemmidel
- häiringud mõõtmiste ajal mõõtelabori keskkonnas
- mõõtemähise ebakorrapärasem kuju võrreldes perfektse geomeetrilise kujuga CAD joonisel, mis sisestati Comsol mõõtetarkvarasse
- mähistsentrite omavahelise telgsuse halve

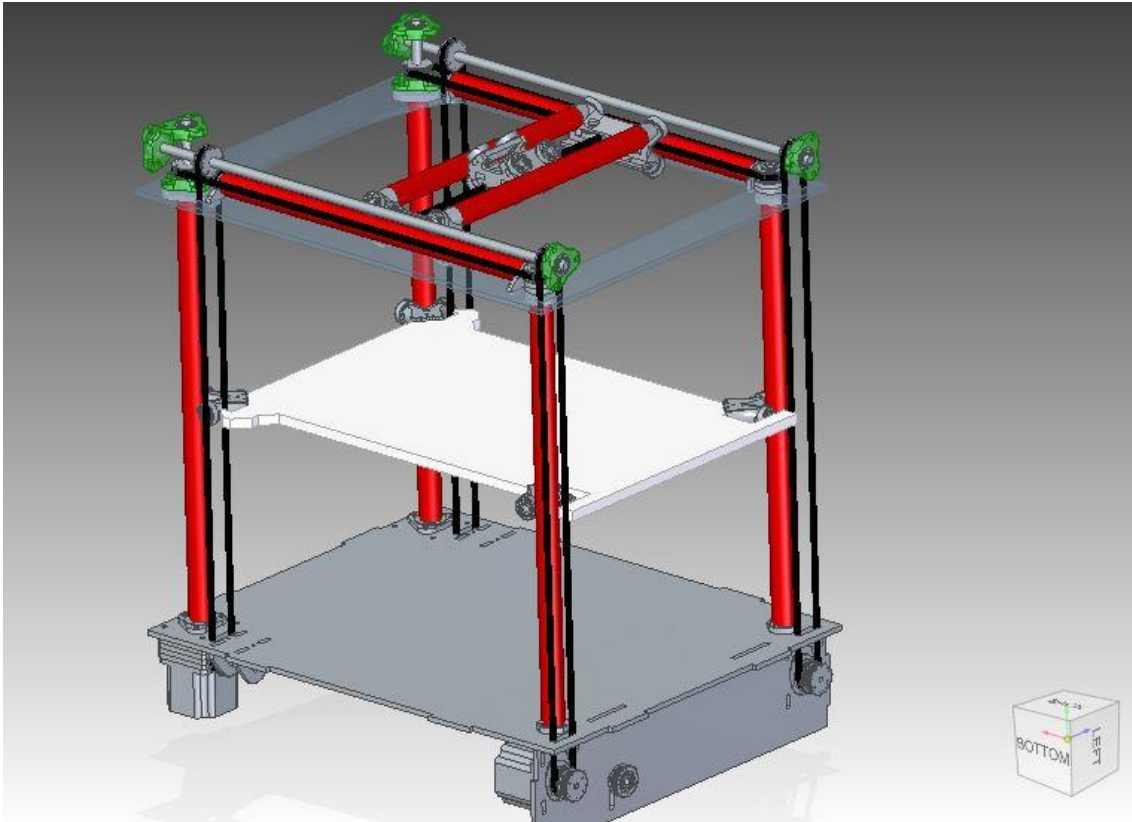
Laboratoorsete katsete ja arvutis mõõdetud tulemuste erinevus oli 25,3 %, mis on uurimistöo lubatud piirides. Võib väita, et elektromagnetlähivälja mõõtemetoodika on rakendatav antud seadmel.

12. TULEVIKU ARENDUSTEGEVUSED

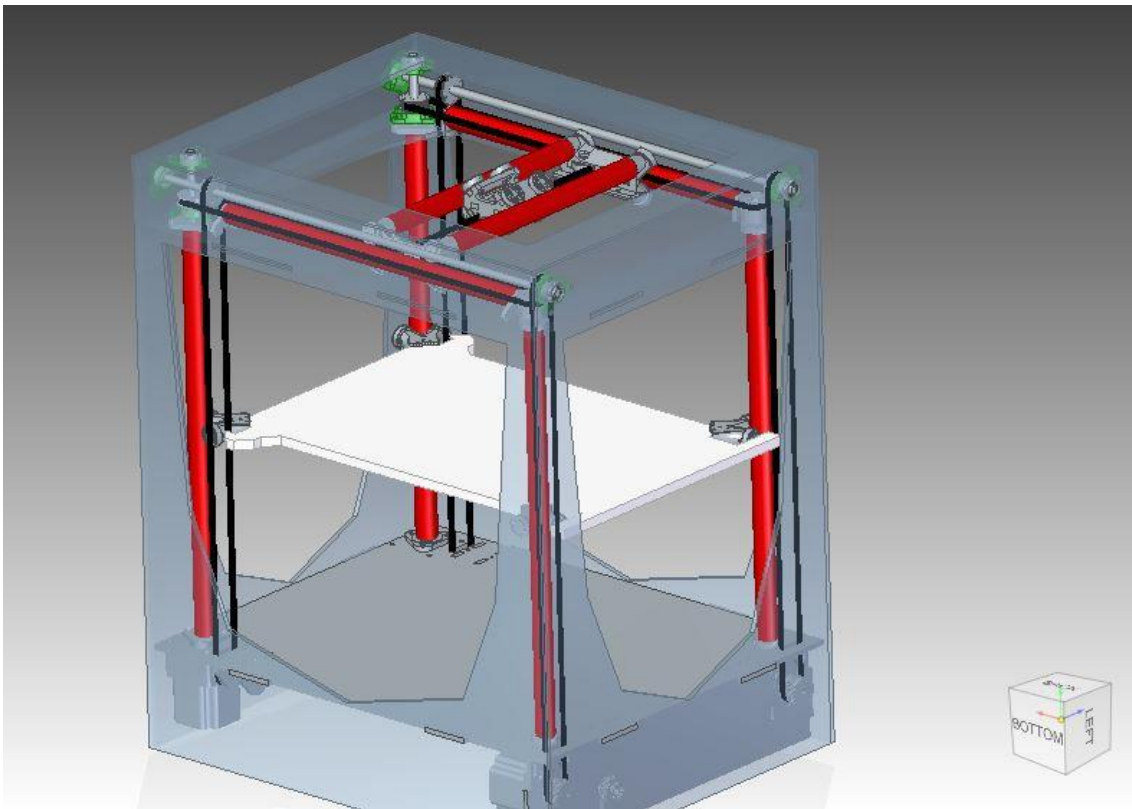
Arendustöö jätkub. Liigutakse edasi mõõteseadme mõõteprooviku arenduse ja katsetustega. Samaaegselt on valmimas ka CAD mudel uuest mõõteseadme konstruktsioonist. Mõõteseadme raami konstrueerimisel on võetud eesmärgiks mõõteala läheduses mitte kasutada magneetivaid materjale. See tähendab, et seadme mõõteproovikust raadiusega 150 mm ei leidu ühtegi ferromagnetilist materjali. Mõõteseadme tööaluse mõõtmed on hetkel planeeritud 300 mm x 400 mm. Uut seadme raami on näha joonistelt 29 ja 30. Jooniselt 29 on näha, et uuel seadmel kasutatakse üles ja alla liikuvat töölauda, mis annab võimaluse teostada mõõtmisi ka suuremagabariidiliste seadmetega. Jooniselt 28 on näha seadme Y-telje ülesehitus. Y-telg on projekteeritud võimalikult kergeks, et liikuvat massi, mis tekitab vibratsioone oleks minimaalselt. Y-telje keerukad koostedetailid on võimalik 3D printida Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudi laboratooriumis laserpaagutusmeetodil printeriga EOS Formiga P100. [19]



Joonis 28. Projekteeritava mõõteseadme Y-telje süsteem



Joonis 29. Arendatav mõõteseadme konstruktsioon ilma ümbriskorpusega

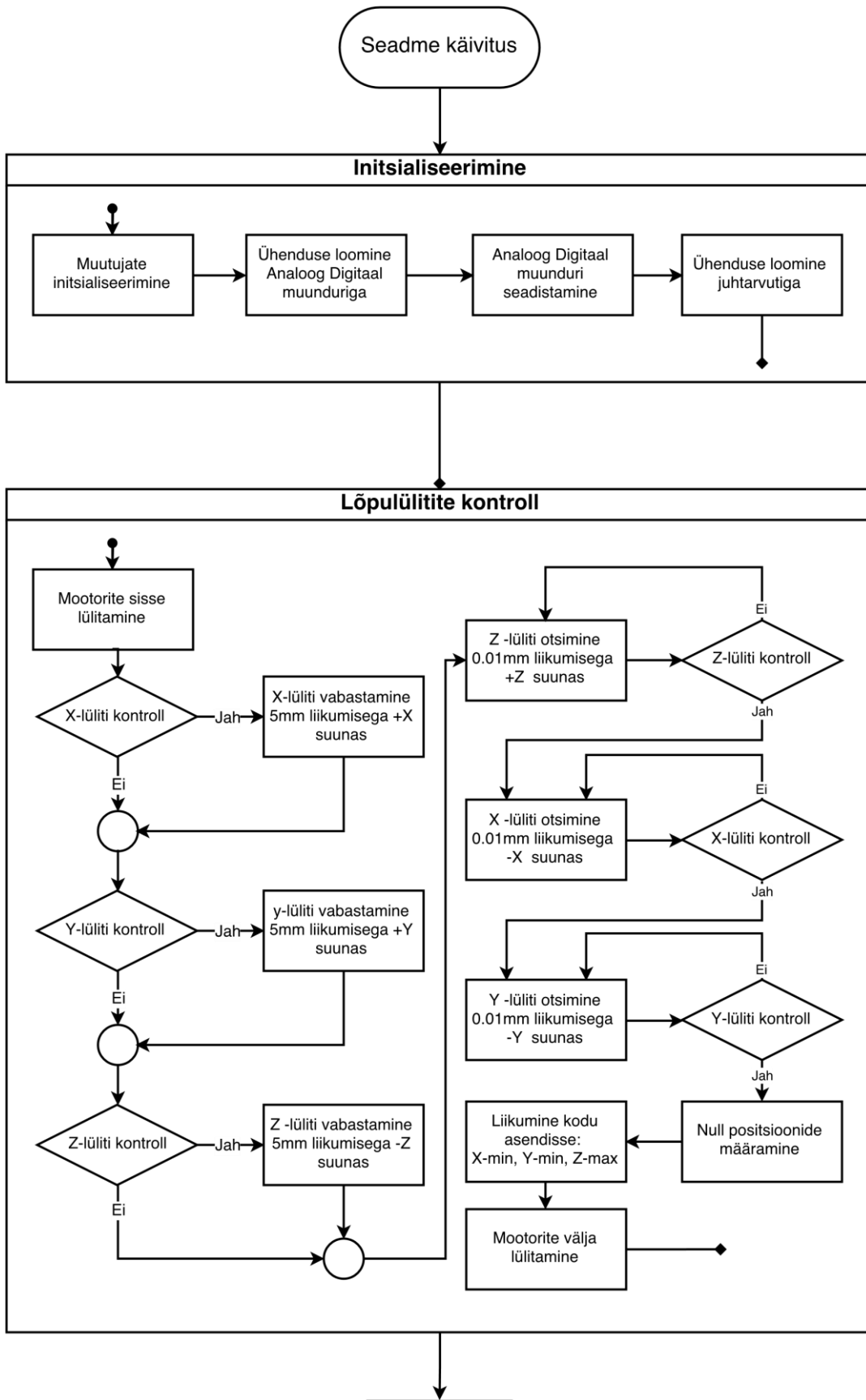


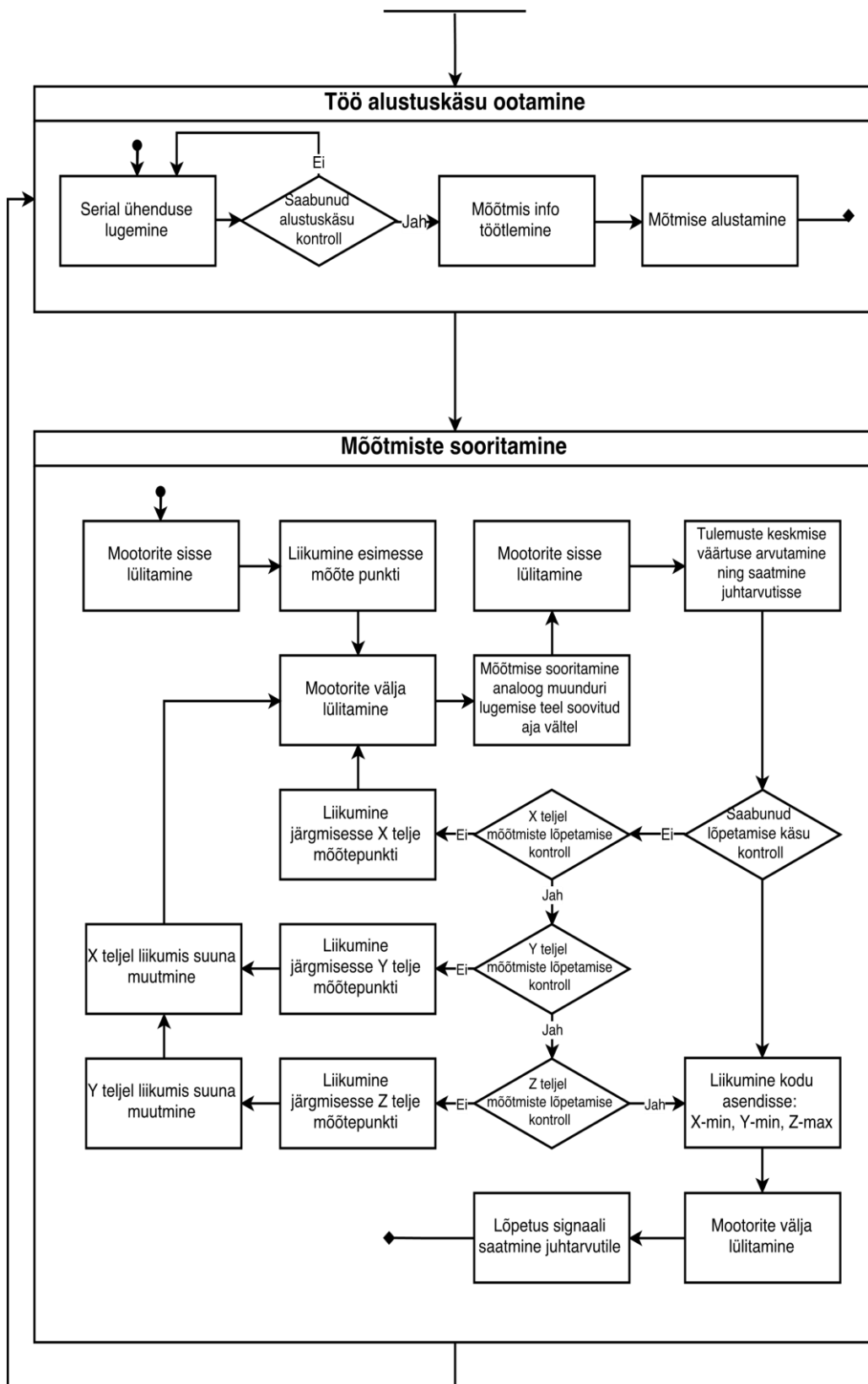
Joonis 30. Arendatav mõõteseadme konstruktsioon koos ümbriskorpusega.

Mõõteseadme toimimisalgoritmi selgitus (joonisel 31):

- Initsialiseerimine – Määratakse muutujate algväärtused, komponendid ning luuakse ühendus juhtarvutiga.
- Lõpulülitite kontroll – Tulenevalt seadme absoluutse positsioneerimise puudumisest tuleb igal käivitusel leida telgede nullasendid masinal olevate lõpulülitite abil.
- Töö alustuskäsu ootamine – Pärast käivitust ootab seade alustuskäsku, millega saadetakse ka info mõõteala ning resolutsiooni kohta.
- Mõõtmiste sooritamine – Mõõtmine toimub sirgjoontena vastavalt X, Y ja Z telje sihiliselt, kui X teljes toimuvad mõõtmised on lõppenud, liigub seade järgmise Y telje reani ning liigub tagasi X teljele mõõtmisi tehes (samalaadselt toimib ka Z teljel). Mõõtmiste ajaks lülitatakse mootorid välja, et vältida soovimatu signaali tuvastamist.
- Pärast mõõtmise lõpetamist läheb seade tagasi algolekusse ning ootab uue alustuskäsu saatmist.

Mõõteseadme arendamine Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse laboris jätkub.





Joonis 31. Arendatava mõõteseadme toimimisalgoritm

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja arendada elektromagnetlähivälja mõõteseade Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse labor tarbeks.

Arvestades valdkonna spetsiifikat, siis esimeses peatükis selgitati, mis taolist masinat tarvis oleks, ja võrreldi turul olevaid seadmeid mõistmaks nende ehitust ja standardiklasse. Peatükist selgus, et lähivälja mõõteseadmeid toodavad mõned üksikud firmad maailmas ja enamasti valmistatakse mõõteseade vastavalt tellija erisoovidele. Nagu ka turu-uuringust selgus, algavad mõõteseadmete hinnad 40 000 tuhandest eurost.

Patendiotsingust selgus, et lähivälja mõõteseadmeid on küll varasemalt ehitatud ja mõned neist on ka patentitud, kuid sellist mõõteseadet, mis on valmistatud elektromagnetilise ühilduvuse labori tarbeks, pole varem loodud.

Mõõtesüsteemi väljatöötamist alustati mõõteprooviku disaini arendusega, millele järgnes mõõteprooviku keha projekteerimine ja mähkimine. Passiivproovik koosneb kolmest koondtsentrilisest solenoidmähisest, mis on paigutatud 90-kraadiste nurkade all kolmele ristuvale tasandile.

Veendumaks mõõteteeoorias, viidi kõigepealt läbi katsed programmis Comsol Multiphysicsis 5.2, kus oli võimalik modelleerida mähistes tekkivaid magnetvälju, saamaks võrdlusmaterjali laborikatsetele.

Laborikatsete läbiviimisel kasutati peatükis 9 kirjeldatud CNC masinat, mille Z-telje külge oli kinnitatud mõõtemähis. CNC kasutamine katses andis prooviku liigutamisel

vajaliku täpsuse. Mõõteseadmetest olid kasutusel programmeeritav lainekuju/funktsioonigeneraator Rigol DG5252, EMI test-ressiiver Rohde & Schwarz ESL6 ja Tektronix proovik 3Z80. Laboratoorsete elektromagnetlähivälj katsete ja arvutis mõõdetud tulemuste erinevus oli 25,3 %, mis on uurimistöö lubatud piirides. Niisiis võib väita, et elektromagnetlähivälja mõõtemetoodika on rakendatav.

Elektromagnetilise ühilduvuse valdkonna spetsiifika ja keerukuse tõttu jäävad paljud katsed veel tuleviku arendustöök. Hetkel on valmimisel uus seadmeraami CAD mudel, mille konstruktsiooni võib näha ka uurimustöö viimases peatükis. Suuremahulisemat katsetamist ja parendamist vajab ka seadme juhtprogramm. Töö mõõteseadme arendamisel jätkub.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] D. C. Hedayat, „Systems, Fraunhofer Institute for Electronic Nano,“ Fraunhofer Institute for Electronic Nano Systems ENAS, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.enas.fraunhofer.de/en/departments/ASE/forschungsschwerpunkte/electromagnetic-near-field-measurement-techniques.html>. [Kasutatud 15 01 2017].
- [2] A. A. J.Järvik, Elektromagnetilise ühilduvuse alused, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2008.
- [3] „Peritec,“ Peritec Corporation, 1985. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.peritec.co.jp/product_en/emi_en.html. [Kasutatud 12 04 2017].
- [4] E. E. R. Laboratory, „Electromagnetic Effects Research Laboratory,“ Nanyang Technological University, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.emerl.eee.ntu.edu.sg/aboutUs/Pages/Facilities.aspx>. [Kasutatud 12 04 2017].
- [5] „ICEy - Interference & Compatibility Evaluation System,“ Schmid & Partner Engineering AG, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.speag.com/products/icey/ICEy-overview/>. [Kasutatud 12 04 2017].
- [6] „Eesti Patendiamet,“ Patendiamet, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.epa.ee/et>. [Kasutatud 16 04 2017].
- [7] „Espacenet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ee.espacenet.com/>. [Kasutatud 16 04 2017].
- [8] L. R. D. W. B. P. K. M. F. Zama Afros, „Espacenet,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://ee.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=70&ND=3&adjacent=true&locale=ee_EE&FT=D&date=20110210&CC=US&NR=2011032253A1&KC=A1. [Kasutatud 16 04 2017].
- [9] Y. Yongxiang, Y. Kun, S. Pingping, C. Hong ja Z. Fan, „Espacenet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ee.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=49&ND=3&adjacent=true&locale=>

- ee_EE&FT=D&date=20140409&CC=CN&NR=203535124U&KC=U.
[Kasutatud 18 04 2017].
- [10] S. B. E. S. T. J. Q. L. V. Cécile Labussière-Dorgan,
„Modeling the Electromagnetic Emission of a Microcontroller
Using a Single Model,“
[Võrgumaterjal]. Available:
https://www.academia.edu/22122105/Modeling_the_Electromagnetic_Emission_of_a_Microcontroller_Using_a_Single_Model.
[Kasutatud 21 04 2017].
- [11] International Electrotechnical Commission, [Võrgumaterjal]. Available:
<http://www.iec.ch/about/>. [Kasutatud 22 04 2017].
- [12] „EMI Spectrum Analyzer SPECTRAN NF-3020,“
Aaronia AG, [Võrgumaterjal]. Available:
<http://www.aaronia.com/products/spectrum-analyzers/NF-3020-EMI-Spectrum-Analyzer/>.
[Kasutatud 25 04 2017].
- [13] H. Mölder, Vedelmetalli juhitava segamisvõimaluse uurimine alalisvoolu
kaarleekahjus, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2012.
- [14] „Vikipeedia,“ [Võrgumaterjal]. Available:
https://et.wikipedia.org/wiki/L%C3%B5plike_elementide_meetod.
[Kasutatud 02 05 2017].
- [15] „COMSOL Multiphysics,“ COMSOL, Inc., [Võrgumaterjal]. Available:
<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
[Kasutatud 05 03 2017].
- [16] Python Software Foundation, [Võrgumaterjal].
Available: <https://www.python.org/>.
[Kasutatud 05 02 2017].
- [17] T. Tehnikaülikool, „Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut,“
[Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ttu.ee/instituut/elektroenergeetika-ja-mehhatroonika-instituut/laborid-ja-teenused-12/seadmed-19/toiteallikad-ja-voimendid-3/>.
[Kasutatud 02 04 2017].
- [18] t. Tehnikaülikool, „Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut,“
[Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ttu.ee/instituut/elektroenergeetika-ja-mehhatroonika-instituut/laborid-ja-teenused-12/seadmed-19/iseseisvad-mooteseadmed/esl6-2/>.
[Kasutatud 04 04 2017].
- [19] Mehaanikainseneri Käsiraamat, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.